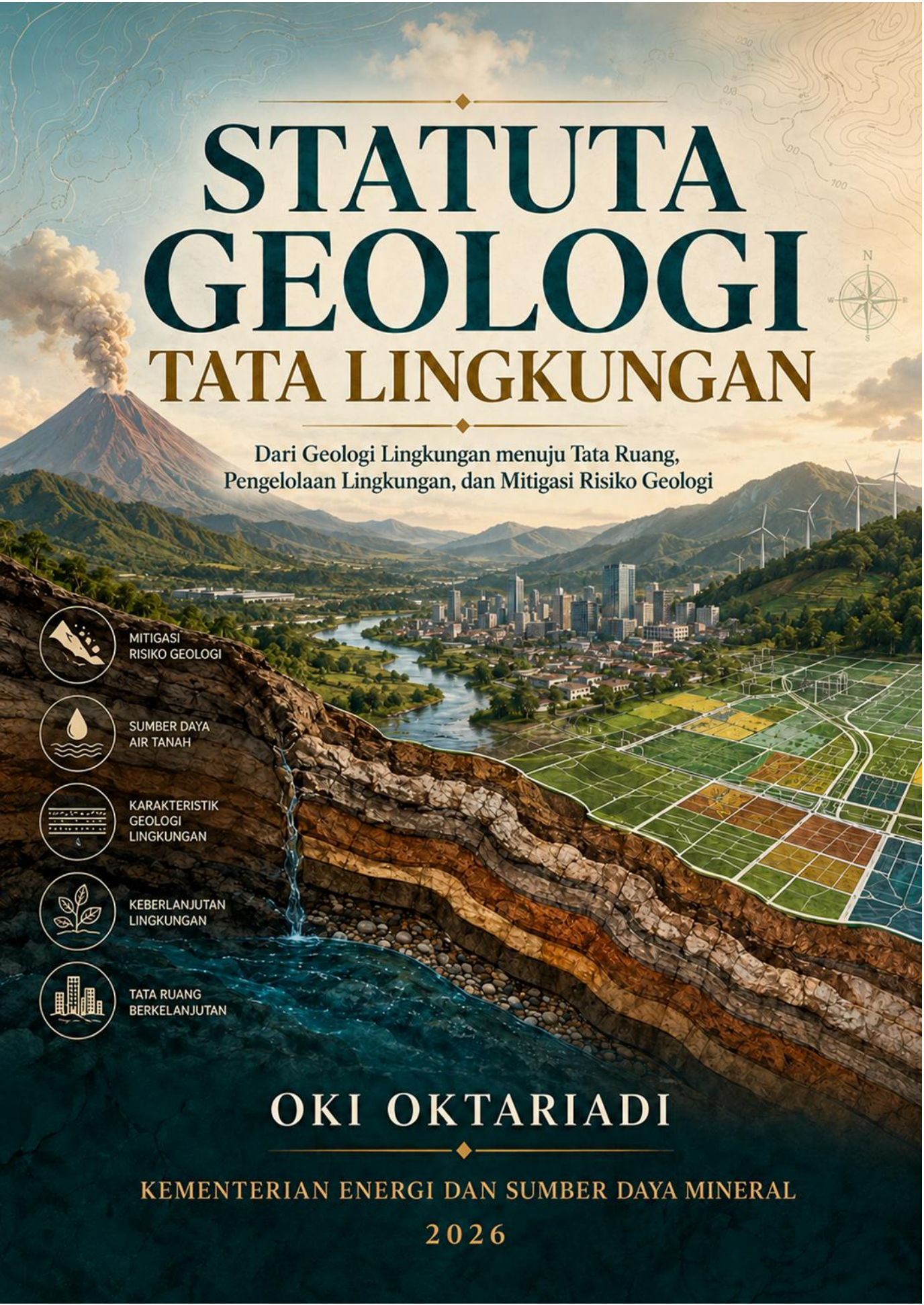
STATUTA GEOLOGI TATA LINGKUNGAN

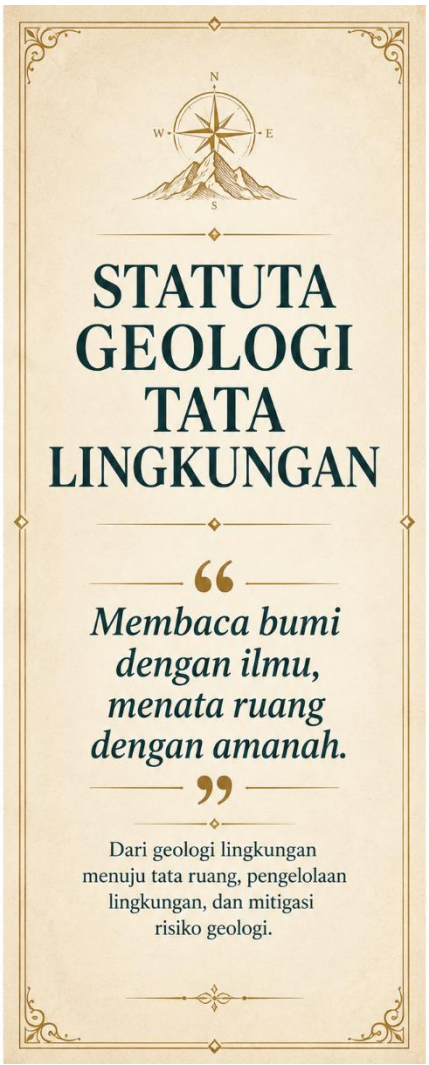
Dari Geologi Lingkungan menuju Tata Ruang,
Pengelolaan Lingkungan, dan Mitigasi Risiko Geologi



OKI OKTARIADI

KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL

2026


N
W
E
S
STATUTA
GEOLOGI
TATA
LINGKUNGAN
“Membaca bumi dengan ilmu, menata ruang dengan amanah.”
Dari geologi lingkungan menuju tata ruang, pengelolaan lingkungan, dan mitigasi risiko geologi.

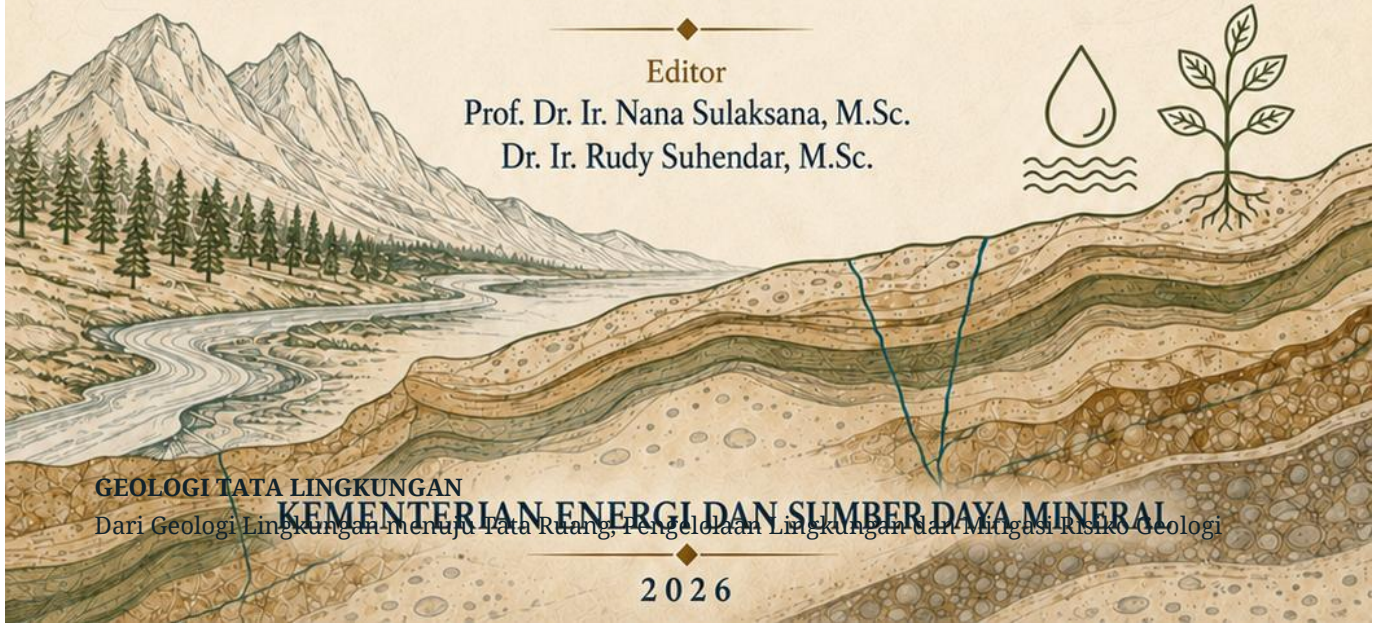
STATUTA GEOLOGI TATA LINGKUNGAN

Dari Geologi Lingkungan menuju Tata Ruang,
Pengelolaan Lingkungan, dan Mitigasi Risiko Geologi

Penulis
Oki Oktariadi

Kontributor
Rustam, Andiani, M. Wachyudi Memed, Tantan Hidayat,
Selasian Gussyak, Dita Arif Yuwana, Kurniah, Rony Afrian,
Giva Havirgus Zahara, Visky Afrida Pungkisari,
Adrikni Wiria Kusumah M, Deni Filanto, Aris Dwi Nugroho,
Eep Ridwan Firdaus, Endrik Susanto, Melia Susana,
Arief Daryanto, Trisno Wardoyo, Rahma Puspa Damayanti

Editor
Prof. Dr. Ir. Nana Sulaksana, M.Sc.
Dr. Ir. Rudy Suhendar, M.Sc.

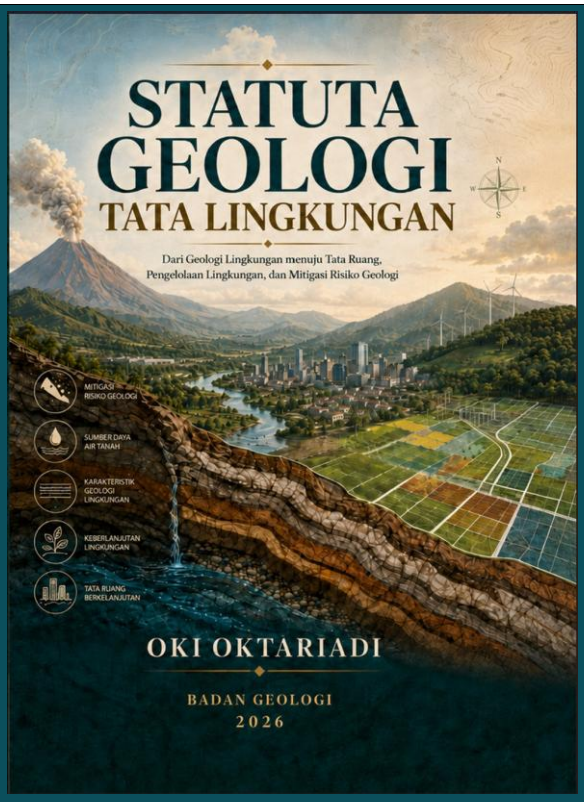


GEOLOGI TATA LINGKUNGAN
KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL
2026

Dari Geologi Lingkungan menuju Tata Ruang, Pengelolaan Lingkungan dan Mitigasi Risiko Geologi

Penulis:
Oki Oktariadi

Kontributor:
Andiani
Rustam
M. Wachyudi Memed
Tantan Hidayat
Selasian Gussyak
Dita Arif Yuwana
Kurniah
Rony Afrian
Visky Afrida Pungkisari
Adrikni Wiria Kusumah M
Deni Filanto
Aris Dwi Nugroho
Eep Ridwan Firdaus
Melia Susana
Arief Daryanto
Trisno Wardoyo
Rahma Puspa Damayanti



Editor:
Prof. Dr. Ir. Nana Sulaksana M.Sc
Dr. Ir. Rudy Suhendar, M.Sc

Ide Foto Sampul
Oki Oktariadi

ISBN: .....
HAK CIPTA @2026 Badan Geologi
PENATA LETAK/ DESAIN JILID
Fadil Muhammad

Undang-Undang RI Nomor 19 Tahun 2002
Tentang Hak Cipta
Ketentuan Pidana Pasal 72:

Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta atau hak terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidanakan dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (Lima Ratus Juta Rupiah).

SAMBUTAN
MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena buku Statuta Geologi Tata Lingkungan: Dari Geologi Lingkungan menuju Tata Ruang, Pengelolaan Lingkungan, dan Mitigasi Risiko Geologi dapat disusun sebagai bagian dari upaya memperkuat peran ilmu kebumian dalam pembangunan nasional.

Indonesia adalah negara dengan kekayaan geologi yang besar, tetapi sekaligus memiliki dinamika kebumian yang harus dikelola secara cermat. Gunung api, gempa bumi, gerakan tanah, kawasan karst, cekungan air tanah, bentang alam pesisir, sumber daya mineral, panas bumi, dan warisan geologi merupakan kenyataan ruang yang perlu dipertimbangkan dalam setiap keputusan pembangunan. Oleh karena itu, pembangunan nasional tidak cukup hanya bertumpu pada pertimbangan administratif, ekonomi, dan sosial, tetapi juga harus memperhatikan daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, dan risiko geologi.

Judul Statuta Geologi Tata Lingkungan memberi tekanan bahwa buku ini memuat kerangka dasar pemikiran, prinsip, metode, dan arah penerapan geologi lingkungan dalam tata ruang, pengelolaan lingkungan, serta mitigasi risiko geologi. Dalam pengertian ini, statuta tidak dimaksudkan sebagai produk hukum baru, melainkan sebagai naskah pemikiran yang menghimpun dasar konseptual, regulatif, dan operasional Geologi Tata Lingkungan agar dapat digunakan secara lebih tertib, konsisten, dan bertanggung jawab.

Saya menyambut baik penyusunan buku ini karena buku ini tidak hanya memuat uraian konseptual, tetapi juga memperlihatkan hubungan antara ilmu geologi, regulasi, peta sintesis, kajian geologi lingkungan, kawasan lindung geologi, pengendalian pemanfaatan ruang, dan pertimbangan teknis. Buku ini diharapkan menjadi rujukan bagi pemerintah pusat, pemerintah daerah, perencana tata ruang, penyusun dokumen lingkungan, akademisi, konsultan, dunia usaha, serta para Fungsional Penyelidik Bumi yang memerlukan dasar ilmiah dalam pengambilan keputusan ruang.

Saya juga memandang penting dimensi pewarisan pengetahuan yang terkandung dalam buku ini. Pengalaman panjang seorang Fungsional Penyelidik Bumi Utama perlu dirumuskan menjadi pengetahuan yang dapat dibaca, diuji, diteruskan, dan dikembangkan oleh generasi berikutnya. Dengan demikian, buku ini tidak hanya menjadi karya individual, tetapi juga menjadi kontribusi bagi penguatan kapasitas kelembagaan Badan Geologi dan pengembangan layanan geologi yang semakin relevan dengan kebutuhan pembangunan.

Ke depan, penguatan Geologi Tata Lingkungan perlu terus dilakukan melalui pemutakhiran data, peningkatan kualitas analisis, pengembangan standar teknis, penguatan validasi, serta integrasi yang lebih baik dengan sistem tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, dan konservasi geologi. Dengan cara itu, kebijakan, rencana, program, dan kegiatan pembangunan dapat lebih sesuai dengan karakter lingkungan geologi setempat.

Saya menyampaikan apresiasi kepada penulis dan semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini. Semoga buku ini memberi manfaat bagi penguatan tata ruang, perlindungan lingkungan hidup, mitigasi risiko geologi, dan pembangunan nasional yang berkelanjutan.

Bandung, Juli 2026
Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral

Dr. Bahlil Lahadalia, S.E., M.Si

SAMBUTAN
KEPALA BADAN GEOLOGI

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena buku Statuta Geologi Tata Lingkungan: Dari Geologi Lingkungan menuju Tata Ruang, Pengelolaan Lingkungan, dan Mitigasi Risiko Geologi dapat diselesaikan. Buku ini merupakan bagian dari ikhtiar memperkuat peran Badan Geologi dalam menyediakan dasar ilmiah dan teknis bagi pembangunan yang aman, tertib, dan berwawasan lingkungan.

Badan Geologi memiliki mandat penting dalam penyediaan data, informasi, rekomendasi, dan pertimbangan teknis di bidang geologi. Dalam praktik pembangunan, kebutuhan terhadap informasi geologi semakin meningkat, baik untuk penyusunan tata ruang, pengelolaan lingkungan hidup, mitigasi risiko geologi, konservasi geologi, maupun pengembangan kawasan. Informasi tersebut perlu disajikan secara operasional agar dapat digunakan oleh pemerintah daerah, perencana, penyusun dokumen lingkungan, pengelola kawasan, dunia usaha, dan masyarakat.

Geologi Tata Lingkungan merupakan kerangka yang menjembatani data geologi dengan keputusan ruang. Melalui kerangka ini, data geologi tidak berhenti sebagai peta dan uraian teknis, tetapi disintesis menjadi penilaian daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, kesesuaian ruang, syarat pemanfaatan, rekomendasi teknis, serta kebutuhan pemantauan. Dengan demikian, Geologi Tata Lingkungan memperkuat keterkaitan antara ilmu geologi, regulasi, dan keputusan pembangunan.

Penggunaan kata statuta pada buku ini dapat dibaca sebagai penegasan atas perlunya pokok-pokok pikiran yang tertib, terstruktur, dan dapat diwariskan. Buku ini tidak dimaksudkan sebagai pengganti peraturan perundang-undangan, tetapi sebagai kerangka pemikiran untuk memperkuat pemahaman, metodologi, dan budaya kerja Geologi Tata Lingkungan di lingkungan Badan Geologi dan para pemangku kepentingan.

Saya menghargai penyusunan buku ini sebagai bentuk pewarisan pengetahuan dari pengalaman panjang seorang Fungsional Penyelidik Bumi. Bagi PB Pertama dan PB Muda, buku ini dapat menjadi pintu masuk untuk memahami bahwa pekerjaan geologi lingkungan bukan hanya mengumpulkan data, tetapi juga menyusun sintesis, membaca pembatas ruang, merumuskan rekomendasi, dan menjaga akuntabilitas teknis dalam setiap pertimbangan.

Saya berharap buku ini mendorong penggunaan data geologi sejak awal proses perencanaan. Banyak persoalan lingkungan, risiko bencana, konflik pemanfaatan ruang, dan pemborosan biaya pembangunan dapat dikurangi apabila kondisi lingkungan geologi dipahami lebih awal. Geologi Tata Lingkungan harus menjadi bagian dari budaya perencanaan dan pengendalian pemanfaatan ruang, bukan sekadar kajian tambahan setelah keputusan disusun.

Atas nama Badan Geologi, saya menyampaikan penghargaan kepada penulis dan semua pihak yang telah mendukung penyusunan buku ini. Semoga buku ini menjadi kontribusi nyata bagi penguatan layanan geologi, perlindungan masyarakat, dan pembangunan Indonesia yang lebih tangguh terhadap dinamika kebumian.

Bandung, Juli 2026
Kepala Badan Geologi

Dr. Lana Saria, S.Si., M.Si

KATA PENGANTAR

KEPALA PUSAT AIR TANAH DAN GEOLOGI TATA LINGKUNGAN

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena buku **Statuta Geologi Tata Lingkungan: Dari Geologi Lingkungan menuju Tata Ruang, Pengelolaan Lingkungan, dan Mitigasi Risiko Geologi** dapat disusun sebagai salah satu ikhtiar untuk memperkuat peran geologi dalam pembangunan nasional yang aman, tertib, dan berwawasan lingkungan.

Buku ini memiliki kedekatan langsung dengan tugas dan fungsi Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan. Di dalamnya tercermin upaya untuk menata kembali pengalaman, konsep, metode, dan praktik Geologi Tata Lingkungan yang selama ini berkembang dalam pelaksanaan tugas penyelidikan, pemetaan, analisis, penyusunan rekomendasi, dan pemberian pertimbangan teknis. Substansi buku ini juga sejalan dengan kebutuhan untuk memperkuat layanan di bidang air tanah, geologi lingkungan, geologi teknik, kawasan lindung geologi, tata ruang, pengelolaan lingkungan, dan mitigasi risiko geologi.

Pembangunan wilayah pada dasarnya selalu berlangsung di atas lingkungan geologi. Tanah, batuan, bentuk lahan, struktur geologi, air tanah, sumber daya geologi, bahaya geologi, serta nilai geologi merupakan bagian penting yang menentukan kemampuan, batas, dan risiko suatu ruang. Oleh karena itu, setiap kebijakan, rencana, program, dan kegiatan pembangunan perlu didukung oleh informasi geologi yang memadai sejak tahap awal. Keputusan ruang yang tidak membaca kondisi geologi dapat menimbulkan persoalan lingkungan, meningkatkan risiko bencana, menurunkan fungsi air tanah, dan menimbulkan biaya sosial maupun ekonomi yang besar.

Dalam konteks tersebut, Geologi Tata Lingkungan memiliki posisi strategis sebagai jembatan antara data geologi dan keputusan pembangunan. Data geologi tidak cukup hanya disajikan sebagai peta dasar atau uraian teknis. Data tersebut perlu dianalisis dan disintesis menjadi informasi mengenai daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, kesesuaian ruang, syarat pemanfaatan, kebutuhan mitigasi, serta arahan pemantauan. Dengan cara itu, geologi dapat hadir secara operasional dalam penyusunan RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengembangan kawasan, pengendalian pemanfaatan ruang, konservasi geologi, dan pengurangan risiko geologi.

Saya memandang penting kehadiran buku ini karena memberikan kerangka pemikiran yang cukup lengkap mengenai Geologi Tata Lingkungan. Buku ini tidak hanya membahas konsep dasar, tetapi juga menguraikan metodologi Kajian Geologi Lingkungan, pemetaan, skoring, pembobotan, analisis spasial, validasi, pertimbangan teknis, sistem informasi, serta penerapan pada berbagai peruntukan, kawasan, tapak, dan prasarana. Dengan demikian, buku ini dapat menjadi rujukan bagi penyusunan kajian yang lebih tertib, lebih terukur, dan lebih dapat dipertanggungjawabkan.

Salah satu perhatian penting dalam buku ini adalah air tanah dan zona resapan. Air tanah merupakan sumber daya sekaligus fungsi lingkungan geologi yang harus dikelola secara hati-hati. Perubahan pemanfaatan ruang dapat memengaruhi imbuhan, muka air tanah, kualitas air tanah, kerentanan terhadap pencemaran, serta keberlanjutan ketersediaan air. Karena itu, integrasi informasi hidrogeologi ke dalam tata ruang, dokumen lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang menjadi kebutuhan yang semakin mendesak, terutama pada kawasan perkotaan, kawasan industri, kawasan pesisir, dan wilayah dengan tekanan pembangunan tinggi.

Buku ini juga menegaskan pentingnya membaca bahaya geologi sebagai bagian dari lingkungan geologi. Gempa bumi, tsunami, gerakan tanah, letusan gunung api, penurunan muka tanah, abrasi, erosi, dan bahaya geologi lainnya perlu diterjemahkan ke dalam arahan pemanfaatan ruang dan syarat teknis yang jelas. Pengurangan risiko tidak cukup dilakukan setelah kejadian bencana, tetapi perlu dimulai sejak tahap perencanaan. Dalam hal ini, Geologi Tata Lingkungan dapat membantu

mengarahkan kegiatan pembangunan agar lebih sesuai dengan karakter wilayah dan lebih mampu mengurangi paparan risiko.

Selain aspek risiko, buku ini memberi ruang penting bagi perlindungan nilai geologi. Warisan geologi, Kawasan Cagar Alam Geologi, Kawasan Bentang Alam Karst, Geopark, dan geowisata merupakan bagian dari kekayaan geologi Indonesia yang perlu dikenali, dilindungi, dan dimanfaatkan secara berkelanjutan. Nilai geologi tidak hanya penting bagi ilmu pengetahuan, tetapi juga bagi pendidikan, identitas wilayah, konservasi, pariwisata berkelanjutan, dan pemberdayaan masyarakat. Oleh karena itu, Geologi Tata Lingkungan perlu hadir untuk menjaga keseimbangan antara pemanfaatan dan perlindungan kawasan bernilai geologi.

Saya juga menghargai dimensi pewarisan pengetahuan yang menjadi salah satu semangat utama penyusunan buku ini. Pengalaman panjang Saudara Oki Oktariadi sebagai Fungsional Penyelidik Bumi dalam bidang geologi lingkungan dan geologi tata lingkungan merupakan modal pengetahuan yang penting untuk dirumuskan, ditulis, dan dibagikan kepada generasi berikutnya. Bagi para Penyelidik Bumi, terutama PB Pertama dan PB Muda, buku ini dapat menjadi pintu masuk untuk memahami bahwa pekerjaan geologi lingkungan tidak berhenti pada pengumpulan data, tetapi berlanjut pada kemampuan menyusun sintesis, membaca pembatas ruang, merumuskan rekomendasi, dan menjaga akuntabilitas teknis dalam setiap pertimbangan.

Ke depan, penguatan Geologi Tata Lingkungan perlu terus dilakukan melalui pemutakhiran data, peningkatan mutu peta, pengembangan pedoman teknis, penguatan validasi kajian, integrasi sistem informasi, serta peningkatan koordinasi dengan sektor tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, konservasi geologi, dan pemerintah daerah. Dengan penguatan tersebut, layanan geologi diharapkan semakin mampu mendukung pembangunan yang aman, efisien, berkeadilan, dan berkelanjutan.

Atas nama Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, saya menyampaikan penghargaan kepada penulis dan seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan buku ini. Semoga buku **Statuta Geologi Tata Lingkungan** ini dapat menjadi rujukan yang bermanfaat bagi para Penyelidik Bumi, perencana ruang, akademisi, konsultan, penyusun dokumen lingkungan, pemerintah daerah, pengelola kawasan, dunia usaha, dan semua pihak yang memerlukan dasar geologi dalam pengambilan keputusan ruang dan lingkungan.

Bandung, Juli 2026
Kepala Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan

Ir. Agus Cahyono Adi, M.T.

PRAKATA PENULIS

GEOLOGI TATA LINGKUNGAN SEBAGAI ILMU TERAPAN UNTUK MEMBACA RUANG HIDUP

Buku **Statuta Geologi Tata Lingkungan: Dari Geologi Lingkungan menuju Tata Ruang, Pengelolaan Lingkungan, dan Mitigasi Risiko Geologi** disusun untuk memperkenalkan, menata, dan memperkuat pemahaman mengenai Geologi Tata Lingkungan sebagai bidang geologi terapan yang langsung berhubungan dengan kehidupan manusia, pembangunan wilayah, perlindungan lingkungan, dan pengurangan risiko geologi.

Geologi Tata Lingkungan berangkat dari kesadaran sederhana, tetapi mendasar: setiap pembangunan selalu berlangsung di atas tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, dan proses geologi yang bekerja terus-menerus. Kota, jalan, kawasan industri, permukiman, bendungan, tempat pengolahan sampah, kawasan wisata, kawasan pesisir, daerah resapan air, dan kawasan strategis lainnya tidak pernah berdiri di ruang kosong. Semuanya berada pada lingkungan geologi yang memiliki kemampuan, keterbatasan, fungsi, nilai, dan risiko.

Karena itu, geologi tidak hanya perlu dibaca sebagai ilmu tentang batuan, mineral, struktur bumi, atau sejarah pembentukan bentang alam. Dalam pembangunan, geologi juga harus hadir sebagai dasar untuk menjawab pertanyaan praktis: ruang mana yang sesuai untuk dikembangkan, ruang mana yang memerlukan syarat teknis, ruang mana yang harus dikendalikan, dan ruang mana yang sebaiknya dilindungi. Buku ini mencoba membawa geologi dari ruang ilmu menuju ruang keputusan.

Tentang Buku Ini

Buku **Statuta Geologi Tata Lingkungan: Dari Geologi Lingkungan menuju Tata Ruang, Pengelolaan Lingkungan, dan Mitigasi Risiko Geologi** disusun sebagai rujukan ilmiah-terapan mengenai Geologi Tata Lingkungan. Disebut ilmiah karena pembahasannya bertumpu pada dasar keilmuan geologi lingkungan, hidrogeologi, geologi teknik, geomorfologi, kebencanaan geologi, konservasi geologi, analisis spasial, serta tata ruang. Disebut terapan karena seluruh pembahasannya diarahkan pada penggunaan nyata dalam perencanaan wilayah, pengelolaan lingkungan, mitigasi risiko geologi, pengendalian pemanfaatan ruang, dan penyusunan rekomendasi teknis.

Istilah **statuta** dalam judul buku ini digunakan untuk menegaskan perlunya pokok-pokok pikiran yang tertib dalam Geologi Tata Lingkungan. Statuta yang dimaksud bukan produk hukum formal, melainkan naskah dasar pemikiran yang menghimpun prinsip, kerangka konseptual, metodologi, arah regulatif, dan rambu operasional agar praktik Geologi Tata Lingkungan dapat dilakukan secara lebih konsisten, terukur, dan bertanggung jawab.

Penyusunan buku ini tidak dapat dilepaskan dari peran para kontributor yang selama ini menjadi rekan kerja penulis dalam bidang geologi lingkungan dan geologi tata lingkungan. Mereka memberikan banyak inspirasi melalui tulisan, catatan teknis, pengalaman pekerjaan, serta diskusi-diskusi yang berlangsung di kantor maupun di lapangan. Dalam berbagai kesempatan, gagasan mengenai geologi lingkungan, Kajian Geologi Lingkungan, tata ruang, kawasan lindung geologi, air tanah, kebencanaan geologi, konservasi geologi, Geopark, geowisata, dan pengelolaan lingkungan berkembang melalui pertukaran pikiran, pembacaan bersama terhadap data, serta refleksi atas pengalaman teknis dalam berbagai pekerjaan. Karena itu, kontribusi mereka tidak hanya hadir sebagai bahan tertulis, tetapi juga sebagai bagian dari suasana intelektual dan profesional yang ikut memperkaya kerangka pemikiran buku ini.

Buku ini tidak dimaksudkan sebagai laporan teknis satu wilayah tertentu. Beberapa contoh peta, bagan, matriks, dan kasus penerapan memang disajikan untuk memperjelas pembahasan, tetapi tujuan utamanya adalah membangun kerangka berpikir Geologi Tata Lingkungan yang dapat

digunakan pada berbagai konteks ruang dan lingkungan. Buku ini juga bukan buku ajar dalam arti sempit, meskipun dapat digunakan sebagai bahan pembelajaran bagi mahasiswa, Fungsional Penyelidik Bumi, perencana ruang, konsultan, penyusun dokumen lingkungan, dan pembaca lintas disiplin.

Dengan posisi tersebut, buku ini diharapkan dapat menjadi jembatan antara ilmu geologi, tata ruang, pengelolaan lingkungan, konservasi geologi, dan mitigasi risiko geologi. Buku ini perlu dibaca bukan sebagai rumusan akhir yang tertutup, melainkan sebagai dasar kerja yang terbuka untuk diuji, dikritik, diperbaiki, dan dikembangkan oleh generasi berikutnya.

Mengapa Geologi Tata Lingkungan Perlu Dipelajari

Indonesia adalah wilayah dengan dinamika geologi yang sangat tinggi. Gunung api, gempa bumi, tsunami, gerakan tanah, kawasan karst, cekungan air tanah, dataran aluvial, kawasan pesisir, sumber daya mineral, panas bumi, dan warisan geologi membentuk ruang hidup yang kaya sekaligus menantang. Kondisi tersebut memberi peluang pembangunan, tetapi juga menghadirkan pembatas dan risiko yang harus dibaca sejak awal.

Sering kali pembangunan hanya melihat permukaan: lahan tersedia, akses memungkinkan, kebutuhan ekonomi mendesak, dan rencana administratif sudah disusun. Padahal, di bawah permukaan dan di balik bentang alam, terdapat kondisi geologi yang menentukan apakah pembangunan tersebut aman, layak, berkelanjutan, atau justru berisiko. Tanah dapat memiliki daya dukung rendah. Air tanah dapat rentan tercemar. Daerah resapan dapat kehilangan fungsi. Lereng dapat menjadi tidak stabil. Kawasan bernilai geologi dapat rusak karena pemanfaatan yang tidak terkendali. Bahaya geologi dapat berubah menjadi bencana apabila bertemu dengan pemanfaatan ruang yang tidak tepat.

Di sinilah Geologi Tata Lingkungan diperlukan. GTL membantu menerjemahkan data geologi menjadi informasi yang dapat digunakan dalam tata ruang, KLHS, dokumen lingkungan, pengembangan kawasan, perizinan, konservasi geologi, Geopark, geowisata, mitigasi bencana, serta pertimbangan teknis. Dengan GTL, peta geologi tidak berhenti sebagai gambar teknis, tetapi menjadi dasar untuk memahami daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, syarat pemanfaatan, dan kebutuhan pemantauan.

Pendekatan yang Digunakan

Buku ini menggunakan pendekatan sintesis. Artinya, geologi tidak dibaca secara terpisah-pisah, tetapi dihubungkan dengan kebutuhan ruang dan lingkungan. Tanah dan batuan dibaca bersama bentuk lahan. Bentuk lahan dibaca bersama air tanah. Air tanah dibaca bersama penggunaan lahan. Bahaya geologi dibaca bersama rencana pembangunan. Kawasan bernilai geologi dibaca bersama perlindungan ruang dan pemanfaatan berkelanjutan.

Pendekatan sintesis ini penting karena persoalan lingkungan geologi jarang berdiri sendiri. Sebuah kawasan dapat tampak sesuai karena lahannya datar, tetapi menjadi terbatas karena muka air tanah dangkal, daya dukung tanah rendah, atau fungsi resapan tinggi. Sebaliknya, kawasan yang memiliki pembatas geologi tidak selalu harus ditutup dari semua pemanfaatan; sebagian masih dapat digunakan dengan syarat teknis, pengendalian intensitas, desain mitigasi, dan pemantauan.

Buku ini juga menekankan pentingnya metodologi. Kajian Geologi Lingkungan tidak cukup hanya mengumpulkan data dan membuat peta. Setiap parameter perlu dipilih dengan alasan yang jelas. Setiap skor dan bobot perlu dapat dijelaskan. Setiap peta sintesis perlu dapat ditelusuri kembali ke data dasarnya. Setiap rekomendasi perlu dikaitkan dengan tindakan yang dapat dilaksanakan dan dipantau. Dengan demikian, GTL bukan hanya pekerjaan teknis, tetapi juga pekerjaan ilmiah yang menuntut keterlacakan dan akuntabilitas.

Susunan Buku

Buku ini disusun dalam beberapa bagian yang saling berhubungan. Bagian awal membangun fondasi konseptual mengenai Geologi Lingkungan dan Geologi Tata Lingkungan. Pada bagian ini dibahas mengapa GTL diperlukan, bagaimana hubungannya dengan tradisi *environmental geology*, serta bagaimana lingkungan geologi menjadi fondasi ruang hidup.

Bagian berikutnya membahas metodologi Kajian Geologi Lingkungan. Pembaca diajak memahami daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, faktor penyisih, pemetaan tematik, skoring, pembobotan, analisis spasial, validasi, zona resapan, air tanah, dan bahaya geologi. Bagian ini menjadi jembatan antara konsep dan penerapan teknis.

Bagian selanjutnya membahas perlindungan nilai geologi dan pemanfaatan berkelanjutan, termasuk kawasan lindung geologi, warisan geologi, kawasan cagar alam geologi, kawasan bentang alam karst, Geopark, dan geowisata. Bagian ini menegaskan bahwa GTL tidak hanya berkaitan dengan risiko dan pembatas, tetapi juga dengan nilai geologi yang perlu dikenali, dijaga, dan dimanfaatkan secara bijaksana.

Buku ini kemudian membahas regulasi, kelembagaan, pertimbangan teknis, sistem informasi, serta arah penguatan GTL di Indonesia. Pembahasan ini penting karena GTL tidak akan efektif apabila hanya berhenti pada konsep. GTL memerlukan kelembagaan, standar data, mekanisme validasi, sistem informasi, koordinasi lintas sektor, dan kapasitas sumber daya manusia.

Pada bagian akhir, buku ini dilengkapi dengan lampiran teknis. Lampiran tersebut disiapkan sebagai contoh penerapan prinsip GTL dan KGL pada berbagai peruntukan, kawasan, tapak, dan prasarana, seperti daerah resapan air, permukiman, kawasan industri, pertambangan, prasarana pesisir strategis, tapak PLTN, Geopark, kawasan bentang alam karst, kawasan cagar alam geologi, tempat pengolahan sampah terpadu, serta kawasan PLTP, pengendalian banjir hulu-tengah-hilir, pemulihan neraca air, serta studi kasus pengembangan kota baru. Dengan demikian, pembaca memperoleh gambaran bagaimana prinsip GTL dapat diterjemahkan menjadi tata cara kerja yang lebih operasional, tidak hanya menunjukkan perangkat kerja sektoral, tetapi juga memperlihatkan cara KGL digunakan untuk membaca sistem air, fungsi ruang, risiko geologi, dan keputusan pemanfaatan ruang secara terpadu.

Cara Menggunakan Buku Ini

Buku ini dapat dibaca dengan beberapa cara. Pembaca yang ingin memahami dasar pemikiran GTL dapat memulai dari bagian awal mengenai fondasi konseptual. Pembaca yang membutuhkan metode kerja dapat langsung menelusuri bagian metodologi Kajian Geologi Lingkungan. Pembaca yang bekerja pada tata ruang, KLHS, dokumen lingkungan, atau pertimbangan teknis dapat menggunakan bagian regulasi, kelembagaan, dan lampiran teknis sebagai rujukan awal.

Bagi Fungsional Penyelidik Bumi, buku ini dapat menjadi bahan penguatan kompetensi. Pekerjaan geologi lingkungan tidak cukup hanya menghasilkan data lapangan. Seorang penyelidik bumi perlu mampu membaca hubungan antarparameter, menyusun sintesis, menjelaskan pembatas, merumuskan syarat pemanfaatan, dan mempertanggungjawabkan rekomendasi. Buku ini diharapkan membantu proses tersebut.

Bagi perencana ruang dan penyusun dokumen lingkungan, buku ini dapat membantu memahami mengapa informasi geologi perlu masuk sejak awal proses perencanaan. Banyak persoalan tata ruang dan lingkungan dapat dikurangi apabila data geologi digunakan sebelum keputusan ditetapkan, bukan setelah masalah muncul di lapangan.

Bagi akademisi dan mahasiswa, buku ini dapat menjadi pintu masuk untuk melihat geologi sebagai ilmu yang hidup dalam persoalan nyata. Geologi bukan hanya menjelaskan masa lalu bumi, tetapi juga membantu manusia membuat keputusan masa depan.

Catatan untuk Pembaca

Buku ini tidak menutup diskusi tentang Geologi Tata Lingkungan. Sebaliknya, buku ini dimaksudkan sebagai dasar kerja yang terbuka untuk diuji, dikritik, diperbaiki, dan dikembangkan. Data geologi selalu memerlukan pemutakhiran. Regulasi selalu berkembang. Kebutuhan pengguna informasi geologi juga semakin kompleks. Karena itu, GTL perlu terus diperkuat melalui riset, pengalaman lapangan, pembaruan metode, peningkatan standar teknis, dan dialog lintas sektor.

Hal terpenting yang ingin ditekankan buku ini adalah bahwa ruang harus dibaca sebelum ditetapkan, dan bumi harus dipahami sebelum dibangun. Geologi Tata Lingkungan mengajak pembaca untuk melihat tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, bahaya, dan nilai geologi sebagai

bahasa alam yang memberi petunjuk. Bila bahasa itu dibaca dengan cermat, pembangunan dapat menjadi lebih aman, lebih hemat, lebih adil, dan lebih berkelanjutan.

Buku ini disusun sebagai bagian dari ikhtiar mewariskan cara pandang, pengalaman, dan tradisi kerja geologi lingkungan kepada generasi berikutnya. Semoga buku ini dapat menjadi rujukan bagi para Penyelidik Bumi, akademisi, perencana, konsultan, pemerintah daerah, pengelola kawasan, penyusun dokumen lingkungan, dan semua pihak yang percaya bahwa pembangunan yang baik harus dimulai dengan memahami bumi.

Bandung, Juli 2026
Penulis

Oki Oktariadi

DAFTAR ISI

Uraian	Hal.
Sambutan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral	**vi**
Sambutan Kepala Badan Geologi	**ix**
Kata Pengantar Kepala Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan	**xii**
Prakata Penulis	**xiv**
Daftar Isi	**xvii**
Daftar Gambar	**xxv**
Daftar Tabel	**xxviii**
Prolog	**1**
BAGIAN I Fondasi Konseptual	**3**
Pengantar Bagian I	**3**
BAB 1 MENGAPA GEOLOGI TATA LINGKUNGAN DIPERLUKAN	**5**
1.1 Pengantar	**5**
1.2 Indonesia sebagai Ruang Hidup Geologi yang Dinamis	**5**
1.3 Geologi sebagai Faktor Pendukung Pembangunan	**6**
1.4 Geologi sebagai Faktor Pembatas Pembangunan	**7**
1.5 Kesenjangan antara Data Geologi dan Keputusan Ruang	**8**
1.6 Dari Geologi Lingkungan menuju Geologi Tata Lingkungan	**9**
1.7 Posisi GTL dalam Tata Ruang	**9**
1.8 Posisi GTL dalam Lingkungan Hidup dan Dokumen Lingkungan	**11**
1.9 Posisi GTL dalam Pengendalian Risiko Geologi	**11**
1.10 Posisi GTL dalam Konservasi Geologi dan Geopark	**12**
1.11 GTL sebagai Instrumen Sintesis, Validasi, dan Pertimbangan Teknis	**13**
1.12 Kesimpulan Bab	**15**
BAB 2 GL, GTL, DAN TRADISI ENVIRONMENTAL GEOLOGY	**17**
2.1 Pengantar	**17**
2.2 Environmental Geology dalam Literatur Internasional	**17**
2.3 Kajian Geologi Lingkungan sebagai Rumusan Sintesis	**18**
2.4 Geologi Lingkungan dalam Konteks Indonesia	**20**
2.5 Lingkungan Geologi sebagai Objek Kajian dan Objek Pengaturan	**20**
2.6 Dari Data Geologi menuju Informasi Geologi Lingkungan	**21**
2.7 Kajian Geologi Lingkungan sebagai Metode Teknis	**22**
2.8 Geologi Tata Lingkungan sebagai Kerangka Sintesis dan Penerapan	**23**
2.9 Perbedaan Geologi Lingkungan, KGL, Kajian GTL, dan Pertimbangan Teknis GTL	**23**

Uraian	Hal.
2.10 GTL sebagai Jembatan antara Ilmu, Regulasi, dan Keputusan Ruang	**24**
2.11 Kesimpulan Bab	**25**
BAB 3 LINGKUNGAN GEOLOGI SEBAGAI FONDASI RUANG HIDUP	**27**
3.1 Pengantar	**27**
3.2 Tanah dan Batuan sebagai Dasar Fisik Pemanfaatan Ruang	**27**
3.3 Bentuk Lahan dan Proses Geomorfologi	**28**
3.4 Air Tanah dan Sistem Hidrogeologi	**29**
3.5 Struktur Geologi, Kestabilan, dan Kerentanan Ruang	**29**
3.6 Sumber Daya Geologi dan Pemanfaatan Berkelanjutan	**30**
3.7 Bahaya Geologi sebagai Bagian dari Lingkungan Geologi	**30**
3.8 Nilai Geologi, Geoheritage, dan Kawasan Bernilai Penting	**31**
3.9 Interaksi Manusia dengan Lingkungan Geologi	**32**
3.10 Lingkungan Geologi dan Satuan Analisis GTL	**33**
3.11 Lingkungan Geologi sebagai Dasar Daya Dukung dan Daya Tampung	**34**
3.12 Kesimpulan Bab	**34**
BAGIAN II Metodologi Kajian Geologi Lingkungan untuk Rekomendasi Tata Ruang	**37**
Pengantar Bagian II	**37**
BAB 4 DAYA DUKUNG, DAYA TAMPUNG, DAN FAKTOR PEMBATAS GEOLOGI	**39**
4.1 Pengantar	**39**
4.2 Daya Dukung Geologi	**39**
4.3 Daya Tampung Geologi	**40**
4.4 Faktor Pendukung Geologi	**40**
4.5 Faktor Pembatas Geologi	**41**
4.6 Faktor Penyisih dan Prinsip Kehati-hatian	**41**
4.7 Dari Pembatas menuju Kelas Kesesuaian Ruang	**42**
4.8 Daya Dukung dan Daya Tampung dalam RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan	**42**
4.9 Parameter Minimum dalam Penilaian Daya Dukung dan Daya Tampung	**43**
4.10 Skala, Ketidakpastian, dan Validasi	**43**
4.11 Rekomendasi Operasional: Dari Kategori ke Syarat Teknis	**44**
4.12 Kesimpulan Bab	**44**
BAB 5 PEMETAAN, SKORING, PEMBOBOTAN, DAN ANALISIS SPASIAL DALAM KGL	**47**
5.1 Pengantar	**47**
5.2 Posisi Pemetaan dan Analisis Spasial dalam KGL	**51**
5.3 Pemetaan Tematik sebagai Dasar Analisis	**52**

Uraian	Hal.
5.4 Satuan Analisis Spasial	**53**
5.5 Pemilihan Parameter dan Indikator	**53**
5.6 Skoring dalam KGL	**54**
5.7 Pembobotan Parameter	**54**
5.8 Analisis Spasial dan Tumpangsusun Peta	**55**
5.9 Indeks Sintesis dan Kelas Kesesuaian	**56**
5.10 Validasi Lapangan, Uji Kewajaran, dan Ketidakpastian	**57**
5.11 Penyajian Peta Sintesis dan Narasi Rekomendasi	**58**
5.12 Penggunaan KGL dalam RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan	**61**
5.13 Kesalahan Umum dalam Skoring dan Pembobotan	**62**
5.14 Kesimpulan Bab	**62**
BAB 6 AIR TANAH, ZONA RESAPAN	**65**
6.1 Pengantar	**65**
6.2 Air Tanah dalam Kerangka Geologi Tata Lingkungan	**66**
6.3 Sistem Akuifer, Imbuhan, Lepasan, dan Aliran Air Tanah	**67**
6.4 Zona Resapan sebagai Fungsi Lingkungan Geologi	**67**
6.5 Parameter Penilaian Zona Resapan dalam KGL	**68**
6.6 Pemetaan Zona Resapan: Data, Skala, dan Metode	**69**
6.7 Skoring dan Pembobotan untuk Zona Resapan	**70**
6.8 Kerentanan Air Tanah terhadap Pencemaran	**70**
6.9 Air Tanah, Zona Resapan, dan Daya Dukung-Daya Tampung	**71**
6.10 Integrasi Zona Resapan ke dalam RTRW dan RDTR	**71**
6.11 Pengaturan Zonasi dan ITBX pada Zona Resapan	**72**
6.12 Pengendalian Pemanfaatan Ruang dan Syarat Teknis	**73**
6.13 Air Tanah dalam KLHS dan Dokumen Lingkungan	**74**
6.14 Pemantauan Air Tanah dan Pemutakhiran Informasi GTL	**75**
6.15 Kesalahan Umum dalam Memahami Zona Resapan	**75**
6.16 Contoh Penerapan: Peta Zona Konservasi dan Kerentanan Air Tanah CAT Jakarta	**75**
6.17 Kesimpulan Bab	**77**
BAB 7 BAHAYA GEOLOGI DAN PENGENDALIAN PEMANFAATAN RUANG	**79**
7.1 Pengantar	**79**
7.2 Bahaya Geologi dalam Kerangka Geologi Tata Lingkungan	**80**
7.3 Pengertian Kawasan Rawan Bencana dalam Perspektif Geologi Tata Lingkungan	**80**
7.4 Dari Bahaya menuju Risiko Geologi	**82**

Uraian	Hal.
7.5 Jenis Bahaya Geologi yang Perlu Dipertimbangkan dalam KGL	**82**
7.6 Data Bahaya Geologi dan Peta Kawasan Rawan Bencana	**83**
7.7 Contoh Penerapan Peta KRB Geologi untuk Tata Ruang: Kasus Kawah Sinila-Kawah Timbang, Dieng	**84**
7.8 Skala, Ketelitian Data, dan Tingkat Keputusan	**88**
7.9 Parameter Bahaya Geologi dalam KGL	**88**
7.10 Bahaya Geologi sebagai Faktor Pembatas dan Faktor Penyisih	**88**
7.11 Integrasi Bahaya Geologi ke dalam RTRW dan RDTR	**89**
7.12 Pengaturan Zonasi dan ITBX pada Kawasan dengan Bahaya Geologi	**91**
7.13 Pengendalian Pemanfaatan Ruang dan Syarat Teknis	**91**
7.14 Mitigasi Struktural, Mitigasi Non-Struktural, dan Pemantauan	**92**
7.15 Bahaya Geologi dalam KLHS dan Dokumen Lingkungan	**92**
7.16 Validasi, Komunikasi Risiko, dan Akuntabilitas Teknis	**93**
7.17 Kesalahan Umum dalam Menggunakan Informasi Bahaya Geologi	**93**
7.18 Kesimpulan Bab	**94**
BAGIAN III Perlindungan Nilai Geologi dan Pemanfaatan Berkelanjutan	**97**
Pengantar Bagian III	**97**
BAB 8 KAWASAN LINDUNG GEOLOGI DAN GEOPARK	**99**
8.1 Pengantar	**99**
8.2 Kawasan Lindung Geologi dalam Kerangka GTL	**99**
8.3 Warisan Geologi sebagai Objek Penilaian dan Perlindungan	**100**
8.4 Kawasan Cagar Alam Geologi sebagai Instrumen Perlindungan Ruang	**100**
8.5 KBAK dan Fungsi Strategis Bentang Alam Karst	**101**
8.6 Geopark sebagai Pengelolaan Terpadu Kawasan Bernilai Geologi	**101**
8.7 Hubungan Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark	**102**
8.8 Pengaturan Ruang pada Kawasan Bernilai Geologi	**103**
8.9 Validasi, Kelembagaan, dan Pemantauan Kawasan	**105**
8.10 Kesimpulan Bab	**105**
BAB 9 GEOWISATA SEBAGAI PEMANFAATAN BERKELANJUTAN WARISAN GEOLOGI	**107**
9.1 Pengantar	**107**
9.2 Konsep Geowisata dalam Kerangka GTL	**107**
9.3 Warisan Geologi sebagai Dasar Narasi Geowisata	**108**
9.4 Prinsip Konservasi dalam Geowisata	**109**
9.5 Daya Dukung dan Daya Tampung Kunjungan	**109**
9.6 Interpretasi Geologi dan Pendidikan Publik	**110**

Uraian	Hal.
9.7 Keterlibatan Masyarakat dan Manfaat Lokal	**111**
9.8 Keselamatan Pengunjung dan Risiko Geologi	**111**
9.9 Integrasi Geowisata dalam Tata Ruang dan Dokumen Pengelolaan	**112**
9.10 Model Pengelolaan Geowisata Berkelanjutan	**112**
9.11 Contoh Penerapan: Peta Potensi Geowisata dan Zonasi Geosite Telaga Menjer, Dieng	**113**
9.12 Pemantauan dan Indikator Keberlanjutan Geowisata	**118**
9.13 Kesalahan Umum dalam Pengembangan Geowisata	**119**
9.14 Kesimpulan Bab	**119**
BAGIAN IV Regulasi, Kelembagaan, dan Instrumen Operasional GTL	**121**
Pengantar Bagian IV	**121**
BAB 10 GTL DALAM SISTEM PERATURAN PERUNDANG-UNDANGAN INDONESIA	**123**
10.1 Pengantar	**123**
10.2 Prinsip Dasar Sistem Peraturan Perundang-undangan	**123**
10.3 Kedudukan GTL sebagai Instrumen Teknis-Regulatif	**124**
10.4 Relasi GTL dengan Penataan Ruang	**125**
10.5 Relasi GTL dengan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup	**126**
10.6 Relasi GTL dengan Air Tanah, Sumber Daya Air, dan Zona Resapan	**126**
10.7 Relasi GTL dengan Kebencanaan dan Pengurangan Risiko Geologi	**127**
10.8 Relasi GTL dengan Kawasan Lindung Geologi, Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark	**128**
10.9 Relasi GTL dengan Perizinan, Persetujuan, dan Kegiatan Strategis	**128**
10.10 Arsitektur Regulasi GTL: Payung, Pedoman, Standar, dan Mekanisme	**129**
10.11 GTL sebagai Bagian dari Norma, Standar, Prosedur, dan Kriteria	**130**
10.12 Kebutuhan Penguatan Regulasi GTL	**130**
10.13 Kesimpulan Bab	**131**
BAB 11 KGL UNTUK PERUNTUKAN LAHAN, KAWASAN, TAPAK, DAN PRASARANA	**133**
11.1 Pengantar	**133**
11.2 Posisi KGL dalam Siklus Keputusan Ruang	**134**
11.3 Penapisan Awal Objek Keputusan	**134**
11.4 KGL untuk Peruntukan Lahan	**135**
11.5 KGL untuk Pengembangan Kawasan	**135**
11.6 KGL untuk Tapak	**138**
11.7 KGL untuk Prasarana	**138**
11.8 KGL untuk Kawasan PLTP sebagai Pemanfaatan Energi Geologi	**139**
11.9 Parameter dan Skala Data untuk Objek KGL	**140**

Uraian	Hal.
11.10 Kelas Kesesuaian dan Bentuk Rekomendasi	**141**
11.11 Hubungan KGL dengan RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan	**142**
11.12 Kesalahan Umum dalam KGL untuk Objek Keputusan	**142**
11.13 Contoh Pemanfaatan Peta Air Tanah dan Peta KRB dalam Dokumen Lingkungan dan Keputusan Pemanfaatan Ruang	**143**
11.14 Kesimpulan Bab	**147**
BAB 12 KELEMBAGAAN, VALIDASI, PERTIMBANGAN TEKNIS, DAN SISTEM INFORMASI GTL	**149**
12.1 Pengantar	**149**
12.2 jejak Kelembagaan Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan	**151**
12.3 Kebutuhan Kelembagaan GTL	**152**
12.4 Peran Unit Teknis, Pemerintah Daerah, dan Pemangku Kepentingan	**152**
12.5 Validasi dalam GTL	**152**
12.6 Pertimbangan Teknis GTL	**153**
12.7 Sistem Informasi GTL	**154**
12.8 Metadata, Standar Data, dan Keterlacakan	**155**
12.9 Pemantauan dan Pemutakhiran Informasi GTL	**155**
12.10 Akuntabilitas dan Komunikasi Teknis	**155**
12.11 Hubungan GTL dengan Sistem Informasi Tata Ruang dan Lingkungan	**156**
12.12 Tantangan Implementasi Kelembagaan GTL	**156**
12.13 Kesimpulan Bab	**157**
BAGIAN V Refleksi, Regenerasi, dan Arah Strategis GTL Indonesia	**159**
Pengantar Bagian V	**159**
BAB 13 PENGUATAN SUMBER DAYA MANUSIA GEOLOGI TATA LINGKUNGAN	**161**
13.1 Pengantar	**161**
13.2 Mengajak Generasi Baru Memasuki Geologi Tata Lingkungan	**161**
13.3 Kaderisasi Internal dan Penguatan Kelembagaan Badan Geologi	**162**
13.4 Kompetensi Dasar Ahli Geologi Tata Lingkungan	**163**
13.5 Kompetensi Lintas-Keilmuan dalam Geologi Tata Lingkungan	**163**
13.6 Pendidikan Lanjut, Riset, dan Tugas Akhir Geologi Tata Lingkungan	**164**
13.7 Ahli Geologi Tata Lingkungan sebagai Sintetisator	**165**
13.8 Jalur Profesi dan Pengabdian dalam Geologi Tata Lingkungan	**166**
13.9 Peta Jalan Penguatan SDM Geologi Tata Lingkungan	**166**
13.10 Kesimpulan Bab	**167**
BAB 14 PERBANDINGAN INTERNASIONAL PENGATURAN GEOLOGI LINGKUNGAN DAN PERENCANAAN BERBASIS RISIKO	**169**

Uraian	Hal.
14.1 Pengantar	**169**
14.2 Mengapa Pembanding Internasional Diperlukan	**169**
14.3 Inggris: Geosains, Pemetaan Tematik, dan Perencanaan Lahan	**170**
14.4 Amerika Serikat: Zona Sesar Aktif, Seismic Hazard, dan Floodplain Management	**170**
14.5 Selandia Baru: Perencanaan Berbasis Risiko Bahaya Alam	**171**
14.6 Swiss: Peta Bahaya, Geodata, dan Pengendalian Risiko	**171**
14.7 Uni Eropa: Infrastruktur Data Spasial dan Interoperabilitas	**172**
14.8 Jepang: Area Peringatan dan Pengendalian Bahaya Gerakan Massa	**172**
14.9 Prinsip Umum yang Dapat Dipetik	**173**
14.10 Relevansi dan Batas Penerapan bagi Indonesia	**174**
14.11 Kesimpulan Bab	**174**
BAB 15 ARAH PENGUATAN GEOLOGI TATA LINGKUNGAN DI INDONESIA	**177**
15.1 Pengantar	**177**
15.2 Memperjelas Definisi dan Ruang Lingkup GTL	**177**
15.3 Memperkuat Arsitektur Regulasi GTL	**178**
15.4 Standar Data, Metadata, dan Skala	**178**
15.5 Penguatan Metodologi KGL	**178**
15.6 Validasi dan Pertimbangan Teknis	**179**
15.7 Penguatan Kelembagaan dan Koordinasi	**179**
15.8 Integrasi GTL ke Instrumen Kebijakan	**179**
15.9 Sistem Informasi GTL	**180**
15.10 Pengembangan Kapasitas Sumber Daya Manusia	**180**
15.11 Komunikasi Risiko dan Literasi Kebijakan	**180**
15.12 Agenda Implementasi Bertahap	**182**
15.13 Indikator Keberhasilan Penguatan GTL	**183**
15.14 Kesimpulan Bab	**183**
BAB 16 KEEKONOMIAN GEOLOGI LINGKUNGAN DALAM TATA RUANG DAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN	**185**
16.1 Pengantar	**185**
16.2 Lingkungan Geologi sebagai Modal Alam	**186**
16.3 Spektrum Nilai Ekonomi Geologi Lingkungan	**187**
16.4 Nilai Ekonomi Daya Dukung dan Daya Tampung	**188**
16.5 Ekonomi Faktor Pembatas dan Biaya yang Dihindari	**189**
16.6 Air Tanah, Zona Resapan, dan Nilai Ekonomi Fungsi Hidrogeologi	**190**

Uraian	Hal.
16.7 Geopark, Geowisata, dan Ekonomi Konservasi Geologi	**190**
16.8 Karst Carbon Sink sebagai Dimensi Baru Keekonomian Geologi Lingkungan	**191**
16.9 Kedudukan Petunjuk Teknis KCS sebagai Turunan Operasional Bab 16	**191**
16.10 Prinsip Valuasi KCS dan Batas Penggunaannya	**192**
16.11 Integrasi Keekonomian Geologi Lingkungan ke RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan	**192**
16.12 Juknis KCS sebagai Penguatan Operasional Bab 16	**193**
16.13 Implikasi untuk Diklat Pengantar Ekonomi Geologi Lingkungan	**194**
16.14 Kesimpulan Bab	**194**
EPILOG	**197**
DAFTAR PUSTAKA	**199**
GLOSARIUM	**203**
LAMPIRAN TEKNIS	**207**
Lampiran 1 Pedoman Umum Kajian Geologi Lingkungan	**210**
Lampiran 2 Petunjuk Teknis KGL untuk Daerah Resapan Air	**219**
Lampiran 3 Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Permukiman Perkotaan	**231**
Lampiran 4 Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Permukiman Nonperkotaan	**243**
Lampiran 5 Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Industri	**254**
Lampiran 6 Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Peruntukan Pertambangan (KPP)	**263**
Lampiran 7 Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Gunung Api Aktif	**274**
Lampiran 8 Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Giant Sea Wall (GSW)	**289**
Lampiran 9 Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir(PLTN	**302**
Lampiran 10 Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Geopark	**315**
Lampiran 11 Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK)	**328**
Lampiran 12 Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Cagar Alam Geologi (KCAG)	**339**
Lampiran 13 Petunjuk Teknis KGL untuk Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST)	**350**
Lampiran 14 Petunjuk Teknis Terpadu KGL dan Program Pemantauan untuk Kawasan PLTP	**362**
Lampiran 15 Petunjuk Teknis KGL untuk Karst Carbon Sink (KCS)	**378**
Lampiran 16 Petunjuk Teknis KGL Hulu-Tengah-Hilir untuk Pengendalian Banjir dan Pemanfaatan Ruang	**390**
Lampiran 17 Penerapan KGL Terpadu Skala Rinci untuk Kawasan Pengembangan Kota Baru	**400**
Tentang Penulis	**415**

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul Gambar/Bagan	Hal.
Gambar I.1	Bagan alir yang menunjukkan transformasi data geologi menjadi dasar keputusan ruang dan lingkungan.	**3**
Gambar 1.1	Skema posisi Kajian Geologi Lingkungan (KGL) dalam tata ruang, yang menunjukkan hubungan antara KRB Geologi, data geologi lingkungan, data pendukung, dan keluaran penilaian pemanfaatan ruang.	**10**
Gambar 1.2	Alur hubungan KRB Geologi, rencana tata ruang, Kajian Geologi Lingkungan (KGL), pemanfaatan ruang, dan pengendalian dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan.	**13**
Gambar 1.3	Contoh keluaran peta geologi tata lingkungan regional untuk pengembangan wilayah permukiman Provinsi Jawa Barat.	**14**
Gambar 2.1	Hubungan Geologi, Lingkungan, Faktor Pendukung, dan Faktor Kendala dalam Geologi Lingkungan.	**21**
Gambar 2.2	Posisi GTL sebagai jembatan antara ilmu, regulasi, dan keputusan ruang.	**25**
Gambar II.1	Bagan Alir yang menunjukkan peta jalan operasional Bagian II.	**37**
Gambar 4.1	Dari data geologi menuju rekomendasi operasional Geologi Tata Lingkungan.	**39**
Gambar 5.1	Alur metodologis KGL berbasis pemetaan dan analisis spasial.	**48**
Gambar 5.2	Prinsip Dasar Kajian Geologi Lingkungan dalam Penilaian Kesesuaian Lahan untuk Berbagai Peruntukan Ruang.	**48**
Gambar 5.3	Proses Penyelidikan Geologi Tata Lingkungan dari Pengumpulan Data hingga Sintesis Rekomendasi.	**50**
Gambar 5.4	Bagan alir yang menunjukkan peran Informasi Geologi Lingkungan dalam Pemanfaatan Ruang Kawasan Budidaya.	**52**
Gambar 5.5	Contoh proses tumpangsusun peta parameter dan hasil nilai kumulatif dalam Kajian Geologi Lingkungan di kawasan Jabodetabekpunjur untuk penilaian kelayakan regional Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST)	**56**
Gambar 5.6	Contoh peta arahan pemanfaatan ruang kawasan budidaya sebagai produk rencana tata ruang di Wilayah Jabodetabekpunjur.	**59**
Gambar 6.1	Alur KGL untuk air tanah, zona resapan, dan tata ruang.	**66**
Gambar 6.2	Contoh penyusunan peta potensi daerah resapan di wilayah Kota Batu, Malang, Provinsi Jawa Timur.	**69**
Gambar 6.3	Contoh peta potensi daerah resapan yang dilengkapi informasi penggunaan lahan, limpasan, dan infiltrasi di wilayah Kota Batu, Malang, Provinsi Jawa Timur.	**70**
Gambar 6.4	Contoh hubungan antara peta fungsi konservasi air tanah dan peta zona koefisien dasar bangunan (KDB) di Kawasan Puncak Bogor-Cianjur.	**73**
Gambar 6.5	Contoh Peta Zona Konservasi Air Tanah CAT Jakarta sebagai instrumen pengendalian pengambilan air tanah.	**76**
Gambar 7.1	Alur GTL untuk bahaya geologi dan pengendalian pemanfaatan ruang.	**80**
Gambar 7.2	Contoh peta geologi tata lingkungan yang memuat elemen pembatas, potensi, serta bahaya geologi dalam satu lembar peta.	**84**
Gambar 7.3	Peta Kawasan Rawan Bencana Kawah Timbang, Dataran Tinggi Dieng, sebagai dasar pengendalian pemanfaatan ruang.	**85**

No.	Judul Gambar/Bagan	Hal.
Gambar III.1	Peta jalan Bagian III: perlindungan nilai geologi dan pemanfaatan berkelanjutan.	**97**
Gambar 8.1	Contoh peta sebaran situs warisan geologi sebagai dasar identifikasi dan penetapan kawasan bernilai geologi untuk kepentingan penetapan sebagai Geopark Nasional maupun UNESCO Global Geopark.	**102**
Gambar 8.2	Contoh peta sebaran situs warisan geologi di Provinsi DI. Yogyakarta yang ditetapkan sebagai Kawasan Cagar Alam Geologi sebagai manifestasi dari perlindungan situs geologi.	**103**
Gambar 8.3	Contoh zonasi pengelolaan geosite untuk mendukung perlindungan dan pemanfaatan ruang pada kawasan bernilai geologi.	**104**
Gambar 9.1	Model geowisata berbasis Warisan Geologi.	**108**
Gambar 9.2	Ilustrasi kegiatan geowisata berbasis interpretasi Warisan Geologi. Seorang pemandu geowisata menjelaskan fenomena geologi berupa perlapisan batuan, litologi, dan struktur lipatan kepada peserta kunjungan lapangan.	**110**
Gambar 9.3	Contoh peta potensi objek geowisata Kawasan Panas Bumi Dieng.	**114**
Gambar 9.4	Contoh peta zonasi geosite Telaga Menjer.	**116**
Gambar IV.1	Alur pengantar Bagian IV: regulasi, analisis teknis, kelembagaan, dan keluaran operasional GTL.	**122**
Gambar 11.1	Alur Kajian Geologi Lingkungan untuk peruntukan lahan, kawasan, tapak, dan prasarana.	**133**
Gambar 11.2	Korelasi Peta Kemampuan Lahan Beraspek Geologi Lingkungan dengan Kelas Situs pada Kawasan Pengembangan Kota Baru Parahyangan, Kabupaten Bandung Barat.	**137**
Gambar 11.3	Contoh Peta Zona Konservasi Air Tanah CAT Jakarta sebagai dasar dokumen lingkungan dan pengendalian pemanfaatan ruang.	**144**
Gambar 11.4	Contoh Peta Kawasan Rawan Bencana Kawah Timbang, Dieng, sebagai dasar keputusan pemanfaatan ruang dan dokumen lingkungan.	**145**
Gambar 12.1	Alur kelembagaan, validasi, Pertimbangan Teknis GTL, dan Sistem Informasi GTL.	**150**
Gambar 12.2	Bagan Alir yang berkaitan dengan peran Geologi Tata Lingkungan dalam Sistem Penataan Ruang, Penataan Bangunan, dan Pengelolaan Lingkungan.	**150**
Gambar V.1	Bagan alir yang menunjukkan pembanding internasional menuju agenda penguatan GTL Indonesia.	**159**
Gambar 15.1	Bagan Alir Arah penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia.	**181**
Gambar 16.1	Kerangka keekonomian geologi lingkungan dalam Geologi Tata Lingkungan.	**186**
Gambar L1.1	Bagan Alir Pedoman Umum Kajian Geologi Lingkungan	**210**
Gambar L2.1	Bagan Alir Petunjuk teknis KGL untuk Daerah Resapan Air	**222**
Gambar L3.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Permukiman Perkotaan	**236**
Gambar L4.1	Bagan Alir Petunjuk teknis KGL untuk Kawasan Non Perkotaan	**246**
Gambar L5.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Industri	**254**
Gambar L6.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Peruntukan Pertambangan	**268**
Gambar L7.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Gunung Api Aktif	**274**
Gambar L8.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk tapak Giant Sea Wall	**289**

No.	Judul Gambar/Bagan	Hal.
Gambar L9.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Pembangkit Listrik tenaga Nuklir	**302**
Gambar L10.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan geopark	**315**
Gambar L11.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK)	**328**
Gambar L12.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Cagar Alam Geologi (KCAG)	**342**
Gambar L13.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST)	**350**
Gambar L14.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan PLTP	**365**
Gambar L15.1	Kerangka petunjuk teknis Karst Carbon Sink dalam Geologi Tata Lingkungan.	**378**
Gambar L15.2	Alur teknis kuantifikasi KCS dan integrasi ke tata ruang.	**381**
Gambar L15.3	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk KCS	**383**
Gambar L15.4	Peta administrasi dan lokasi kajian KCS wilayah Pangandaran dan Kecamatan Cigugur.	**386**
Gambar L15.5	Peta geologi daerah Pangandaran sebagai dasar pembacaan satuan karbonat dan kontrol geologi.	**387**
Gambar L15.6	Sebaran KBAK Pangandaran Blok Cigugur sebagai konteks lokasi pengukuran KCS.	**387**
Gambar L15.7	Contoh grafik CDR per mata air pada KBAK Pangandaran Blok Cigugur dan titik kontrol.	**388**
Gambar L15.8	Contoh grafik CSF per mata air pada KBAK Pangandaran Blok Cigugur dan titik kontrol.	**388**
Gambar L16.1	Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Pengendalian banjir Hulu-Hilir	**390**
Gambar L17.1	Bagan Alir penerapan KGL Terpadu Skala Rinci untuk Kawasan Pengembangan Kota Baru	**400**
Gambar L17.2	Keterkaitan studi kasus kota baru dengan berbagai petunjuk teknis GTL.	**403**
Gambar L17.3	Penyederhanaan bagan alir penerapan KGL terpadu pada skala rinci untuk kawasan pengembangan kota baru.	**405**
Gambar TP.1	Gambar TP.1. JEJAK KARYA DALAM PENGABDIAN “Kumpulan buku yang lahir dari hampir 38 tahun pengabdian di Badan Geologi, KESDM	
Gambar TP.2	Jejak Ilmu dan Safar Kehidupan	

DAFTAR TABEL

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel L.1	Peta jalan konseptual Bagian I.	3
Tabel 1.1	Posisi operasional GTL dalam ruang keputusan publik.	14
Tabel 2.1	Pembedaan istilah utama dalam kerangka GTL.	24
Tabel 3.1	Unsur lingkungan geologi dan implikasinya bagi GTL.	33
Tabel II.1	Peta jalan Bagian II.	37
Tabel 4.1	Hubungan konsep operasional dalam GTL	42
Tabel 5.1	Contoh perbedaan orientasi parameter menurut jenis kegiatan.	54
Tabel 5.2	Contoh hubungan parameter, indikator, skor, dan makna teknis dalam KGL.	55
Tabel 5.3	Pemeriksaan mutu metode pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial.	57
Tabel 5.4	Contoh metrik arahan Geologi Tata Lingkungan sebagai penjabaran teknis dari peta arahan pemanfaatan ruang kawasan budidaya	59
Tabel 6.1	Parameter utama penilaian air tanah dan zona resapan dalam KGL.	68
Tabel 6.2	Contoh penerjemahan kelas zona resapan ke dalam arahan tata ruang.	72
Tabel 6.3	Hubungan zona resapan dengan instrumen kebijakan.	74
Tabel 7.1	Jenis bahaya geologi dan implikasinya bagi pengendalian pemanfaatan ruang.	83
Tabel 7.2	Contoh Pembacaan Peta KRB Kawah Timbang untuk Pengendalian Pemanfaatan Ruang	87
Tabel 7.3	Penerjemahan tingkat bahaya ke dalam arahan pengendalian ruang.	89
Tabel 7.4	Penggunaan informasi bahaya geologi dalam instrumen kebijakan.	93
Tabel III.1	Peta jalan Bagian III.	97
Tabel 8.1	Perbedaan kedudukan instrumen kawasan bernilai geologi.	100
Tabel 8.2	Contoh penerjemahan nilai geologi ke dalam arahan pengendalian ruang.	105
Tabel 9.1	Komponen daya dukung dan daya elola geowisata.	109
Tabel 9.2	Model operasional geowisata berkelanjutan.	112
Tabel 9.3	Contoh matriks ITBX zonasi geosite Telaga Menjer.	116
Tabel 9.4	Contoh indikator pemantauan geowisata berbasis Warisan Geologi.	119
Tabel IV.1	Peta jalan Bagian IV: dari regulasi menuju instrumen operasional GTL.	121
Tabel 10.1	Kedudukan GTL sebagai instrumen teknis-regulatif.	125
Tabel 10.2	Integrasi GTL dalam tahapan penataan ruang.	125
Tabel 10.3	Hubungan GTL dengan perlindungan nilai dan fungsi geologi.	128
Tabel 10.4	Arsitektur regulasi dan instrumen operasional GTL.	129
Tabel 10.5	Arah penguatan regulasi GTL.	131
Tabel 11.1	Objek keputusan dan orientasi KGL.	134

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel 11.2	Orientasi KGL untuk kawasan PLTP sebagai pemanfaatan energi geologi.	**140**
Tabel 11.3	Parameter KGL menurut objek keputusan.	**141**
Tabel 11.4	Kelas kesesuaian dan implikasi rekomendasi KGL.	**141**
Tabel 11.5	Contoh Pemanfaatan Peta Air Tanah dan Peta KRB dalam Dokumen Lingkungan dan Keputusan Ruang	**146**
Tabel 12.1	Pemeriksaan mutu validasi KGL dan Kajian GTL.	**153**
Tabel 12.2	Unsur utama Pertimbangan Teknis GTL.	**154**
Tabel 12.3	Komponen Sistem Informasi GTL.	**154**
Tabel V.1	Peta jalan Bagian V.	**159**
Tabel 14.1	Ringkasan pembanding internasional yang relevan bagi GTL.	**173**
Tabel 14.2	Prinsip pembelajaran internasional untuk penguatan GTL Indonesia.	**174**
Tabel 15.1	Arah penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia.	**182**
Tabel 15.2	Agenda implementasi bertahap penguatan GTL Indonesia.	**182**
Tabel 16.1	Unsur lingkungan geologi sebagai modal alam dan sumber nilai ekonomi dalam GTL	**187**
Tabel 16.2	Spektrum nilai ekonomi geologi lingkungan dalam kerangka GTL	**188**
Tabel 16.3	Faktor pembatas sebagai informasi ekonomi dan dasar pengurangan kerugian	**189**
Tabel 16.4	Pembagian peran Bab 16 dan Petunjuk Teknis KCS dalam pengembangan keekonomian geologi lingkungan	**192**
Tabel 16.5	Integrasi keekonomian geologi lingkungan ke instrumen tata ruang dan pengelolaan lingkungan	**193**
Tabel LT.1	Peta hubungan lampiran teknis dengan bab utama buku GTL.	**207**
Tabel LT.2	Struktur baku pembacaan setiap lampiran.	**209**
Tabel L1.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**211**
Tabel L1.2	Daftar periksa awal pembaca	**211**
Tabel L1.3	Jenis data umum untuk analisis KGL	**213**
Tabel L1.4	Skala peta untuk tingkatan analisis KGL	**214**
Tabel L1.5	Jenis faktor dalam KGL	**215**
Tabel L1.6	Nilai skoring parameter	**215**
Tabel L1.7	Hirarki zona kesesuaian lahan dalam KGL	**216**
Tabel L1.8	Matriks ITBX dalam KGL	**216**
Tabel L1.9	Matriks generic hubungan zona dan ITBX	**217**
Tabel L2.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**219**
Tabel L2.2	Daftar periksa awal pembaca	**219**
Tabel L2.3	Istilah teknis dan pengertiannya	**220**
Tabel L2.4	Kelompok data dan rinciannya	**223**

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel L2.5	Tingkat kajian skala peta dan kegunaannya	**223**
Tabel L2.6	Parameter, bobot indikatif, dan dasar pertimbangan	**224**
Tabel L2.7	Nilai IPR Indikatif	**225**
Tabel L2.8	Klasifikasi zona resapan dan arah pemanfaatan	**225**
Tabel L2.9	Klasifikasi arahan KDB/BCR dan KDH	**227**
Tabel L2.10	Klasifikasi kekritisan zona resapan	**227**
Tabel L2.11	Klasifikasi zona resapan dan arahan rekayas	**227**
Tabel L2.12	Matriks ITBX Indikatif Daerah Resapan Air	**228**
Tabel L2.13	contoh struktur tabel hasil zona resapan air per administrasi	**210**
Tabel L2.14	Contoh struktur tabel rekomendasi KDB/BCR dan KDH	**210**
Tabel L2.15	Contoh daftar layer digital	**210**
Tabel L3.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**231**
Tabel L3.2	Daftar periksa awal pembaca	**231**
Tabel L3.3	Istilah teknis dan pengertian operasional	**232**
Tabel L3.4	Peringkat analisis dalam KGL permukiman perkotaan	**233**
Tabel L3.5	Data dan analisis dalam KGL permukiman perkotaan	**234**
Tabel L3.6	Komponen faktor daya dukung geologi dalam KGL permukiman perkotaan	**235**
Tabel L3.7	Komponen faktor bahaya geologi dalam KGL permukiman perkotaan	**237**
Tabel L3.8	Komponen faktor bahaya nongeologi dalam KGL permukiman perkotaan	**237**
Tabel L3.9	Bobot acuan faktor berpengaruh dalam KGL permukiman perkotaan	**238**
Tabel L3.10	Klasifikasi dan arah kesesuaian lahan dalam KGL permukiman perkotaan	**238**
Tabel L3.11	Zonasi dan ITBX dalam KGL permukiman perkotaan	**239**
Tabel L3.12	Arahan KDB dan KDH dalam KGL permukiman perkotaan	**240**
Tabel L3.13	Ketentuan khusus permukiman perkotaan pesisir	**240**
Tabel L3.14	Tahapan kegiatan dalam KGL permukiman perkotaan	**241**
Tabel L3.15	Pemantauan dalam KGL permukiman perkotaan	**242**
Tabel L4.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**243**
Tabel L4.2	Daftar periksa awal pembaca	**243**
Tabel L4.3	Istilah teknis dan pengertian operasional	**244**
Tabel L4.4	Satuan analisis KGL non-perkotaan	**245**
Tabel L4.5	Data Dasar Utama KGL Non Perkotaan	**247**
Tabel L4.6	Data Dasar Utama KGL Non Perkotaan	**248**
Tabel L4.7	Komponen Faktor Sumber Daya Geologi dalam KGL Non Perkotaan	**248**
Tabel L4.8	Komponen Faktor Bahaya Geologi dalam KGL Non Perkotaan	**249**

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel L4.9	Zona Kesesuaian Lahan dalam KGL Non Perkotaan	**250**
Tabel L4.10	Bobot Acuan Faktor-Faktor dalam KGL Non Perkotaan	**250**
Tabel L4.11	ITBX pada Zona Kesesuaian Lahan dalam KGL Non Perkotaan	**251**
Tabel L4.12	Jenis Keluaran dan Muatan Minimum dalam KGL Non Perkotaan	**252**
Tabel L5.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**255**
Tabel L5.2	Daftar periksa awal pembaca	**255**
Tabel L5.3	Kelompok data dan Informasi Dasar dalam KGL Kawasan Industri	**257**
Tabel L5.4	Parameter Utama dalam KGL Kawasan Industri	**258**
Tabel L5.5	Peran Faktor Kendala Geologi dalam KGL Kawasan Industri	**259**
Tabel L5.6	Peran Faktor Daya Dukung Geologi dalam KGL Kawasan Industri	**259**
Tabel L5.7	Bobot acuan faktor berpengaruh dalam KGL Kawasan Industri	**260**
Tabel L5.8	Makna Kelas Kesesuaian Lahan dalam KGL Kawasan Industri	**260**
Tabel L5.9	ITBX Kesesuaian Lahan dalam KGL Kawasan Industri	**261**
Tabel L6.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**263**
Tabel L6.2	Daftar periksa awal pembaca	**263**
Tabel L6.3	Aspek Berpengaruh dalam KGL KPP	**265**
Tabel L6.4	Kelompok Data dan Kegunaannya dalam KGL KPP	**266**
Tabel L6.5	Kriteria GL utama pada Kelompok Komoditas dalam KGL KPP	**266**
Tabel L6.6	Kriteria dan Penilaian dalam KGL KPP	**267**
Tabel L6.7	Parameter Daya Dukung dan Potensi Sumber Daya	**269**
Tabel L6.8	Parameter Bahaya dan Dampak Geologi Lingkungan	**269**
Tabel L6.9	Bobot acuan faktor faktor berpengaruh dalam KGL KPP	**270**
Tabel L6.10	ITBX pada kelas kesesuaian lahan dalam KGL KPP	**270**
Tabel L6.11	Arahan Zonasi ITBX dalam KGL KPP	**271**
Tabel L6.12	ITBX pada berbagai jenis kegiatan dalam KGL KPP	**271**
Tabel L6.13	Tahapan penentuan KPP dalam KGL	**272**
Tabel L7.1	Hubungan Petunjuk Teknis KGA Aktif dengan bab utama Buku GTL	**275**
Tabel L7.2	Istilah teknis kunci dalam KGL KGA Aktif.	**278**
Tabel L7.3	Prinsip dasar KGL pada kawasan gunung api aktif.	**278**
Tabel L7.4	Data minimum KGL KGA Aktif.	**279**
Tabel L7.5	Contoh faktor penyisih pada KGL KGA Aktif.	**280**
Tabel L7.6	Parameter utama yang dinilai dalam KGL KGA Aktif.	**281**
Tabel L7.7	Contoh skala penilaian parameter	**282**
Tabel L7.8	Tahapan pelaksanaan KGL KGA Aktif.	**282**

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel L7.9	Kelas kesesuaian ruang pada KGL KGA Aktif.	**283**
Tabel L7.10	Matriks ITBX indikatif pada kawasan gunung api aktif.	**284**
Tabel L7.11	Rekomendasi teknis menurut objek keputusan.	**284**
Tabel L7.12	Parameter pemantauan KGL KGA Aktif.	**286**
Tabel L7.13	Struktur laporan KGL KGA Aktif.	**286**
Tabel L7.14	Daftar periksa mutu KGL KGA Aktif.	**287**
Tabel L8.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**290**
Tabel L8.2	Daftar periksa awal pembaca	**290**
Tabel L8.3	Istilah dan pengertian operasional dalam KGL Giant Sea Wall (GSW)	**292**
Tabel L8.4	Komponen analisis dalam KGL GSW	**293**
Tabel L8.5	Kelompok data dalam KGL GSW	**293**
Tabel L8.6	Keluaran Tahap I dalam KGL GSW	**294**
Tabel L8.7	Obyek verifikasi dalam KGL GSW	**295**
Tabel L8.8	Faktor Daya Dukung Geologi	**295**
Tabel L8.9	Faktor Bahaya Geologi di wilayah Pesisir	**296**
Tabel L8.10	Bobot acuan faktor faktor penentu dalam KGL GSW	**297**
Tabel L8.11	Kelas, Makna Teknis, dan Tindak Lanjut pad Zona Kesesuaian Lahan	**297**
Tabel L8.12	Tipe rekomendasi dalam KGL GSW	**297**
Tabel L8.13	Pengaturan Zonasi dan matriks ITBX dalam KGL GSW	**298**
Tabel L8.14	Ketentuan khusus ruas pesisir dalam KGL GSW	**299**
Tabel L8.15	Metode pemantauan parameter dalam KGL GSW	**300**
Tabel L9.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**303**
Tabel L9.2	Daftar periksa awal pembaca	**303**
Tabel L9.3	Istilah dan pengertian operasional	**304**
Tabel L9.4	Lapis penilaian dan keluaran utama dalam KGL PLTN	**305**
Tabel L9.5	Parameter yang dinilai pada komponen utama dalam KGL PLTN	**306**
Tabel L9.6	Kelompok data dan informasi dasar dalam KGL PLTN	**306**
Tabel L9.7	Tahapan kegiatan dalam KGL PLTN	**306**
Tabel L9.8	Jenis kegiatan dalam KGL PLTN	**307**
Tabel L9.9	Kriteria eliminasi tahap 1 dalam KGL PLTN	**307**
Tabel L9.10	Studi kelayakan rinci dalam KGL PLTN	**308**
Tabel L9.11	Metode dan analisis kelayakan rinci dalam KGL PLTN	**308**
Tabel L9.12	Analisis Geologi teknik dalam KGL PLTN	**309**
Tabel L9.13	Analisis Hidrogeologi dalam KGL PLTN	**309**

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel L9.14	Klasifikasi kelayakan tapak dalam KGL PLTN	**310**
Tabel L9.15	Bobot indikatif faktor faktor penentu dalam KGL PLTN	**311**
Tabel L9.16	Kisi kisi rekomendasi teknis dalam KGL PLTN	**311**
Tabel L9.17	Acuan Matriks ITBX dalam KGL PLTN	**312**
Tabel L9.18	Volume, isi pokok, dan keluaran laporan dalam KGL PLTN	**312**
Tabel L9.19	Pengelolaan data geospasial dalam KGL PLTN	**313**
Tabel L9.20	Parameter dan metode indikatif dalam KGL PLTN	**313**
Tabel L10.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**316**
Tabel L10.2	Daftar periksa awal pembaca	**316**
Tabel L10.3	Istilah dan Pengertian Operasional	**317**
Tabel L10.4	Tahapan KGL untuk Kawasan Geopark	**318**
Tabel L10.5	Data dasar dan satuan analisis pada KGL Kawasan Geopark	**319**
Tabel L10.6	Penilaian parameter utama pada faktor berpengaruh dalam KGL Geopark	**320**
Tabel L10.7	Bobot acuan faktor faktor berpengaruh dalam KGL Geopark	**320**
Tabel L10.8	Klasifikasi Kesesuaian lahan dalam KGL Geopark	**321**
Tabel L10.9	Indikator minimum dan penilaian faktor faktor Geopark dalam KGL	**321**
Tabel L10.10	Indikator minimum dan penilaian faktor faktor Geopark dalam KGL	**322**
Tabel L10.11	Penilaian status lahan dan tata ruang dalam dalam KGL Geopark	**322**
Tabel L10.12	Penilaian tata Kelola dan pencapaian daerah dalam KGL Geopark	**323**
Tabel L10.13	Klasifikasi Kelayakan Geosite dalam KGL Geopark	**323**
Tabel L10.14	Pengaturan Zonasi dalam KGL Geopark	**323**
Tabel L10.15	Perlindungan Geosite melalui ITBX dalam KGL Geopark	**324**
Tabel L10.16	Integrasi produk KGL Geopark dalam Tata Ruang dan Pengelolaan lingkungan	**326**
Tabel L10.17	Pelaporan dan isi minimum dalam KGL Geopark	**326**
Tabel L10.18	Parameter Pemantauan dan indikator utama dalam KGL Geopark	**326**
Tabel L11.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	**329**
Tabel L11.2	Daftar periksa awal pembaca	**329**
Tabel L11.3	Istilah dan Makna Operasional	**331**
Tabel L11.4	Kerangka penilaian dalam KGL KBAK	**331**
Tabel L11.5	Jenis data, muatan minimum, dan kegunaan dalam KGL KBAK	**332**
Tabel L11.6	Jenis data, muatan minimum, dan kegunaan dalam KGL KBAK	**332**
Tabel L11.7	Indikator minimum parameter KBAK dalam KGL	**333**
Tabel L11.8	Bobot acuan faktor faktor penentu dalam KGL KBAK	**334**
Tabel L11.9	Kelas, makna teknis, dan tindak lanjut dalam KGL KBAK	**334**

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel L11.10	Arahan pengaturan zonasi KBAK dalam KGL	335
Tabel L11.11	Skala acuan skala peta dalam KGL KBAK	337
Tabel L11.12	Kelas, makna teknis, dan tindak lanjut dalam KGL KBAK	337
Tabel L11.13	LAMPIRAN: Format Checklist Inventarisasi KBAK	338
Tabel L11.14	LAMPIRAN: Format Matriks Keputusan Teknis KBAK	338
Tabel L12.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	339
Tabel L12.2	Daftar periksa awal pembaca	339
Tabel L12.3	Istilah dan definisi operasional	341
Tabel L12.4	Kerangka penilaian dalam KGL KCAG	341
Tabel L12.5	Jenis data dasar dalam KGL KCAG	343
Tabel L12.6	Penilaian parameter keunikan geologi dalam KGL KCAG	344
Tabel L12.7	Parameter, Indikator minimum, dan arah rekomendasi dalam KGL KCAG	344
Tabel L12.8	Parameter, Indikator minimum, dan makna teknis dalam KGL KCAG	345
Tabel L12.9	Penggunaan faktor Penyisih dalam KGL KCAG	345
Tabel L12.10	Pengaturan zonasi pada kelas kesesuaian lahan dalam KGL KCAG	345
Tabel L12.11	Matriks ITBX pada berbagai peruntukan ruang dalam KGL KCAG	346
Tabel L12.12	Ketentuan khusus dalam KGL KCAG	347
Tabel L12.13	Pemantauan dalam KGL KCAG	348
Tabel L12.14	A. Checklist Analisis KCAG	349
Tabel L12.15	B. Format Ringkas Rekomendasi Teknis	349
Tabel L13.1	Kedudukan lampiran dalam buku GTL	351
Tabel L13.2	Daftar periksa awal pembaca	351
Tabel L13.3	Istilah dan Pengertian Operasional	352
Tabel L13.4	Kerangka Penilaian Faktor Faktor Utama dalam KGL TPST	353
Tabel L13.5	Data Dasar Minimum dalam KGL TPST	353
Tabel L13.6	Skala Peta dalam KGL TPST	354
Tabel L13.7	Faktor penyisih Regional Dalam KGL TPST	354
Tabel L13.8	Penentuan Kelas Kelayakan Regional dalam KGL TPST	355
Tabel L13.9	Indikator minimum pada Parameter Utama dalam KGL TPST	356
Tabel L13.10	Penskoran dalam KGL TPST	356
Tabel L13.11	Pembobotan dalam KGL TPST	356
Tabel L13.12	Penilaian Kerentanan Pencemaran Air Tanah dalam KGL TPST	357
Tabel L13.13	Klasifikasi Zona Kesesuaian Lahan dalam KGL TPST	357
Tabel L13.14	Struktur Zona Operasional dalam KGL TPST	358

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel L13.15	Matriks ITBX acuan dalam KGL TPST	**358**
Tabel L13.16	Produk peta dan data digital dalam KGL TPST	**360**
Tabel L13.17	Validasi Teknis dalam KGL TPST	**360**
Tabel L14.1	Kedudukan Lampiran dalam Buku GTL.	**362**
Tabel L14.2	Istilah dan singkatan kunci.	**363**
Tabel L14.3	Tujuan dan penjelasan operasional Lampiran 14	**364**
Tabel L14.4	Prinsip analisis terpadu KGL dan sidik jari air PLTP.	**366**
Tabel L14.5	Kerangka penilaian terpadu kawasan PLTP	**366**
Tabel L14.6	Data minimum KGL dan pemantauan PLTP	**367**
Tabel L14.7	Tahapan pelaksanaan terpadu.	**367**
Tabel L14.8	Jenis titik pantau dan fungsi interpretasinya	**368**
Tabel L14.9	Kebutuhan baseline minimum	**368**
Tabel L14.10	Parameter lapangan minimum	**369**
Tabel L14.11	Parameter laboratorium yang disarankan	**369**
Tabel L14.12	Parameter penjelas sebab-akibat	**370**
Tabel L14.13	Format kode contoh air	**370**
Tabel L14.14	Analisis minimum dan bentuk penyajian	**370**
Tabel L14.15	Status indikasi perubahan	**371**
Tabel L14.16	Matriks telaah sebab-akibat	**371**
Tabel L14.17	Kelas kesesuaian kawasan PLTP dalam KGL	**372**
Tabel L14.18	Pilihan tindakan korektif	**372**
Tabel L14.19	Format komunikasi hasil	**373**
Tabel L14.20	Alur penanganan keluhan	**373**
Tabel L14.21	Jenis laporan.	**373**
Tabel L14.22	Daftar periksa mutu perencanaan program	**374**
Tabel L14.23	Daftar periksa mutu data lapangan.	**374**
Tabel L14.24	Daftar periksa mutu interpretasi	**375**
Tabel L14.25	Formulir Pengukuran berkala.	**375**
Tabel L14.26	Formulir Pengukuran berkala	**375**
Tabel L14.27	Formulir Rantai kendali contoh air	**376**
Tabel L14.28	Formulir Registrasi keluhan sumber air	**376**
Tabel L15.1	Istilah teknis dan pengertian operasional	**380**
Tabel L15.2	Implikasi pengelolaan dalam berbagai Aspek GTL dalam KGL KCS	**381**
Tabel L15.3	Jenis data minimum pada kelompok data utama dalam KGL KCS	**382**

No.	Judul Tabel	Hal.
Tabel L15.4	Tahapan pelaksanaan dalam KGL KCS	**383**
Tabel L15.5	Prinsip Klasifikasi dalam KGL KCS	**384**
Tabel L15.6	Arahan pemanfaatan ruang dalam KGL KCS	
Tabel L15.7	Bab laporan dan isi minimum dalam KGL KCS	**385**
Tabel L15.8	Validasi Teknis dalam KGL KCS	**386**
Tabel L15.9	Contoh ringkasan hasil CDR, CSF, dan nilai ekonomi karbon indikatif pada KBAK Pangandaran Blok Cigugur	**388**
Tabel L16.1	Kedudukan Lampiran 16 dalam Buku GTL	**391**
Tabel L16.2	Ruang lingkup Petunjuk Teknis KGL Hulu-Tengah-Hilir	**392**
Tabel L16.3	Bagan alur operasional Petunjuk Teknis KGL Hulu-Tengah-Hilir	**393**
Tabel L16.4	Matriks umum kondisi wilayah, risiko, dan arahan KGL	**396**
Tabel L16.5	Matriks intervensi teknis berbasis kondisi setempat	**397**
Tabel L16.6	Indikator pemantauan dan evaluasi petunjuk teknis	**398**
Tabel L17.1	Kedudukan lampiran studi kasus dalam buku GTL.	**401**
Tabel L17.2	Daftar periksa awal sebelum menggunakan lampiran studi kasus	**401**
Tabel L17.3	Data minimum untuk KGL terpadu skala rinci kawasan kota baru	**404**
Tabel L17.4	Parameter dan indikator utama KGL kota baru	**405**
Tabel L17.5	Pembacaan lintas-lampiran untuk studi kasus kawasan kota baru	**406**
Tabel L17.6	Penerjemahan kelas hasil sintesis ke keputusan pengembangan kota baru	**407**
Tabel L17.7	Contoh Pembacaan blok pengembangan Kota Baru Parahyangan	**408**
Tabel L17.8	Contoh arahan pemanfaatan dan pengendalian ruang skala blok	**409**
Tabel L17.9	Arahan umum KDB/BCR berbasis fungsi resapan dan pembatas geologi	**410**
Tabel L17.10	Prioritas validasi site plan dan aset kawasan	**411**
Tabel L17.11	Format laporan studi kasus KGL terpadu skala rinci	**412**

PROLOG

Dari Geologi Lingkungan Menuju Tata Ruang, Pengelolaan Lingkungan, dan Mitigasi Risiko Geologi

Setiap ruang memiliki dasar geologi. Di atas tanah, batuan, air tanah, dan bentang alam, manusia membangun permukiman, kota, jalan, kawasan industri, pusat ekonomi, dan berbagai prasarana kehidupan. Namun, ruang tidak pernah sepenuhnya kosong dan netral. Di dalamnya terdapat riwayat pembentukan, sifat fisik, proses alam, daya dukung, daya tampung, fungsi lingkungan, serta risiko yang perlu dipahami sebelum keputusan pembangunan diambil.

Geologi Lingkungan lahir dari kebutuhan untuk membaca hubungan antara bumi, manusia, dan lingkungan. Tanah, batuan, air tanah, lereng, bentuk lahan, struktur geologi, sumber daya geologi, bahaya geologi, dan nilai geologi tidak cukup dipahami sebagai data teknis yang berdiri sendiri. Semua unsur tersebut membentuk sistem ruang hidup yang menentukan apakah suatu kawasan dapat dikembangkan, perlu diberi syarat teknis, harus dikendalikan, atau perlu dilindungi.

Dalam konteks inilah Geologi Tata Lingkungan memperoleh maknanya. Ia menjadi langkah lanjut dari Geologi Lingkungan menuju tata ruang, pengelolaan lingkungan, konservasi geologi, dan mitigasi risiko geologi. Geologi Tata Lingkungan membantu menerjemahkan bahasa bumi menjadi arahan ruang: dari peta menuju rekomendasi, dari data menuju pertimbangan teknis, dan dari pemahaman ilmiah menuju keputusan pembangunan yang lebih bertanggung jawab.

Pembangunan yang tidak membaca kondisi geologi sejak awal dapat menimbulkan persoalan yang mahal, baik secara teknis, sosial, ekonomi, maupun lingkungan. Kawasan dengan daya dukung rendah dapat dipaksakan menjadi ruang terbangun. Daerah resapan dapat kehilangan fungsi. Air tanah dapat menurun kualitas dan ketersediaannya. Kawasan rawan bencana dapat menjadi tempat berkembangnya risiko. Kawasan bernilai geologi dapat kehilangan makna ilmiah, pendidikan, dan konservasinya. Sebaliknya, pembangunan yang memahami kondisi geologi sejak awal akan lebih mampu menyesuaikan diri dengan kemampuan dan batas alam.

Bagi Indonesia, kebutuhan ini sangat mendesak. Indonesia adalah negeri dengan dinamika geologi yang tinggi: gunung api aktif, gempa bumi, tsunami, gerakan tanah, kawasan karst, cekungan air tanah, dataran aluvial, kawasan pesisir, sumber daya geologi, dan warisan geologi hadir sebagai bagian dari ruang hidup masyarakat. Keragaman tersebut merupakan kekuatan, tetapi sekaligus menuntut kehati-hatian dalam menata ruang dan mengelola lingkungan.

Geologi Tata Lingkungan mengajak kita membaca bumi sebelum menata ruang. Ia menempatkan geologi bukan hanya sebagai ilmu yang menjelaskan masa lalu bumi, tetapi juga sebagai dasar untuk merancang masa depan ruang hidup. Dengan cara itu, pembangunan tidak hanya mengejar ketersediaan lahan dan pertumbuhan ekonomi, tetapi juga memperhatikan keselamatan, keberlanjutan, perlindungan lingkungan, dan keadaban dalam memperlakukan bumi.

Prolog ini mengantar pembaca untuk melihat buku ini sebagai ajakan berpikir: bahwa keputusan ruang perlu berakar pada pemahaman geologi, bahwa peta harus diterjemahkan menjadi tanggung jawab, dan bahwa pembangunan yang baik harus dimulai dari kemampuan membaca tanda-tanda bumi secara cermat, jujur, dan bertanggung jawab.

BAGIAN I

Fondasi Konseptual

Pengantar Bagian I

Bagian I perlu dibaca sebagai fondasi konseptual bagi seluruh lampiran teknis. Istilah, posisi ilmu, dan unsur lingkungan geologi yang dijelaskan pada bagian ini menjadi dasar agar setiap petunjuk teknis di akhir buku tidak dipahami sebagai prosedur lepas, melainkan sebagai penerapan dari cara pandang GTL terhadap ruang hidup.

Bagian I membangun fondasi konseptual Geologi Tata Lingkungan. Bagian ini menjelaskan mengapa keputusan pembangunan perlu bertumpu pada kondisi lingkungan geologi, bagaimana Geologi Lingkungan berkembang menjadi kerangka GTL, dan mengapa lingkungan geologi harus dipahami sebagai fondasi ruang hidup.

Alur Bagian I bergerak dari alasan kebutuhan GTL, menuju pembedaan istilah dan kedudukan keilmuan, lalu berakhir pada pemahaman unsur lingkungan geologi. Dengan demikian, pembaca memperoleh dasar untuk memahami mengapa data tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, bahaya geologi, dan nilai geologi harus masuk ke dalam keputusan ruang.

Bagian ini juga menegaskan bahwa GTL bukan sekadar tambahan administratif dalam perencanaan, melainkan perangkat sintesis yang menghubungkan ilmu geologi dengan tata ruang, lingkungan hidup, konservasi geologi, pengendalian risiko, dan pertimbangan teknis.

Bagi pembaca kebijakan, Bagian I berfungsi sebagai pintu masuk konseptual: geologi tidak hanya menjadi latar alamiah, tetapi menentukan batas aman, syarat teknis, peluang pemanfaatan, dan ruang yang perlu dilindungi.

Tabel I.1 Peta jalan konseptual Bagian I.

Bab	Fokus Utama	Pertanyaan Kunci	Keluaran Konseptual
Bab 1	Urgensi GTL	Mengapa GTL diperlukan dalam pembangunan Indonesia?	Alasan ilmiah, teknis, dan regulatif perlunya GTL.
Bab 2	Fondasi keilmuan dan istilah	Bagaimana hubungan Geologi Lingkungan, KGL, Kajian GTL, dan Pertimbangan Teknis GTL?	Arsitektur konsep dan posisi GTL sebagai jembatan ilmu, regulasi, dan keputusan ruang.
Bab 3	Lingkungan geologi	Apa unsur lingkungan geologi yang menentukan ruang hidup dan pemanfaatan lahan?	Dasar untuk memahami daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, dan syarat pemanfaatan.

Gambar I.1. Bagan alir yang menunjukkan transformasi data geologi menjadi dasar keputusan ruang dan lingkungan.

Dengan peta jalan tersebut, pembaca dapat mengikuti alur buku secara bertahap. GTL tidak dimulai dari produk administratif, melainkan dari kebutuhan untuk membaca lingkungan geologi sebagai dasar ruang hidup. Data geologi kemudian disintesis melalui KGL dan Kajian GTL agar dapat menghasilkan rekomendasi, syarat pemanfaatan, serta pertimbangan teknis yang dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan.

Mengapa Geologi Tata Lingkungan Diperlukan

Membaca bumi sebelum menata ruang

> Geologi Tata Lingkungan mengajak kita membaca bumi sebelum menata ruang. Tanah, batuan, air, lereng, sesar, dan bentang alam bukan sekadar latar pembangunan, melainkan bahasa alam yang menyimpan pesan tentang kemampuan, batas, dan kehati-hatian.
> Ruang yang baik bukan hanya ruang yang tampak kosong dan tersedia, tetapi ruang yang dipahami asal-usulnya, prosesnya, daya dukungnya, dan risikonya.
> Dari sinilah GTL berdiri: menjadikan ilmu geologi sebagai dasar kebijaksanaan dalam mengelola ruang hidup.

PRINSIP MEMBACA BUMI UNTUK MENATA RUANG

TANAH & BATUAN

Mengetahui jenis, sebaran, dan sifat batuan serta tanah sebagai dasar perencanaan.

AIR

Memahami aliran permukaan, air tanah, dan daerah resapan untuk menjaga ketersediaan dan kualitas air.

LERENG

Mengidentifikasi kemiringan, kepekaan lereng, dan potensi gerakan tanah.

SESAR & STRUKTUR

Mengenali sesar, rekahan, dan struktur geologi yang dapat memicu bahaya seismik dan deformasi.

DAYA DUKUNG

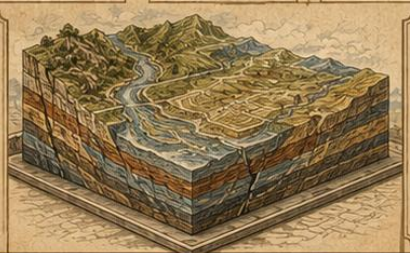
Menilai kemampuan lahan menopang kegiatan tanpa melebihi batas alamnya.

RISIKO

Mengantisipasi bahaya geologi untuk mengurangi kerugian dan melindungi kehidupan.

PROSES GTL

1. PENGAMATAN & PENGUMPULAN DATA
2. ANALISIS DAN INTERPRETASI
3. PENILAIAN DAYA DUKUNG & RISIKO
4. REKOMENDASI PENATAAN RUANG



TUJUAN GTL

- MERANCANG RUANG YANG AMAN DAN NYAMAN
- MENJAGA KESEIMBANGAN ALAM DAN PEMBANGUNAN
- MENGURANGI RISIKO DAN KERUGIAN
- MEWARISKAN RUANG HIDUP YANG BERKELANJUTAN

Setiap bentang alam memiliki cerita.
Tugas kita adalah mendengarkan, memahami, dan menatanya dengan bijak.

Ruang yang bijak lahir dari pembacaan bumi yang jujur.

BAB 1

Mengapa Geologi Tata Lingkungan Diperlukan

1.1 Pengantar

Geologi Tata Lingkungan diperlukan karena pembangunan pada dasarnya selalu berlangsung di atas, di dalam, dan melalui lingkungan geologi. Setiap keputusan mengenai permukiman, kawasan industri, pertambangan, infrastruktur, kawasan pesisir, daerah resapan air, tempat pengolahan sampah, kawasan konservasi, Geopark, maupun tapak fasilitas strategis selalu berhadapan dengan kondisi tanah, batuan, bentuk lahan, air tanah, air permukaan, proses geologi, sumber daya geologi, dan bahaya geologi. Dengan demikian, geologi tidak hanya menyediakan latar alamiah bagi pembangunan, tetapi juga menentukan batas aman, syarat teknis, dan daya dukung ruang.

Dalam tradisi environmental geology, geologi dipahami sebagai ilmu yang menjelaskan hubungan antara proses bumi, sumber daya, bahaya, dan aktivitas manusia. Keller menempatkan environmental geology sebagai bidang yang menghubungkan proses geologi dengan persoalan lingkungan dan kehidupan manusia, termasuk bahaya alam, sumber daya air, pencemaran, penggunaan lahan, pengelolaan limbah, serta kebijakan lingkungan. Pandangan yang sama juga tampak dalam Montgomery, yang menempatkan geologi sebagai dasar untuk memahami dampak kegiatan manusia terhadap sistem bumi dan sebaliknya. Dalam kerangka tersebut, Geologi Tata Lingkungan dapat dipahami sebagai pengembangan operasional dari geologi lingkungan untuk mendukung keputusan ruang dan lingkungan.

Bagi Indonesia, kebutuhan terhadap GTL menjadi semakin penting karena kondisi geologi nasional sangat dinamis dan beragam. Indonesia memiliki rangkaian gunung api aktif, wilayah seismik, kawasan pesisir yang berubah cepat, cekungan air tanah, bentang alam karst, dataran aluvial, daerah pegunungan, kawasan rawan gerakan tanah, serta wilayah dengan nilai warisan geologi yang tinggi. Kondisi tersebut menyediakan sumber daya sekaligus pembatas. Oleh karena itu, tata ruang dan pembangunan tidak cukup hanya didasarkan pada kebutuhan ekonomi, administratif, atau ketersediaan lahan, tetapi harus memperhitungkan kemampuan lingkungan geologi untuk mendukung dan menerima kegiatan manusia.

Bab ini menjelaskan mengapa GTL diperlukan sebagai kerangka keilmuan, teknis, dan kebijakan. Pembahasan dimulai dari posisi Indonesia sebagai ruang hidup geologi yang dinamis, kemudian dilanjutkan dengan peran geologi sebagai faktor pendukung dan pembatas pembangunan. Setelah itu, bab ini menjelaskan adanya kesenjangan antara data geologi dan keputusan ruang, perbedaan antara Geologi Lingkungan dan Geologi Tata Lingkungan, serta posisi GTL dalam tata ruang, lingkungan hidup, dan pengendalian risiko geologi.

1.2 Indonesia sebagai Ruang Hidup Geologi yang Dinamis

Indonesia merupakan wilayah kepulauan yang terbentuk oleh proses geologi aktif dan kompleks. Interaksi lempeng tektonik, aktivitas gunung api, pembentukan cekungan sedimen, proses pelapukan tropis, dinamika pesisir, serta perubahan hidrologi membentuk kondisi geologi yang sangat beragam. Keragaman tersebut tidak hanya terlihat pada batuan dan bentuk lahan, tetapi juga pada sistem air tanah, sumber daya mineral, panas bumi, kawasan bernilai geologi, serta potensi bahaya geologi.

Dalam perspektif environmental geology, ruang hidup manusia tidak dapat dipisahkan dari kondisi geologi tempat manusia bermukim dan beraktivitas. Keller menjelaskan bahwa proses geologi memengaruhi kehidupan manusia melalui sumber daya, bahaya, kualitas lingkungan, dan perubahan bentang alam. Bell juga menekankan bahwa aspek geologi perlu dipahami dalam perencanaan karena kondisi tanah, batuan, kemiringan lereng, air tanah, dan bahaya geologi dapat menentukan kelayakan suatu lokasi untuk berbagai kegiatan pembangunan.

Kondisi ini sangat nyata di Indonesia. Kawasan dataran aluvial dapat menarik bagi permukiman dan kegiatan ekonomi karena relatif datar dan mudah dikembangkan, tetapi pada saat yang sama dapat memiliki keterbatasan daya dukung, risiko banjir, penurunan muka tanah, atau likuefaksi. Kawasan pesisir dapat menjadi pusat pelabuhan, industri, dan kota pantai, tetapi juga menghadapi ancaman abrasi, rob, intrusi air asin, perubahan garis pantai, serta penurunan muka tanah. Kawasan pegunungan dapat memiliki sumber air, bentang alam, dan potensi geowisata, tetapi juga dapat berhadapan dengan gerakan tanah, erosi, dan keterbatasan akses.

Dengan demikian, ruang di Indonesia perlu dibaca sebagai ruang geologi. Pembacaan ini tidak hanya menyangkut inventarisasi unsur geologi, tetapi juga penilaian mengenai bagaimana unsur-unsur tersebut memengaruhi pemanfaatan ruang. Di sinilah GTL menjadi penting. GTL membantu menerjemahkan data geologi menjadi informasi yang dapat digunakan untuk menilai kesesuaian ruang, menentukan syarat pemanfaatan, membatasi kegiatan tertentu, serta melindungi kawasan yang memiliki fungsi lingkungan geologi penting.

Rujukan Indonesia memperlihatkan bahwa pendekatan seperti ini telah lama berkembang dalam praktik geologi lingkungan. Studi Geologi Lingkungan Cekungan Bandung, misalnya, menunjukkan bahwa kondisi geologi, air tanah, penggunaan lahan, kawasan resapan, banjir, dan perkembangan wilayah perlu dibaca secara terpadu dalam pengelolaan ruang kawasan perkotaan dan sekitarnya (Oktariadi et al., 2021). Suhari (1993) juga telah menunjukkan bahwa geologi lingkungan dapat digunakan untuk mendukung penggunaan lahan dan perencanaan regional di Cekungan Bandung. Dua rujukan tersebut memperlihatkan bahwa gagasan GTL memiliki dasar empiris yang kuat dalam pengalaman Indonesia.

1.3 Geologi sebagai Faktor Pendukung Pembangunan

> *Geologi menyediakan berbagai faktor pendukung pembangunan. Air tanah mendukung kebutuhan domestik, industri, pertanian, dan pelayanan publik. Tanah dan batuan menjadi dasar bangunan, jalan, bendungan, kawasan industri, permukiman, dan prasarana lain. Mineral, batubara, minyak, gas bumi, dan panas bumi menjadi bagian dari sumber daya strategis. Bentang alam tertentu memiliki nilai estetika, pendidikan, konservasi, dan pariwisata. Kawasan yang memiliki nilai geologi penting dapat menjadi dasar pengembangan Warisan Geologi, Kawasan Cagar Alam Geologi, Geopark, dan geowisata.*

Dalam environmental geology, sumber daya geologi tidak hanya dipandang sebagai komoditas, tetapi sebagai bagian dari sistem lingkungan. Flawn menempatkan environmental geology dalam kaitannya dengan konservasi, perencanaan penggunaan lahan, dan pengelolaan sumber daya. Pandangan ini penting karena pemanfaatan sumber daya geologi harus selalu dipertimbangkan bersama daya dukung, daya

tampung, risiko, dan keberlanjutan fungsi lingkungan geologi. Artinya, geologi mendukung pembangunan, tetapi dukungan tersebut memiliki batas dan syarat.

Pada konteks Indonesia, air tanah merupakan contoh penting. Air tanah tersedia karena adanya sistem geologi dan hidrogeologi tertentu, seperti akuifer, daerah imbuhan, daerah lepasan, sifat batuan, struktur geologi, dan hubungan air tanah dengan air permukaan. Fetter menjelaskan bahwa perilaku air tanah sangat dipengaruhi oleh sifat akuifer, aliran air tanah, kualitas air, dan hubungan antara sistem hidrogeologi dengan kegiatan manusia. Hiscock dan Bense juga menegaskan pentingnya pemahaman hidrogeologi dalam pengelolaan sumber daya air tanah secara berkelanjutan. Karena itu, pengelolaan ruang yang tidak memperhatikan fungsi imbuhan dan perlindungan air tanah dapat menurunkan keberlanjutan sumber daya air.

Geologi juga mendukung pengembangan kawasan bernilai geologi. Buku Warisan Geologi Nusantara menunjukkan bahwa keragaman geologi Indonesia memiliki nilai ilmiah, pendidikan, estetika, budaya, konservasi, dan ekonomi berkelanjutan (Oktariadi dan Suhendar, 2020). Dalam perspektif geodiversity dan geoheritage, Gray menegaskan bahwa keragaman unsur abiotik merupakan bagian penting dari alam yang perlu dikenali, dinilai, dan dilindungi. Brilha juga menekankan pentingnya inventarisasi dan penilaian geosite serta geodiversity site untuk mendukung konservasi dan pengelolaan kawasan bernilai geologi. Dengan demikian, geologi bukan hanya dasar fisik pembangunan, tetapi juga modal pengetahuan dan identitas wilayah.

Peran pendukung geologi akan optimal apabila data geologi digunakan sejak tahap perencanaan. Ellison et al. menunjukkan bahwa informasi geologi lingkungan dapat disajikan untuk mendukung land use planning, development, dan conservation. Informasi tersebut menjadi lebih bermanfaat apabila dikemas dalam bentuk peta tematik, peta sintesis, dan rekomendasi yang dapat dipahami oleh perencana dan pengambil keputusan. Dalam kerangka GTL, prinsip ini diterjemahkan menjadi kebutuhan untuk menyusun Informasi GTL dan Kajian GTL yang dapat digunakan dalam RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, perizinan sektor, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

1.4 Geologi sebagai Faktor Pembatas Pembangunan

Selain menjadi faktor pendukung, geologi juga menjadi faktor pembatas pembangunan. Faktor pembatas dapat berasal dari bahaya geologi, keterbatasan daya dukung tanah dan batuan, kerentanan air tanah, fungsi resapan yang harus dijaga, kawasan lindung geologi, kawasan bernilai geologi, atau kondisi geomorfologi yang tidak sesuai untuk kegiatan tertentu. Dalam Kajian Geologi Lingkungan, faktor pembatas harus dikenali secara jelas karena menentukan apakah suatu kegiatan dapat dilakukan, dapat dilakukan dengan syarat, perlu dibatasi, atau tidak direkomendasikan.

Bell menegaskan bahwa kondisi geologi dapat memengaruhi kelayakan lokasi untuk pembangunan, baik dari aspek fondasi, kestabilan lereng, air tanah, bahaya alam, maupun dampak kegiatan manusia terhadap lingkungan. Dalam konteks geologi teknik, Bell juga menunjukkan bahwa setiap pekerjaan rekayasa harus mempertimbangkan kondisi tanah dan batuan tempat bangunan atau prasarana akan ditempatkan. Pandangan ini relevan bagi GTL karena pembangunan kawasan, tapak strategis, dan prasarana lingkungan memerlukan penilaian geologi sejak tahap perencanaan.

Bahaya geologi merupakan salah satu faktor pembatas yang paling penting. Hyndman dan Hyndman menjelaskan bahwa bahaya alam menjadi bencana ketika proses alam berinteraksi dengan manusia, infrastruktur, dan kegiatan ekonomi. Dengan demikian, bahaya geologi tidak cukup hanya dipetakan sebagai fenomena alam; bahaya tersebut harus dikaitkan dengan pemanfaatan ruang, kerentanan, kapasitas, dan rencana pengurangan risiko. Bathrellos menekankan bahwa perencanaan penggunaan lahan dapat menjadi instrumen penting untuk mengurangi risiko bahaya alam karena perencanaan dapat membedakan area yang lebih aman, area yang memerlukan syarat teknis, dan area yang seharusnya dihindari untuk kegiatan tertentu.

Di Indonesia, hubungan antara bahaya geologi dan tata ruang sangat penting karena banyak wilayah pembangunan berada pada kawasan rawan gempa bumi, tsunami, letusan gunung api, gerakan tanah, likuefaksi, banjir yang dipengaruhi kondisi geologi, penurunan muka tanah, atau intrusi air asin. Jika data bahaya geologi tidak digunakan dalam perencanaan, maka tata ruang dapat meningkatkan paparan risiko. Sebaliknya, apabila data bahaya geologi diintegrasikan ke dalam GTL, maka hasilnya dapat digunakan untuk menyusun rekomendasi kesesuaian ruang, arahan mitigasi, ketentuan khusus dalam peraturan zonasi, dan parameter pemantauan.

Faktor pembatas juga dapat berasal dari fungsi lingkungan geologi yang harus dipertahankan. Daerah resapan air, kawasan perlindungan air tanah, KBAK, KCAG, kawasan rawan bencana geologi, dan kawasan bernilai geologi tertentu tidak dapat diperlakukan sama seperti lahan biasa. Kawasan-kawasan tersebut memiliki fungsi tertentu yang perlu dilindungi atau dikendalikan pemanfaatannya. Oleh karena itu, GTL diperlukan untuk menempatkan faktor pembatas bukan sebagai penghalang pembangunan semata, melainkan sebagai dasar untuk mengarahkan pembangunan agar tetap aman dan berkelanjutan.

1.5 Kesenjangan antara Data Geologi dan Keputusan Ruang

Salah satu persoalan mendasar dalam pembangunan wilayah adalah adanya kesenjangan antara ketersediaan data geologi dan penggunaannya dalam keputusan ruang. Data geologi dasar, peta hidrogeologi, peta geologi teknik, peta bahaya geologi, data air tanah, data kawasan lindung geologi, dan informasi warisan geologi sering tersedia di lembaga teknis, tetapi belum selalu menjadi bagian yang kuat dalam proses penyusunan RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, persetujuan atau perizinan sektor, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Kesenjangan tersebut dapat terjadi karena beberapa sebab. Pertama, data geologi sering disusun dalam format teknis yang tidak mudah langsung digunakan oleh perencana ruang atau pengambil keputusan. Kedua, skala peta geologi tidak selalu sesuai dengan kebutuhan perencanaan rinci. Ketiga, data geologi sektoral belum selalu disintesis menjadi informasi yang menunjukkan kesesuaian, pembatas, syarat pemanfaatan, dan rekomendasi tindak lanjut. Keempat, belum selalu tersedia mekanisme validasi dan pertimbangan teknis yang menjamin bahwa kajian pihak lain memenuhi standar data, metode, dan skala.

Ellison et al. menekankan bahwa agar berguna bagi perencanaan, informasi geologi lingkungan perlu disajikan dalam bentuk yang operasional, termasuk peta dan penjelasan yang menunjukkan sumber daya, kendala, dan implikasi bagi pengembangan. Bell juga menunjukkan bahwa peta geologi lingkungan dan peta potensi bahaya dapat menjadi instrumen penting dalam perencanaan, terutama apabila informasi geologi diterjemahkan ke dalam istilah yang dapat digunakan oleh perencana. Dalam kerangka GTL, gagasan ini berarti bahwa data geologi perlu diolah menjadi Informasi GTL, Kajian GTL, peta rekomendasi, dan pertimbangan teknis.

Kesenjangan data dan keputusan ruang juga terlihat dalam konteks peraturan perundang-undangan. Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 menempatkan penataan ruang sebagai sistem perencanaan, pemanfaatan, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2021 memperkuat penyelenggaraan penataan ruang, termasuk perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pengawasan, pembinaan, dan kelembagaan. Namun, agar ketentuan tersebut berjalan efektif pada kawasan yang memiliki pembatas geologi, diperlukan data dan kajian geologi yang dapat masuk ke dalam proses teknis penataan ruang. GTL dapat mengisi ruang tersebut sebagai instrumen sintesis dan pertimbangan teknis.

Dalam hal lingkungan hidup, KLHS dan dokumen lingkungan juga membutuhkan informasi mengenai daya dukung, daya tampung, risiko, dan dampak kegiatan terhadap tanah, batuan, air, bentuk lahan, dan kawasan lindung. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 dan peraturan pelaksanaannya menempatkan pencegahan kerusakan lingkungan sebagai bagian penting dari

perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. GTL dapat membantu menyediakan dasar geologi bagi penilaian tersebut, terutama pada kegiatan yang berpotensi mengubah kondisi fisik lahan, tata air, kestabilan lahan, atau kualitas lingkungan geologi.

Dengan demikian, GTL diperlukan bukan karena data geologi tidak ada, tetapi karena data tersebut perlu disintesis, divalidasi, dan dihubungkan dengan sistem pengambilan keputusan. Tanpa GTL, data geologi berisiko tetap berada dalam ruang teknis yang terpisah. Dengan GTL, data tersebut dapat menjadi dasar kebijakan, rencana, program, dan kegiatan yang lebih aman dan dapat dipertanggungjawabkan.

1.6 Dari Geologi Lingkungan menuju Geologi Tata Lingkungan

Geologi Lingkungan merupakan basis keilmuan yang menjelaskan hubungan antara kondisi geologi, proses geologi, lingkungan hidup, dan aktivitas manusia. Dalam pengertian ini, Geologi Lingkungan mencakup kajian mengenai tanah, batuan, bentuk lahan, air tanah, proses geologi, sumber daya, bahaya, pencemaran, penggunaan lahan, serta dampak kegiatan manusia terhadap lingkungan geologi. Keller, Montgomery, serta Pipkin et al. menempatkan environmental geology sebagai bidang yang menghubungkan sistem bumi dengan masalah lingkungan dan sosial.

Geologi Tata Lingkungan bergerak satu langkah lebih operasional. GTL menggunakan dasar-dasar Geologi Lingkungan untuk menilai kesesuaian ruang, daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, bahaya geologi, fungsi lindung, dan syarat pemanfaatan ruang. Dengan kata lain, Geologi Lingkungan menjelaskan hubungan ilmiah antara geologi dan lingkungan, sedangkan GTL menerjemahkan hubungan tersebut ke dalam perangkat perencanaan, rekomendasi, validasi, dan pengendalian.

Perbedaan ini perlu ditegaskan karena dalam praktik sering terjadi pencampuran istilah antara Geologi Lingkungan, Kajian Geologi Lingkungan, dan Geologi Tata Lingkungan. Dalam buku ini, Geologi Lingkungan ditempatkan sebagai basis ilmu dan data. Kajian Geologi Lingkungan ditempatkan sebagai metode teknis-operasional yang mencakup inventarisasi, analisis, evaluasi, dan pengendalian dampak geologi. Geologi Tata Lingkungan ditempatkan sebagai kerangka operasional-regulatif yang menggunakan data dan hasil KGL untuk mendukung tata ruang, lingkungan hidup, pembangunan kawasan, konservasi geologi, dan pengendalian risiko.

Dengan pemahaman tersebut, KGL dapat diposisikan sebagai instrumen teknis-operasional dalam sistem GTL. KGL menghasilkan peta tematik, peta sintesis, kelas kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, arahan mitigasi, dan matriks ITBX. GTL menggunakan hasil tersebut untuk memperkuat keputusan ruang dan lingkungan. Karena itu, kerangka GTL dan pedoman teknis KGL perlu dibaca sebagai satu kesatuan kerja berjenjang: GTL memberi kerangka sintesis dan koordinasi, sedangkan KGL memberi tata cara teknis pelaksanaan.

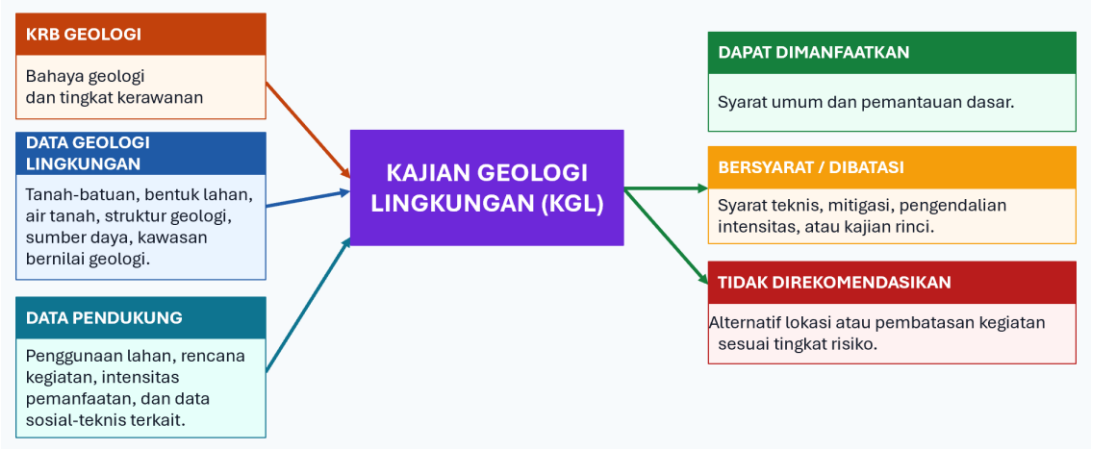
Pandangan ini juga sejalan dengan pengalaman Indonesia dalam penyusunan pedoman dan kajian geologi lingkungan. Geologi Lingkungan Cekungan Bandung memperlihatkan bahwa kajian geologi lingkungan tidak berhenti pada inventarisasi data, tetapi dapat menghasilkan rekomendasi pengelolaan ruang, perlindungan air tanah, mitigasi bahaya, dan pengendalian pemanfaatan kawasan (Oktariadi et al., 2021). Dengan demikian, GTL dapat dipahami sebagai penguatan terhadap praktik yang telah berkembang, bukan sebagai konsep yang sepenuhnya baru.

1.7 Posisi GTL dalam Tata Ruang

Dalam tata ruang, GTL berfungsi sebagai dasar teknis untuk menilai apakah suatu wilayah sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, tidak sesuai, atau memerlukan kajian lanjutan untuk pemanfaatan tertentu. Penilaian tersebut tidak hanya didasarkan pada status ruang, tetapi juga pada kondisi lingkungan geologi. Parameter yang dipertimbangkan dapat mencakup tanah dan batuan, kemiringan lereng, bentuk lahan, air tanah, air permukaan, fungsi resapan, bahaya geologi, kawasan lindung geologi, penggunaan lahan, serta rencana kegiatan.

Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 dan Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2021 memberikan kerangka umum bagi penyelenggaraan penataan ruang. Namun, pengambilan keputusan pada kawasan yang memiliki pembatas geologi memerlukan informasi teknis yang lebih rinci. Dalam hal ini, GTL dapat menjadi jembatan antara peta geologi dan pengaturan zonasi. Informasi GTL dapat digunakan untuk menyusun ketentuan kegiatan dan penggunaan lahan, ketentuan intensitas pemanfaatan ruang, ketentuan prasarana, ketentuan khusus, serta persyaratan teknis.

Posisi tersebut dapat dipahami melalui flowchart pada gambar berikut. Flowchart ini menunjukkan bahwa Kajian Geologi Lingkungan (KGL) merupakan inti proses penilaian teknis dalam GTL. KGL menerima masukan dari KRB Geologi yang memberikan informasi mengenai bahaya geologi dan tingkat kerawanan, dari data geologi lingkungan yang memuat kondisi tanah-batuan, bentuk lahan, air tanah, struktur geologi, sumber daya, dan kawasan bernilai geologi, serta dari data pendukung seperti penggunaan lahan, rencana kegiatan, intensitas pemanfaatan, dan data sosial-teknis terkait. Berdasarkan integrasi ketiga kelompok data tersebut, KGL menghasilkan arahan apakah suatu ruang dapat dimanfaatkan, dimanfaatkan dengan syarat atau pembatasan tertentu, atau tidak direkomendasikan untuk kegiatan yang direncanakan.



Gambar 1.1. Skema posisi Kajian Geologi Lingkungan (KGL) dalam tata ruang, yang menunjukkan hubungan antara KRB Geologi, data geologi lingkungan, data pendukung, dan keluaran penilaian pemanfaatan ruang.

Penelitian kesesuaian lahan berbasis GIS dan multi-criteria decision analysis memperlihatkan bahwa penilaian lahan dapat dilakukan dengan menggabungkan berbagai parameter fisik, lingkungan, dan sosial. Luan et al. (2021) menunjukkan penggunaan pendekatan GIS-based soft computing untuk menilai kesesuaian lahan perkotaan. Yan et al. (2021) memperlihatkan pentingnya sistem indeks dan teknologi GIS dalam evaluasi kesesuaian lahan perkotaan. Puntsag (2014) serta Suthar et al. (2024) memperkuat bahwa weighted overlay, GIS, dan pendekatan multi-kriteria dapat digunakan sebagai alat bantu keputusan penggunaan lahan, sepanjang parameter, bobot, dan skala analisis dijelaskan secara transparan. Bagi KGL, rujukan tersebut memperkuat kebutuhan

metode yang terbuka, dapat dijelaskan, dapat diuji, dan tetap dikendalikan oleh penalaran geologi.

Dalam praktik Indonesia, berbagai studi kesesuaian lahan berbasis geologi lingkungan juga telah dilakukan. Ahmad et al. menilai kesesuaian lahan untuk permukiman berdasarkan aspek geologi lingkungan di Pangandaran. Umar et al. menilai arahan peruntukan permukiman berdasarkan kriteria geologi. Ilham et al. menggunakan pendekatan geologi lingkungan untuk menyusun rekomendasi pengembangan kawasan. Kudiai et al. menggunakan parameter batuan, lereng, bahaya geologi, potensi air tanah, struktur geologi, dan curah hujan dalam penilaian kesesuaian permukiman. Studi-studi tersebut memperlihatkan bahwa KGL memiliki dasar penerapan yang cukup kuat dalam konteks Indonesia.

Dengan demikian, dalam tata ruang, GTL tidak hanya berfungsi sebagai pelengkap informasi geologi, tetapi sebagai instrumen sintesis yang membantu menerjemahkan data bahaya geologi, data geologi lingkungan, dan data pendukung lainnya menjadi keputusan pemanfaatan ruang yang lebih aman, terkendali, dan dapat dipertanggungjawabkan.

1.8 Posisi GTL dalam Lingkungan Hidup dan Dokumen Lingkungan

GTL juga diperlukan dalam pengelolaan lingkungan hidup karena banyak kegiatan pembangunan berpotensi mengubah kondisi tanah, batuan, tata air, bentuk lahan, kestabilan kawasan, dan kualitas air. Kegiatan permukiman, industri, pertambangan, TPST, prasarana pesisir, reklamasi, dan pembangunan fasilitas strategis dapat menimbulkan dampak yang perlu dinilai sejak awal. Informasi geologi lingkungan dapat membantu mengidentifikasi pembatas utama, potensi dampak, kebutuhan mitigasi, serta parameter pemantauan.

Dalam environmental geology, hubungan antara pembangunan dan lingkungan tidak hanya dilihat dari pencemaran, tetapi juga dari perubahan sistem fisik. Bell menekankan bahwa perencanaan lingkungan perlu mempertimbangkan kondisi geologi, bahaya, sumber daya, limbah, dan dampak kegiatan manusia. Dalam konteks KGL, hal ini berarti bahwa dokumen lingkungan perlu didukung oleh penilaian geologi yang memadai, terutama untuk kegiatan yang menimbulkan tekanan terhadap tanah, air, bentuk lahan, atau kawasan lindung geologi.

Salah satu contoh penting adalah kegiatan yang berpotensi mencemari tanah dan air tanah. Kajian kerentanan air tanah seperti DRASTIC dan modifikasinya dapat digunakan untuk membantu menilai seberapa rentan suatu kawasan terhadap kontaminasi. Bera et al. (2021) menggunakan model DRASTIC berbasis GIS untuk menilai kerentanan air tanah terhadap kontaminasi pertanian di Nangasai River Basin, India. Barbulescu (2020) mengulas metode DRASTIC dan turunannya, termasuk kekuatan dan keterbatasannya. Kozlowski et al. (2019) menunjukkan bahwa penggunaan lahan dapat dimasukkan ke dalam model DRASTIC termodifikasi agar hasilnya lebih relevan untuk perencanaan. Rujukan tersebut penting bagi KGL, terutama untuk TPST, kawasan industri, permukiman, dan daerah resapan air.

Dengan memasukkan GTL ke dalam KLHS dan dokumen lingkungan, proses penilaian lingkungan menjadi lebih lengkap. KLHS dapat menggunakan informasi GTL untuk menilai daya dukung, daya tampung, risiko geologi, fungsi resapan, dan kawasan lindung geologi dalam kebijakan, rencana, dan program. Dokumen lingkungan dapat menggunakan Kajian GTL untuk menyusun syarat teknis, rencana pengelolaan, rencana pemantauan, dan rekomendasi tindak lanjut. Dengan demikian, GTL membantu menjadikan perlindungan lingkungan hidup lebih berbasis data geologi.

1.9 Posisi GTL dalam Pengendalian Risiko Geologi

Pengendalian risiko geologi memerlukan hubungan yang jelas antara data bahaya, rencana pemanfaatan ruang, syarat teknis, dan pemantauan. GTL tidak menggantikan rezim kebencanaan geologi, tetapi menggunakan Data Bahaya Geologi, Peta Kawasan Rawan Bencana Geologi, dan rekomendasi teknis kebencanaan sebagai rujukan dalam menilai kesesuaian

pemanfaatan ruang. Dengan demikian, kebencanaan geologi memberikan batas risiko, sedangkan GTL membantu menerjemahkan batas tersebut ke dalam pengaturan ruang dan syarat pemanfaatan.

Konsep ini sejalan dengan literatur natural hazards and land use. Kajian mengenai natural hazards and land use menekankan bahwa pengurangan risiko tidak cukup dilakukan melalui respons darurat, tetapi juga melalui pengaturan penggunaan lahan. Bathrellos menegaskan bahwa perencanaan penggunaan lahan dapat mengurangi risiko dengan mengarahkan kegiatan ke area yang lebih aman atau mensyaratkan mitigasi pada area tertentu. Zhang et al. menunjukkan bahwa pendekatan geomorfologi dan ekologi dapat digunakan untuk mendukung perencanaan penggunaan lahan pada kawasan rawan longsor. Literatur ini memperkuat posisi GTL sebagai instrumen pengendalian risiko melalui tata ruang.

Dalam konteks Indonesia, kebutuhan ini sangat nyata. Banyak kegiatan pembangunan berada pada kawasan rawan bencana geologi atau kawasan yang memiliki potensi bahaya geologi tertentu. Pada kondisi demikian, Kajian GTL perlu memastikan bahwa rencana pemanfaatan ruang mengacu pada data bahaya yang sahih, menggunakan skala yang tepat, dan menghasilkan syarat teknis yang dapat dilaksanakan. Jika kajian disusun oleh pihak lain, mekanisme verifikasi dan/atau validasi diperlukan agar hasil kajian dapat digunakan secara bertanggung jawab.

GTL juga dapat membantu mengurangi risiko dengan menetapkan rekomendasi yang berbeda sesuai tingkat pembatas. Pada kawasan dengan risiko rendah, kegiatan dapat dilakukan dengan syarat umum. Pada kawasan dengan pembatas sedang, kegiatan dapat dilakukan dengan syarat teknis tertentu. Pada kawasan dengan pembatas tinggi, pemanfaatan dapat dibatasi atau tidak direkomendasikan. Pendekatan ini memungkinkan pengendalian ruang dilakukan secara proporsional, bukan sekadar melarang atau membebaskan kegiatan tanpa dasar teknis.

1.10 Posisi GTL dalam Konservasi Geologi dan Geopark

GTL tidak hanya berkaitan dengan risiko, tetapi juga dengan perlindungan nilai geologi. Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark memerlukan dukungan informasi GTL agar perlindungan ruang, pemanfaatan kawasan, keselamatan pengunjung, dan pengendalian daya dukung dapat berjalan seimbang. Tanpa GTL, kawasan bernilai geologi berisiko hanya dipahami sebagai objek wisata atau objek konservasi sektoral, padahal kawasan tersebut juga memiliki keterkaitan dengan tata ruang, lingkungan hidup, pendidikan, dan pembangunan lokal.

Dalam literatur geoheritage, Brilha menekankan pentingnya inventarisasi dan penilaian geosite serta geodiversity site sebagai dasar pengelolaan dan perlindungan. Brocx dan Semeniuk membahas sejarah, definisi, cakupan, dan skala geoheritage serta geoconservation. Reynard dan Brilha menempatkan geoheritage dalam kerangka penilaian, perlindungan, dan pengelolaan. Rujukan-rujukan tersebut penting untuk menjelaskan bahwa nilai geologi harus diidentifikasi dan dikelola secara sistematis.

Dalam konteks Geopark dan geowisata, Dowling dan Newsome menekankan bahwa geotourism harus memperhatikan keberlanjutan, dampak, pengelolaan, dan interpretasi. Ólafsdóttir dan Tverijonaite menunjukkan bahwa geotourism berfokus pada geologi dan lanskap, mendorong pemahaman kebumian, serta mendukung konservasi geodiversity. Buku Geowisata: Model Pariwisata Berkelanjutan juga menempatkan geowisata sebagai model pemanfaatan kawasan bernilai geologi yang menggabungkan edukasi, konservasi, keselamatan, dan pemberdayaan masyarakat (Oktariadi dan Andiani, 2021).

Peraturan Presiden Nomor 9 Tahun 2019 tentang Pengembangan Taman Bumi menempatkan Geopark sebagai wilayah geografis yang memiliki Warisan Geologi dan dikelola secara terpadu untuk konservasi, edukasi, dan pembangunan ekonomi masyarakat secara berkelanjutan. Dalam kerangka

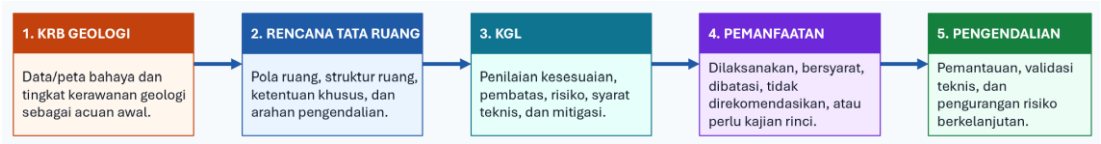
tersebut, GTL dapat berperan menilai daya dukung kawasan, keselamatan pengunjung, perlindungan nilai geologi, serta hubungan antara Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan rencana pengelolaan Geopark. Dengan demikian, GTL membantu memastikan bahwa pengembangan Geopark tetap berada dalam batas konservasi dan keselamatan kawasan.

1.11 GTL sebagai Instrumen Sintesis, Validasi, dan Pertimbangan Teknis

Sebagai buku rujukan kebijakan dan teknis, narasi Geologi Tata Lingkungan akan lebih mudah dipahami apabila disertai contoh keluaran spasial berupa peta geologi tata lingkungan, peta arahan pemanfaatan ruang, peta kawasan lindung geologi, peta zona resapan, dan peta bahaya geologi. Oleh karena itu, pada beberapa bab berikut disisipkan contoh peta representatif agar pembaca dapat melihat bagaimana konsep, data, dan Kajian Geologi Lingkungan (KGL) diterjemahkan menjadi rekomendasi keruangan yang operasional.

GTL diperlukan karena keputusan ruang dan pembangunan membutuhkan informasi yang telah disintesis. Data geologi dasar, data hidrogeologi, data geologi teknik, data bahaya geologi, data penggunaan lahan, dan data kawasan lindung tidak cukup hanya dikumpulkan. Data tersebut harus dianalisis, ditafsirkan, dan diterjemahkan menjadi informasi mengenai kesesuaian, pembatas, syarat pemanfaatan, rekomendasi teknis, dan rencana pemantauan.

Hubungan antara KRB Geologi, rencana tata ruang, KGL, pemanfaatan ruang, dan pengendalian dapat dilihat pada flowchart berikut. Flowchart ini menunjukkan bahwa KRB Geologi berperan sebagai acuan awal untuk mengenali data/peta bahaya dan tingkat kerawanan geologi, yang kemudian menjadi salah satu masukan penting dalam rencana tata ruang. Selanjutnya, melalui KGL, berbagai data tersebut dinilai secara lebih operasional untuk menentukan kesesuaian, pembatas, risiko, syarat teknis, dan kebutuhan mitigasi. Hasil KGL kemudian menjadi dasar untuk menetapkan apakah suatu ruang dapat dimanfaatkan, dimanfaatkan dengan syarat, dibatasi, tidak direkomendasikan, atau memerlukan kajian rinci. Pada tahap akhir, pengendalian dilakukan melalui pemantauan, validasi teknis, dan upaya pengurangan risiko secara berkelanjutan.

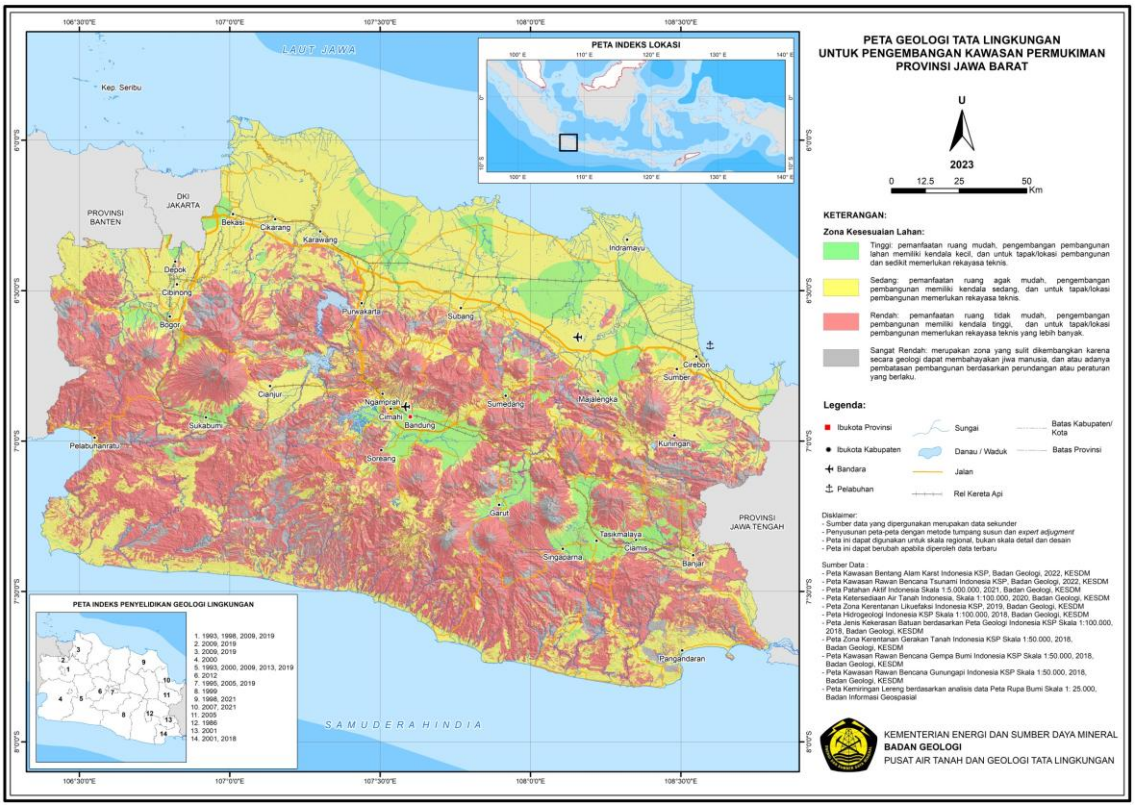


Gambar 1.2. Alur hubungan KRB Geologi, rencana tata ruang, Kajian Geologi Lingkungan (KGL), pemanfaatan ruang, dan pengendalian dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan.

Dalam KGL, proses sintesis dapat dilakukan melalui peta tematik, skoring, pembobotan, *overlay*, GIS, AHP, atau metode lain yang dapat dipertanggungjawabkan. Luan et al., Yan et al., Nor et al., dan berbagai studi kesesuaian lahan menunjukkan bahwa metode multi-kriteria dapat membantu menilai kesesuaian ruang secara sistematis. Namun, penggunaan metode tersebut harus disertai kehati-hatian. Bobot, skor, parameter, dan skala harus dijelaskan agar hasilnya dapat diuji dan tidak menjadi angka yang tampak presisi tetapi lemah secara ilmiah.

Validasi menjadi unsur penting dalam GTL karena hasil kajian sering digunakan untuk keputusan yang memiliki konsekuensi besar. Kajian yang digunakan dalam tata ruang, dokumen lingkungan, kawasan strategis, atau kegiatan berisiko tinggi perlu diperiksa kecukupan data, ketepatan metode, kesesuaian skala, konsistensi peta, dan kelayakan rekomendasi. Dengan validasi, GTL tidak hanya menjadi proses penyusunan laporan, tetapi juga menjadi mekanisme penjaminan mutu teknis.

Pertimbangan teknis GTL menjadi bentuk keluaran yang dapat digunakan oleh pengambil keputusan. Dokumen ini dapat memuat dasar data, metode, hasil analisis, status kesesuaian, pembatas utama, syarat teknis, rekomendasi tindak lanjut, dan rencana pemantauan. Dalam tata kelola pemerintahan, pertimbangan teknis seperti ini penting karena membantu menjembatani bahasa teknis geologi dengan kebutuhan keputusan administratif dan kebijakan.



Gambar 1.3. Contoh keluaran peta geologi tata lingkungan regional untuk pengembangan wilayah permukiman Provinsi Jawa Barat.

Tabel 1.1. Posisi operasional GTL dalam ruang keputusan publik.

Ruang keputusan publik	Peran operasional GTL	Keluaran yang digunakan dalam kebijakan
Tata ruang	Menguji kesesuaian ruang, mengenali pembatas geologi, serta menerjemahkan data geologi menjadi arahan zonasi dan syarat pemanfaatan.	Peta rekomendasi, ketentuan khusus RDTR, arahan pengendalian, dan dasar pertimbangan dalam RTRW/RDTR.
Lingkungan hidup	Memperkuat penilaian daya dukung, daya tampung, potensi dampak, dan kebutuhan pengelolaan lingkungan fisik.	Masukan KLHS, dokumen lingkungan, rencana pengelolaan, rencana pemantauan, dan parameter mitigasi.
Risiko geologi	Menghubungkan data bahaya geologi dengan rencana pemanfaatan ruang agar risiko dikurangi sejak tahap perencanaan.	Syarat mitigasi, pembatasan kegiatan, rekomendasi kajian rinci, dan dasar pengurangan paparan risiko.
Konservasi geologi dan Geopark	Menempatkan nilai geologi, fungsi lindung, daya dukung kunjungan, dan keselamatan kawasan sebagai dasar pengelolaan.	Arahan KCAG, Geopark, geowisata, pengendalian akses, perlindungan nilai geologi, dan pemantauan kawasan.

Ruang keputusan publik	Peran operasional GTL	Keluaran yang digunakan dalam kebijakan
Kawasan dan tapak strategis	Memberi pertimbangan teknis untuk kegiatan yang memiliki konsekuensi ruang dan risiko tinggi, termasuk kawasan industri, TPST, prasarana pesisir, dan fasilitas strategis.	Kajian GTL, Kajian Geologi Lingkungan, pertimbangan teknis, syarat tapak, dan kebutuhan investigasi lanjutan.

1.12 Kesimpulan Bab

Geologi Tata Lingkungan diperlukan karena pembangunan yang aman dan berkelanjutan harus memperhitungkan kondisi lingkungan geologi. Geologi menyediakan sumber daya, ruang, air, bentang alam, dan nilai konservasi, tetapi juga menghadirkan pembatas berupa bahaya, keterbatasan daya dukung, kerentanan air tanah, fungsi resapan, kawasan lindung, dan nilai geologi yang perlu dilindungi.

Bab ini menunjukkan bahwa GTL merupakan penerapan operasional dari Geologi Lingkungan. Geologi Lingkungan memberi dasar ilmu dan data, sedangkan GTL menerjemahkan data tersebut menjadi informasi, kajian, rekomendasi, validasi, dan pertimbangan teknis untuk tata ruang, lingkungan hidup, pembangunan kawasan, konservasi geologi, dan pengendalian risiko.

Kebutuhan GTL menjadi semakin kuat karena masih terdapat kesenjangan antara data geologi dan keputusan ruang. Banyak data geologi tersedia, tetapi belum selalu disintesis menjadi informasi yang dapat digunakan dalam RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengaturan zonasi, dan pengendalian pemanfaatan ruang. GTL diperlukan untuk mengisi kesenjangan tersebut.

Dengan demikian, GTL tidak dimaksudkan untuk menggantikan kewenangan sektor, tetapi memperkuat dasar teknis lintas sektor. Dalam tata ruang, GTL membantu menilai kesesuaian dan syarat pemanfaatan. Dalam lingkungan hidup, GTL memperkuat penilaian daya dukung dan dampak. Dalam kebencanaan geologi, GTL menerjemahkan data bahaya menjadi arahan pemanfaatan ruang. Dalam konservasi geologi dan Geopark, GTL membantu menjaga nilai geologi, daya dukung kawasan, dan keselamatan pemanfaatan. Posisi inilah yang menjadikan GTL penting sebagai kerangka penghubung antara ilmu geologi, kebijakan ruang, perlindungan lingkungan, dan pembangunan berkelanjutan.

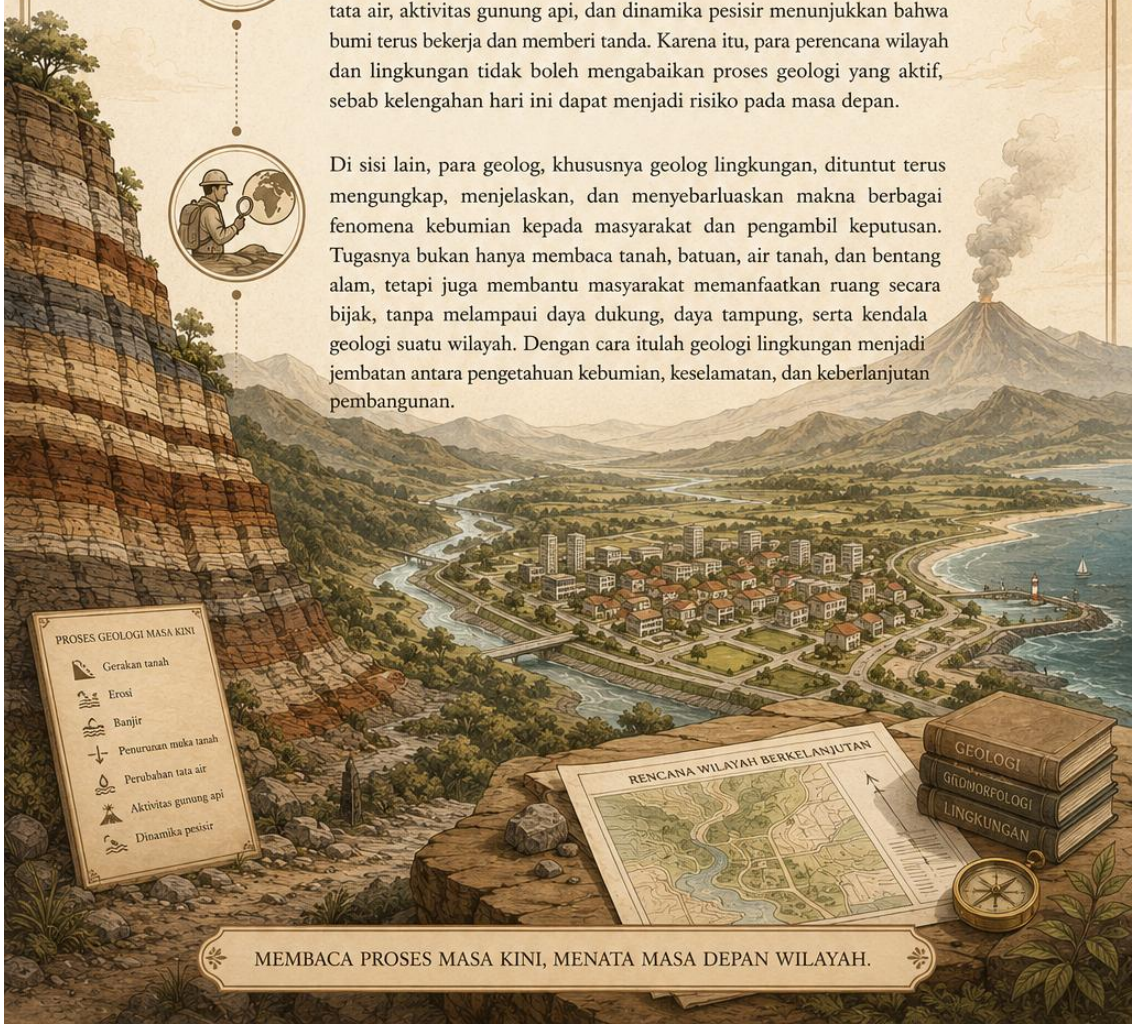
> *Geologi Tata Lingkungan diperlukan karena setiap pembangunan selalu berdiri di atas tanah, batuan, air, bentuk lahan, dan proses geologi yang bekerja diam-diam namun menentukan. Ruang tidak pernah benar-benar kosong; ia memiliki riwayat, kekuatan, batas, dan risiko. Pembangunan yang baik bukan hanya mencari tempat yang tersedia, tetapi memahami apakah tempat itu mampu menerima beban, perubahan, dan kehidupan baru. Di sinilah GTL hadir sebagai cara membaca bumi sebelum keputusan ruang dibuat. Bumi tidak menolak pembangunan, tetapi selalu meminta manusia memahami tanda-tandanya terlebih dahulu.*

Masa Kini adalah Kunci untuk Membaca Masa Depan

> *"The present is the key to the future."*
> — Charles Lyell (1830)

Dalam pengembangan wilayah, pemahaman terhadap ungkapan Charles Lyell tersebut mengingatkan bahwa keputusan ruang harus bertolak dari pembacaan yang cermat terhadap kondisi geologi masa kini. Fenomena seperti gerakan tanah, banjir, erosi, penurunan muka tanah, perubahan tata air, aktivitas gunung api, dan dinamika pesisir menunjukkan bahwa bumi terus bekerja dan memberi tanda. Karena itu, para perencana wilayah dan lingkungan tidak boleh mengabaikan proses geologi yang aktif, sebab kelengahan hari ini dapat menjadi risiko pada masa depan.

Di sisi lain, para geolog, khususnya geolog lingkungan, dituntut terus mengungkap, menjelaskan, dan menyebarluaskan makna berbagai fenomena kebumian kepada masyarakat dan pengambil keputusan. Tugasnya bukan hanya membaca tanah, batuan, air tanah, dan bentang alam, tetapi juga membantu masyarakat memanfaatkan ruang secara bijak, tanpa melampaui daya dukung, daya tampung, serta kendala geologi suatu wilayah. Dengan cara itulah geologi lingkungan menjadi jembatan antara pengetahuan kebumian, keselamatan, dan keberlanjutan pembangunan.



MEMBACA PROSES MASA KINI, MENATA MASA DEPAN WILAYAH.

BAB 2

Geologi Lingkungan Geologi Tata Lingkungan dan Tradisi Environmental Geology

2.1 Pengantar

Bab pertama telah menjelaskan alasan mengapa Geologi Tata Lingkungan diperlukan dalam pembangunan Indonesia. Bab kedua memperjelas fondasi konseptualnya. Penjelasan ini penting karena istilah Geologi Lingkungan, Kajian Geologi Lingkungan, Kajian Geologi Tata Lingkungan, Informasi Geologi Tata Lingkungan, dan Pertimbangan Teknis Geologi Tata Lingkungan sering digunakan dalam ruang yang berdekatan. Tanpa pembedaan yang jelas, istilah-istilah tersebut dapat menimbulkan kerancuan antara basis ilmu, metode analisis, produk teknis, dan instrumen kebijakan.

Dalam buku ini, Geologi Lingkungan diposisikan sebagai bidang keilmuan yang mengkaji hubungan antara kondisi dan proses geologi dengan lingkungan hidup serta aktivitas manusia. Kajian Geologi Lingkungan diposisikan sebagai metode teknis untuk menilai kondisi, potensi, pembatas, risiko, dan rekomendasi pemanfaatan ruang berdasarkan data geologi lingkungan. Geologi Tata Lingkungan diposisikan sebagai kerangka sintesis dan penerapan yang menghubungkan data, analisis, peta, rekomendasi, validasi, dan pertimbangan teknis ke dalam sistem tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan geologi, konservasi geologi, dan pengendalian pembangunan.

Pembedaan tersebut tidak dimaksudkan untuk memisahkan ketiganya secara kaku. Sebaliknya, pembedaan ini diperlukan agar hubungan antarkonsep menjadi jelas. Geologi Lingkungan memberi dasar ilmu; Kajian Geologi Lingkungan memberi metode kerja teknis; sedangkan Geologi Tata Lingkungan memberi kerangka penggunaan hasil analisis untuk mendukung keputusan publik. Dengan demikian, GTL dapat dipahami sebagai penguatan operasional dari tradisi environmental geology dalam konteks Indonesia.

2.2 Environmental Geology dalam Literatur Internasional

Dalam literatur internasional, environmental geology berkembang sebagai cabang geologi terapan yang menempatkan hubungan antara manusia dan lingkungan geologi sebagai pusat perhatian. Bell (1998) menekankan bahwa bidang ini memperhatikan dua arah hubungan: dampak kegiatan manusia terhadap lingkungan fisik dan pengaruh lingkungan geologi terhadap manusia. Dengan demikian, environmental geology tidak hanya membahas dampak pembangunan, tetapi juga membaca bagaimana tanah, batuan, air, bentuk lahan, proses geologi, sumber daya, dan bahaya geologi menentukan keselamatan serta keberlanjutan kehidupan manusia.

Keller (2012) menempatkan environmental geology sebagai cara untuk memahami interaksi antara geologi dan kehidupan manusia melalui lima gagasan dasar, yaitu pertumbuhan penduduk, keberlanjutan, bumi sebagai sistem, proses kebumian yang

berbahaya, serta hubungan antara pengetahuan ilmiah dan nilai-nilai sosial. Rumusan ini penting bagi GTL karena keputusan ruang tidak hanya memerlukan data geologi, tetapi juga pemahaman mengenai bagaimana data tersebut memengaruhi kesejahteraan, keselamatan, dan keberlanjutan masyarakat.

Montgomery (2011) merumuskan environmental geology secara sangat ringkas sebagai geologi yang diterapkan untuk kehidupan. Makna ringkas ini memperlihatkan bahwa geologi tidak berhenti sebagai ilmu tentang batuan dan sejarah bumi, tetapi menjadi ilmu yang membantu manusia membaca proses bumi yang memengaruhi ruang hidupnya. Proses tersebut dapat berupa gempa bumi, letusan gunung api, gerakan tanah, banjir yang dipengaruhi kondisi geologi, abrasi, penurunan muka tanah, pencemaran air tanah, perubahan aliran permukaan, dan perubahan kualitas lingkungan akibat kegiatan manusia.

Nakić, Mileusnić, Pavlić, dan Kovač (2017) memperjelas bahwa environmental geology merupakan disiplin ilmiah yang membahas interaksi antara manusia dan lingkungan geologi. Mereka menekankan bahwa dampaknya bersifat timbal balik: banyak bahaya alam dipengaruhi oleh tatanan geologi, sementara aktivitas manusia dapat memberi tekanan besar terhadap lingkungan fisik. Pandangan ini sejalan dengan kebutuhan GTL untuk menilai bukan hanya kondisi alamiah, tetapi juga perubahan yang muncul akibat pemanfaatan ruang.

Pipkin, Trent, Hazlett, dan Bierman (2014) menempatkan environmental geology sebagai bidang yang mempelajari hubungan manusia dengan bahaya geologi, proses geologi, dan sumber daya geologi. Flawn (1970) bahkan sejak awal telah mengaitkan environmental geology dengan konservasi, perencanaan penggunaan lahan, dan pengelolaan sumber daya. Dua rujukan tersebut memperlihatkan bahwa environmental geology sejak awal memiliki orientasi terapan: memberi dasar ilmiah agar pemanfaatan ruang dan sumber daya tidak melepaskan diri dari kemampuan, batas, dan risiko lingkungan geologi.

Atas dasar berbagai rujukan tersebut, environmental geology dapat dipahami sebagai fondasi akademik bagi Geologi Lingkungan dan Geologi Tata Lingkungan. Geologi Lingkungan memberi dasar ilmu untuk membaca hubungan antara bumi, lingkungan, dan manusia. Kajian Geologi Lingkungan menyediakan metode teknis-operasional untuk melakukan inventarisasi, analisis, evaluasi, dan pengendalian dampak geologi. Geologi Tata Lingkungan bergerak lebih jauh sebagai kerangka sintesis dan penerapan untuk membawa hasil KGL ke dalam tata ruang, pengelolaan lingkungan, konservasi geologi, dan mitigasi risiko geologi.

Dengan demikian, GTL dalam buku ini tidak ditempatkan sebagai istilah yang berdiri sendiri tanpa akar akademik. GTL diposisikan sebagai pengembangan operasional environmental geology dalam konteks Indonesia. Bila environmental geology menjelaskan hubungan manusia dengan lingkungan geologi, maka GTL menerjemahkan hubungan tersebut menjadi peta, kelas kesesuaian, faktor pembatas, syarat teknis, validasi, pertimbangan teknis, pengaturan ruang, dan pemantauan. Di titik inilah ilmu geologi berubah menjadi dasar kerja untuk menata ruang hidup secara lebih aman, rasional, dan berkelanjutan.

2.3 Kajian Geologi Lingkungan sebagai Rumusan Sintesis

Berdasarkan berbagai pengertian Geologi Lingkungan dan environmental geology yang telah dijelaskan sebelumnya, penulis merumuskan Kajian Geologi Lingkungan (KGL) sebagai istilah operasional untuk menjembatani dasar keilmuan geologi lingkungan dengan kebutuhan penerapan dalam tata ruang, pengelolaan lingkungan, pemanfaatan sumber daya alam, konservasi geologi, dan mitigasi risiko geologi.

Rumusan ini disusun melalui sintesis atas beberapa pokok pemikiran utama. Pertama, Geologi Lingkungan dipahami sebagai bidang ilmu yang mengkaji hubungan antara kondisi geologi, proses kebumian, lingkungan, dan aktivitas manusia. Kedua, lingkungan geologi tidak hanya dilihat sebagai objek ilmiah, tetapi juga sebagai dasar ruang hidup yang memiliki daya dukung, daya tampung, faktor pembatas,

fungsi lingkungan, nilai geologi, serta potensi bahaya. Ketiga, hasil kajian geologi perlu dapat diterjemahkan menjadi informasi, arahan, rekomendasi, syarat teknis, dan dasar pengendalian agar dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan.

Dengan kerangka tersebut, penulis mendefinisikan:

Kajian Geologi Lingkungan (KGL) adalah rangkaian kegiatan inventarisasi, analisis, dan evaluasi aspek geologi dalam keterkaitannya dengan lingkungan dan aktivitas manusia, guna mengenali, menilai, serta mengendalikan dampak geologi, termasuk pencegahan dan/atau penanggulangan bahaya geologi, dalam rangka mendukung pemanfaatan ruang dan sumber daya alam yang aman, terkendali, dan berkelanjutan.

Definisi tersebut menegaskan bahwa KGL tidak berhenti pada pengumpulan data geologi. KGL mencakup proses yang lebih utuh, mulai dari inventarisasi data, analisis hubungan antarparameter, evaluasi daya dukung dan faktor pembatas, penilaian potensi dampak, hingga perumusan arahan pengendalian. Dalam konteks ini, data tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, struktur geologi, sumber daya geologi, bahaya geologi, kawasan bernilai geologi, dan penggunaan lahan dibaca secara terpadu untuk memahami implikasinya terhadap ruang dan lingkungan.

Unsur inventarisasi dalam KGL mencakup pengumpulan, penataan, dan pemeriksaan data geologi serta data pendukung yang relevan. Unsur analisis mencakup penafsiran hubungan antara kondisi geologi dengan fungsi lingkungan, kegiatan manusia, dan rencana pemanfaatan ruang. Unsur evaluasi mencakup penilaian terhadap kesesuaian, keterbatasan, risiko, kebutuhan mitigasi, dan kemungkinan pengendalian. Sementara itu, unsur pengendalian dampak geologi mencakup penyusunan rekomendasi, syarat teknis, arahan pemantauan, serta tindakan pencegahan dan/atau penanggulangan terhadap bahaya geologi.

Dengan demikian, KGL menjadi istilah operasional yang digunakan dalam buku ini. KGL tidak hanya mencakup analisis, tetapi juga inventarisasi, evaluasi, sintesis, pengendalian dampak, dan perumusan rekomendasi yang dapat digunakan dalam tata ruang, dokumen lingkungan, pengelolaan sumber daya alam, konservasi geologi, dan mitigasi risiko geologi.

Dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan, KGL berfungsi sebagai metode teknis-operasional. Hasil KGL menjadi dasar bagi penyusunan Informasi Geologi Tata Lingkungan, Kajian Geologi Tata Lingkungan, validasi teknis, serta pertimbangan teknis. Dengan posisi tersebut, KGL menghubungkan basis ilmu Geologi Lingkungan dengan kebutuhan pengambilan keputusan yang lebih operasional, terukur, dan dapat dipertanggungjawabkan.

1. ***Environmental geology:*** *bidang geologi terapan yang mengkaji hubungan timbal balik antara manusia dan lingkungan geologi, mencakup sumber daya, proses, bahaya, pencemaran, penggunaan lahan, dan pengelolaan lingkungan.*
2. ***Geologi Lingkungan:*** *padanan konseptual environmental geology dalam konteks Indonesia, yaitu bidang ilmu yang menilai hubungan antara kondisi geologi, proses kebumian, kualitas lingkungan, dan aktivitas manusia.*
3. ***Kajian Geologi Lingkungan:*** *metode teknis untuk menilai data geologi lingkungan menjadi kelas kesesuaian, faktor pembatas, syarat teknis, rekomendasi, dan kebutuhan pemantauan.*

4. ***Geologi Tata Lingkungan:*** *kerangka sintesis dan penerapan yang mengubah data serta kajian geologi lingkungan menjadi dasar tata ruang, pengelolaan lingkungan, konservasi geologi, dan mitigasi risiko geologi.*

2.4 Geologi Lingkungan dalam Konteks Indonesia

Dalam konteks Indonesia, Geologi Lingkungan berkembang bukan hanya sebagai bidang akademik, tetapi juga sebagai praktik teknis kelembagaan. Kegiatan penyelidikan geologi lingkungan telah digunakan untuk mendukung pengembangan permukiman, kawasan perkotaan, kawasan industri, pertambangan, tempat pengolahan sampah, perlindungan air tanah, kawasan karst, kawasan rawan bencana geologi, dan kawasan bernilai geologi. Dengan demikian, Geologi Lingkungan di Indonesia memiliki dimensi praktis yang kuat.

Geologi Lingkungan Cekungan Bandung memperlihatkan bagaimana kondisi geologi, air tanah, penggunaan lahan, kawasan resapan, banjir, dan perkembangan wilayah dianalisis secara terpadu untuk memahami daya dukung dan pembatas kawasan (Oktariadi et al., 2021). Contoh ini menunjukkan bahwa Geologi Lingkungan tidak berhenti pada deskripsi tanah, batuan, atau bentuk lahan, tetapi menilai hubungan antara kondisi geologi dengan arah perkembangan ruang. Dalam pengertian ini, Geologi Lingkungan telah lama menjadi dasar bagi gagasan GTL.

Profil Geologi Lingkungan Jabodetabek-Punjur juga memperlihatkan pentingnya informasi geologi lingkungan bagi kawasan metropolitan dan kawasan strategis. Kawasan seperti Jabodetabek-Punjur tidak hanya menghadapi tekanan pertumbuhan penduduk dan infrastruktur, tetapi juga persoalan air tanah, penurunan muka tanah, banjir, kawasan resapan, kondisi tanah, dan perubahan penggunaan lahan. Informasi geologi lingkungan diperlukan agar perencanaan wilayah tidak hanya berorientasi pada kebutuhan pembangunan, tetapi juga memperhitungkan kemampuan fisik dan fungsi lingkungan geologi.

Dalam praktik Badan Geologi, Geologi Lingkungan berkaitan erat dengan geologi teknik, hidrogeologi, kawasan lindung geologi, dan kebencanaan geologi. Karena itu, Geologi Lingkungan Indonesia memiliki karakter sintetik dibandingkan pemahaman geologi yang hanya berorientasi pada pemetaan litologi atau sumber daya. Geologi Lingkungan diarahkan untuk menjawab pertanyaan: bagaimana kondisi geologi memengaruhi kelayakan dan risiko pemanfaatan ruang, serta bagaimana pembangunan harus menyesuaikan diri dengan kondisi tersebut.

Kekhasan Indonesia terletak pada kebutuhan untuk menghubungkan Geologi Lingkungan dengan sistem regulasi. Negara kepulauan yang dinamis secara geologi memerlukan instrumen yang mampu menerjemahkan pengetahuan geologi ke dalam perencanaan tata ruang, KLHS, dokumen lingkungan, perizinan, pengendalian pemanfaatan ruang, dan konservasi geologi. Di sinilah istilah Geologi Tata Lingkungan memperoleh makna yang lebih operasional.

2.5 Lingkungan Geologi sebagai Objek Kajian dan Objek Pengaturan

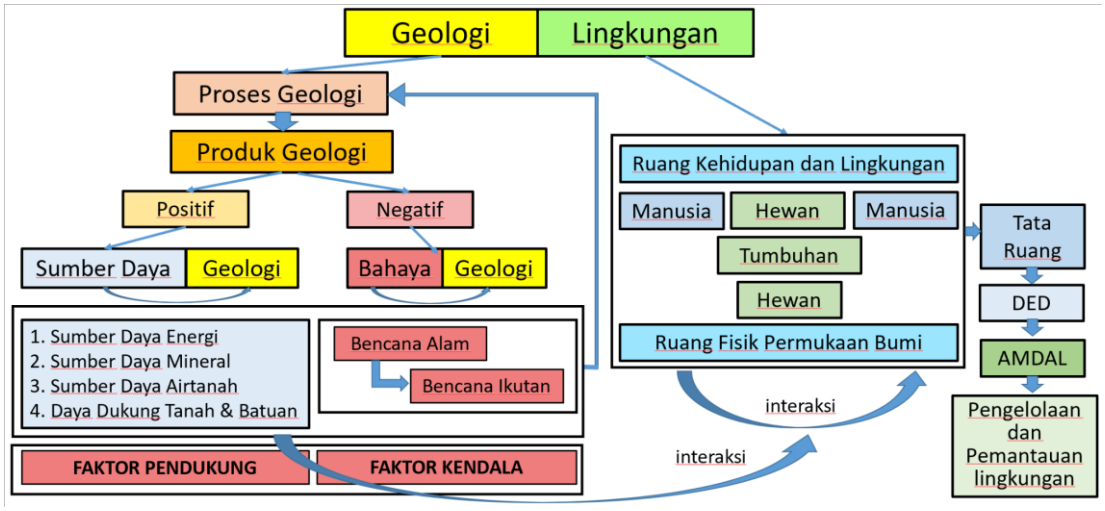
Lingkungan geologi dapat dipahami sebagai ruang fisik bumi yang mencakup tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, struktur geologi, proses geologi, sumber daya geologi, bahaya geologi, dan nilai geologi. Lingkungan geologi bukan hanya latar tempat manusia hidup, tetapi juga sistem yang menyediakan dukungan, menerima tekanan, dan dapat berubah akibat proses alam maupun aktivitas manusia.

Sebagai objek kajian, lingkungan geologi dianalisis untuk memahami kondisi, proses, potensi, dan pembatas. Kajian tersebut meliputi identifikasi satuan batuan, sifat tanah, kestabilan lereng, sistem air tanah, daerah imbuhan, daerah lepasan, struktur geologi, potensi bahaya, kawasan bernilai geologi, serta interaksi semua unsur tersebut dengan rencana pemanfaatan ruang. Dalam tahap ini, pendekatan ilmiah menjadi penting karena setiap kesimpulan harus didasarkan pada data dan metode yang dapat ditelusuri.

Sebagai objek pengaturan, lingkungan geologi perlu diterjemahkan menjadi arahan pemanfaatan dan perlindungan. Tidak semua lingkungan geologi dapat diperlakukan sama. Ada kawasan yang dapat mendukung pembangunan intensif, ada kawasan yang hanya dapat dimanfaatkan dengan syarat teknis, ada kawasan yang harus dibatasi, dan ada kawasan yang perlu dilindungi karena fungsi atau nilainya. Dengan demikian, lingkungan geologi menjadi bagian dari dasar pengaturan zonasi, pengendalian pembangunan, mitigasi risiko, perlindungan air tanah, dan konservasi geologi.

Pembedaan antara objek kajian dan objek pengaturan penting bagi GTL. Geologi Lingkungan terutama menjelaskan lingkungan geologi sebagai objek kajian ilmiah. GTL membawa hasil kajian tersebut ke ruang pengaturan. Oleh karena itu, GTL tidak hanya bertanya "bagaimana kondisi geologinya?", tetapi juga "apa implikasinya bagi pemanfaatan ruang?", "syarat teknis apa yang diperlukan?", "kegiatan apa yang perlu dibatasi?", dan "bagian mana yang perlu dilindungi?".

Dalam konteks ini, lingkungan geologi menjadi dasar bagi konsep daya dukung dan daya tampung lingkungan geologi. Daya dukung berkaitan dengan kemampuan unsur geologi untuk menopang pemanfaatan ruang, sedangkan daya tampung berkaitan dengan kemampuan sistem geologi menerima tekanan tanpa kehilangan fungsi, kestabilan, dan keselamatannya. Oleh karena itu, lingkungan geologi harus dibaca sebagai sistem yang menyatukan proses geologi, produk geologi, sumber daya, bahaya, manusia, dan ruang hidup.



Gambar 2.1. Hubungan Geologi, Lingkungan, Faktor Pendukung, dan Faktor Kendala dalam Geologi Lingkungan. Bagan Alir pada gambar 2.1 di atas menegaskan bahwa produk geologi dapat memberi manfaat sekaligus menimbulkan kendala. Sumber daya energi, mineral, air tanah, serta daya dukung tanah dan batuan merupakan faktor pendukung pembangunan. Sebaliknya, bahaya geologi, bencana alam, dan bencana ikutan merupakan faktor kendala yang perlu dikendalikan. Keduanya berinteraksi dengan ruang fisik permukaan bumi dan ruang kehidupan, sehingga hasil kajian geologi lingkungan harus diterjemahkan ke dalam tata ruang, perancangan teknis, dokumen lingkungan, serta sistem pengelolaan dan pemantauan.

Hubungan konseptual tersebut dapat dipahami melalui bagan berikut. Bagan ini menempatkan Geologi Lingkungan sebagai bidang yang membaca interaksi antara proses

geologi, produk geologi, faktor pendukung, faktor kendala, dan lingkungan hidup. Dengan cara ini, Geologi Tata Lingkungan memperoleh dasar keilmuan untuk menerjemahkan informasi geologi menjadi arahan tata ruang, DED, AMDAL, serta pengelolaan dan pemantauan lingkungan.

2.6 Dari Data Geologi menuju Informasi Geologi Lingkungan

Data geologi merupakan bahan dasar yang sangat penting, tetapi data geologi belum otomatis menjadi informasi yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan. Data litologi, struktur geologi, kemiringan lereng, kedalaman air tanah, curah hujan, penggunaan lahan, kualitas air, titik kejadian gerakan tanah, atau batas kawasan karst masih perlu dianalisis dan disintesis agar memiliki makna bagi tata ruang dan lingkungan.

Ellison et al. menunjukkan bahwa informasi geologi lingkungan untuk perencanaan penggunaan lahan perlu disajikan dalam bentuk yang operasional. Informasi tersebut dapat menunjukkan sumber daya, kendala, bahaya, dan peluang pengembangan. Bell juga menekankan bahwa peta geologi lingkungan harus membantu pengguna non-geolog memahami implikasi geologi terhadap pembangunan. Dengan demikian, transformasi dari data menjadi informasi merupakan salah satu inti pekerjaan KGL dan GTL.

Dalam GTL, transformasi tersebut dapat digambarkan sebagai tahapan berjenjang. Tahap pertama adalah data dasar, seperti peta geologi, peta geomorfologi, peta hidrogeologi, peta geologi teknik, peta bahaya geologi, data kualitas air, data penggunaan lahan, dan data kawasan lindung. Tahap kedua adalah interpretasi tematik, misalnya potensi air tanah, kerentanan pencemaran, kestabilan lereng, fungsi resapan, tingkat bahaya, atau nilai geologi. Tahap ketiga adalah sintesis, yaitu penilaian kesesuaian, daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, dan syarat pemanfaatan. Tahap keempat adalah rekomendasi teknis dan pertimbangan kebijakan.

Proses ini menuntut kejelasan metode. Apabila peta tematik ditumpangsusunkan, maka dasar pemilihan parameter, skor, bobot, dan ambang klasifikasi harus dijelaskan. Apabila rekomendasi diberikan, maka rekomendasi tersebut harus dapat ditelusuri kembali ke data dan analisisnya. Tanpa keterlacakan tersebut, hasil kajian dapat tampak meyakinkan secara visual, tetapi lemah secara ilmiah.

Karena itu, Informasi Geologi Tata Lingkungan sebaiknya dipahami sebagai data geologi lingkungan yang telah diolah, dianalisis, disintesis, dan dikemas untuk mendukung keputusan. Informasi ini dapat berbentuk peta, laporan, basis data, matriks rekomendasi, status kesesuaian, faktor pembatas, atau pertimbangan teknis. Nilai utamanya bukan hanya pada kelengkapan data, tetapi pada kemampuan informasi tersebut menjawab kebutuhan tata ruang, lingkungan hidup, dan pengendalian risiko.

2.7 Kajian Geologi Lingkungan sebagai Metode Teknis-Operasional

Kajian Geologi Lingkungan merupakan metode teknis-operasional untuk menilai hubungan antara kondisi geologi dan rencana pemanfaatan ruang atau kegiatan. KGL menggunakan data geologi lingkungan, hidrogeologi, geologi teknik, geomorfologi, bahaya geologi, penggunaan lahan, dan data pendukung lain melalui tahapan inventarisasi, analisis, evaluasi, dan pengendalian dampak untuk menghasilkan penilaian kesesuaian, pembatas, risiko, arahan mitigasi, serta rekomendasi teknis.

KGL memiliki posisi penting karena menjadi jembatan antara data teknis dan keputusan operasional. Dalam perencanaan permukiman, KGL dapat menilai kestabilan lahan, kerentanan banjir, potensi air tanah, fungsi resapan, dan risiko gerakan tanah. Dalam kawasan industri, KGL dapat menilai kondisi fondasi, kerentanan pencemaran air tanah, risiko banjir, dan kebutuhan pengelolaan limbah. Dalam tapak PLTN atau prasarana pesisir strategis, KGL memerlukan standar yang lebih ketat karena konsekuensi risikonya lebih besar. Dalam TPST, KGL perlu menilai kerentanan air tanah, tanah dan batuan, kemiringan lereng, jarak terhadap unsur sensitif, serta risiko pencemaran.

Secara metodologis, KGL dapat menggunakan pendekatan kualitatif, semi-kuantitatif, maupun kuantitatif. Banyak studi kesesuaian lahan menggunakan GIS, overlay, skoring, pembobotan, dan multi-criteria decision analysis. Luan et al. menunjukkan penggunaan GIS dan pendekatan komputasional dalam penilaian kesesuaian lahan perkotaan. Yan et al. menekankan pentingnya sistem indeks dalam evaluasi lahan perkotaan. Penelitian di Indonesia seperti Ahmad et al., Umar et al., Ilham et al., dan Kudiai et al. menunjukkan bahwa parameter geologi lingkungan dapat digunakan untuk menilai kesesuaian permukiman dan pengembangan kawasan.

KGL juga harus memperhatikan skala. Analisis untuk RTRW berbeda dengan analisis untuk RDTR, tapak fasilitas strategis, atau desain teknis. Semakin rinci keputusan yang akan diambil, semakin rinci pula data yang diperlukan. Peta skala regional dapat berguna untuk arahan umum, tetapi tidak cukup untuk keputusan tapak yang membutuhkan kepastian tinggi. Oleh karena itu, KGL harus menyatakan skala data, ketelitian peta, keterbatasan metode, dan kebutuhan kajian lanjutan.

Hasil KGL idealnya tidak berhenti pada deskripsi. Hasilnya harus menghasilkan kategori, arahan, dan syarat. Misalnya: lahan sesuai untuk permukiman dengan syarat pengendalian drainase; lahan terbatas karena fungsi resapan tinggi; kawasan tidak direkomendasikan untuk fasilitas tertentu karena berada pada bahaya geologi tinggi; atau kegiatan dapat dilakukan setelah investigasi geologi teknik rinci. Dengan demikian, KGL menjadi metode teknis-operasional yang menghasilkan rekomendasi operasional.

2.8 Geologi Tata Lingkungan sebagai Kerangka Sintesis dan Penerapan

Geologi Tata Lingkungan dapat dipahami sebagai kerangka sintesis yang menggunakan data dan kajian geologi lingkungan untuk mendukung penataan ruang, pengelolaan lingkungan hidup, pembangunan kawasan, pemanfaatan sumber daya, konservasi geologi, dan pengendalian risiko geologi. GTL tidak hanya mengumpulkan data, tetapi menempatkan data tersebut dalam konteks keputusan.

Kata “tata” dalam Geologi Tata Lingkungan menunjukkan unsur pengaturan, penataan, dan pengarahan. Artinya, GTL bukan semata-mata kajian ilmiah, tetapi penerapan pengetahuan geologi lingkungan untuk menata hubungan antara manusia, ruang, dan lingkungan geologi. Dalam pengertian ini, GTL menuntut sintesis lintas bidang: environmental geology, engineering geology, hydrogeology, geomorphology, geohazard, geoheritage, geoconservation, dan land-use planning.

GTL juga memiliki dimensi kelembagaan. Hasil kajian geologi lingkungan perlu memiliki mekanisme penyusunan, verifikasi, validasi, penyimpanan data, pemutakhiran, dan pemanfaatan. Tanpa mekanisme kelembagaan, hasil KGL dapat menjadi laporan yang terpisah dan tidak berpengaruh terhadap keputusan. Karena itu, GTL memerlukan sistem informasi, standar data, pedoman teknis, pertimbangan teknis, dan koordinasi lintas sektor.

Dalam konteks regulasi, GTL dapat menjadi payung yang menghubungkan berbagai instrumen. Pada sisi tata ruang, GTL membantu penyusunan RTRW, RDTR, dan pengaturan zonasi. Pada sisi lingkungan hidup, GTL memperkuat KLHS dan dokumen lingkungan. Pada sisi kebencanaan, GTL menggunakan data bahaya geologi untuk menilai syarat pemanfaatan ruang. Pada sisi konservasi, GTL membantu perlindungan Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark. Dengan demikian, GTL berfungsi sebagai simpul integrasi.

GTL tidak mengambil alih kewenangan sektor. Sebaliknya, GTL memperkuat sektor dengan menyediakan dasar teknis yang dapat dipertanggungjawabkan. Sektor penataan ruang tetap memiliki kewenangan penataan ruang; sektor lingkungan tetap memiliki kewenangan perlindungan dan pengelolaan lingkungan; sektor kebencanaan tetap memiliki kewenangan mitigasi; sektor konservasi geologi tetap memiliki instrumen perlindungan. GTL bekerja sebagai penghubung teknis agar keputusan sektor tidak mengabaikan kondisi lingkungan geologi.

2.9 Perbedaan Geologi Lingkungan, KGL, Kajian GTL, dan Pertimbangan Teknis GTL

Agar tidak terjadi kerancuan, buku ini membedakan empat istilah utama: Geologi Lingkungan, Kajian Geologi Lingkungan, Kajian Geologi Tata Lingkungan, dan Pertimbangan Teknis Geologi Tata Lingkungan. Keempatnya saling berhubungan, tetapi memiliki kedudukan yang berbeda.

Geologi Lingkungan adalah basis ilmu. Ia menjelaskan hubungan antara geologi dan lingkungan hidup, termasuk sumber daya, bahaya, air tanah, tanah, batuan, bentuk lahan, limbah, pencemaran, dan kegiatan manusia. Geologi Lingkungan menjawab pertanyaan ilmiah: bagaimana kondisi dan proses geologi memengaruhi lingkungan dan aktivitas manusia, serta bagaimana aktivitas manusia memengaruhi lingkungan geologi.

Kajian Geologi Lingkungan adalah metode teknis-operasional. Ia menggunakan data dan prinsip Geologi Lingkungan melalui tahapan inventarisasi, analisis, evaluasi, dan pengendalian dampak geologi untuk menilai kesesuaian ruang atau kegiatan tertentu. KGL menghasilkan peta tematik, peta sintesis, kategori kesesuaian, faktor pembatas, rekomendasi teknis, dan arahan pengendalian. KGL menjawab pertanyaan teknis: apakah suatu lokasi sesuai untuk kegiatan tertentu, apa pembatasnya, syarat apa yang diperlukan, dan apa risiko yang harus dikendalikan.

Kajian Geologi Tata Lingkungan adalah proses sintesis dalam kerangka kebijakan dan tata ruang. Kajian GTL dapat menggunakan hasil KGL, data bahaya geologi, data air tanah, data kawasan lindung, data warisan geologi, dan data pendukung lain untuk menyusun rekomendasi ruang dan lingkungan. Kajian GTL menjawab pertanyaan kebijakan-teknis: bagaimana informasi geologi digunakan untuk mendukung keputusan tata ruang, lingkungan hidup, pembangunan kawasan, pemanfaatan sumber daya, atau perlindungan kawasan.

Pertimbangan Teknis Geologi Tata Lingkungan adalah keluaran yang ditujukan untuk mendukung keputusan. Dokumen ini memuat hasil penilaian, status kesesuaian, pembatas utama, syarat teknis, rekomendasi, dan kebutuhan tindak lanjut. Pertimbangan teknis menjawab pertanyaan administratif-operasional: apa rekomendasi Badan Geologi atau unit teknis terhadap rencana, kegiatan, kawasan, atau kebijakan tertentu berdasarkan kajian GTL.

Hubungan keempat istilah tersebut dapat diringkas sebagai berikut: Geologi Lingkungan adalah dasar ilmu; KGL adalah metode teknis-operasional;

Tabel 2.1 Pembedaan istilah utama dalam kerangka GTL.

Istilah	Kedudukan	Pertanyaan yang Dijawab	Bentuk Keluaran	Pengguna Utama
Geologi Lingkungan	Basis ilmu	Bagaimana kondisi dan proses geologi berhubungan dengan lingkungan dan manusia?	Data, interpretasi ilmiah, peta tematik.	Akademisi, penyelidik, analis teknis.
Kajian Geologi Lingkungan	Metode teknis-operasional	Apakah suatu lokasi atau kegiatan sesuai, apa pembatasnya, dan bagaimana dampak geologi dikendalikan?	Peta sintesis, kelas kesesuaian, rekomendasi teknis, arahan mitigasi, dan arahan pengendalian.	Perencana, penyusun dokumen lingkungan, pemerintah daerah.
Kajian GTL	Sintesis kebijakan-teknis	Bagaimana hasil analisis geologi dipakai untuk keputusan ruang dan lingkungan?	Arahan ruang, syarat pemanfaatan, kebutuhan tindak lanjut.	Pengambil keputusan, unit teknis, perencana wilayah.
Pertimbangan Teknis GTL	Keluaran untuk keputusan	Apa rekomendasi teknis terhadap rencana, kegiatan, atau kawasan?	Dokumen pertimbangan teknis.	Pejabat berwenang, sektor terkait, pemrakarsa.

2.10 GTL sebagai Jembatan antara Ilmu, Regulasi, dan Keputusan Ruang

GTL memiliki nilai strategis karena berada di antara ilmu geologi dan pengambilan keputusan. Ilmu geologi menyediakan data dan penjelasan mengenai kondisi bumi. Regulasi menyediakan kerangka kewenangan, prosedur, dan konsekuensi hukum. Keputusan ruang menentukan bagaimana lahan, kawasan, tapak, dan sumber daya digunakan. GTL menjembatani ketiganya agar keputusan ruang tidak terputus dari dasar ilmiah dan tidak lepas dari kerangka regulatif.

Dalam praktik, jembatan ini diperlukan karena bahasa ilmiah dan bahasa kebijakan sering berbeda. Ahli geologi dapat menjelaskan litologi, struktur, akuifer, sesar, kerentanan, dan proses geomorfologi, tetapi perencana ruang memerlukan kategori zonasi, arahan kegiatan, ketentuan khusus, dan syarat pemanfaatan. Pejabat pengambil keputusan memerlukan pertimbangan yang ringkas, sahih, dan dapat dipertanggung jawabkan. GTL menerjemahkan bahasa geologi menjadi bahasa keputusan tanpa menghilangkan dasar ilmiahnya.

Kebutuhan ini sangat terlihat dalam integrasi GTL ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan perizinan sektor. Dalam RTRW dan RDTR, GTL dapat menyediakan dasar untuk menetapkan kawasan lindung geologi, kawasan dengan pembatas pemanfaatan, ketentuan khusus, dan arahan pengendalian. Dalam KLHS, GTL dapat membantu menilai daya dukung, daya tampung, risiko, dan alternatif kebijakan. Dalam dokumen lingkungan, GTL dapat membantu menilai dampak terhadap tanah, batuan, air tanah, fungsi resapan, dan risiko geologi.

GTL juga menjadi jembatan antara kebencanaan geologi dan tata ruang. Data Bahaya Geologi dan Peta KRB Geologi perlu digunakan dalam keputusan ruang, tetapi penggunaannya memerlukan sintesis terhadap rencana kegiatan dan kondisi lokal. GTL dapat menilai apakah suatu kegiatan masih dapat dilakukan, harus memenuhi syarat teknis tertentu, atau tidak direkomendasikan. Dengan demikian, GTL membantu mengubah data bahaya menjadi arahan pemanfaatan ruang yang operasional.

Gambar 2.2. Posisi GTL sebagai jembatan antara ilmu, regulasi, dan keputusan ruang.

Dalam konservasi geologi dan Geopark, GTL menjadi jembatan antara nilai geologi dan pengelolaan ruang. Warisan Geologi perlu dinilai, dilindungi, dan pada beberapa kondisi dikembangkan sebagai bagian dari edukasi dan geowisata. Namun, pengembangan tersebut harus memperhatikan daya dukung, keselamatan, akses, tekanan pengunjung, dan perlindungan nilai geologi. GTL dapat membantu menilai keseimbangan antara konservasi dan pemanfaatan.

Geologi Tata Lingkungan tidak menggantikan kewenangan sektor, tetapi memperkuat keputusan sektor dengan dasar geologi yang dapat dipertanggungjawabkan.

2.11 Kesimpulan Bab

Bab ini menegaskan bahwa Geologi Tata Lingkungan memiliki akar akademik pada environmental geology, tetapi berkembang sebagai kerangka penerapan yang khas untuk kebutuhan Indonesia. Environmental geology menjelaskan hubungan antara bumi, lingkungan, dan manusia. Geologi Lingkungan di Indonesia mengembangkan hubungan tersebut dalam praktik penyelidikan dan rekomendasi teknis. Geologi Tata Lingkungan memperluasnya menjadi kerangka sintesis, validasi, pertimbangan teknis, dan pengendalian pemanfaatan ruang

Pembedaan antara Geologi Lingkungan, KGL, Kajian GTL, dan Pertimbangan Teknis GTL sangat penting. Geologi Lingkungan adalah basis ilmu. KGL adalah metode teknis-operasional.

Bab ini juga menunjukkan bahwa lingkungan geologi merupakan objek kajian sekaligus objek pengaturan. Sebagai objek kajian, lingkungan geologi dipelajari untuk memahami kondisi, proses, potensi, dan pembatas. Sebagai objek pengaturan, lingkungan geologi diterjemahkan menjadi arahan pemanfaatan, syarat teknis, pembatasan, perlindungan, dan pemantauan. Hubungan antara kajian dan pengaturan inilah yang menjadi inti GTL.

Dengan demikian, GTL dapat dipahami sebagai jembatan antara ilmu, regulasi, dan keputusan ruang. GTL membantu agar data geologi tidak berhenti sebagai informasi teknis, melainkan digunakan untuk membangun tata ruang yang aman, lingkungan yang terlindungi, kawasan bernilai geologi yang terjaga, dan pembangunan yang bertanggung jawab.

> *Istilah yang jelas adalah pintu pertama menuju kerja ilmiah yang tertib. Geologi Lingkungan, Kajian Geologi Lingkungan, Kajian Geologi Tata Lingkungan, dan Pertimbangan Teknis GTL perlu ditempatkan pada kedudukan masing-masing agar tidak saling tertukar. Ilmu memberi dasar, analisis memberi cara kerja, kajian memberi sintesis, dan pertimbangan teknis memberi arah keputusan. Dengan memahami perbedaan itu, pembaca dapat melihat GTL bukan sebagai istilah baru yang berdiri sendiri, tetapi sebagai jembatan antara pengetahuan kebumian dan keputusan ruang. Bahasa yang tertib membuat bumi lebih mudah diterjemahkan ke dalam kebijakan.*

BAB 3

Lingkungan Geologi sebagai Fondasi Ruang Hidup

3.1 Pengantar

Bab pertama menjelaskan alasan mengapa Geologi Tata Lingkungan diperlukan, sedangkan Bab kedua memperjelas hubungan antara Geologi Lingkungan, Kajian Geologi Lingkungan, Kajian GTL, dan Pertimbangan Teknis GTL. Bab ketiga melangkah lebih jauh dengan membahas objek utama yang menjadi dasar seluruh kerangka tersebut, yaitu lingkungan geologi. Tanpa pemahaman yang memadai mengenai lingkungan geologi, GTL berisiko hanya menjadi istilah administratif, bukan perangkat ilmiah dan teknis yang benar-benar bertumpu pada kondisi bumi.

Lingkungan geologi dapat dipahami sebagai ruang fisik dan proses kebumian yang memengaruhi serta dipengaruhi oleh kehidupan manusia. Ia mencakup tanah, batuan, bentuk lahan, air tanah, air permukaan yang berinteraksi dengan kondisi geologi, struktur geologi, proses geomorfologi, sumber daya geologi, bahaya geologi, dan nilai geologi. Dalam environmental geology, unsur-unsur tersebut tidak dipelajari sebagai komponen yang berdiri sendiri, tetapi sebagai sistem yang berkaitan dengan penggunaan lahan, kualitas lingkungan, keselamatan manusia, dan keberlanjutan sumber daya (Keller; Montgomery; Bell).

Dalam konteks GTL, lingkungan geologi berfungsi sebagai fondasi ruang hidup. Istilah fondasi di sini tidak hanya berarti dasar fisik tempat bangunan berdiri, tetapi juga dasar ekologis, hidrologis, geomorfologis, dan keselamatan bagi pembangunan wilayah. Suatu kawasan dapat tampak layak secara administratif, tetapi belum tentu layak secara lingkungan geologi. Sebaliknya, suatu kawasan dapat memiliki pembatas geologi tertentu, tetapi masih dapat dimanfaatkan apabila syarat teknisnya dipenuhi. Karena itu, GTL memerlukan pemahaman lingkungan geologi secara utuh.

Bab ini membahas lingkungan geologi melalui beberapa unsur utama: tanah dan batuan, bentuk lahan dan proses geomorfologi, air tanah dan sistem hidrogeologi, struktur geologi dan kestabilan ruang, sumber daya geologi, bahaya geologi, kawasan bernilai geologi, serta interaksi manusia dengan lingkungan geologi. Pembahasan ini menjadi jembatan menuju Bab 4 tentang daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas geologi.

3.2 Tanah dan Batuan sebagai Dasar Fisik Pemanfaatan Ruang

Tanah dan batuan merupakan unsur paling dasar dalam lingkungan geologi. Semua kegiatan pembangunan pada akhirnya bersentuhan dengan tanah dan batuan, baik sebagai tempat berdiri bangunan, media peresapan air, bahan pembentuk lereng, tempat bergeraknya air tanah, sumber bahan bangunan, maupun media yang dapat mengalami perubahan akibat kegiatan manusia. Dalam geologi teknik, kondisi tanah dan batuan menentukan daya dukung fondasi, kestabilan lereng, kerentanan terhadap erosi, potensi penurunan, dan kebutuhan desain teknik (Bell).

Dalam GTL, tanah dan batuan tidak hanya dilihat dari nama litologi atau jenis tanahnya, tetapi dari sifat dan implikasinya terhadap pemanfaatan ruang. Batuan keras yang kompak dapat memberikan daya dukung baik untuk beberapa jenis bangunan, tetapi dapat memiliki keterbatasan dalam penyediaan air tanah apabila rekahan atau porositasnya terbatas. Endapan aluvial dapat mudah dikembangkan karena topografinya relatif datar, tetapi dapat memiliki daya dukung

rendah, muka air tanah dangkal, potensi banjir, atau kerentanan likuefaksi. Tanah hasil pelapukan batuan vulkanik dapat subur dan mendukung pertanian, tetapi pada lereng tertentu dapat rentan terhadap gerakan tanah.

Sifat tanah dan batuan juga memengaruhi fungsi lingkungan. Permeabilitas, tekstur, struktur, tingkat pelapukan, kedalaman tanah, dan hubungan dengan muka air tanah menentukan kemampuan suatu kawasan menyerap air, menyaring pencemar, atau menahan beban. Dalam konteks daerah resapan air, sifat tanah dan batuan menjadi salah satu parameter penting untuk menilai kemampuan infiltrasi. Dalam konteks TPST atau kawasan industri, sifat tanah dan batuan menjadi dasar untuk menilai potensi penyebaran pencemar ke air tanah.

KGL perlu menerjemahkan informasi tanah dan batuan ke dalam kategori operasional. Informasi litologi harus dihubungkan dengan daya dukung, kerentanan, kemampuan resapan, potensi bahan galian, potensi pencemaran, atau kebutuhan investigasi lanjutan. Dalam penilaian kesesuaian lahan, parameter tanah dan batuan sering dikombinasikan dengan kemiringan lereng, bahaya geologi, air tanah, penggunaan lahan, dan faktor lain melalui metode skoring, pembobotan, atau analisis spasial berbasis GIS (Luan et al.; Yan et al.; Ahmad et al.; Kudiai et al.).

Dengan demikian, tanah dan batuan merupakan dasar pertama untuk membaca lingkungan geologi. Kesalahan memahami sifat tanah dan batuan dapat menyebabkan kesalahan dalam penentuan lokasi, desain, mitigasi, dan pengendalian. Karena itu, GTL harus menempatkan data tanah dan batuan sebagai unsur awal dalam setiap sintesis ruang dan lingkungan.

3.3 Bentuk Lahan dan Proses Geomorfologi

Bentuk lahan merupakan hasil interaksi antara batuan, struktur geologi, iklim, air, gravitasi, waktu, dan aktivitas manusia. Bentuk lahan dapat berupa dataran aluvial, kipas aluvial, lembah sungai, lereng pegunungan, dataran pantai, teras sungai, perbukitan karst, kaldera, dataran vulkanik, delta, atau bentuk lain yang masing-masing memiliki karakter pemanfaatan dan pembatas. Dalam pendekatan environmental geology, bentuk lahan menjadi petunjuk penting untuk memahami proses yang sedang atau pernah berlangsung (Keller; Merritts, De Wet, dan Menking).

Dalam GTL, geomorfologi penting karena bentuk lahan sering mencerminkan proses dan risiko. Lereng curam dapat mengindikasikan potensi erosi atau gerakan tanah, terutama apabila tersusun oleh material mudah melapuk dan mendapat tekanan penggunaan lahan. Dataran banjir menunjukkan area yang secara alamiah berhubungan dengan dinamika sungai. Dataran pantai dapat menunjukkan kerentanan terhadap abrasi, rob, intrusi air asin, atau penurunan muka tanah. Bentang alam karst menunjukkan sistem pelarutan, aliran bawah permukaan, dan fungsi hidrogeologi yang perlu dilindungi.

Bentuk lahan juga menentukan pola pengembangan wilayah. Dataran rendah cenderung menjadi pusat permukiman, industri, jalan, pelabuhan, dan pertanian intensif karena mudah dibangun. Namun, kemudahan pengembangan tidak selalu berarti aman atau berkelanjutan. Banyak dataran rendah memiliki muka air tanah dangkal, risiko banjir, tanah lunak, atau kecenderungan penurunan muka tanah. Di sisi lain, kawasan pegunungan dapat menarik untuk pariwisata dan perkebunan, tetapi memerlukan pengendalian lereng, drainase, dan pembatasan pembukaan lahan.

Proses geomorfologi perlu dibaca sebagai proses yang terus berlangsung. Sungai mengikis, mengangkut, dan mengendapkan material. Pantai mengalami abrasi dan akresi. Lereng mengalami pelapukan, erosi, dan gerakan massa. Karst mengalami pelarutan dan membentuk sistem aliran bawah permukaan. Gunung api membentuk endapan dan bentang alam baru. Dalam konteks tata ruang, mengabaikan proses geomorfologi berarti menganggap ruang sebagai benda statis, padahal ruang geologi selalu berubah.

KGL perlu memasukkan bentuk lahan dan proses geomorfologi sebagai parameter utama. Informasi geomorfologi membantu menilai kesesuaian lahan, menentukan zona

resapan, mengidentifikasi bahaya, menilai kestabilan lereng, dan menyusun rekomendasi pemanfaatan ruang. Dalam peta sintesis GTL, satuan geomorfologi dapat menjadi kerangka dasar untuk menggabungkan informasi geologi, air tanah, bahaya, dan penggunaan lahan.

3.4 Air Tanah dan Sistem Hidrogeologi

Air tanah merupakan bagian penting dari lingkungan geologi karena keberadaannya sangat dipengaruhi oleh sifat batuan, struktur geologi, topografi, curah hujan, daerah imbuhan, dan penggunaan lahan. Air tanah bukan hanya sumber daya air, tetapi juga indikator fungsi lingkungan geologi. Perubahan tata ruang dapat mengubah imbuhan, kualitas, muka air tanah, arah aliran, dan keberlanjutan cadangan air tanah. Karena itu, GTL perlu memandang air tanah sebagai unsur penting dalam sintesis ruang.

Fetter menjelaskan bahwa air tanah bergerak dalam sistem akuifer yang dikontrol oleh sifat porositas, permeabilitas, gradien hidrolik, dan batas geologi. Hiscock dan Bense menekankan bahwa hidrogeologi diperlukan untuk memahami keberlanjutan sumber daya air, kualitas air, dan hubungan antara air tanah dengan perubahan lingkungan. Dalam GTL, pemahaman tersebut menjadi dasar untuk menilai daerah resapan, daerah lepasan, kerentanan pencemaran, serta dampak pemanfaatan ruang terhadap sistem air tanah.

Daerah imbuhan atau resapan memerlukan perhatian khusus karena menjadi tempat masuknya air ke sistem akuifer. Perubahan tutupan lahan, peningkatan permukaan kedap air, pemadatan tanah, pengurangan ruang terbuka hijau, dan perubahan drainase dapat menurunkan imbuhan air tanah. Dalam kawasan perkotaan, persoalan ini sering berhubungan dengan peningkatan limpasan, banjir lokal, penurunan muka air tanah, dan menurunnya fungsi tata air. Karena itu, zona resapan air perlu dipahami sebagai bagian dari informasi GTL yang berhubungan langsung dengan tata ruang.

Kerentanan air tanah terhadap pencemaran juga menjadi isu penting. Model DRASTIC dan pengembangannya menunjukkan bahwa kerentanan air tanah dapat dinilai melalui parameter kedalaman muka air tanah, imbuhan, media akuifer, jenis tanah, topografi, zona tak jenuh, dan konduktivitas hidraulik (Bera et al.; Satouh et al.; Barbulescu). Kozłowski et al. menunjukkan bahwa penggunaan lahan dapat dimasukkan ke dalam penilaian kerentanan agar lebih relevan untuk perencanaan. Bagi KGL, pendekatan ini penting untuk kawasan industri, TPST, permukiman padat, dan daerah resapan.

Dalam kerangka GTL, air tanah harus diposisikan secara hati-hati. Pengaturan sumber daya air dan air tanah memiliki rezim peraturan tersendiri. Namun, data air tanah sangat penting sebagai data pendukung sintesis GTL. GTL tidak mengambil alih pengaturan air tanah, tetapi menggunakan data hidrogeologi untuk menilai kesesuaian ruang, fungsi resapan, risiko pencemaran, dan syarat pemanfaatan. Dengan demikian, air tanah menjadi komponen penghubung antara geologi, lingkungan hidup, dan tata ruang.

3.5 Struktur Geologi, Kestabilan, dan Kerentanan Ruang

Struktur geologi seperti sesar, lipatan, rekahan, kekar, dan zona deformasi memengaruhi kondisi lingkungan geologi. Struktur geologi dapat mengontrol aliran air tanah, kestabilan lereng, distribusi batuan, zona lemah, sumber mata air, potensi gempa, serta jalur pergerakan fluida. Dalam kawasan tertentu, struktur geologi menjadi faktor penting dalam penilaian kelayakan pembangunan dan pengendalian risiko.

Dalam geologi teknik, keberadaan struktur geologi perlu diperhitungkan karena dapat memengaruhi kekuatan massa batuan, arah potensi runtuhan lereng, rembesan, kestabilan fondasi, dan desain konstruksi. Bell menekankan pentingnya memahami kondisi geologi dan struktur batuan dalam pekerjaan rekayasa. Dalam GTL, informasi struktur geologi perlu diterjemahkan menjadi implikasi ruang: apakah suatu area memerlukan investigasi detail, apakah ada zona yang harus dihindari, atau apakah pemanfaatan masih memungkinkan dengan syarat teknis tertentu.

Struktur geologi juga berhubungan dengan bahaya. Sesar aktif, misalnya, dapat menjadi dasar penetapan zona pembatas dalam pembangunan. Contoh internasional dari California melalui Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act menunjukkan bahwa informasi sesar aktif dapat digunakan untuk mengendalikan pembangunan di sekitar zona sesar. Walaupun konteks hukum Indonesia berbeda, prinsipnya relevan bagi GTL: informasi geologi struktural yang memiliki implikasi keselamatan perlu diterjemahkan ke dalam pengaturan ruang.

Kestabilan ruang tidak hanya ditentukan oleh struktur geologi, tetapi juga oleh hubungan antara struktur, litologi, lereng, air, dan kegiatan manusia. Lereng yang tampak stabil dapat menjadi rentan apabila terjadi pemotongan lereng, perubahan drainase, pembebanan, atau perubahan tutupan lahan. Kawasan yang memiliki batuan retak intensif dapat memiliki risiko lebih tinggi terhadap pergerakan massa atau rembesan. Karena itu, GTL perlu menilai kestabilan ruang secara integratif.

Informasi struktur geologi sering kali memerlukan skala dan ketelitian yang sesuai. Untuk perencanaan regional, informasi struktur utama mungkin cukup sebagai indikasi awal. Untuk tapak fasilitas strategis, kawasan industri besar, PLTN, bendungan, atau prasarana pesisir penting, informasi struktur harus diteliti lebih rinci. Dengan demikian, GTL harus mampu membedakan tingkat kebutuhan data sesuai tingkat risiko dan konsekuensi kegiatan.

3.6 Sumber Daya Geologi dan Pemanfaatan Berkelanjutan

Lingkungan geologi menyediakan berbagai sumber daya yang mendukung kehidupan dan pembangunan. Sumber daya tersebut mencakup air tanah, mineral, batuan, bahan bangunan, energi fosil, panas bumi, lahan, bentang alam, dan nilai geologi. Dalam environmental geology, pemanfaatan sumber daya harus selalu dihubungkan dengan dampaknya terhadap lingkungan, keselamatan, dan keberlanjutan (Flawn; Keller; Pipkin et al.).

Dalam GTL, sumber daya geologi tidak hanya dipandang dari sisi potensi ekonomi. Setiap sumber daya memiliki konteks ruang dan lingkungan. Pemanfaatan bahan galian dapat mengubah bentuk lahan, drainase, kestabilan lereng, kualitas air, dan fungsi kawasan. Pemanfaatan air tanah dapat memengaruhi muka air tanah, intrusi air asin, penurunan muka tanah, dan keberlanjutan pasokan. Pemanfaatan bentang alam untuk wisata dapat memberikan manfaat ekonomi, tetapi juga dapat menimbulkan tekanan terhadap kawasan bernilai geologi.

GTL diperlukan untuk menilai keseimbangan antara pemanfaatan dan perlindungan. Sumber daya yang dapat dimanfaatkan perlu diarahkan sesuai daya dukung dan syarat teknis. Sumber daya yang memiliki fungsi lindung atau nilai penting perlu dikelola dengan lebih hati-hati. Kawasan yang berfungsi sebagai resapan, kawasan karst penting, atau situs warisan geologi tidak dapat diperlakukan semata-mata sebagai lahan cadangan pembangunan.

Dalam kerangka tata ruang, informasi sumber daya geologi dapat menjadi dasar alokasi ruang, tetapi harus dipadukan dengan informasi bahaya, daya dukung, kawasan lindung, dan penggunaan lahan. Kawasan yang kaya sumber daya tidak selalu otomatis layak dikembangkan secara intensif. Sebaliknya, kawasan dengan pembatas tertentu dapat tetap dimanfaatkan apabila jenis kegiatan dan syaratnya sesuai. GTL memberi kerangka untuk membuat keputusan semacam ini secara lebih seimbang.

Pemanfaatan berkelanjutan juga memerlukan pemantauan. Kondisi lingkungan geologi dapat berubah akibat eksploitasi, pembangunan, perubahan iklim, atau dinamika alami. Oleh karena itu, informasi GTL tidak boleh dipahami sebagai data sekali jadi. Data dan rekomendasi perlu diperbarui sesuai perubahan kondisi, terutama pada kawasan yang mengalami tekanan pembangunan tinggi.

3.7 Bahaya Geologi sebagai Bagian dari Lingkungan Geologi

Bahaya geologi merupakan proses atau kondisi geologi yang berpotensi menimbulkan kerugian bagi manusia, lingkungan, infrastruktur, dan kegiatan ekonomi. Gempa

bumi, tsunami, letusan gunung api, gerakan tanah, likuefaksi, penurunan muka tanah, abrasi, erosi, banjir yang dipengaruhi kondisi geologi, dan intrusi air asin merupakan contoh bahaya yang perlu diperhitungkan dalam GTL. Dalam natural hazards, bahaya menjadi risiko ketika bertemu dengan unsur terpapar dan kerentanan (Hyndman dan Hyndman).

Dalam GTL, bahaya geologi tidak diposisikan sebagai tema terpisah dari lingkungan geologi. Bahaya geologi merupakan salah satu ekspresi dari dinamika lingkungan geologi. Lereng, batuan, struktur, air, bentuk lahan, dan penggunaan lahan dapat berinteraksi membentuk kondisi bahaya. Karena itu, penilaian bahaya harus dimasukkan ke dalam sintesis kesesuaian ruang, bukan ditempatkan sebagai informasi tambahan yang berdiri sendiri.

Data Bahaya Geologi dan Peta Kawasan Rawan Bencana Geologi memiliki peran penting sebagai rujukan. Namun, penggunaan data tersebut dalam tata ruang memerlukan penafsiran terhadap rencana kegiatan, skala analisis, tingkat risiko yang dapat diterima, dan syarat teknis mitigasi. GTL dapat membantu menerjemahkan data bahaya menjadi arahan pemanfaatan ruang, seperti kawasan yang harus dihindari, kawasan yang dapat dimanfaatkan dengan syarat teknis, atau kawasan yang memerlukan kajian rinci.

3.8 Nilai Geologi, Geoheritage, dan Kawasan Bernilai Penting

Lingkungan geologi tidak hanya memiliki fungsi fisik dan ekonomi, tetapi juga nilai ilmiah, pendidikan, estetika, budaya, dan konservasi. Nilai ini muncul pada situs fosil, bentang alam unik, struktur geologi penting, batuan khas, bentuk lahan langka, sistem karst, kaldera, gunung api, pantai, kawasan tektonik, dan berbagai objek geologi lain. Dalam konsep geoheritage, nilai geologi perlu dikenali, dinilai, dilindungi, dan dikelola (Brilha; Brocx dan Semeniuk; Reynard dan Brilha).

Gray menempatkan geodiversity sebagai keragaman unsur abiotik alam, termasuk batuan, mineral, fosil, tanah, bentuk lahan, dan proses. Keragaman ini menjadi dasar bagi geoheritage dan geoconservation. Dalam konteks Indonesia, Warisan Geologi Nusantara menunjukkan bahwa Indonesia memiliki kekayaan nilai geologi yang sangat besar dan beragam (Oktariadi dan Suhendar, 2020). Nilai ini menjadi modal penting untuk konservasi, pendidikan, penelitian, geowisata, dan pengembangan Geopark.

Dalam GTL, kawasan bernilai geologi perlu diperlakukan sebagai bagian dari lingkungan geologi yang memiliki implikasi ruang. Artinya, nilai geologi tidak hanya dicatat sebagai objek ilmiah atau daya tarik wisata, tetapi harus diterjemahkan ke dalam kebutuhan perlindungan, pengaturan akses, pengendalian pembangunan, dan pemantauan. Warisan Geologi yang memerlukan perlindungan ruang dapat menjadi dasar usulan atau penetapan Kawasan Cagar Alam Geologi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Dalam penerapan nasional, penggunaan peta KRB perlu merujuk pedoman teknis dan standar pemetaan yang berlaku di lingkungan Badan Geologi/PVMBG serta, apabila tersedia, SNI terkait. Rujukan standar ini penting agar kelas bahaya, skala peta, simbolisasi, dan batas penggunaan data tidak diterjemahkan secara bebas oleh pengguna hilir.

Literatur mengenai natural hazards and land use menunjukkan bahwa pengaturan penggunaan lahan merupakan instrumen penting dalam pengurangan risiko. Bathrellos menekankan bahwa perencanaan lahan dapat membantu membedakan area aman dan tidak aman untuk aktivitas perkotaan. Pendekatan ini sejalan dengan GTL karena GTL tidak hanya mendeskripsikan bahaya, tetapi menghubungkannya dengan keputusan ruang dan pengendalian pemanfaatan.

Dalam konteks Indonesia, integrasi bahaya geologi ke dalam GTL sangat penting karena pembangunan sering berlangsung pada kawasan yang memiliki potensi bahaya. Pengendalian risiko tidak cukup dilakukan setelah bencana terjadi. Risiko perlu dikurangi sejak tahap perencanaan melalui pemilihan lokasi, penentuan intensitas pemanfaatan ruang, persyaratan teknis bangunan, pengaturan drainase, perlindungan kawasan, dan pemantauan. GTL memberi kerangka untuk melakukan hal tersebut.

Geopark juga memerlukan dukungan GTL. Perpres tentang Pengembangan Taman Bumi menempatkan Geopark sebagai wilayah geografis yang memiliki warisan geologi dan dikelola secara terpadu untuk konservasi, edukasi, dan pembangunan ekonomi masyarakat secara berkelanjutan. Namun, pengembangan Geopark perlu memperhatikan daya dukung kawasan, keselamatan pengunjung, risiko geologi, tata ruang, dan perlindungan nilai geologi. GTL dapat menyediakan dasar teknis untuk menyeimbangkan konservasi dan pemanfaatan.

Seri buku geowisata daerah yang disusun dari Warisan Geologi Nusantara dapat dipahami sebagai bentuk interpretasi publik terhadap nilai geologi. Namun, dalam kerangka GTL, geowisata tidak boleh dilepaskan dari pengendalian kawasan. Interpretasi, akses, infrastruktur wisata, keselamatan, dan keterlibatan masyarakat harus memperhatikan kapasitas lingkungan geologi. Dengan demikian, nilai geologi menjadi bagian integral dari tata ruang dan pembangunan berkelanjutan, bukan sekadar objek promosi.

3.9 Interaksi Manusia dengan Lingkungan Geologi

Lingkungan geologi dan aktivitas manusia membentuk hubungan timbal balik. Manusia memanfaatkan tanah, batuan, air, mineral, energi, dan bentang alam. Pada saat yang sama, aktivitas manusia mengubah tutupan lahan, mengubah drainase, mengambil air tanah, memotong lereng, menimbun lahan, membangun kawasan padat, menghasilkan limbah, dan mengubah keseimbangan fisik kawasan. Environmental geology mempelajari hubungan timbal balik ini agar pembangunan dapat dilakukan dengan lebih hati-hati (Keller; Montgomery).

Perubahan penggunaan lahan merupakan salah satu bentuk interaksi paling penting. Perubahan dari lahan terbuka menjadi kawasan terbangun dapat mengurangi infiltrasi, meningkatkan limpasan, menekan fungsi resapan, mengubah kualitas air, dan meningkatkan risiko banjir. Pembukaan lahan pada lereng dapat meningkatkan erosi dan gerakan tanah. Pengambilan air tanah berlebihan dapat menurunkan muka air tanah, memicu intrusi air asin di kawasan pesisir, atau berkontribusi pada penurunan muka tanah.

Kegiatan pembangunan juga dapat meningkatkan kerentanan terhadap bahaya. Kawasan yang secara alamiah memiliki bahaya sedang dapat berubah menjadi kawasan berisiko tinggi apabila dipadati penduduk dan infrastruktur tanpa syarat teknis memadai. Sebaliknya, kawasan yang memiliki potensi bahaya dapat dikelola lebih aman apabila pemanfaatannya dibatasi, dirancang dengan standar teknik tepat, dan dipantau secara berkala. Dengan demikian, risiko bukan hanya hasil proses geologi, tetapi juga hasil keputusan manusia terhadap ruang.

Interaksi manusia dengan lingkungan geologi juga menghasilkan kebutuhan pengaturan. Jika setiap kegiatan dibiarkan hanya mengikuti kepentingan sektoral atau ekonomi jangka pendek, fungsi lingkungan geologi dapat menurun. Karena itu, GTL diperlukan untuk memberikan dasar teknis dalam mengatur penggunaan lahan, menetapkan syarat pemanfaatan, melindungi fungsi penting, dan mengarahkan kegiatan agar sesuai dengan kemampuan lingkungan.

Dalam praktik, GTL harus mampu membaca interaksi ini secara prospektif. Artinya, kajian GTL tidak hanya melihat kondisi saat ini, tetapi juga memperkirakan dampak perubahan pemanfaatan ruang terhadap lingkungan geologi. Apabila kawasan resapan akan berubah menjadi kawasan terbangun, apa dampaknya terhadap imbuhan air tanah? Apabila kawasan industri dikembangkan pada daerah dengan muka air tanah dangkal, apa risiko pencemarannya? Apabila geosite dibuka untuk wisata massal,

apa dampaknya terhadap nilai geologi dan keselamatan? Pertanyaan-pertanyaan seperti ini menjadi inti GTL.

3.10 Lingkungan Geologi dan Satuan Analisis GTL

Agar dapat digunakan dalam perencanaan, lingkungan geologi perlu diterjemahkan ke dalam satuan analisis. Satuan analisis adalah ruang atau unit yang digunakan untuk menggabungkan data dan menilai karakteristik lingkungan geologi. Satuan ini dapat berupa satuan geologi, satuan geomorfologi, satuan hidrogeologi, satuan lereng, satuan bahaya, satuan lahan, batas administrasi, batas perencanaan, atau gabungan beberapa unsur tersebut.

Pemilihan satuan analisis sangat menentukan hasil KGL dan GTL. Apabila satuan terlalu umum, informasi lokal yang penting dapat hilang. Apabila satuan terlalu rinci tanpa dukungan data memadai, hasil analisis dapat memberi kesan presisi yang tidak didukung ketelitian data. Karena itu, pemilihan satuan analisis harus disesuaikan dengan tujuan kajian, skala peta, tingkat keputusan, dan ketersediaan data.

Untuk RTRW, satuan analisis dapat bersifat regional dan digunakan untuk arahan umum. Untuk RDTR, satuan analisis harus lebih rinci agar dapat mendukung pengaturan zonasi dan ketentuan pemanfaatan ruang. Untuk tapak fasilitas strategis, satuan analisis harus lebih detail lagi dan sering memerlukan investigasi lapangan serta uji geologi teknik. Dengan demikian, GTL harus membedakan kebutuhan data untuk kebijakan makro, perencanaan rinci, dan keputusan tapak.

Satuan analisis juga penting untuk menyusun peta sintesis. Peta kesesuaian lahan, peta zona resapan, peta kerentanan, peta pembatas, dan peta rekomendasi tidak dapat disusun tanpa kerangka spasial yang jelas. Dalam metode GIS dan multi-criteria decision analysis, satuan analisis menjadi tempat skor, bobot, dan parameter digabungkan. Karena itu, metodologi KGL harus menjelaskan satuan analisis yang digunakan.

Dalam buku ini, satuan analisis GTL dipahami sebagai jembatan antara realitas geologi dan kebutuhan perencanaan. Realitas geologi bersifat kontinu dan kompleks, sedangkan perencanaan membutuhkan batas, kategori, dan rekomendasi. Satuan analisis membantu menerjemahkan kompleksitas tersebut menjadi informasi yang dapat digunakan tanpa mengabaikan keterbatasan data dan ketidakpastian.

Tabel 3.1 Unsur lingkungan geologi dan implikasinya bagi GTL.

Unsur Lingkungan Geologi	Makna Teknis	Implikasi Ruang	Contoh Parameter	Kebutuhan Pengendalian
Tanah dan batuan	Dasar fisik dan media lingkungan.	Menentukan fondasi, resapan, kerentanan pencemaran, dan stabilitas.	Litologi, sifat tanah, pelapukan, permeabilitas.	Investigasi rinci, desain fondasi, perlindungan resapan.
Bentuk lahan	Cerminan proses geomorfologi.	Menentukan pola pengembangan dan potensi bahaya.	Kemiringan lereng, satuan geomorfologi, dinamika pantai atau sungai.	Pembatasan intensitas, pengelolaan drainase, konservasi lereng.
Air tanah	Sumber daya dan fungsi hidrogeologi.	Menentukan perlindungan imbuhan, kualitas air, dan ketersediaan.	Akuifer, muka air tanah, imbuhan, kerentanan.	Zonasi resapan, pemantauan kualitas, syarat kegiatan.
Struktur geologi	Pengontrol kestabilan dan aliran bawah permukaan.	Menentukan kebutuhan kajian khusus pada kawasan sensitif.	Sesar, lipatan, kekar, zona deformasi.	Zona kehati-hatian, investigasi tapak, mitigasi teknis.

Unsur Lingkungan Geologi	Makna Teknis	Implikasi Ruang	Contoh Parameter	Kebutuhan Pengendalian
Bahaya geologi	Ekspresi dinamika geologi yang berpotensi merugikan.	Menentukan pembatasan, mitigasi, dan standar pemanfaatan.	KRB, gerakan tanah, gempa, tsunami, erosi, penurunan tanah.	Arahan mitigasi, pembatasan kegiatan, pemantauan risiko.
Nilai geologi	Nilai ilmiah, pendidikan, estetika, budaya, dan konservasi.	Menentukan perlindungan kawasan dan pemanfaatan terbatas.	Warisan Geologi, KCAG, Geopark, geosite.	Perlindungan nilai, pengaturan akses, interpretasi, pemantauan.

3.11 Lingkungan Geologi sebagai Dasar Daya Dukung dan Daya Tampung

Daya dukung dan daya tampung lingkungan geologi tidak dapat dipahami tanpa memahami lingkungan geologi sebagai sistem. Daya dukung berkaitan dengan kemampuan tanah, batuan, bentuk lahan, air, dan proses geologi untuk menopang kegiatan manusia. Daya tampung berkaitan dengan kemampuan lingkungan geologi menerima tekanan, perubahan, limbah, beban, atau gangguan tanpa menurunkan fungsi dan keselamatan.

Daya dukung tidak hanya berarti kemampuan mekanik tanah atau batuan menahan bangunan. Dalam GTL, daya dukung juga mencakup ketersediaan air, kestabilan lereng, kemampuan resapan, ketahanan terhadap erosi, keamanan terhadap bahaya, dan kesesuaian fungsi kawasan. Suatu kawasan dapat memiliki daya dukung baik untuk pertanian, tetapi tidak untuk permukiman padat. Kawasan lain dapat sesuai untuk konservasi dan geowisata terbatas, tetapi tidak sesuai untuk industri besar. Karena itu, daya dukung selalu harus dikaitkan dengan jenis pemanfaatan.

Daya tampung juga bersifat kontekstual. Kawasan dengan air tanah rentan dapat memiliki daya tampung rendah terhadap kegiatan yang menghasilkan limbah cair. Kawasan resapan dapat memiliki daya tampung rendah terhadap peningkatan permukaan kedap air. Kawasan bernilai geologi dapat memiliki daya tampung terbatas terhadap kunjungan massal. Kawasan rawan gerakan tanah dapat memiliki daya tampung rendah terhadap pembukaan lahan dan pemotongan lereng.

Konsep daya dukung dan daya tampung dalam GTL sebaiknya tidak diperlakukan sebagai angka tunggal yang berlaku untuk semua kegiatan. Keduanya perlu diterjemahkan ke dalam kategori dan syarat pemanfaatan. Misalnya, sesuai tanpa syarat khusus, sesuai bersyarat, terbatas, tidak sesuai, atau memerlukan kajian rinci. Pendekatan ini lebih operasional karena dapat langsung dihubungkan dengan pengaturan zonasi, dokumen lingkungan, dan rekomendasi teknis.

Dengan demikian, lingkungan geologi merupakan dasar bagi penilaian daya dukung dan daya tampung. Bab berikutnya akan membahas lebih rinci bagaimana daya dukung, daya tampung, faktor pendukung, faktor pembatas, dan faktor penyisih digunakan dalam GTL untuk menilai kesesuaian ruang dan mengarahkan pemanfaatan lahan.

3.12 Kesimpulan Bab

Lingkungan geologi merupakan fondasi ruang hidup. Ia mencakup tanah, batuan, bentuk lahan, air tanah, struktur geologi, sumber daya geologi, bahaya geologi, nilai geologi, dan proses yang terus berlangsung. Semua unsur tersebut menentukan bagaimana manusia dapat memanfaatkan ruang, batas apa yang harus dihormati, risiko apa yang perlu dikendalikan, dan nilai apa yang harus dilindungi.

Bab ini menunjukkan bahwa lingkungan geologi tidak cukup dipahami sebagai kumpulan data geologi. Lingkungan geologi harus dibaca sebagai sistem yang mendukung, membatasi, menerima tekanan, dan berubah akibat proses alam maupun aktivitas manusia. Karena itu, GTL perlu menggunakan pendekatan sintesis agar tanah, batuan, air

tanah, geomorfologi, bahaya, sumber daya, dan nilai konservasi dapat dipahami dalam satu kerangka ruang.

Dalam kerangka KGL, lingkungan geologi diterjemahkan menjadi parameter analisis. Dalam kerangka GTL, parameter tersebut disintesis menjadi informasi mengenai daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, syarat pemanfaatan, perlindungan kawasan, dan pengendalian risiko. Dengan demikian, lingkungan geologi menjadi dasar konseptual dan teknis bagi tata ruang yang aman, lingkungan yang terlindungi, dan pembangunan yang berkelanjutan.

Bab ini juga menegaskan bahwa setiap keputusan ruang harus memperhitungkan jenis pemanfaatan. Suatu kawasan tidak dapat disebut baik atau buruk secara mutlak; ia harus dinilai berdasarkan kesesuaian terhadap kegiatan tertentu, skala pemanfaatan, intensitas pembangunan, risiko yang dapat diterima, dan syarat teknis yang dapat diterapkan. Pemahaman inilah yang menjadi dasar pembahasan Bab 4 mengenai daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas geologi.

Lingkungan geologi adalah dasar ruang hidup yang sering tidak terlihat, tetapi selalu bekerja. Tanah menyimpan sifatnya, batuan menyimpan kekuatannya, air tanah mengikuti jalurnya, lereng mencari keseimbangannya, dan proses geologi terus berlangsung melampaui umur rencana pembangunan. Manusia sering melihat permukaan, tetapi GTL mengajak membaca dasar yang menopang permukaan itu. Ruang yang aman lahir dari kemampuan memahami hubungan antara bumi dan kehidupan di atasnya. Setiap tapak memiliki cerita, dan cerita itu dimulai jauh sebelum manusia menggambar rencana.

BAGIAN II

Metodologi Kajian Geologi Lingkungan untuk Rekomendasi Tata Ruang

Pengantar Bagian II

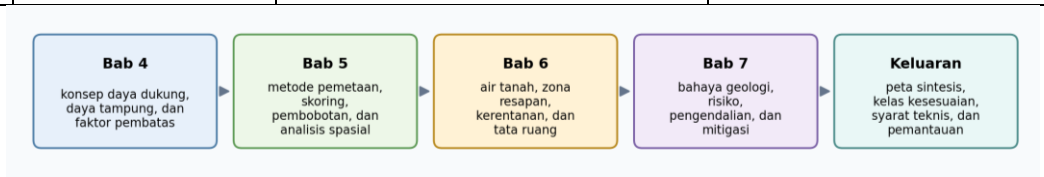
Bagian II menjadi penghubung langsung antara narasi metodologis dan Lampiran Teknis. Bab 4 sampai Bab 7 menjelaskan konsep daya dukung, daya tampung, pemetaan, skoring, pembobotan, zona resapan, neraca air, dan bahaya geologi; lampiran kemudian menyediakan tata cara kerja untuk menerapkan konsep tersebut pada peruntukan lahan, kawasan, tapak, prasarana, pengendalian banjir hulu-tengah-hilir, serta studi kasus pengembangan kota baru.

Bagian II menerjemahkan fondasi konseptual pada Bagian I menjadi perangkat operasional dan metodologis. Jika Bagian I menjawab mengapa GTL diperlukan, maka Bagian II menjawab bagaimana lingkungan geologi dinilai, dipetakan, diberi kelas, dan diterjemahkan menjadi rekomendasi ruang.

Pembahasan dimulai dari daya dukung, daya tampung, faktor pendukung, faktor pembatas, dan faktor penyisih. Setelah itu, bagian ini menjelaskan metode pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial dalam KGL. Dua tema aplikatif kemudian dibahas secara khusus, yaitu air tanah dan zona resapan, serta bahaya geologi dalam pengendalian pemanfaatan ruang.

Tabel II.1 Peta jalan Bagian II.

Bab	Fokus utama	Pertanyaan pengarah	Keluaran operasional
Bab 4	Daya dukung, daya tampung, dan pembatas	Bagaimana lingkungan geologi dinilai untuk menentukan batas pemanfaatan?	Kategori kesesuaian, pembatas, penyisih, dan syarat pemanfaatan.
Bab 5	Pemetaan dan analisis spasial	Bagaimana data geologi diolah menjadi peta sintesis dan rekomendasi?	Parameter, skor, bobot, kelas kesesuaian, dan validasi.
Bab 6	Air tanah dan zona resapan	Bagaimana fungsi imbuhan dan kerentanan air tanah masuk ke tata ruang?	Arahan perlindungan resapan, ITBX, syarat teknis, dan pemantauan.
Bab 7	Bahaya geologi	Bagaimana bahaya geologi menjadi dasar pengendalian pemanfaatan ruang?	Mitigasi, pembatasan kegiatan, kajian rinci, dan pemantauan risiko.



Gambar II.1. Bagan Alir yang menunjukkan peta jalan operasional Bagian II.

Bagian II menekankan bahwa KGL tidak boleh berhenti sebagai kompilasi peta. Setiap peta harus mempunyai fungsi analitis; setiap skor dan bobot harus dapat dijelaskan; setiap kelas kesesuaian harus dapat ditelusuri ke data; dan setiap rekomendasi harus dapat diterjemahkan ke dalam tata ruang, dokumen lingkungan, serta syarat teknis.

Dengan demikian, Bagian II menjadi jembatan antara konsep GTL dan instrumen pelaksanaan. Pembaca diharapkan memahami hubungan antara data, metode, skala, validasi, rekomendasi, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

BAB 4

Daya Dukung, Daya Tampung, dan Faktor Pembatas Geologi

4.1 Pengantar

Bab 3 telah menegaskan bahwa lingkungan geologi merupakan fondasi ruang hidup. Bab 4 melanjutkan pembahasan tersebut dengan menjelaskan bagaimana lingkungan geologi dinilai dalam kerangka daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas. Ketiga konsep ini sangat penting karena menjadi dasar untuk menentukan apakah suatu ruang dapat dimanfaatkan, dapat dimanfaatkan dengan syarat, perlu dibatasi, atau tidak direkomendasikan untuk kegiatan tertentu.

Dalam tata kelola ruang, daya dukung dan daya tampung sering dipakai sebagai istilah kunci. Namun, dalam Geologi Tata Lingkungan, keduanya perlu diberi makna yang lebih spesifik. Daya dukung geologi tidak hanya berarti kemampuan fondasi menahan bangunan, tetapi juga kemampuan lingkungan geologi menopang fungsi ruang, ketersediaan air, kestabilan lahan, keamanan terhadap bahaya, dan keberlanjutan fungsi lingkungan. Daya tampung geologi tidak hanya berarti kemampuan menerima beban fisik, tetapi juga kemampuan menerima tekanan, perubahan, limbah, dan intensitas pemanfaatan tanpa kehilangan fungsi serta keselamatan.

Faktor pembatas geologi merupakan unsur atau kondisi geologi yang membatasi pemanfaatan ruang. Pembatas tersebut dapat berupa bahaya geologi, daya dukung rendah, kerentanan air tanah, fungsi resapan yang harus dipertahankan, lereng tidak stabil, kawasan bernilai geologi, kawasan lindung geologi, atau kondisi tapak yang memerlukan investigasi rinci. Dalam KGL, faktor pembatas harus dikenali sejak awal karena menentukan arah rekomendasi teknis.

Bab ini membahas daya dukung, daya tampung, faktor pendukung, faktor pembatas, faktor penyisih, hubungan antara pembatas dan rekomendasi ruang, serta prinsip kehati-hatian dalam pengambilan keputusan. Dengan demikian, Bab 4 menjadi dasar metodologis sebelum buku ini masuk ke pembahasan mengenai data, parameter, skala, metode analisis, dan produk GTL pada bab-bab berikutnya.

Gambar 4.1. Dari data geologi menuju rekomendasi operasional Geologi Tata Lingkungan.

4.2 Daya Dukung Geologi

Daya dukung geologi adalah kemampuan lingkungan geologi untuk menopang kegiatan manusia, infrastruktur, dan fungsi ruang tertentu. Kemampuan ini dipengaruhi oleh sifat tanah dan batuan, bentuk lahan, kemiringan lereng, kondisi air tanah, struktur geologi, proses geomorfologi, serta potensi bahaya. Karena itu, daya dukung geologi

selalu bersifat kontekstual dan harus dikaitkan dengan jenis kegiatan yang akan ditempatkan pada suatu kawasan.

Dalam pengertian sempit, daya dukung sering dipahami sebagai kemampuan tanah atau batuan menerima beban bangunan. Pemahaman ini penting, tetapi belum cukup untuk GTL. Kawasan yang kuat secara fondasi belum tentu memiliki daya dukung baik untuk kawasan industri apabila air tanahnya rentan terhadap pencemaran. Kawasan yang relatif datar belum tentu sesuai untuk permukiman padat apabila berada pada area banjir berulang, penurunan muka tanah, atau muka air tanah sangat dangkal.

Daya dukung geologi harus dibaca sebagai kemampuan sistem. Tanah, batuan, air, lereng, proses alam, dan penggunaan lahan saling berhubungan. Perubahan pada satu unsur dapat memengaruhi unsur lain. Pembukaan lahan pada lereng dapat menurunkan kestabilan dan meningkatkan erosi. Peningkatan permukaan kedap air pada daerah resapan dapat menurunkan imbuhan air tanah. Pengambilan air tanah yang tidak terkendali dapat menurunkan muka air tanah dan meningkatkan kerentanan kawasan pesisir.

Dalam KGL, penilaian daya dukung geologi dapat dilakukan dengan menggabungkan parameter fisik dan lingkungan. Parameter tersebut dapat mencakup litologi, sifat tanah, kemiringan lereng, kedalaman muka air tanah, potensi air tanah, fungsi resapan, bahaya geologi, kualitas air, dan penggunaan lahan. Hasilnya tidak harus berupa angka tunggal, tetapi dapat berupa kategori yang mudah digunakan dalam perencanaan: mendukung, mendukung bersyarat, terbatas, atau memerlukan kajian rinci.

4.3 Daya Tampung Geologi

Daya tampung geologi adalah kemampuan lingkungan geologi menerima tekanan atau perubahan akibat pemanfaatan ruang tanpa kehilangan fungsi, kestabilan, kualitas, dan keselamatannya. Tekanan tersebut dapat berupa beban pembangunan, perubahan tutupan lahan, penimbunan, penggalian, limbah cair, limbah padat, pengambilan air tanah, perubahan drainase, atau peningkatan kunjungan pada kawasan bernilai geologi.

Daya tampung berbeda dari daya dukung. Daya dukung lebih menekankan kemampuan lingkungan geologi menopang kegiatan, sedangkan daya tampung menekankan kemampuan menerima akibat kegiatan. Suatu kawasan dapat memiliki daya dukung cukup untuk bangunan rendah, tetapi daya tampung rendah terhadap limbah cair karena air tanahnya rentan. Kawasan lain dapat mendukung geowisata terbatas, tetapi tidak memiliki daya tampung untuk kunjungan massal tanpa pengaturan akses dan fasilitas keselamatan.

Dalam konteks lingkungan hidup, daya tampung geologi penting untuk mencegah kerusakan fisik dan penurunan kualitas lingkungan. Kawasan resapan memiliki daya tampung rendah terhadap permukaan kedap air. Kawasan dengan muka air tanah dangkal memiliki daya tampung rendah terhadap kegiatan yang berisiko mencemari air tanah. Kawasan lereng curam memiliki daya tampung rendah terhadap pembukaan lahan, pemotongan lereng, dan perubahan drainase yang tidak terkendali.

Penilaian daya tampung geologi perlu dikaitkan dengan intensitas kegiatan. Bukan hanya jenis kegiatannya yang penting, tetapi juga skala, kepadatan, teknologi pengendalian, rencana pengelolaan, dan pemantauan. Dengan demikian, GTL tidak hanya menghasilkan rekomendasi boleh atau tidak boleh, tetapi juga dapat menyusun syarat teknis agar kegiatan yang masih dapat dilakukan tetap berada dalam batas aman.

4.4 Faktor Pendukung Geologi

Faktor pendukung geologi adalah unsur lingkungan geologi yang memberi peluang bagi pemanfaatan ruang. Faktor ini dapat berupa tanah dan batuan yang stabil, topografi yang sesuai, ketersediaan air tanah, potensi bahan bangunan, bentang alam yang bernilai, fungsi resapan yang baik, atau kondisi geologi yang mendukung kegiatan tertentu. Dalam GTL, faktor pendukung perlu dikenali agar pembangunan dapat diarahkan pada ruang yang paling sesuai.

Faktor pendukung tidak boleh dibaca secara terpisah dari pembatas. Dataran aluvial, misalnya, dapat mendukung pengembangan permukiman karena relatif

datar, tetapi perlu diuji terhadap risiko banjir, penurunan muka tanah, likuefaksi, atau muka air tanah dangkal. Kawasan vulkanik dapat memiliki tanah subur dan sumber air, tetapi pada area tertentu juga berhubungan dengan bahaya letusan, lahar, dan gerakan tanah. Karena itu, faktor pendukung selalu perlu diseimbangkan dengan pembatas.

Pada kawasan bernilai geologi, faktor pendukung dapat berbentuk nilai ilmiah, pendidikan, estetika, dan potensi geowisata. Nilai tersebut dapat mendukung pembangunan lokal apabila dikelola secara berkelanjutan. Namun, dukungan tersebut harus diikuti perlindungan nilai geologi, pengaturan akses, keselamatan pengunjung, dan pemantauan dampak. Dengan cara ini, nilai geologi tidak hanya dilihat sebagai objek ekonomi, tetapi sebagai modal konservasi dan edukasi.

Dalam produk KGL dan Kajian GTL, faktor pendukung dapat disajikan dalam bentuk peta potensi, peta kesesuaian, matriks peluang, atau uraian teknis. Penyajiannya perlu menggunakan bahasa yang dapat dipahami perencana dan pengambil keputusan. Faktor pendukung harus menjawab pertanyaan: kegiatan apa yang paling sesuai, pada area mana kegiatan tersebut dapat diarahkan, dan syarat apa yang tetap perlu diperhatikan.

4.5 Faktor Pembatas Geologi

Faktor pembatas geologi adalah kondisi yang mengurangi, membatasi, atau meniadakan kelayakan suatu ruang untuk kegiatan tertentu. Pembatas dapat berupa bahaya geologi tinggi, lereng tidak stabil, kondisi tanah dan batuan yang lemah, air tanah rentan, daerah resapan penting, kawasan lindung geologi, kawasan bernilai geologi yang harus dilindungi, atau ketidakcukupan data untuk mengambil keputusan.

Dalam GTL, faktor pembatas tidak selalu berarti larangan mutlak. Sebagian pembatas dapat dikelola melalui syarat teknis, desain, pengendalian intensitas, mitigasi, atau pemantauan. Namun, ada pula pembatas yang bersifat kuat sehingga kegiatan tertentu tidak direkomendasikan. Perbedaan ini perlu dijelaskan secara eksplisit agar rekomendasi GTL tidak dipahami sebagai hambatan umum terhadap pembangunan, melainkan sebagai arahan keselamatan dan keberlanjutan.

Pembatas geologi perlu dikaitkan dengan jenis kegiatan. Kawasan dengan air tanah rentan mungkin tidak sesuai untuk fasilitas yang menghasilkan limbah cair berisiko tinggi, tetapi masih dapat sesuai untuk ruang terbuka, pertanian terbatas, atau kegiatan konservasi. Kawasan dengan lereng curam mungkin tidak sesuai untuk permukiman padat, tetapi dapat berfungsi sebagai kawasan lindung, resapan, atau geowisata terbatas dengan pengaturan yang ketat.

KGL harus mengidentifikasi pembatas utama, tingkat pembatas, luas sebaran, dan implikasinya. Pembatas utama perlu ditampilkan secara jelas pada peta dan narasi. Apabila pembatas berasal dari data yang belum cukup rinci, rekomendasi harus menyatakan kebutuhan investigasi lanjutan. Dengan demikian, faktor pembatas menjadi dasar pengambilan keputusan yang transparan dan dapat ditelusuri.

4.6 Faktor Penyisih dan Prinsip Kehati-hatian

Faktor penyisih adalah kondisi geologi atau lingkungan geologi yang membuat suatu kegiatan sebaiknya tidak ditempatkan pada lokasi tertentu, atau hanya dapat dipertimbangkan setelah perubahan rencana yang mendasar. Faktor penyisih dapat muncul karena tingkat bahaya sangat tinggi, fungsi lindung yang tidak dapat diganggu, nilai geologi yang harus dilindungi, kerentanan pencemaran yang sangat tinggi, atau konsekuensi risiko yang tidak sebanding dengan manfaat kegiatan.

Perbedaan antara faktor pembatas dan faktor penyisih penting untuk kejelasan rekomendasi. Faktor pembatas masih membuka ruang pengelolaan melalui syarat teknis, sedangkan faktor penyisih menunjukkan kondisi yang secara prinsip tidak sejalan dengan kegiatan tertentu. Sebagai contoh, kawasan yang menjadi zona inti perlindungan nilai geologi tidak tepat diarahkan untuk kegiatan yang mengubah bentuk dan nilai utama kawasan. Area dengan bahaya sangat tinggi untuk kegiatan berisiko tinggi juga perlu diperlakukan dengan prinsip kehati-hatian.

Prinsip kehati-hatian diperlukan karena keputusan ruang sering memiliki konsekuensi jangka panjang. Ketika data belum cukup, tetapi indikasi pembatas atau risiko cukup kuat, GTL sebaiknya tidak memaksakan kesimpulan yang terlalu pasti. Rekomendasi dapat berbentuk penundaan keputusan, kebutuhan kajian rinci, pembatasan sementara, atau arahan alternatif lokasi. Pendekatan ini lebih bertanggung jawab daripada memberi persetujuan berbasis data yang belum memadai.

Dalam konteks regulatif, faktor penyisih membantu pengambil keputusan membedakan area yang masih dapat dikelola dari area yang seharusnya dihindari. Hal ini penting untuk kegiatan yang berkonsekuensi besar seperti kawasan industri, fasilitas pengelolaan limbah, prasarana pesisir besar, PLTN, bendungan, atau pembangunan pada kawasan rawan bencana geologi. Dengan demikian, faktor penyisih merupakan instrumen keselamatan, bukan sekadar klasifikasi teknis.

Tabel 4.1 Hubungan konsep operasional dalam GTL

Konsep	Pertanyaan utama	Contoh parameter geologi	Implikasi rekomendasi
Daya dukung geologi	Apakah lingkungan geologi mampu menopang kegiatan tertentu?	Sifat tanah dan batuan, lereng, air tanah, kestabilan, bahaya.	Sesuai, sesuai bersyarat, atau perlu kajian rinci.
Daya tampung geologi	Seberapa besar tekanan kegiatan masih dapat diterima?	Kerentanan air tanah, fungsi resapan, kapasitas lereng, nilai geologi.	Batas intensitas, syarat pengelolaan, pemantauan.
Faktor pembatas	Kondisi apa yang membatasi pemanfaatan?	Bahaya geologi, tanah lemah, kawasan lindung, resapan penting.	Pembatasan kegiatan, mitigasi, atau syarat teknis.
Faktor penyisih	Kondisi apa yang membuat kegiatan perlu dihindari?	Bahaya sangat tinggi, nilai geologi utama, fungsi lindung kritis.	Tidak direkomendasikan atau perlu alternatif lokasi.

4.7 Dari Pembatas menuju Kelas Kesesuaian Ruang

Penilaian GTL perlu mengubah faktor pendukung dan pembatas menjadi kelas kesesuaian ruang. Kelas kesesuaian membantu pembaca kebijakan memahami hasil analisis tanpa harus membaca seluruh data teknis. Kelas tersebut dapat disusun dengan berbagai istilah, tetapi prinsipnya harus menunjukkan tingkat kelayakan dan syarat pemanfaatan.

Secara sederhana, kelas kesesuaian dapat dibagi menjadi sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, tidak sesuai, dan memerlukan kajian rinci. Kelas sesuai berarti kondisi geologi mendukung kegiatan dengan syarat umum. Kelas sesuai bersyarat berarti kegiatan masih dapat dilakukan, tetapi memerlukan syarat teknis. Kelas terbatas berarti kegiatan perlu dibatasi jenis, intensitas, atau lokasinya. Kelas tidak sesuai berarti kegiatan tidak direkomendasikan. Kelas memerlukan kajian rinci digunakan ketika data belum cukup untuk keputusan final.

Kelas kesesuaian harus dapat ditelusuri kembali ke parameter. Apabila suatu kawasan dinilai terbatas, alasan pembatasnya harus jelas: apakah karena lereng, air tanah, bahaya, nilai geologi, atau kombinasi beberapa faktor. Tanpa keterlacakan, kelas kesesuaian hanya menjadi label peta yang sulit dipertanggungjawabkan.

Dalam pengaturan zonasi, kelas kesesuaian dapat diterjemahkan menjadi ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, ketentuan khusus, dan syarat teknis. Dengan demikian, hasil GTL tidak berhenti sebagai peta, tetapi masuk ke perangkat pengendalian pemanfaatan ruang.

4.8 Daya Dukung dan Daya Tampung dalam RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan

Daya dukung dan daya tampung geologi memiliki tempat penting dalam berbagai

instrumen kebijakan. Dalam RTRW, keduanya membantu menentukan arah struktur ruang dan pola ruang secara umum. Dalam RDTR, keduanya perlu diterjemahkan lebih rinci ke dalam pengaturan zonasi, ketentuan kegiatan, ketentuan intensitas, dan ketentuan khusus. Dalam KLHS, keduanya membantu menilai keberlanjutan kebijakan, rencana, dan program. Dalam dokumen lingkungan, keduanya menjadi dasar penilaian dampak, pengelolaan, dan pemantauan.

Perbedaan instrumen tersebut menuntut perbedaan tingkat kedalaman data. RTRW membutuhkan gambaran makro mengenai kawasan yang mendukung, terbatas, rawan, atau perlu dilindungi. RDTR membutuhkan informasi lebih rinci agar dapat menentukan aturan pemanfaatan pada skala kawasan. KLHS membutuhkan sintesis untuk membandingkan alternatif kebijakan dan menguji keberlanjutan. Dokumen lingkungan membutuhkan informasi kegiatan dan tapak secara lebih spesifik.

Karena itu, GTL harus menyatakan skala dan tujuan penggunaan hasil analisis. Hasil pada skala regional tidak boleh digunakan langsung untuk keputusan tapak berisiko tinggi tanpa investigasi lanjutan. Sebaliknya, hasil kajian tapak yang sangat rinci tidak selalu dapat digeneralisasi untuk seluruh wilayah. Kejelasan skala merupakan bagian dari validitas ilmiah dan akuntabilitas teknis.

Dengan memasukkan daya dukung dan daya tampung geologi ke dalam instrumen tersebut, keputusan ruang menjadi lebih berbasis kondisi fisik. Pembangunan tidak hanya mengikuti kebutuhan ekonomi atau administratif, tetapi juga memperhitungkan kemampuan lingkungan geologi menopang dan menerima kegiatan.

4.9 Parameter Minimum dalam Penilaian Daya Dukung dan Daya Tampung

Parameter yang digunakan dalam penilaian daya dukung dan daya tampung harus dipilih sesuai tujuan kajian. Namun, terdapat beberapa parameter minimum yang umumnya perlu diperhatikan: tanah dan batuan, bentuk lahan, kemiringan lereng, air tanah, fungsi resapan, bahaya geologi, penggunaan lahan, kawasan lindung geologi, dan nilai geologi. Parameter tambahan dapat dimasukkan sesuai karakter wilayah atau jenis kegiatan.

Untuk permukiman, parameter penting dapat mencakup kemiringan lereng, kondisi tanah, potensi air tanah, bahaya geologi, banjir, dan akses prasarana dasar. Untuk kawasan industri, penilaian perlu menekankan daya dukung tanah, risiko banjir, kerentanan air tanah, pengelolaan limbah, dan jarak terhadap unsur sensitif. Untuk TPST, kerentanan air tanah, sifat tanah, muka air tanah, lereng, drainase, dan arah aliran air tanah menjadi sangat penting. Untuk Geopark dan geowisata, nilai geologi, keselamatan, daya dukung kunjungan, dan pengendalian akses perlu diperhatikan.

Pemilihan parameter harus dijelaskan secara terbuka. Parameter tidak boleh dipilih hanya karena data tersedia, tetapi karena relevan dengan pertanyaan kajian. Jika parameter penting belum tersedia, kajian harus menyatakan keterbatasan tersebut dan merekomendasikan pengumpulan data tambahan.

Penilaian parameter dapat dilakukan secara kualitatif, semi-kuantitatif, atau kuantitatif. Yang terpenting bukan sekadar metode yang dipilih, tetapi konsistensi antara data, skala, tujuan kajian, dan rekomendasi. Skoring dan pembobotan dapat membantu, tetapi tidak boleh menggantikan penalaran geologi dan verifikasi lapangan.

4.10 Skala, Ketidakpastian, dan Validasi

Skala merupakan unsur penting dalam GTL. Peta dan data pada skala kecil berguna untuk melihat pola regional, tetapi tidak cukup untuk keputusan yang membutuhkan ketelitian tapak. Sebaliknya, data tapak yang rinci memberi kepastian lokal, tetapi tidak selalu menjelaskan konteks regional. Karena itu, setiap hasil KGL dan Kajian GTL harus menyatakan skala data dan batas penggunaannya.

Ketidakpastian tidak dapat dihilangkan sepenuhnya dalam kajian geologi. Data bawah permukaan terbatas, proses alam berubah, dan aktivitas manusia dapat mengubah kondisi ruang. Namun, ketidakpastian dapat dikelola melalui metode yang jelas, data yang

memadai, verifikasi lapangan, penggunaan skenario, dan rekomendasi kajian lanjutan. Dalam buku ini, ketidakpastian bukan alasan untuk menunda semua keputusan, tetapi alasan untuk membuat keputusan secara hati-hati.

Validasi diperlukan ketika hasil kajian digunakan untuk keputusan publik. Validasi dapat mencakup pemeriksaan kecukupan data, kesesuaian parameter, ketepatan metode, konsistensi peta, keterlacakan rekomendasi, dan kesesuaian skala. Untuk kajian yang disusun oleh pihak lain, validasi membantu memastikan bahwa hasilnya dapat digunakan secara bertanggung jawab oleh pemerintah atau unit teknis.

Dengan demikian, daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas tidak boleh diperlakukan sebagai hasil mekanis. Ketiganya memerlukan penalaran ilmiah, pemeriksaan data, dan pertimbangan teknis. GTL harus menjaga keseimbangan antara kebutuhan keputusan yang operasional dan kehati-hatian ilmiah.

4.11 Rekomendasi Operasional: Dari Kategori ke Syarat Teknis

Hasil GTL harus dapat digunakan. Oleh karena itu, kategori daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas perlu diterjemahkan menjadi syarat teknis yang jelas. Syarat tersebut dapat berupa kebutuhan investigasi geologi teknik, pengendalian drainase, perlindungan zona resapan, pembatasan pengambilan air tanah, pengolahan limbah, perlindungan nilai geologi, pengaturan intensitas bangunan, atau pemantauan berkala.

Rekomendasi operasional perlu dibedakan menurut tingkat pembatas. Pada kawasan dengan pembatas rendah, rekomendasi dapat berupa syarat umum dan pemantauan dasar. Pada kawasan dengan pembatas sedang, rekomendasi harus memuat syarat teknis yang lebih spesifik. Pada kawasan dengan pembatas tinggi, rekomendasi dapat berupa pembatasan kegiatan atau kewajiban kajian rinci. Pada kawasan dengan faktor penyisih, rekomendasi dapat berupa tidak direkomendasikan atau pencarian lokasi alternatif.

Rekomendasi yang baik harus memenuhi tiga kriteria. Pertama, dapat ditelusuri ke data dan analisis. Kedua, dapat dilaksanakan oleh pemrakarsa, pemerintah daerah, atau pengelola kawasan. Ketiga, dapat dipantau. Rekomendasi yang terlalu umum sulit digunakan dalam pengendalian pemanfaatan ruang, sedangkan rekomendasi yang terlalu rinci tanpa dasar data dapat menimbulkan kesan kepastian yang tidak tepat.

Dengan demikian, GTL tidak hanya menyusun kajian, tetapi juga membantu membangun jembatan menuju tindakan. Tindakan tersebut dapat berupa pengaturan zonasi, desain mitigasi, perlindungan kawasan, kajian lanjutan, atau pemantauan. Di sinilah daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas berubah dari konsep menjadi instrumen pengendalian ruang.

4.12 Kesimpulan Bab

Daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas merupakan konsep inti dalam Geologi Tata Lingkungan. Daya dukung menunjukkan kemampuan lingkungan geologi menopang kegiatan; daya tampung menunjukkan kemampuan menerima tekanan dan perubahan; faktor pembatas menunjukkan kondisi yang membatasi pemanfaatan; sedangkan faktor penyisih menunjukkan kondisi yang membuat kegiatan tertentu sebaiknya dihindari atau dialihkan.

Bab ini menegaskan bahwa konsep-konsep tersebut harus selalu dikaitkan dengan jenis kegiatan, skala keputusan, intensitas pemanfaatan, dan tingkat risiko. Suatu kawasan tidak dapat dinilai baik atau buruk secara mutlak. Kawasan harus dinilai berdasarkan kesesuaiannya terhadap kegiatan tertentu dan syarat yang dapat diterapkan untuk menjaga fungsi serta keselamatan lingkungan geologi.

Dalam KGL dan Kajian GTL, daya dukung dan daya tampung perlu diterjemahkan menjadi parameter, kelas kesesuaian, faktor pembatas, rekomendasi, dan syarat teknis. Hasilnya dapat digunakan dalam RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengaturan zonasi, pengendalian risiko, dan perlindungan kawasan bernilai geologi.

Dengan demikian, Bab 4 menjadi dasar operasional bagi pembahasan berikutnya.

Setelah memahami lingkungan geologi sebagai fondasi ruang hidup dan memahami daya dukung serta daya tampung sebagai konsep penilaian, buku ini dapat bergerak menuju pembahasan mengenai data, parameter, metode KGL, peta sintesis, validasi, dan pertimbangan teknis GTL.

> *Daya dukung menunjukkan sejauh mana lingkungan geologi mampu menopang kegiatan manusia, sedangkan daya tampung menunjukkan sejauh mana lingkungan itu mampu menerima tekanan tanpa kehilangan fungsinya. Faktor pembatas mengingatkan bahwa tidak semua ruang dapat diperlakukan sama. Ada kawasan yang mudah dikembangkan, ada yang memerlukan syarat teknis, ada yang harus dibatasi, dan ada yang lebih bijaksana untuk dilindungi. Dalam GTL, penilaian ruang bukan soal baik atau buruk secara mutlak, melainkan soal kesesuaian antara karakter geologi dan jenis pemanfaatannya. Bumi memberi peluang, tetapi selalu bersama batasnya.*

Pemetaan, Skoring, Pembobotan, dan Analisis Spasial dalam KGL

> *Peta tanpa analisis hanya menunjukkan di mana sesuatu berada, tetapi analisis spasial menunjukkan mengapa, bagaimana, dan apa yang seharusnya dilakukan.*

1 PEMETAAN

Menggambarkan kondisi geologi, hidrogeologi, geomorfologi, kebencanaan geologi, dan faktor lingkungan dalam bentuk peta dasar dan peta tematik.

2 SKORING

Memberi nilai pada setiap parameter berdasarkan tingkat kondisi atau kelas kerentanan/kelayakan menggunakan skala yang terukur dan konsisten.

RENDAH	SEDANG	TINGGI
1	2	3

3 PEMBOBOTAN

Menentukan tingkat kepentingan relatif tiap parameter sesuai pengaruhnya terhadap kondisi lingkungan dan tujuan pemanfaatan ruang.

Parameter	Bobot (w)
Geologi	0,25
Hidrogeologi	0,25
Geomorfologi	0,20
Kebencanaan Geologi	0,20
Lingkungan Geologi	0,10
Jumlah	**1,00**

4 ANALISIS SPASIAL

Menggabungkan skor dan bobot secara spasial (*overlay*) untuk menghasilkan peta sintesis: kesesuaian, kerawanan, atau daya dukung lingkungan.

INTEGRASI DATA, METODE, DAN KEARIFAN

Proses ini bukan sekadar perhitungan, tetapi wujud tanggung jawab ilmiah untuk memahami bumi secara utuh, menilai dengan adil, dan merencanakan ruang secara berkelanjutan.

**PETA MEMBERI ARAH,
ANALISIS MEMBERI MAKNA,
KEPUTUSAN MEMBERI MASA DEPAN.**

BAB 5

Pemetaan, Skoring, Pembobotan, dan Analisis Spasial dalam KGL

Uraian Bab 5 menjadi rujukan metodologis utama bagi seluruh Lampiran Teknis. Setiap lampiran menerapkan prinsip pemetaan tematik, pemilihan parameter, skoring, pembobotan, analisis spasial, faktor penyisih, validasi, dan penyusunan rekomendasi dengan penyesuaian menurut jenis peruntukan, kawasan, tapak, prasarana, sistem hulu-tengah-hilir, atau studi kasus skala rinci.

Bab ini disusun sebagai kelanjutan dari Bab 4 yang telah menjelaskan daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, dan faktor penyisih geologi. Jika Bab 4 memberi dasar konseptual-operasional, maka Bab 5 menjelaskan cara kerja teknis untuk mengubah data geologi lingkungan menjadi peta, nilai, bobot, kelas kesesuaian, dan rekomendasi yang dapat digunakan dalam Kajian Geologi Lingkungan serta Kajian Geologi Tata Lingkungan.

5.1 Pengantar

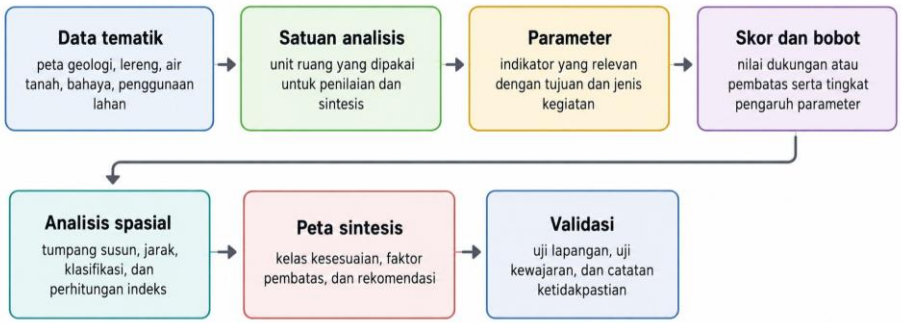
Kajian Geologi Lingkungan memerlukan metode yang mampu menghubungkan data kebumian dengan keputusan ruang. Data geologi, hidrogeologi, geomorfologi, geologi teknik, bahaya geologi, penggunaan lahan, dan kawasan bernilai geologi tidak cukup hanya ditampilkan sebagai informasi terpisah. Data tersebut harus diolah menjadi peta tematik, parameter analisis, kelas nilai, bobot pengaruh, peta sintesis, dan rekomendasi operasional. Di sinilah pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial memiliki posisi penting dalam KGL.

Bab 4 telah menunjukkan bahwa daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, dan faktor penyisih tidak dapat dinilai secara umum tanpa melihat jenis kegiatan, skala keputusan, dan kondisi lingkungan geologi. Bab 5 melanjutkan pembahasan tersebut dengan menjelaskan bagaimana konsep-konsep itu diterjemahkan menjadi prosedur teknis. Dengan kata lain, bab ini membahas cara kerja KGL dari data menuju keputusan: bagaimana parameter dipilih, bagaimana nilai diberikan, bagaimana bobot ditetapkan, bagaimana peta dianalisis, dan bagaimana hasilnya ditafsirkan secara geologi.

Dalam tradisi environmental geology, peta dan analisis spasial menjadi sarana penting untuk menjelaskan hubungan antara kondisi geologi dan penggunaan lahan. Ellison et al. menekankan bahwa peta geologi lingkungan harus dapat membantu perencanaan penggunaan lahan, pengembangan wilayah, dan konservasi. Bell juga menegaskan bahwa informasi geologi perlu disajikan dalam bentuk yang dapat dipahami oleh perencana dan pengambil keputusan. Dalam konteks ini, KGL tidak hanya menghasilkan peta teknis, tetapi peta yang mempunyai makna kebijakan.

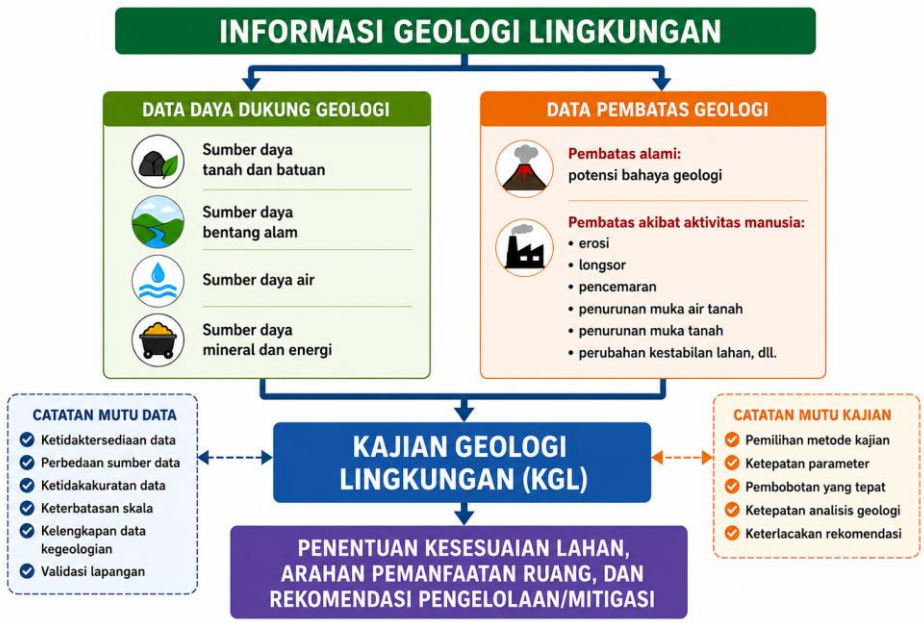
Bab 5 ini membahas pemetaan tematik, satuan analisis, pemilihan parameter, skoring, pembobotan, analisis spasial, penyusunan indeks sintesis, klasifikasi kesesuaian, validasi, serta penerjemahan hasil ke

dalam rekomendasi. Pembahasan disusun dengan bahasa ilmiah sederhana agar dapat dibaca oleh penyusun kebijakan, perencana ruang, analis lingkungan, penyelidik bumi, dan pembaca lintas disiplin.



Gambar 5.1 Alur metodologis KGL berbasis pemetaan dan analisis spasial.

Kajian Geologi Lingkungan pada dasarnya bekerja dengan membaca dua kelompok informasi utama, yaitu data daya dukung geologi dan data pembatas geologi. Data daya dukung geologi menunjukkan potensi atau kemampuan lingkungan geologi untuk mendukung pemanfaatan ruang, sedangkan data pembatas geologi menunjukkan kondisi yang dapat membatasi, mengendalikan, atau bahkan meniadakan kelayakan suatu peruntukan. Kedua kelompok data tersebut kemudian dianalisis untuk menentukan tingkat kesesuaian lahan bagi berbagai peruntukan ruang.



Gambar 5.2 Prinsip Dasar Kajian Geologi Lingkungan dalam Penilaian Kesesuaian Lahan untuk Berbagai Peruntukan Ruang. Gambar menunjukkan bahwa informasi geologi lingkungan dapat dikelompokkan ke dalam data daya dukung geologi dan data pembatas geologi. Data daya dukung mencakup sumber daya tanah dan batuan, sumber daya bentang alam, sumber daya air, serta sumber daya mineral dan energi. Data pembatas mencakup pembatas alami berupa potensi bahaya geologi serta pembatas yang dipengaruhi aktivitas manusia, seperti erosi, longsor, pencemaran, penurunan muka air tanah, dan penurunan muka tanah. Integrasi kedua kelompok data tersebut menjadi dasar Kajian Geologi Lingkungan untuk menentukan peringkat kesesuaian lahan bagi berbagai peruntukan ruang.

Gambar 5.2 menegaskan bahwa KGL tidak boleh hanya bertumpu pada data potensi. Informasi mengenai sumber daya batuan dan tanah, bentang alam, air, mineral, dan energi memang penting sebagai faktor pendukung pemanfaatan ruang. Namun, informasi tersebut harus selalu dibaca bersama pembatas geologi. Suatu kawasan dapat memiliki sumber daya atau posisi ruang yang menguntungkan, tetapi tetap tidak layak untuk kegiatan tertentu apabila memiliki bahaya geologi tinggi, kerentanan pencemaran, penurunan muka tanah, atau keterbatasan daya dukung tanah dan batuan.

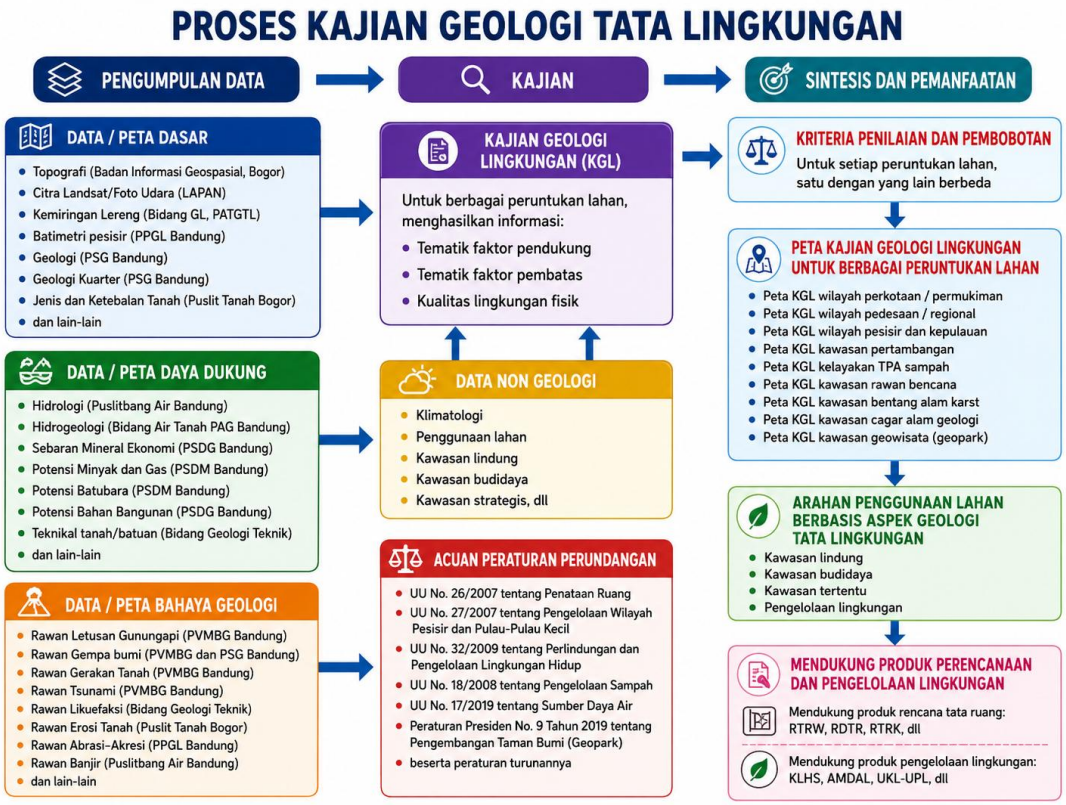
Dengan pendekatan ini, KGL tidak hanya menilai apakah suatu kawasan dapat dimanfaatkan, tetapi juga menjelaskan mengapa kawasan tersebut sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, atau tidak direkomendasikan. Kekuatan KGL terletak pada kemampuannya mengubah informasi geologi lingkungan menjadi rekomendasi ruang yang dapat digunakan dalam tata ruang, dokumen lingkungan, dan pertimbangan teknis.

Sebaliknya, suatu kawasan yang memiliki pembatas tidak selalu harus ditetapkan sebagai kawasan yang tidak dapat dimanfaatkan. Dalam banyak kasus, pembatas geologi dapat dikelola melalui syarat teknis, pembatasan intensitas, pengendalian drainase, penguatan desain fondasi, perlindungan daerah resapan, atau pemantauan berkala. Oleh karena itu, KGL perlu membedakan antara faktor pendukung, faktor pembatas, dan faktor penyisih. Pembedaan ini penting agar rekomendasi tidak bersifat terlalu umum, tetapi dapat diterjemahkan menjadi arahan pemanfaatan ruang yang proporsional.

Gambar tersebut juga mengingatkan bahwa mutu KGL sangat bergantung pada mutu data dan ketepatan metode analisis. Ketidaktersediaan data, perbedaan sumber data, ketidakakuratan data, atau analisis geologi yang masih terlalu deskriptif dapat melemahkan hasil penilaian. Karena itu, setiap hasil KGL perlu disertai keterangan mengenai sumber data, skala, metode, keterbatasan, serta kebutuhan validasi lapangan. Dengan demikian, peringkat kesesuaian lahan yang dihasilkan tidak hanya tampak meyakinkan secara visual, tetapi juga dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dan teknis.

Dalam penyelidikan Geologi Tata Lingkungan, proses kerja tidak berhenti pada pengumpulan data geologi. Data dasar, data daya dukung, data bahaya geologi, data non-geologi, dan acuan peraturan perundang-undangan harus diolah melalui tahapan analisis dan sintesis. Tahapan tersebut diperlukan agar informasi geologi tidak hanya menjadi data teknis, tetapi berubah menjadi peta geologi lingkungan, peta kesesuaian lahan, arahan penggunaan lahan, rekomendasi tata ruang, serta masukan bagi pengelolaan lingkungan.

Bagan alir pada Gambar 5.3 berikut ini memperlihatkan alur umum penyelidikan Geologi Tata Lingkungan, mulai dari pengumpulan data, analisis, hingga sintesis. Alur ini menegaskan bahwa GTL merupakan proses integratif yang menghubungkan data kebumian, data non-geologi, dan kerangka regulasi untuk menghasilkan rekomendasi yang dapat digunakan dalam RTRW, RDTR, KLHS, AMDAL, UKL-UPL, dan instrumen pengelolaan lingkungan lainnya. Bagan tersebut menegaskan bahwa penyelidikan Geologi Tata Lingkungan merupakan proses bertahap dan integratif. Tahap pertama adalah pengumpulan data, yang mencakup data/peta dasar seperti topografi, citra satelit atau foto udara, kemiringan lereng, batimetri pesisir, geologi, geologi kuarter, jenis tanah, dan ketebalan tanah. Selain itu, dikumpulkan pula data daya dukung, antara lain hidrologi, hidrogeologi, sebaran mineral, potensi minyak dan gas, batubara, bahan bangunan, serta keteknikan tanah dan batuan. Data bahaya geologi juga menjadi komponen penting, meliputi rawan letusan gunung api, rawan gempa bumi, rawan gerakan tanah, tsunami, likuefaksi, erosi tanah, abrasi-akrasi, banjir, dan bahaya geologi lain yang relevan dengan wilayah kajian.



Gambar 5.3. Proses Penyelidikan Geologi Tata Lingkungan dari Pengumpulan Data hingga Sintesis Rekomendasi. Bagan menunjukkan bahwa penyelidikan GTL dimulai dari pengumpulan data/peta dasar, data/peta daya dukung, dan data/peta bahaya geologi. Data tersebut kemudian dianalisis bersama data non-geologi dan acuan peraturan perundang-undangan untuk menghasilkan informasi tematik mengenai faktor pendukung, faktor pembatas, dan kualitas lingkungan fisik. Hasil analisis selanjutnya disintesis menjadi berbagai peta geologi lingkungan untuk peruntukan lahan tertentu, arahan penggunaan lahan berbasis aspek geologi tata lingkungan, serta dukungan terhadap produk rencana tata ruang dan dokumen pengelolaan lingkungan.

Tahap kedua adalah kajian geologi lingkungan. Pada tahap ini, data geologi dan data non-geologi diolah untuk menghasilkan informasi tematik mengenai faktor pendukung, faktor pembatas, dan kualitas lingkungan fisik. Data non-geologi seperti klimatologi, penggunaan lahan, kawasan lindung, kawasan budidaya, dan kawasan strategis diperlukan agar analisis tidak hanya membaca kondisi bumi secara fisik, tetapi juga memahami konteks pemanfaatan ruang dan kebutuhan pembangunan. Acuan peraturan perundang-undangan digunakan sebagai dasar agar hasil analisis dapat diterjemahkan ke dalam instrumen kebijakan dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Tahap ketiga adalah sintesis. Pada tahap ini, hasil analisis diterjemahkan menjadi peta geologi lingkungan untuk berbagai peruntukan lahan. Peta tersebut dapat berupa peta kelayakan kawasan perkotaan atau permukiman, peta geologi lingkungan wilayah pedesaan atau regional, peta wilayah pesisir dan kepulauan, peta kawasan peruntukan pertambangan, peta kelayakan TPA sampah, peta koefisien dasar bangunan, peta kawasan bentang alam karst, peta kawasan cagar alam

geologi, peta kesehatan masyarakat, dan peta kawasan geowisata atau Geopark.

Dengan demikian, keluaran GTL tidak hanya berupa peta tematik, tetapi juga arahan penggunaan lahan berbasis aspek geologi tata lingkungan. Arahan tersebut dapat digunakan untuk kawasan lindung, kawasan budidaya, kawasan tertentu, dan pengelolaan lingkungan. Pada tahap lanjut, hasil sintesis GTL dapat mendukung produk rencana tata ruang seperti RTRW dan RDTR, serta mendukung produk pengelolaan lingkungan seperti KLHS, AMDAL, UKL-UPL, dan instrumen lain yang relevan.

Makna utama dari bagan ini adalah bahwa Geologi Tata Lingkungan merupakan jembatan antara data geologi dan keputusan ruang. Data geologi tidak boleh berhenti sebagai peta dasar, sedangkan rekomendasi tata ruang tidak boleh disusun tanpa membaca kondisi geologi. Melalui proses pengumpulan data, analisis, dan sintesis, GTL membantu memastikan bahwa pembangunan wilayah dilakukan dengan memperhatikan daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, bahaya geologi, fungsi lingkungan, dan ketentuan regulatif yang berlaku

5.2 Posisi Pemetaan dan Analisis Spasial dalam KGL

Pemetaan dan analisis spasial berada pada inti KGL karena persoalan geologi lingkungan pada dasarnya selalu memiliki dimensi ruang. Tanah dan batuan memiliki sebaran. Lereng memiliki kemiringan dan arah. Air tanah memiliki daerah imbuhan, aliran, dan lepasan. Bahaya geologi memiliki wilayah pengaruh. Penggunaan lahan memiliki intensitas dan pola. Kawasan bernilai geologi memiliki batas perlindungan dan kebutuhan pengelolaan. Karena itu, keputusan GTL memerlukan pemahaman mengenai di mana suatu kondisi terjadi, seberapa luas pengaruhnya, dan bagaimana hubungan spasialnya dengan rencana kegiatan.

Dalam KGL, peta tidak hanya berfungsi sebagai ilustrasi. Peta merupakan alat analisis. Peta membantu menghubungkan berbagai parameter, menunjukkan perbedaan karakter antar ruang, dan memperlihatkan implikasi suatu rencana kegiatan terhadap lingkungan geologi. Peta juga membantu pembaca kebijakan memahami hasil analisis dengan lebih cepat dibandingkan uraian teknis yang panjang. Namun, peta hanya berguna apabila dasar data, skala, metode klasifikasi, dan batas penggunaannya dijelaskan secara terbuka.

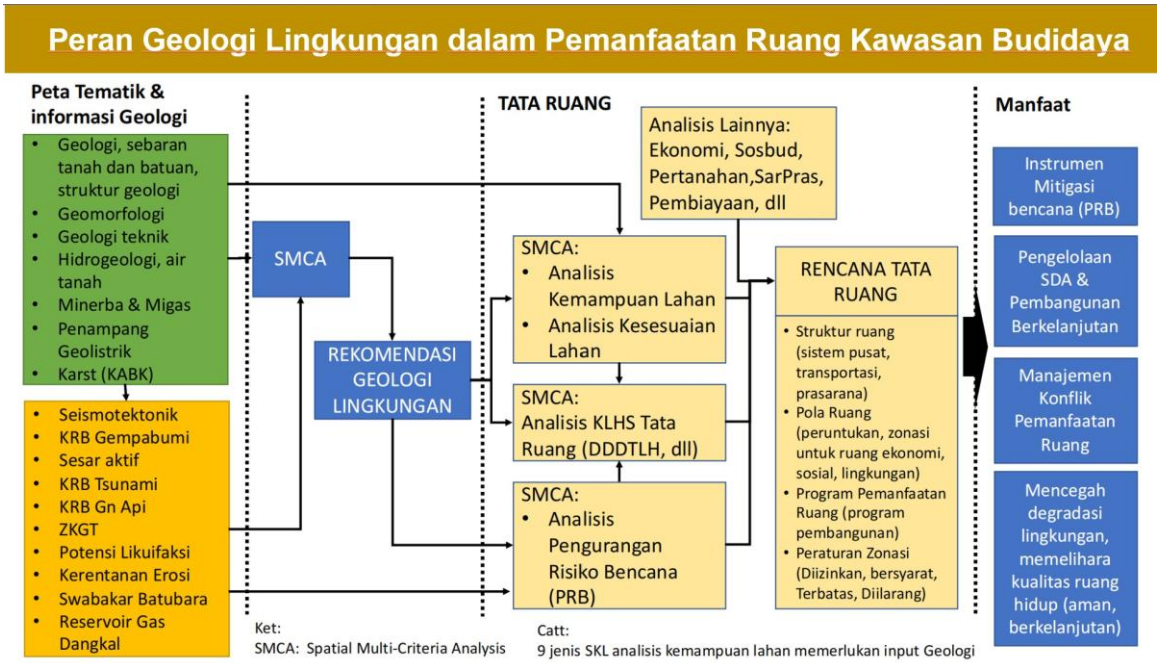
Analisis spasial memungkinkan KGL melakukan sintesis. Peta lereng dapat digabungkan dengan peta litologi, peta bahaya gerakan tanah, peta resapan air, peta penggunaan lahan, dan peta kawasan lindung geologi. Hasilnya dapat menunjukkan area yang mendukung, area yang memerlukan syarat teknis, area yang terbatas, serta area yang sebaiknya dihindari untuk kegiatan tertentu. Proses sintesis ini merupakan jembatan antara pengetahuan geologi dan rekomendasi ruang.

Posisi analisis spasial dalam KGL harus dipahami secara proporsional. Perangkat GIS, skoring, dan pembobotan membantu membuat analisis lebih sistematis, tetapi tidak boleh menggantikan penalaran geologi, verifikasi lapangan, dan uji kewajaran. Dalam GTL, analisis spasial berfungsi sebagai jembatan antara data geologi lingkungan dan keputusan pemanfaatan ruang, terutama ketika hasil analisis harus diterjemahkan ke dalam kemampuan lahan, kesesuaian lahan, KLHS tata ruang, dan pengurangan risiko bencana.

Peran KGL tersebut terlihat pada bagan alir berikut. Bagan alir ini menjelaskan bahwa peta tematik dan informasi geologi dapat masuk ke dalam proses tata ruang melalui Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA), kemudian menghasilkan rekomendasi geologi lingkungan yang digunakan dalam analisis kemampuan lahan, analisis kesesuaian lahan, analisis KLHS tata ruang, dan analisis pengurangan risiko bencana.

Bagan ini memperlihatkan bahwa data geologi, tanah dan batuan, struktur geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, air tanah, mineral dan energi, penampang geofisika, karst, seismotektonik, kawasan rawan bencana, potensi likuefaksi, kerentanan erosi, dan bahaya lain dapat disintesis menjadi rekomendasi geologi lingkungan. Rekomendasi tersebut tidak berdiri sendiri, tetapi dipadukan dengan analisis ekonomi, sosial-budaya, pertanahan, sarana-prasarana,

dan pembiayaan dalam proses tata ruang. Dengan demikian, keluaran GTL berkontribusi langsung terhadap struktur ruang, pola ruang, program pemanfaatan ruang, peraturan zonasi, pengurangan risiko bencana, pengelolaan sumber daya, manajemen konflik pemanfaatan ruang, dan pencegahan degradasi lingkungan.



Gambar 5.4. Bagan alir yang menunjukkan peran Informasi Geologi Lingkungan dalam Pemanfaatan Ruang Kawasan Budidaya.

5.3 Pemetaan Tematik sebagai Dasar Analisis

Pemetaan tematik adalah tahap awal untuk mengubah data dasar menjadi informasi yang siap dianalisis. Peta tematik menyajikan satu tema tertentu yang relevan dengan pertanyaan KGL, misalnya peta litologi, peta geomorfologi, peta kemiringan lereng, peta hidrogeologi, peta muka air tanah, peta bahaya geologi, peta kerentanan air tanah, peta penggunaan lahan, peta daerah resapan, atau peta kawasan bernilai geologi. Setiap peta tematik harus menjawab kebutuhan analisis tertentu, bukan sekadar melengkapi laporan.

Dalam penyusunan KGL, peta tematik perlu dibedakan dari peta dasar. Peta dasar menyediakan orientasi, seperti batas administrasi, jaringan jalan, sungai, kontur, garis pantai, dan toponimi. Peta tematik memberi informasi teknis yang berkaitan langsung dengan kondisi geologi lingkungan. Keduanya diperlukan, tetapi memiliki fungsi berbeda. Peta dasar membantu pembaca mengenali lokasi, sedangkan peta tematik membantu pembaca memahami karakter dan pembatas ruang.

Peta tematik harus memiliki sumber data yang jelas. Data dapat berasal dari peta geologi, peta hidrogeologi, peta geologi teknik, peta kawasan rawan bencana geologi, data penginderaan jauh, DEM, survei lapangan, hasil pengujian, data penggunaan lahan, atau data kelembagaan lain. Setiap sumber data perlu disebutkan skala, tahun, penyusun, dan keterbatasannya. Kejelasan sumber sangat penting karena hasil KGL akan digunakan untuk rekomendasi teknis dan keputusan publik.

Kualitas peta tematik menentukan kualitas analisis berikutnya. Apabila peta awal tidak sesuai skala, tidak mutakhir, atau tidak terverifikasi, maka skoring dan pembobotan berikutnya dapat menghasilkan kesimpulan yang tampak terukur tetapi tidak kokoh secara ilmiah. Oleh karena itu, KGL harus memeriksa

kecukupan data sebelum melangkah ke tahap sintesis. Data yang belum memadai tidak boleh disembunyikan; keterbatasannya perlu dinyatakan dan diikuti rekomendasi pengumpulan data tambahan.

5.4 Satuan Analisis Spasial

Satuan analisis adalah ruang yang digunakan sebagai dasar penilaian dalam KGL. Satuan ini dapat berupa satuan geologi, satuan geomorfologi, satuan lahan, grid, batas tapak, batas administrasi, batas rencana kawasan, atau gabungan dari beberapa dasar spasial. Pemilihan satuan analisis menentukan bagaimana parameter digabungkan dan bagaimana hasil akhir ditafsirkan.

Dalam kajian regional, satuan analisis dapat bersifat lebih umum karena tujuannya memberi arahan makro. Pada skala RTRW, satuan analisis dapat membantu mengenali kawasan yang mendukung, terbatas, rawan, atau perlu dilindungi. Pada skala RDTR, satuan analisis harus lebih rinci agar dapat digunakan untuk ketentuan kegiatan, intensitas, dan persyaratan teknis. Pada kajian tapak, satuan analisis perlu lebih detail dan sering membutuhkan verifikasi lapangan serta data bawah permukaan.

Pemilihan satuan analisis harus mempertimbangkan homogenitas kondisi, tujuan kajian, ketelitian data, skala peta, dan jenis kegiatan. Satuan yang terlalu umum dapat menghilangkan variasi lokal yang penting. Sebaliknya, satuan yang terlalu rinci tanpa dukungan data memadai dapat memberi kesan kepastian yang tidak tepat. Dalam KGL, ketelitian satuan analisis harus sebanding dengan ketelitian data dan konsekuensi keputusan.

Satuan analisis juga menentukan cara rekomendasi disusun. Apabila satuan analisis berbasis grid, hasilnya cenderung mudah dihitung dan divisualkan, tetapi perlu ditafsirkan kembali agar sesuai dengan batas rencana atau batas pengelolaan. Apabila satuan analisis berbasis satuan geomorfologi atau satuan lahan, hasilnya lebih dekat dengan proses geologi, tetapi memerlukan kehati-hatian ketika diterjemahkan ke batas administrasi atau batas zonasi. Karena itu, satuan analisis harus dijelaskan secara eksplisit dalam metodologi KGL.

5.5 Pemilihan Parameter dan Indikator

Parameter adalah unsur yang digunakan untuk menilai kesesuaian, daya dukung, daya tampung, atau faktor pembatas. Indikator adalah ukuran atau ciri yang menunjukkan kondisi parameter tersebut. Misalnya, kemiringan lereng merupakan parameter, sedangkan kelas lereng 0-8 persen, 8-15 persen, 15-25 persen, dan seterusnya merupakan indikator atau kelas nilai. Dalam KGL, parameter harus dipilih berdasarkan relevansi terhadap tujuan kajian dan jenis kegiatan yang dinilai.

Pemilihan parameter tidak boleh hanya mengikuti ketersediaan data. Parameter yang mudah diperoleh belum tentu penting, sedangkan parameter yang penting belum tentu tersedia. Jika parameter penting belum tersedia, kajian perlu menyatakan keterbatasan data dan merekomendasikan penyelidikan tambahan. Prinsip ini penting agar KGL tidak menghasilkan kesimpulan yang terlalu kuat dari data yang terbatas.

Untuk permukiman, parameter yang lazim dipertimbangkan dapat meliputi kemiringan lereng, sifat tanah dan batuan, potensi air tanah, bahaya geologi, banjir, fungsi resapan, dan penggunaan lahan. Untuk kawasan industri, parameter dapat mencakup daya dukung tanah, akses, risiko banjir, kerentanan air tanah, kedalaman muka air tanah, drainase, dan jarak terhadap unsur sensitif. Untuk TPST, parameter kerentanan air tanah, muka air tanah, sifat tanah, arah aliran air tanah, lereng, drainase, dan potensi pencemaran menjadi sangat penting. Untuk Geopark dan geowisata, parameter nilai geologi, keselamatan, akses, daya dukung kunjungan, dan perlindungan kawasan menjadi pusat perhatian.

Parameter juga perlu dibedakan antara parameter pendukung, parameter pembatas, dan parameter penyisih. Parameter pendukung menunjukkan peluang pemanfaatan. Parameter pembatas menunjukkan syarat atau kendala yang perlu dikelola. Parameter penyisih menunjukkan kondisi yang membuat suatu kegiatan tidak

tepat ditempatkan pada lokasi tertentu. Pembedaan ini membantu KGL menghasilkan rekomendasi yang lebih jelas dan tidak hanya berupa nilai total.

Tabel 5.1 Contoh perbedaan orientasi parameter menurut jenis kegiatan.

Jenis kegiatan	Parameter yang biasanya dominan	Parameter pembatas utama	Keluaran yang diharapkan
Permukiman	Lereng, tanah-batuan, bahaya geologi, air tanah, penggunaan lahan	Lereng tidak stabil, banjir, bahaya gerakan tanah, muka air tanah dangkal	Kelas kesesuaian permukiman dan syarat teknis pengembangan.
Kawasan industri	Daya dukung tanah, kerentanan air tanah, banjir, drainase, akses	Kerentanan pencemaran, bahaya banjir, tanah lunak, konflik fungsi resapan	Arahan lokasi, syarat pengelolaan limbah, dan pemantauan lingkungan geologi.
TPST	Muka air tanah, arah aliran air tanah, sifat tanah, kerentanan, drainase	Air tanah rentan, muka air tanah dangkal, lokasi dekat unsur sensitif	Rekomendasi tapak, desain pengendalian, dan parameter pemantauan.
Geopark dan geowisata	Nilai geologi, keselamatan, akses, kapasitas kunjungan, konservasi	Kerusakan nilai geologi, bahaya lokal, tekanan kunjungan	Pengaturan akses, interpretasi, keselamatan, dan perlindungan nilai geologi.
Prasarana pesisir	Dinamika pantai, penurunan muka tanah, banjir pesisir, intrusi air asin	Abrasi, rob, tanah lunak, penurunan muka tanah	Arahan tapak, mitigasi pesisir, dan kebutuhan kajian rinci.

5.6 Skoring dalam KGL

Skoring adalah proses pemberian nilai pada kelas parameter berdasarkan tingkat dukungan atau pembatasnya terhadap suatu kegiatan. Dalam KGL, skoring biasanya digunakan untuk menyederhanakan variasi kondisi geologi menjadi nilai yang dapat dibandingkan dan digabungkan. Misalnya, lereng landai dapat diberi nilai lebih mendukung untuk permukiman daripada lereng curam. Daerah dengan kerentanan air tanah tinggi dapat diberi nilai lebih membatasi untuk kegiatan yang berisiko mencemari air tanah.

Skoring harus selalu didasarkan pada logika geologi dan tujuan pemanfaatan. Nilai yang tinggi tidak selalu berarti baik secara umum; nilai tersebut harus jelas artinya. Dalam peta kesesuaian permukiman, nilai tinggi dapat berarti lebih sesuai untuk permukiman. Dalam peta fungsi resapan, nilai tinggi dapat berarti fungsi resapan lebih penting untuk dilindungi. Perbedaan orientasi nilai ini harus dijelaskan agar pembaca tidak salah menafsirkan peta.

Skoring dapat menggunakan skala sederhana, misalnya 1 sampai 3, 1 sampai 5, atau 1 sampai 9. Skala yang lebih banyak memberi variasi lebih rinci, tetapi juga menuntut dasar klasifikasi yang lebih kuat. Skala yang terlalu rinci tanpa data memadai dapat menimbulkan kesan ketelitian yang tidak sesuai. Oleh karena itu, pemilihan skala nilai harus mempertimbangkan ketelitian data, tujuan kajian, dan kebutuhan pengguna.

Dalam KGL, setiap nilai skor harus dapat ditelusuri. Tabel skoring perlu menunjukkan parameter, kelas, nilai, dasar penilaian, dan makna teknisnya. Misalnya, kelas lereng rendah diberi nilai tertentu karena lebih mudah dikembangkan dan lebih rendah risiko kestabilannya, sedangkan kelas lereng tinggi diberi nilai pembatas karena memerlukan pengendalian teknis. Keterlacakan ini penting agar hasil analisis dapat diuji, dikoreksi, dan dipertanggung jawabkan.

5.7 Pembobotan Parameter

Pembobotan adalah proses pemberian tingkat pengaruh pada setiap parameter. Tidak semua parameter memiliki pengaruh yang sama terhadap suatu kegiatan. Pada kajian TPST, kerentanan air tanah dapat memiliki bobot lebih besar daripada akses visual kawasan. Pada kajian permukiman di lereng, kestabilan lereng dan bahaya gerakan tanah dapat memiliki bobot lebih besar daripada parameter lain. Pada kajian

Geopark, nilai geologi dan keselamatan kawasan dapat memiliki bobot tinggi.

Pembobotan dapat dilakukan melalui pertimbangan ahli, konsultasi teknis, metode perbandingan berpasangan seperti AHP, atau pendekatan multi-criteria decision analysis. Rujukan mengenai GIS dan MCDA menunjukkan bahwa pembobotan dapat membantu mendukung keputusan penggunaan lahan secara sistematis. Namun, pembobotan harus digunakan secara hati-hati karena bobot sangat memengaruhi hasil akhir. Perbedaan bobot dapat mengubah kelas kesesuaian dan implikasi rekomendasi.

Bobot harus disusun berdasarkan tujuan kajian. Parameter yang sangat penting untuk satu kegiatan belum tentu penting untuk kegiatan lain. Lereng mungkin menjadi pembatas utama bagi permukiman pegunungan, tetapi dalam kawasan pesisir datar parameter lain seperti banjir, penurunan muka tanah, intrusi air asin, dan kerentanan air tanah dapat lebih menentukan. Karena itu, tidak ada satu matriks bobot yang berlaku untuk semua wilayah dan semua kegiatan.

Pembobotan juga harus diuji kewajarannya. Hasil pembobotan perlu diperiksa apakah sesuai dengan pengetahuan lapangan dan logika geologi. Jika suatu area yang jelas memiliki risiko tinggi justru muncul sebagai area sangat sesuai karena bobot tidak tepat, maka model harus diperiksa kembali. Dalam KGL, pembobotan bukan proses mekanis, melainkan bagian dari penalaran teknis yang harus diuji dan dijelaskan.

Tabel 5.2 Contoh hubungan parameter, indikator, skor, dan makna teknis dalam KGL.

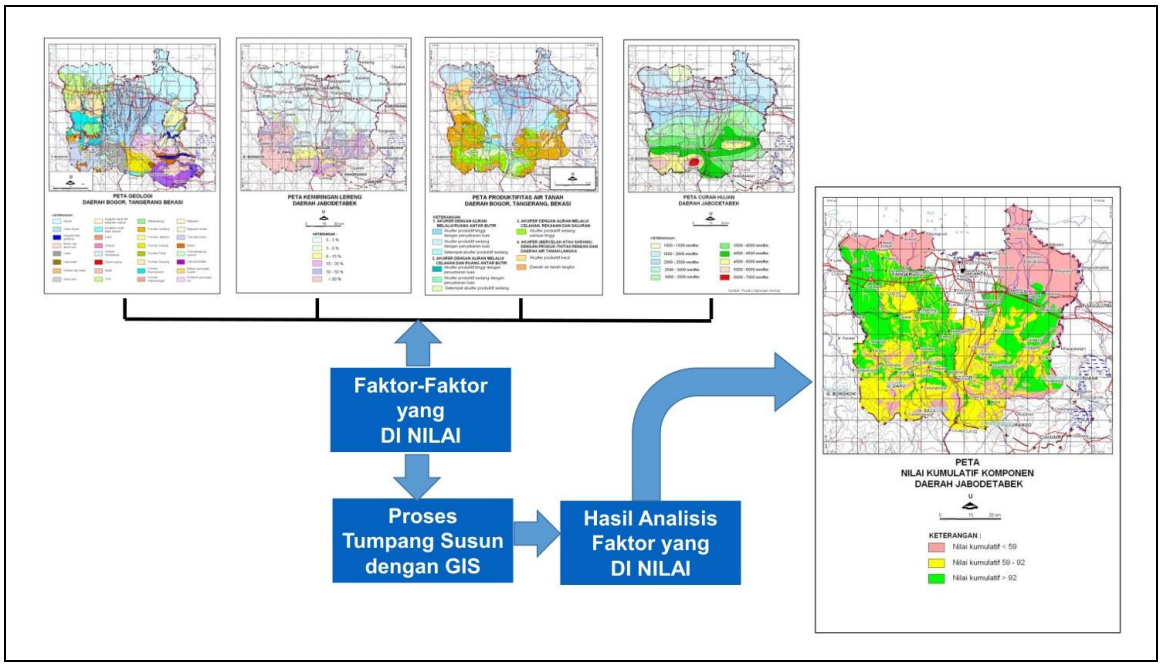
Parameter	Contoh indikator	Arah penilaian	Contoh skor	Makna teknis
Kemiringan lereng	0-8%, 8-15%, 15-25%, >25%	Semakin curam semakin membatasi untuk permukiman intensif	1-5	Menunjukkan kebutuhan pengendalian lereng dan pembatasan intensitas.
Litologi dan sifat tanah	Batuan kompak, endapan lepas, tanah lunak, tanah pelapukan	Semakin stabil semakin mendukung, semakin lemah semakin membatasi	1-5	Menunjukkan daya dukung awal dan kebutuhan investigasi geologi teknik.
Muka air tanah	Dalam, sedang, dangkal	Muka air tanah dangkal lebih membatasi kegiatan berisiko pencemaran	1-5	Menunjukkan kerentanan terhadap gangguan kualitas air dan kebutuhan pengelolaan.
Fungsi resapan	Rendah, sedang, tinggi	Fungsi resapan tinggi lebih perlu dilindungi	1-5	Menentukan batas intensitas pembangunan dan kebutuhan perlindungan ruang terbuka.
Bahaya geologi	Rendah, sedang, tinggi	Bahaya tinggi menjadi pembatas atau penyisih sesuai jenis kegiatan	1-5 atau aturan penyisih	Menentukan mitigasi, pembatasan, kajian rinci, atau alternatif lokasi.
Nilai geologi	Nilai lokal, regional, nasional, internasional	Nilai tinggi menuntut perlindungan lebih kuat	1-5 atau aturan penyisih	Menentukan perlindungan kawasan, pengaturan akses, dan pemantauan.

Catatan: contoh skor pada tabel ini bersifat ilustratif. Nilai aktual harus disesuaikan dengan tujuan kajian, jenis kegiatan, skala data, dan konteks wilayah.

5.8 Analisis Spasial dan Tumpangsusun Peta

Analisis spasial dalam KGL tidak hanya berupa tumpang susun mekanis beberapa layer, melainkan proses sintesis yang menggabungkan parameter geologi, geomorfologi, hidrogeologi, dan penggunaan lahan ke dalam satuan penilaian yang sebanding.

Contoh pada Gambar 5.5 menunjukkan bahwa peta geologi, kemiringan lereng, produktivitas air tanah, dan curah hujan dapat disusun menjadi peta nilai kumulatif. Produk antara seperti ini penting karena memperlihatkan keterlacakan logika penilaian sebelum hasil akhir diterjemahkan menjadi kelas kesesuaian atau arahan ruang.



Gambar 5.5 Contoh proses tumpangsusun peta parameter dan hasil nilai kumulatif dalam Kajian Geologi Lingkungan di kawasan Jabodetabekpunjur untuk penilaian kelayakan regional Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST)

Analisis spasial adalah proses mengolah hubungan antar data berdasarkan letak, jarak, bentuk, luas, elevasi, kemiringan, dan keterhubungan ruang. Dalam KGL, analisis spasial digunakan untuk menggabungkan peta tematik, menghitung skor, menerapkan bobot, mengidentifikasi area pembatas, dan menghasilkan peta sintesis. Perangkat GIS memudahkan proses ini, tetapi kualitas hasil tetap bergantung pada kualitas data dan ketepatan interpretasi.

Operasi spasial yang sering digunakan dalam KGL antara lain klasifikasi peta, tumpangsusun peta, analisis jarak, analisis lereng, analisis daerah tangkapan, ekstraksi nilai raster, perhitungan luas, dan pembuatan zona kehati-hatian. Operasi tersebut perlu dipilih sesuai pertanyaan kajian. Tidak semua operasi GIS diperlukan dalam semua kajian. Metode yang terlalu rumit tanpa kebutuhan yang jelas dapat mengaburkan pesan utama KGL.

Tumpangsusun peta merupakan salah satu teknik paling penting. Melalui tumpangsusun, KGL dapat melihat pertemuan antara faktor pendukung dan pembatas. Misalnya, area yang datar dan dekat prasarana dapat tampak mendukung, tetapi apabila berada pada kerentanan air tanah tinggi atau fungsi resapan penting, rekomendasinya harus berubah. Dengan cara ini, KGL membantu mencegah keputusan yang hanya melihat satu aspek ruang.

Analisis spasial harus menjaga konsistensi proyeksi, skala, resolusi, dan batas kajian. Data dengan skala berbeda tidak boleh digabungkan tanpa penjelasan. Data raster dengan resolusi kasar tidak boleh menghasilkan rekomendasi tapak yang terlalu detail. Data vektor yang batasnya tidak konsisten perlu diselaraskan sebelum dianalisis. Kedisiplinan teknis ini menentukan kredibilitas peta sintesis KGL.

5.9 Indeks Sintesis dan Kelas Kesesuaian

Indeks sintesis adalah hasil penggabungan skor dan bobot untuk menunjukkan tingkat kesesuaian, tingkat pembatas, tingkat daya dukung, atau tingkat kerentanan. Secara sederhana, indeks dapat dihitung dengan menjumlahkan nilai parameter yang telah dikalikan bobot. Namun, dalam KGL, angka indeks bukan tujuan akhir. Angka tersebut harus ditafsirkan menjadi kelas yang bermakna bagi keputusan ruang.

Kelas kesesuaian dapat disusun menjadi sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, tidak sesuai, dan memerlukan kajian rinci. Istilah lain dapat digunakan sepanjang maknanya jelas. Kelas sesuai berarti kondisi geologi relatif mendukung kegiatan dengan syarat umum. Kelas sesuai bersyarat berarti kegiatan dapat dilakukan dengan syarat teknis tertentu. Kelas terbatas berarti kegiatan harus dibatasi jenis, intensitas, atau lokasinya. Kelas tidak sesuai berarti kegiatan tidak direkomendasikan. Kelas memerlukan kajian rinci digunakan apabila data belum cukup untuk keputusan final.

Klasifikasi indeks perlu memiliki dasar. Ambang kelas dapat ditentukan berdasarkan distribusi nilai, pengetahuan ahli, standar teknis, atau kombinasi beberapa pendekatan. Namun, ambang tidak boleh dibuat secara sembarang. Apabila batas kelas ditentukan dari statistik semata, hasilnya harus tetap diuji terhadap kondisi geologi. Apabila batas kelas ditentukan berdasarkan pertimbangan ahli, dasar pertimbangannya perlu dijelaskan.

Dalam beberapa kasus, faktor penyisih harus diberlakukan sebelum indeks sintesis dihitung. Misalnya, kawasan dengan fungsi lindung utama atau bahaya sangat tinggi untuk kegiatan tertentu dapat langsung diklasifikasikan tidak direkomendasikan, meskipun nilai parameter lain tampak mendukung. Pendekatan ini penting karena beberapa pembatas tidak boleh dikompensasi oleh parameter lain. Dengan demikian, KGL perlu membedakan antara model kompensasi nilai dan aturan penyisih yang bersifat kehati-hatian.

5.10 Validasi Lapangan, Uji Kewajaran, dan Ketidakpastian

Validasi merupakan bagian penting dari KGL. Hasil peta, skor, bobot, dan kelas kesesuaian perlu diperiksa terhadap kondisi lapangan dan penalaran geologi. Validasi dapat dilakukan melalui survei lapangan, pengecekan titik contoh, konsultasi dengan ahli setempat, pembandingan dengan data kejadian, pemeriksaan citra, atau diskusi teknis dengan instansi terkait. Tujuannya bukan hanya memastikan peta benar secara visual, tetapi memastikan hasilnya masuk akal secara geologi.

Uji kewajaran perlu dilakukan sebelum peta sintesis digunakan. Pertanyaan dasarnya adalah: apakah area yang dinilai sesuai benar-benar tidak memiliki pembatas utama? Apakah area yang dinilai terbatas memiliki alasan teknis yang jelas? Apakah area berisiko tinggi tidak tertutup oleh nilai pendukung lain? Apakah hasil sesuai dengan pengalaman lapangan dan data kejadian? Pertanyaan semacam ini membantu mencegah kesalahan model.

Ketidakpastian harus diakui. Kajian geologi selalu berhadapan dengan keterbatasan data, terutama data bawah permukaan, variasi lokal, perubahan penggunaan lahan, dan dinamika proses alam. Ketidakpastian tidak berarti KGL tidak dapat digunakan, tetapi hasilnya harus disajikan dengan batas penggunaan yang jelas. Pada area dengan data terbatas, rekomendasi dapat berupa kajian rinci, pengumpulan data tambahan, atau penerapan prinsip kehati-hatian.

Validasi juga penting untuk mencegah dominasi hasil numerik. Skor dan bobot dapat memberi kesan objektif, tetapi tetap mengandung pilihan nilai dan asumsi teknis. Oleh karena itu, hasil model harus diperiksa oleh ahli geologi lingkungan dan, bila perlu, oleh ahli hidrogeologi, geologi teknik, kebencanaan geologi, atau konservasi geologi sesuai karakter kajian. Dengan validasi, KGL menjadi proses ilmiah yang lebih dapat dipertanggungjawabkan.

Tabel 5.3 Pemeriksaan mutu metode pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial.

Aspek yang diperiksa	Pertanyaan kendali mutu	Implikasi jika belum memadai
Sumber data	Apakah sumber, tahun, skala, dan penyusun data disebutkan jelas?	Hasil perlu diberi catatan keterbatasan atau data perlu diperbarui.
Kesesuaian skala	Apakah skala data sesuai dengan tingkat keputusan?	Hasil tidak boleh digunakan untuk keputusan yang lebih detail dari ketelitian datanya.

Aspek yang diperiksa	Pertanyaan kendali mutu	Implikasi jika belum memadai
Parameter	Apakah parameter relevan dengan tujuan kajian dan jenis kegiatan?	Parameter perlu disesuaikan atau kajian tambahan diperlukan.
Skor dan bobot	Apakah dasar skor dan bobot dapat dijelaskan?	Model perlu diperbaiki sebelum digunakan sebagai dasar rekomendasi.
Faktor penyisih	Apakah pembatas kuat diperlakukan secara khusus?	Kelas kesesuaian dapat terlalu optimistis dan berisiko.
Validasi	Apakah hasil diuji dengan data lapangan atau uji kewajaran?	Rekomendasi perlu diberi status sementara atau memerlukan verifikasi.

5.11 Penyajian Peta Sintesis dan Narasi Rekomendasi

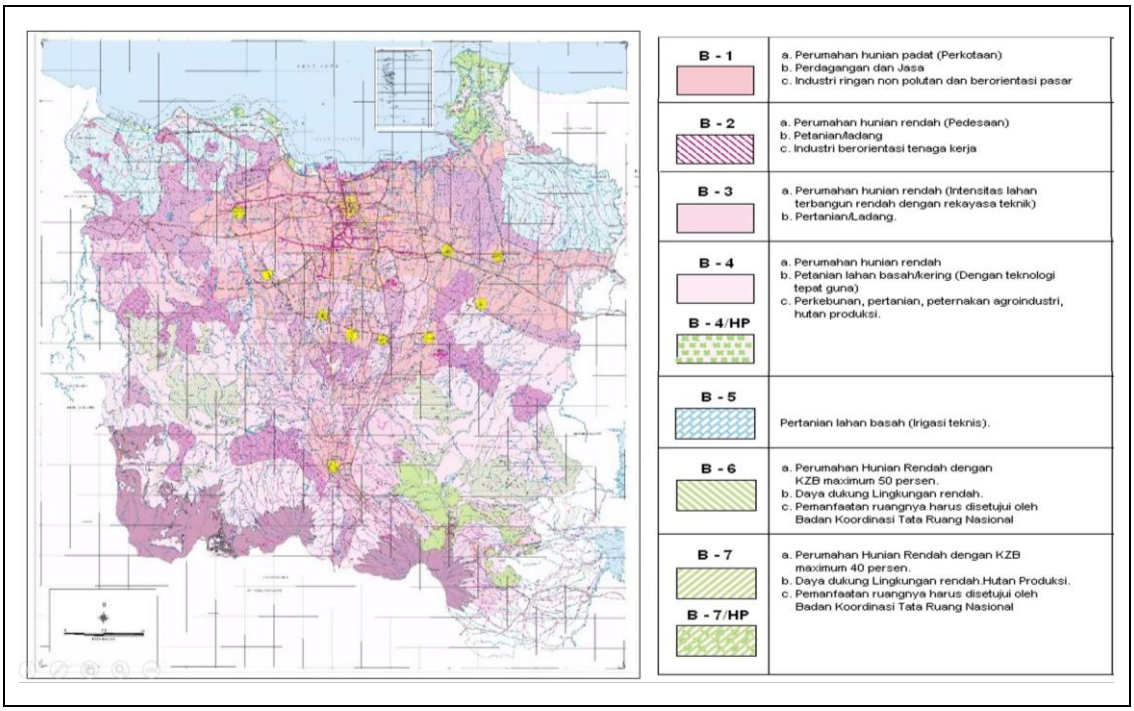
Hasil sintesis Kajian Geologi Lingkungan tidak boleh berhenti pada angka skor, indeks kesesuaian, atau peta tematik yang bersifat teknis. Hasil akhir harus diterjemahkan menjadi peta rekomendasi yang mudah dibaca oleh perencana, pengambil keputusan, penyusun dokumen lingkungan, dan pengguna lintas disiplin. Oleh karena itu, peta sintesis perlu disajikan bersama narasi rekomendasi yang menjelaskan makna setiap kelas, dasar penilaiannya, faktor pembatas utama, serta tindakan teknis yang perlu dilakukan.

Peta sintesis merupakan bentuk komunikasi spasial dari hasil analisis. Di dalam peta tersebut, berbagai parameter seperti geologi, tanah dan batuan, kemiringan lereng, air tanah, bahaya geologi, penggunaan lahan, serta faktor pembatas lainnya telah dirangkum menjadi satuan arahan pemanfaatan ruang. Dengan demikian, peta sintesis bukan hanya peta hasil akhir, tetapi juga instrumen yang menjembatani data geologi dengan keputusan tata ruang.

Gambar 5.6 memperlihatkan contoh peta arahan pemanfaatan ruang sebagai produk rencana tata ruang di Wilayah Jabodetabekpunjur. Pada peta tersebut, kawasan budidaya dibagi ke dalam beberapa kode zona, antara lain B-1, B-2, B-3, B-4, B-4/HP, B-5, B-6, B-7, dan B-7/HP. Setiap kode zona menunjukkan arahan pemanfaatan ruang yang berbeda, seperti perumahan hunian padat, perdagangan dan jasa, industri ringan non-polutan, perumahan hunian rendah, pertanian, perkebunan, peternakan, agroindustri, hutan produksi, serta pemanfaatan ruang dengan pembatas tertentu.

Gambar 5.6 penting karena memberikan gambaran spasial mengenai arahan pemanfaatan ruang. Namun, peta tersebut belum cukup apabila tidak disertai penjelasan teknis mengenai mengapa suatu zona diarahkan untuk fungsi tertentu dan syarat apa yang harus dipenuhi. Dalam konteks Geologi Tata Lingkungan, setiap arahan ruang harus memiliki dasar geologi lingkungan yang jelas. Misalnya, zona yang diarahkan untuk perumahan padat atau kegiatan jasa perlu dinilai dari aspek daya dukung tanah dan batuan, kerentanan banjir, kondisi air tanah, kemampuan resapan, serta risiko geologi lainnya. Demikian pula zona pertanian, hutan produksi, atau budidaya terbatas perlu dikaitkan dengan fungsi konservasi tanah dan air, stabilitas lahan, serta daya tampung lingkungan geologi.

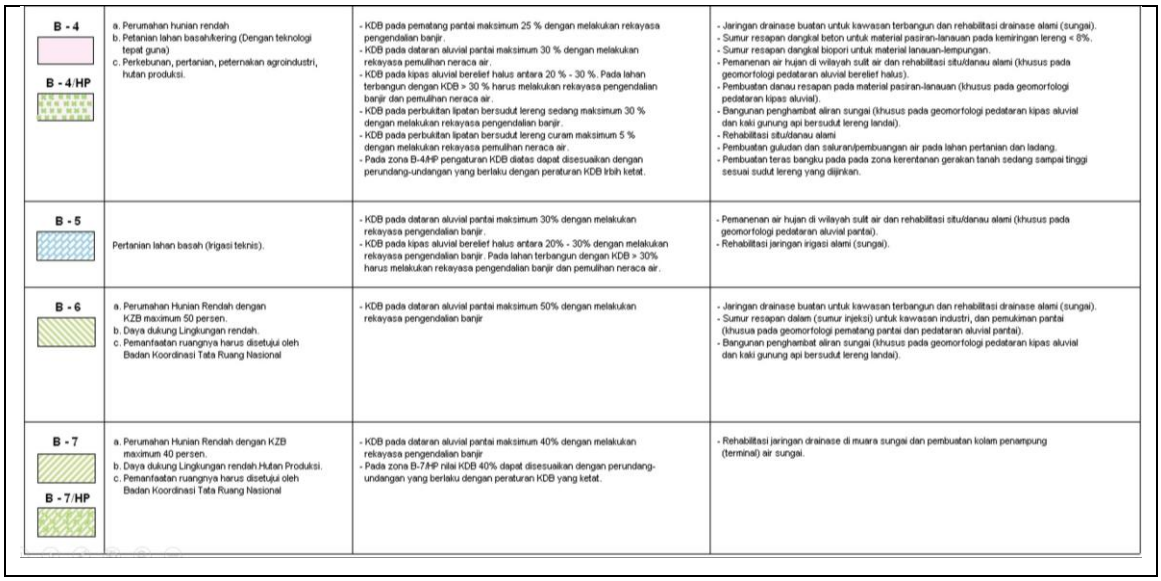
Tabel 5.4 memperlihatkan contoh bagaimana arahan pemanfaatan ruang pada kawasan budidaya diterjemahkan lebih lanjut ke dalam arahan Geologi Tata Lingkungan. Dalam contoh tersebut, setiap kode zona tidak hanya diberi keterangan jenis pemanfaatan ruang, tetapi juga dilengkapi dengan arahan Koefisien Dasar Bangunan (KDB) dan rekomendasi teknis pengendalian banjir serta pemulihan neraca air. Dengan demikian, hasil sintesis GTL tidak berhenti pada informasi “boleh” atau “tidak boleh”, tetapi berkembang menjadi arahan operasional mengenai intensitas pemanfaatan, rekayasa pengendalian banjir, pengelolaan air hujan, rehabilitasi drainase alami, pembangunan kolam penampung, serta perlindungan fungsi resapan.



Gambar 5.6. Contoh peta arahan pemanfaatan ruang kawasan budidaya sebagai produk rencana tata ruang di Wilayah Jabodetabekpunjur.

Tabel 5.4 Contoh matriks arahan Geologi Tata Lingkungan sebagai penjabaran teknis dari peta arahan pemanfaatan ruang kawasan budidaya.

KODE ZONA	ARAHAN PEMANFAATAN RUANG KAWASAN BUDIDAYA	ARAHAN GEOLOGI TATA LINGKUNGAN	
		KOEFISIEN DASAR BANGUNAN (KDB)	REKAYASA PENGENDALIAN BANJIR DAN PEMULIHAN NERACA AIR (PbPna)
B - 1	a. Perumahan hunian padat (Perkotaan) b. Perdagangan dan Jasa c. Industri ringan non polutan dan berorientasi pasar	- KDB pada aluvial pantai adalah 35 %. Meningkatkan KDB pada lahan belum terbangun dapat dilakukan sampai 45 % dan pada lahan terbangun dengan KDB 35 % harus melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air - KDB pada aluvial berelief halus adalah 30 % dan dapat dikembangkan sampai 40 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air - KDB pada kipas aluvial adalah 25 %. Pada lahan belum terbangun dapat di-kembangkan hingga 35 % dan pada lahan terbangun dengan KDB > 35 % harus melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air. - KDB pada kaki gunung api bersudut lereng landai di kawasan puncak adalah 20 % dan dapat dikembangkan sampai 35 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air.	- Rehabilitasi Banjir Kanal Barat dan Pembangunan Banjir Kanal Timur untuk wilayah Jakarta Utara. - Jaringan drainase buatan untuk kawasan terbangun dan rehabilitasi drainase alami (sungai) - Sumur resapan dangkal beton untuk material pasiran-lanauan pada kemiringan lereng < 8%. - Sumur resapan dangkal biopori untuk material lanauan-lempungan. - Sumur resapan dalam (sumur injeksi) untuk kawasan industri, gedung tinggi (khusus pada geomorfologi pedataran aluvial pantai dan pedataran kipas aluvial). - Pemanenan air hujan di wilayah sulit air dan rehabilitasi situ/danau alami (khusus pada geomorfologi pedataran aluvial pantai dan pedataran aluvial berelief halus). - Pembuatan danau resapan pada material pasiran-lanauan (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial). - Bangunan penghambat aliran sungai (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial dan kaki gunung api bersudut lereng landai). - Rehabilitasi situ/danau alami dan pemanenan air hujan. - Pembuatan teras bangku pada lereng curam di kawasan puncak sesuai sudut lereng aman yang diijinkan.
B - 2	a. Perumahan hunian rendah (Pedesaan) b. Petanian/ladang c. Industri berorientasi tenaga kerja	- KDB pada pematang pantai maksimum 30 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air - KDB pada dataran aluvial pantai maksimum 35 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air. - KDB pada kipas aluvial berelief halus maksimum 30 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air. - KDB pada pedataran kipas aluvial maksimum 25 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air. - KDB pada perbukitan lipatan bersudut lereng sedang maksimum 45 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air.	- Jaringan drainase buatan untuk kawasan terbangun dan rehabilitasi drainase alami (sungai). - Sumur resapan dangkal beton untuk material pasiran-lanauan pada kemiringan lereng < 8%. - Sumur resapan dangkal biopori untuk material lanauan-lempungan. - Sumur resapan dalam (sumur injeksi) untuk kawasan industri. - Pemanenan air hujan di wilayah sulit air dan rehabilitasi situ/danau alami (khusus pada geomorfologi pedataran aluvial pantai dan pedataran aluvial berelief halus). - Pembuatan danau resapan pada material pasiran-lanauan (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial). - Bangunan penghambat aliran sungai (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial). - Rehabilitasi situ/danau alami - Pembuatan guludan dan saluran/pembuangan air pada lahan pertanian dan ladang. - Pembuatan teras bangku pada pada zona kerentanan gerakan tanah sedang sampai tinggi sesuai sudut lereng yang diijinkan.
B - 3	a. Perumahan hunian rendah (Intensitas lahan terbangun rendah dengan rekayasa teknik) b. Pertanian/Ladang.	- KDB pada kipas aluvial berelief halus antara 25 % - 35 %. pada lahan terbangun dengan BDB > 35 % harus melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air - KDB pada pedataran kipas aluvial antara 15 % - 25 %. Pada lahan terbangun dengan KDB > 25 % harus melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air. - KDB pada perbukitan lipatan bersudut lereng sedang maksimum 35 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir. - KDB pada perbukitan lipatan bersudut lereng curam maksimum 5 % dengan melakukan rekayasa pemulihan neraca air.	- Jaringan drainase buatan untuk kawasan terbangun dan rehabilitasi drainase alami (sungai). - Sumur resapan dangkal beton untuk material pasiran-lanauan pada kemiringan lereng < 8%. - Sumur resapan dangkal biopori untuk material lanauan-lempungan. - Sumur resapan dalam (sumur injeksi) untuk kawasan industri, gedung tinggi (khusus pada geomorfologi kipas aluvial berelief halus dan padataran kipas aluvial). - Pemanenan air hujan di wilayah sulit air dan rehabilitasi situ/danau alami (khusus pada pedataran aluvial berelief halus). - Pembuatan danau resapan pada material pasiran-lanauan (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial). - Bangunan penghambat aliran sungai (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial dan kaki gunung api bersudut lereng landai). - Rehabilitasi situ/danau alami - Pembuatan guludan dan saluran/pembuangan air pada lahan pertanian dan ladang. - Pembuatan teras bangku pada pada zona kerentanan gerakan tanah sedang sampai tinggi sesuai sudut lereng yang diijinkan.



B - 4 B - 4/HP	a. Perumahan hunian rendah b. Petanian lahan basah/kering (Dengan teknologi tepat guna) c. Perkebunan, pertanian, peternakan agroindustri, hutan produksi.	- KDB pada pematang pantai maksimum 25 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir. - KDB pada dataran aluvial pantai maksimum 30 % dengan melakukan rekayasa pemulihan neraca air. - KDB pada kipas aluvial berelief halus antara 20 % - 30 %. Pada lahan terbangun dengan KDB > 30 % harus melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air. - KDB pada perbukitan lipatan bersudut lereng sedang maksimum 30 % dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir. - KDB pada perbukitan lipatan bersudut lereng curam maksimum 5 % dengan melakukan rekayasa pemulihan neraca air. - Pada zona B-4/HP pengaturan KDB diatas dapat disesuaikan dengan perundang-undangan yang berlaku dengan peraturan KDB lebih ketat.	- Jaringan drainase buatan untuk kawasan terbangun dan rehabilitasi drainase alami (sungai). - Sumur resapan dangkal beton untuk material pasiran-lanauan pada kemiringan lereng < 8%. - Sumur resapan dangkal biopori untuk material lanauan-lempungan. - Pemanenan air hujan di wilayah sulit air dan rehabilitasi situ/danau alami (khusus pada geomorfologi pedataran aluvial berelief halus). - Pembuatan danau resapan pada material pasiran-lanauan (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial). - Bangunan penghambat aliran sungai (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial dan kaki gunung api bersudut lereng landai). - Rehabilitasi situ/danau alami - Pembuatan guludan dan saluran/pembuangan air pada lahan pertanian dan ladang. - Pembuatan teras bangku pada pada zona kerentanan gerakan tanah sedang sampai tinggi sesuai sudut lereng yang diijinkan.
B - 5	Pertanian lahan basah (Irigasi teknis).	- KDB pada dataran aluvial pantai maksimum 30% dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir. - KDB pada kipas aluvial berelief halus antara 20% - 30% dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir. Pada lahan terbangun dengan KDB > 30% harus melakukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air.	- Pemanenan air hujan di wilayah sulit air dan rehabilitasi situ/danau alami (khusus pada geomorfologi pedataran aluvial pantai). - Rehabilitasi jaringan irigasi alami (sungai).
B - 6	a. Perumahan Hunian Rendah dengan KZB maximum 50 persen. b. Daya dukung Lingkungan rendah. c. Pemanfaatan ruangnya harus disetujui oleh Badan Koordinasi Tata Ruang Nasional	- KDB pada dataran aluvial pantai maksimum 50% dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir	- Jaringan drainase buatan untuk kawasan terbangun dan rehabilitasi drainase alami (sungai). - Sumur resapan dalam (sumur injeksi) untuk kawasan industri, dan pemukiman pantai (khusua pada geomorfologi pematang pantai dan pedataran aluvial pantai). - Bangunan penghambat aliran sungai (khusus pada geomorfologi pedataran kipas aluvial dan kaki gunung api bersudut lereng landai).
B - 7 B - 7/HP	a. Perumahan Hunian Rendah dengan KZB maximum 40 persen. b. Daya dukung Lingkungan rendah.Hutan Produksi. c. Pemanfaatan ruangnya harus disetujui oleh Badan Koordinasi Tata Ruang Nasional	- KDB pada dataran aluvial pantai maksimum 40% dengan melakukan rekayasa pengendalian banjir - Pada zona B-7/HP nilai KDB 40% dapat disesuaikan dengan perundang-undangan yang berlaku dengan peraturan KDB yang ketat.	- Rehabilitasi jaringan drainase di muara sungai dan pembuatan kolam penampung (terminal) air sungai.

Hubungan antara Gambar 5.6 dan Tabel 5.4 menunjukkan bahwa penyajian hasil GTL sebaiknya dilakukan dalam dua bentuk yang saling melengkapi. Gambar 5.2a memberikan informasi spasial berupa lokasi dan batas zona pemanfaatan ruang, sedangkan Gambar 5.2b memberikan informasi teknis mengenai syarat pemanfaatan dan rekomendasi pengendalian. Dengan cara ini, peta sintesis dapat langsung dihubungkan dengan perangkat operasional tata ruang, seperti pengaturan zonasi, ketentuan intensitas bangunan, ketentuan prasarana, dan syarat teknis pengelolaan lingkungan.

Peta sintesis harus disajikan dengan legenda yang jelas. Warna, simbol, kode zona, dan keterangan harus dapat dipahami oleh pengguna non-geologi. Setiap kelas atau zona dalam peta harus memiliki makna operasional. Zona yang dinilai sesuai perlu dijelaskan jenis pemanfaatan yang dapat diarahkan. Zona yang sesuai bersyarat harus disertai penjelasan syarat teknis yang diperlukan. Zona terbatas harus menyebutkan faktor pembatas utama. Zona yang tidak direkomendasikan harus menjelaskan alasan teknisnya. Sementara itu, zona yang memerlukan kajian rinci harus menyebutkan jenis data tambahan yang diperlukan sebelum keputusan final diambil.

Narasi rekomendasi menjadi bagian penting dari penyajian peta sintesis. Narasi tersebut harus menjelaskan dasar data, parameter yang digunakan, metode analisis, hasil klasifikasi, pembatas utama, serta implikasi teknis bagi pemanfaatan ruang. Tanpa narasi yang memadai, peta sintesis dapat ditafsirkan secara keliru. Pengguna peta dapat menganggap suatu warna atau kode zona sebagai keputusan mutlak, padahal dalam GTL setiap arahan ruang harus dibaca bersama syarat, batas penggunaan data, dan tingkat ketelitian analisis.

Dalam penyusunan narasi rekomendasi, hubungan antara peta dan tindakan harus ditulis secara eksplisit. Rekomendasi tidak cukup hanya menyatakan bahwa suatu kawasan sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, atau tidak sesuai. Rekomendasi harus menjawab tindakan apa yang diperlukan. Tindakan tersebut dapat berupa pengendalian intensitas bangunan, pembatasan KDB, perlindungan zona resapan, pengendalian limpasan, rehabilitasi drainase alami, investigasi geologi teknik, pemantauan muka air tanah, pengendalian kualitas air, pengelolaan limbah, mitigasi bahaya geologi, perlindungan kawasan bernilai geologi, atau pencarian alternatif lokasi.

Dalam konteks tata ruang, penyajian peta sintesis dan narasi rekomendasi juga harus mampu masuk ke perangkat kebijakan. Hasil GTL dapat digunakan untuk memperkuat struktur ruang, pola ruang, ketentuan kegiatan dan penggunaan lahan, ketentuan intensitas pemanfaatan ruang, ketentuan prasarana, ketentuan khusus, dan matriks ITBX. Oleh karena itu, narasi rekomendasi

perlu menggunakan bahasa yang dapat diterjemahkan ke dalam dokumen RTRW, RDTR, KLHS, AMDAL, UKL-UPL, maupun pertimbangan teknis.

Penyajian hasil GTL yang baik setidaknya memuat empat unsur. Pertama, peta sintesis yang menunjukkan lokasi, kelas, dan batas arahan ruang. Kedua, legenda operasional yang menjelaskan arti setiap warna, simbol, dan kode zona. Ketiga, matriks rekomendasi yang menghubungkan setiap zona dengan arahan pemanfaatan, pembatas utama, syarat teknis, dan tindakan pengelolaan. Keempat, narasi rekomendasi yang menjelaskan dasar ilmiah, batas penggunaan data, serta tindak lanjut yang diperlukan.

Dengan demikian, peta sintesis dan narasi rekomendasi merupakan satu kesatuan. Peta menunjukkan "di mana" arahan berlaku, sedangkan narasi dan matriks menjelaskan "mengapa" arahan tersebut diberikan dan "bagaimana" arahan tersebut harus dilaksanakan. Kombinasi ini menjadikan hasil KGL dan Kajian GTL lebih mudah digunakan dalam proses pengambilan keputusan, pengendalian pemanfaatan ruang, pengelolaan lingkungan, serta mitigasi risiko geologi.

Penyajian seperti ini juga memperkuat akuntabilitas teknis. Setiap rekomendasi dapat ditelusuri kembali ke data, parameter, metode, dan hasil analisis. Apabila suatu zona diberi batas KDB tertentu, maka dasar geologi lingkungan, hidrologi, banjir, resapan, atau daya dukungnya harus dapat dijelaskan. Apabila suatu kawasan memerlukan rekayasa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air, maka kaitannya dengan kondisi bentuk lahan, drainase, limpasan, dan fungsi resapan harus dinyatakan. Dengan keterlacakan tersebut, GTL tidak hanya menghasilkan peta yang informatif, tetapi juga rekomendasi yang dapat dipertanggungjawabkan.

Dalam dokumen kebijakan, peta dan narasi harus disusun agar mudah digunakan oleh pengambil keputusan. Pembaca kebijakan membutuhkan pesan yang ringkas, tetapi tetap sahih. Karena itu, laporan KGL dan Kajian GTL sebaiknya dilengkapi dengan ringkasan eksekutif, peta prioritas pengendalian, matriks rekomendasi, tabel pembatas utama, dan daftar tindak lanjut. Penyajian yang baik membantu agar hasil GTL tidak berhenti sebagai dokumen teknis, tetapi benar-benar masuk ke dalam proses perencanaan, perizinan, pengawasan, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

5.12 Penggunaan KGL dalam RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan

Hasil pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial dalam KGL dapat digunakan pada berbagai instrumen kebijakan. Dalam RTRW, hasil KGL dapat memberi dasar arahan umum mengenai kawasan yang mendukung pengembangan, kawasan yang terbatas, kawasan rawan, dan kawasan yang perlu dilindungi. Dalam RDTR, hasil KGL dapat diterjemahkan menjadi ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, ketentuan khusus, dan syarat teknis pemanfaatan ruang.

Dalam KLHS, hasil KGL membantu menilai keberlanjutan kebijakan, rencana, dan program dari sisi lingkungan geologi. Informasi mengenai daya dukung, daya tampung, bahaya geologi, fungsi resapan, dan kawasan bernilai geologi dapat digunakan untuk membandingkan alternatif rencana. Dengan demikian, KLHS tidak hanya menilai aspek ekologis secara umum, tetapi juga memperhitungkan kondisi tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, dan proses geologi.

Dalam dokumen lingkungan, hasil KGL dapat digunakan untuk menilai dampak kegiatan terhadap lingkungan geologi dan merumuskan rencana pengelolaan serta pemantauan. Misalnya, pada kawasan industri atau TPST, analisis kerentanan air tanah dan kondisi tanah-batuan menjadi dasar pengelolaan limbah dan pemantauan kualitas air. Pada prasarana pesisir, analisis abrasi, banjir pesisir, penurunan muka tanah, dan intrusi air asin dapat menjadi dasar mitigasi. Pada kawasan geowisata, analisis nilai geologi dan keselamatan menjadi dasar pengaturan akses serta pemantauan kawasan.

Penggunaan hasil KGL dalam instrumen kebijakan memerlukan kejelasan skala. Hasil pada skala regional tidak boleh digunakan untuk keputusan tapak berisiko tinggi tanpa kajian rinci. Sebaliknya, hasil kajian tapak tidak selalu dapat digeneralisasi untuk kebijakan wilayah yang lebih luas. Oleh

karena itu, setiap peta dan rekomendasi KGL harus menyebutkan skala, tingkat ketelitian, batas penggunaan, dan kebutuhan kajian lanjutan.

5.13 Kesalahan Umum dalam Skoring dan Pembobotan

Salah satu kesalahan umum dalam KGL adalah menganggap skoring dan pembobotan sebagai proses yang sepenuhnya objektif. Padahal, pemilihan parameter, penentuan kelas, pemberian nilai, dan penetapan bobot selalu mengandung asumsi. Asumsi tersebut dapat diterima sepanjang dijelaskan, didasarkan pada rujukan atau pertimbangan ahli, dan diuji terhadap kondisi lapangan. Tanpa penjelasan, skor dan bobot dapat menjadi angka yang sulit dipertanggungjawabkan.

Kesalahan lain adalah menggunakan bobot yang sama untuk semua jenis kegiatan. Parameter yang penting untuk permukiman belum tentu penting untuk industri, TPST, Geopark, prasarana pesisir, atau fasilitas strategis. KGL harus menyusun parameter dan bobot berdasarkan tujuan kajian. Matriks umum dapat menjadi titik awal, tetapi harus disesuaikan dengan konteks wilayah, jenis kegiatan, dan tingkat risiko.

Kesalahan berikutnya adalah membiarkan nilai pendukung menutupi faktor penyisih. Dalam beberapa kondisi, pembatas tertentu tidak boleh dikompensasi oleh parameter lain. Misalnya, kawasan bernilai geologi utama yang harus dilindungi tidak tepat dinilai sesuai hanya karena aksesnya baik dan lerengnya landai. Kawasan dengan bahaya sangat tinggi untuk kegiatan berisiko besar juga tidak tepat menjadi sesuai hanya karena parameter lain mendukung. Karena itu, aturan penyisih perlu ditempatkan secara jelas dalam metode.

Kesalahan juga dapat muncul ketika hasil model tidak divalidasi. Peta yang tampak rapi belum tentu benar secara geologi. Oleh karena itu, KGL harus memadukan analisis GIS dengan pengetahuan lapangan, pemeriksaan data, dan uji kewajaran. Pendekatan ini menjaga agar metode kuantitatif tetap berada dalam kendali penalaran geologi lingkungan.

5.14 Kesimpulan Bab

Pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial merupakan perangkat penting dalam KGL karena membantu mengubah data geologi lingkungan menjadi informasi yang dapat digunakan dalam keputusan ruang. Pemetaan tematik menyediakan dasar data. Satuan analisis menentukan ruang penilaian. Parameter dan indikator memberi kerangka penilaian. Skoring dan pembobotan membantu mengukur tingkat dukungan atau pembatas. Analisis spasial menggabungkan berbagai data. Peta sintesis dan rekomendasi menerjemahkan hasil ke dalam tindakan.

Bab ini menegaskan bahwa metode KGL harus transparan, dapat ditelusuri, dan sesuai skala. Setiap parameter, skor, bobot, ambang kelas, dan rekomendasi perlu memiliki dasar yang jelas. Hasil analisis tidak boleh hanya berupa angka atau peta, tetapi harus disertai penalaran geologi yang menjelaskan mengapa suatu ruang dinilai sesuai, bersyarat, terbatas, tidak sesuai, atau memerlukan kajian rinci.

Skoring dan pembobotan dapat memperkuat KGL apabila digunakan secara hati-hati. Keduanya membantu menyusun analisis yang sistematis, tetapi tidak boleh menggantikan verifikasi lapangan, pertimbangan ahli, dan prinsip kehati-hatian. Faktor penyisih harus diperlakukan secara khusus agar pembatas yang penting tidak tertutup oleh nilai parameter lain.

Dengan demikian, Bab 5 menjadi dasar metodologis untuk pembahasan berikutnya mengenai parameter dan produk KGL yang lebih spesifik. Setelah memahami cara kerja pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial, buku ini dapat bergerak menuju pembahasan tentang penyusunan peta tematik, peta sintesis, matriks rekomendasi, serta pertimbangan teknis GTL dalam berbagai konteks pemanfaatan ruang.

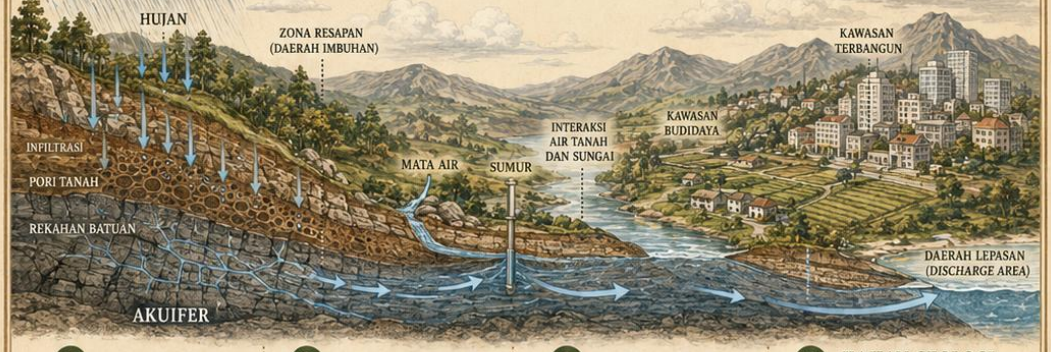
> *Peta adalah bahasa ruang, tetapi peta yang baik harus disertai nalar. Skor, bobot, parameter, dan analisis spasial membantu mengubah data geologi menjadi informasi yang dapat dibandingkan, diuji, dan diterjemahkan menjadi rekomendasi. Namun angka tidak boleh menggantikan penalaran geologi; angka hanya membantu menjelaskan apa yang telah dipahami dari lapangan, peta, dan proses kebumian. KGL yang baik membuat data berbicara dengan tertib, bukan sekadar tampak rapi. Dari peta tematik menuju peta sintesis, GTL mengubah tanda-tanda bumi menjadi arahan ruang yang dapat dipertanggungjawabkan.*

Air Tanah, Zona Resapan, dan Tata Ruang

Membaca cadangan tak terlihat, menjaga resapan, dan menata ruang secara bertanggung jawab

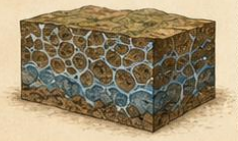
> *Air tanah adalah sumber kehidupan yang tidak selalu tampak di permukaan; zona resapan adalah pintu masuknya, dan tata ruang menentukan apakah keduanya dijaga atau justru terancam.*

Bab ini menerapkan kerangka Kajian Geologi Lingkungan pada salah satu tema paling penting dalam Geologi Tata Lingkungan, yaitu air tanah, zona resapan, dan hubungan keduanya dengan tata ruang. Air tanah tidak hanya dipahami sebagai cadangan air bawah permukaan, tetapi sebagai bagian dari sistem ruang hidup yang dipengaruhi kondisi geologi, bentang lahan, penggunaan lahan, dan arah pembangunan.



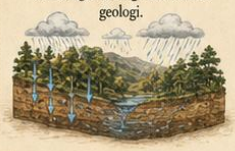
1 AIR TANAH

Air tanah tersimpan dalam pori tanah, rekahan batuan, dan akuifer. Ia menopang kebutuhan domestik, pertanian, industri, dan ekosistem, sehingga ketersediaan dan mutunya harus dijaga.



2 ZONA RESAPAN

Zona resapan adalah wilayah tempat air hujan meresap ke dalam tanah dan mengisi cadangan air tanah. Kawasan ini sangat dipengaruhi bentuk lahan, jenis tanah-batuan, tutupan lahan, kemiringan lereng, dan kondisi geologi.



3 TATA RUANG

Tata ruang menentukan bagaimana ruang dimanfaatkan: mana yang boleh dibangun, mana yang harus dibatasi, dan mana yang perlu dilindungi. Dalam konteks air tanah, tata ruang harus menjaga kawasan imbuhan, daerah sempadan, dan kawasan rentan.

4 KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

Melalui pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial, KGL membantu menilai potensi air tanah, fungsi zona resapan, faktor pembatas, risiko pemanfaatan, dan arahan pengelolaan ruang yang lebih aman dan berkelanjutan.

ANCAMAN BILA DIABAIKAN

- Penurunan muka air tanah
- Berkurangnya imbuhan
- Menurunnya kualitas air
- Banjir dan limpasan meningkat
- Konflik pemanfaatan ruang

Menjaga air tanah berarti menjaga masa depan ruang hidup. Zona resapan yang terlindungi dan tata ruang yang berpijak pada geologi akan mendukung keberlanjutan, keselamatan, dan ketahanan wilayah.

Membaca bawah permukaan, menjaga resapan, menata masa depan.

BAB 6

Air Tanah, Zona Resapan dan Tata Ruang

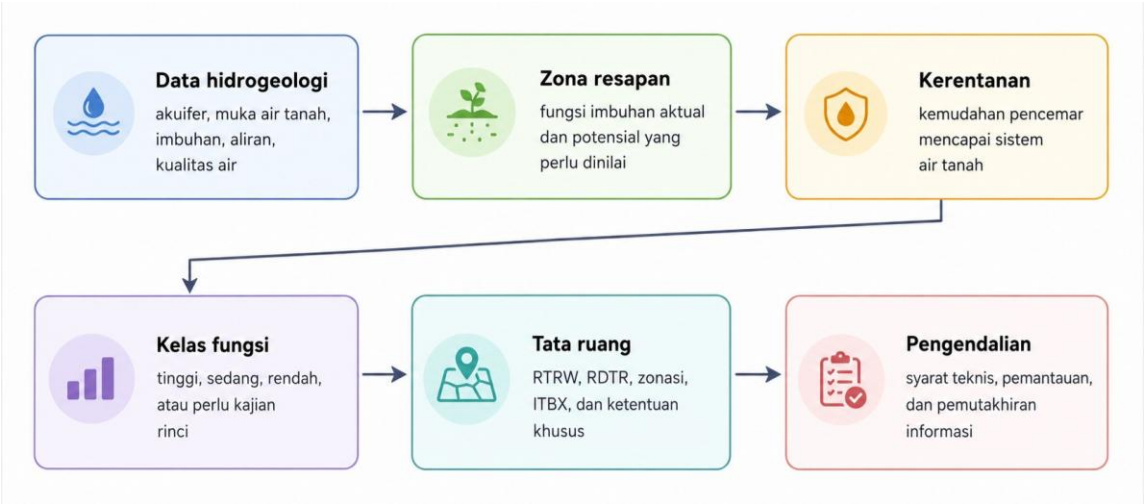
6.1 Pengantar

Bab 4 telah membahas daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, dan faktor penyisih geologi sebagai dasar penilaian ruang. Bab 5 kemudian menjelaskan bagaimana pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial digunakan dalam Kajian Geologi Lingkungan. Bab 6 menerapkan kerangka tersebut pada salah satu tema paling penting dalam Geologi Tata Lingkungan, yaitu air tanah, zona resapan, dan hubungan keduanya dengan tata ruang.

Air tanah merupakan bagian dari sistem lingkungan geologi yang menopang kehidupan, kegiatan ekonomi, pelayanan publik, dan keberlanjutan wilayah. Air tanah tidak berdiri sendiri sebagai sumber daya air semata, tetapi terkait dengan batuan, tanah, bentuk lahan, struktur geologi, curah hujan, tutupan lahan, proses imbuhan, dan aktivitas manusia. Oleh karena itu, keputusan tata ruang yang mengubah kondisi lahan dapat memengaruhi kuantitas, kualitas, dan keberlanjutan air tanah.

Dalam kerangka GTL, zona resapan memiliki kedudukan strategis. Zona resapan bukan hanya area tempat air hujan masuk ke dalam tanah, melainkan bagian dari fungsi ruang yang menjaga kesinambungan sistem air tanah. Apabila zona resapan berubah menjadi kawasan terbangun dengan permukaan kedap air tinggi, maka imbuhan air tanah dapat menurun, limpasan meningkat, dan tekanan terhadap sistem hidrologi kawasan menjadi lebih besar. Pada wilayah perkotaan, persoalan tersebut dapat berhubungan dengan banjir lokal, penurunan muka air tanah, penurunan muka tanah, dan kerentanan kualitas air.

Bab ini menjelaskan air tanah dan zona resapan dalam perspektif KGL dan GTL. Pembahasan dimulai dari posisi air tanah dalam lingkungan geologi, sistem akuifer, imbuhan dan lepasan, parameter penilaian zona resapan, pemetaan dan klasifikasi, hubungan zona resapan dengan RTRW dan RDTR, pengendalian pemanfaatan ruang, serta kebutuhan pemantauan. Dengan demikian, Bab 6 dimaksudkan untuk memperkuat pemahaman bahwa perlindungan air tanah harus diterjemahkan ke dalam tata ruang yang operasional.



Gambar 6.1 Alur KGL untuk air tanah, zona resapan, dan tata ruang.

Hubungan Bab 6 dengan Lampiran Teknis terutama terlihat pada petunjuk daerah resapan air, kawasan industri, permukiman, pertambangan, KBAK, TPST, PLTP, pengendalian banjir hulu-tengah-hilir, pemulihan neraca air, dan studi kasus pengembangan kota baru. Bab ini memberi dasar untuk membaca kawasan imbuhan, air tanah, mata air, aliran dasar, kerentanan pencemaran, serta hubungan antara pengendalian limpasan dan pemanfaatan ruang yang diterjemahkan menjadi arahan KDB/BCR, KDH, ITBX, syarat teknis, dan pemantauan.

Untuk kawasan PLTP, Bab 6 juga perlu dibaca sebagai dasar untuk memahami mengapa isu debit mata air dan muka air tanah tidak dapat digeneralisasi. Sistem air tanah dangkal, daerah imbuhan, mata air, titik lepasan, dan penggunaan air masyarakat harus dipantau sebagai satu sistem hidrogeologi lokal yang dapat dibandingkan dengan karakter manifestasi panas bumi melalui sidik jari air.

6.2 Air Tanah dalam Kerangka Geologi Tata Lingkungan

Air tanah dalam GTL dipahami sebagai sumber daya, fungsi lingkungan, sekaligus indikator kondisi ruang. Sebagai sumber daya, air tanah mendukung kebutuhan rumah tangga, pertanian, industri, pelayanan publik, pariwisata, dan berbagai kegiatan lain. Sebagai fungsi lingkungan, air tanah berkaitan dengan imbuhan, aliran bawah permukaan, mata air, hubungan dengan sungai, dan keseimbangan tata air. Sebagai indikator kondisi ruang, perubahan muka air tanah, kualitas air, dan pola aliran dapat menunjukkan adanya tekanan akibat pemanfaatan ruang.

Fetter menjelaskan bahwa perilaku air tanah dikontrol oleh sifat akuifer, gradien hidraulik, hubungan air tanah dengan batas geologi, serta kondisi imbuhan dan lepasan. Hiscock dan Bense menekankan bahwa hidrogeologi perlu dipahami sebagai sistem yang berhubungan dengan keberlanjutan sumber daya air dan perubahan lingkungan. Dalam konteks GTL, prinsip tersebut berarti bahwa air tanah tidak cukup dinilai dari debit atau kedalaman semata, tetapi harus dikaitkan dengan kondisi geologi dan penggunaan ruang di atasnya.

Pengaturan air tanah memiliki rezim regulasi tersendiri. Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air menempatkan sumber daya air sebagai

cabang produksi penting yang dikuasai negara dan dikelola untuk kemakmuran rakyat. Peraturan Pemerintah Nomor 43 Tahun 2008 tentang Air Tanah secara khusus mengatur pengelolaan air tanah. Namun, GTL tetap memiliki peran penting karena keputusan tata ruang dapat memperkuat atau melemahkan perlindungan air tanah.

Dengan demikian, peran GTL bukan mengambil alih pengaturan air tanah, melainkan menggunakan data hidrogeologi untuk mendukung keputusan ruang. GTL membantu menjawab pertanyaan: kawasan mana yang perlu dijaga sebagai resapan, kegiatan apa yang perlu dibatasi, syarat teknis apa yang harus diberlakukan, dan parameter apa yang harus dipantau. Jawaban atas pertanyaan tersebut sangat penting untuk RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan pertimbangan teknis kegiatan.

6.3 Sistem Akuifer, Imbuhan, Lepasan, dan Aliran Air Tanah

Sistem air tanah terbentuk oleh hubungan antara akuifer, daerah imbuhan, daerah lepasan, arah aliran, kondisi geologi, dan neraca air. Akuifer adalah satuan geologi yang mampu menyimpan dan meneruskan air dalam jumlah yang berarti bagi pemanfaatan. Kemampuan tersebut dipengaruhi oleh ruang antarbutir, retakan alami, tingkat pelapukan, hubungan antar lapisan batuan, dan batas hidrogeologi.

Daerah imbuhan adalah area tempat air masuk ke sistem air tanah. Pada daerah ini, curah hujan, kondisi tanah, kemiringan lahan, tutupan lahan, dan sifat batuan menentukan besarnya air yang dapat meresap. Daerah lepasan adalah area tempat air tanah keluar kembali ke permukaan atau berhubungan dengan sungai, rawa, mata air, pesisir, atau sistem air permukaan lain. Hubungan antara imbuhan, aliran, dan lepasan membentuk sistem hidrogeologi yang harus dibaca secara menyeluruh.

Dalam KGL, pemahaman sistem akuifer sangat penting karena zona resapan tidak dapat ditentukan hanya dari satu parameter. Lahan terbuka belum tentu otomatis menjadi zona resapan utama apabila sifat tanah dan batuannya kurang mendukung infiltrasi. Sebaliknya, area tertentu dengan kondisi geologi yang baik dapat memiliki peran imbuhan penting meskipun secara administratif belum ditetapkan sebagai kawasan lindung. Karena itu, pemetaan zona resapan harus menggabungkan data geologi, hidrogeologi, geomorfologi, topografi, curah hujan, tutupan lahan, dan data pendukung lain.

Arah aliran air tanah juga perlu diperhatikan. Kegiatan yang berpotensi mencemari air tanah tidak hanya berdampak pada lokasi kegiatan, tetapi dapat memengaruhi area di hilir aliran air tanah. Oleh karena itu, kajian KGL untuk kawasan industri, TPST, permukiman padat, dan fasilitas berisiko perlu memperhatikan arah aliran, kedalaman muka air tanah, litologi, dan kerentanan akuifer.

6.4 Zona Resapan sebagai Fungsi Lingkungan Geologi

Zona resapan dalam GTL dipahami sebagai kawasan yang memiliki fungsi penting dalam memasukkan air ke sistem air tanah. Fungsi ini dapat bersifat lokal, regional, atau strategis, bergantung pada sistem akuifer dan skala wilayah. Zona resapan tidak hanya penting untuk menjaga ketersediaan air tanah, tetapi juga untuk mengurangi limpasan, menjaga mata air, mendukung ekosistem, dan mempertahankan keseimbangan tata air wilayah.

Secara tata ruang, zona resapan harus diperlakukan sebagai fungsi ruang yang memiliki konsekuensi pengaturan. Kawasan dengan fungsi resapan tinggi tidak tepat diperlakukan sama dengan lahan biasa. Kegiatan pada kawasan tersebut perlu diarahkan agar tidak mengurangi kemampuan infiltrasi secara signifikan. Ketentuan pemanfaatan dapat mencakup pembatasan intensitas bangunan, kewajiban ruang terbuka, sistem drainase berwawasan resapan, pengelolaan air hujan, dan larangan atau pembatasan kegiatan yang berisiko mencemari air tanah.

Perbedaan antara zona resapan aktual dan zona resapan potensial juga penting. Zona resapan aktual menunjukkan area yang saat ini masih menjalankan fungsi imbuhan dengan baik. Zona resapan potensial menunjukkan area yang secara geologi dan

geomorfologi mendukung fungsi imbuhan, tetapi fungsinya dapat menurun karena perubahan penggunaan lahan. Dalam perencanaan ruang, kedua jenis informasi tersebut diperlukan. Zona resapan aktual perlu dilindungi, sedangkan zona resapan potensial perlu dikendalikan agar tidak kehilangan fungsi strategisnya.

Dalam konteks GTL, zona resapan menjadi salah satu contoh jelas bagaimana data geologi harus diterjemahkan menjadi arahan ruang. Tanpa pengaturan, zona resapan dapat berubah menjadi kawasan terbangun yang mengurangi imbuhan air tanah. Dengan GTL, zona resapan dapat dimasukkan ke dalam kebijakan ruang, ketentuan khusus RDTR, arahan KLHS, dan syarat teknis dokumen lingkungan.

6.5 Parameter Penilaian Zona Resapan dalam KGL

Penilaian zona resapan dalam KGL memerlukan parameter yang relevan, dapat ditelusuri, dan sesuai dengan skala kajian. Parameter umum yang sering digunakan mencakup litologi, sifat tanah, kemiringan lereng, curah hujan, penggunaan lahan, kedalaman muka air tanah, jenis akuifer, permeabilitas, geomorfologi, dan keberadaan mata air. Parameter tersebut tidak harus selalu sama pada setiap wilayah, karena karakter hidrogeologi Indonesia sangat beragam.

Litologi dan sifat tanah menentukan kemampuan air masuk dan bergerak ke dalam sistem bawah permukaan. Kemiringan lereng memengaruhi pembagian antara infiltrasi dan limpasan. Curah hujan menentukan potensi air yang tersedia untuk imbuhan. Tutupan lahan menentukan seberapa besar air dapat tertahan dan meresap. Kedalaman muka air tanah membantu menilai hubungan antara permukaan dan sistem akuifer. Geomorfologi membantu membaca posisi relatif kawasan terhadap daerah imbuhan dan lepasan.

Pemilihan parameter tidak boleh semata-mata mengikuti ketersediaan data. Parameter harus dipilih karena relevan dengan pertanyaan kajian. Untuk kajian pada skala RTRW, parameter dapat digunakan untuk memberi arahan umum kawasan resapan. Untuk RDTR, parameter harus lebih rinci agar dapat diterjemahkan ke dalam pengaturan zonasi. Untuk tapak kegiatan berisiko, parameter harus dilengkapi dengan investigasi lapangan, data muka air tanah, uji tanah, dan informasi arah aliran.

Selain parameter fisik, KGL juga perlu memperhatikan tekanan pemanfaatan ruang. Kawasan yang secara alamiah memiliki fungsi resapan tinggi dapat kehilangan fungsi jika telah mengalami pembangunan intensif. Karena itu, penggunaan lahan bukan hanya parameter tambahan, tetapi unsur penting untuk menilai kondisi aktual dan kebutuhan pengendalian.

Tabel 6.1 Parameter utama penilaian air tanah dan zona resapan dalam KGL.

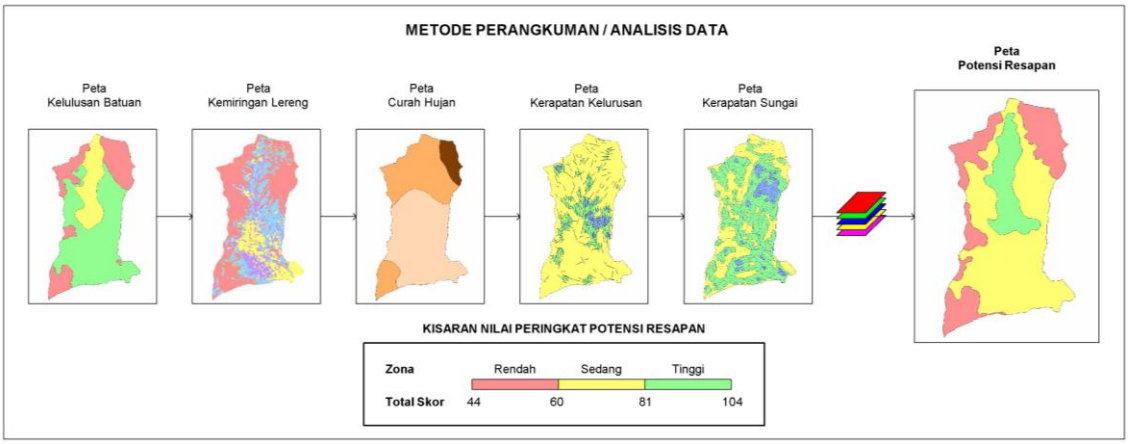
Parameter	Makna Teknis	Implikasi dalam KGL	Keluaran yang Diharapkan
Litologi dan sifat batuan	Mengontrol kemampuan menyimpan dan meneruskan air.	Menentukan potensi imbuhan, jenis akuifer, dan kebutuhan kajian rinci.	Peta satuan hidrogeologi dan penjelasan fungsi resapan.
Sifat tanah	Mengontrol infiltrasi awal, retensi air, dan penyaringan alami.	Menilai kemampuan resapan dan kerentanan terhadap pencemaran.	Kelas kemampuan resapan dan syarat pengendalian.
Kemiringan lahan	Mempengaruhi limpasan dan peluang infiltrasi.	Menentukan tingkat dukungan terhadap imbuhan dan risiko erosi.	Peta kelas lereng dan arahan pemanfaatan.
Curah hujan	Menentukan potensi air yang tersedia untuk imbuhan.	Menilai potensi imbuhan menurut wilayah dan musim.	Peta potensi imbuhan dan catatan ketidakpastian.
Penggunaan lahan	Menunjukkan kondisi aktual dan tekanan pemanfaatan ruang.	Menilai perubahan fungsi resapan dan kebutuhan pengendalian.	Peta resapan aktual serta rekomendasi pemulihan atau perlindungan.

Parameter	Makna Teknis	Implikasi dalam KGL	Keluaran yang Diharapkan
Muka air tanah	Menunjukkan kedalaman sistem air tanah terhadap permukaan.	Menilai kerentanan pencemaran dan kebutuhan pemantauan.	Peta kedalaman muka air tanah dan arahan syarat teknis.
Kualitas air tanah	Menunjukkan kondisi kimia, fisik, dan indikasi tekanan lingkungan.	Menilai dampak kegiatan dan kebutuhan pengelolaan.	Parameter pemantauan dan rekomendasi pengendalian.

6.6 Pemetaan Zona Resapan: Data, Skala, dan Metode

Dalam konteks air tanah, peta zona resapan sebaiknya dipahami sebagai peta fungsi hidrogeologi, bukan sekadar peta tutupan lahan. Karena itu, penyusunannya perlu memadukan data bentuklahan, kemiringan lereng, litologi, permeabilitas, penggunaan lahan, serta—bila tersedia—neraca limpasan dan infiltrasi sebagaimana terlihat pada gambar 6.2.

Pemetaan zona resapan bertujuan mengidentifikasi kawasan yang memiliki fungsi imbuhan air tanah dan menentukan tingkat kepentingannya bagi tata ruang. Pemetaan ini dapat dilakukan melalui interpretasi peta geologi, peta hidrogeologi, peta tanah, peta kemiringan lereng, data curah hujan, citra penginderaan jauh, data penggunaan lahan, pengamatan mata air, dan data lapangan. Hasilnya dapat berupa peta zona resapan, peta tingkat fungsi resapan, atau peta prioritas perlindungan resapan.



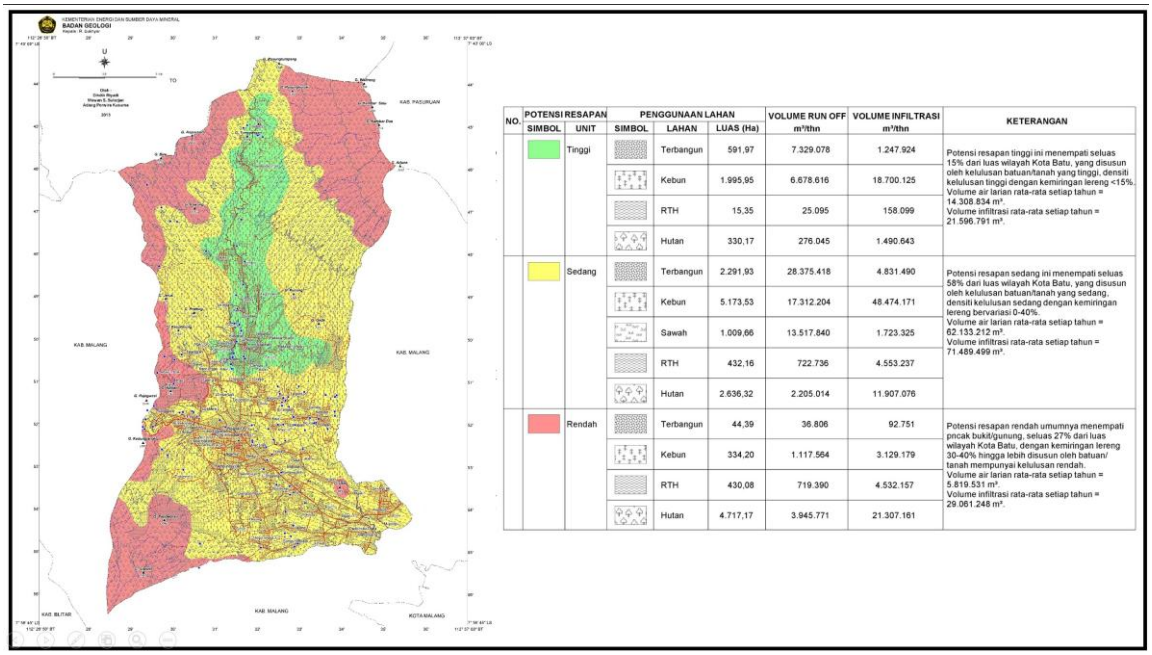
Gambar 6.2 Contoh penyusunan peta potensi daerah resapan di wilayah Kota Batu, Malang, Provinsi Jawa Timur.

Sebagaimana dicontohkan pada Gambar 6.3, merupakan hasil dari proses perangkuman analisis data berupa klasifikasi potensi resapan dapat dibedakan menjadi tinggi, sedang, dan rendah, lalu dikaitkan dengan penggunaan lahan, volume limpasan, dan volume infiltrasi. Dengan cara ini, peta resapan tidak hanya informatif secara fisik, tetapi juga dapat langsung digunakan sebagai bahan pertimbangan pengendalian pemanfaatan ruang.

Pada skala regional, pemetaan zona resapan dapat menggunakan pendekatan indikatif. Data yang digunakan dapat berupa satuan hidrogeologi, satuan bentuk lahan, curah hujan, dan penggunaan lahan. Hasilnya berguna untuk RTRW, KLHS, dan arahan perlindungan kawasan. Namun, hasil skala regional tidak boleh langsung dipakai untuk keputusan tapak berisiko tinggi tanpa pemeriksaan rinci.

Pada skala RDTR atau kawasan, pemetaan harus lebih rinci. Data kemiringan lahan, tutupan lahan aktual, jaringan drainase, mata air, kedalaman muka air tanah, dan batas satuan hidrogeologi perlu diperiksa lebih teliti. Pada skala tapak, khususnya untuk kawasan industri, TPST, atau fasilitas strategis, kajian harus menggunakan data lapangan yang cukup, termasuk pengukuran muka air tanah, pengamatan material penyusun tanah, serta analisis arah aliran.

Metode pemetaan dapat bersifat kualitatif, semi-kuantitatif, atau kuantitatif. Pendekatan skoring dan pembobotan dapat membantu menyusun indeks fungsi resapan, tetapi harus disertai penalaran hidrogeologi. Skor dan bobot tidak boleh menghasilkan peta yang tampak pasti tetapi tidak sesuai dengan kondisi lapangan. Karena itu, setiap peta zona resapan perlu dilengkapi penjelasan metode, skala, sumber data, keterbatasan, dan kebutuhan verifikasi.



NO.	POTENSI RESAPAN		PENGGUNAAN LAHAN			VOLUME RUN OFF	VOLUME INFILTRASI	KETERANGAN
	SIMBOL	UNIT	SIMBOL	LAHAN	LUAS (Ha)	m³/thn	m³/thn	
		Tinggi		Terbangun	591,97	7.329.078	1.247.924	Potensi resapan tinggi ini menempati seluas 15% dari luas wilayah Kota Batu, yang disusun oleh kelulusan batuan/tanah yang tinggi, densiti kelulusan tinggi dengan kemiringan lereng <15%. Volume air larian rata-rata setiap tahun = 14.308.834 m³. Volume infiltrasi rata-rata setiap tahun = 21.596.791 m³.
				Kebun	1.995,95	6.678.616	18.700.125	
				RTH	15,35	25.095	158.099	
				Hutan	330,17	276.045	1.490.643	
		Sedang		Terbangun	2.291,93	28.375.418	4.831.490	Potensi resapan sedang ini menempati seluas 58% dari luas wilayah Kota Batu, yang disusun oleh kelulusan batuan/tanah yang sedang, densiti kelulusan sedang dengan kemiringan lereng bervariasi 0-40%. Volume air larian rata-rata setiap tahun = 62.133.212 m³. Volume infiltrasi rata-rata setiap tahun = 71.489.499 m³.
				Kebun	5.173,53	17.312.204	48.474.171	
				Sawah	1.009,66	13.517.840	1.723.325	
				RTH	432,16	722.736	4.553.237	
				Hutan	2.636,32	2.205.014	11.907.076	
		Rendah		Terbangun	44,39	36.806	92.751	Potensi resapan rendah umumnya menempati pncak bukit/gunung, seluas 27% dari luas wilayah Kota Batu, dengan kemiringan lereng 30-40% hingga lebih disusun oleh batuan/ tanah mempunyai kelulusan rendah. Volume air larian rata-rata setiap tahun = 5.819.531 m³. Volume infiltrasi rata-rata setiap tahun = 29.061.248 m³.
				Kebun	334,20	1.117.564	3.129.179	
				RTH	430,08	719.390	4.532.157	
				Hutan	4.717,17	3.945.771	21.307.161	

Gambar 6.3 Contoh peta potensi daerah resapan yang dilengkapi informasi penggunaan lahan, limpasan, dan infiltrasi di wilayah Kota Batu, Malang, Provinsi Jawa Timur.

6.7 Skoring dan Pembobotan untuk Zona Resapan

Skoring dan pembobotan dalam penilaian zona resapan digunakan untuk mengubah parameter hidrogeologi dan lingkungan geologi menjadi nilai yang dapat dibandingkan secara spasial. Skor menunjukkan tingkat kontribusi suatu parameter terhadap fungsi resapan, sedangkan bobot menunjukkan tingkat kepentingan relatif parameter tersebut terhadap tujuan kajian. Misalnya, litologi dan sifat akuifer dapat diberi bobot lebih besar pada wilayah yang fungsi imbuhannya sangat dikontrol oleh karakter batuan.

Skoring harus mengikuti logika geologi. Kemiringan lereng yang lebih landai umumnya memberi peluang infiltrasi lebih baik dibanding lereng curam, tetapi penilaian ini harus tetap mempertimbangkan jenis tanah, penggunaan lahan, dan sifat batuan. Tutupan lahan berupa hutan atau lahan terbuka bervegetasi dapat mendukung resapan, tetapi perannya dapat berbeda bergantung pada kondisi tanah dan topografi. Dengan demikian, skor tidak boleh dipahami sebagai angka terlepas dari konteks.

Pembobotan dapat dilakukan melalui penilaian ahli, diskusi teknis, metode AHP, atau pendekatan lain yang dapat dijelaskan. Yang penting adalah keterbukaan alasan. Pembaca harus dapat memahami mengapa suatu parameter lebih penting daripada parameter lain. Dalam dokumen KGL, dasar pemberian bobot perlu disampaikan agar hasil dapat diuji dan dipertanggungjawabkan.

Hasil skoring dan pembobotan dapat diklasifikasikan menjadi zona resapan sangat tinggi, tinggi, sedang, rendah, dan sangat rendah; atau menggunakan istilah yang lebih sesuai dengan kebutuhan kebijakan. Namun, kelas tersebut harus selalu dihubungkan dengan rekomendasi ruang. Kelas tinggi

memerlukan perlindungan lebih kuat, kelas sedang memerlukan pengendalian, sedangkan kelas rendah dapat memiliki arahan pemanfaatan yang berbeda bergantung pada pembatas lain.

6.8 Kerentanan Air Tanah terhadap Pencemaran

Selain kuantitas air tanah, GTL juga harus memperhatikan kerentanan air tanah terhadap pencemaran. Kerentanan menunjukkan tingkat kemudahan pencemar mencapai sistem air tanah apabila terdapat sumber pencemar di permukaan atau dekat permukaan. Kajian kerentanan sangat penting untuk kegiatan yang menghasilkan limbah cair, bahan kimia, air lindi, atau potensi pencemar lain, seperti kawasan industri, TPST, permukiman padat, fasilitas kesehatan, dan prasarana tertentu.

Model DRASTIC dan berbagai pengembangannya telah banyak digunakan untuk menilai kerentanan air tanah. Parameter umum dalam pendekatan tersebut meliputi kedalaman muka air tanah, imbuhan, media akuifer, jenis tanah, topografi, zona tak jenuh, dan konduktivitas hidraulik. Bera et al. (2021), Barbulescu (2020), Satouh et al. (2021), dan Kozlowski et al. (2019) menunjukkan bahwa DRASTIC dapat diterapkan dalam lingkungan GIS, dimodifikasi dengan parameter penggunaan lahan, serta diuji terhadap indikator kualitas air. Dalam KGL, pendekatan semacam ini harus diperlakukan sebagai alat bantu analisis yang perlu dikalibrasi terhadap kondisi hidrogeologi setempat.

Dalam KGL, penilaian kerentanan tidak harus selalu menggunakan satu model tertentu. Metode dapat disesuaikan dengan ketersediaan data, karakter wilayah, dan tujuan kajian. Namun, prinsipnya harus jelas: semakin dangkal muka air tanah, semakin permeabel media geologi, semakin tinggi imbuhan, dan semakin dekat kegiatan dengan area sensitif, maka kehati-hatian terhadap pencemaran harus semakin kuat. Penilaian ini harus diterjemahkan menjadi syarat teknis dan pengendalian kegiatan.

Kerentanan air tanah perlu dibedakan dari risiko pencemaran. Kerentanan lebih menekankan sifat alamiah atau kondisi hidrogeologi, sedangkan risiko mencakup keberadaan sumber pencemar, intensitas kegiatan, teknologi pengendalian, dan kemungkinan kegagalan pengelolaan. Dengan demikian, kawasan yang rentan belum tentu tercemar, tetapi memerlukan pengendalian lebih ketat agar pencemaran tidak terjadi.

6.9 Air Tanah, Zona Resapan, dan Daya Dukung-Daya Tampung

Air tanah dan zona resapan memiliki hubungan langsung dengan daya dukung dan daya tampung geologi. Daya dukung berkaitan dengan kemampuan kawasan menyediakan dan mempertahankan fungsi air tanah untuk kegiatan tertentu. Daya tampung berkaitan dengan kemampuan sistem air tanah menerima tekanan akibat perubahan penggunaan lahan, pengambilan air, limbah, dan perubahan drainase tanpa mengalami penurunan fungsi yang tidak dapat diterima.

Kawasan dengan potensi air tanah baik dapat mendukung kegiatan tertentu, tetapi belum tentu memiliki daya tampung tinggi terhadap pencemaran. Sebaliknya, kawasan dengan fungsi resapan penting mungkin perlu dilindungi meskipun secara fisik dapat dibangun. Di sinilah GTL perlu membedakan antara peluang pemanfaatan dan batas perlindungan. Air tanah sebagai sumber daya tidak boleh membuat kawasan resapan dipandang sebagai lahan bebas untuk pembangunan intensif.

Dalam penilaian daya dukung, KGL dapat menggunakan data potensi akuifer, ketersediaan air, kualitas air, kedalaman muka air tanah, dan hubungan dengan sumber air lain. Dalam penilaian daya tampung, KGL perlu menggunakan data kerentanan, fungsi resapan, intensitas pembangunan, beban pencemar, perubahan tutupan lahan, dan kemampuan pengelolaan. Kedua sisi tersebut harus dibaca bersama agar rekomendasi tidak hanya memperhatikan kebutuhan pemanfaatan, tetapi juga keberlanjutan fungsi air tanah.

Hasil penilaian dapat diterjemahkan menjadi kelas ruang. Kawasan resapan utama dapat direkomendasikan sebagai kawasan lindung atau kawasan dengan ketentuan khusus. Kawasan resapan sedang dapat diarahkan untuk pemanfaatan terbatas

dengan kewajiban pengelolaan air hujan. Kawasan dengan kerentanan tinggi terhadap pencemaran dapat dibatasi untuk kegiatan tertentu atau diwajibkan menerapkan pengendalian teknis yang ketat.

6.10 Integrasi Zona Resapan ke dalam RTRW dan RDTR

Integrasi zona resapan ke dalam tata ruang merupakan inti penerapan GTL pada tema air tanah. Dalam RTRW, informasi zona resapan dapat digunakan untuk menetapkan arahan perlindungan kawasan, kawasan lindung geologi, kawasan perlindungan setempat, atau kawasan dengan ketentuan khusus sesuai kerangka peraturan yang berlaku. Dalam RDTR, informasi tersebut harus diterjemahkan lebih operasional ke dalam zonasi, sub-zonasi, ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, dan persyaratan teknis.

Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Penataan Ruang mengatur perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pengawasan, pembinaan, dan kelembagaan penataan ruang. Dalam konteks tersebut, GTL dapat menyediakan dasar teknis agar pengaturan ruang tidak hanya didasarkan pada kebutuhan pembangunan, tetapi juga pada fungsi lingkungan geologi, termasuk zona resapan dan perlindungan air tanah.

Pada RTRW, informasi zona resapan dapat digunakan sebagai arahan makro. Misalnya, kawasan dengan fungsi resapan tinggi diarahkan untuk dipertahankan sebagai ruang terbuka, kawasan lindung, pertanian berkelanjutan, hutan kota, atau fungsi lain yang tidak mengurangi imbuhan secara signifikan. Pada RDTR, arahan tersebut perlu dipertegas melalui ketentuan teknis, seperti batas koefisien dasar bangunan, kewajiban area terbuka, sistem drainase resapan, pengendalian basement, dan pembatasan kegiatan berisiko terhadap air tanah.

Integrasi ke dalam tata ruang juga memerlukan konsistensi antar peta. Peta zona resapan harus dikaitkan dengan peta pola ruang, peta rawan bencana, peta geologi, peta hidrogeologi, peta penggunaan lahan, dan peta rencana infrastruktur. Apabila terdapat konflik antara rencana pembangunan dan fungsi resapan, GTL perlu memberi pertimbangan teknis yang menjelaskan risiko, syarat, atau alternatif penyesuaian.

Tabel 6.2 Contoh penerjemahan kelas zona resapan ke dalam arahan tata ruang.

Kelas Zona Resapan	Makna GTL	Arahan Pemanfaatan Ruang	Contoh Syarat Teknis
Sangat tinggi	Fungsi imbuhan sangat penting dan perlu perlindungan kuat.	Diarahkan sebagai kawasan lindung, ruang terbuka, konservasi, atau pemanfaatan sangat terbatas.	Pembatasan permukaan kedap air, pengendalian limbah, pemantauan air tanah.
Tinggi	Fungsi resapan penting dan sensitif terhadap perubahan penggunaan lahan.	Kegiatan terbangun harus bersyarat dan dikendalikan intensitasnya.	Ruang terbuka minimum, sistem drainase resapan, kajian hidrogeologi untuk kegiatan berisiko.
Sedang	Fungsi resapan masih berarti tetapi dapat dikelola dengan syarat.	Pemanfaatan dapat dilakukan dengan pengendalian teknis dan pemantauan.	Pengelolaan air hujan, pengendalian limbah, pemeliharaan area terbuka.
Rendah	Fungsi resapan terbatas atau telah menurun.	Arahan pemanfaatan perlu mempertimbangkan pembatas geologi lain.	Pemantauan kondisi air tanah dan pengendalian pencemaran sesuai jenis kegiatan.
Sangat rendah	Fungsi resapan kecil atau tidak dominan.	Bukan prioritas perlindungan resapan, tetapi tetap perlu menilai bahaya dan daya dukung.	Syarat mengikuti pembatas utama lain seperti banjir, penurunan tanah, atau kerentanan kualitas air.

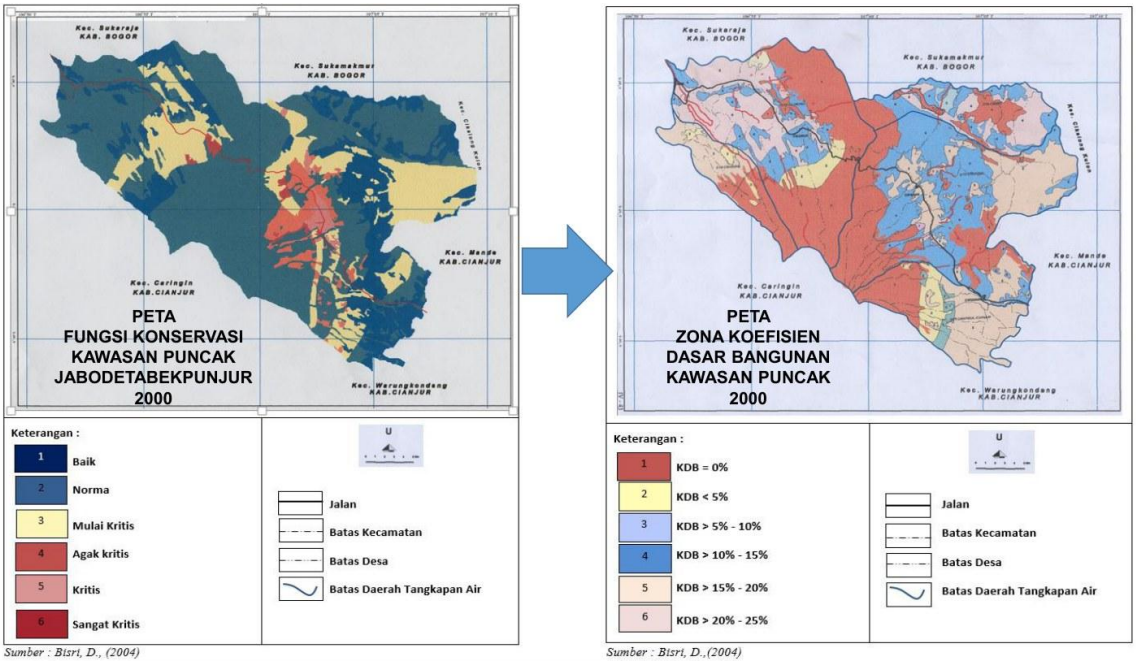
6.11 Pengaturan Zonasi dan ITBX pada Zona Resapan

Peta fungsi konservasi air tanah perlu dihubungkan dengan pengaturan intensitas pemanfaatan ruang. Dengan demikian, perlindungan kawasan imbuhan tidak berhenti sebagai informasi tematik, tetapi benar-benar diterjemahkan ke dalam pengendalian pembangunan, termasuk pembatasan kerapatan dan koefisien dasar bangunan.

Dalam RDTR, perlindungan zona resapan perlu diterjemahkan ke dalam pengaturan zonasi. Pengaturan ini tidak cukup hanya menyebut bahwa kawasan resapan harus dijaga, tetapi harus memberi arahan kegiatan yang diperbolehkan, diperbolehkan bersyarat, terbatas, atau tidak direkomendasikan. Matriks ITBX dapat menjadi perangkat penting untuk menghubungkan hasil KGL dengan keputusan pemanfaatan ruang.

Untuk zona resapan tinggi, kegiatan yang mempertahankan tutupan lahan alami, ruang terbuka, konservasi, pendidikan lingkungan, pertanian rendah input, dan pemanfaatan terbatas dapat lebih mudah diterima. Kegiatan terbangun dapat diperlakukan sebagai kegiatan bersyarat atau terbatas, terutama apabila meningkatkan permukaan kedap air, mengubah drainase, atau menimbulkan potensi pencemaran. Kegiatan yang menghasilkan limbah berisiko tinggi perlu dikaji secara sangat hati-hati.

Untuk zona resapan sedang, pengaturan dapat lebih adaptif. Kegiatan tertentu dapat diizinkan dengan syarat pengelolaan air hujan, pembatasan intensitas bangunan, penyediaan ruang terbuka, pengendalian limbah, dan pemantauan air tanah. Untuk zona resapan rendah, pengaturan dapat lebih menekankan pembatas geologi lain, seperti banjir, daya dukung tanah, penurunan muka tanah, atau kerentanan pencemaran.



Gambar 6.4 Contoh hubungan antara peta fungsi konservasi air tanah dan peta zona koefisien dasar bangunan (KDB) di Kawasan Puncak Bogor-Cianjur.

Matriks ITBX harus didukung alasan teknis. Apabila suatu kegiatan dinyatakan bersyarat, syaratnya harus jelas. Apabila kegiatan dinyatakan terbatas, batasannya harus dapat diterapkan. Apabila kegiatan tidak direkomendasikan, dasar pembatasnya harus dapat ditelusuri ke hasil KGL. Dengan demikian, ITBX tidak hanya menjadi daftar administratif, tetapi instrumen pengendalian yang berbasis kondisi lingkungan geologi.

6.12 Pengendalian Pemanfaatan Ruang dan Syarat Teknis

Pengendalian pemanfaatan ruang pada zona resapan perlu diarahkan pada perlindungan fungsi imbuhan, pencegahan pencemaran, dan pemantauan perubahan kondisi air tanah. Syarat teknis dapat berbeda menurut kelas resapan, jenis kegiatan, skala pembangunan, dan tingkat kerentanan air tanah. Semakin penting fungsi resapan dan semakin tinggi risiko kegiatan, semakin kuat syarat teknis yang diperlukan.

Syarat teknis dapat mencakup pembatasan permukaan kedap air, kewajiban pengelolaan air hujan di dalam kawasan, pemeliharaan ruang terbuka, penggunaan sistem drainase yang mendukung infiltrasi, pengendalian limbah cair, larangan pembuangan langsung ke tanah, pemantauan kualitas air tanah, dan kewajiban kajian hidrogeologi rinci. Untuk kegiatan berisiko tinggi, syarat dapat mencakup desain pengaman, sistem deteksi kebocoran, dan rencana tanggap darurat lingkungan.

Pengendalian juga perlu memperhatikan kegiatan eksisting. Tidak semua kawasan resapan masih berada dalam kondisi alami. Pada kawasan yang telah terbangun, GTL dapat merekomendasikan pemulihan fungsi melalui peningkatan ruang terbuka, perbaikan drainase, sumur resapan sesuai kelayakan setempat, pengurangan beban pencemar, dan pemantauan muka air tanah. Untuk kawasan yang belum berkembang, pengendalian harus lebih kuat agar fungsi resapan tidak menurun.

Syarat teknis harus dapat dilaksanakan dan dipantau. Rekomendasi yang terlalu umum tidak membantu pengendalian. Sebaliknya, rekomendasi yang terlalu rinci tanpa data memadai dapat menimbulkan kesan kepastian yang tidak tepat. Oleh karena itu, KGL perlu menyeimbangkan antara ketegasan arahan dan keterbatasan data. Jika data belum cukup, rekomendasi harus menyebut kebutuhan kajian lanjutan.

6.13 Air Tanah dalam KLHS dan Dokumen Lingkungan

KLHS dan dokumen lingkungan merupakan instrumen penting untuk memastikan bahwa aspek air tanah dan zona resapan diperhitungkan dalam kebijakan, rencana, program, dan kegiatan. Dalam KLHS, informasi air tanah dapat digunakan untuk menilai daya dukung dan daya tampung wilayah, membandingkan alternatif pengembangan, serta mengidentifikasi kawasan yang harus dilindungi atau dikendalikan. Dalam dokumen lingkungan, informasi tersebut digunakan untuk menilai dampak, menyusun pengelolaan, dan menetapkan pemantauan.

Untuk KLHS, pertanyaan pentingnya adalah: apakah rencana tata ruang mempertahankan zona resapan penting? Apakah pengembangan kawasan baru akan menurunkan imbuhan air tanah? Apakah rencana industri atau permukiman padat berada pada kawasan rentan air tanah? Apakah terdapat alternatif lokasi yang lebih aman? Pertanyaan ini membantu KLHS bekerja sebagai instrumen pencegahan, bukan sekadar pemeriksaan administratif.

Untuk AMDAL atau UKL-UPL, pertanyaan menjadi lebih teknis. Bagaimana kondisi muka air tanah? Ke mana arah aliran air tanah? Seberapa rentan akuifer terhadap pencemaran? Apa sumber pencemar yang mungkin muncul? Bagaimana sistem pengelolaan limbah dan air hujan? Parameter apa yang harus dipantau? Dengan dukungan KGL, dokumen lingkungan dapat lebih kuat dalam menilai dampak terhadap tanah dan air tanah.

Integrasi KGL ke KLHS dan dokumen lingkungan juga membantu menghindari pemisahan antara tata ruang dan pengelolaan lingkungan. Jika zona resapan telah dikenali dalam tata ruang, dokumen lingkungan harus mengacu pada arahan tersebut. Jika dokumen lingkungan menemukan pembatas baru pada tapak tertentu, informasi tersebut perlu menjadi masukan untuk pengendalian dan pemutakhiran data GTL.

Tabel 6.3 Hubungan zona resapan dengan instrumen kebijakan.

Instrumen	Fungsi Informasi Zona Resapan	Bentuk Integrasi	Catatan Kehati-hatian
RTRW	Memberi arahan makro perlindungan fungsi imbuhan.	Pola ruang, kawasan lindung, kawasan dengan ketentuan khusus.	Gunakan sebagai arahan regional, bukan keputusan tapak rinci.
RDTR	Menerjemahkan fungsi resapan ke pengaturan operasional.	Zonasi, sub-zonasi, ketentuan kegiatan, intensitas, dan syarat teknis.	Perlu data lebih rinci dan konsistensi dengan peta lain.
KLHS	Menilai keberlanjutan kebijakan, rencana, dan program.	Alternatif pengembangan, daya dukung, daya tampung, dan mitigasi.	Harus menilai dampak kumulatif perubahan penggunaan lahan.
Dokumen lingkungan	Menilai dampak kegiatan terhadap air tanah dan resapan.	RKL-RPL, pemantauan muka air tanah, kualitas air, dan pengelolaan air hujan.	Harus berbasis data tapak dan rencana kegiatan.
Pertimbangan teknis GTL	Memberi rekomendasi teknis bagi pengambil keputusan.	Syarat pemanfaatan, kebutuhan kajian rinci, atau alternatif lokasi.	Harus dapat ditelusuri ke data dan metode KGL.

6.14 Pemantauan Air Tanah dan Pemutakhiran Informasi GTL

Informasi air tanah dan zona resapan tidak boleh diperlakukan sebagai data yang berlaku tetap. Kondisi air tanah dapat berubah akibat perubahan penggunaan lahan, pengambilan air, perubahan iklim, pembangunan infrastruktur, dan dinamika alami. Oleh karena itu, GTL memerlukan mekanisme pemantauan dan pemutakhiran informasi.

Parameter pemantauan dapat mencakup muka air tanah, kualitas air, debit mata air, perubahan tutupan lahan, luas permukaan kedap air, kejadian banjir lokal, penurunan muka tanah, dan kepatuhan terhadap syarat teknis. Parameter yang dipilih harus sesuai dengan jenis kegiatan dan tingkat risiko. Kawasan industri, TPST, atau permukiman padat memerlukan pemantauan yang berbeda dari kawasan konservasi atau geowisata.

Pemantauan harus dihubungkan dengan keputusan. Data pemantauan yang hanya dikumpulkan tanpa mekanisme tindak lanjut tidak akan memperkuat pengendalian. Apabila muka air tanah turun terus-menerus, kualitas air menurun, atau fungsi resapan berkurang, perlu ada respons kebijakan: pengetatan syarat, pembatasan kegiatan, pemulihan fungsi resapan, atau evaluasi tata ruang.

Dalam sistem GTL, pemutakhiran data dapat dilakukan melalui basis data geologi lingkungan, laporan KGL, hasil pemantauan dokumen lingkungan, hasil pengawasan tata ruang, dan kajian lapangan. Dengan cara ini, informasi air tanah dan zona resapan menjadi bagian dari siklus tata kelola ruang yang adaptif.

6.15 Kesalahan Umum dalam Memahami Zona Resapan

Kesalahan pertama adalah menyamakan semua lahan terbuka sebagai zona resapan utama. Lahan terbuka memang dapat mendukung infiltrasi, tetapi fungsi resapan bergantung pada litologi, tanah, lereng, curah hujan, kondisi akuifer, dan posisi hidrogeologi. Karena itu, penetapan zona resapan perlu berbasis analisis, bukan hanya interpretasi penggunaan lahan.

Kesalahan kedua adalah menganggap peta zona resapan sebagai peta larangan mutlak. Dalam GTL, peta zona resapan harus diterjemahkan secara proporsional. Ada kawasan yang harus dilindungi ketat, ada kawasan yang dapat dimanfaatkan dengan syarat, dan ada kawasan yang memerlukan kajian rinci. Keputusan tersebut harus mempertimbangkan fungsi resapan, kerentanan air tanah, dan jenis kegiatan.

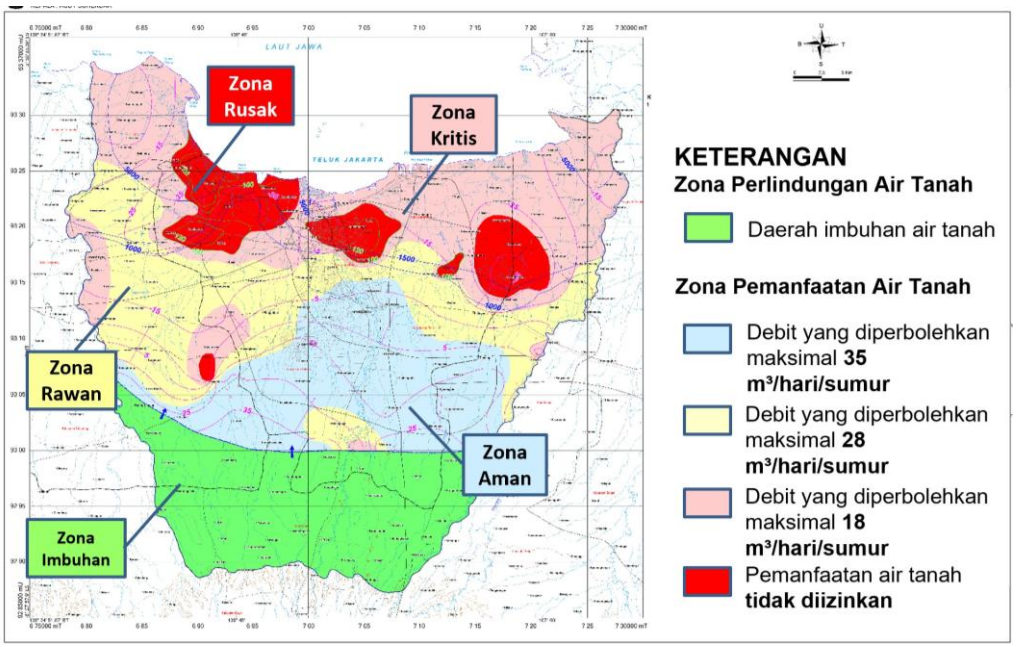
Kesalahan ketiga adalah menggunakan data skala regional untuk keputusan tapak yang membutuhkan ketelitian tinggi. Peta regional berguna untuk arahan umum, tetapi tidak cukup untuk kegiatan yang berisiko

terhadap air tanah. Untuk keputusan tapak, diperlukan data yang lebih rinci dan verifikasi lapangan.

Kesalahan keempat adalah memisahkan perlindungan resapan dari pengendalian pencemaran. Zona resapan tidak hanya berkaitan dengan jumlah air yang masuk ke dalam sistem air tanah, tetapi juga dengan kualitas air yang masuk. Oleh karena itu, perlindungan zona resapan harus selalu dikaitkan dengan pengendalian limbah, kegiatan berisiko, dan pemantauan kualitas air tanah.

6.16 Contoh Penerapan: Peta Zona Konservasi dan Kerentanan Air Tanah CAT Jakarta

Salah satu contoh penting penerapan informasi hidrogeologi dalam Geologi Tata Lingkungan adalah pengelolaan air tanah pada Cekungan Air Tanah (CAT) Jakarta, (Gambar 6.5). Kawasan ini memperlihatkan bahwa persoalan air tanah di wilayah perkotaan tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan air, tetapi juga dengan penurunan muka air tanah, penurunan tanah, intrusi air laut, dan pencemaran air tanah. Oleh karena itu, air tanah harus dibaca sebagai sistem geologi lingkungan yang memiliki batas daya dukung, daya tampung, dan risiko penurunan kualitas apabila pemanfaatannya tidak dikendalikan.



Keterangan peta:

- **Zona imbuhan:** wilayah perlindungan air tanah yang perlu dijaga agar proses pengisian akuifer tetap berlangsung.
- **Zona aman:** wilayah pemanfaatan air tanah dengan debit yang masih diperbolehkan secara lebih longgar sesuai ketentuan peta konservasi.
- **Zona rawan:** wilayah yang memerlukan pengendalian lebih ketat karena mulai menunjukkan tekanan terhadap kondisi air tanah.
- **Zona kritis:** wilayah yang memerlukan pembatasan pemanfaatan lebih kuat karena kondisi air tanah dan/atau lingkungan air tanah telah mengalami tekanan serius.
- **Zona rusak:** wilayah yang pemanfaatan air tanahnya tidak diizinkan karena kondisi air tanah dan lingkungan air tanah telah melampaui batas pengendalian.

Gambar 6.5. Contoh Peta Zona Konservasi Air Tanah CAT Jakarta sebagai instrumen pengendalian pengambilan air tanah. Peta memperlihatkan zona perlindungan air tanah dan zona pemanfaatan air tanah, mulai dari zona aman sampai zona rusak. Sumber cuplikan: Badan Geologi, Kementerian ESDM, 2025; mengacu pada Permen ESDM No. 18 Tahun 2021 dan Kepmen ESDM No. 195.K/HK.02/MEM.G/2021.

Gambar 6.5 di atas menunjukkan bahwa peta konservasi air tanah dapat dipakai sebagai instrumen pengendalian yang langsung dapat diterjemahkan ke dalam kebijakan perizinan, pembatasan debit, dan pengawasan pemanfaatan air tanah. Pada zona aman, pemanfaatan masih dapat dilakukan dengan pengendalian. Pada zona rawan dan kritis, pengambilan air tanah perlu dibatasi secara lebih ketat, disertai pemantauan muka air tanah dan kualitas air tanah. Pada zona rusak, pemanfaatan air tanah tidak direkomendasikan atau tidak diizinkan, sehingga kebutuhan air harus dialihkan ke sumber lain yang lebih aman, seperti jaringan air perpipaan.

Dalam tata ruang dan dokumen lingkungan, peta zona konservasi air tanah mempunyai peran strategis karena menghubungkan data hidrogeologi dengan keputusan pemanfaatan ruang. Peta ini tidak hanya menunjukkan keberadaan akuifer, tetapi membagi wilayah ke dalam zona perlindungan dan zona pemanfaatan. Zona imbuhan perlu dijaga agar proses pengisian air tanah tetap berlangsung, sedangkan zona aman, rawan, kritis, dan rusak menunjukkan tingkat pengendalian yang berbeda terhadap pengambilan air tanah.

Kriteria penentuan zona konservasi air tanah mencakup keterdapatan dan potensi air tanah, perubahan kondisi air tanah, perubahan lingkungan air tanah, serta prioritas pemanfaatan. Perubahan kondisi air tanah dapat berupa penurunan muka air tanah dan penurunan kualitas air, sedangkan perubahan lingkungan air tanah dapat berupa penurunan tanah dan intrusi air laut. Dengan demikian, peta konservasi air tanah tidak hanya menggambarkan kondisi hidrogeologi, tetapi juga merekam dampak pemanfaatan terhadap lingkungan geologi.

Kerentanan air tanah juga perlu dibaca melalui kualitas air tanah. Pada kawasan pesisir, salah satu isu penting adalah intrusi air laut. Indikasi intrusi air laut dapat dikenali melalui peningkatan zat padat terlarut (TDS), perubahan fasies hidrokimia menjadi Na-Cl, rasio Na/Cl, rasio Cl/HCO3, serta dukungan data isotop. Contoh CAT Jakarta menunjukkan bahwa intrusi air laut tidak dapat disimpulkan hanya dari satu parameter. Penilaian harus menggabungkan posisi terhadap garis pantai, kedalaman akuifer, kondisi pisometrik, kualitas air tanah, dinamika pengambilan air tanah, dan data pemantauan berkala.

Dalam dokumen lingkungan, informasi tersebut penting untuk menentukan kelayakan rencana kegiatan, kewajiban penggunaan sumber air alternatif, pembatasan pengambilan air tanah, perlindungan daerah imbuhan, pengendalian limbah, pemantauan muka air tanah, dan pemantauan kualitas air. Dengan demikian, peta kerentanan dan peta zona konservasi air tanah tidak boleh diposisikan sebagai lampiran teknis semata, tetapi sebagai dasar penetapan syarat lingkungan dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Makna utama dari contoh CAT Jakarta adalah bahwa air tanah bukan sumber daya yang dapat dieksploitasi tanpa batas. Pada kawasan perkotaan dan pesisir, tekanan pemanfaatan dapat menjalar menjadi krisis kuantitas, krisis kualitas, penurunan tanah, dan intrusi air laut. Karena itu, Geologi Tata Lingkungan perlu menempatkan peta konservasi air tanah sebagai perangkat utama dalam tata ruang, KLHS, AMDAL, UKL-UPL, perizinan, dan pengawasan lingkungan. Adapun implikasi untuk Tata Ruang dan Dokumen Lingkungan

- Pada zona imbuhan, kegiatan yang mengurangi resapan perlu dibatasi dan diarahkan untuk mempertahankan fungsi pengisian air tanah.
- Pada zona rawan dan kritis, pengambilan air tanah perlu dikendalikan melalui pembatasan debit, kewajiban pemantauan, serta prioritas penggunaan air perpipaan.
- Pada zona rusak, pengambilan air tanah tidak direkomendasikan dan sebaiknya digantikan dengan sumber air lain yang tidak memperburuk kondisi akuifer.
- Pada kawasan pesisir yang terindikasi intrusi air laut, dokumen lingkungan perlu mewajibkan pemantauan TDS, klorida, rasio ion, muka air tanah, dan indikasi penurunan tanah.

6.17 Kesimpulan Bab

Air tanah dan zona resapan merupakan unsur penting dalam Geologi Tata Lingkungan karena keduanya menghubungkan sistem

geologi, hidrologi, tata ruang, dan perlindungan lingkungan. Air tanah menopang kebutuhan manusia dan kegiatan pembangunan, sedangkan zona resapan menjaga keberlanjutan sistem air tanah. Keputusan tata ruang yang mengabaikan keduanya dapat menurunkan fungsi imbuhan, meningkatkan limpasan, memperbesar kerentanan pencemaran, dan melemahkan daya dukung wilayah.

Bab ini menegaskan bahwa zona resapan perlu dipahami sebagai fungsi ruang. Fungsi tersebut harus dipetakan, dinilai, diklasifikasikan, dan diterjemahkan ke dalam arahan RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengaturan zonasi, matriks ITBX, syarat teknis, dan pemantauan. Dengan demikian, perlindungan air tanah tidak berhenti pada konsep hidrogeologi, tetapi menjadi bagian dari tata kelola ruang.

Dalam KGL, penilaian air tanah dan zona resapan memerlukan data geologi, hidrogeologi, geomorfologi, curah hujan, penggunaan lahan, muka air tanah, kualitas air, dan kerentanan pencemaran. Skoring, pembobotan, dan analisis spasial dapat digunakan, tetapi harus tetap dikendalikan oleh penalaran hidrogeologi, skala data, verifikasi lapangan, dan prinsip kehati-hatian.

Dengan memahami air tanah dan zona resapan secara operasional, GTL dapat membantu mengarahkan pembangunan ke ruang yang lebih sesuai, melindungi fungsi imbuhan, mengendalikan kegiatan berisiko, dan menjaga keberlanjutan sumber daya air tanah. Bab berikutnya dapat melanjutkan pembahasan ke tema lain yang berkaitan erat dengan pemanfaatan ruang, seperti kawasan rawan bencana geologi, kawasan pesisir, kawasan karst, atau kawasan strategis.

> *Air tanah adalah bagian dari kehidupan bumi yang bergerak perlahan, sering tersembunyi, tetapi sangat menentukan keberlanjutan ruang. Daerah imbuhan, daerah lepasan, mata air, akuifer, dan zona resapan bukan sekadar istilah hidrogeologi, melainkan bagian dari sistem penyangga kehidupan. Ketika ruang terbangun tanpa memahami sistem air tanah, yang terganggu bukan hanya ketersediaan air, tetapi juga keseimbangan lingkungan geologi. Karena itu, tata ruang perlu memberi tempat bagi air untuk meresap, bergerak, dan muncul kembali secara alami. Menjaga air tanah berarti menjaga napas panjang sebuah wilayah.*

BAB 7

Bahaya Geologi dan Pengendalian Pemanfaatan Ruang

7.1. Pengantar

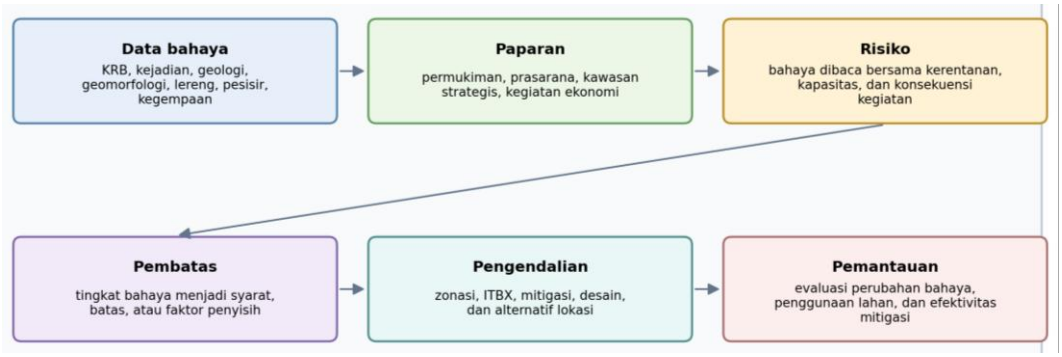
Bab 6 telah menjelaskan air tanah, zona resapan, dan tata ruang sebagai salah satu tema penting dalam Geologi Tata Lingkungan. Bab 7 melanjutkan pembahasan tersebut dengan menempatkan bahaya geologi sebagai dasar pengendalian pemanfaatan ruang. Pembahasan ini penting karena banyak keputusan ruang di Indonesia dibuat pada wilayah yang memiliki potensi gempa bumi, tsunami, letusan gunung api, gerakan tanah, likuefaksi, penurunan muka tanah, abrasi, erosi, banjir yang dipengaruhi kondisi geologi, atau intrusi air asin.

Dalam Geologi Tata Lingkungan, bahaya geologi tidak dipahami hanya sebagai peristiwa alam. Bahaya geologi merupakan kondisi atau proses geologi yang dapat menimbulkan kerugian apabila bertemu dengan manusia, infrastruktur, kegiatan ekonomi, dan fungsi lingkungan yang rentan. Oleh karena itu, peta bahaya harus dihubungkan dengan penggunaan lahan, rencana pembangunan, kepadatan kegiatan, nilai aset, kapasitas mitigasi, serta ketentuan pengendalian ruang.

Pengendalian pemanfaatan ruang menjadi pintu masuk utama untuk mengurangi risiko sejak tahap perencanaan. Apabila bahaya geologi baru diperhatikan setelah kawasan terbangun, pilihan pengendalian menjadi lebih terbatas dan lebih mahal. Sebaliknya, apabila informasi bahaya digunakan sejak penyusunan RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan perizinan sektor, maka pembangunan dapat diarahkan ke ruang yang lebih aman, sedangkan kawasan berisiko dapat dikelola dengan syarat teknis yang jelas.

Bab ini membahas posisi bahaya geologi dalam GTL, perbedaan antara bahaya dan risiko, jenis bahaya yang perlu dipertimbangkan, penggunaan data bahaya, skala dan ketelitian peta, penerjemahan bahaya menjadi faktor pembatas, integrasi ke dalam tata ruang, pengaturan zonasi, ITBX, mitigasi, pemantauan, validasi, serta kesalahan umum dalam penggunaan informasi bahaya geologi.

Bab 7 menjadi dasar pembacaan seluruh lampiran yang berhubungan dengan bahaya geologi, pengendalian banjir, kawasan berisiko, tapak fasilitas strategis, serta kegiatan berkonsekuensi besar. Dengan tambahan Lampiran 16 dan Lampiran 17, bahaya geologi perlu dibaca sebagai faktor pembatas sekaligus dasar pengendalian pemanfaatan ruang, baik pada skala sistem hulu-tengah-hilir maupun pada skala rinci kawasan pengembangan kota baru.



Gambar 7.1. Alur GTL untuk bahaya geologi dan pengendalian pemanfaatan ruang.

7.2. Bahaya Geologi dalam Kerangka Geologi Tata Lingkungan

Bahaya geologi adalah kondisi atau proses geologi yang berpotensi menimbulkan dampak merugikan terhadap keselamatan manusia, lingkungan, infrastruktur, dan kegiatan ekonomi. Dalam kerangka natural hazards, bahaya menjadi risiko ketika terdapat unsur yang terpapar dan memiliki kerentanan tertentu. Dengan demikian, bahaya geologi harus dianalisis bersama pola ruang, intensitas pemanfaatan, serta kapasitas pengendalian.

Dalam GTL, bahaya geologi merupakan bagian dari lingkungan geologi. Ia tidak berdiri sendiri di luar sistem tanah, batuan, bentuk lahan, air tanah, struktur geologi, iklim, dan aktivitas manusia. Gerakan tanah, misalnya, tidak hanya dipengaruhi oleh kemiringan lereng, tetapi juga oleh jenis batuan, tingkat pelapukan, tata air, penggunaan lahan, dan perubahan drainase. Penurunan muka tanah tidak hanya berhubungan dengan kondisi endapan tanah, tetapi juga dengan pengambilan air tanah, beban pembangunan, dan dinamika kawasan pesisir.

Posisi bahaya geologi dalam GTL adalah sebagai dasar penilaian kesesuaian ruang dan pengendalian pemanfaatan. Informasi bahaya membantu menjawab pertanyaan apakah suatu kegiatan dapat ditempatkan di lokasi tertentu, syarat teknis apa yang harus dipenuhi, intensitas apa yang dapat diterima, dan apakah lokasi alternatif perlu dipertimbangkan. Dalam pengertian ini, bahaya geologi tidak hanya menjadi data latar, tetapi menjadi dasar rekomendasi operasional.

Pemahaman ini sejalan dengan prinsip pengurangan risiko bencana yang menempatkan pencegahan dan mitigasi sebagai bagian dari pembangunan. Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana menekankan bahwa penyelenggaraan penanggulangan bencana dilakukan secara terencana, terpadu, terkoordinasi, dan menyeluruh. Dalam konteks tata ruang, prinsip ini berarti bahwa pengurangan risiko perlu dimulai sejak tahap penataan ruang, bukan hanya melalui tanggap darurat.

7.3. Pengertian Kawasan Rawan Bencana dalam Perspektif Geologi Tata Lingkungan

Dalam penataan ruang, istilah kawasan rawan bencana perlu dipahami secara hati-hati. Kawasan rawan bencana tidak identik secara langsung dengan zona bahaya geologi murni. Zona bahaya geologi menunjukkan ruang yang dipengaruhi oleh proses atau kondisi geologi tertentu, seperti gempa bumi, tsunami, letusan gunung api, gerakan tanah, likuefaksi, penurunan muka tanah, abrasi, erosi, atau bahaya geologi lainnya. Akan tetapi, suatu zona bahaya baru menjadi kawasan rawan bencana dalam konteks tata ruang apabila di dalamnya terdapat manusia, bangunan, prasarana, kegiatan ekonomi, fungsi pelayanan publik, atau rencana pemanfaatan ruang yang dapat terdampak oleh bahaya tersebut.

Dengan demikian, secara operasional, kawasan rawan bencana dapat dipahami sebagai zona bahaya yang memiliki unsur terpapar dan kerentanan tertentu. Ungkapan sederhana bahwa kawasan rawan bencana adalah “zona bahaya geologi yang ada

manusianya" dapat digunakan sebagai penjelasan awal, sepanjang dipahami bahwa unsur "manusia" mencakup penduduk, permukiman, infrastruktur, kegiatan ekonomi, fasilitas umum, fasilitas strategis, serta sistem sosial dan lingkungan yang dapat mengalami kerugian apabila bahaya terjadi.

Pemahaman ini penting karena bahaya geologi pada dasarnya merupakan bagian dari dinamika alam. Gempa bumi, letusan gunung api, gerakan tanah, abrasi, banjir yang dipengaruhi kondisi geologi, atau penurunan muka tanah merupakan proses yang dapat terjadi tanpa harus langsung menjadi bencana. Proses tersebut berubah menjadi persoalan kebencanaan ketika bertemu dengan ruang yang dihuni, dimanfaatkan, atau direncanakan untuk kegiatan manusia. Oleh karena itu, istilah kawasan rawan bencana selalu mengandung dimensi geologi sekaligus dimensi tata ruang.

Dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan, kawasan rawan bencana harus dibaca sebagai hasil interaksi antara bahaya, paparan, kerentanan, dan kapasitas pengendalian. Bahaya menunjukkan sumber ancaman. Paparan menunjukkan keberadaan manusia, bangunan, prasarana, dan aktivitas pada wilayah yang dapat terdampak. Kerentanan menunjukkan tingkat kelemahan fisik, sosial, ekonomi, lingkungan, atau kelembagaan dalam menghadapi bahaya. Kapasitas menunjukkan kemampuan untuk mencegah, mengurangi, menanggapi, dan memulihkan dampak.

Dengan pengertian tersebut, peta bahaya geologi tidak boleh langsung diterjemahkan sebagai peta larangan mutlak. Peta bahaya perlu dianalisis bersama penggunaan lahan, rencana tata ruang, kepadatan kawasan terbangun, jenis kegiatan, nilai aset, fungsi strategis, serta kemampuan mitigasi. Suatu wilayah dengan bahaya tinggi dapat memerlukan pembatasan ketat atau bahkan penghindaran untuk kegiatan tertentu. Sebaliknya, wilayah dengan bahaya sedang dapat tetap dimanfaatkan apabila jenis kegiatannya sesuai, intensitasnya dikendalikan, dan syarat teknis mitigasinya dipenuhi.

Dalam tata ruang, pengertian kawasan rawan bencana menjadi penting karena keputusan ruang menentukan besar kecilnya risiko. Apabila kawasan dengan bahaya tinggi diarahkan untuk permukiman padat, fasilitas penting, industri berisiko, atau prasarana strategis tanpa mitigasi yang memadai, maka tata ruang dapat meningkatkan risiko. Sebaliknya, apabila informasi bahaya digunakan sejak awal untuk mengarahkan pemanfaatan, membatasi intensitas, menyediakan ruang evakuasi, mengendalikan pembangunan, dan menetapkan syarat teknis, maka tata ruang dapat menjadi instrumen pengurangan risiko.

Dengan demikian, Geologi Tata Lingkungan berperan menjembatani peta bahaya geologi dengan kebijakan pemanfaatan ruang. GTL membantu menjawab pertanyaan: bahaya apa yang ada, siapa dan apa yang terpapar, seberapa rentan ruang tersebut, kegiatan apa yang masih dapat dilakukan, kegiatan apa yang harus dibatasi, syarat teknis apa yang diperlukan, dan bagian mana yang sebaiknya dihindari atau dilindungi. Pertanyaan-pertanyaan tersebut menjadikan GTL sebagai perangkat penting dalam pengendalian pemanfaatan ruang pada kawasan rawan bencana.

Secara ringkas, zona bahaya geologi adalah ruang yang dipengaruhi proses geologi berbahaya, sedangkan kawasan rawan bencana adalah zona bahaya yang telah atau berpotensi berinteraksi dengan manusia, aset, kegiatan, dan fungsi ruang. Pembedaan ini penting agar peta bahaya tidak digunakan secara keliru, dan agar kebijakan tata ruang mampu mengurangi risiko sejak tahap perencanaan.

"Kawasan rawan bencana bukan sekadar ruang yang memiliki bahaya geologi, melainkan ruang tempat bahaya geologi bertemu manusia, aset, kegiatan, dan kerentanan. Karena itu, pengendalian kawasan rawan bencana harus dilakukan melalui tata ruang yang membaca bahaya sekaligus mengatur paparan dan kerentanannya."

7.4. Dari Bahaya menuju Risiko Geologi

Perbedaan antara bahaya dan risiko perlu dijelaskan secara tegas. Bahaya adalah potensi proses geologi yang dapat menimbulkan dampak merugikan. Risiko adalah kemungkinan kerugian yang muncul akibat interaksi antara bahaya, unsur terpapar, kerentanan, dan kapasitas. Dengan kata lain, bahaya tinggi belum tentu menghasilkan risiko tinggi apabila tidak ada unsur penting yang terpapar. Sebaliknya, bahaya sedang dapat menjadi risiko tinggi apabila kawasan tersebut dipadati penduduk, infrastruktur penting, atau kegiatan berkonsekuensi besar.

Dalam GTL, peralihan dari bahaya ke risiko terjadi ketika data bahaya dibaca bersama rencana pemanfaatan ruang. Kawasan rawan gempa bumi perlu dinilai berbeda apabila akan digunakan untuk ruang terbuka, permukiman padat, rumah sakit, kawasan industri, bendungan, atau fasilitas strategis. Tingkat konsekuensi kegiatan menentukan kedalaman kajian dan tingkat kehati-hatian yang diperlukan.

Kerentanan merupakan unsur penting dalam penilaian risiko. Kerentanan dapat berupa kerentanan fisik, sosial, ekonomi, lingkungan, maupun kelembagaan. Dalam konteks GTL, kerentanan fisik dan lingkungan menjadi perhatian utama, misalnya kualitas bangunan, kepadatan ruang terbangun, kondisi fondasi, sistem drainase, akses evakuasi, fungsi resapan, atau kedekatan dengan kawasan lindung. Namun, penilaian GTL sebaiknya tetap membuka ruang integrasi dengan data sosial dan ekonomi ketika digunakan dalam tata ruang atau KLHS.

Kapasitas juga perlu diperhitungkan. Kawasan dengan bahaya tertentu dapat dikelola lebih aman apabila memiliki standar bangunan, sistem peringatan dini, jalur evakuasi, pengaturan intensitas, prasarana pengendali, dan pemantauan yang memadai. Akan tetapi, kapasitas tidak boleh digunakan untuk membenarkan pemanfaatan ruang yang secara geologi tidak layak. Kapasitas harus menjadi unsur pengurangan risiko, bukan alasan untuk mengabaikan pembatas geologi.

7.5. Jenis Bahaya Geologi yang Perlu Dipertimbangkan dalam KGL

KGL perlu mengenali jenis bahaya geologi yang relevan dengan wilayah dan jenis kegiatan yang dikaji. Tidak semua bahaya muncul pada semua wilayah, tetapi setiap kajian harus menunjukkan alasan mengapa suatu bahaya dipertimbangkan atau tidak dipertimbangkan. Ketiadaan pembahasan bahaya tertentu harus didasarkan pada data dan penalaran geologi, bukan semata-mata karena data belum tersedia.

Bahaya gempa bumi perlu diperhitungkan pada wilayah yang dipengaruhi aktivitas tektonik, sesar aktif, kondisi tanah yang dapat memperkuat guncangan, atau infrastruktur dengan konsekuensi tinggi. Dalam tata ruang, informasi gempa bumi tidak selalu menghasilkan larangan pemanfaatan, tetapi dapat menghasilkan syarat bangunan, kebutuhan kajian tapak, standar desain, dan pembatasan untuk kegiatan tertentu pada area yang sangat rentan.

Bahaya tsunami dan bahaya pesisir perlu diperhitungkan pada kawasan pantai, muara, dataran rendah dekat pantai, serta kawasan strategis pesisir. Informasi ini penting untuk penentuan lokasi permukiman, fasilitas publik, kawasan industri, pelabuhan, prasarana pesisir, dan jalur evakuasi. Pada wilayah tertentu, abrasi, rob, intrusi air asin, dan penurunan muka tanah juga perlu dibaca sebagai satu rangkaian persoalan ruang pesisir.

Bahaya letusan gunung api mencakup aliran material gunung api, jatuhan abu, gas berbahaya, lahar, dan proses lain yang dipengaruhi aktivitas gunung api. Dalam tata ruang, data kawasan rawan bencana gunung api perlu digunakan untuk mengarahkan lokasi permukiman, prasarana penting, kawasan wisata, pertanian, dan jalur evakuasi. Pengembangan pada wilayah gunung api harus selalu memperhitungkan dinamika bahaya dan kebutuhan kesiapsiagaan.

Gerakan tanah merupakan bahaya yang sangat erat dengan pemanfaatan ruang. Lereng, jenis batuan, pelapukan, curah hujan, tata air, perubahan tutupan lahan, pemotongan lereng, dan pembebanan dapat saling memengaruhi. Oleh karena itu, KGL perlu menilai gerakan tanah bukan hanya dari peta kejadian, tetapi juga dari faktor pengontrol dan perubahan yang mungkin ditimbulkan oleh rencana pembangunan.

Likuefaksi, penurunan muka tanah, erosi, banjir yang dipengaruhi kondisi geologi, dan intrusi air asin juga penting dalam banyak wilayah Indonesia. Bahaya tersebut sering tidak berdiri sendiri. Penurunan muka tanah dapat memperparah genangan pesisir. Intrusi air asin dapat berkaitan dengan pengambilan air tanah dan perubahan tata ruang. Erosi dapat meningkat akibat pembukaan lahan. Karena itu, KGL perlu menggunakan pendekatan sistemik ketika menilai bahaya geologi.

Tabel 7.1 Jenis bahaya geologi dan implikasinya bagi pengendalian pemanfaatan ruang.

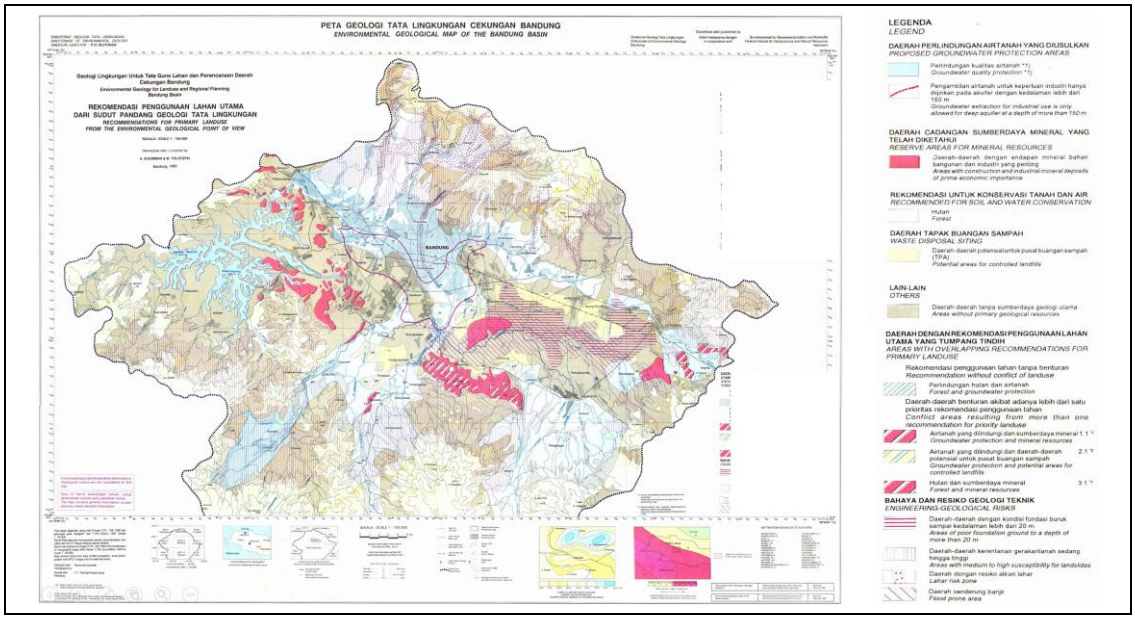
Jenis bahaya geologi	Parameter awal yang perlu diperiksa	Implikasi tata ruang	Contoh arahan pengendalian
Gempa bumi	Kegempaan, kondisi tanah, sesar aktif, respons tapak.	Menentukan kebutuhan standar bangunan, kajian tapak, dan kehati-hatian untuk fasilitas penting.	Desain tahan gempa, investigasi rinci, pembatasan kegiatan berkonsekuensi tinggi pada area sensitif.
Tsunami	Elevasi, jarak dari pantai, peta bahaya tsunami, akses evakuasi.	Menentukan arahan pemanfaatan ruang pesisir dan kebutuhan evakuasi.	Pengaturan zona evakuasi, pembatasan fungsi tertentu, jalur dan tempat evakuasi.
Letusan gunung api	KRB gunung api, lahar, jatuhan abu, riwayat aktivitas.	Menentukan batas pemanfaatan dan kesiapsiagaan kawasan sekitar gunung api.	Pembatasan pemanfaatan, rencana evakuasi, pengaturan wisata, pemantauan aktivitas.
Gerakan tanah	Lereng, litologi, pelapukan, curah hujan, tata air, penggunaan lahan.	Menentukan batas intensitas pembangunan dan kebutuhan pengelolaan lereng.	Kajian kestabilan, pengendalian drainase, pembatasan pemotongan lereng, pemantauan.
Likuefaksi	Kondisi endapan lepas, muka air tanah, intensitas gempa, data tanah bawah permukaan.	Menentukan kebutuhan investigasi dan desain khusus pada kawasan terbangun.	Kajian geoteknik rinci, desain fondasi, pembatasan fasilitas penting jika data belum memadai.
Penurunan muka tanah dan bahaya pesisir	Data penurunan tanah, muka air tanah, rob, abrasi, intrusi air asin.	Menentukan pengendalian kawasan pesisir dan perlindungan infrastruktur.	Pengendalian air tanah, pengaturan elevasi, perlindungan pantai berbasis kajian, pemantauan.

7.6. Data Bahaya Geologi dan Peta Kawasan Rawan Bencana

Peta bahaya geologi dalam GTL idealnya tidak berdiri sendiri, tetapi dikemas bersama informasi rekomendasi pemanfaatan lahan, konservasi air tanah, sumber daya, dan kendala geoteknik. Pendekatan ini membuat peta lebih fungsional bagi perencana karena hubungan antara ancaman, pembatas, dan peluang pemanfaatan ruang dapat dibaca secara serempak.

Contoh pada Gambar 7.2 memperlihatkan bentuk peta geologi tata lingkungan Cekungan Bandung yang memadukan perlindungan air tanah, cadangan sumber daya mineral, rekomendasi konservasi tanah dan air, tapak TPST, serta bahaya dan risiko geologi teknik. Bentuk peta seperti ini efektif karena

perencana dapat membaca berbagai batasan dan peluang dalam satu lembar Keputusan teknis.



Gambar 7.2 Contoh peta geologi tata lingkungan yang memuat elemen pembatas, potensi, serta bahaya geologi dalam satu lembar peta.

Data bahaya geologi dapat berasal dari peta geologi, peta geomorfologi, peta bahaya geologi, peta Kawasan Rawan Bencana, catatan kejadian, data struktur geologi, data curah hujan, data air tanah, citra penginderaan jauh, model elevasi, survei lapangan, serta hasil kajian teknis dari lembaga berwenang. Data tersebut perlu dinilai sumber, tahun, skala, metode, dan kesesuaiannya dengan tujuan kajian.

Peta Kawasan Rawan Bencana Geologi merupakan rujukan penting, tetapi penggunaannya dalam KGL harus memperhatikan skala dan konteks. Peta regional berguna untuk arahan umum, sedangkan keputusan tapak memerlukan data yang lebih rinci. Kesalahan sering terjadi ketika peta skala regional digunakan langsung untuk memutuskan kelayakan tapak tanpa pemeriksaan lapangan dan kajian tambahan.

Catatan kejadian juga penting, tetapi tidak cukup apabila digunakan sendiri. Tidak adanya catatan kejadian pada suatu area bukan berarti area tersebut aman. Bisa saja kejadian belum tercatat, belum ada pemantauan, atau area tersebut belum pernah dimanfaatkan secara intensif. Karena itu, KGL perlu menggabungkan data kejadian dengan analisis kondisi geologi, bentuk lahan, lereng, tata air, dan penggunaan lahan.

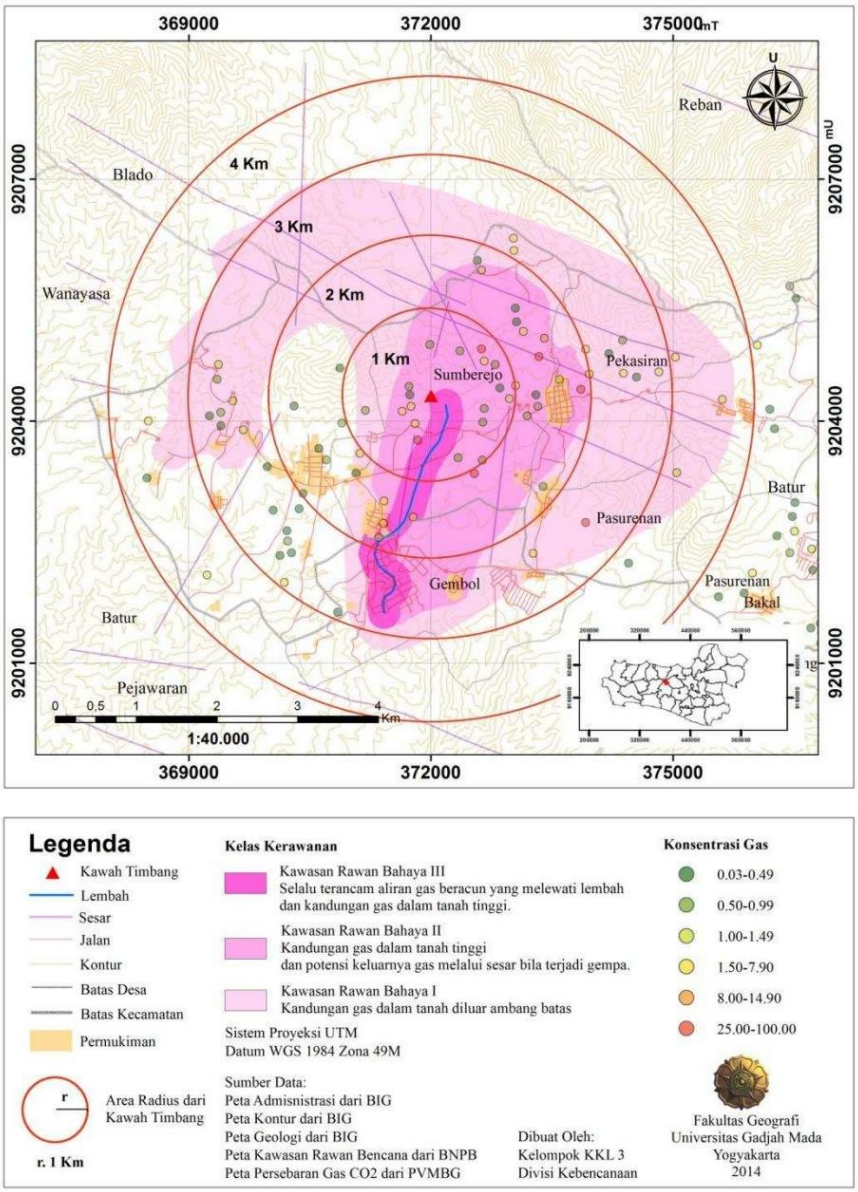
Data bahaya perlu dikelola sebagai informasi yang dapat diperbarui. Bahaya geologi dapat berubah akibat proses alam, perubahan penggunaan lahan, pembangunan, pengambilan air tanah, perubahan drainase, dan peningkatan intensitas kegiatan. Oleh karena itu, hasil KGL dan Kajian GTL perlu menyatakan kebutuhan pemutakhiran data, terutama pada kawasan yang mengalami tekanan pembangunan tinggi.

7.7. Contoh Penerapan Peta KRB Geologi untuk Tata Ruang: Kasus Kawah Sinila–Kawah Timbang, Dieng

Peta Kawasan Rawan Bencana Geologi merupakan salah satu instrumen penting dalam Geologi Tata Lingkungan karena mampu menerjemahkan bahaya geologi menjadi arahan pengendalian pemanfaatan ruang. Peta KRB tidak hanya menunjukkan wilayah yang berpotensi terdampak bahaya, tetapi juga memberikan dasar untuk

menentukan kegiatan yang dapat dilakukan, kegiatan yang perlu dibatasi, kegiatan yang memerlukan syarat teknis, serta kegiatan yang sebaiknya dihindari.

Salah satu contoh yang kuat adalah kawasan Kawah Sinila dan Kawah Timbang di Dataran Tinggi Dieng. Kawasan ini memperlihatkan karakter bahaya geologi yang khas, yaitu bahaya gas vulkanik yang tidak selalu terlihat secara visual, tetapi dapat sangat mematikan. Peristiwa Sinila tahun 1979 menunjukkan bahwa letusan freatik di Kawah Sinila dan Kawah Sigluduk dapat memicu pelepasan gas beracun dari Kawah Timbang. Gas yang didominasi CO_2 memiliki massa jenis lebih besar daripada udara, sehingga cenderung bergerak mengikuti relief lembah dan terkumpul pada bagian rendah. Kondisi inilah yang menyebabkan jalur evakuasi yang tampak aman secara visual dapat berubah menjadi jalur berbahaya apabila tidak didasarkan pada analisis morfologi dan peta KRB.



Gambar 7.3. Peta Kawasan Rawan Bencana Kawah Timbang, Dataran Tinggi Dieng, sebagai dasar pengendalian pemanfaatan ruang.

Peta Kawasan Rawan Bencana Kawah Timbang di atas memperlihatkan pembagian kawasan rawan bencana Kawah Timbang ke dalam KRB III, KRB II, dan KRB I. KRB III menunjukkan kawasan dengan tingkat rawan tertinggi yang berkaitan dengan jalur aliran gas CO_2 dan perlu dikendalikan secara ketat. KRB II menunjukkan kawasan yang memiliki potensi bahaya gas dari zona sesar dan memerlukan pengaturan kegiatan, rambu bahaya, serta kesiapsiagaan. KRB I menunjukkan kawasan dengan tingkat potensi lebih rendah, tetapi tetap memerlukan kewaspadaan dan edukasi kebencanaan. Dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan, peta ini digunakan untuk menerjemahkan bahaya geologi menjadi arahan tata ruang, zona pengendalian, pembatasan kegiatan, jalur evakuasi, dan pemantauan.

Gambar 7.3 pun menunjukkan bahwa pembagian Kawasan Rawan bencana (KRB) perlu dibaca sebagai dasar tindakan, bukan sekadar klasifikasi bahaya. Warna dan batas KRB harus diterjemahkan menjadi aturan pemanfaatan ruang. Pada KRB III, prioritas utama adalah perlindungan jiwa melalui pembatasan aktivitas, pelarangan permukiman baru, pengendalian akses, serta penempatan rambu dan sistem peringatan. Pada KRB II, pemanfaatan masih dapat dipertimbangkan secara terbatas, tetapi harus disertai pengawasan, pemantauan gas, dan pengaturan aktivitas masyarakat. Pada KRB I, kegiatan ruang relatif lebih memungkinkan, tetapi tetap harus berada dalam kerangka kesiapsiagaan.

Dalam konteks Geologi Tata Lingkungan, kasus Sinila–Timbang memberi pelajaran penting bahwa peta KRB harus dibaca bersama unsur geologi, struktur geologi, morfologi, penggunaan lahan, permukiman, jalur evakuasi, serta rencana pengembangan kawasan. Kawah Timbang tidak hanya dipahami sebagai titik keluarnya gas, tetapi sebagai bagian dari sistem vulkanik-hidrotermal Dieng yang dikontrol oleh struktur geologi dan bentuk lahan. Oleh karena itu, pengendalian ruang di sekitarnya tidak cukup dilakukan dengan penetapan radius sederhana, tetapi perlu mempertimbangkan arah aliran gas, posisi lembah, elevasi, jalur sesar, lokasi permukiman, serta kegiatan masyarakat.

Peta KRB Kawah Timbang membagi kawasan menjadi KRB III, KRB II, dan KRB I. KRB III merupakan tingkat rawan tertinggi dan berkaitan langsung dengan jalur aliran gas CO_2 dari Kawah Timbang. Kawasan ini perlu diperlakukan sebagai zona pengendalian sangat ketat, terutama untuk permukiman baru, fasilitas umum, penginapan, atau kegiatan yang meningkatkan keberadaan manusia secara tetap. KRB II menunjukkan wilayah dengan tingkat kerawanan menengah, antara lain karena potensi keluarnya gas dari zona sesar apabila terjadi gangguan tektonik atau vulkanik. KRB I merupakan kawasan dengan tingkat potensi lebih rendah, tetapi tetap memerlukan kesiapsiagaan karena masih berada dalam sistem bahaya Kawah Timbang.

Dengan demikian, Peta KRB Kawah Timbang dapat digunakan sebagai contoh bagaimana data bahaya geologi diterjemahkan menjadi pengendalian tata ruang. KRB III dapat menjadi dasar penetapan zona inti perlindungan atau zona larangan aktivitas tertentu. KRB II dapat menjadi dasar zona penyangga dengan pembatasan kegiatan, pengawasan, rambu bahaya, dan pengaturan waktu aktivitas masyarakat. KRB I dapat menjadi zona kewaspadaan yang masih dapat dimanfaatkan, tetapi tetap memerlukan edukasi, jalur evakuasi, dan pemantauan.

Pengalaman Sinila–Timbang juga menunjukkan pentingnya membedakan antara bahaya yang tampak dan bahaya yang tidak tampak. Pada kawasan gunung api, bahaya sering diasosiasikan dengan lava, awan panas, lahar, atau jatuhan abu. Namun, pada sistem vulkanik-hidrotermal seperti Dieng, gas CO_2 dan H_2S dapat menjadi ancaman utama. Gas tersebut dapat keluar melalui rekahan, bergerak mengikuti bentuk lahan, dan membahayakan manusia tanpa tanda visual yang mudah dikenali. Karena itu, tata ruang di kawasan seperti ini harus memasukkan informasi geologi struktur, morfologi, dan hasil pemantauan gas sebagai dasar pengendalian.

Dalam dokumen tata ruang, Peta KRB Kawah Timbang dapat digunakan untuk menyusun ketentuan pola ruang, ketentuan

kegiatan dan penggunaan lahan, ketentuan khusus, serta arahan mitigasi. Kawasan yang berada pada KRB III sebaiknya tidak diarahkan untuk permukiman baru, fasilitas pendidikan, fasilitas kesehatan, penginapan, atau kegiatan wisata massal. Kawasan pada KRB II dapat dimanfaatkan secara terbatas dengan syarat pengawasan, rambu bahaya, jalur evakuasi, pembatasan waktu aktivitas, dan pemantauan gas. Kawasan pada KRB I tetap perlu dilengkapi informasi kebencanaan, edukasi masyarakat, dan kesiapsiagaan.

Kasus Sinila–Timbang menegaskan bahwa peta KRB bukan hanya peta informasi bahaya, melainkan perangkat pengambilan keputusan. Peta tersebut membantu menjawab pertanyaan: ruang mana yang harus dihindari, ruang mana yang dapat dimanfaatkan secara terbatas, jalur evakuasi mana yang aman, lokasi mana yang tidak tepat untuk fasilitas publik, dan kegiatan apa yang harus dikendalikan. Dengan demikian, Peta KRB Geologi menjadi salah satu jembatan utama antara kebencanaan geologi dan tata ruang.

Kasus Kawah Timbang juga memperlihatkan pentingnya penentuan jalur evakuasi berdasarkan data morfologi. Jalur evakuasi tidak boleh hanya mengikuti akses tercepat atau jalan yang telah ada, tetapi harus mempertimbangkan kemungkinan pergerakan gas pada bagian rendah. Pada bahaya gas vulkanik, tempat yang tampak mudah dilalui belum tentu aman. Karena itu, penyusunan jalur evakuasi harus memperhatikan elevasi, arah angin, posisi lembah, jalur aliran gas, dan titik kumpul yang berada pada lokasi lebih aman.

Dalam GTL, pembacaan seperti ini penting karena tata ruang dapat memperbesar atau memperkecil risiko. Apabila kawasan rawan tinggi tetap diarahkan untuk permukiman, wisata massal, atau fasilitas penting, maka tata ruang memperbesar paparan. Sebaliknya, apabila Peta KRB digunakan sebagai dasar pengendalian, maka tata ruang dapat mengurangi risiko melalui pembatasan kegiatan, pemindahan fungsi yang tidak sesuai, pengaturan akses, penyediaan rambu, dan pemantauan berkala.

Tabel 7.2. Contoh Pembacaan Peta KRB Kawah Timbang untuk Pengendalian Pemanfaatan Ruang

Kelas KRB	Makna bahaya	Implikasi tata ruang	Arahan pengendalian
KRB III	Kawasan dengan potensi bahaya tertinggi, terutama terkait jalur aliran gas CO_2.	Tidak diarahkan untuk permukiman baru, penginapan, fasilitas publik, atau kegiatan dengan kehadiran manusia secara tetap.	Pembatasan ketat, pengendalian akses, rambu bahaya, pemantauan gas, dan penetapan jalur evakuasi aman.
KRB II	Kawasan dengan potensi bahaya menengah, termasuk potensi keluarnya gas dari zona sesar.	Pemanfaatan dapat dilakukan secara terbatas dan bersyarat.	Pembatasan kegiatan, pengaturan waktu aktivitas, edukasi masyarakat, sistem peringatan, dan pemantauan berkala.
KRB I	Kawasan dengan potensi lebih rendah, tetapi masih berada dalam sistem kewaspadaan Kawah Timbang.	Pemanfaatan relatif lebih memungkinkan, tetapi tetap mempertimbangkan kesiapsiagaan.	Informasi bahaya, rambu, jalur evakuasi, simulasi, dan integrasi dengan rencana tata ruang.
Area di luar KRB utama	Tingkat bahaya lebih rendah menurut peta KRB, tetapi tetap perlu verifikasi.	Dapat menjadi prioritas pemanfaatan dibandingkan kawasan rawan lebih tinggi.	Verifikasi tapak, pengendalian kegiatan strategis, dan pemantauan sesuai kebutuhan.

Dengan contoh tersebut, Bab 7 memperlihatkan bahwa pengendalian risiko geologi dalam GTL tidak berhenti pada penyajian peta bahaya. Peta KRB harus diturunkan menjadi arahan ruang, ketentuan pemanfaatan, rekomendasi mitigasi, dan rencana pemantauan. Pada kawasan seperti Sinila–Timbang, keputusan ruang yang baik adalah keputusan yang mampu membaca bahaya tidak tampak, menghormati data geologi, dan mengutamakan keselamatan manusia sejak tahap perencanaan.

7.8. Skala, Ketelitian Data, dan Tingkat Keputusan

Skala merupakan unsur metodologis yang menentukan validitas penggunaan data bahaya. Peta bahaya untuk arahan nasional atau provinsi tidak dapat langsung digunakan sebagai dasar keputusan teknis tapak tanpa kajian tambahan. Sebaliknya, data tapak yang sangat rinci tidak selalu dapat menggambarkan pola bahaya pada wilayah yang lebih luas. GTL harus menempatkan setiap data sesuai tingkat keputusan.

Untuk RTRW, informasi bahaya digunakan untuk mengarahkan struktur ruang, pola ruang, kawasan lindung, kawasan budidaya bersyarat, dan area yang memerlukan pengendalian. Untuk RDTR, informasi bahaya harus diterjemahkan ke ketentuan zonasi, ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, ketentuan khusus, dan syarat teknis. Untuk tapak fasilitas strategis, kajian harus lebih rinci dan dapat memerlukan investigasi geologi teknik, geofisika, hidrogeologi, geoteknik, serta analisis skenario bahaya.

Ketelitian data juga memengaruhi kelas rekomendasi. Apabila data memadai, KGL dapat menghasilkan rekomendasi yang lebih tegas. Apabila data belum memadai, rekomendasi sebaiknya tidak memaksakan kesimpulan akhir. Kelas “memerlukan kajian rinci” harus dipakai secara tepat untuk menunjukkan bahwa keputusan belum layak dibuat berdasarkan data yang ada.

Dalam dokumen KGL, skala dan keterbatasan data harus ditulis secara jelas. Pernyataan ini bukan kelemahan, melainkan bagian dari akuntabilitas ilmiah. Pengambil keputusan perlu mengetahui sejauh mana hasil kajian dapat digunakan dan pada kondisi apa kajian tambahan diperlukan.

7.9. Parameter Bahaya Geologi dalam KGL

Parameter bahaya geologi harus dipilih berdasarkan jenis bahaya, karakter wilayah, dan rencana kegiatan. Untuk gerakan tanah, parameter dapat mencakup kemiringan lereng, bentuk lahan, litologi, tingkat pelapukan, struktur geologi, curah hujan, penggunaan lahan, dan riwayat kejadian. Untuk likuefaksi, parameter dapat mencakup kondisi endapan lepas, muka air tanah dangkal, intensitas gempa, dan karakter tanah bawah permukaan. Untuk tsunami, parameter dapat mencakup elevasi, jarak dari pantai, bentuk pantai, akses evakuasi, dan rujukan peta bahaya tsunami.

Parameter tidak boleh dipilih hanya karena mudah diperoleh. Parameter harus relevan terhadap mekanisme bahaya. Jika suatu parameter tidak memiliki hubungan yang jelas dengan bahaya yang dikaji, penggunaan parameter tersebut dapat menurunkan validitas analisis. Sebaliknya, jika parameter penting tidak tersedia, kajian harus menyatakan keterbatasan dan merekomendasikan pengumpulan data tambahan.

Dalam skoring dan pembobotan, parameter bahaya perlu diturunkan menjadi kelas yang dapat diuji. Misalnya, kemiringan lereng dibagi menjadi kelas sesuai tingkat pengaruh terhadap kestabilan; jarak dari pantai dibaca bersama elevasi dan peta bahaya tsunami; muka air tanah dangkal dibaca bersama karakter tanah untuk menilai potensi likuefaksi. Setiap skor harus memiliki makna teknis, bukan sekadar angka.

Parameter bahaya juga harus dikaitkan dengan sensitivitas kegiatan. Permukiman, kawasan industri, sekolah, rumah sakit, TPST, prasarana pesisir, bendungan, dan fasilitas strategis memerlukan tingkat kehati-hatian yang berbeda. Oleh karena itu, parameter yang sama dapat memiliki bobot berbeda sesuai konsekuensi kegiatan.

7.10. Bahaya Geologi sebagai Faktor Pembatas dan Faktor Penyisih

Dalam GTL, bahaya geologi dapat berfungsi sebagai faktor pembatas atau faktor penyisih. Sebagai faktor pembatas, bahaya menunjukkan adanya kondisi yang membatasi pemanfaatan, tetapi masih membuka ruang pengelolaan melalui syarat teknis, pembatasan intensitas, desain mitigasi, atau pemantauan. Sebagai faktor penyisih, bahaya menunjukkan kondisi yang membuat kegiatan tertentu sebaiknya dihindari atau dialihkan ke lokasi lain.

Perbedaan ini penting agar rekomendasi tidak terlalu umum. Kawasan dengan bahaya gerakan tanah sedang, misalnya, mungkin

masih dapat dimanfaatkan untuk kegiatan tertentu dengan syarat pengelolaan lereng, drainase, pembatasan pemotongan lereng, dan pemantauan. Namun, kawasan dengan bahaya sangat tinggi untuk kegiatan berisiko besar perlu dinilai secara lebih ketat dan dapat tidak direkomendasikan.

Bahaya tsunami pada dataran pantai rendah, bahaya letusan gunung api pada area tertentu, atau bahaya likuefaksi pada tapak infrastruktur penting dapat menjadi pembatas kuat. Namun, keputusan tetap harus mempertimbangkan jenis kegiatan, standar teknis, fungsi kawasan, dan kemungkinan lokasi alternatif. Prinsip kehati-hatian harus digunakan ketika konsekuensi kegagalan sangat besar atau data belum memadai.

Dengan demikian, bahaya geologi tidak hanya memberi label rawan atau tidak rawan. Bahaya geologi harus diterjemahkan menjadi tingkat pembatas, implikasi ruang, syarat teknis, kebutuhan kajian rinci, atau rekomendasi alternatif lokasi. Inilah nilai operasional GTL dalam pengendalian pemanfaatan ruang.

Tabel 7.3. Penerjemahan tingkat bahaya ke dalam arahan pengendalian ruang.

Tingkat bahaya	Makna dalam KGL	Arahan umum	Catatan kehati-hatian
Rendah	Bahaya masih berada pada tingkat yang dapat dikelola dengan syarat umum.	Pemanfaatan dapat dilakukan dengan standar teknis umum dan pemantauan dasar.	Tetap perlu memperhatikan jenis kegiatan dan perubahan penggunaan lahan.
Sedang	Bahaya memerlukan syarat teknis dan pengendalian intensitas.	Pemanfaatan bersyarat; perlu kajian teknis sesuai jenis kegiatan.	Syarat harus ditulis jelas dan terkait langsung dengan pembatas geologi.
Tinggi	Bahaya menjadi pembatas kuat bagi kegiatan tertentu.	Kegiatan padat, penting, atau berkonsekuensi besar perlu dibatasi atau memerlukan kajian rinci.	Tidak boleh hanya mengandalkan mitigasi umum tanpa bukti teknis.
Sangat tinggi	Bahaya dapat menjadi faktor penyisih untuk kegiatan tertentu.	Kegiatan tertentu tidak direkomendasikan atau diarahkan ke lokasi alternatif.	Prinsip kehati-hatian harus digunakan, terutama pada fasilitas strategis.
Data belum cukup	Tingkat bahaya belum dapat ditentukan secara bertanggung jawab.	Keputusan final ditunda sampai data rinci tersedia.	Gunakan kelas memerlukan kajian rinci, bukan kesimpulan yang terlalu pasti.

7.11 Integrasi Bahaya Geologi ke dalam RTRW dan RDTR

Kedudukan KRB Geologi dan KGL dalam Penataan Ruang

Dalam penataan ruang, Kawasan Rawan Bencana Geologi (KRB Geologi) dan Kajian Geologi Lingkungan (KGL) memiliki kedudukan yang berbeda, tetapi saling melengkapi. KRB Geologi berfungsi sebagai acuan dasar untuk mengenali jenis, sebaran, tingkat, dan karakter bahaya geologi yang perlu diperhatikan dalam penyusunan rencana tata ruang. Sementara itu, KGL berfungsi sebagai instrumen teknis-operasional untuk menilai kesesuaian, keterbatasan, risiko, syarat pemanfaatan, dan kebutuhan pengendalian terhadap berbagai peruntukan ruang.

Dengan pengertian tersebut, KRB Geologi dapat dipahami sebagai informasi dasar pada tahap awal penataan ruang. Peta dan data KRB Geologi memberi peringatan mengenai kawasan yang memiliki potensi bahaya geologi, baik berupa letusan gunung api, gempa bumi, tsunami, gerakan tanah, likuefaksi, penurunan muka tanah, abrasi, erosi, maupun bahaya geologi lain yang relevan dengan karakter wilayah. Informasi ini diperlukan dalam penetapan struktur ruang, pola ruang, kawasan lindung, kawasan budidaya bersyarat, kawasan yang memerlukan ketentuan khusus, serta arahan pengendalian pemanfaatan ruang.

Namun, KRB Geologi tidak selalu cukup untuk langsung menentukan boleh atau tidaknya suatu peruntukan ruang. Peta KRB menunjukkan tingkat bahaya dan kerawanan,

tetapi keputusan pemanfaatan ruang masih memerlukan penilaian yang lebih terpadu terhadap kondisi lingkungan geologi, jenis kegiatan, intensitas pemanfaatan, skala rencana, unsur yang terpapar, tingkat kerentanan, serta kemampuan mitigasi yang dapat diterapkan. Di sinilah KGL memiliki peran penting.

KGL menggunakan data KRB Geologi sebagai salah satu data utama, bersama data tanah dan batuan, bentuk lahan, kemiringan lereng, air tanah, fungsi resapan, struktur geologi, sumber daya geologi, kawasan bernilai geologi, penggunaan lahan, serta data nongeologi yang relevan. Melalui tahapan inventarisasi, analisis, evaluasi, sintesis, dan perumusan rekomendasi, KGL menerjemahkan informasi bahaya geologi menjadi penilaian kesesuaian ruang, faktor pembatas, syarat teknis, arahan mitigasi, kebutuhan kajian rinci, dan rencana pemantauan.

Dengan demikian, hubungan antara KRB Geologi dan KGL dalam penataan ruang bersifat berjenjang. KRB Geologi menjadi acuan untuk mengenali bahaya dan kerawanan ruang, sedangkan KGL menjadi instrumen untuk menilai bagaimana ruang tersebut dapat atau tidak dapat dimanfaatkan untuk peruntukan tertentu. KRB Geologi memberi dasar pengenalan bahaya, sedangkan KGL memberi dasar penilaian pemanfaatan.

Dalam RTRW, KRB Geologi dapat digunakan untuk mengarahkan pola ruang secara makro, termasuk penetapan kawasan lindung, kawasan rawan bencana, kawasan budidaya bersyarat, serta kawasan yang memerlukan pengendalian khusus. Dalam RDTR, informasi KRB Geologi perlu diterjemahkan lebih rinci ke dalam ketentuan kegiatan, ketentuan intensitas, ketentuan prasarana, ketentuan khusus, dan persyaratan teknis. Pada tahap ini, KGL menjadi penting karena dapat menguji kesesuaian peruntukan ruang secara lebih operasional sesuai skala, jenis kegiatan, dan karakter lokasi.

Perbedaan kedudukan tersebut juga penting untuk menghindari kekeliruan dalam penggunaan peta KRB. Peta KRB tidak boleh dipahami hanya sebagai peta larangan, tetapi sebagai peta peringatan dan pengendalian risiko. Pada kawasan dengan tingkat bahaya rendah sampai sedang, pemanfaatan ruang tertentu masih dapat dimungkinkan dengan syarat teknis, pengaturan intensitas, mitigasi, dan pemantauan. Pada kawasan dengan tingkat bahaya tinggi atau konsekuensi risiko yang tidak dapat diterima, KGL dapat merekomendasikan pembatasan kegiatan, perubahan peruntukan, kebutuhan kajian rinci, atau alternatif lokasi.

Dengan posisi tersebut, KRB Geologi dan KGL tidak saling menggantikan. KRB Geologi memberikan dasar bahaya dan kerawanan untuk perencanaan ruang, sedangkan KGL memberikan penilaian teknis untuk pemanfaatan ruang. Integrasi keduanya diperlukan agar penataan ruang tidak hanya mengenali kawasan rawan bencana secara administratif, tetapi juga mampu menerjemahkannya menjadi arahan pemanfaatan ruang yang aman, terkendali, dan dapat dipertanggungjawabkan.

RTRW dan RDTR merupakan instrumen utama untuk menghubungkan informasi bahaya geologi dengan keputusan ruang. Dalam RTRW, informasi bahaya dapat digunakan untuk menetapkan kawasan lindung geologi, kawasan rawan bencana, kawasan budidaya bersyarat, dan arahan pengembangan wilayah. Dalam RDTR, informasi yang sama harus diterjemahkan secara lebih rinci ke dalam ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, ketentuan khusus, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang menempatkan penataan ruang sebagai sistem perencanaan, pemanfaatan, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2021 memperjelas penyelenggaraan penataan ruang, termasuk perencanaan, pemanfaatan, pengendalian, pengawasan, pembinaan, dan kelembagaan. Dalam kerangka ini, informasi bahaya geologi dapat menjadi dasar teknis agar pengendalian pemanfaatan ruang tidak hanya administratif, tetapi juga berbasis kondisi geologi.

Integrasi ke RTRW dan RDTR harus dilakukan secara proporsional. Tidak semua kawasan rawan harus menjadi kawasan yang

dilarang untuk semua kegiatan. Sebagian kawasan dapat diarahkan untuk kegiatan dengan risiko rendah, ruang terbuka, konservasi, pertanian terbatas, atau fungsi lindung. Sebagian lain dapat dimanfaatkan dengan syarat teknis tertentu. Kawasan dengan bahaya tinggi dan konsekuensi besar dapat diarahkan untuk pembatasan lebih ketat.

Dalam RDTR, hasil GTL dapat mendukung penyusunan ketentuan khusus. Ketentuan khusus tersebut dapat mencakup kewajiban kajian geologi teknik, pengaturan elevasi bangunan pada kawasan pesisir, ketentuan drainase pada lereng, pembatasan penggalian, pengendalian pengambilan air tanah, jalur evakuasi, standar bangunan, atau kewajiban pemantauan. Dengan cara ini, data bahaya menjadi perangkat pengendalian, bukan hanya peta lampiran.

7.12 Pengaturan Zonasi dan ITBX pada Kawasan dengan Bahaya Geologi

Pengaturan zonasi merupakan instrumen untuk menerjemahkan arahan ruang menjadi ketentuan yang dapat dilaksanakan. Dalam kawasan dengan bahaya geologi, pengaturan zonasi perlu membedakan kegiatan yang dapat diizinkan, diizinkan bersyarat, dibatasi, atau tidak direkomendasikan. Pendekatan ITBX dapat membantu menyusun arahan tersebut secara lebih jelas bagi pemerintah daerah, pemrakarsa, dan masyarakat.

Pada kawasan dengan bahaya rendah, kegiatan dapat diizinkan dengan syarat umum dan pemantauan dasar. Pada kawasan dengan bahaya sedang, kegiatan dapat diizinkan bersyarat, misalnya dengan kewajiban kajian teknis, pengendalian drainase, desain bangunan tertentu, atau pembatasan intensitas. Pada kawasan dengan bahaya tinggi, kegiatan tertentu perlu dibatasi atau tidak direkomendasikan, terutama apabila melibatkan kepadatan tinggi, fasilitas publik penting, atau konsekuensi risiko besar.

ITBX tidak boleh disusun secara mekanis hanya berdasarkan kelas bahaya. Jenis kegiatan harus menjadi pertimbangan utama. Kegiatan ruang terbuka, konservasi, atau geowisata terbatas memiliki konsekuensi berbeda dari permukiman padat, kawasan industri, rumah sakit, sekolah, atau fasilitas strategis. Oleh karena itu, matriks ITBX harus menghubungkan kelas bahaya, jenis kegiatan, intensitas pemanfaatan, dan syarat teknis.

Dalam konteks GTL, pengaturan zonasi dan ITBX harus tetap dapat ditelusuri ke data geologi. Jika suatu kegiatan dinyatakan bersyarat, syaratnya harus jelas dan berhubungan dengan pembatas geologi. Jika suatu kegiatan tidak direkomendasikan, alasannya harus dijelaskan. Transparansi ini penting agar pengendalian ruang tidak dipahami sebagai larangan administratif semata, tetapi sebagai perlindungan keselamatan dan keberlanjutan.

7.13 Pengendalian Pemanfaatan Ruang dan Syarat Teknis

Pengendalian pemanfaatan ruang merupakan tahap ketika rekomendasi GTL diterjemahkan menjadi tindakan. Tindakan tersebut dapat berupa pembatasan kegiatan, kewajiban kajian rinci, syarat desain, pengaturan intensitas, ketentuan prasarana, perlindungan kawasan, atau pemantauan. Tujuannya adalah mengurangi risiko geologi tanpa mengabaikan kebutuhan pembangunan yang masih dapat dilakukan secara aman.

Syarat teknis harus spesifik terhadap pembatas. Pada kawasan rawan gerakan tanah, syarat dapat berupa kajian kestabilan lereng, pengendalian drainase, larangan pemotongan lereng yang tidak terkendali, pengaturan beban bangunan, dan pemantauan retakan tanah. Pada kawasan rawan tsunami, syarat dapat berupa pengaturan zona evakuasi, elevasi bangunan tertentu, jalur evakuasi, ruang terbuka penyelamat, dan pembatasan kegiatan berisiko tinggi pada area tertentu.

Pada kawasan berpotensi likuefaksi, syarat teknis dapat mencakup investigasi tanah bawah permukaan, evaluasi potensi deformasi, desain fondasi, dan pembatasan kegiatan berkonsekuensi tinggi apabila data tidak memadai. Pada kawasan pesisir yang mengalami abrasi, rob, intrusi air asin, atau penurunan tanah, syarat dapat mencakup pengendalian pengambilan air tanah, pengaturan drainase, perlindungan pantai berbasis kajian, dan pemantauan perubahan garis pantai.

Syarat teknis harus dapat dilaksanakan dan dipantau. Rekomendasi yang terlalu umum, seperti “perlu mitigasi”, tidak cukup untuk pengendalian ruang. Rekomendasi harus menjelaskan bentuk mitigasi, siapa yang perlu melaksanakan, parameter apa yang dipantau, dan kapan evaluasi dilakukan. Dengan demikian, GTL membantu mengubah informasi bahaya menjadi tindakan pengendalian yang operasional.

7.14 Mitigasi Struktural, Mitigasi Non-Struktural, dan Pemantauan

Mitigasi risiko geologi dapat bersifat struktural dan non-struktural. Mitigasi struktural mencakup tindakan fisik atau rekayasa, seperti perkuatan lereng, sistem drainase, desain fondasi, bangunan tahan gempa, perlindungan pantai, atau prasarana evakuasi. Mitigasi non-struktural mencakup pengaturan ruang, peraturan zonasi, edukasi, sistem peringatan dini, prosedur evakuasi, pembatasan kegiatan, dan pemantauan.

Dalam GTL, mitigasi non-struktural memiliki peran sangat penting karena banyak risiko dapat dikurangi melalui keputusan ruang. Memilih lokasi yang lebih aman sering lebih efektif daripada memperbaiki risiko setelah kawasan terbangun. Karena itu, pengaturan ruang, pembatasan intensitas, dan arahan penggunaan lahan merupakan bagian inti dari mitigasi geologi.

Mitigasi struktural tetap diperlukan pada kawasan yang sudah terbangun atau kawasan yang masih dapat dimanfaatkan dengan syarat teknis. Namun, mitigasi struktural tidak boleh menjadi alasan untuk membangun pada lokasi yang secara prinsip tidak layak. Efektivitas rekayasa harus diuji terhadap tingkat bahaya, umur rencana, biaya pemeliharaan, dampak lingkungan, dan konsekuensi kegagalan.

Pemantauan menjadi bagian penting setelah keputusan dibuat. Parameter pemantauan dapat mencakup pergerakan lereng, muka air tanah, kualitas air, penurunan tanah, retakan permukaan, perubahan garis pantai, kejadian banjir, atau perubahan penggunaan lahan. Data pemantauan perlu digunakan untuk memperbarui informasi GTL dan menyesuaikan ketentuan pengendalian apabila kondisi berubah.

7.15 Bahaya Geologi dalam KLHS dan Dokumen Lingkungan

KLHS dan dokumen lingkungan memerlukan informasi bahaya geologi untuk menilai keberlanjutan kebijakan, rencana, program, dan kegiatan. Dalam KLHS, bahaya geologi dapat digunakan untuk menguji apakah arah pembangunan meningkatkan paparan risiko atau justru menguranginya. Informasi ini penting dalam pemilihan alternatif lokasi, arahan pola ruang, dan penentuan program mitigasi.

Dalam dokumen lingkungan, bahaya geologi perlu dibaca bersama dampak kegiatan. Pembangunan pada lereng dapat meningkatkan risiko gerakan tanah apabila mengubah drainase dan kestabilan. Kawasan industri pada area rentan banjir atau air tanah dangkal dapat meningkatkan risiko pencemaran. Prasarana pesisir pada area penurunan tanah dapat meningkatkan kebutuhan pengelolaan jangka panjang. Dengan demikian, bahaya geologi harus menjadi bagian dari identifikasi dampak dan rencana pengelolaan.

Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup menempatkan pencegahan kerusakan lingkungan sebagai bagian penting dari pengelolaan lingkungan. Dalam GTL, pencegahan tersebut dapat diperkuat dengan memasukkan data bahaya geologi, daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas ke dalam KLHS dan dokumen lingkungan.

Integrasi bahaya geologi ke dokumen lingkungan juga membantu menyusun rencana pemantauan. Pemantauan tidak hanya memeriksa kualitas lingkungan, tetapi juga perubahan kondisi geologi yang dapat memengaruhi keselamatan. Dengan demikian, dokumen lingkungan tidak hanya menilai dampak kegiatan terhadap lingkungan, tetapi juga dampak kondisi geologi terhadap keberlanjutan kegiatan.

Tabel 7.4. Penggunaan informasi bahaya geologi dalam instrumen kebijakan.

Instrumen	Fungsi informasi bahaya geologi	Keluaran yang diharapkan
RTRW	Memberi arahan makro mengenai kawasan rawan, kawasan lindung, dan kawasan budidaya bersyarat.	Arahan pola ruang, kawasan pengendalian, dan prioritas mitigasi wilayah.
RDTR	Menerjemahkan bahaya ke peraturan zonasi, ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, dan ketentuan khusus.	Matriks ITBX, syarat teknis, pembatasan kegiatan, dan arahan pemanfaatan.
KLHS	Menguji apakah kebijakan, rencana, dan program meningkatkan atau mengurangi risiko geologi.	Alternatif kebijakan, rekomendasi mitigasi, dan arahan keberlanjutan.
Dokumen lingkungan	Menilai hubungan antara kegiatan, dampak lingkungan, dan bahaya geologi tapak.	Rencana pengelolaan, rencana pemantauan, dan syarat teknis kegiatan.
Pertimbangan teknis GTL	Memberi rekomendasi berdasarkan data bahaya, faktor pembatas, dan konsekuensi kegiatan.	Status kesesuaian, syarat pemanfaatan, kebutuhan kajian rinci, atau rekomendasi lokasi alternatif.

7.16 Validasi, Komunikasi Risiko, dan Akuntabilitas Teknis

Validasi diperlukan agar informasi bahaya geologi dapat digunakan secara bertanggung jawab. Validasi mencakup pemeriksaan sumber data, skala peta, metode analisis, konsistensi antarparameter, kecukupan survei lapangan, kesesuaian dengan rencana kegiatan, dan keterlacakan rekomendasi. Untuk kajian yang disusun oleh pihak lain, validasi menjadi mekanisme penjaminan mutu sebelum hasil kajian digunakan dalam keputusan publik.

Komunikasi risiko juga penting. Informasi bahaya sering sulit dipahami oleh pembaca non-teknis apabila disajikan hanya dalam istilah geologi. GTL perlu menerjemahkan informasi tersebut menjadi bahasa keputusan: area mana yang lebih aman, area mana yang bersyarat, kegiatan apa yang perlu dibatasi, syarat apa yang harus dipenuhi, dan data apa yang masih perlu dilengkapi. Penyajian peta, tabel, matriks ITBX, dan ringkasan rekomendasi dapat membantu komunikasi tersebut.

Akuntabilitas teknis menuntut agar setiap rekomendasi dapat ditelusuri. Jika suatu lokasi dinyatakan tidak direkomendasikan, dasar datanya harus jelas. Jika suatu kegiatan diizinkan bersyarat, syaratnya harus terkait langsung dengan pembatas geologi. Jika kajian lanjutan diperlukan, ruang lingkup kajian harus disebutkan. Tanpa keterlacakan, rekomendasi GTL berisiko dipahami sebagai pendapat umum, bukan pertimbangan teknis.

Dalam konteks kebijakan, komunikasi risiko harus seimbang. Informasi bahaya tidak boleh dilemahkan untuk kepentingan pembangunan jangka pendek, tetapi juga tidak perlu disampaikan secara berlebihan sehingga menghambat kegiatan yang sebenarnya dapat dikelola. GTL harus menjaga keseimbangan antara kehati-hatian ilmiah, kebutuhan pembangunan, dan perlindungan keselamatan publik.

7.17 Kesalahan Umum dalam Menggunakan Informasi Bahaya Geologi

Salah satu kesalahan umum adalah memperlakukan peta bahaya sebagai peta larangan tunggal. Peta bahaya menunjukkan tingkat potensi bahaya, tetapi keputusan ruang harus mempertimbangkan jenis kegiatan, intensitas, unsur terpapar, kerentanan, kapasitas, dan syarat teknis. Karena itu, peta bahaya perlu diterjemahkan ke dalam arahan pengendalian, bukan digunakan secara kaku tanpa interpretasi.

Kesalahan kedua adalah menggunakan peta dengan skala yang tidak sesuai. Peta regional sering dipakai untuk keputusan tapak tanpa kajian tambahan. Praktik ini dapat menimbulkan kesalahan karena informasi lokal yang penting tidak tertangkap. Setiap penggunaan peta harus menyatakan skala, ketelitian, dan batas penerapannya.

Kesalahan ketiga adalah menganggap tidak adanya kejadian sebagai bukti tidak adanya bahaya. Catatan kejadian bersifat terbatas. Banyak area belum memiliki catatan karena belum terpantau, belum dimanfaatkan, atau belum mengalami pemicu tertentu selama periode pencatatan. Penilaian bahaya harus tetap didasarkan pada kondisi geologi, bentuk lahan, struktur, air, dan faktor pemicu.

Kesalahan keempat adalah memisahkan bahaya dari tata ruang. Informasi bahaya sering disajikan sebagai lampiran teknis, tetapi tidak diterjemahkan ke dalam ketentuan zonasi, syarat teknis, atau pengendalian pemanfaatan ruang. Akibatnya, data bahaya ada, tetapi tidak memengaruhi keputusan. GTL perlu menghindari kesenjangan ini dengan menghubungkan data bahaya langsung ke rekomendasi operasional.

Kesalahan kelima adalah terlalu percaya pada skor dan bobot tanpa penalaran geologi. Skoring dapat membantu sintesis, tetapi tidak boleh menggantikan pemeriksaan lapangan, pengetahuan proses geologi, dan uji kewajaran. Hasil angka harus selalu dikembalikan pada logika geologi dan konsekuensi kegiatan.

7.18 Kesimpulan Bab

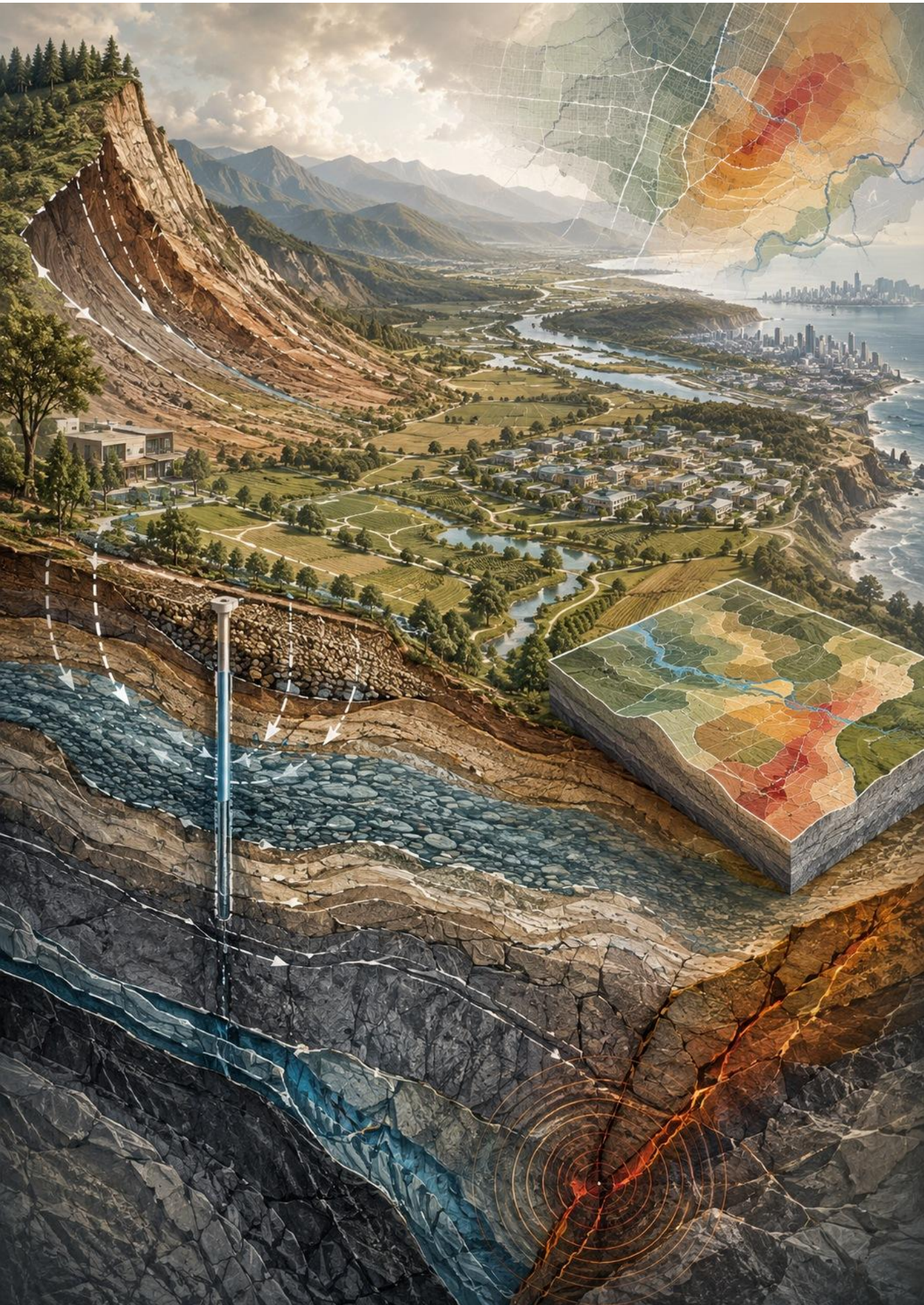
Bahaya geologi merupakan bagian penting dari lingkungan geologi dan harus menjadi dasar pengendalian pemanfaatan ruang. Dalam GTL, bahaya tidak hanya dipetakan sebagai fenomena alam, tetapi diterjemahkan menjadi faktor pembatas, faktor penyisih, syarat teknis, arahan mitigasi, dan parameter pemantauan.

Bab ini menegaskan bahwa pengurangan risiko geologi harus dimulai sejak tahap perencanaan. RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengaturan zonasi, dan perizinan sektor perlu menggunakan informasi bahaya geologi secara proporsional. Tujuannya bukan sekadar melarang pembangunan, tetapi mengarahkan pemanfaatan ruang agar sesuai dengan tingkat bahaya, daya dukung, daya tampung, dan konsekuensi kegiatan.

Perbedaan antara bahaya dan risiko perlu dipahami dengan baik. Bahaya menjadi risiko ketika bertemu dengan unsur terpapar, kerentanan, dan kapasitas yang tidak memadai. Karena itu, KGL dan Kajian GTL perlu membaca data bahaya bersama penggunaan lahan, rencana kegiatan, intensitas pembangunan, fungsi lindung, dan kesiapan mitigasi.

Bab ini juga menunjukkan pentingnya skala, validasi, komunikasi risiko, dan akuntabilitas teknis. Informasi bahaya harus bersumber dari data yang sahih, digunakan pada skala yang tepat, diuji kewajarannya, dan diterjemahkan menjadi rekomendasi yang dapat dilaksanakan. Dengan demikian, GTL dapat menjadi jembatan antara data bahaya geologi dan pengendalian pemanfaatan ruang yang aman serta berkelanjutan.

Bahaya geologi adalah cara bumi menunjukkan bahwa ruang memiliki dinamika. Gempa bumi, tsunami, letusan gunung api, gerakan tanah, likuefaksi, abrasi, erosi, dan penurunan muka tanah bukan sekadar ancaman, tetapi proses yang harus dibaca sebelum ruang dimanfaatkan. Kawasan rawan bencana bukan hanya wilayah yang memiliki bahaya, melainkan ruang tempat bahaya bertemu manusia, aset, kegiatan, dan kerentanan. Tata ruang dapat memperbesar risiko apabila abai, tetapi dapat pula menguranginya apabila membaca bahaya sejak awal. Dalam GTL, mitigasi dimulai bukan saat bencana terjadi, melainkan saat keputusan ruang dirumuskan.



BAGIAN III

Perlindungan Nilai Geologi dan Pemanfaatan Berkelanjutan

Pengantar Bagian III

Bagian III perlu dibaca bersama lampiran yang membahas Geopark, KBAK, KCAG, dan geowisata. Dengan hubungan ini, uraian mengenai perlindungan nilai geologi dan pemanfaatan berkelanjutan tidak berhenti sebagai gagasan umum, tetapi memiliki perangkat teknis untuk inventarisasi, penilaian, zonasi, ITBX, pengelolaan pengunjung, dan pemantauan kawasan.

Bagian III menempatkan lingkungan geologi sebagai warisan alam yang memiliki nilai ilmiah, pendidikan, estetika, budaya, konservasi, dan ekonomi berkelanjutan. Setelah Bagian II membahas metode penilaian daya dukung, zona resapan, dan bahaya geologi, bagian ini memperluas pembahasan ke perlindungan nilai geologi dan pemanfaatan kawasan secara bertanggung jawab.

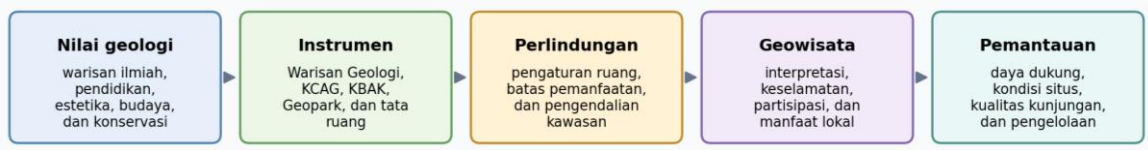
Alur Bagian III dimulai dari kawasan lindung geologi, Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark. Pembahasan kemudian bergerak menuju geowisata sebagai bentuk pemanfaatan berkelanjutan yang harus tetap bertumpu pada konservasi, interpretasi, keselamatan, pengendalian daya dukung, dan manfaat masyarakat lokal.

Dalam kerangka GTL, kawasan bernilai geologi tidak cukup hanya diinventarisasi atau dipromosikan. Kawasan tersebut harus dinilai, dilindungi, diatur akses dan pemanfaatannya, dimasukkan ke dalam tata ruang, serta dipantau agar nilai utamanya tidak menurun.

Bagian III memperjelas bahwa perlindungan dan pemanfaatan bukan dua agenda yang saling meniadakan. Keduanya dapat berjalan bersama apabila didukung data geologi, pengaturan ruang, pengelolaan kawasan, dan pemantauan yang dapat dipertanggungjawabkan.

Tabel III.1 Peta jalan Bagian III.

Bab	Fokus	Pertanyaan pengarah	Keluaran bagi GTL
Bab 8	Perlindungan nilai geologi	Bagaimana Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark ditempatkan dalam GTL?	Arahan perlindungan, pengendalian ruang, dan pengelolaan kawasan.
Bab 9	Geowisata berkelanjutan	Bagaimana Warisan Geologi dapat dimanfaatkan tanpa menurunkan nilainya?	Model geowisata berbasis konservasi, interpretasi, keselamatan, dan pemantauan.



Gambar III.1 Peta jalan Bagian III: perlindungan nilai geologi dan pemanfaatan berkelanjutan.

Konservasi Geologi, Geopark, dan Geowisata

Memahami bumi lebih dalam, menjaga warisan geologi, dan memanfaatkannya secara bermartabat

> Tidak semua nilai geologi harus diubah menjadi lahan terbangun. Ada batuan yang menyimpan sejarah bumi, ada bentang alam yang menjadi ruang belajar, ada kawasan karst, geosite, dan warisan geologi yang nilainya justru terletak pada kemampuannya untuk tetap lestari. Pemanfaatan terbaik kadang bukan membangun lebih banyak, tetapi memahami lebih dalam. Melalui konservasi, Geopark, dan geowisata, Geologi Tata Lingkungan menunjukkan bahwa bumi dapat memberi pengetahuan, identitas, dan manfaat ekonomi tanpa kehilangan martabat alaminya.

1. NILAI GEOLOGI

Batuan, bentang alam, fosil, karst, gua, struktur geologi, dan proses kebumian menyimpan rekaman sejarah bumi, nilai ilmiah, pendidikan, dan identitas kawasan.

2. KONSERVASI

Konservasi geologi menjaga warisan geologi agar tetap lestari, tidak rusak oleh pemanfaatan yang melampaui daya dukung, dan tetap dapat diwariskan kepada generasi berikutnya.

3. GEOPARK

Geopark menghubungkan keragaman geologi dengan keanekaragaman hayati dan budaya masyarakat. Ia menjadi ruang edukasi, konservasi, dan pembangnuan lokal yang berkelanjutan.

4. GEOWISATA

Geowisata memanfaatkan warisan geologi sebagai sarana belajar dan pengalaman ruang, sehingga memberi manfaat ekonomi tanpa menghilangkan nilai ilmiah dan martabat alamnya.

⚠ BILA DIABAIKAN

- Hilangnya nilai ilmiah dan pendidikan
- Rusaknya bentang alam dan geosite
- Menurunnya fungsi lindung kawasan karst
- Konflik pemanfaatan ruang
- Hilangnya identitas kawasan

Dalam Geologi Tata Lingkungan, pemanfaatan terbaik tidak selalu berarti membangun lebih banyak, melainkan menempatkan ruang sesuai nilainya: ada yang dapat dimanfaatkan, ada yang harus dibatasi, dan ada yang justru perlu dijaga agar tetap menjadi sumber ilmu, identitas, dan keberlanjutan.

Menjaga warisan geologi, merawat identitas ruang, dan mewariskan manfaat yang lestari.

BAB 8

Kawasan Lindung Geologi dan Geopark

8.1 Pengantar

Bab 8 membahas kawasan bernilai geologi sebagai bagian penting dari Geologi Tata Lingkungan. Pada bab-bab sebelumnya, lingkungan geologi telah dipahami sebagai fondasi ruang hidup, daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, sumber daya, dan sumber risiko. Bab ini menambahkan satu dimensi penting, yaitu lingkungan geologi sebagai warisan alam yang memiliki nilai ilmiah, pendidikan, estetika, budaya, dan konservasi.

Dalam praktik pembangunan, kawasan bernilai geologi sering menghadapi tekanan ganda. Di satu sisi, kawasan tersebut memiliki potensi untuk pendidikan, penelitian, identitas wilayah, pengembangan Geopark, dan geowisata. Di sisi lain, kawasan tersebut dapat tertekan oleh pembangunan fisik, perubahan penggunaan lahan, ekstraksi sumber daya, perluasan permukiman, dan aktivitas wisata yang tidak dikendalikan. Karena itu, GTL perlu hadir sebagai kerangka yang menempatkan nilai geologi dalam sistem perlindungan dan pemanfaatan ruang.

Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark tidak dapat dipahami sebagai istilah yang berdiri sendiri. Keempatnya saling berhubungan, tetapi tidak identik. Warisan Geologi berhubungan dengan nilai geologi yang dinilai penting; KCAG berhubungan dengan perlindungan kawasan yang memiliki nilai geologi; KBAK berhubungan dengan perlindungan bentang alam karst beserta fungsi geologis dan hidrogeologisnya; Geopark berhubungan dengan pengelolaan terpadu untuk konservasi, edukasi, dan pembangunan ekonomi masyarakat secara berkelanjutan.

Bab ini menjelaskan hubungan konseptual dan operasional antara berbagai instrumen tersebut. Pembahasan diarahkan agar pembaca kebijakan memahami bahwa perlindungan geologi bukan hambatan pembangunan, melainkan prasyarat agar pemanfaatan kawasan berlangsung aman, bernilai, dan berkelanjutan.

8.2 Kawasan Lindung Geologi dalam Kerangka GTL

Kawasan lindung geologi adalah ruang yang perlu dilindungi karena memiliki fungsi atau nilai geologi tertentu. Fungsi tersebut dapat berkaitan dengan perlindungan air tanah, pelestarian bentang alam karst, perlindungan situs bernilai geologi, kawasan rawan bencana geologi, atau kawasan yang menyimpan informasi penting mengenai sejarah bumi. Dalam kerangka GTL, kawasan lindung geologi menjadi bagian dari dasar penataan ruang dan pengendalian pemanfaatan.

Perlindungan kawasan geologi tidak selalu berarti menutup seluruh bentuk pemanfaatan. Perlindungan harus dipahami sebagai pengaturan agar kegiatan manusia tidak menghilangkan nilai, fungsi, kestabilan, dan keselamatan kawasan. Ada kawasan yang memerlukan perlindungan ketat, ada kawasan yang dapat dimanfaatkan secara terbatas, dan ada kawasan yang dapat dikembangkan untuk pendidikan serta geowisata dengan syarat pengelolaan tertentu.

Dalam tata ruang, kawasan lindung geologi perlu diterjemahkan ke dalam pola ruang,

ketentuan khusus, pengaturan zonasi, dan ketentuan pemanfaatan. Penerjemahan ini memerlukan data dan argumentasi teknis. Tanpa dukungan data GTL, perlindungan geologi dapat menjadi lemah karena tidak jelas batas, alasan, parameter, dan konsekuensi pengaturannya.

KGL dan Kajian GTL dapat membantu mengidentifikasi nilai dan fungsi geologi, menilai tingkat kerentanan kawasan, serta menyusun rekomendasi pengendalian. Dengan demikian, kawasan lindung geologi tidak hanya menjadi kategori administratif, tetapi menjadi bagian dari sistem keputusan ruang yang berbasis data dan dapat dipertanggungjawabkan.

8.3 Warisan Geologi sebagai Objek Penilaian dan Perlindungan

Warisan Geologi adalah unsur geologi yang memiliki nilai penting karena merekam proses, sejarah, bentuk, material, atau fenomena kebumian tertentu. Nilai tersebut dapat bersifat ilmiah, pendidikan, estetika, budaya, atau ekonomi berkelanjutan. Dalam konteks Indonesia, penetapan Warisan Geologi memperoleh dasar melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 1 Tahun 2020 tentang Pedoman Penetapan Warisan Geologi.

Penilaian Warisan Geologi harus dilakukan secara sistematis. Suatu objek geologi tidak cukup disebut penting karena indah atau populer. Penilaian perlu memperhatikan makna ilmiah, tingkat representasi, kelangkaan relatif, keutuhan, potensi edukasi, aksesibilitas, kerentanan, dan kebutuhan perlindungan. Pendekatan ini sejalan dengan literatur geoheritage yang menekankan inventarisasi, penilaian, perlindungan, dan pengelolaan berbasis kriteria.

Dalam GTL, Warisan Geologi tidak hanya dipahami sebagai objek konservasi. Ia juga menjadi dasar pengaturan ruang. Apabila suatu objek geologi memiliki nilai utama dan rentan terhadap perubahan fisik, maka ruang di sekitarnya perlu dikendalikan. Kegiatan yang dapat merusak nilai utama harus dibatasi, sedangkan kegiatan edukasi dan interpretasi dapat dikembangkan dengan syarat yang sesuai.

Dengan demikian, Warisan Geologi menjadi titik awal untuk membangun hubungan antara ilmu, perlindungan, dan pemanfaatan. Inventarisasi Warisan Geologi perlu diikuti dengan penilaian kebutuhan ruang, rencana pengelolaan, pengendalian akses, dan pemantauan. Tanpa itu, Warisan Geologi berisiko hanya menjadi daftar objek, bukan dasar kebijakan kawasan.

Tabel 8.1. Perbedaan kedudukan instrumen kawasan bernilai geologi.

Instrumen	Fokus Utama	Makna dalam GTL	Keluaran Operasional
Warisan Geologi	Nilai geologi penting.	Dasar pengenalan nilai ilmiah, edukatif, estetika, budaya, dan konservasi.	Inventarisasi, penilaian nilai, rekomendasi perlindungan.
KCAG	Perlindungan kawasan geologi.	Instrumen ruang untuk menjaga nilai utama geologi.	Batas kawasan, pengaturan kegiatan, syarat pemanfaatan.
KBAK	Perlindungan bentang alam karst.	Pengendalian ruang pada karst yang memiliki fungsi geologi dan hidrogeologi.	Arahan perlindungan fungsi, pengendalian kegiatan, pemantauan.
Geopark	Pengelolaan terpadu kawasan bernilai geologi.	Model konservasi, edukasi, dan pembangunan lokal berbasis nilai geologi.	Rencana pengelolaan, interpretasi, geowisata, pemberdayaan masyarakat.

8.4 Kawasan Cagar Alam Geologi sebagai Instrumen Perlindungan Ruang

Kawasan Cagar Alam Geologi atau KCAG merupakan instrumen perlindungan ruang bagi kawasan yang memiliki nilai geologi penting. Dalam kerangka GTL, KCAG berperan sebagai perangkat untuk memastikan bahwa nilai geologi utama tidak hilang akibat perubahan penggunaan lahan atau pembangunan yang tidak sesuai. KCAG menghubungkan penilaian Warisan Geologi dengan kebutuhan pengaturan ruang.

Penetapan KCAG membutuhkan dasar ilmiah dan teknis. Data yang diperlukan dapat mencakup batas objek bernilai geologi, konteks geologi regional, proses pembentukan, kondisi keutuhan, tingkat ancaman, akses, pemanfaatan saat ini, dan kebutuhan perlindungan. Karena berhubungan dengan ruang, penetapan KCAG juga perlu memperhatikan batas administrasi, penggunaan lahan, rencana tata ruang, dan kepentingan masyarakat.

Dalam pengendalian pemanfaatan ruang, KCAG dapat diterjemahkan menjadi zona perlindungan, zona pemanfaatan terbatas, dan zona pendukung. Zona perlindungan diarahkan untuk menjaga nilai utama. Zona pemanfaatan terbatas dapat digunakan untuk edukasi, penelitian, dan kunjungan terkendali. Zona pendukung dapat menampung fasilitas pelayanan tanpa mengganggu nilai geologi utama.

KGL dan Kajian GTL dapat membantu menentukan tingkat kesesuaian kegiatan di dalam dan sekitar KCAG. Kegiatan yang mengubah bentuk utama, mengganggu kestabilan, menurunkan nilai edukasi, atau meningkatkan risiko keselamatan perlu dibatasi. Sebaliknya, kegiatan interpretasi, penelitian, pendidikan, dan geowisata terkendali dapat diarahkan sebagai bentuk pemanfaatan yang sejalan dengan perlindungan.

8.5 KBAK dan Fungsi Strategis Bentang Alam Karst

Kawasan Bentang Alam Karst atau KBAK memiliki posisi khusus dalam GTL karena karst bukan hanya bentang alam yang bernilai estetika, tetapi juga sistem geologi dan hidrogeologi yang memiliki fungsi lingkungan penting. Karst dapat menyimpan informasi geologi, menjadi tempat berkembangnya ekosistem khas, berperan dalam tata air, serta memiliki nilai ilmiah, budaya, dan pariwisata.

Dalam penataan ruang, KBAK tidak boleh diperlakukan sebagai lahan biasa. Sifat karst yang memiliki aliran bawah permukaan, kerentanan terhadap perubahan fisik, serta hubungan erat antara permukaan dan sistem hidrogeologi membuat kawasan ini memerlukan kehati-hatian. Perubahan pada satu bagian dapat memengaruhi fungsi tata air dan nilai bentang alam secara lebih luas.

KGL untuk KBAK perlu memperhatikan satuan geomorfologi karst, sistem aliran air, mata air, kualitas air, kawasan bernilai geologi, nilai hayati dan budaya yang terkait, penggunaan lahan, serta potensi tekanan kegiatan. Kajian tidak cukup hanya memetakan bentuk permukaan, tetapi harus membaca hubungan antara bentuk, proses, air, dan pemanfaatan ruang.

Dalam kerangka GTL, KBAK dapat menjadi bagian dari kawasan lindung geologi, kawasan resapan penting, kawasan bernilai geologi, dan kawasan pengembangan geowisata terbatas. Karena fungsi tersebut saling berhubungan, pengaturan KBAK harus mengutamakan perlindungan fungsi utama, mengendalikan kegiatan berisiko tinggi, dan memastikan pemanfaatan yang dilakukan tidak menurunkan nilai serta fungsi lingkungan geologi.

8.6 Geopark sebagai Pengelolaan Terpadu Kawasan Bernilai Geologi

Geopark merupakan wilayah yang memiliki warisan geologi dan dikelola secara terpadu untuk konservasi, edukasi, dan pembangunan ekonomi masyarakat secara berkelanjutan. Peraturan Presiden Nomor 9 Tahun 2019 tentang Pengembangan Taman Bumi menempatkan Geopark sebagai instrumen pengembangan kawasan yang menghubungkan pelestarian, pendidikan, dan manfaat masyarakat. UNESCO juga menekankan bahwa geopark dikelola dengan konsep perlindungan, pendidikan, dan pembangunan berkelanjutan.

Dalam GTL, Geopark perlu dilihat sebagai ruang pengelolaan, bukan sekadar label promosi kawasan. Pengembangan Geopark membutuhkan inventarisasi geosite, penilaian

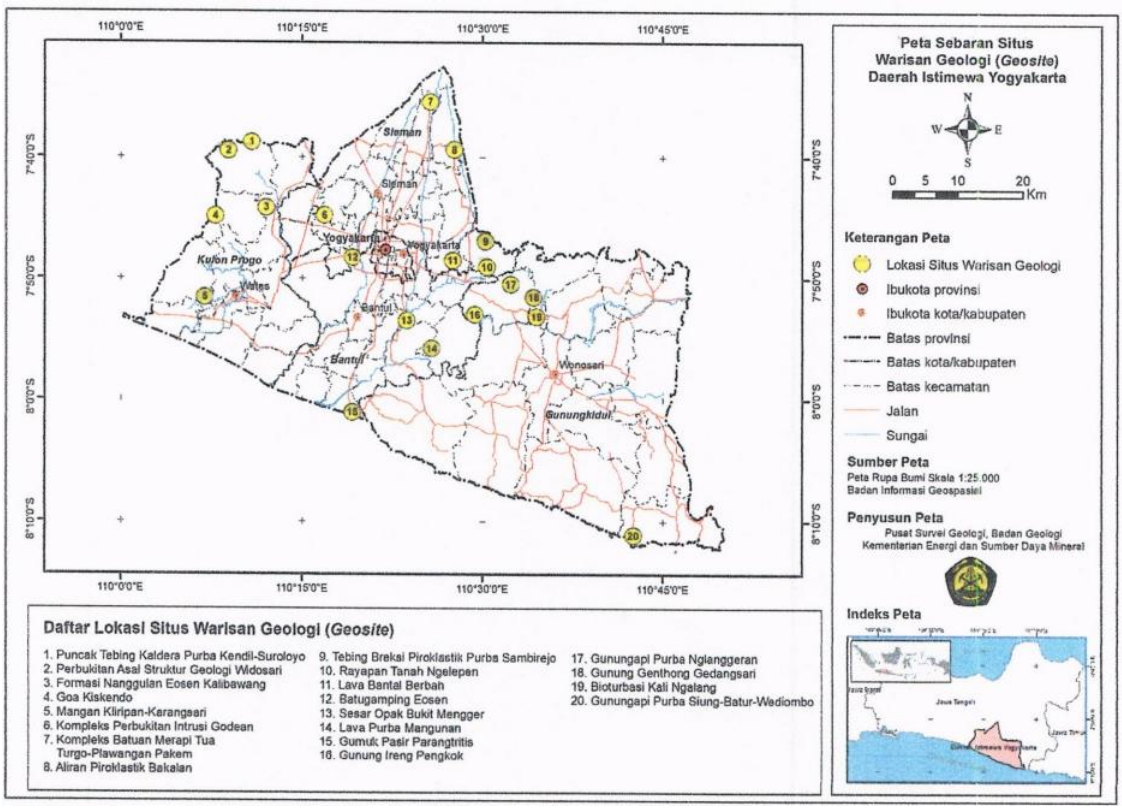
nilai geologi, rencana konservasi, interpretasi, pendidikan publik, pengaturan akses, keselamatan pengunjung, serta keterlibatan masyarakat. Semua unsur tersebut perlu dikaitkan dengan daya dukung dan daya tampung kawasan.

Geopark juga memerlukan hubungan yang jelas dengan tata ruang. Batas kawasan, lokasi geosite, jalur kunjungan, fasilitas pendukung, kawasan perlindungan, kawasan rawan bencana geologi, dan kegiatan masyarakat harus dibaca secara terpadu. Tanpa integrasi dengan tata ruang, Geopark berisiko berkembang sebagai kegiatan sektoral yang tidak cukup kuat mengendalikan tekanan pemanfaatan.

GTL dapat membantu Geopark melalui penyediaan informasi geologi, peta nilai, peta risiko, rekomendasi daya dukung, syarat pengembangan fasilitas, dan indikator pemantauan. Dengan demikian, Geopark menjadi ruang penerapan GTL yang sangat nyata karena menggabungkan konservasi geologi, edukasi, geowisata, tata ruang, dan pengembangan lokal.

8.7 Hubungan Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark

Pada kawasan bernilai geologi, peta sebaran situs dan batas kawasan berfungsi sebagai dasar identifikasi, registrasi, dan penetapan prioritas perlindungan. Penyajian spasial semacam ini penting karena menunjukkan hubungan antara titik geosite, jaringan akses, satuan wilayah administrasi, dan cakupan kawasan yang akan dikelola.



Gambar 8.1 Contoh peta sebaran situs warisan geologi sebagai dasar identifikasi dan penetapan kawasan bernilai geologi untuk kepentingan penetapan sebagai Geopark Nasional maupun UNESCO Global Geopark.

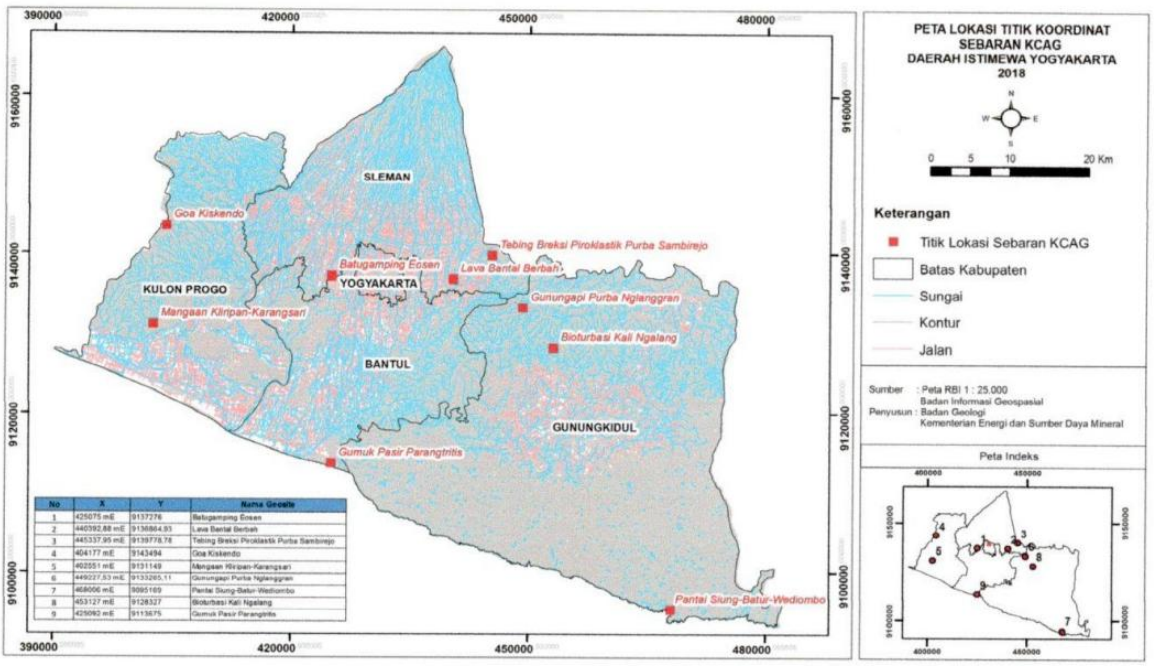
Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark memiliki hubungan berjenjang, tetapi tidak selalu membentuk urutan tunggal. Warisan Geologi berawal dari penilaian nilai objek atau lokasi geologi. KCAG memberi perlindungan ruang terhadap kawasan yang memiliki nilai geologi penting. KBAK melindungi bentang alam karst beserta fungsi geologi dan hidrogeologinya. Geopark mengelola wilayah bernilai geologi secara

terpadu untuk konservasi, edukasi, dan pembangunan berkelanjutan.

Suatu Warisan Geologi dapat menjadi dasar penetapan KCAG apabila nilai dan kebutuhan perlindungannya menuntut pengaturan ruang khusus. KBAK dapat memuat Warisan Geologi dan dapat pula menjadi bagian dari Geopark apabila memenuhi kriteria pengelolaan kawasan yang lebih luas. Geopark dapat mencakup berbagai geosite, kawasan lindung, kawasan budaya, kawasan edukasi, dan kawasan pemanfaatan masyarakat.

Perbedaan kedudukan ini penting agar kebijakan tidak mencampuradukkan fungsi masing-masing instrumen. Warisan Geologi berfokus pada nilai; KCAG dan KBAK berfokus pada perlindungan kawasan; Geopark berfokus pada pengelolaan terpadu. GTL berperan menghubungkan semuanya ke dalam tata ruang, perlindungan lingkungan, pengendalian pemanfaatan, dan rencana pengelolaan.

Dengan memahami hubungan ini, pemerintah daerah dan pengelola kawasan dapat menyusun strategi yang lebih tertib. Tidak semua Warisan Geologi harus langsung dikembangkan sebagai objek wisata. Tidak semua kawasan karst tepat diarahkan untuk kunjungan intensif. Tidak semua Geopark cukup hanya mengandalkan daya tarik visual. Semua harus dinilai berdasarkan nilai, fungsi, pembatas, risiko, dan kapasitas pengelolaan.

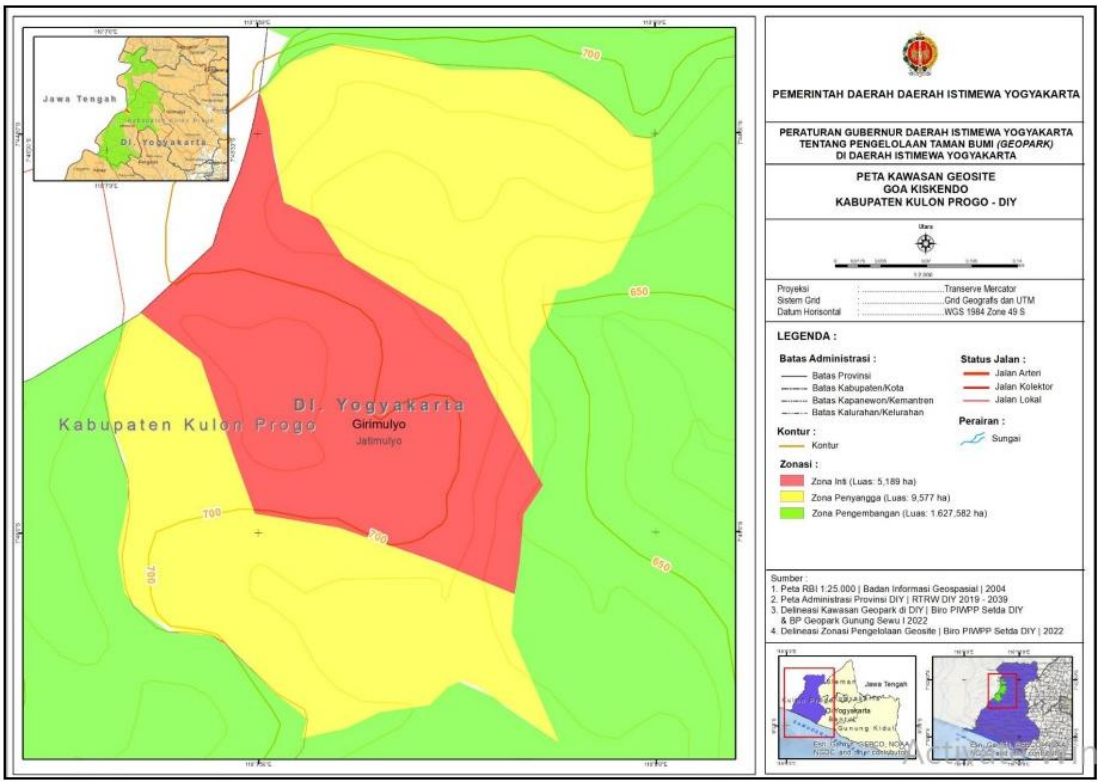


Gambar 8.2 Contoh peta sebaran situs warisan geologi di Provinsi DI. Yogyakarta yang ditetapkan sebagai Kawasan Cagar Alam Geologi sebagai manifestasi dari perlindungan situs geologi.

8.8 Pengaturan Ruang pada Kawasan Bernilai Geologi

Setelah suatu kawasan bernilai geologi ditetapkan, pekerjaan GTL tidak berhenti pada inventarisasi, tetapi harus dilanjutkan ke penyusunan zonasi pengelolaan ruang yang membedakan area inti, area penyangga, dan area pemanfaatan.

Gambar 8.3 di bawah ini memperlihatkan contoh zoning text geosite Goa Kiskendo yang membedakan zona inti, zona penyangga, dan zona pengembangan, disertai arahan pemanfaatan, ancaman terhadap kelestarian, serta kegiatan yang tidak diperbolehkan. Contoh ini penting karena menunjukkan hubungan langsung antara peta geologi bernilai penting dengan instrumen pengendalian ruang.



Gambar 8.3 Contoh zonasi pengelolaan geosite untuk mendukung perlindungan dan pemanfaatan ruang pada kawasan bernilai geologi. Contoh ZONING TEXT pada GEOSITE GOA KISKENDO Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, setidaknya berisikan narasi: 1) Arti Penting; 2) Hasil Pengkreterian; 3) Foto Obyek; 4) Lokasi; 5) Koordinat Simpul; 6) Komponen Geologi Unggulan; 7) Ancaman terhadap Kelestarian KCAG (Situs Warisan Geologi); 8) Arahan Perlindungan dan Pelestarian; 9) Arahan Pemanfaatan Ruang; 10) Kegiatan yang tidak diperbolehkan, dan lain sebagainya yang sekiranya penting ditampilkan.

Kawasan bernilai geologi memerlukan pengaturan ruang yang jelas. Pengaturan tersebut dapat berbentuk penetapan kawasan lindung, ketentuan khusus dalam RDTR, pengaturan kegiatan dan penggunaan lahan, ketentuan intensitas, pengendalian akses, persyaratan teknis, serta kewajiban pemantauan. Tujuannya adalah menjaga nilai geologi sekaligus memungkinkan pemanfaatan yang sesuai.

Dalam pengaturan ruang, prinsip pertama adalah perlindungan nilai utama. Kegiatan yang dapat mengubah, menurunkan, atau menghilangkan nilai utama harus dibatasi. Prinsip kedua adalah kesesuaian kegiatan. Kegiatan pendidikan, penelitian, konservasi, dan geowisata terkendali umumnya lebih sesuai dibandingkan kegiatan yang bersifat ekstraktif atau mengubah kondisi fisik secara besar. Prinsip ketiga adalah pengelolaan risiko, terutama pada kawasan yang memiliki bahaya geologi atau kerentanan lingkungan.

Pengaturan ruang juga perlu mengenali zona internal. Zona perlindungan inti diarahkan untuk menjaga nilai utama. Zona pemanfaatan terbatas diarahkan untuk edukasi dan kunjungan terkendali. Zona pendukung diarahkan untuk fasilitas pelayanan, informasi, dan aktivitas ekonomi masyarakat yang tidak mengganggu nilai utama. Pembagian ini membantu agar pemanfaatan tidak langsung menekan bagian paling penting dari kawasan.

Dalam GTL, pengaturan ruang harus didasarkan pada peta dan rekomendasi. Peta nilai geologi, peta kerentanan, peta bahaya, peta penggunaan lahan, dan peta akses dapat disintesis menjadi arahan pengendalian. Hasilnya dapat digunakan dalam RTRW, RDTR, rencana pengelolaan Geopark, KLHS, dan dokumen lingkungan.

Tabel 8.2. Contoh penerjemahan nilai geologi ke dalam arahan pengendalian ruang.

Kondisi Kawasan	Arahan Perlindungan	Arahan Pemanfaatan	Kebutuhan Pemantauan
Nilai geologi sangat tinggi dan rentan.	Perlindungan ketat pada nilai utama.	Penelitian dan edukasi sangat terbatas.	Kondisi fisik, akses, dan tekanan kegiatan.
Nilai geologi tinggi dengan akses memadai.	Perlindungan nilai utama dan pengaturan akses.	Edukasi, interpretasi, dan geowisata terkendali.	Kunjungan, keselamatan, dan kondisi geosite.
Karst dengan fungsi hidrogeologi penting.	Perlindungan fungsi tata air dan bentuk utama.	Pemanfaatan terbatas yang tidak menurunkan fungsi.	Mata air, kualitas air, penggunaan lahan, dan tekanan kegiatan.
Geopark dengan banyak geosite.	Perlindungan geosite prioritas.	Pengembangan jalur edukasi dan ekonomi lokal.	Kondisi geosite, manfaat masyarakat, dan efektivitas interpretasi.

8.9 Validasi, Kelembagaan, dan Pemantauan Kawasan

Perlindungan kawasan bernilai geologi membutuhkan validasi. Validasi memastikan bahwa nilai geologi yang dinyatakan penting benar-benar didukung oleh data, metode, dan kriteria yang jelas. Validasi juga diperlukan agar batas kawasan, rekomendasi perlindungan, dan arahan pemanfaatan dapat dipertanggungjawabkan dalam pengambilan keputusan publik.

Kelembagaan menjadi faktor penting karena kawasan bernilai geologi sering melibatkan banyak pihak. Pemerintah pusat, pemerintah daerah, pengelola Geopark, masyarakat lokal, akademisi, pelaku wisata, dan sektor lain memiliki peran yang berbeda. Tanpa pembagian peran yang jelas, perlindungan dapat melemah dan pemanfaatan dapat berjalan tanpa kendali yang memadai.

Pemantauan diperlukan karena kondisi kawasan dapat berubah. Perubahan dapat berasal dari pembangunan, peningkatan kunjungan, erosi, proses geomorfologi, bencana geologi, perubahan penggunaan lahan, atau kegiatan ekonomi. Pemantauan dapat mencakup kondisi geosite, kualitas lingkungan, stabilitas akses, keselamatan pengunjung, efektivitas interpretasi, dan perubahan tekanan pemanfaatan.

Dalam kerangka GTL, validasi, kelembagaan, dan pemantauan harus diperlakukan sebagai satu siklus. Data menghasilkan rekomendasi; rekomendasi digunakan dalam pengaturan; pengaturan dilaksanakan; pelaksanaan dipantau; hasil pemantauan digunakan untuk memperbarui informasi GTL. Dengan cara ini, perlindungan kawasan bernilai geologi tidak berhenti pada penetapan, tetapi terus hidup dalam tata kelola kawasan.

8.10 Kesimpulan Bab

Bab ini menegaskan bahwa kawasan lindung geologi, Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark merupakan bagian penting dari Geologi Tata Lingkungan. Kawasan tersebut menunjukkan bahwa geologi tidak hanya menjadi dasar teknis pembangunan, tetapi juga menyimpan nilai yang harus dilindungi dan dikelola.

Warisan Geologi menjadi dasar pengenalan nilai; KCAG dan KBAK menjadi instrumen perlindungan kawasan; Geopark menjadi model pengelolaan terpadu yang menghubungkan konservasi, edukasi, dan pembangunan berkelanjutan. GTL berfungsi menghubungkan seluruh instrumen tersebut dengan penataan ruang, pengendalian pemanfaatan, mitigasi risiko, dan pemantauan.

Perlindungan kawasan bernilai geologi tidak berarti menutup semua pemanfaatan. Yang diperlukan adalah pemanfaatan yang sesuai dengan nilai, fungsi, daya dukung, daya tampung, dan tingkat risiko kawasan. Karena itu, KGL dan Kajian GTL harus mampu menerjemahkan nilai geologi menjadi peta, kelas perlindungan, syarat pemanfaatan, dan rekomendasi operasional.

Geowisata sebagai Pemanfaatan Berkelanjutan Warisan Geologi

Melindungi makna geologi, merawat identitas kawasan, dan memanfaatkan bumi secara bijak

> Tidak semua nilai geologi harus diukur dari kemampuannya untuk dibangun atau dieksploitasi. Ada batuan, bentang alam, karst, fosil, struktur geologi, mata air, dan jejak proses bumi yang nilainya justru terletak pada keberadaannya sebagai warisan alam. Kawasan Lindung Geologi, Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark mengingatkan bahwa bumi juga menyimpan memori, pengetahuan, dan identitas wilayah. Melindungi nilai geologi bukan berarti menolak pemanfaatan, tetapi mengatur agar pemanfaatan tidak menghilangkan makna yang dilindungi. Dalam GTL, konservasi adalah cara menghormati sejarah panjang bumi.

1. WARISAN GEOLOGI

Batuan, fosil, bentang alam, karst, mata air, dan struktur geologi menyimpan rekaman sejarah bumi, nilai ilmiah, pendidikan, dan identitas kawasan.

2. KONSERVASI

Perlindungan dilakukan agar nilai geologi tetap lestari, tidak rusak oleh pemanfaatan yang melampaui daya dukung dan fungsi lindungnya.

3. GEOPARK

Geopark menghubungkan warisan geologi dengan edukasi, konservasi, budaya lokal, dan pembangunan berkelanjutan.

4. GEOWISATA

Geowisata memanfaatkan warisan geologi sebagai sarana belajar, pengalaman ruang, dan manfaat ekonomi tanpa menghilangkan martabat alaminya.

⚠ BILA DIABAIKAN

- **Hilangnya nilai ilmiah**
- **Rusaknya bentang alam**
- **Turunnya fungsi lindung**
- **Konflik pemanfaatan ruang**
- **Hilangnya identitas kawasan**

Konservasi bukan penghalang kemajuan, melainkan fondasi pemanfaatan yang bermakna. Geowisata yang baik menyeimbangkan perlindungan nilai geologi dengan manfaat sosial, budaya, dan ekonomi bagi masyarakat. Dengan kesadaran dan tata kelola yang bijak, warisan geologi akan tetap lestari dan memberi kebaikan bagi generasi kini dan mendatang.

Memahami bumi lebih dalam, menjaga warisan geologi, dan memanfaatkannya secara bermartabat.

BAB 9

Geowisata sebagai Pemanfaatan Berkelanjutan Warisan Geologi

9.1. Pengantar

Bab 9 membahas geowisata sebagai bentuk pemanfaatan berkelanjutan Warisan Geologi. Setelah Bab 8 menjelaskan perlindungan nilai geologi melalui Warisan Geologi, Kawasan Cagar Alam Geologi (KCAG), Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK), dan Geopark, bab ini menjelaskan bagaimana nilai geologi dapat dimanfaatkan untuk edukasi, pengalaman wisata, pemberdayaan masyarakat, dan penguatan identitas wilayah tanpa menurunkan nilai geologi yang dilindungi.

Geowisata tidak dapat dipahami sebagai wisata biasa yang kebetulan berlangsung pada objek geologi. Geowisata menempatkan geologi sebagai inti pengalaman, interpretasi, dan pembelajaran. Pengunjung tidak hanya melihat bentang alam, tetapi juga diajak memahami proses pembentukannya, nilai ilmiahnya, hubungan dengan kehidupan masyarakat, serta alasan mengapa kawasan tersebut perlu dilindungi.

Dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan (GTL), geowisata harus ditempatkan sebagai bentuk pemanfaatan yang tunduk pada daya dukung, daya tampung, keselamatan, dan perlindungan nilai geologi. Kawasan bernilai geologi tidak boleh dibebani kunjungan, fasilitas, promosi, dan kegiatan ekonomi yang melampaui kapasitas pengelolaan. Karena itu, pengembangan geowisata memerlukan perencanaan, zonasi internal, interpretasi, pengendalian akses, standar keselamatan, keterlibatan masyarakat, serta pemantauan berkala.

Bab ini membahas prinsip geowisata, hubungan geowisata dengan konservasi geologi, interpretasi geologi, keterlibatan masyarakat, pengendalian pemanfaatan, keselamatan, integrasi dengan tata ruang, model pengelolaan, serta indikator pemantauan. Dengan demikian, Bab 9 menutup Bagian III dengan penegasan bahwa pemanfaatan Warisan Geologi hanya dapat disebut berkelanjutan apabila perlindungan menjadi fondasinya.

9.2. Konsep Geowisata dalam Kerangka GTL

Geowisata adalah kegiatan wisata yang berfokus pada nilai geologi dan bentang alam, disertai interpretasi, edukasi, konservasi, dan pemanfaatan yang memberi manfaat bagi masyarakat lokal. Dalam literatur geotourism, geowisata dipahami sebagai bentuk wisata yang menjadikan geologi dan bentang alam sebagai dasar pengalaman, dengan tetap memperhatikan keberlanjutan lingkungan, konservasi nilai geologi, dan manfaat sosial-ekonomi bagi masyarakat.

Dalam kerangka GTL, geowisata tidak berdiri di luar tata ruang. Geowisata menggunakan ruang, memerlukan akses, fasilitas, jalur kunjungan, informasi, keselamatan, dan pengelolaan dampak. Karena itu, geowisata harus dikaitkan dengan kesesuaian ruang, kawasan lindung geologi, bahaya geologi, daya dukung kunjungan, daya tampung kawasan, dan pengaturan zonasi.

Geowisata juga berbeda dari promosi pariwisata umum. Fokus utamanya bukan hanya meningkatkan jumlah pengunjung, melainkan meningkatkan pemahaman terhadap nilai-nilai geologi, memperkuat konservasi, dan memberi manfaat ekonomi yang sejalan dengan perlindungan kawasan. Jika geowisata hanya mengejar jumlah kunjungan tanpa interpretasi dan pengendalian, maka kegiatan tersebut kehilangan sifat geowisatanya.

Dengan demikian, geowisata dalam buku ini dipahami sebagai kegiatan pemanfaatan berkelanjutan Warisan Geologi. Ia harus mempertemukan tiga tujuan utama, yaitu menjaga nilai geologi, memberi pengalaman dan pembelajaran kepada pengunjung, serta menghasilkan manfaat bagi masyarakat lokal melalui tata kelola yang bertanggung jawab.

Gambar 9.1 Model geowisata berbasis Warisan Geologi.

9.3. Warisan Geologi sebagai Dasar Narasi Geowisata

Geowisata memerlukan narasi geologi. Tanpa narasi, objek geologi hanya menjadi pemandangan. Narasi menjelaskan bagaimana suatu bentang alam terbentuk, proses apa yang bekerja, apa nilai ilmiahnya, bagaimana hubungannya dengan sejarah bumi, dan mengapa kawasan tersebut perlu dijaga. Narasi inilah yang membedakan geowisata dari wisata alam biasa.

Narasi geowisata harus benar secara ilmiah, tetapi disampaikan dengan cara yang mudah dipahami. Pengunjung umum tidak selalu membutuhkan istilah teknis yang panjang. Mereka membutuhkan cerita kebumian yang akurat, menarik, dan terhubung dengan pengalaman ruang. Oleh karena itu, ahli geologi, pengelola kawasan, pemandu, pendidik, pelaku wisata, dan masyarakat lokal perlu bekerja sama dalam membangun interpretasi.

Warisan Geologi menyediakan bahan dasar narasi. Nilai ilmiah dapat diterjemahkan menjadi cerita mengenai proses pembentukan, umur geologi, perubahan lingkungan, hubungan batuan dengan bentang alam, dan peran geologi dalam kehidupan masyarakat. Nilai edukatif dapat diterjemahkan menjadi jalur belajar, papan interpretasi, materi digital, kegiatan sekolah lapangan, dan panduan kunjungan.

Dalam GTL, narasi geowisata juga harus memuat pesan perlindungan. Pengunjung perlu memahami bukan hanya apa yang menarik, tetapi juga apa yang tidak boleh dilakukan, mengapa akses tertentu dibatasi, mengapa kawasan perlu dirawat, dan mengapa nilai geologi tidak boleh dirusak. Dengan demikian, interpretasi menjadi bagian dari pengendalian pemanfaatan ruang.

9.4. Prinsip Konservasi dalam Geowisata

Prinsip pertama geowisata adalah konservasi. Pemanfaatan hanya dapat disebut berkelanjutan apabila nilai geologi yang menjadi dasar pemanfaatan tetap terlindungi. Karena itu, geowisata harus dimulai dari identifikasi nilai utama, penilaian kerentanan, dan penentuan batas pemanfaatan.

Konservasi dalam geowisata tidak selalu berarti menutup kawasan dari pengunjung. Konservasi berarti mengatur agar kunjungan, fasilitas, dan kegiatan ekonomi tidak merusak nilai utama. Pada beberapa lokasi, pengunjung dapat diarahkan ke titik pandang atau jalur tertentu. Pada lokasi lain, akses dapat dibatasi, sementara interpretasi dilakukan melalui media visual, pusat informasi, pemanduan, atau jalur alternatif yang lebih aman.

Geowisata juga memerlukan pengaturan fasilitas. Fasilitas yang terlalu dekat dengan objek bernilai geologi dapat menurunkan kualitas visual, mengganggu proses alam, meningkatkan tekanan terhadap kawasan, atau menambah risiko keselamatan. Fasilitas sebaiknya ditempatkan pada area pendukung yang lebih sesuai, dengan desain yang tidak mendominasi kawasan dan tidak mengubah nilai utama.

Dengan prinsip konservasi, keberhasilan geowisata tidak diukur semata-mata dari jumlah kunjungan. Keberhasilan diukur dari terjaganya nilai geologi, meningkatnya pemahaman pengunjung, bertambahnya dukungan masyarakat terhadap perlindungan, dan terkendalinya dampak pemanfaatan.

9.5. Daya Dukung dan Daya Tampung Kunjungan

Daya dukung dan daya tampung kunjungan merupakan unsur penting dalam geowisata. Daya dukung menunjukkan kemampuan kawasan menerima kegiatan wisata tanpa mengurangi keselamatan, kenyamanan, dan fungsi kawasan. Daya tampung menunjukkan batas tekanan kunjungan, fasilitas, dan aktivitas ekonomi yang masih dapat diterima tanpa menurunkan nilai geologi dan kualitas lingkungan.

Dalam kawasan bernilai geologi, daya dukung kunjungan dipengaruhi oleh kondisi akses, kestabilan lereng, potensi bahaya geologi, luas area aman, kapasitas pengelola, ketersediaan informasi, dan kemampuan pengawasan. Daya tampung dipengaruhi oleh kerentanan geosite, sensitivitas lingkungan, potensi gangguan terhadap nilai utama, kemampuan kawasan menerima limbah, serta perubahan fisik akibat kegiatan wisata.

Penilaian daya dukung geowisata tidak cukup dilakukan dengan menghitung kapasitas fisik ruang. Kajian harus memperhatikan karakter nilai geologi, risiko, pola kunjungan, perilaku pengunjung, kapasitas pengelola, dan kesiapan masyarakat. Kawasan yang secara fisik luas belum tentu dapat menerima kunjungan intensif apabila nilai utamanya rentan atau risiko keselamatannya tinggi.

Dalam GTL, daya dukung dan daya tampung kunjungan perlu diterjemahkan menjadi syarat operasional: jumlah kunjungan harian, jalur yang dapat digunakan, titik berhenti, lokasi fasilitas, kebutuhan pemandu, standar keselamatan, serta sistem pemantauan. Dengan demikian, konsep daya dukung menjadi alat pengelolaan, bukan sekadar istilah umum.

Tabel 9.1. Komponen daya dukung dan daya elola geowisata.

Komponen	Pertanyaan Pengelolaan	Contoh Indikator	Arahan Operasional
Nilai geologi	Nilai apa yang harus dijaga?	Nilai ilmiah, edukasi, estetika, keutuhan.	Tentukan zona perlindungan dan batas kunjungan.
Keselamatan	Risiko apa yang harus dikendalikan?	Bahaya geologi, kondisi akses, kapasitas evakuasi.	SOP keselamatan, rambu, pemandu, penutupan sementara.
Kapasitas fisik	Berapa kunjungan yang dapat diterima?	Luas area aman, jalur, fasilitas, waktu kunjungan.	Batas kunjungan, sistem reservasi, jalur terkendali.

Komponen	Pertanyaan Pengelolaan	Contoh Indikator	Arahan Operasional
Kapasitas sosial	Apakah masyarakat siap dan memperoleh manfaat?	Peran masyarakat, penerimaan lokal, usaha lokal.	Kemitraan, pelatihan, pembagian peran.
Kapasitas pengelola	Apakah pengelola mampu mengawasi?	Jumlah pemandu, sistem informasi, pemantauan.	Penguatan kelembagaan dan evaluasi berkala.

9.6. Interpretasi Geologi dan Pendidikan Publik

Interpretasi geologi adalah proses menerjemahkan informasi geologi menjadi pesan yang dapat dipahami oleh pengunjung. Interpretasi yang baik membuat pengunjung memahami bahwa bentang alam bukan sekadar pemandangan, melainkan hasil proses kebumian yang berlangsung dalam waktu panjang. Interpretasi juga membantu pengunjung memahami hubungan antara geologi, air, tanah, bahaya, budaya, dan kehidupan masyarakat.

Media interpretasi dapat berupa papan informasi, peta jalur, buku panduan, pusat informasi, aplikasi digital, audio visual, pemanduan langsung, kegiatan sekolah lapangan, dan materi edukasi. Pilihan media harus disesuaikan dengan karakter pengunjung, kondisi lokasi, aksesibilitas, bahasa, dan kapasitas pengelola.

Gambar 9.2 Ilustrasi kegiatan geowisata berbasis interpretasi Warisan Geologi. Seorang pemandu geowisata menjelaskan fenomena geologi berupa perlapisan batuan, litologi, dan struktur lipatan kepada peserta kunjungan lapangan.

Ilustrasi ini menunjukkan bahwa geowisata bukan sekadar kegiatan menikmati bentang alam, tetapi juga proses edukasi kebumian yang menghubungkan objek

geologi dengan narasi ilmiah, keselamatan pengunjung, konservasi nilai geologi, dan peningkatan kesadaran publik. Papan interpretasi, jalur kunjungan, serta peran pemandu menjadi unsur penting dalam menerjemahkan informasi geologi agar mudah dipahami oleh masyarakat tanpa mengurangi nilai geologi yang dilindungi.

Bahasa interpretasi perlu sederhana tetapi tidak menyesatkan. Istilah teknis dapat digunakan apabila dijelaskan dengan contoh yang mudah dipahami. Narasi sebaiknya tidak hanya menjelaskan nama batuan atau umur geologi, tetapi juga menjawab pertanyaan yang dekat dengan pengunjung: mengapa bentuk ini terbentuk, apa hubungannya dengan air dan kehidupan, risiko apa yang perlu diwaspadai, dan mengapa kawasan harus dilindungi.

Dalam Geopark, interpretasi memiliki peran strategis karena menghubungkan konservasi, edukasi, dan ekonomi lokal. Produk lokal, cerita masyarakat, sejarah budaya, dan aktivitas masyarakat dapat dikaitkan dengan narasi geologi. Dengan demikian, geowisata menjadi sarana penyebaran pengetahuan kebumian kepada publik.

9.7. Keterlibatan Masyarakat dan Manfaat Lokal

Geowisata berkelanjutan memerlukan keterlibatan masyarakat. Masyarakat lokal tidak boleh hanya menjadi penonton dari pengembangan kawasan. Mereka perlu menjadi bagian dari pengelolaan, pemanduan, penyediaan jasa, produksi lokal, pengawasan, dan penyampaian narasi kawasan. Keterlibatan ini membuat geowisata lebih kuat secara sosial dan kelembagaan.

Manfaat lokal dapat berbentuk pendapatan dari jasa pemanduan, homestay, kuliner, kerajinan, transportasi lokal, kegiatan edukasi, dan aktivitas budaya. Namun, manfaat ekonomi harus disusun agar tidak menekan nilai geologi. Kegiatan ekonomi yang berkembang di sekitar geosite harus mengikuti aturan ruang, kebersihan, keselamatan, dan perlindungan nilai utama.

Keterlibatan masyarakat juga penting untuk konservasi. Masyarakat yang memahami nilai geologi cenderung lebih mendukung perlindungan. Sebaliknya, apabila masyarakat tidak memperoleh manfaat atau tidak memahami alasan perlindungan, pengelolaan kawasan dapat menghadapi resistensi. Karena itu, edukasi masyarakat lokal menjadi bagian dari strategi geowisata.

Dalam GTL, pemberdayaan masyarakat perlu ditempatkan dalam rencana pengelolaan kawasan. Peran masyarakat, hak dan kewajiban, mekanisme manfaat, standar pelayanan, serta sistem pemantauan perlu dirumuskan secara jelas. Dengan demikian, geowisata tidak hanya mengembangkan destinasi, tetapi juga memperkuat tata kelola lokal.

9.8. Keselamatan Pengunjung dan Risiko Geologi

Kawasan geowisata sering berada pada lingkungan geologi yang dinamis. Tebing, lereng, gunung api, kawasan karst, sungai, air terjun, pantai, dan kawasan rawan bencana geologi memerlukan perhatian keselamatan. Karena itu, geowisata tidak boleh hanya mengandalkan keindahan atau keunikan objek, tetapi harus disertai penilaian risiko.

Penilaian keselamatan mencakup bahaya geologi, kondisi akses, kestabilan jalur, potensi banjir cepat, abrasi, gerakan tanah, aktivitas gunung api, gempa bumi, tsunami, kualitas prasarana, serta kesiapan pengelola menghadapi keadaan darurat. Informasi bahaya perlu diterjemahkan ke dalam arahan kunjungan yang jelas dan mudah dipahami.

Pengelolaan keselamatan dapat mencakup pembatasan akses pada kondisi tertentu, penutupan sementara saat cuaca ekstrem atau peringatan bahaya, penempatan rambu, penyediaan jalur aman, pelatihan pemandu, prosedur evakuasi, dan koordinasi dengan lembaga kebencanaan. Keselamatan harus menjadi bagian dari perencanaan, bukan respons setelah terjadi kejadian.

Dalam kerangka GTL, keselamatan pengunjung merupakan bagian dari daya dukung geowisata. Kawasan yang memiliki nilai tinggi tetapi berisiko tinggi tetap dapat ditafsirkan melalui media alternatif atau titik pandang aman. Dengan demikian, perlindungan nilai dan keselamatan manusia dapat berjalan seimbang.

9.9. Integrasi Geowisata dalam Tata Ruang dan Dokumen Pengelolaan

Geowisata perlu diintegrasikan ke dalam tata ruang dan dokumen pengelolaan kawasan. Tanpa integrasi tersebut, pengembangan fasilitas, akses, parkir, pusat informasi, usaha lokal, dan kegiatan wisata dapat tumbuh tidak terkendali. Integrasi tata ruang membantu memastikan bahwa pemanfaatan berada pada lokasi yang sesuai dan tidak menekan nilai utama.

Dalam RTRW, geowisata dapat diperhatikan sebagai bagian dari pengembangan kawasan berbasis potensi geologi dan konservasi. Dalam RDTR, geowisata perlu diterjemahkan lebih rinci ke dalam ketentuan zonasi, ketentuan kegiatan, intensitas pemanfaatan, prasarana, dan ketentuan khusus. Dalam rencana pengelolaan Geopark, geowisata perlu dikaitkan dengan geosite, jalur interpretasi, masyarakat lokal, fasilitas, keselamatan, dan pemantauan.

Dokumen lingkungan dan KLHS juga dapat menggunakan informasi GTL untuk menilai dampak pengembangan geowisata. Pembangunan fasilitas wisata dapat mengubah drainase, meningkatkan sampah, menekan kawasan bernilai geologi, dan menambah risiko keselamatan apabila tidak dirancang dengan baik. Karena itu, geowisata tetap memerlukan penilaian lingkungan sesuai skala dan jenis kegiatannya.

Integrasi ini menunjukkan bahwa geowisata bukan urusan pariwisata semata. Geowisata berada pada pertemuan antara geologi, tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, masyarakat, ekonomi lokal, dan kebudayaan. GTL membantu memastikan bahwa pertemuan tersebut dikelola secara tertib dan berbasis data.

9.10. Model Pengelolaan Geowisata Berkelanjutan

Model pengelolaan geowisata berkelanjutan dapat dibangun melalui lima komponen utama: perlindungan nilai geologi, interpretasi, pengaturan kunjungan, manfaat lokal, dan pemantauan. Kelima komponen tersebut tidak berdiri sendiri. Perlindungan memberi batas; interpretasi memberi makna; pengaturan kunjungan memberi kendali; manfaat lokal memberi dukungan sosial; pemantauan memberi umpan balik untuk perbaikan.

Perlindungan nilai geologi dimulai dari identifikasi nilai utama dan kerentanannya. Interpretasi mengubah nilai tersebut menjadi pesan edukatif. Pengaturan kunjungan menentukan bagaimana pengunjung masuk, bergerak, berhenti, belajar, dan keluar dari kawasan. Manfaat lokal memastikan bahwa masyarakat memperoleh peran yang adil. Pemantauan memastikan bahwa seluruh sistem dapat diperbaiki apabila terjadi tekanan atau perubahan kondisi.

Model ini dapat diterapkan pada skala kecil maupun luas. Pada satu geosite, model tersebut dapat berbentuk jalur interpretasi dan pengawasan kunjungan. Pada skala Geopark, model tersebut dapat menjadi sistem pengelolaan banyak geosite, pusat informasi, produk lokal, sekolah lapangan, dan kemitraan masyarakat. Perbedaannya terletak pada kompleksitas kelembagaan dan kebutuhan data.

Dalam GTL, model pengelolaan geowisata harus didukung oleh peta dan rekomendasi. Peta nilai, peta akses, peta risiko, peta fasilitas, dan peta zona pengelolaan perlu disusun agar pengelola memiliki dasar yang jelas. Dengan demikian, geowisata dapat berkembang tanpa kehilangan dasar konservasinya.

Tabel 9.2. Model operasional geowisata berkelanjutan.

Tahap	Fokus	Produk yang Dihasilkan	Kaitan dengan GTL
Identifikasi nilai	Menentukan nilai geologi utama.	Daftar geosite, narasi geologi, peta nilai.	Dasar penilaian dan perlindungan.
Penilaian kapasitas	Menguji daya dukung, daya tampung, dan risiko.	Kelas pengelolaan, batas kunjungan, syarat keselamatan.	Dasar pengendalian pemanfaatan.
Interpretasi	Menerjemahkan nilai menjadi pesan edikatif.	Papan informasi, panduan, media digital, materi edukasi.	Penguatan edukasi dan kesadaran konservasi.

Tahap	Fokus	Produk yang Dihasilkan	Kaitan dengan GTL
Pengelolaan kunjungan	Mengatur akses, fasilitas, dan perilaku pengunjung.	Jalur, SOP, zonasi internal, sistem pemanduan.	Penerapan syarat teknis di lapangan.
Pemantauan	Mengevaluasi kondisi dan dampak.	Laporan berkala, data kunjungan, evaluasi geosite.	Pemutakhiran informasi GTL.

9.11. Contoh Penerapan: Peta Potensi Geowisata dan Zonasi Geosite Dieng

Subbab ini menyajikan contoh penerapan zonasi geosite pada satu objek, yaitu Telaga Menjer, Dieng. Contoh ini dipilih karena Telaga Menjer memperlihatkan hubungan yang jelas antara nilai warisan geologi, fungsi hidrologi, pemanfaatan geowisata, pengendalian ruang, dan keselamatan pengunjung. Dengan memilih satu geosite, pembahasan menjadi lebih fokus dan dapat menunjukkan bagaimana peta potensi geowisata pada skala kawasan diturunkan menjadi zonasi pengelolaan yang lebih operasional pada skala objek.

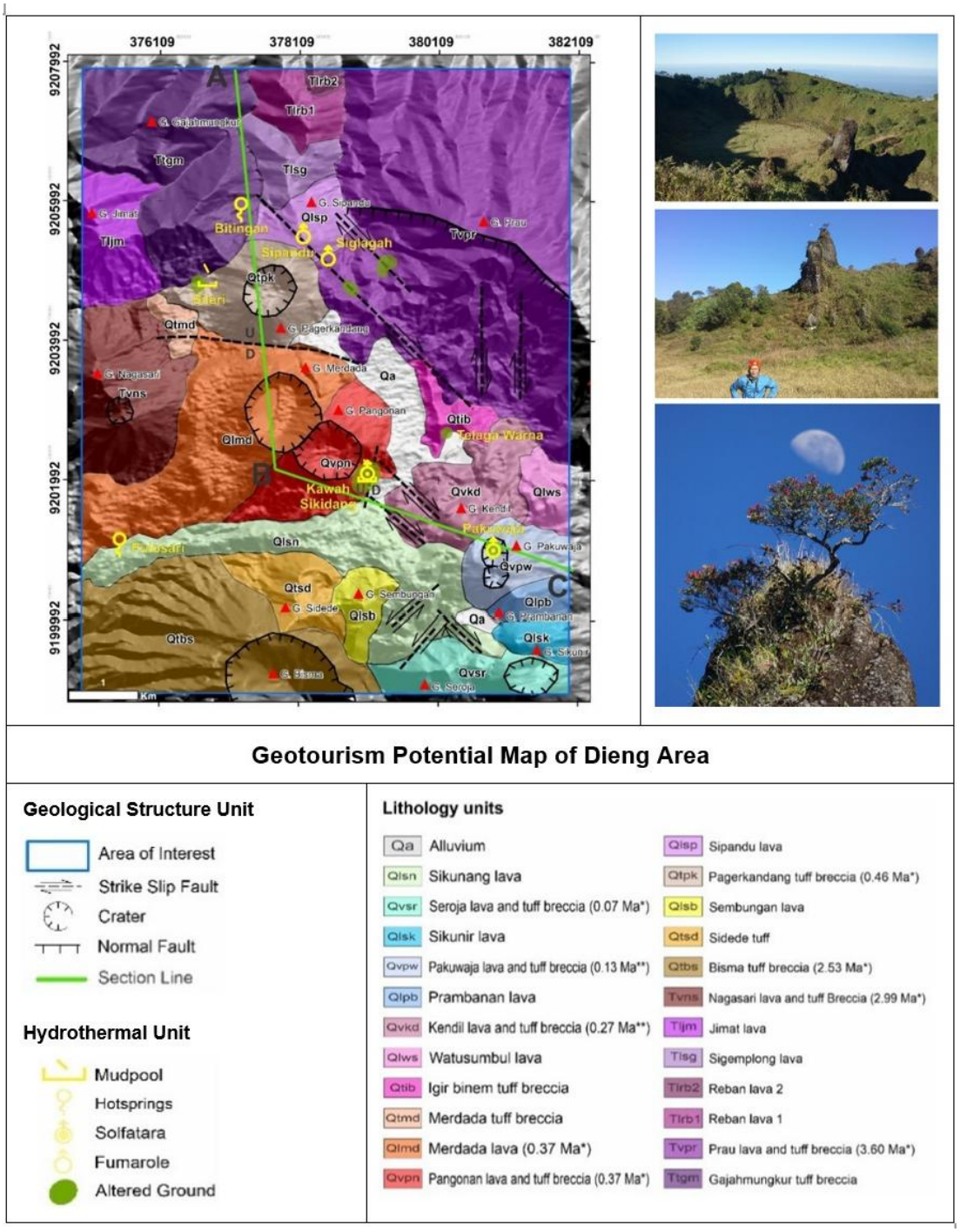
Pemilihan Telaga Menjer sebagai contoh tidak dapat dilepaskan dari keunikan geologi Dataran Tinggi Dieng secara keseluruhan. Dieng merupakan kompleks vulkanik dataran tinggi yang terbentuk oleh interaksi antara vulkanisme Kuarter, struktur geologi, proses hidrotermal, dan dinamika geomorfologi. Kawasan ini memiliki keragaman bentuk lahan yang sangat kaya, antara lain kawah aktif, telaga vulkanik, kerucut gunung api tua, aliran lava, mata air, manifestasi panas bumi, zona alterasi, serta bentang alam yang dikontrol oleh sesar. Keunikan tersebut menjadikan Dieng bukan hanya kawasan wisata alam, tetapi juga laboratorium geologi terbuka yang merekam hubungan antara proses pembentukan bumi, sumber daya air, energi panas bumi, bahaya geologi, dan kehidupan masyarakat dataran tinggi.

Telaga Menjer dipilih karena objek ini mewakili salah satu tipe geosite yang paling mudah dipahami oleh pembaca lintas disiplin. Telaga ini memperlihatkan transformasi proses geologi menjadi manfaat ruang hidup: dari bentukan vulkanik menjadi badan air, dari badan air menjadi sumber hidrologi, dari sumber hidrologi menjadi penunjang energi dan kegiatan ekonomi, serta dari bentang alam menjadi objek geowisata. Pada saat yang sama, Telaga Menjer juga menunjukkan bahwa pemanfaatan geowisata memerlukan batas pengendalian karena keberlanjutan telaga dipengaruhi oleh kualitas air, stabilitas tebing, pengelolaan sempadan, tekanan kunjungan, dan keselamatan aktivitas wisata air.

Dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan, peta potensi geowisata berfungsi sebagai pintu masuk untuk mengenali sebaran nilai geologi pada skala kawasan. Akan tetapi, keputusan pengelolaan tidak cukup hanya bertumpu pada peta potensi. Pada tingkat geosite, nilai tersebut harus diterjemahkan menjadi batas pengendalian, arahan pemanfaatan, ketentuan keselamatan, dan kebutuhan pemantauan. Oleh karena itu, contoh Telaga Menjer digunakan untuk memperlihatkan alur kerja yang lebih lengkap, yaitu inventarisasi nilai geologi, interpretasi geowisata, zonasi geosite, penyusunan matriks ITBX, pengelolaan kunjungan, dan pemantauan berkala.

Dalam konteks geowisata, Dieng mempunyai nilai penting karena objek-objek geologinya dapat dibaca sebagai satu sistem. Kawah dan manifestasi panas bumi menunjukkan dinamika magmatis dan hidrotermal yang masih berlangsung. Telaga-telaga vulkanik menunjukkan bagaimana proses letusan dan perubahan morfologi dapat berkembang menjadi sistem tampungan air alami. Kerucut dan dinding gunung api tua memperlihatkan rekaman evolusi vulkanisme masa lalu. Sementara itu, struktur geologi berperan mengontrol kemunculan mata air, jalur fluida panas bumi, kestabilan lereng, serta

pembentukan sebagian bentang alam. Dengan karakter seperti ini, Dieng memberikan contoh yang kuat bahwa geowisata harus dibangun di atas dasar pemahaman geologi, bukan sekadar keindahan visual.



Gambar 9.3 Contoh peta potensi objek geowisata Kawasan Panas Bumi Dieng. Peta ini menunjukkan bahwa pengembangan geowisata perlu bertumpu pada hubungan antara satuan batuan, struktur geologi, manifestasi hidrotermal, dan objek geologi. Sumber cuplikan: Buku KCAG Dieng, Gambar 2.11; peta bersumber dari Shalihin dkk. (2020).

Dengan demikian, Telaga Menjer tidak hanya digunakan sebagai contoh objek geowisata, tetapi juga sebagai contoh metodologis. Melalui geosite ini, dapat ditunjukkan bahwa zonasi bukan sekadar membagi ruang, melainkan cara untuk menjaga nilai geologi, mengatur pemanfaatan, mengurangi risiko, dan memastikan agar manfaat ekonomi lokal tetap berada dalam batas daya dukung dan daya tampung lingkungan. Prinsip ini penting untuk diterapkan pada geosite lain di Dieng maupun pada kawasan warisan geologi di daerah lain.

Dari Peta Potensi Geowisata ke Zonasi Geosite

Peta potensi objek geowisata Dieng memperlihatkan bahwa geowisata tidak dapat dibangun hanya dari daftar objek wisata. Geowisata memerlukan dasar geologi yang menjelaskan jenis batuan, struktur geologi, proses pembentukan, manifestasi panas bumi, bentuk lahan, air, potensi bahaya, akses, dan hubungan antarobjek. Dengan peta tersebut, suatu geosite tidak lagi dipahami sebagai titik kunjungan yang berdiri sendiri, tetapi sebagai bagian dari sistem geologi yang memiliki nilai ilmiah, nilai edukasi, fungsi lingkungan, dan batas keselamatan.

Telaga Menjer dipilih sebagai contoh karena memiliki karakter yang lengkap. Telaga ini merupakan badan air alami pada lingkungan vulkanik Dieng, memiliki dinding morfologi yang kuat, menjadi bagian dari sistem hidrologi setempat, dimanfaatkan untuk wisata air, memiliki keterkaitan dengan sumber daya energi melalui PLTA Garung, serta memerlukan pengendalian sempadan, kualitas air, stabilitas lereng, dan keselamatan pengunjung. Dengan demikian, Telaga Menjer dapat digunakan untuk menunjukkan bahwa zonasi geosite bukan sekadar pembagian ruang, melainkan instrumen konservasi, pelayanan geowisata, dan manajemen risiko.

Karakter Geologi Lingkungan Telaga Menjer

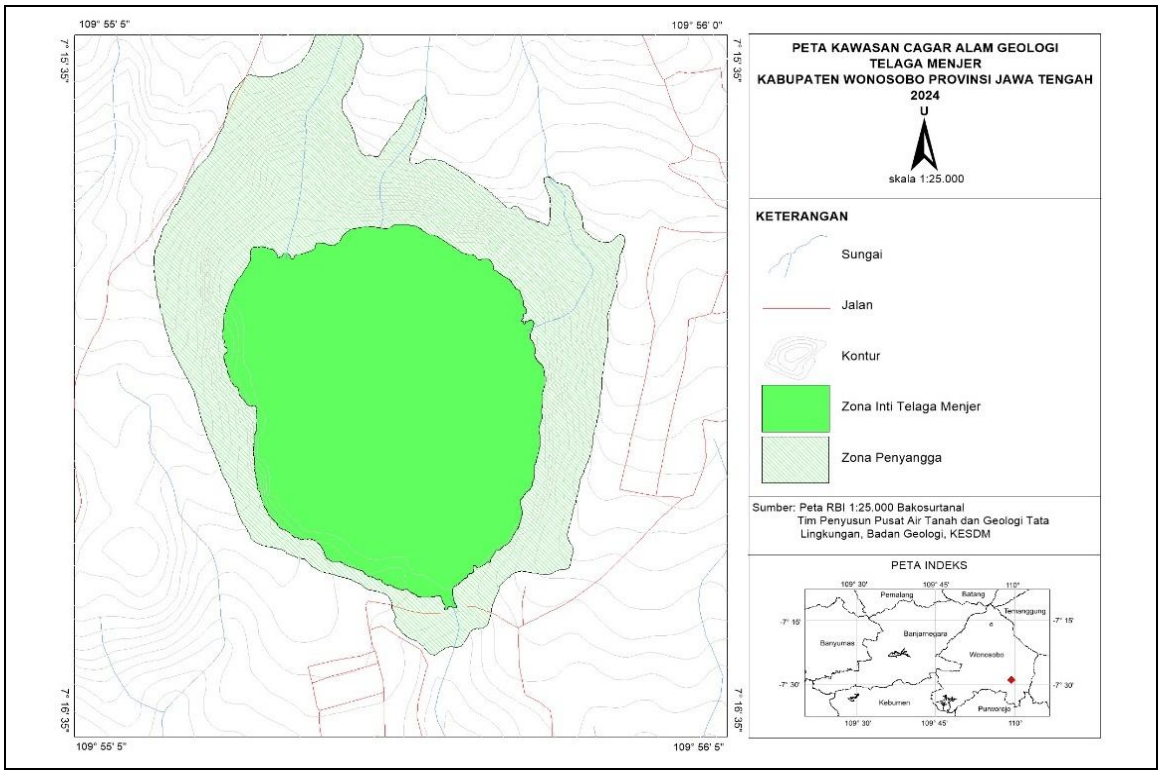
Telaga Menjer dapat dipahami sebagai telaga vulkanik yang berkembang pada cekungan kawah di lingkungan Kompleks Vulkanik Dieng. Bentuk telaga yang dikelilingi lereng curam menunjukkan kuatnya kontrol proses vulkanik dan struktur geologi dalam pembentukan bentang alamnya. Badan air yang terbentuk kemudian berfungsi sebagai penampung air permukaan dan bagian dari sistem hidrologi kawasan. Dalam konteks geowisata, karakter tersebut memberikan narasi yang kuat: proses geologi masa lampau membentuk ruang air yang kini menjadi sumber kehidupan, energi, dan pengalaman wisata.

Nilai utama Telaga Menjer tidak hanya terletak pada keindahan visualnya, tetapi juga pada kemampuannya memperlihatkan hubungan antara geologi, air, ekosistem, energi, dan masyarakat. Dinding telaga, lereng penyangga, badan air, sempadan, area wisata, dan fasilitas pendukung harus dibaca sebagai satu sistem. Kerusakan pada satu unsur dapat memengaruhi kualitas air, stabilitas lereng, kenyamanan wisata, keselamatan pengunjung, dan keberlanjutan fungsi telaga.

Prinsip Zonasi Geosite Telaga Menjer

Zonasi Telaga Menjer disusun untuk membedakan ruang yang harus dilindungi, ruang yang berfungsi sebagai pelindung, dan ruang yang dapat dimanfaatkan secara terbatas. Zona inti diarahkan pada badan telaga dan unsur bentang alam utama yang membentuk identitas geosite. Tujuan utamanya adalah mempertahankan bentuk alami, kualitas air, dan nilai ilmiah telaga sebagai rekaman proses geologi.

Zona penyangga diarahkan pada sempadan telaga dan lereng sekitarnya. Zona ini berfungsi melindungi zona inti dari tekanan pemanfaatan, menahan erosi, menjaga vegetasi pelindung, mengendalikan limpasan, dan mencegah masuknya pencemar ke badan air. Pada Telaga Menjer, zona penyangga juga penting untuk mengatur penempatan jalur kunjungan, area pandang, fasilitas wisata, dan kegiatan ekonomi masyarakat agar tidak menekan fungsi utama telaga.



Gambar 9.4 Contoh peta zonasi geosite Telaga Menjer. Zona inti diarahkan untuk mempertahankan badan air dan bentuk bentang alam utama, sedangkan zona penyangga diarahkan untuk melindungi sempadan, kualitas air, stabilitas lereng, serta fungsi ekosistem telaga. Sumber cuplikan: Buku KCAG Dieng, Gambar 6.5.

Zona pemanfaatan terbatas dapat ditetapkan sesuai kebutuhan pengembangan geowisata dan rencana tata ruang yang lebih rinci. Zona ini dapat mencakup dermaga, titik informasi, jalur interpretasi, area pelayanan, dan fasilitas pendukung non-permanen. Prinsipnya, fasilitas geowisata harus ditempatkan pada lokasi yang relatif aman, tidak mengganggu sempadan, memiliki sistem pengelolaan limbah, dan tidak mengubah karakter geologi utama Telaga Menjer.

Matriks Arahan Pengendalian Pemanfaatan Ruang

Agar peta zonasi tidak berhenti sebagai gambar, setiap zona perlu diterjemahkan ke dalam matriks kegiatan. Matriks ITBX membantu menjelaskan kegiatan yang diizinkan, kegiatan yang terbatas, kegiatan yang bersyarat, dan kegiatan yang dilarang. Dengan matriks ini, pengelola, pemerintah daerah, pelaku wisata, masyarakat lokal, dan pengunjung memiliki rujukan yang sama mengenai cara memanfaatkan geosite secara terkendali.

Tabel 9.3 Contoh matriks ITBX zonasi geosite Telaga Menjer.

Ketentuan	Zona Inti (Badan Telaga dan Bentang Alam Utama)	Zona Penyangga (Sempadan, Lereng, dan Ruang Pelindung)	Zona Pemanfaatan Terbatas (Pelayanan Geowisata)
I Diizinkan	Pemantauan hidrologi, penelitian geologi-hidrogeologi, inventarisasi ekosistem perairan, dan kegiatan konservasi yang tidak mengubah bentuk alami telaga.	Rehabilitasi vegetasi pelindung, pemeliharaan drainase alami, patroli kawasan, dan pemasangan papan informasi konservasi.	Pusat informasi kecil, papan interpretasi, pengelolaan tiket, pemanduan, dan fasilitas pelayanan ringan yang tidak permanen.

Ketentuan	Zona Inti (Badan Telaga dan Bentang Alam Utama)	Zona Penyangga (Sempadan, Lereng, dan Ruang Pelindung)	Zona Pemanfaatan Terbatas (Pelayanan Geowisata)
T Terbatas	Kegiatan wisata perahu pada jalur yang ditentukan, pengamatan geologi dari area aman, serta kegiatan edukasi dengan pengawasan pengelola.	Jalur pejalan kaki, area pandang, kegiatan fotografi, dan aktivitas ekonomi lokal skala kecil yang tidak mengganggu sempadan dan vegetasi.	Kios, ruang tunggu, area parkir terbatas, dan fasilitas penunjang dengan pengendalian jumlah, waktu operasi, dan standar kebersihan.
B Bersyarat	Pemanfaatan air dan aktivitas operasional PLTA dengan syarat tidak menurunkan keselamatan pengunjung, kualitas air, dan kestabilan fungsi telaga.	Pembangunan fasilitas pendukung hanya dapat dilakukan dengan syarat kajian teknis, pengelolaan limbah, pengendalian limpasan, dan tidak menambah beban pada lereng rawan.	Kegiatan wisata berbayar, event edukasi, atau paket geowisata harus memenuhi SOP keselamatan, kuota kunjungan, pengelolaan sampah, dan keterlibatan pemandu.
X Dilarang	Berenang di area berbahaya, membuang sampah atau limbah ke badan air, mendekati area intake PLTA tanpa izin, dan kegiatan yang mengganggu kualitas air.	Pendirian bangunan permanen berat pada lereng curam, penebangan vegetasi pelindung, pembuangan limbah, pembukaan lahan baru yang meningkatkan erosi, dan kegiatan yang merusak sempadan.	Fasilitas tanpa pengolahan limbah, kegiatan yang melampaui daya dukung, promosi kunjungan massal tanpa pengendalian, serta kegiatan yang menutup akses keselamatan dan evakuasi.

Narasi Interpretasi Geowisata Telaga Menjer

Narasi interpretasi Telaga Menjer dapat dimulai dari pengenalan bentuk telaga sebagai hasil proses geologi pada lingkungan vulkanik Dieng. Pengunjung perlu diajak memahami bahwa permukaan air yang tenang menyimpan cerita tentang aktivitas gunung api, pembentukan cekungan kawah, pengisian air, dan perubahan fungsi ruang dari bentang alam geologi menjadi sumber air, energi, dan geowisata. Dengan cara ini, wisata air tidak hanya menjadi kegiatan rekreasi, tetapi juga menjadi pintu masuk untuk memahami proses kebumian.

Alur interpretasi dapat disusun melalui beberapa titik pengalaman. Di area dermaga, pengunjung dikenalkan pada asal-usul telaga dan fungsi sempadan. Dari tengah telaga, pemandu dapat menjelaskan morfologi dinding telaga dan hubungan antara air, lereng, vegetasi, serta kualitas lingkungan. Pada area yang mengarah ke fasilitas energi, interpretasi dapat menjelaskan bagaimana air telaga dimanfaatkan secara teknis tanpa melepaskan kewajiban konservasi. Pada area pandang, pengunjung dapat diajak membaca keseluruhan lanskap sebagai hasil interaksi geologi, hidrologi, dan kehidupan masyarakat.

Interpretasi tersebut harus selalu disertai pesan keselamatan. Telaga Menjer memiliki kedalaman, perubahan elevasi air, potensi arus karena pemanfaatan untuk PLTA, lereng curam, dan risiko cuaca pegunungan. Oleh karena itu, penggunaan pelampung, pengaturan jalur perahu, pembatasan area berbahaya, rambu informasi, pemandu terlatih, dan kesiapan evakuasi harus menjadi bagian dari pengalaman geowisata. Geowisata yang baik bukan hanya membuat pengunjung kagum, tetapi juga membuat pengunjung memahami batas aman dan alasan konservasi.

Arahan Pemantauan dan Tindak Lanjut

Pemantauan Telaga Menjer perlu mencakup kondisi badan air, kualitas air, perubahan sempadan, stabilitas lereng, kondisi vegetasi pelindung, jumlah kunjungan, kepatuhan jalur wisata, kejadian keselamatan, serta pengelolaan limbah. Data tersebut perlu dicatat secara berkala dan digunakan untuk memperbarui batas kunjungan, memperbaiki fasilitas, menata ulang jalur, memperkuat rambu, atau membatasi kegiatan pada periode tertentu.

Contoh Telaga Menjer menunjukkan bahwa peta zonasi geosite merupakan perangkat penting dalam GTL. Peta tersebut menjawab pertanyaan tentang ruang mana yang harus dijaga, ruang mana yang menjadi pelindung, dan ruang mana yang dapat

digunakan secara terbatas. Jika peta zonasi dipadukan dengan matriks ITBX, narasi interpretasi, SOP keselamatan, dan pemantauan berkala, maka geowisata dapat berkembang tanpa menurunkan nilai Warisan Geologi yang menjadi dasar daya tariknya.

Contoh dari Kawasan Dieng memperlihatkan bahwa geowisata yang baik tidak dapat dibangun hanya dari daftar objek wisata. Geowisata memerlukan peta yang memperlihatkan dasar geologinya: satuan batuan, struktur geologi, manifestasi hidrotermal, bentuk lahan, bahaya geologi, akses, dan keterkaitan antar geosite. Dengan peta tersebut, objek geologi tidak lagi dipahami sebagai titik kunjungan yang berdiri sendiri, tetapi sebagai bagian dari sistem geologi yang memiliki proses pembentukan, nilai ilmiah, fungsi lingkungan, serta batas keselamatan.

Peta potensi objek geowisata Dieng dapat digunakan sebagai contoh bagaimana informasi geologi dikemas menjadi dasar pengembangan rute geowisata. Peta semacam ini membantu membedakan kawasan yang memiliki tema vulkanisme, hidrotermal, telaga vulkanik, struktur geologi, sumber air, dan bentang alam bernilai estetika. Bagi pemandu geowisata, peta tersebut menjadi dasar penyusunan alur cerita. Bagi pengelola kawasan, peta tersebut menjadi dasar penentuan prioritas pengembangan, pengaturan akses, dan pengendalian tekanan kunjungan.

Namun, peta potensi belum cukup untuk menjamin keberlanjutan. Pada tingkat geosite, peta potensi harus diturunkan menjadi peta zonasi. Zonasi diperlukan untuk membedakan ruang yang harus dilindungi secara ketat, ruang yang berfungsi sebagai pelindung dan pengaman, serta ruang yang dapat dimanfaatkan secara terbatas untuk pelayanan kunjungan. Dalam konteks KCAG, pembagian tersebut dapat diterjemahkan menjadi zona inti, zona penyangga, dan zona pemanfaatan terbatas sesuai karakter objek geologi dan tingkat risiko setempat.

Dieng memberi contoh penting karena geosite di dalamnya tidak hanya indah, tetapi juga dinamis. Kawah, telaga, manifestasi panas bumi, lembah vulkanik, struktur sesar, dan kawasan dengan potensi gas berbahaya memerlukan pendekatan geowisata yang berbeda. Geosite dengan nilai edukasi tinggi tetapi memiliki risiko keselamatan harus dikelola melalui pembatasan akses, jalur kunjungan terkendali, rambu bahaya, pemandu terlatih, serta sistem pemantauan. Sebaliknya, geosite yang relatif aman dapat dikembangkan untuk edukasi publik yang lebih luas sepanjang daya dukung dan kualitas lingkungannya tetap dijaga.

9.12. Pemantauan dan Indikator Keberlanjutan Geowisata

Pemantauan menjadi syarat penting dalam geowisata berkelanjutan. Tanpa pemantauan, pengelola tidak dapat mengetahui apakah kunjungan mulai menekan kawasan, apakah fasilitas berada pada lokasi yang tepat, apakah interpretasi efektif, atau apakah masyarakat memperoleh manfaat yang seimbang. Pemantauan juga membantu memperbarui informasi GTL.

Indikator pemantauan dapat mencakup kondisi geosite, perubahan penggunaan lahan, keselamatan pengunjung, jumlah kunjungan, kepatuhan terhadap jalur, kualitas kebersihan, kondisi fasilitas, pendapatan masyarakat, kualitas interpretasi, dan persepsi pengunjung. Pada kawasan yang memiliki risiko geologi, indikator pemantauan juga perlu mencakup kondisi lereng, cuaca ekstrem, informasi peringatan, dan kejadian yang memengaruhi keselamatan.

Pemantauan tidak harus selalu rumit. Untuk pengelola lokal, pemantauan dapat dimulai dari pencatatan kunjungan, laporan kondisi lapangan, dokumentasi foto berkala, catatan kejadian keselamatan, dan evaluasi pemandu. Untuk kawasan yang lebih kompleks, pemantauan dapat dilengkapi sistem informasi geografis, basis data geosite, dan evaluasi berkala lintas pemangku kepentingan.

Yang terpenting adalah hasil pemantauan digunakan. Apabila data menunjukkan tekanan meningkat, pengelola harus dapat menyesuaikan jalur, membatasi kunjungan, memperbaiki interpretasi, memindahkan fasilitas, atau memperkuat pengawasan. Dengan demikian, geowisata menjadi sistem adaptif, bukan rencana sekali jadi.

Tabel 9.4. Contoh indikator pemantauan geowisata berbasis Warisan Geologi.

Aspek	Indikator	Sumber Data	Tindak Lanjut
Kondisi geosite	Perubahan fisik, kebersihan, gangguan pada nilai utama.	Observasi berkala, foto pembanding, laporan pemandu.	Perbaikan pengelolaan, pembatasan akses, restorasi terbatas.
Kunjungan	Jumlah, pola waktu, kepatuhan jalur.	Tiket, reservasi, catatan pemandu.	Pengaturan kuota, jadwal, dan jalur.
Keselamatan	Kejadian, titik rawan, kesiapan tanggap darurat.	Laporan kejadian, inspeksi lapangan.	Pembaruan SOP, rambu, dan pelatihan.
Manfaat lokal	Pelibatan masyarakat dan pendapatan usaha lokal.	Survei, catatan usaha, forum pengelola.	Perbaikan kemitraan dan pelatihan.
Interpretasi	Pemahaman pengunjung dan kualitas media.	Survei pengunjung, evaluasi pemandu.	Perbaikan narasi, media, dan metode edukasi.

9.13. Kesalahan Umum dalam Pengembangan Geowisata

Terdapat beberapa kesalahan umum dalam pengembangan geowisata. Pertama, menganggap geowisata sama dengan wisata alam biasa. Kesalahan ini membuat nilai geologi tidak dijelaskan, interpretasi lemah, dan konservasi tidak menjadi dasar pengelolaan. Kedua, terlalu menekankan promosi tanpa menghitung kapasitas kawasan dan kesiapan pengelola.

Ketiga, menempatkan fasilitas terlalu dekat dengan nilai geologi utama. Fasilitas yang tidak tepat dapat menurunkan kualitas kawasan dan mengganggu pengalaman edukatif. Keempat, mengabaikan risiko geologi dan keselamatan pengunjung. Kawasan yang menarik secara visual dapat tetap memiliki bahaya yang perlu dikelola secara serius.

Kelima, tidak melibatkan masyarakat secara bermakna. Geowisata yang tidak memberi ruang bagi masyarakat lokal berisiko kurang mendapat dukungan sosial. Keenam, tidak memiliki sistem pemantauan. Tanpa pemantauan, dampak pengembangan baru disadari setelah kerusakan atau konflik terjadi.

Dalam GTL, kesalahan-kesalahan tersebut dapat dicegah dengan pendekatan berbasis data. Pengembangan geowisata harus dimulai dari penilaian nilai, daya dukung, daya tampung, risiko, dan kapasitas pengelolaan. Baru setelah itu promosi dan pengembangan fasilitas dilakukan.

9.14. Kesimpulan Bab

Bab ini menegaskan bahwa geowisata merupakan bentuk pemanfaatan berkelanjutan Warisan Geologi apabila dibangun di atas prinsip konservasi, interpretasi, keselamatan, keterlibatan masyarakat, dan pemantauan. Geowisata bukan hanya kegiatan wisata pada kawasan geologi, melainkan cara mengubah nilai geologi menjadi pengetahuan publik dan manfaat lokal tanpa melemahkan nilai yang dilindungi.

Warisan Geologi menjadi dasar narasi geowisata. Nilai ilmiah, edukatif, estetika, dan budaya perlu diterjemahkan ke dalam interpretasi yang mudah dipahami. Interpretasi membuat pengunjung memahami proses kebumian, alasan perlindungan, dan hubungan geologi dengan kehidupan masyarakat.

Geowisata harus dikendalikan melalui daya dukung dan daya tampung kunjungan. Pengaturan akses, fasilitas, jalur, standar keselamatan, dan pemantauan menjadi bagian penting dari pengelolaan. Kawasan yang bernilai tinggi tetapi rentan perlu dikelola dengan lebih hati-hati, bahkan dapat menggunakan interpretasi tidak langsung apabila akses fisik terlalu berisiko.

Dengan demikian, Bagian III menutup pembahasan mengenai kawasan bernilai geologi dengan pesan utama: dalam kerangka GTL, perlindungan dan pemanfaatan bukan dua tujuan yang berlawanan, tetapi dua sisi dari tata kelola kawasan yang bertanggung jawab.

BAGIAN IV

Regulasi, Kelembagaan, dan Instrumen Operasional Geologi Tata Lingkungan

Pengantar Bagian IV

Bagian IV merupakan tempat narasi utama buku bertemu dengan perangkat pelaksanaan. Bab 10 memberi kedudukan regulatif, Bab 11 memberi kerangka penerapan KGL untuk keputusan ruang, dan Bab 12 memberi mekanisme kelembagaan, validasi, pertimbangan teknis, serta sistem informasi; seluruhnya diperkuat oleh Lampiran Teknis 1 sampai 17, termasuk Lampiran 16 tentang sistem hulu-tengah-hilir dan Lampiran 17 tentang penerapan KGL terpadu skala rinci pada kawasan pengembangan kota baru.

Bagian IV menempatkan Geologi Tata Lingkungan dalam ranah regulasi, kelembagaan, dan instrumen operasional. Setelah buku ini menjelaskan konsep, metode, air tanah, bahaya geologi, kawasan lindung geologi, dan geowisata, bagian ini menjawab bagaimana seluruh gagasan tersebut bekerja dalam sistem keputusan publik.

Bagian ini terdiri atas tiga bab yang saling berhubungan. Bab 10 menjelaskan kedudukan GTL dalam sistem peraturan perundang-undangan Indonesia. Bab 11 menjelaskan penerapan KGL untuk peruntukan lahan, kawasan, tapak, dan prasarana. Bab 12 membahas kelembagaan, validasi, pertimbangan teknis, dan Sistem Informasi GTL.

Alur Bagian IV bergerak dari norma dan mandat regulatif menuju analisis teknis, kemudian menuju validasi, pertimbangan teknis, dan pengelolaan informasi. Dengan susunan ini, GTL dipahami bukan sebagai laporan teknis yang berdiri sendiri, tetapi sebagai sistem kerja yang harus dapat masuk ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, perizinan, pengendalian, dan pembinaan.

Bagian IV juga menekankan akuntabilitas. Setiap hasil KGL dan Kajian GTL perlu memiliki dasar data, metode, skala, validasi, dan rekomendasi yang dapat ditelusuri. Tanpa kelembagaan dan sistem informasi, hasil kajian berisiko berhenti sebagai dokumen, tidak menjadi dasar pengambilan keputusan yang berkelanjutan.

Tabel IV.1 Peta jalan Bagian IV: dari regulasi menuju instrumen operasional GTL.

Bab	Fokus utama	Pertanyaan kunci	Keluaran yang diharapkan
Bab 10	Kedudukan GTL dalam sistem peraturan perundang-undangan Indonesia.	Bagaimana GTL ditempatkan dalam kerangka penataan ruang, lingkungan hidup, air tanah, kebencanaan, konservasi geologi, Geopark, dan perizinan?	Peta posisi regulatif GTL, arsitektur pengaturan, dan arah penguatan norma, standar, prosedur, dan kriteria.
Bab 11	Penerapan KGL untuk peruntukan lahan, kawasan, tapak, dan prasarana.	Bagaimana KGL digunakan untuk menilai objek keputusan yang berbeda skala, risiko, dan kebutuhan datanya?	Arahan metode KGL, parameter, kelas kesesuaian, rekomendasi teknis, dan hubungan dengan RTRW, RDTR, KLHS, serta dokumen lingkungan.
Bab 12	Kelembagaan, validasi, pertimbangan teknis, dan Sistem Informasi GTL.	Bagaimana hasil KGL dan Kajian GTL dijamin mutunya, digunakan dalam keputusan, disimpan, dan diperbarui?	Kerangka kelembagaan, mekanisme validasi, struktur Pertimbangan Teknis GTL, metadata, dan Sistem Informasi GTL.

Gambar IV.1 Alur pengantar Bagian IV: regulasi, analisis teknis, kelembagaan, dan keluaran operasional GTL. Bagan alir inimenunjukkan bahwa Bagian IV bergerak dari kedudukan regulatif menuju penerapan teknis, lalu berakhir pada kelembagaan dan sistem informasi. Alurnya menegaskan bahwa GTL hanya akan efektif apabila regulasi, metode KGL, validasi, pertimbangan teknis, dan pengelolaan data ditempatkan dalam satu sistem kerja yang saling menguatkan.

Dengan pengantar ini, pembaca dapat mengikuti tiga bab berikut secara runtut. Bab 10 menjelaskan dasar regulatif, Bab 11 menunjukkan cara kerja KGL pada objek keputusan, dan Bab 12 menutup Bagian IV dengan pembahasan kelembagaan serta instrumen operasional yang diperlukan agar GTL dapat berjalan dalam tata kelola pemerintahan dan praktik pembangunan.

> *Ilmu yang baik perlu jalan untuk bekerja di dalam kebijakan. Geologi Tata Lingkungan tidak cukup hidup di laporan dan peta, tetapi harus hadir dalam regulasi, tata ruang, pertimbangan teknis, validasi, dan sistem informasi. Di sinilah pengetahuan kebumian bertemu dengan tanggung jawab kelembagaan. Ketika data geologi masuk ke dalam keputusan publik, pembangunan tidak lagi hanya bertanya "di mana bisa dibangun", tetapi juga "apakah ruang ini aman, layak, terkendali, dan adil bagi masa depan".*

BAB 10

Geologi Tata Lingkungan dalam Sistem Peraturan Perundang-undangan Indonesia

10.1 Pengantar

Bab-bab sebelumnya telah menunjukkan bahwa GTL memiliki dasar ilmiah dan kebutuhan operasional yang kuat. Bab 1 menjelaskan urgensi GTL, Bab 2 menempatkan GTL sebagai jembatan antara Geologi Lingkungan, KGL, Kajian GTL, dan Pertimbangan Teknis GTL, Bab 3 menjelaskan lingkungan geologi sebagai fondasi ruang hidup, sedangkan Bab 4 sampai Bab 7 memperlihatkan bagaimana daya dukung, daya tampung, pemetaan, zona resapan, dan bahaya geologi diterjemahkan menjadi arahan pemanfaatan ruang. Bagian III kemudian memperluas pembahasan ke kawasan lindung geologi, warisan geologi, Geopark, dan geowisata berkelanjutan.

Bab 10 menjawab pertanyaan berikutnya: bagaimana seluruh konsep dan metode tersebut ditempatkan dalam sistem peraturan perundang-undangan Indonesia? Pertanyaan ini penting karena GTL tidak cukup hanya menjadi pengetahuan teknis. Agar berpengaruh terhadap keputusan publik, GTL perlu memiliki jalur pemanfaatan yang jelas dalam regulasi, kelembagaan, prosedur, dan produk administrasi pemerintahan.

Dalam konteks Indonesia, sistem hukum telah memuat sejumlah instrumen yang berkaitan dengan ruang, lingkungan hidup, air, bencana, kawasan lindung, dan pengembangan kawasan. Namun, unsur geologi lingkungan belum selalu ditempatkan secara eksplisit sebagai dasar sintesis lintas instrumen. Data geologi sering hadir dalam bentuk peta sektoral, rekomendasi teknis, atau kajian khusus, tetapi belum selalu terintegrasi kuat dalam norma, standar, prosedur, dan kriteria penataan ruang serta pengelolaan lingkungan.

Karena itu, Bab 10 menempatkan GTL sebagai instrumen penghubung. GTL tidak menggantikan peraturan penataan ruang, peraturan lingkungan hidup, peraturan sumber daya air, peraturan kebencanaan, atau peraturan konservasi geologi. GTL memperkuat seluruh rezim tersebut dengan menyediakan dasar teknis geologi lingkungan yang dapat digunakan untuk menyusun rencana, mengevaluasi kebijakan, mengendalikan pemanfaatan ruang, melindungi fungsi lingkungan geologi, dan mengurangi risiko.

10.2 Prinsip Dasar Sistem Peraturan Perundang-undangan

Setiap gagasan regulatif mengenai GTL perlu ditempatkan dalam tata urutan dan asas pembentukan peraturan perundang-undangan. Dalam sistem hukum Indonesia, pembentukan peraturan tidak hanya menyangkut substansi yang dianggap penting, tetapi juga menyangkut jenis peraturan, kewenangan pembentuk, materi muatan, prosedur penyusunan, partisipasi, harmonisasi, pengundangan, dan keterlaksanaan. Oleh karena itu, gagasan GTL

harus disusun dengan memperhatikan kedudukan norma dalam sistem hukum nasional.

Undang-Undang Nomor 12 Tahun 2011 tentang Pembentukan Peraturan Perundang-undangan, sebagaimana telah diubah antara lain dengan Undang-Undang Nomor 15 Tahun 2019 dan Undang-Undang Nomor 13 Tahun 2022, menjadi rujukan utama dalam memahami bagaimana suatu norma dibentuk dan ditempatkan. Dalam konteks GTL, rujukan ini penting untuk membedakan mana materi yang layak ditempatkan pada tingkat peraturan presiden, peraturan menteri, pedoman teknis, atau dokumen standar operasional.

Peraturan yang terlalu umum tidak akan cukup membantu pelaksanaan teknis. Sebaliknya, peraturan yang terlalu rinci pada tingkat yang tidak tepat dapat menjadi kaku dan sulit menyesuaikan perkembangan ilmu, teknologi, data, dan metode KGL. Karena itu, arsitektur regulasi GTL perlu berjenjang: norma umum dan koordinatif ditempatkan pada tingkat yang lebih tinggi, sedangkan metode teknis, standar data, format peta, skoring, pembobotan, validasi, dan format pertimbangan teknis ditempatkan dalam pedoman operasional yang lebih mudah diperbarui.

Prinsip penting lainnya adalah keterpaduan. GTL berurusan dengan berbagai sektor, sehingga pengaturannya tidak boleh menghasilkan konflik kewenangan. Regulasi GTL sebaiknya dirancang untuk memperkuat kewenangan yang sudah ada melalui penyediaan dasar teknis, bukan mengambil alih kewenangan sektor. Dengan demikian, GTL dapat diterima sebagai instrumen integrasi, bukan sebagai tambahan beban administratif yang berdiri sendiri.

10.3 Kedudukan GTL sebagai Instrumen Teknis-Regulatif

GTL dapat dipahami sebagai instrumen teknis-regulatif. Istilah teknis menunjukkan bahwa GTL bertumpu pada data, metode, peta, analisis, validasi, dan rekomendasi. Istilah regulatif menunjukkan bahwa hasil teknis tersebut diarahkan untuk mendukung keputusan yang memiliki konsekuensi hukum atau administrasi, seperti penyusunan rencana tata ruang, penerbitan persetujuan lingkungan, penetapan kawasan lindung geologi, pengendalian pemanfaatan ruang, atau pemberian pertimbangan teknis terhadap kegiatan tertentu.

Sebagai instrumen teknis, GTL membutuhkan standar keilmuan. Data harus dapat ditelusuri, peta harus memiliki skala dan ketelitian yang jelas, metode harus dapat dijelaskan, parameter harus relevan dengan tujuan kajian, serta rekomendasi harus dapat dihubungkan kembali dengan hasil analisis. Hal ini telah dibahas pada Bab 5 mengenai pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial.

Sebagai instrumen regulatif, GTL membutuhkan jalur pemanfaatan. Informasi GTL harus diketahui kapan digunakan, oleh siapa, dalam dokumen apa, dan untuk keputusan apa. Kajian GTL harus memiliki posisi dalam penyusunan RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, kebijakan kawasan strategis, kegiatan berisiko tinggi, kawasan resapan, kawasan rawan bencana geologi, serta kawasan bernilai geologi. Pertimbangan Teknis GTL harus memiliki format dan mekanisme yang cukup jelas agar dapat digunakan oleh pejabat berwenang.

Dengan kedudukan seperti ini, GTL tidak sama dengan laporan ilmiah biasa. GTL adalah proses pengolahan data geologi lingkungan menjadi informasi keputusan. Oleh karena itu, setiap regulasi GTL perlu memastikan bahwa ada hubungan yang tegas antara data, analisis, peta, rekomendasi, validasi, dan tindak lanjut administratif.

Tabel 10.1 Kedudukan GTL sebagai instrumen teknis-regulatif.

Dimensi	Makna dalam GTL	Contoh bentuk operasional	Implikasi regulatif
Teknis	Berbasis data, peta, metode, analisis, dan validasi.	Peta tematik, peta sintesis, skoring, pembobotan, survei lapangan, analisis spasial.	Memerlukan standar data, skala, parameter, metode, dan keterlacakan rekomendasi.
Regulatif	Digunakan untuk mendukung keputusan yang memiliki konsekuensi hukum atau administrasi.	RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengendalian pemanfaatan ruang, pertimbangan teknis.	Memerlukan kedudukan, prosedur, dan hubungan yang jelas dengan instrumen hukum.
Koordinatif	Menghubungkan beberapa sektor yang menggunakan ruang dan lingkungan geologi.	Koordinasi Badan Geologi, kementerian/lembaga, pemerintah daerah, pemrakarsa, dan pengelola kawasan.	Memerlukan pembagian peran yang jelas agar tidak terjadi tumpang tindih kewenangan.
Akuntabel	Dapat diperiksa, ditelusuri, dan dipertanggungjawabkan.	Metadata, catatan metode, batas penggunaan, validasi, dan pemantauan.	Memerlukan mekanisme penjaminan mutu dan pemutakhiran data.

10.4 Relasi GTL dengan Penataan Ruang

Penataan ruang merupakan salah satu ruang utama bagi penerapan GTL. Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang, sebagaimana telah diubah melalui rezim Cipta Kerja yang kini ditetapkan dalam Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023, memberikan kerangka hukum bagi perencanaan tata ruang, pemanfaatan ruang, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Dalam kerangka ini, GTL dapat berfungsi sebagai dasar teknis untuk membaca daya dukung, daya tampung, bahaya geologi, kawasan lindung geologi, dan syarat pemanfaatan ruang sejak tahap penyusunan RTRW dan RDTR.

Pada tahap perencanaan tata ruang, GTL menyediakan informasi mengenai kesesuaian ruang, daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, kawasan rawan bencana geologi, zona resapan, kawasan lindung geologi, dan kawasan bernilai geologi. Informasi ini dapat digunakan untuk memperkuat penyusunan struktur ruang, pola ruang, kawasan lindung, kawasan budi daya, kawasan strategis, dan arahan pemanfaatan ruang.

Pada tahap pemanfaatan ruang, GTL dapat digunakan untuk menilai apakah rencana kegiatan sesuai dengan karakter lingkungan geologi. Kegiatan yang secara zonasi tampak diperbolehkan tetap perlu dinilai terhadap pembatas geologi tertentu. Sebagai contoh, kegiatan industri, TPST, permukiman padat, prasarana pesisir, atau fasilitas strategis memerlukan perhatian khusus apabila berada pada area dengan air tanah rentan, potensi penurunan muka tanah, bahaya geologi, atau nilai geologi yang perlu dilindungi.

Pada tahap pengendalian pemanfaatan ruang, GTL dapat diterjemahkan ke dalam ketentuan kegiatan dan penggunaan lahan, ketentuan intensitas pemanfaatan ruang, ketentuan prasarana, ketentuan khusus, persyaratan teknis, dan rekomendasi kajian lanjutan. Dengan demikian, GTL membantu agar pengendalian pemanfaatan ruang tidak hanya berdasarkan kesesuaian administrasi, tetapi juga kesesuaian lingkungan geologi.

Tabel 10.2 Integrasi GTL dalam tahapan penataan ruang.

Tahap penataan ruang	Peran GTL	Produk yang relevan	Contoh tindak lanjut
Perencanaan tata ruang	Memberi dasar kesesuaian, daya dukung, pembatas, fungsi lindung, dan risiko geologi.	Informasi GTL, peta tematik, peta sintesis, Kajian GTL.	Masukan pola ruang, kawasan lindung, kawasan budi daya, kawasan strategis, dan arahan pemanfaatan.

Tahap penataan ruang	Peran GTL	Produk yang relevan	Contoh tindak lanjut
Pemanfaatan ruang	Menilai kesesuaian rencana kegiatan terhadap kondisi lingkungan geologi.	KGL, Kajian GTL, pertimbangan teknis.	Syarat pemanfaatan, kebutuhan kajian rinci, atau alternatif lokasi.
Pengendalian pemanfaatan ruang	Menerjemahkan pembatas geologi ke dalam ketentuan operasional.	Peta rekomendasi, matriks arahan, ketentuan khusus.	Ketentuan zonasi, pembatasan kegiatan, mitigasi, dan pemantauan.
Pengawasan penataan ruang	Menguji kesesuaian pelaksanaan dengan arahan dan syarat teknis.	Data pemantauan, evaluasi perubahan lingkungan geologi.	Peringatan dini administratif, evaluasi izin, pemutakhiran rekomendasi.

10.5 Relasi GTL dengan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

GTL juga memiliki hubungan langsung dengan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009, sebagaimana telah diubah melalui rezim Cipta Kerja yang ditetapkan dengan Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023, menempatkan instrumen pencegahan pencemaran dan kerusakan lingkungan sebagai bagian penting dari pengelolaan lingkungan hidup. Dalam kerangka ini, GTL dapat memperkuat penilaian daya dukung, daya tampung, risiko lingkungan geologi, dan dampak kegiatan terhadap tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, dan fungsi kawasan.

Dalam KLHS, GTL dapat digunakan untuk menilai apakah kebijakan, rencana, dan program memiliki risiko terhadap lingkungan geologi. KLHS tidak hanya memerlukan informasi biotik dan sosial-ekonomi, tetapi juga informasi fisik-geologi yang menentukan kemampuan ruang. Zona resapan, air tanah rentan, kawasan rawan bencana geologi, kawasan lindung geologi, dan kawasan bernilai geologi perlu masuk dalam penilaian alternatif kebijakan.

Dalam dokumen lingkungan, GTL dapat membantu menilai dampak kegiatan secara lebih spesifik. Kegiatan yang mengubah bentuk lahan, memengaruhi air tanah, menghasilkan limbah, membuka lereng, membangun prasarana besar, atau mengembangkan kawasan pesisir perlu didukung oleh informasi geologi lingkungan yang memadai. Dengan demikian, rencana pengelolaan dan rencana pemantauan lingkungan dapat memuat parameter geologi yang relevan.

Relasi GTL dengan lingkungan hidup juga penting karena sebagian kerusakan lingkungan terjadi melalui perubahan fisik yang bertahap. Penurunan fungsi resapan, penurunan muka air tanah, peningkatan kerentanan banjir, kerusakan bentang alam geologi, atau ketidakstabilan lereng tidak selalu segera tampak sebagai pencemaran. GTL membantu memperluas perhatian dokumen lingkungan agar tidak hanya menilai emisi atau limbah, tetapi juga perubahan sistem fisik lingkungan geologi.

10.6 Relasi GTL dengan Air Tanah, Sumber Daya Air, dan Zona Resapan

Air tanah dan zona resapan merupakan tema yang memperlihatkan pentingnya hubungan antara regulasi sektor dan GTL. Pengelolaan sumber daya air memiliki rezim peraturan tersendiri, termasuk Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air, Peraturan Pemerintah Nomor 30 Tahun 2024 tentang Pengelolaan Sumber Daya Air, serta Peraturan Pemerintah Nomor 43 Tahun 2008 tentang Air Tanah sepanjang masih relevan dan tidak bertentangan dengan ketentuan yang lebih baru. Namun, tata ruang sangat memengaruhi imbuhan, kualitas, dan keberlanjutan air tanah. Oleh karena itu, GTL berperan sebagai penghubung antara data hidrogeologi dan keputusan ruang.

Dalam sistem regulasi, GTL dapat membantu menerjemahkan perlindungan air tanah dan zona resapan ke dalam RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Bentuknya dapat berupa penetapan kawasan yang perlu dilindungi, ketentuan khusus pada zona resapan, pembatasan kegiatan yang berisiko

mencemari air tanah, pengaturan permukaan kedap air, persyaratan sistem drainase berwawasan resapan, serta pemantauan muka dan kualitas air tanah.

Bab 6 telah menjelaskan bahwa zona resapan tidak boleh dipahami hanya sebagai area hijau atau area dengan tutupan lahan tertentu. Zona resapan adalah fungsi lingkungan geologi yang dipengaruhi oleh tanah, batuan, kemiringan lereng, geomorfologi, curah hujan, muka air tanah, sistem akuifer, dan penggunaan lahan. Karena itu, perlindungan zona resapan memerlukan kajian geologi lingkungan, bukan hanya klasifikasi administrasi.

Dengan demikian, GTL tidak mengambil alih pengelolaan sumber daya air. GTL menggunakan data air tanah sebagai dasar sintesis ruang. Kewenangan sektor air tetap berjalan, tetapi keputusan ruang memperoleh dasar teknis yang lebih kuat agar tidak merusak fungsi imbuhan dan kualitas air tanah.

10.7 Relasi GTL dengan Kebencanaan dan Pengurangan Risiko Geologi

Dalam hubungan antara GTL dan kebencanaan geologi, perlu dibedakan kedudukan KRB Geologi dan KGL dalam penataan ruang. KRB Geologi merupakan acuan dasar untuk mengenali jenis, sebaran, dan tingkat bahaya geologi yang perlu diperhatikan dalam penyusunan RTRW dan RDTR. Adapun KGL merupakan instrumen teknis-operasional untuk menerjemahkan data KRB Geologi bersama data lingkungan geologi lainnya menjadi penilaian kesesuaian ruang, faktor pembatas, syarat pemanfaatan, arahan mitigasi, dan kebutuhan pengendalian. Dengan demikian, KRB Geologi menjadi dasar pengenalan bahaya, sedangkan KGL menjadi dasar penilaian teknis pemanfaatan ruang.

Bahaya geologi memiliki rezim pengaturan dalam kebencanaan, tetapi pengurangan risiko geologi tidak dapat dilepaskan dari penataan ruang. Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana menempatkan penyelenggaraan penanggulangan bencana sebagai rangkaian kegiatan yang mencakup tahap sebelum bencana, saat tanggap darurat, dan setelah bencana. Dalam konteks GTL, tahap sebelum bencana menjadi sangat penting karena risiko dapat dikurangi sejak perencanaan ruang.

Bab 7 telah menjelaskan bahwa bahaya geologi perlu diterjemahkan menjadi arahan pengendalian pemanfaatan ruang. Data bahaya dan peta kawasan rawan bencana geologi tidak cukup hanya menjadi lampiran teknis. Data tersebut harus masuk ke dalam kelas kesesuaian ruang, ketentuan khusus, pembatasan kegiatan, syarat mitigasi, dan kebutuhan pemantauan.

GTL dapat memperkuat kebencanaan melalui tiga jalur. Pertama, GTL membantu memastikan bahwa data bahaya geologi digunakan dalam RTRW dan RDTR. Kedua, GTL membantu menyusun syarat teknis pada kawasan yang masih dapat dimanfaatkan secara terbatas. Ketiga, GTL membantu mengidentifikasi faktor penyisih untuk kegiatan yang tidak seharusnya ditempatkan pada area dengan risiko tidak dapat diterima.

Dengan demikian, GTL tidak menggantikan lembaga atau regulasi kebencanaan. GTL menerjemahkan data bahaya geologi menjadi keputusan ruang yang operasional. Keterjemahan inilah yang menentukan apakah data kebencanaan hanya diketahui atau benar-benar digunakan untuk mengurangi paparan risiko.

10.8 Relasi GTL dengan Kawasan Lindung Geologi, Warisan Geologi, KCAG, KBAK, dan Geopark

Bagian III telah menegaskan bahwa nilai geologi memerlukan perlindungan dan pengelolaan. Peraturan Presiden Nomor 9 Tahun 2019 tentang Pengembangan Taman Bumi dan Peraturan Menteri ESDM Nomor 1 Tahun 2020 tentang Pedoman Penetapan Warisan Geologi memberikan dasar penting bagi pengelolaan Geopark dan penetapan warisan geologi. Namun, pengelolaan kawasan bernilai geologi tetap memerlukan integrasi dengan tata ruang dan pengendalian pemanfaatan kawasan.

Dalam konteks ini, GTL membantu menghubungkan inventarisasi nilai geologi dengan pengaturan ruang. Warisan Geologi yang telah diidentifikasi perlu diterjemahkan menjadi kebutuhan perlindungan, pengaturan akses, pengendalian pembangunan, serta arahan pemanfaatan berkelanjutan. KCAG dan KBAK juga perlu dibaca sebagai bagian dari sistem perlindungan lingkungan geologi yang memiliki implikasi terhadap tata ruang dan kegiatan pembangunan.

Geopark membutuhkan pendekatan terpadu karena menggabungkan konservasi, edukasi, dan pengembangan ekonomi masyarakat. GTL dapat memperkuat pengelolaan Geopark melalui penilaian daya dukung kawasan, keselamatan pengunjung, risiko geologi, batas pemanfaatan, dan hubungan antara situs bernilai geologi dengan rencana ruang daerah. Dalam hal ini, geowisata tidak berdiri sebagai promosi wisata semata, tetapi sebagai pemanfaatan yang harus tetap menjaga nilai geologi.

Relasi GTL dengan kawasan lindung geologi juga penting untuk mencegah konflik pemanfaatan. Kawasan yang memiliki nilai ilmiah, pendidikan, estetika, atau fungsi hidrogeologi penting tidak dapat diperlakukan seperti lahan biasa. GTL menyediakan dasar teknis agar perlindungan tersebut dapat dijelaskan dalam bahasa perencanaan dan kebijakan.

Tabel 10.3 Hubungan GTL dengan perlindungan nilai dan fungsi geologi.

Objek/Instrumen	Kebutuhan utama	Peran GTL	Keluaran operasional
Warisan Geologi	Identifikasi, penilaian, dan perlindungan nilai geologi.	Menghubungkan nilai geologi dengan kebutuhan pengaturan ruang.	Arahan perlindungan, pengendalian akses, dan rekomendasi pemanfaatan terbatas.
KCAG	Perlindungan kawasan bernilai geologi penting.	Menilai batas, pembatas, risiko, dan kebutuhan pemantauan.	Dasar teknis penetapan, pengelolaan, dan pengendalian kegiatan.
KBAK	Perlindungan fungsi hidrogeologi dan bentang alam karst.	Menilai fungsi resapan, sistem air bawah permukaan, dan sensitivitas kawasan.	Arahan tata ruang, pembatasan kegiatan, dan pemantauan fungsi lingkungan.
Geopark	Konservasi, edukasi, dan ekonomi lokal berkelanjutan.	Menilai daya dukung, keselamatan, risiko, dan keterpaduan dengan tata ruang.	Arahan pengelolaan kawasan, geowisata, interpretasi, dan pemantauan.

10.9 Relasi GTL dengan Perizinan, Persetujuan, dan Kegiatan Strategis

GTL memiliki posisi penting dalam konteks persetujuan, perizinan, dan kegiatan strategis. Kegiatan seperti kawasan industri, TPST, prasarana pesisir, reklamasi, PLTN, bendungan, jalur infrastruktur besar, kawasan permukiman baru, dan kegiatan lain yang berkonsekuensi besar terhadap ruang

memerlukan dasar geologi lingkungan yang lebih kuat daripada kegiatan umum.

Dalam konteks tersebut, Pertimbangan Teknis GTL dapat menjadi instrumen yang menjembatani kajian teknis dengan keputusan administratif. Pertimbangan teknis dapat memuat status kesesuaian, pembatas utama, syarat pemanfaatan, kebutuhan investigasi lanjutan, mitigasi, pemantauan, dan batas penggunaan rekomendasi. Dengan format seperti ini, pejabat berwenang memperoleh dasar yang lebih jelas dalam mengambil keputusan.

GTL juga dapat membantu membedakan jenis kegiatan berdasarkan konsekuensi risikonya. Kegiatan berisiko rendah dapat cukup menggunakan informasi GTL umum atau data sekunder yang telah diverifikasi. Kegiatan dengan risiko sedang memerlukan KGL yang lebih rinci. Kegiatan dengan risiko tinggi atau strategis memerlukan Kajian GTL dan investigasi khusus sesuai standar teknis terkait. Pembedaan ini penting agar pengaturan tidak terlalu membebani kegiatan kecil, tetapi tetap ketat untuk kegiatan yang berpotensi menimbulkan dampak besar.

Dalam sistem perizinan dan persetujuan, GTL sebaiknya ditempatkan sebagai dasar teknis, bukan sebagai prosedur yang mengulang penilaian sektor lain. Nilai tambah GTL terletak pada sintesis geologi lingkungan: menggabungkan tanah, batuan, air tanah, bahaya, geomorfologi, fungsi lindung, dan nilai geologi menjadi rekomendasi yang dapat dipakai dalam keputusan.

10.10 Arsitektur Regulasi GTL: Payung, Pedoman, Standar, dan Mekanisme

Agar dapat bekerja efektif, GTL memerlukan arsitektur regulasi yang berjenjang. Arsitektur ini perlu membedakan antara payung kebijakan, pedoman teknis, standar data, mekanisme validasi, dan format keluaran. Tanpa pembedaan tersebut, regulasi GTL berisiko terlalu umum atau terlalu teknis pada tingkat peraturan yang kurang tepat.

Payung kebijakan diperlukan untuk menetapkan kedudukan GTL, ruang lingkup, tujuan, prinsip, koordinasi, kewenangan umum, dan hubungan dengan instrumen kebijakan lain. Payung ini dapat memuat pengakuan bahwa GTL digunakan untuk mendukung tata ruang, lingkungan hidup, pengelolaan kawasan, konservasi geologi, dan pengendalian risiko geologi.

Pedoman teknis diperlukan untuk menjelaskan bagaimana KGL dan Kajian GTL disusun. Pedoman ini dapat memuat parameter minimum, skala data, metode pemetaan, skoring, pembobotan, analisis spasial, validasi lapangan, klasifikasi kesesuaian, format peta, serta format rekomendasi. Karena metode teknis dapat berkembang, pedoman teknis harus cukup lentur untuk diperbarui sesuai kebutuhan.

Standar data dan mekanisme validasi diperlukan untuk menjaga mutu. Informasi GTL yang digunakan dalam keputusan publik harus memiliki sumber data, skala, metadata, metode, dan batas penggunaan. Validasi perlu memastikan bahwa kajian yang disusun oleh pihak lain memenuhi standar minimum. Dengan demikian, regulasi GTL tidak hanya mengatur kewajiban, tetapi juga menjaga akuntabilitas teknis.

Tabel 10.4 Arsitektur regulasi dan instrumen operasional GTL.

Lapisan pengaturan	Materi utama	Contoh muatan	Catatan penerapan
Payung kebijakan	Kedudukan, tujuan, ruang lingkup, prinsip, koordinasi.	Definisi GTL, Informasi GTL, KGL, Kajian GTL, Pertimbangan Teknis GTL.	Menjadi dasar integrasi lintas sektor dan lintas pemerintahan.
Pedoman teknis	Metode penyusunan KGL dan Kajian GTL.	Parameter minimum, skala, pemetaan, skoring, pembobotan, analisis spasial, validasi.	Perlu cukup rinci, tetapi dapat diperbarui mengikuti perkembangan metode.

Lapisan pengaturan	Materi utama	Contoh muatan	Catatan penerapan
Standar data	Mutu data dan keterlacakan.	Metadata, sumber data, skala, ketelitian, format peta, basis data.	Menjamin hasil kajian dapat diperiksa dan digunakan ulang.
Mekanisme validasi	Penjaminan mutu kajian.	Pemeriksaan data, metode, skala, konsistensi peta, rekomendasi.	Penting untuk kajian pihak lain dan kegiatan berisiko tinggi.
Pertimbangan teknis	Keluaran untuk keputusan administratif.	Status kesesuaian, pembatas, syarat teknis, rekomendasi, pemantauan.	Harus ringkas, jelas, dan dapat ditindaklanjuti.

10.11 GTL sebagai Bagian dari Norma, Standar, Prosedur, dan Kriteria

Dalam tata kelola pemerintahan, GTL perlu diterjemahkan ke dalam norma, standar, prosedur, dan kriteria. Norma menjelaskan prinsip dasar, misalnya bahwa pemanfaatan ruang harus memperhatikan daya dukung, daya tampung, bahaya geologi, fungsi resapan, kawasan lindung geologi, dan nilai geologi. Standar menjelaskan persyaratan teknis, seperti skala data, parameter minimum, format peta, dan mutu kajian.

Prosedur menjelaskan tahapan kerja. Dalam GTL, prosedur dapat mencakup pengumpulan data, verifikasi data, penyusunan peta tematik, analisis spasial, penilaian kesesuaian, validasi lapangan, penyusunan rekomendasi, penyampaian pertimbangan teknis, dan pemutakhiran informasi. Kriteria menjelaskan dasar penilaian, misalnya kelas kesesuaian, tingkat pembatas, kondisi yang memerlukan kajian rinci, atau kondisi yang menjadi faktor penyisih.

Penerjemahan GTL ke dalam norma, standar, prosedur, dan kriteria penting agar pelaksanaannya tidak bergantung pada tafsir perorangan. Para penyusun kajian, pemerintah daerah, pemrakarsa, dan pengambil keputusan memerlukan acuan yang sama. Acuan tersebut tidak harus meniadakan penilaian profesional ahli geologi, tetapi harus memberi batas minimum agar hasil kajian dapat dibandingkan, diperiksa, dan dipertanggungjawabkan.

Dalam jangka panjang, NSPK GTL dapat menjadi dasar pembinaan dan pengawasan. Pemerintah pusat dapat memberi panduan, pemerintah daerah dapat memanfaatkan dalam penyusunan rencana ruang dan pengendalian pemanfaatan, sedangkan pemrakarsa dapat memahami data dan kajian apa yang diperlukan sebelum mengembangkan kegiatan pada kawasan tertentu.

10.12 Kebutuhan Penguatan Regulasi Geologi Tata Lingkungan

Penguatan regulasi GTL diperlukan bukan karena tidak ada peraturan yang berkaitan dengan ruang dan lingkungan, tetapi karena hubungan antara data geologi dan keputusan publik masih memerlukan jembatan yang lebih eksplisit. Saat ini, banyak instrumen hukum telah mengatur penataan ruang, perlindungan lingkungan hidup, sumber daya air, kebencanaan, warisan geologi, dan Geopark. Namun, belum seluruhnya memberi ruang yang cukup jelas bagi Informasi GTL, KGL, Kajian GTL, dan Pertimbangan Teknis GTL sebagai produk yang terstandardisasi.

Penguatan tersebut dapat dilakukan melalui beberapa arah. Pertama, menegaskan kedudukan GTL sebagai dasar teknis dalam penyusunan dan peninjauan kembali rencana tata ruang. Kedua, memasukkan informasi lingkungan geologi sebagai komponen penting dalam KLHS dan dokumen lingkungan untuk kegiatan yang relevan. Ketiga, menetapkan pedoman teknis KGL untuk berbagai jenis kawasan dan tapak. Keempat, membangun mekanisme validasi kajian geologi lingkungan yang digunakan dalam keputusan publik. Kelima, memperkuat sistem informasi GTL agar data dapat diakses, diperbarui, dan digunakan lintas sektor.

Penguatan regulasi juga perlu memperhatikan proporsionalitas. Tidak semua kegiatan memerlukan kajian yang sama rinci. Regulasi harus mampu membedakan kebutuhan informasi berdasarkan skala rencana, jenis kegiatan, tingkat risiko, dan sensitivitas lingkungan geologi. Dengan demikian, regulasi GTL tidak

menjadi beban umum, tetapi menjadi instrumen yang tepat sasaran.

Pada akhirnya, penguatan GTL harus diarahkan pada keputusan yang lebih aman, lebih transparan, dan lebih dapat dipertanggungjawabkan. Regulasi GTL bukan tujuan akhir, melainkan sarana untuk memastikan bahwa pembangunan memperhitungkan kemampuan, keterbatasan, risiko, dan nilai lingkungan geologi.

Tabel 10.5 Arah penguatan regulasi GTL.

Kebutuhan penguatan	Masalah yang dijawab	Bentuk tindak lanjut	Manfaat yang diharapkan
Kedudukan GTL dalam tata ruang	Data geologi belum selalu menjadi dasar kuat dalam RTRW/RDTR.	Memasukkan Informasi GTL dan Kajian GTL sebagai masukan teknis.	Rencana ruang lebih sesuai dengan daya dukung, pembatas, dan risiko geologi.
Integrasi dengan KLHS dan dokumen lingkungan	Dampak terhadap tanah, batuan, air tanah, dan bentuk lahan belum selalu dinilai memadai.	Menetapkan parameter geologi lingkungan untuk kegiatan relevan.	Dokumen lingkungan lebih lengkap dan berbasis kondisi fisik.
Pedoman teknis KGL	Metode penilaian dapat berbeda antar kajian.	Menyusun pedoman parameter, skala, skoring, pembobotan, dan validasi.	Hasil kajian lebih konsisten dan dapat diperiksa.
Validasi kajiani	Kajian pihak lain belum selalu memenuhi standar data dan metode.	Mekanisme verifikasi dan/atau validasi oleh unit teknis berwenang.	Keputusan publik lebih akuntabel.
Sistem informasi GTL	Data geologi tersebar dan belum selalu mudah digunakan.	Basis data dan peta GTL yang diperbarui berkala.	Pemanfaatan lintas sektor lebih mudah dan efektif.

10.13 Kesimpulan Bab

Bab ini menegaskan bahwa GTL perlu ditempatkan dalam sistem peraturan perundang-undangan Indonesia sebagai instrumen teknis-regulatif. GTL bertumpu pada ilmu dan data geologi lingkungan, tetapi diarahkan untuk mendukung keputusan publik dalam penataan ruang, lingkungan hidup, pengelolaan air tanah, pengurangan risiko geologi, perlindungan kawasan bernilai geologi, dan pengembangan kawasan strategis.

GTL tidak dimaksudkan untuk menggantikan rezim peraturan yang sudah ada. GTL memperkuat rezim tersebut dengan menyediakan dasar teknis yang disintesis, divalidasi, dan diterjemahkan ke dalam rekomendasi operasional. Dalam tata ruang, GTL membantu menilai kesesuaian, pembatas, dan syarat pemanfaatan. Dalam lingkungan hidup, GTL memperkuat penilaian daya dukung, daya tampung, dan dampak fisik. Dalam kebencanaan, GTL menerjemahkan data bahaya menjadi arahan pengendalian ruang. Dalam konservasi geologi, GTL membantu melindungi nilai geologi dan mengatur pemanfaatan berkelanjutan.

Agar dapat berjalan efektif, GTL memerlukan arsitektur regulasi berjenjang. Payung kebijakan diperlukan untuk menetapkan kedudukan dan koordinasi. Pedoman teknis diperlukan untuk mengatur penyusunan KGL dan Kajian GTL. Standar data, prosedur validasi, dan format pertimbangan teknis diperlukan untuk menjaga mutu serta akuntabilitas. Sistem informasi dan pemutakhiran data diperlukan agar informasi GTL tetap relevan dengan perubahan ruang dan dinamika geologi.

Dengan demikian, Bab 10 menjadi dasar bagi pembahasan kelembagaan dan instrumen operasional GTL pada bab berikutnya. Setelah posisi GTL dalam sistem hukum dipahami, langkah berikutnya adalah merumuskan siapa yang berwenang, bagaimana koordinasi dilakukan, bagaimana kajian divalidasi, dan bagaimana pertimbangan teknis GTL digunakan dalam proses pengambilan keputusan.

Kajian Geologi Lingkungan untuk Peruntukan Lahan, Kawasan, Tapak, dan Prasarana

Menjembatani ilmu kebumian, kebijakan, dan keputusan publik

> Ilmu yang baik perlu menemukan jalannya ke dalam sistem kebijakan. Geologi Tata Lingkungan tidak cukup hidup dalam peta, laporan, dan diskusi teknis; ia harus hadir dalam tata ruang, lingkungan hidup, air tanah, kebencanaan, konservasi geologi, perizinan, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Regulasi memberi ruang agar pengetahuan geologi dapat bekerja secara tertib dan memiliki akibat dalam keputusan publik. Tanpa pijakan regulatif, rekomendasi teknis mudah menjadi nasihat yang diabaikan. Dengan GTL, hukum dan ilmu kebumian dapat bertemu untuk menjaga ruang hidup secara lebih bertanggung jawab.

1. PETA & DATA GEOLOGI

- Peta geologi, geomorfologi, dan hidrogeologi
- Data bahan galian dan geologi teknik
- Data kerawanan & bahaya geologi
- Data lingkungan & kualitas air tanah

2. KAJIAN & REKOMENDASI

- Analisis kondisi geologi lingkungan
- Penilaian kesesuaian lahan & tapak
- Identifikasi risiko & daya dukung
- Alternatif solusi dan rekomendasi teknis

3. REGULASI & PERIZINAN

- Peraturan & kebijakan tata ruang
- Standar, pedoman, dan kriteria teknis
- Proses perizinan & AMDAL
- Pengendalian & pengawasan

4. PEMANFAATAN RUANG

- Peruntukan kawasan sesuai daya dukung
- Pengembangan tapak yang aman
- Pembangunan prasarana berkelanjutan
- Kualitas lingkungan terjaga

⚠ BILA DIABAIKAN

- Konflik pemanfaatan ruang
- Risiko geologi meningkat
- Kerusakan lingkungan
- Keputusan teknis lemah

Geologi memberikan pemahaman tentang kondisi alam dan batasan ruang.

Regulasi memberi arah dan kepastian hukum.

Sinergi keduanya menghasilkan keputusan yang adil, efektif, dan berkelanjutan bagi generasi kini dan mendatang.

Ketika ilmu kebumian hadir dalam kebijakan, ruang dapat ditata dengan lebih aman, tertib, dan bertanggung jawab.

BAB 11

Kajian Geologi Lingkungan untuk Peruntukan Lahan, Kawasan, Tapak, dan Prasarana

11.1. Pengantar

Bab-bab sebelumnya telah menjelaskan bahwa KGL merupakan metode teknis dalam kerangka GTL. KGL menggunakan data geologi lingkungan untuk menilai kesesuaian, daya dukung, daya tampung, pembatas, risiko, dan syarat pemanfaatan ruang. Bab 11 memperjelas bagaimana KGL diterapkan untuk berbagai objek keputusan: peruntukan lahan, pengembangan kawasan, penilaian tapak, dan pembangunan prasarana.

Peruntukan lahan biasanya berkaitan dengan arahan penggunaan ruang pada skala wilayah atau kawasan. Pengembangan kawasan berkaitan dengan rencana yang lebih terarah, misalnya kawasan permukiman, kawasan industri, kawasan strategis, kawasan pesisir, kawasan pariwisata, atau kawasan bernilai geologi. Tapak berkaitan dengan lokasi yang lebih spesifik dan memiliki konsekuensi teknis lebih langsung. Prasarana berkaitan dengan jaringan atau fasilitas yang memerlukan penilaian lintasan, lokasi, konstruksi, risiko, dan dampak terhadap lingkungan geologi.

Dengan demikian, KGL tidak boleh diperlakukan sebagai prosedur tunggal yang sama untuk semua keadaan. Prinsip dasarnya tetap sama, tetapi kedalaman data, pilihan parameter, skala peta, metode analisis, dan bentuk rekomendasi harus disesuaikan dengan objek keputusan. KGL untuk RTRW dapat memberi arahan makro, sedangkan KGL untuk tapak berisiko tinggi harus memiliki tingkat ketelitian dan verifikasi yang lebih kuat.

Bab ini disusun untuk membantu pembaca memahami perbedaan kebutuhan KGL pada tingkat lahan, kawasan, tapak, dan prasarana. Pembahasan dimulai dari posisi KGL dalam siklus keputusan ruang, kemudian dilanjutkan dengan penapisan objek, kebutuhan data, parameter analisis, kelas kesesuaian, rekomendasi teknis, dan keterkaitannya dengan instrumen tata ruang serta dokumen lingkungan.

Gambar 11.1 Alur Kajian Geologi Lingkungan untuk peruntukan lahan, kawasan, tapak, dan prasarana.

Bab 11 merupakan bab utama yang paling langsung terkait dengan Lampiran Teknis. Lampiran 1 sampai Lampiran 17 memperlihatkan bagaimana KGL diterapkan pada tingkat peruntukan lahan, kawasan, tapak, prasarana, kawasan bernilai geologi, fasilitas tertentu, kawasan PLTP, pengendalian banjir hulu-tengah-hilir, pemulihan

neraca air, dan studi kasus pengembangan kota baru. Dengan demikian, bab ini memberi kerangka konseptual-operasional, sedangkan lampiran memberi perangkat kerja rinci untuk memastikan setiap keputusan ruang memiliki dasar data, metode, validasi, dan rekomendasi yang dapat ditelusuri.

11.2. Posisi KGL dalam Siklus Keputusan Ruang

KGL berada pada bagian awal dan tengah siklus keputusan ruang. Pada bagian awal, KGL membantu mengenali apakah suatu ruang memiliki potensi, pembatas, risiko, atau nilai geologi yang harus diperhatikan sebelum rencana disusun. Pada bagian tengah, KGL menguji apakah rencana yang telah dirumuskan masih sesuai dengan kondisi lingkungan geologi. Pada bagian akhir, hasil KGL digunakan sebagai dasar syarat teknis, mitigasi, pemantauan, atau kebutuhan kajian lanjutan.

Dalam sistem penataan ruang, KGL dapat memberi masukan bagi penyusunan RTRW, RDTR, peraturan zonasi, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Dalam sistem lingkungan hidup, KGL dapat memperkuat KLHS, AMDAL, UKL-UPL, atau dokumen lingkungan lain yang memerlukan informasi tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, bahaya geologi, dan fungsi lindung geologi. Dalam perizinan atau persetujuan teknis, KGL dapat membantu menjelaskan apakah suatu kegiatan layak ditempatkan pada lokasi tertentu dan syarat apa yang harus dipenuhi.

Posisi KGL menjadi penting karena keputusan ruang sering diambil berdasarkan kepentingan administratif, ekonomi, akses lahan, atau rencana infrastruktur. Semua faktor tersebut penting, tetapi belum cukup. Ruang perlu diuji terhadap kondisi geologi karena pembangunan selalu berlangsung pada media fisik yang memiliki kemampuan, batas, dan dinamika. Dengan KGL, keputusan ruang dapat diarahkan agar tidak bertentangan dengan daya dukung, daya tampung, dan keselamatan lingkungan geologi.

KGL juga membantu mengurangi kesenjangan antara data geologi dan keputusan publik. Data geologi dasar sering tersedia, tetapi belum selalu siap digunakan oleh perencana atau pengambil keputusan. KGL mengubah data tersebut menjadi informasi operasional: kelas kesesuaian, faktor pembatas, arahan pemanfaatan, syarat teknis, dan rekomendasi tindak lanjut.

Tabel 11.1 Objek keputusan dan orientasi KGL.

Objek keputusan	Orientasi analisis	Kebutuhan data	Bentuk rekomendasi
Peruntukan lahan	Menilai kesesuaian umum untuk penggunaan ruang tertentu.	Data tematik regional sampai kawasan; peta geologi, lereng, air tanah, bahaya, penggunaan lahan.	Arahan zonasi, kelas kesesuaian, pembatas, dan syarat umum.
Kawasan	Menilai sistem kawasan dan hubungan antaraktivitas.	Data kawasan lebih rinci, fungsi resapan, prasarana, risiko, kawasan lindung, nilai geologi.	Pembagian ruang internal, syarat pengelolaan, pengendalian intensitas, dan pemantauan.
Tapak	Menilai kelayakan lokasi tertentu.	Data lokal, verifikasi lapangan, informasi tanah dan batuan, air tanah, drainase, bahaya lokal.	Syarat tapak, kebutuhan investigasi rinci, desain mitigasi, atau alternatif lokasi.
Prasarana	Menilai lokasi, lintasan, konstruksi, risiko, dan dampak prasarana.	Data segmen atau lokasi, kondisi geologi teknik, geomorfologi, bahaya, hidrologi, dan lingkungan sekitar.	Rekomendasi segmen, penyesuaian desain, pengendalian drainase, mitigasi, dan pemantauan.

11.3. Penapisan Awal Objek Keputusan

Setiap KGL perlu dimulai dengan penapisan awal objek keputusan. Penapisan ini menjawab pertanyaan dasar: apa yang akan dinilai, untuk tujuan apa, pada skala apa, dan dengan konsekuensi risiko seperti apa. Tanpa penapisan, kajian dapat menjadi terlalu umum, terlalu rinci, atau tidak relevan dengan keputusan yang akan diambil.

Untuk peruntukan lahan, penapisan berfokus pada arah penggunaan ruang. Pertanyaan utamanya adalah jenis pemanfaatan apa yang paling sesuai, area mana yang harus dibatasi, dan fungsi lingkungan geologi apa yang harus dilindungi. Untuk kawasan, penapisan berfokus pada karakter kawasan, intensitas rencana, hubungan antaraktivitas, serta kebutuhan pengendalian. Untuk tapak, penapisan berfokus pada kelayakan lokasi secara spesifik. Untuk prasarana, penapisan berfokus pada lokasi, lintasan, pengaruh konstruksi, risiko gangguan terhadap lingkungan geologi, dan kebutuhan pemantauan.

Penapisan juga harus memperhatikan tingkat konsekuensi. Tapak fasilitas strategis, prasarana vital, tempat pengolahan sampah, kawasan industri besar, atau fasilitas pada kawasan rawan bencana memerlukan standar analisis yang lebih tinggi daripada rencana pemanfaatan umum. Semakin besar konsekuensi keselamatan dan lingkungan, semakin kuat kebutuhan data, validasi, dan kehati-hatian rekomendasi.

Hasil penapisan awal sebaiknya dicatat secara eksplisit dalam dokumen KGL. Catatan tersebut memuat objek yang dinilai, tujuan kajian, skala rujukan, data yang digunakan, parameter utama, batas wilayah analisis, dan batas penggunaan hasil. Dengan cara ini, pembaca dapat memahami ruang lingkup kajian sejak awal.

11.4. KGL untuk Peruntukan Lahan

KGL untuk peruntukan lahan bertujuan menilai hubungan antara kondisi lingkungan geologi dan rencana penggunaan ruang. Objeknya dapat berupa permukiman, pertanian, kawasan industri, kawasan pariwisata, ruang terbuka, kawasan konservasi, kawasan resapan, atau penggunaan lain yang direncanakan dalam tata ruang. Pada tingkat ini, KGL biasanya digunakan untuk memberi arahan umum dan membedakan area yang lebih mendukung, area bersyarat, area terbatas, dan area yang tidak direkomendasikan untuk penggunaan tertentu.

Parameter utama KGL untuk peruntukan lahan mencakup tanah dan batuan, bentuk lahan, kemiringan lereng, kondisi air tanah, fungsi resapan, bahaya geologi, penggunaan lahan eksisting, kawasan lindung geologi, dan nilai geologi. Parameter tersebut dipilih sesuai jenis peruntukan. Peruntukan permukiman memerlukan perhatian pada kestabilan lahan, potensi banjir, air tanah, dan akses prasarana dasar. Peruntukan industri memerlukan perhatian tambahan pada kerentanan air tanah, pengelolaan limbah, dan jarak terhadap unsur sensitif. Peruntukan konservasi geologi memerlukan perhatian pada nilai geologi, keutuhan objek, dan perlindungan ruang.

Hasil KGL untuk peruntukan lahan dapat berbentuk peta kesesuaian, peta pembatas, matriks rekomendasi, dan narasi syarat pemanfaatan. Peta harus disertai penjelasan agar tidak hanya menjadi gambar tematik. Narasi perlu menjelaskan mengapa suatu area dinilai sesuai atau terbatas, parameter apa yang paling berpengaruh, dan tindak lanjut apa yang diperlukan.

Pada skala RTRW, KGL untuk peruntukan lahan dapat memberi arahan umum mengenai kawasan yang mendukung pengembangan, kawasan yang memerlukan pengendalian, dan kawasan yang perlu dilindungi. Pada skala RDTR, hasilnya perlu lebih rinci agar dapat diterjemahkan ke dalam ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, dan ketentuan khusus.

11.5. KGL untuk Pengembangan Kawasan

KGL untuk pengembangan kawasan lebih terarah dibandingkan KGL untuk peruntukan lahan umum. Kawasan yang dinilai dapat berupa kawasan perkotaan, kawasan industri, kawasan permukiman baru, kawasan pesisir, kawasan pariwisata, kawasan strategis, kawasan Geopark, atau kawasan yang memiliki tekanan pembangunan tinggi. Pada

tingkat ini, KGL harus membaca hubungan antara berbagai kegiatan dalam satu kawasan dan dampaknya terhadap lingkungan geologi.

Pengembangan kawasan biasanya menimbulkan perubahan fisik yang lebih besar daripada kegiatan tunggal. Perubahan tersebut dapat mencakup perubahan tutupan lahan, pengaturan drainase, peningkatan beban bangunan, peningkatan kebutuhan air, perubahan pola resapan, peningkatan potensi limbah, serta meningkatnya unsur terpapar terhadap bahaya geologi. Karena itu, KGL untuk kawasan tidak cukup hanya menilai lokasi satu per satu, tetapi perlu menilai sistem kawasan secara utuh.

Parameter KGL untuk kawasan harus mencakup daya dukung, daya tampung, fungsi resapan, kerentanan pencemaran, bahaya geologi, prasarana lingkungan, dan hubungan dengan kawasan lindung. Dalam kawasan industri, misalnya, penilaian tidak hanya melihat kekuatan tanah untuk bangunan, tetapi juga risiko pencemaran air tanah, arah aliran air tanah, banjir, kebutuhan pengelolaan limbah, dan lokasi unsur sensitif. Dalam kawasan pariwisata berbasis geologi, penilaian harus memperhatikan nilai geologi, keselamatan, akses, kapasitas kunjungan, dan perlindungan nilai utama kawasan.

Hasil KGL untuk kawasan sebaiknya menghasilkan pembagian ruang internal yang operasional. Ada area yang dapat diarahkan untuk kegiatan utama, area untuk penyangga, area untuk prasarana, area yang harus dipertahankan sebagai resapan atau perlindungan, dan area yang memerlukan pembatasan. Pembagian ini harus didukung oleh peta dan argumentasi teknis yang jelas.

Salah satu contoh penerapan KGL untuk pengembangan kawasan adalah korelasi antara peta kemampuan lahan beraspek Geologi Lingkungan dan peta kelas situs. Peta kemampuan lahan memberikan informasi mengenai tingkat dukungan dan pembatas geologi lingkungan untuk pengembangan ruang, sedangkan peta kelas situs memberikan informasi mengenai respons tanah dan batuan terhadap guncangan gempa. Keduanya perlu dibaca secara terpadu karena kawasan yang secara umum memiliki kemampuan lahan cukup baik belum tentu memiliki respons seismik yang sama pada seluruh bagiannya.

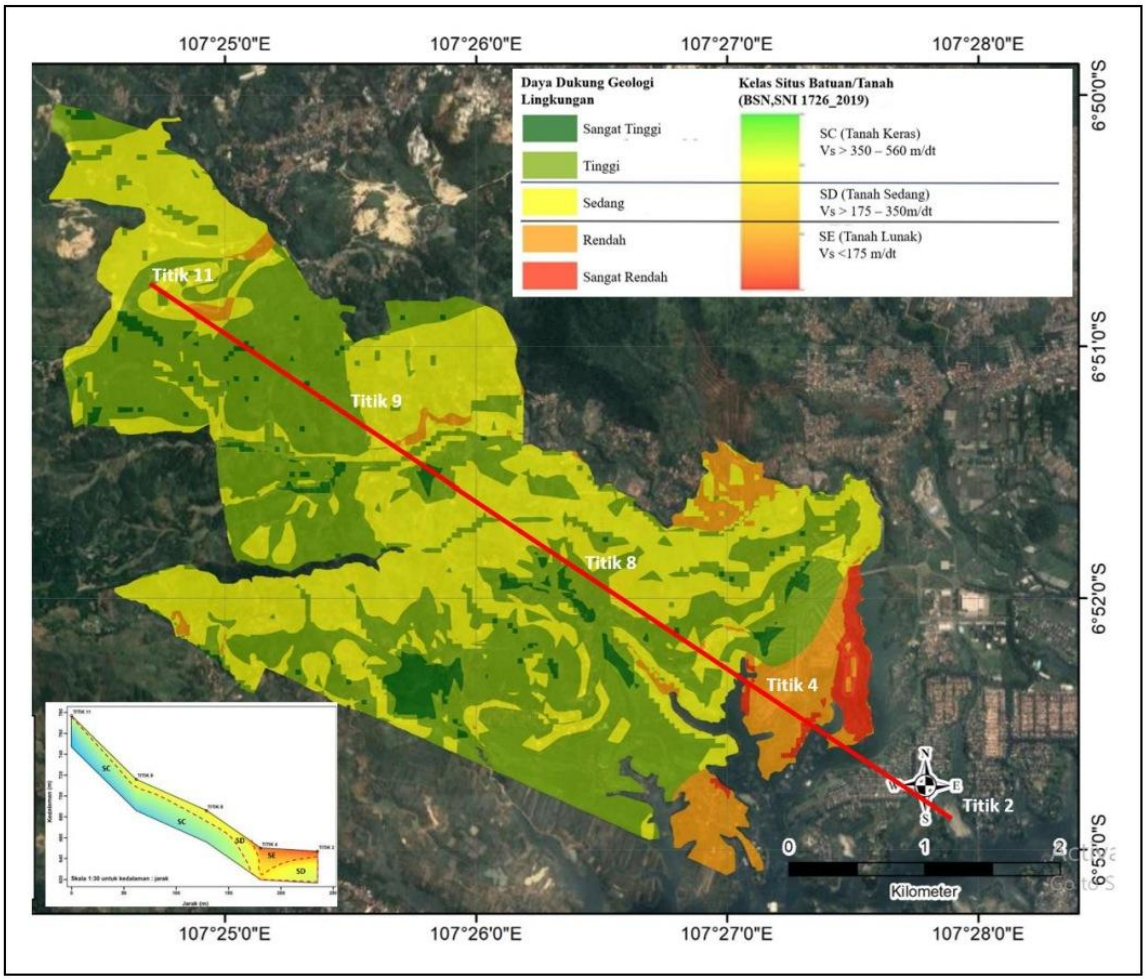
Gambar 11.2 memperlihatkan bahwa peta kemampuan lahan dan peta kelas situs memiliki fungsi yang berbeda, tetapi saling melengkapi. Peta kemampuan lahan beraspek Geologi Lingkungan disusun dari parameter seperti ketersediaan air tanah, kekerasan batuan dan tanah, kemiringan lereng, serta kestabilan lahan. Peta ini memberikan gambaran mengenai kemampuan suatu kawasan untuk menerima pengembangan permukiman dari sudut pandang geologi lingkungan.

Dalam pengembangan kawasan permukiman baru, korelasi tersebut penting untuk membedakan arahan makro kawasan dengan kebutuhan teknis tapak. Peta kemampuan lahan dapat digunakan untuk menetapkan prioritas pengembangan, pembatasan, dan kebutuhan rekayasa umum. Sementara itu, kelas situs digunakan untuk menilai kebutuhan desain fondasi, struktur tahan gempa, investigasi geoteknik, dan mikrozonasi rinci. Dengan demikian, KGL tidak hanya menghasilkan peta kesesuaian, tetapi juga memberi dasar bagi desain teknis dan manajemen risiko kawasan.

Sementara itu, kelas situs menggambarkan karakter respons tanah dan batuan terhadap guncangan gempa. Kelas situs yang lebih lunak menunjukkan kebutuhan perhatian lebih besar dalam desain struktur, pondasi, prasarana, dan pengendalian risiko. Oleh karena itu, kawasan yang memiliki kemampuan lahan sedang atau cukup baik tetap dapat memerlukan syarat teknis tambahan apabila berada pada kelas situs yang lebih rentan terhadap amplifikasi guncangan.

Dalam kasus Kota Baru Parahyangan, korelasi peta kemampuan lahan dengan kelas

situs menunjukkan pentingnya pembacaan multi-parameter. Pengembangan kawasan tidak cukup hanya ditentukan oleh satu peta sintesis. Peta kemampuan lahan harus dikoreksi dengan informasi geologi teknik, Vs30, mikrozonasi, struktur geologi, air tanah, drainase, dan kondisi deformasi apabila tersedia. Integrasi tersebut diperlukan agar rekomendasi kawasan tidak hanya menjawab pertanyaan "di mana kawasan dapat dikembangkan", tetapi juga "dengan syarat teknis apa kawasan tersebut dapat dikembangkan secara aman".



Gambar 11.2. Korelasi Peta Kemampuan Lahan Beraspek Geologi Lingkungan dengan Kelas Situs pada Kawasan Pengembangan Kota Baru Parahyangan, Kabupaten Bandung Barat. Gambar menunjukkan contoh integrasi hasil sintesis kemampuan lahan dengan kelas situs berdasarkan karakter tanah dan batuan setempat. Korelasi ini memperlihatkan bahwa penilaian kemampuan lahan untuk kawasan permukiman perlu dikaitkan dengan respons tapak terhadap guncangan gempa. Area dengan kelas situs lebih lunak memerlukan perhatian lebih tinggi karena berpotensi mengalami amplifikasi guncangan dan membutuhkan investigasi geoteknik serta desain struktur yang lebih rinci. Contoh ini menegaskan bahwa KGL untuk pengembangan kawasan harus menghubungkan aspek daya dukung, faktor pembatas, bahaya geologi, dan persyaratan teknis bangunan.

Dengan demikian, gambar ini menjadi contoh bahwa KGL untuk pengembangan kawasan harus bergerak dari penilaian kesesuaian menuju rekomendasi operasional. Hasil akhirnya dapat berupa arahan zona pengembangan, kebutuhan investigasi geoteknik lanjutan, penentuan lokasi prioritas mikrozonasi rinci, pembatasan intensitas bangunan, desain fondasi yang sesuai, pengendalian drainase, serta pemantauan jangka panjang. Pada titik inilah KGL berperan sebagai jembatan antara peta

geologi lingkungan dan keputusan teknis pembangunan kawasan.

11.6. KGL untuk Tapak

KGL untuk tapak adalah analisis yang berfokus pada lokasi tertentu. Tapak dapat berupa lokasi bangunan penting, tempat pengolahan sampah, fasilitas strategis, instalasi pengolahan limbah, prasarana air, fasilitas energi, kawasan industri inti, atau kegiatan lain yang memerlukan keputusan lokasi secara spesifik. Karena menyangkut lokasi yang lebih pasti, KGL untuk tapak memerlukan data yang lebih rinci dibandingkan penilaian tingkat wilayah.

Pada KGL tapak, skala dan ketelitian menjadi sangat penting. Informasi regional dapat digunakan sebagai latar, tetapi keputusan tapak memerlukan verifikasi lapangan, pengamatan kondisi tanah dan batuan, data muka air tanah, informasi drainase, identifikasi bahaya lokal, serta apabila diperlukan investigasi geologi teknik dan hidrogeologi. Kajian tapak tidak boleh hanya mengandalkan peta umum apabila keputusan yang diambil memiliki konsekuensi keselamatan atau lingkungan yang besar.

KGL tapak harus menjawab tiga pertanyaan. Pertama, apakah lokasi tersebut secara geologi dapat menerima kegiatan yang direncanakan. Kedua, apa pembatas utama yang harus dikendalikan. Ketiga, syarat teknis apa yang wajib dipenuhi sebelum kegiatan dilaksanakan. Untuk tapak TPST, misalnya, pembatas dapat berupa muka air tanah dangkal, kerentanan air tanah, sifat tanah, jarak terhadap permukiman, risiko banjir, atau kebutuhan lapisan pengaman teknis. Untuk tapak prasarana pesisir, pembatas dapat berupa abrasi, rob, penurunan muka tanah, intrusi air asin, dan dinamika pantai.

Hasil KGL tapak harus lebih tegas dibandingkan kajian umum. Rekomendasi dapat berupa layak dengan syarat, memerlukan investigasi rinci, perlu perubahan desain, perlu pengurangan intensitas, atau tidak direkomendasikan. Keputusan tidak boleh hanya didasarkan pada rata-rata kondisi kawasan, karena faktor lokal dapat menentukan keselamatan dan kinerja kegiatan.

11.7. KGL untuk Prasarana

KGL untuk prasarana memiliki karakter khusus karena prasarana dapat berupa fasilitas titik, jalur, atau jaringan. Jalan, rel, jaringan pipa, saluran, bendungan, pelabuhan, tanggul, dan prasarana pesisir memiliki kebutuhan analisis yang berbeda. Sebagian prasarana memerlukan penilaian lintasan, sebagian memerlukan penilaian lokasi, dan sebagian lain memerlukan gabungan keduanya.

Pada prasarana jalur, KGL harus memperhatikan perubahan kondisi geologi sepanjang rencana lintasan. Satu segmen dapat berada pada tanah yang relatif stabil, sedangkan segmen lain dapat melewati lereng rentan, dataran banjir, kawasan resapan, struktur geologi penting, atau kawasan bernilai geologi. Oleh karena itu, rekomendasi KGL untuk prasarana jalur sebaiknya disusun per segmen agar arahan teknisnya lebih tepat.

Pada prasarana titik, seperti pelabuhan, bendungan, instalasi pengolahan, PLTP, PLTN, atau fasilitas energi lain, KGL perlu menilai kecocokan lokasi secara lebih mendalam. Parameter yang penting dapat mencakup kondisi tanah dan batuan, air tanah, mata air, bahaya geologi, struktur geologi, sedimentasi, dinamika pesisir atau sungai, kestabilan lereng, dan dampak terhadap fungsi lingkungan geologi. Untuk prasarana besar dan kegiatan strategis berbasis sumber daya geologi, KGL harus terhubung dengan investigasi teknis yang lebih rinci serta rencana pemantauan sebelum, selama, dan setelah operasi.

KGL untuk prasarana juga perlu menilai dampak prasarana terhadap lingkungan geologi. Prasarana tidak hanya menerima pengaruh kondisi geologi, tetapi juga dapat mengubah drainase, aliran permukaan, resapan, kestabilan lahan, dan pola pemanfaatan ruang. Karena itu, KGL perlu memuat rekomendasi mitigasi dan pemantauan selama tahap perencanaan, konstruksi, dan operasi.

11.8. KGL untuk Kawasan PLTP sebagai Pemanfaatan Energi Geologi

Dalam buku ini, pembahasan PLTP tidak berhenti pada kesesuaian tapak dan prasarana. PTP dijadikan contoh bagaimana KGL harus memadukan penilaian teknis kawasan dengan mekanisme pembuktian sosial-teknis melalui Program Pemantauan Partisipatif Sidik Jari Air. Program tersebut menjadi cara untuk membedakan karakter air tanah dangkal, mata air masyarakat, air hujan, air permukaan, dan manifestasi panas bumi secara terbuka.

Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi atau PLTP merupakan bentuk pemanfaatan energi geologi yang perlu ditempatkan setara dengan pembahasan tapak fasilitas strategis lain, seperti PLTN, prasarana perlindungan pesisir strategis, kawasan industri, dan TPST. Perbedaannya, PLTP memanfaatkan sistem panas bumi yang berada di bawah permukaan sehingga KGL harus membaca hubungan antara sistem geologi, struktur geologi, reservoir panas bumi, akuifer dangkal, mata air, penggunaan air masyarakat, dan penerimaan sosial.

Isu penting dalam pengelolaan kawasan PLTP adalah kekhawatiran masyarakat terhadap perubahan debit mata air, perubahan muka air tanah pada sumur penduduk, perubahan kualitas air, dan kemungkinan hubungan antara kegiatan panas bumi dengan air tanah dangkal yang dikonsumsi masyarakat. Kekhawatiran tersebut harus diperlakukan sebagai isu geologi lingkungan sekaligus isu kepercayaan sosial, sehingga tidak cukup dijawab melalui sosialisasi umum, tetapi memerlukan baseline, pemantauan berkala, pembandingan titik kontrol, uji sidik jari air, dan forum data bersama masyarakat.

KGL untuk kawasan PLTP harus membedakan secara jelas antara sistem panas bumi yang menjadi objek pemanfaatan energi dan sistem air tanah dangkal yang digunakan masyarakat. Pembedaan tersebut harus dibangun melalui model konseptual geologi-hidrogeologi, data mata air dan sumur penduduk, parameter lapangan, parameter laboratorium, serta interpretasi geokimia dan isotop apabila diperlukan. Dengan demikian, hubungan antara PLTP dan perubahan air masyarakat tidak diasumsikan, tetapi diuji berdasarkan data yang dapat ditelusuri.

Selain isu air, kawasan PLTP juga memiliki pembatas geologi lain. Banyak kawasan panas bumi berada pada lingkungan vulkanik atau tektonik aktif, sehingga KGL perlu menilai bahaya letusan gunung api bila relevan, gempa bumi, gerakan tanah, gas alami, suhu tanah, alterasi batuan, kestabilan lereng, erosi, dan dampak pembangunan jalan, tapak sumur, pipa, kolam operasi, bangunan pembangkit, serta jaringan transmisi terhadap tata air dan kestabilan lahan. Oleh karena itu, KGL untuk PLTP perlu bekerja lintas skala: regional untuk memahami sistem, kawasan untuk menilai kesesuaian ruang, dan tapak untuk menetapkan syarat teknis.

Dalam dokumen GTL, hasil KGL untuk PLTP tidak cukup berupa peta potensi sumber daya. Keluaran yang diperlukan adalah peta kesesuaian kawasan, peta pembatas utama, peta zona perlindungan mata air dan sumber air masyarakat, peta bahaya geologi, matriks rekomendasi teknis, rencana pemantauan air tanah dan mata air, serta mekanisme komunikasi risiko. Rekomendasi perlu menyatakan kegiatan yang dapat dilanjutkan, kegiatan yang harus bersyarat, bagian kawasan yang perlu dibatasi, serta data tambahan yang diperlukan sebelum keputusan tahap berikutnya.

Dengan memasukkan PLTP ke dalam kerangka KGL, buku ini menegaskan bahwa pemanfaatan energi geologi harus tetap berada dalam batas daya dukung, daya tampung, perlindungan air, keselamatan geologi, dan akuntabilitas sosial. Lampiran 14 menyediakan petunjuk teknis yang lebih rinci untuk menerjemahkan prinsip tersebut melalui penilaian kesesuaian kawasan, kajian tapak, baseline air, pemantauan partisipatif, dan tindak lanjut pengelolaan.

Tabel 11.2 Orientasi KGL untuk kawasan PLTP sebagai pemanfaatan energi geologi.

Fokus KGL PLTP	Pertanyaan teknis utama	Keluaran operasional
Sistem panas bumi dan air tanah	Apakah sistem panas bumi, akuifer dangkal, mata air, dan sumur masyarakat memiliki hubungan yang perlu dikendalikan?	Model konseptual, peta zona kehati-hatian, dan rencana pemantauan air.
Bahaya geologi dan kestabilan lahan	Bahaya apa yang dapat memengaruhi tapak sumur, pipa, pembangkit, jalan, dan permukiman sekitar?	Peta pembatas, syarat teknis, mitigasi, dan kebutuhan kajian rinci.
Tata ruang dan penerimaan sosial	Bagaimana rencana PLTP berinteraksi dengan permukiman, sumber air masyarakat, kawasan lindung, dan kegiatan eksisting?	Arahan zonasi, zona penyangga, komunikasi risiko, dan mekanisme tindak lanjut.

11.9. Parameter dan Skala Data untuk Objek KGL

Perbedaan objek KGL menentukan perbedaan parameter dan skala data. Untuk peruntukan lahan, parameter disusun untuk membedakan kesesuaian ruang secara umum. Untuk kawasan, parameter disusun untuk membaca sistem kawasan dan hubungan antaraktivitas. Untuk tapak, parameter harus mampu menjawab kelayakan lokasi secara spesifik. Untuk prasarana, parameter harus memperhatikan lokasi, lintasan, konstruksi, risiko, dan dampak perubahan ruang.

Kesesuaian skala merupakan syarat validitas. Peta berskala regional dapat membantu mengenali kecenderungan umum, tetapi tidak dapat menggantikan data tapak. Sebaliknya, data tapak yang rinci tidak selalu dapat digunakan untuk menilai seluruh wilayah. Karena itu, dokumen KGL harus menyatakan skala data, sumber data, tingkat ketelitian, dan batas penggunaan hasil analisis.

Parameter minimum yang sering digunakan meliputi tanah dan batuan, kemiringan lereng, geomorfologi, air tanah, fungsi resapan, bahaya geologi, penggunaan lahan, kawasan lindung geologi, dan nilai geologi. Parameter tambahan dapat dimasukkan sesuai objek. Kawasan industri memerlukan parameter limbah dan kerentanan air tanah. Geowisata memerlukan nilai geologi dan keselamatan pengunjung. Prasarana pesisir memerlukan dinamika pantai dan penurunan muka tanah. Kawasan PLTP memerlukan parameter tambahan mengenai sistem panas bumi, manifestasi permukaan, struktur geologi pengontrol aliran fluida, hubungan antara sistem panas bumi dan sistem air tanah dangkal, mata air masyarakat, serta parameter pemantauan sosial-lingkungan.

Pemilihan parameter harus dijelaskan dalam narasi metode. Parameter yang dipilih karena ketersediaan data saja dapat menghasilkan analisis yang lemah. Parameter harus dipilih karena relevan dengan pertanyaan keputusan. Jika data penting belum tersedia, dokumen KGL harus menyebutkan keterbatasan dan merekomendasikan pengumpulan data tambahan.

Tabel 11.3 Parameter KGL menurut objek keputusan.

Parameter	Peruntukan lahan	Kawasan	Tapak	Prasarana
Tanah dan batuan	Dasar kesesuaian umum.	Dasar zonasi internal dan prasarana kawasan.	Dasar kelayakan lokasi dan desain awal.	Dasar konstruksi, stabilitas, dan segmen kritis.
Air tanah dan resapan	Menilai fungsi air dan batas pemanfaatan.	Menilai keberlanjutan kawasan dan risiko pencemaran.	Menilai muka air tanah, arah aliran, dan perlindungan kualitas.	Menilai pengaruh konstruksi terhadap tata air.
Bahaya geologi	Membedakan area aman, bersyarat, dan terbatas.	Menilai paparan kawasan dan kebutuhan mitigasi.	Menilai bahaya lokal dan syarat teknis.	Menilai risiko pada lokasi atau lintasan.
Nilai geologi	Menentukan area perlindungan atau pemanfaatan terbatas.	Menata konservasi dan pengembangan kawasan.	Menilai perlindungan objek pada lokasi tertentu.	Menilai dampak prasarana terhadap kawasan bernilai geologi.
Penggunaan lahan	Menilai kesesuaian rencana dengan kondisi eksisting.	Menilai tekanan kawasan dan kebutuhan pengendalian.	Menilai konflik lokasi dan unsur sensitif.	Menilai koridor pengaruh dan perubahan ruang.

11.10.Kelas Kesesuaian dan Bentuk Rekomendasi

Hasil KGL perlu diterjemahkan menjadi kelas kesesuaian yang mudah dipahami. Kelas tersebut dapat berupa sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, tidak sesuai, atau memerlukan kajian rinci. Namun, nama kelas tidak boleh lebih penting daripada makna teknisnya. Setiap kelas harus memiliki kriteria, alasan, dan implikasi rekomendasi.

Kelas sesuai berarti kondisi geologi mendukung kegiatan dengan syarat umum. Kelas sesuai bersyarat berarti kegiatan masih dapat dilakukan, tetapi memerlukan syarat teknis tertentu. Kelas terbatas berarti kegiatan harus dibatasi jenis, intensitas, atau luasan pemanfaatannya. Kelas tidak sesuai berarti kegiatan tidak direkomendasikan karena pembatasnya terlalu kuat atau konsekuensi risikonya tidak dapat diterima. Kelas memerlukan kajian rinci digunakan ketika data belum cukup untuk keputusan final.

Bentuk rekomendasi harus disesuaikan dengan objek. Untuk peruntukan lahan, rekomendasi dapat berupa arahan zonasi dan jenis kegiatan. Untuk kawasan, rekomendasi dapat berupa pembagian ruang internal dan syarat pengelolaan. Untuk tapak, rekomendasi dapat berupa syarat investigasi, desain, mitigasi, atau penolakan lokasi. Untuk prasarana, rekomendasi dapat berupa penyesuaian lintasan, penguatan desain, pengendalian drainase, atau pemantauan.

Rekomendasi yang baik memiliki tiga ciri: dapat ditelusuri ke data, dapat dilaksanakan, dan dapat dipantau. Rekomendasi yang terlalu umum sulit dipakai dalam pengendalian ruang. Rekomendasi yang terlalu detail tanpa data yang cukup juga tidak tepat. KGL harus menjaga keseimbangan antara kejelasan operasional dan kehati-hatian ilmiah.

Tabel 11.4 Kelas kesesuaian dan implikasi rekomendasi KGL.

Kelas	Makna teknis	Implikasi rekomendasi
Sesuai	Kondisi geologi mendukung kegiatan dengan syarat umum.	Kegiatan dapat diarahkan dengan pemantauan dasar dan penerapan standar teknis umum.

Kelas	Makna teknis	Implikasi rekomendasi
Sesuai bersyarat	Kondisi geologi mendukung, tetapi terdapat pembatas yang dapat dikelola.	Kegiatan dapat dilakukan dengan syarat teknis, mitigasi, atau pengendalian intensitas.
Terbatas	Pembatas cukup kuat sehingga jenis, skala, atau intensitas kegiatan harus dibatasi.	Perlu pembatasan kegiatan, desain khusus, atau pengalihan sebagian fungsi ruang.
Tidak sesuai	Pembatas sangat kuat atau risiko tidak dapat diterima untuk kegiatan tertentu.	Kegiatan tidak direkomendasikan dan perlu alternatif lokasi atau perubahan rencana.
Memerlukan kajian rinci	Data belum cukup untuk keputusan final, tetapi terdapat indikasi pembatas penting.	Perlu investigasi lanjutan, validasi, atau pengumpulan data tambahan sebelum keputusan.

11.11. Hubungan KGL dengan RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan

KGL dapat digunakan pada berbagai instrumen. Dalam RTRW, KGL memberi arahan umum mengenai kawasan yang mendukung, terbatas, rawan, atau perlu dilindungi. Dalam RDTR, KGL dapat diterjemahkan menjadi ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, ketentuan khusus, dan syarat teknis. Dalam KLHS, KGL membantu menilai keberlanjutan kebijakan, rencana, dan program. Dalam dokumen lingkungan, KGL membantu menilai dampak kegiatan terhadap tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, bahaya geologi, dan kawasan bernilai geologi.

Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2021 mengatur penyelenggaraan penataan ruang yang mencakup perencanaan, pemanfaatan ruang, pengendalian pemanfaatan ruang, pengawasan, pembinaan, dan kelembagaan. Dalam kerangka tersebut, KGL dapat memberi dasar teknis agar rencana ruang dan pengendaliannya memperhitungkan kondisi lingkungan geologi.

Dalam perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, PP Nomor 22 Tahun 2021 menjadi salah satu rujukan penting karena mengatur persetujuan lingkungan, pengendalian pencemaran dan kerusakan lingkungan, serta sistem informasi lingkungan hidup. KGL dapat memperkaya substansi dokumen lingkungan melalui penilaian kerentanan air tanah, kestabilan lahan, risiko geologi, fungsi resapan, dan kebutuhan pemantauan.

Hubungan KGL dengan instrumen kebijakan harus dijelaskan dalam dokumen. Hasil KGL untuk RTRW tidak sama kedalamannya dengan KGL untuk AMDAL tapak. Hasil KGL untuk RDTR harus lebih siap diterjemahkan ke dalam pengaturan zonasi. Kejelasan ini penting agar hasil KGL digunakan sesuai tujuan dan tidak melampaui batas ketelitiannya.

11.12. Kesalahan Umum dalam KGL untuk Objek Keputusan

Terdapat beberapa kesalahan umum dalam KGL. Kesalahan pertama adalah menggunakan parameter yang sama untuk semua objek keputusan. Padahal peruntukan lahan, kawasan, tapak, dan prasarana memerlukan kedalaman serta orientasi parameter yang berbeda. Kesalahan kedua adalah menggunakan peta berskala umum untuk keputusan tapak tanpa verifikasi lapangan. Kesalahan ketiga adalah memberi skor dan bobot tanpa dasar penalaran geologi yang jelas.

Kesalahan lain adalah menghasilkan peta kesesuaian tanpa menjelaskan pembatas utama. Peta dapat terlihat rapi, tetapi tidak cukup berguna apabila pembaca tidak mengetahui alasan teknis di balik kelas kesesuaian. Kesalahan berikutnya adalah memberi rekomendasi yang terlalu umum, misalnya hanya menyatakan “perlu pengelolaan lingkungan” tanpa menyebutkan syarat teknis yang harus dilakukan.

KGL juga sering menjadi lemah apabila tidak membedakan antara data, interpretasi, dan rekomendasi. Data adalah fakta atau informasi dasar. Interpretasi adalah penafsiran berdasarkan metode. Rekomendasi adalah arahan tindakan berdasarkan interpretasi. Ketiganya harus dipisahkan secara jelas agar dokumen dapat diperiksa dan dipertanggungjawabkan.

Untuk menghindari kesalahan tersebut, KGL harus menyatakan tujuan kajian, objek keputusan, parameter, skala, metode, keterbatasan, hasil, dan rekomendasi secara terbuka. Validasi lapangan dan pemeriksaan mutu teknis menjadi bagian penting sebelum hasil digunakan dalam keputusan publik.

11.13. Contoh Pemanfaatan Peta Air Tanah dan Peta KRB dalam Dokumen Lingkungan dan Keputusan Pemanfaatan Ruang

Dalam pemanfaatan ruang dan penyusunan dokumen lingkungan, peta KRB Geologi perlu ditempatkan sebagai data dasar bahaya yang menunjukkan tingkat kerawanan suatu kawasan. Namun, keputusan mengenai peruntukan ruang, intensitas kegiatan, syarat teknis, mitigasi, dan pemantauan memerlukan KGL. Melalui KGL, peta KRB Geologi tidak hanya dibaca sebagai informasi bahaya, tetapi diintegrasikan dengan data tanah dan batuan, air tanah, bentuk lahan, penggunaan lahan, fungsi resapan, sumber daya geologi, serta data pendukung lainnya. Hasil integrasi tersebut menjadi dasar untuk menentukan apakah suatu kegiatan dapat dilakukan, dapat dilakukan dengan syarat, perlu dibatasi, memerlukan kajian rinci, atau tidak direkomendasikan.

Kajian Geologi Lingkungan untuk dokumen lingkungan dan keputusan pemanfaatan ruang perlu menggunakan peta tematik yang dapat menjelaskan daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, risiko, serta syarat pengelolaan. Dua jenis peta yang sangat penting dalam konteks ini adalah peta air tanah dan peta Kawasan Rawan Bencana Geologi. Peta air tanah menjelaskan kondisi hidrogeologi, fungsi imbuhan, potensi dan keterbatasan pemanfaatan air tanah, kerentanan kualitas air, serta kebutuhan pengendalian. Sementara itu, peta KRB Geologi menjelaskan tingkat bahaya geologi yang harus diperhitungkan dalam penentuan lokasi, intensitas, jenis kegiatan, dan syarat mitigasi.

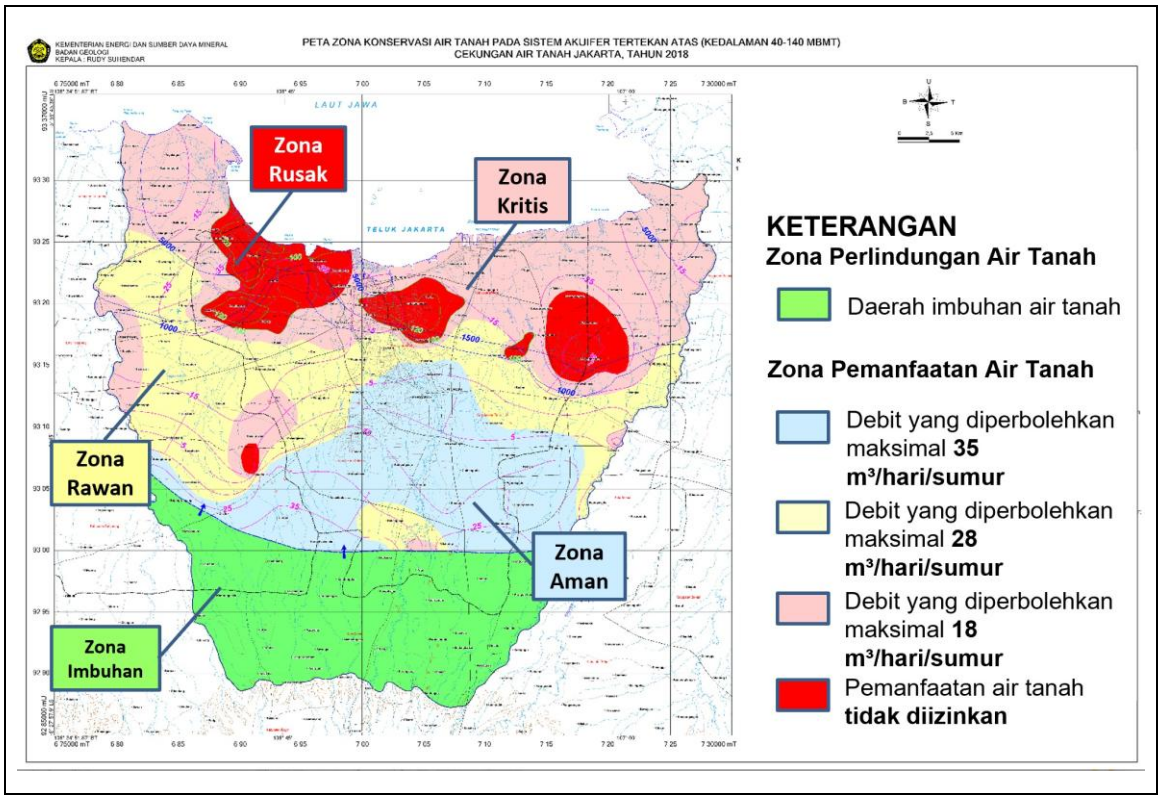
Dalam dokumen lingkungan seperti KLHS, AMDAL, UKL-UPL, dan dokumen pengelolaan lingkungan lainnya, peta air tanah diperlukan untuk menilai apakah suatu kebijakan, rencana, program, atau kegiatan berpotensi menurunkan kuantitas dan kualitas air tanah. Informasi yang dapat digunakan antara lain zona imbuhan, zona pemanfaatan, muka air tanah, arah aliran air tanah, produktivitas akuifer, kualitas air tanah, indikasi intrusi air laut, pencemaran, serta hubungan antara pengambilan air tanah dan penurunan tanah. Dengan demikian, dokumen lingkungan tidak cukup hanya menyebut kebutuhan air, tetapi juga harus menjelaskan sumber air, kondisi akuifer, batas pemanfaatan, potensi dampak, dan rencana pemantauan.

Contoh penting dapat dilihat pada pengelolaan air tanah Cekungan Air Tanah Jakarta. Permasalahan utama air tanah Jakarta berkaitan dengan pengambilan air tanah berlebih, penurunan tanah, intrusi air laut, dan pencemaran air tanah. Peta zona konservasi air tanah CAT Jakarta membagi wilayah ke dalam zona imbuhan, zona aman, zona rawan, zona kritis, dan zona rusak. Pembagian zona tersebut digunakan sebagai instrumen pengendalian pengambilan air tanah, termasuk pembatasan debit pengambilan atau larangan pemanfaatan air tanah pada zona tertentu. Dengan demikian, peta air tanah tidak hanya berfungsi sebagai peta sumber daya, tetapi juga sebagai dasar pengendalian ruang dan pengelolaan lingkungan.

Selain peta zona konservasi air tanah, informasi kualitas air tanah juga penting untuk menilai kerentanan lingkungan. Pada wilayah pesisir, salah satu isu utama adalah intrusi air laut. Studi pada sistem akuifer tertekan CAT Jakarta menunjukkan bahwa indikasi intrusi air laut dapat dikenali melalui kombinasi parameter hidrokimia dan hidroisotop, antara lain TDS, rasio Na/Cl, rasio Cl/HCO_3, serta komposisi isotop. Air tanah yang terindikasi intrusi air laut dijumpai pada beberapa lokasi di Jakarta bagian utara dan sekitarnya, seperti Kapuk, Tongkol, Sunter, Daan Mogot, dan Cakung. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penilaian dampak lingkungan terhadap air tanah tidak boleh hanya didasarkan pada satu parameter, tetapi perlu menggunakan pendekatan hidrogeologi yang terpadu.

Dalam keputusan pemanfaatan ruang, peta air tanah dapat digunakan untuk menyusun

syarat teknis. Pada zona imbuhan, kegiatan yang mengurangi resapan perlu dibatasi dan diwajibkan menyediakan ruang terbuka, sumur resapan, kolam retensi, atau teknologi imbuhan buatan sesuai kondisi setempat. Pada zona rawan dan kritis, pengambilan air tanah perlu dikendalikan secara ketat dan kegiatan yang berpotensi mencemari akuifer harus memenuhi persyaratan pengelolaan limbah yang lebih kuat. Pada zona rusak, pemanfaatan air tanah untuk kegiatan baru sebaiknya tidak direkomendasikan dan perlu diarahkan pada sumber air alternatif, pemulihan muka air tanah, serta pengawasan kualitas air.

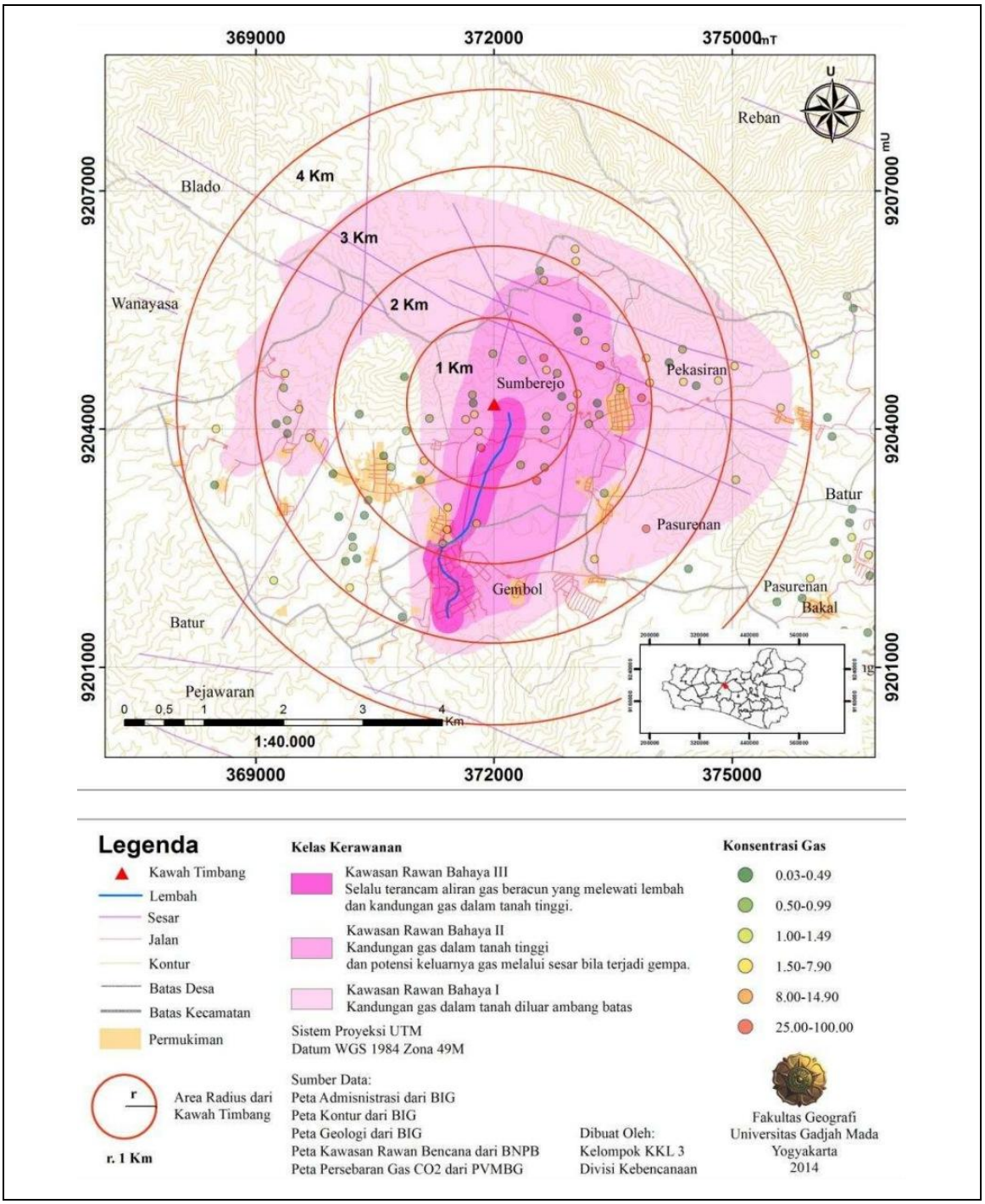


Gambar 11.3 Contoh Peta Zona Konservasi Air Tanah CAT Jakarta sebagai dasar dokumen lingkungan dan pengendalian pemanfaatan ruang. Peta Zona Konservasi Air Tanah CAT Jakarta memperlihatkan pembagian zona perlindungan dan zona pemanfaatan air tanah berdasarkan keterdapatan dan potensi air tanah, perubahan kondisi kualitas dan muka air tanah, perubahan lingkungan air tanah seperti penurunan tanah dan intrusi air laut, serta prioritas pemanfaatan air tanah. Dalam dokumen lingkungan, peta ini dapat digunakan untuk menentukan batas pengambilan air tanah, kewajiban penggunaan air perpipaan, kebutuhan pemantauan muka air tanah, pemantauan kualitas air, perlindungan zona imbuhan, serta pengendalian kegiatan yang berpotensi mencemari akuifer.

Peta KRB Geologi memiliki fungsi yang berbeda, tetapi sama pentingnya. Peta ini digunakan untuk menilai apakah suatu rencana kegiatan berada pada wilayah yang memiliki bahaya geologi tertentu. Dalam dokumen lingkungan, peta KRB membantu menilai potensi dampak bahaya terhadap kegiatan dan sebaliknya, yaitu apakah kegiatan yang direncanakan dapat meningkatkan paparan dan kerentanan masyarakat. Dalam keputusan pemanfaatan ruang, peta KRB dapat digunakan untuk menetapkan kawasan yang harus dihindari, kawasan yang dapat dimanfaatkan secara terbatas, kawasan yang memerlukan syarat mitigasi, serta kawasan yang membutuhkan kajian rinci.

Contoh yang sangat kuat adalah Peta KRB Kawah Timbang di Dataran Tinggi Dieng. Pada kawasan ini, bahaya utama bukan hanya letusan atau material vulkanik yang mudah

terlihat, tetapi gas CO_2 yang tidak berwarna dan tidak berbau. Peta KRB Kawah Timbang membagi wilayah menjadi KRB III, KRB II, dan KRB I. KRB III merupakan kelas tertinggi yang berkaitan dengan lembah sebagai jalur gas CO_2; KRB II menunjukkan wilayah dengan kandungan gas dalam tanah tinggi dan potensi keluarnya gas dari sesar; sedangkan KRB I menunjukkan wilayah yang lebih jauh dari sumber gas dan secara topografi lebih tinggi, tetapi tetap memerlukan kewaspadaan.



Gambar 11.4. Contoh Peta Kawasan Rawan Bencana Kawah Timbang, Dieng, sebagai dasar keputusan pemanfaatan ruang dan dokumen lingkungan.

Peta KRB Kawah Timbang menunjukkan pembagian kawasan rawan bencana berdasarkan tingkat bahaya gas vulkanik. KRB III menjadi dasar pengendalian sangat ketat karena berhubungan dengan jalur aliran gas CO_2. KRB II menjadi dasar pembatasan kegiatan karena memiliki potensi gas dari zona sesar. KRB I menunjukkan kawasan dengan tingkat potensi lebih rendah, tetapi tetap membutuhkan kesiapsiagaan. Dalam dokumen lingkungan, peta ini dapat digunakan untuk menilai kelayakan rencana kegiatan, menentukan zona larangan atau zona terbatas, merancang jalur evakuasi, menempatkan rambu peringatan, dan menyusun rencana pemantauan.

Integrasi peta air tanah dan peta KRB Geologi diperlukan karena keputusan lingkungan dan pemanfaatan ruang sering menghadapi lebih dari satu faktor pembatas. Suatu kawasan dapat memiliki potensi pengembangan yang baik dari sisi akses dan penggunaan lahan, tetapi berada pada zona air tanah rawan atau zona bahaya geologi. Sebaliknya, suatu kawasan dapat berada di luar bahaya utama, tetapi memiliki kerentanan air tanah tinggi sehingga tidak sesuai untuk kegiatan yang berisiko mencemari akuifer. Karena itu, KGL perlu membaca kedua peta tersebut secara terpadu.

Dalam KLHS, integrasi ini dapat digunakan untuk menilai alternatif kebijakan, rencana, atau program. Misalnya, rencana pengembangan kawasan baru perlu diuji apakah berada pada zona imbuhan air tanah, zona air tanah rawan, atau kawasan rawan bencana geologi. Dalam AMDAL atau UKL-UPL, integrasi tersebut dapat digunakan untuk menentukan rona awal lingkungan, dampak penting hipotetik, rencana pengelolaan lingkungan, rencana pemantauan lingkungan, dan kelayakan lingkungan. Dalam RDTR dan pengaturan zonasi, hasil integrasi dapat diterjemahkan menjadi ketentuan kegiatan, ketentuan intensitas, ketentuan prasarana, dan ketentuan khusus.

Dengan pendekatan tersebut, peta air tanah dan peta KRB Geologi tidak diperlakukan sebagai lampiran pasif. Keduanya menjadi dasar keputusan. Peta air tanah menjawab pertanyaan tentang kemampuan dan batas sistem hidrogeologi, sedangkan peta KRB menjawab pertanyaan tentang tingkat bahaya dan syarat keselamatan ruang. Jika keduanya dibaca bersama, dokumen lingkungan dan keputusan pemanfaatan ruang menjadi lebih kuat karena mempertimbangkan kuantitas air, kualitas air, fungsi resapan, risiko pencemaran, bahaya geologi, paparan manusia, dan kebutuhan mitigasi.

Tabel 11.5 Contoh Pemanfaatan Peta Air Tanah dan Peta KRB dalam Dokumen Lingkungan dan Keputusan Ruang

Jenis Peta	Informasi Utama	Penggunaan dalam Dokumen Lingkungan	Implikasi Keputusan Pemanfaatan Ruang
Peta Zona Konservasi Air Tanah	Zona imbuhan, zona aman, zona rawan, zona kritis, zona rusak.	Menilai sumber air, batas pengambilan air tanah, potensi penurunan muka air tanah, dan kebutuhan pemantauan.	Perlindungan zona imbuhan, pembatasan debit, larangan pengambilan pada zona rusak, dan kewajiban sumber air alternatif.
Peta Kerentanan/Kualitas Air Tanah	Kerentanan pencemaran, salinitas, intrusi air laut, kualitas kimia air tanah.	Menentukan potensi dampak pencemaran, parameter RKL-RPL, dan kebutuhan pengendalian limbah.	Pembatasan kegiatan berisiko, peningkatan standar pengolahan limbah, pemantauan kualitas air tanah, dan pengaturan lokasi kegiatan.
Peta KRB Geologi	Tingkat bahaya geologi, zona bahaya tinggi, sedang, rendah, dan jalur bahaya.	Menilai risiko lokasi kegiatan, kebutuhan mitigasi, kesiapsiagaan, dan rencana tanggap darurat.	Penghindaran zona bahaya tinggi, pembatasan kegiatan, jalur evakuasi, rambu peringatan, dan ketentuan khusus zonasi.

Jenis Peta	Informasi Utama	Penggunaan dalam Dokumen Lingkungan	Implikasi Keputusan Pemanfaatan Ruang
Peta Sintesis KGL	Integrasi air tanah, bahaya geologi, tanah-batuan, lereng, penggunaan lahan, dan faktor pembatas lain.	Menyusun kesimpulan kelayakan lingkungan, syarat pengelolaan, dan rencana pemantauan.	Kelas kesesuaian, matriks ITBX, rekomendasi teknis, dan pertimbangan teknis GTL.

Contoh CAT Jakarta dan Kawah Timbang menunjukkan bahwa peta tematik geologi lingkungan harus diterjemahkan menjadi tindakan. Pada kasus CAT Jakarta, peta air tanah menjadi dasar pembatasan pengambilan air tanah, perlindungan imbuhan, pemantauan kualitas air, dan pengendalian intrusi air laut. Pada kasus Kawah Timbang, peta KRB menjadi dasar pengendalian aktivitas, pembatasan pemanfaatan ruang, penentuan jalur evakuasi, dan kesiapsiagaan terhadap bahaya gas vulkanik. Dengan demikian, Bab 11 menegaskan bahwa KGL berfungsi sebagai jembatan antara peta tematik, dokumen lingkungan, dan keputusan pemanfaatan ruang yang dapat dilaksanakan.

11.13 Kesimpulan Bab

Kajian Geologi Lingkungan untuk peruntukan lahan, kawasan, tapak, dan prasarana merupakan bagian penting dari operasionalisasi GTL. KGL membantu menerjemahkan kondisi lingkungan geologi menjadi kelas kesesuaian, faktor pembatas, syarat teknis, dan rekomendasi yang dapat digunakan dalam tata ruang, dokumen lingkungan, perizinan, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Bab ini menegaskan bahwa KGL harus disesuaikan dengan objek keputusan. Peruntukan lahan membutuhkan arahan umum. Kawasan membutuhkan penilaian sistem kawasan. Tapak membutuhkan ketelitian lokal. Prasarana membutuhkan penilaian lokasi, lintasan, konstruksi, risiko, dan dampak terhadap lingkungan geologi.

Kekuatan KGL terletak pada keterkaitan antara data, metode, peta, penalaran geologi, dan rekomendasi. Skoring, pembobotan, dan analisis spasial dapat membantu, tetapi tidak boleh menggantikan penilaian ilmiah dan validasi lapangan. Rekomendasi KGL harus dapat ditelusuri, dilaksanakan, dan dipantau.

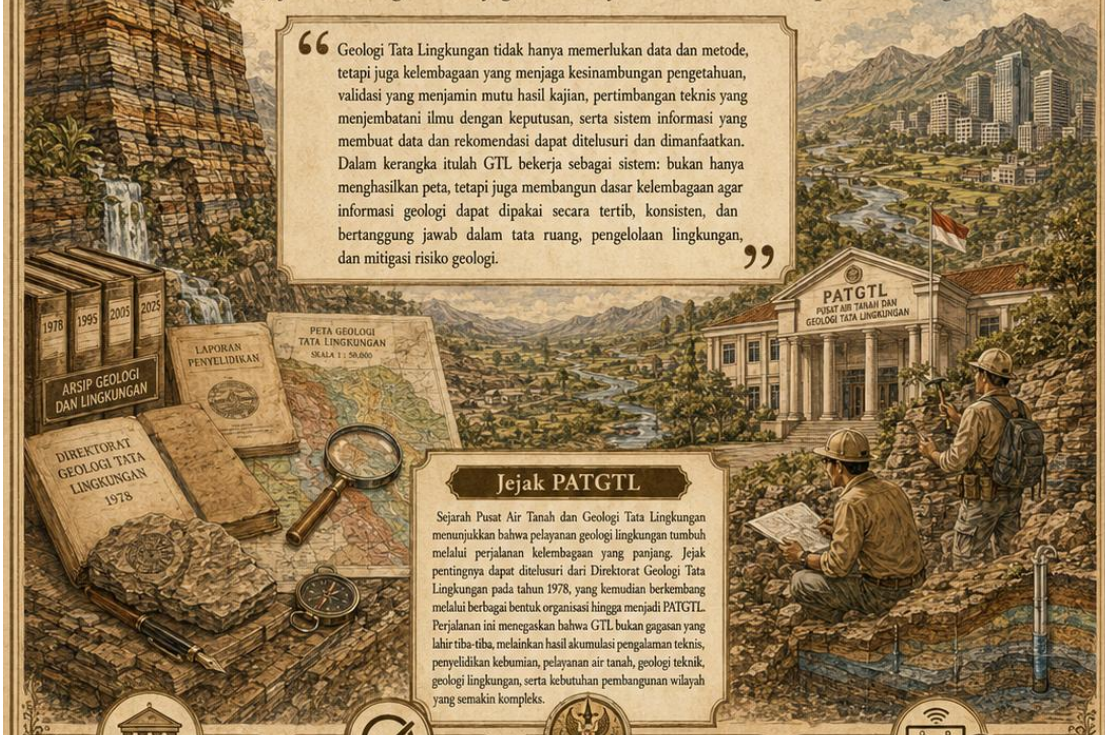
Dengan demikian, Bab 11 menjadi penghubung antara metodologi KGL dan kebutuhan kelembagaan GTL. Penambahan pembahasan PLTP memperlihatkan bahwa KGL tidak hanya bekerja pada peruntukan umum, tetapi juga pada pemanfaatan energi geologi yang memiliki konsekuensi terhadap air tanah, mata air, bahaya geologi, penerimaan masyarakat, dan kebutuhan pemantauan jangka panjang. Hasil analisis yang baik masih memerlukan validasi, pertimbangan teknis, sistem informasi, dan tata kelola agar dapat digunakan secara sahih dalam keputusan publik. Hal tersebut menjadi pokok pembahasan Bab 12.

BAB 12

Kelembagaan, Validasi, Pertimbangan Teknis, dan Sistem Informasi GTL

Jejak kelembagaan menjaga mutu kajian dan ketertiban keputusan ruang

> Geologi Tata Lingkungan tidak hanya memerlukan data dan metode, tetapi juga kelembagaan yang menjaga kesinambungan pengetahuan, validasi yang menjamin mutu hasil kajian, pertimbangan teknis yang menjembatani ilmu dengan keputusan, serta sistem informasi yang membuat data dan rekomendasi dapat ditelusuri dan dimanfaatkan. Dalam kerangka itulah GTL bekerja sebagai sistem: bukan hanya menghasilkan peta, tetapi juga membangun dasar kelembagaan agar informasi geologi dapat dipakai secara tertib, konsisten, dan bertanggung jawab dalam tata ruang, pengelolaan lingkungan, dan mitigasi risiko geologi.

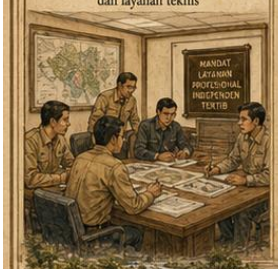


Jejak PATGTL

Sejarah Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan menunjukkan bahwa pelayanan geologi lingkungan tumbuh melalui perjalanan kelembagaan yang panjang. Jejak pentingnya dapat ditelusuri dari Direktorat Geologi Tata Lingkungan pada tahun 1978, yang kemudian berkembang melalui berbagai bentuk organisasi hingga menjadi PATGTL. Perjalanan ini menegaskan bahwa GTL bukan gagasan yang lahir tiba-tiba, melainkan hasil akumulasi pengalaman teknis, penyelidikan kebumian, pelayanan air tanah, geologi teknik, geologi lingkungan, serta kebutuhan pembangunan wilayah yang semakin kompleks.

1. KELEMBAGAAN

Menjaga mandat, kesinambungan, dan layanan teknis



2. VALIDASI

Memeriksa data, metode, skala, dan kelayakan rekomendasi

3. PERTIMBANGAN TEKNIS

Menerjemahkan hasil kajian menjadi dasar keputusan

4. SISTEM INFORMASI GTL

Menyimpan, menelusuri, dan menyebarluaskan informasi geologi

Lembaga yang kuat, kajian yang sahih, dan informasi yang tertata adalah dasar keputusan ruang yang bertanggung jawab.

BAB 12

Kelembagaan, Validasi, Pertimbangan Teknis, dan Sistem Informasi GTL

12.1 Pengantar

Bab 11 telah menjelaskan bagaimana KGL diterapkan untuk peruntukan lahan, kawasan, tapak, dan prasarana. Namun, hasil analisis tidak otomatis menjadi keputusan yang dapat digunakan. Dalam tata kelola publik, hasil teknis harus melewati mekanisme kelembagaan, validasi, penyusunan pertimbangan teknis, penyimpanan data, pemutakhiran, dan akuntabilitas. Bab 12 membahas rangkaian tersebut sebagai bagian dari sistem GTL.

Dalam kasus PLTP, Bab 12 menjadi penting karena validasi teknis dan sistem informasi tidak hanya memeriksa kecukupan laporan, tetapi juga memastikan data debit, MAT, kualitas air, curah hujan, titik kontrol, keluhan masyarakat, dan tindak lanjut dikelola sebagai basis data yang dapat diaudit. Dengan demikian, pertimbangan teknis GTL dapat membedakan indikasi, dugaan, dan bukti dampak secara proporsional.

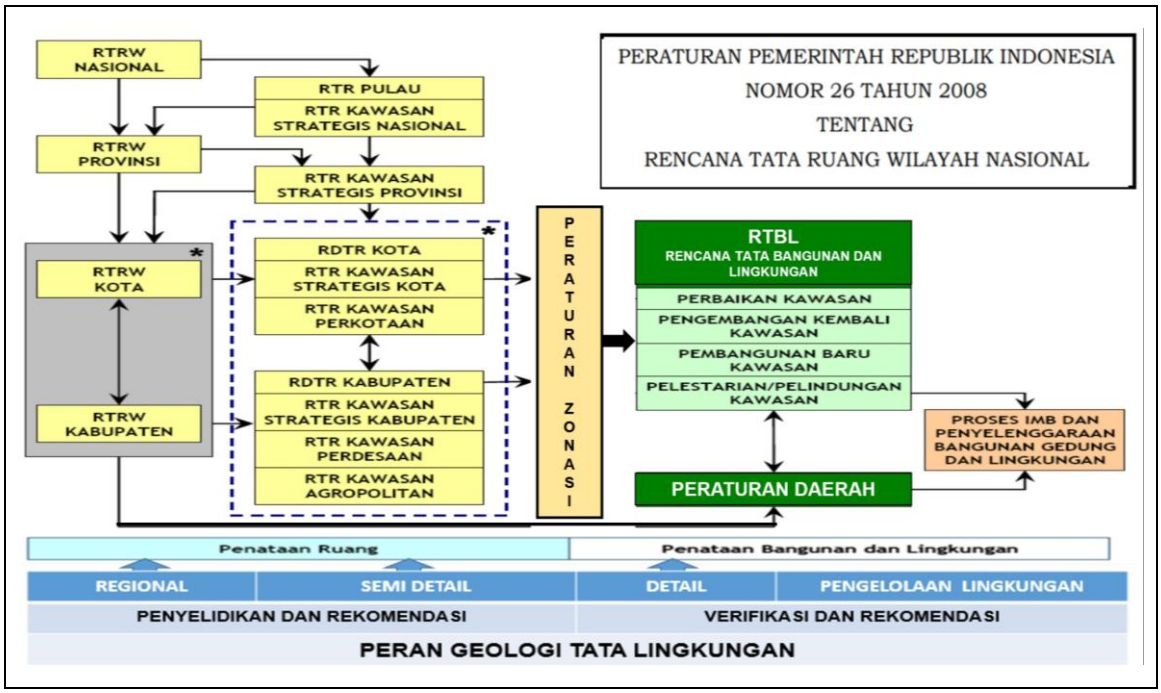
Kelembagaan GTL diperlukan karena isu lingkungan geologi bersifat lintas sektor. Data geologi dapat berasal dari lembaga teknis geologi, hidrogeologi, kebencanaan, tata ruang, lingkungan hidup, pemerintah daerah, perguruan tinggi, atau konsultan. Keputusan penggunaannya dapat berada pada proses penataan ruang, persetujuan lingkungan, perizinan, pengendalian pemanfaatan ruang, perlindungan kawasan, atau pembangunan prasarana. Tanpa kelembagaan yang jelas, data dan kajian dapat berjalan sendiri-sendiri.

Validasi menjadi unsur penting karena hasil KGL dan Kajian GTL sering dipakai untuk keputusan yang memiliki konsekuensi ruang, keselamatan, lingkungan, dan hukum. Validasi memastikan bahwa data cukup, metode tepat, skala sesuai, peta konsisten, dan rekomendasi dapat ditelusuri. Pertimbangan Teknis GTL kemudian menjadi bentuk keluaran yang dapat digunakan oleh pengambil keputusan.

Sistem Informasi GTL dibutuhkan agar data, peta, hasil kajian, validasi, rekomendasi, dan riwayat pemutakhiran tidak hilang sebagai dokumen terpisah. Sistem informasi membantu menjaga kesinambungan pengetahuan, keterlacakan keputusan, serta hubungan antara penyelidikan geologi, rekomendasi teknis, penataan ruang, penataan bangunan, peraturan zonasi, dan pengelolaan lingkungan.

Gambar 12.1. Alur kelembagaan, validasi, Pertimbangan Teknis GTL, dan Sistem Informasi GTL.

Kedudukan GTL dalam sistem penataan ruang dan penataan bangunan dapat digambarkan melalui bagan alir pada Gambar 12.2. Bagan alir ini menunjukkan bahwa GTL tidak hanya berperan pada tahap penyelidikan regional, tetapi juga pada skala semi detail, detail, verifikasi, rekomendasi, serta pengelolaan lingkungan. Dengan demikian, GTL perlu hadir sejak penyusunan RTRW dan RDTR hingga penyusunan RTBL, peraturan daerah, proses perizinan bangunan, serta penyelenggaraan bangunan gedung dan lingkungan.



Gambar 12.2. Bagan Alir yang berkaitan dengan peran Geologi Tata Lingkungan dalam Sistem Penataan Ruang, Penataan Bangunan, dan Pengelolaan Lingkungan. Bagan Alir ini menegaskan bahwa GTL merupakan simpul teknis antara sistem rencana tata ruang dan sistem pengelolaan lingkungan. Pada skala regional, GTL memberi dasar penyelidikan dan rekomendasi bagi RTRW nasional, provinsi, kabupaten, dan kota. Pada skala semi detail, GTL mendukung RDTR, RTR kawasan strategis, dan peraturan zonasi. Pada skala detail, GTL dapat menjadi dasar verifikasi dan rekomendasi untuk RTBL, peraturan daerah, serta proses perizinan bangunan. Hubungan ini penting karena keputusan pembangunan yang aman tidak cukup hanya mengikuti status ruang, tetapi harus memperhitungkan kondisi geologi, daya dukung, faktor pembatas, bahaya geologi, dan kebutuhan pengelolaan lingkungan.

Dengan demikian, Bab 12 ini menjadi dasar tata kelola bagi penggunaan seluruh lampiran teknis. Setiap petunjuk teknis dalam Lampiran 1 sampai Lampiran 17 harus dibaca bersama mekanisme validasi, pertimbangan teknis, sistem informasi, metadata, pemantauan, dan pemutakhiran agar hasil KGL tidak hanya menjadi laporan teknis, tetapi dapat menjadi dasar keputusan yang dapat dipertanggungjawabkan.

12.2 Jejak Kelembagaan Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan

Perkembangan Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan (PATGTL) tidak dapat dilepaskan dari sejarah panjang kelembagaan geologi di Indonesia. Akar teknisnya dapat ditelusuri sejak masa penyelidikan geologi, hidrogeologi, geologi teknik, dan pencatatan air tanah pada masa Hindia Belanda. Namun, sebagai jejak kelembagaan modern yang secara eksplisit membawa nama Geologi Tata Lingkungan, tonggak pentingnya dapat ditempatkan pada pembentukan Direktorat Geologi Tata Lingkungan pada akhir dekade 1970-an.

Dalam sejarah kelembagaan Badan Geologi, nama Direktorat Geologi Tata Lingkungan telah muncul pada fase reorganisasi Departemen Pertambangan dan Energi. Pada periode tersebut, urusan geologi tidak lagi hanya dipahami sebagai pemetaan geologi dasar dan penyelidikan sumber daya, tetapi mulai berkembang ke arah pelayanan teknis yang lebih luas, termasuk geologi teknik, air tanah, lingkungan geologi, bahaya geologi, dan kebutuhan pembangunan wilayah.

Tonggak penting terjadi pada tahun 1978. Melalui reorganisasi kelembagaan, Direktorat Geologi dikembangkan menjadi beberapa unit utama, yaitu Direktorat Sumber Daya Mineral, Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Direktorat Vulkanologi, dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Dengan demikian, tahun 1978 dapat dibaca sebagai fase penting ketika Geologi Tata Lingkungan memperoleh tempat kelembagaan yang lebih jelas sebagai salah satu direktorat teknis dalam struktur geologi nasional.

Jejak tersebut tidak hanya tampak dalam struktur organisasi, tetapi juga dalam dokumen dan layanan teknis. Katalog Perpustakaan Badan Geologi mencatat adanya terbitan tahun 1978 yang diterbitkan oleh Direktorat Geologi Tata Lingkungan. Selain itu, sejarah Laboratorium Air juga menunjukkan bahwa pelayanan analisis air telah berkembang sejak unit ini masih bernama Direktorat Geologi Tata Lingkungan pada tahun 1978, ketika dikenal sebagai Seksi Analisis Air. Hal ini memperlihatkan bahwa sejak awal, Geologi Tata Lingkungan tidak hanya berhubungan dengan peta dan tata ruang, tetapi juga dengan air tanah, kualitas air, dan fungsi lingkungan geologi.

Dalam perjalanan berikutnya, mandat kelembagaan terus berkembang. Direktorat Geologi Tata Lingkungan menjadi ruang tumbuh bagi bidang-bidang teknis yang kelak menjadi inti PATGTL, terutama geologi lingkungan, geologi teknik, hidrogeologi, analisis air, kawasan lindung geologi, serta rekomendasi pemanfaatan ruang. Pada fase ini, geologi mulai semakin kuat diposisikan sebagai dasar teknis untuk pembangunan wilayah, pengelolaan lingkungan, mitigasi bahaya geologi, dan perlindungan fungsi air tanah.

Perubahan kelembagaan selanjutnya membawa unit ini melalui beberapa nomenklatur, antara lain Pusat Lingkungan Geologi, Pusat Sumber Daya Air Tanah dan Geologi Lingkungan, hingga menjadi Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan. Perubahan nama tersebut tidak sekadar administratif, tetapi menunjukkan perkembangan mandat: dari penyelidikan dan penyediaan data geologi lingkungan menuju pelayanan teknis yang lebih operasional bagi tata ruang, pengelolaan lingkungan, konservasi geologi, mitigasi risiko geologi, dan pertimbangan teknis pembangunan.

Dengan demikian, PATGTL dapat dipahami sebagai kelanjutan kelembagaan dari tradisi panjang Direktorat Geologi Tata Lingkungan. Jejak tahun 1978 penting karena menandai hadirnya Geologi Tata Lingkungan sebagai unit teknis yang berdiri dalam struktur geologi nasional. Dari titik inilah berkembang tradisi kerja yang menghubungkan data geologi, air tanah, geologi teknik, kualitas lingkungan, bahaya geologi, dan kebutuhan penataan ruang.

Dalam konteks buku ini, sejarah tersebut memberi dasar bahwa Geologi Tata Lingkungan bukan istilah yang lahir tiba-tiba. GTL merupakan hasil perkembangan panjang praktik kelembagaan, pengalaman lapangan, pelayanan teknis, dan kebutuhan pembangunan Indonesia. Karena itu, penguatan GTL pada masa kini sebaiknya dipahami sebagai kelanjutan dari mandat

historis PATGTL: membaca bumi secara ilmiah, menerjemahkannya menjadi informasi yang operasional, dan menghadirkannya sebagai dasar keputusan ruang dan lingkungan yang bertanggung jawab.

12.3 Kebutuhan Kelembagaan GTL

GTL memerlukan kelembagaan karena bekerja pada pertemuan antara ilmu, regulasi, dan keputusan ruang. Kelembagaan tidak hanya berarti keberadaan organisasi, tetapi juga pembagian peran, alur kerja, kewenangan teknis, standar data, prosedur validasi, mekanisme koordinasi, dan sistem penyimpanan informasi. Semua unsur tersebut diperlukan agar GTL dapat berfungsi secara stabil.

Dalam praktik, satu keputusan ruang dapat memerlukan data geologi dasar, informasi air tanah, data bahaya geologi, data kawasan lindung, data penggunaan lahan, dan informasi rencana pembangunan. Data tersebut tidak selalu berada pada satu institusi. Karena itu, kelembagaan GTL harus mampu menghubungkan unit penyedia data, unit penyusun kajian, unit validasi, dan unit pengguna hasil.

Kelembagaan GTL juga diperlukan untuk menjaga mutu. Tanpa standar kelembagaan, kajian dapat berbeda-beda kualitasnya. Ada kajian yang sangat rinci, tetapi tidak sesuai tujuan. Ada kajian yang sederhana, tetapi digunakan untuk keputusan besar. Ada peta yang menarik secara visual, tetapi tidak jelas skala dan metodenya. Kelembagaan memberi rambu agar hasil KGL dan Kajian GTL dapat dibandingkan, diperiksa, dan digunakan secara bertanggung jawab.

Dalam kerangka pemerintahan, kelembagaan GTL sebaiknya dipahami sebagai mekanisme koordinatif dan teknis. GTL tidak mengambil alih kewenangan sektor. Sebaliknya, GTL memperkuat sektor dengan menyediakan dasar geologi yang teruji untuk penataan ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, konservasi geologi, perizinan, dan pengendalian pembangunan.

12.4 Peran Unit Teknis, Pemerintah Daerah, dan Pemangku Kepentingan

Unit teknis geologi memiliki peran penting dalam penyediaan data, penyusunan pedoman, pemeriksaan metode, dan pemberian pertimbangan teknis. Unit ini dapat berada pada tingkat pusat maupun daerah sesuai kewenangan dan kapasitas. Perannya bukan hanya menghasilkan peta, tetapi juga memastikan bahwa peta dan kajian dipahami secara benar oleh pengguna.

Pemerintah daerah memiliki posisi strategis karena banyak keputusan ruang dan pembangunan terjadi pada wilayah administratif daerah. RTRW, RDTR, perizinan berusaha, pengendalian pemanfaatan ruang, pengelolaan kawasan, dan pelayanan masyarakat sangat bergantung pada kemampuan daerah menggunakan informasi geologi. Karena itu, penguatan kapasitas daerah menjadi bagian penting dari kelembagaan GTL.

Pemangku kepentingan lain meliputi pemrakarsa kegiatan, konsultan, perguruan tinggi, masyarakat, pengelola kawasan, dan lembaga nonpemerintah. Mereka dapat berperan dalam penyediaan data, pelaksanaan kajian, pemantauan, maupun pengawasan sosial. Namun, peran tersebut perlu ditempatkan dalam mekanisme yang jelas agar data dan rekomendasi yang dihasilkan tetap dapat diverifikasi.

Koordinasi antarpihak harus diarahkan pada tujuan yang konkret: data yang dapat diakses sesuai kewenangan, metode yang seragam, rekomendasi yang konsisten, dan keputusan yang dapat dipertanggung jawabkan. GTL tidak akan kuat apabila hanya menjadi laporan teknis; GTL harus menjadi sistem kerja bersama yang terhubung dengan keputusan publik.

12.5 Validasi dalam GTL

Validasi adalah proses pemeriksaan untuk memastikan bahwa hasil KGL atau Kajian GTL memenuhi standar kecukupan data, kesesuaian metode, ketepatan skala, konsistensi peta, dan kelayakan rekomendasi. Validasi tidak sama dengan menyusun ulang seluruh kajian, tetapi memeriksa apakah kajian layak digunakan sebagai dasar keputusan.

Validasi diperlukan terutama ketika kajian disusun oleh pihak lain atau digunakan untuk keputusan yang berkonsekuensi besar. Kajian kawasan industri, TPST, tapak fasilitas

strategis, prasarana besar, kawasan rawan bencana, atau kawasan bernilai geologi perlu diperiksa lebih ketat. Semakin besar risiko dan dampak keputusan, semakin kuat kebutuhan validasi.

Aspek yang diperiksa dalam validasi meliputi sumber data, tahun data, skala peta, metode analisis, pemilihan parameter, skoring, pembobotan, hasil analisis spasial, konsistensi peta, hasil verifikasi lapangan, dan keterlacakan rekomendasi. Pemeriksa juga perlu menilai apakah rekomendasi terlalu lemah, terlalu umum, atau terlalu pasti dibandingkan data yang tersedia.

Validasi harus menghasilkan catatan yang jelas. Hasil validasi dapat menyatakan kajian dapat digunakan, dapat digunakan dengan perbaikan, memerlukan data tambahan, memerlukan kajian rinci, atau belum layak digunakan sebagai dasar keputusan. Catatan ini menjadi bagian dari akuntabilitas teknis.

Tabel 12.1. Pemeriksaan mutu validasi KGL dan Kajian GTL.

Aspek validasi	Pertanyaan pemeriksaan	Kemungkinan tindak lanjut
Kecukupan data	Apakah data dasar cukup untuk tujuan dan skala keputusan?	Dapat digunakan, perlu data tambahan, atau perlu kajian rinci.
Metode	Apakah metode analisis sesuai dengan parameter dan objek keputusan?	Perbaikan metode, penjelasan ulang bobot, atau revisi analisis.
Skala	Apakah skala peta sesuai dengan keputusan yang akan diambil?	Pembatasan penggunaan hasil atau kebutuhan data lebih rinci.
Konsistensi peta	Apakah peta tematik, peta sintesis, dan narasi saling mendukung?	Koreksi peta, penyesuaian legenda, atau perbaikan narasi.
Rekomendasi	Apakah rekomendasi dapat ditelusuri, dilaksanakan, dan dipantau?	Penyusunan syarat teknis yang lebih jelas atau penambahan indikator pemantauan.

12.6 Pertimbangan Teknis GTL

Pertimbangan Teknis GTL adalah keluaran yang menjembatani kajian teknis dengan keputusan administratif atau kebijakan. Dokumen ini memuat ringkasan dasar data, metode, hasil analisis, status kesesuaian, pembatas utama, syarat teknis, rekomendasi tindak lanjut, dan kebutuhan pemantauan. Pertimbangan teknis harus ringkas, tetapi tetap cukup kuat secara ilmiah.

Pertimbangan teknis berbeda dari laporan kajian lengkap. Laporan kajian memuat uraian data dan metode secara rinci. Pertimbangan teknis mengambil inti hasil kajian untuk mendukung keputusan. Karena itu, pertimbangan teknis harus jelas mengenai objek yang dinilai, dasar analisis, batas penggunaan, dan rekomendasi yang diberikan.

Dalam tata ruang, Pertimbangan Teknis GTL dapat digunakan untuk mendukung penyusunan RTRW, RDTR, ketentuan khusus, atau pengendalian pemanfaatan ruang. Dalam dokumen lingkungan, pertimbangan teknis dapat mendukung penilaian dampak, rencana pengelolaan, rencana pemantauan, dan persyaratan teknis. Dalam perizinan atau kegiatan strategis, pertimbangan teknis dapat menjadi dasar syarat lokasi, kebutuhan investigasi lanjutan, atau penolakan teknis terhadap lokasi tertentu.

Agar dapat digunakan, Pertimbangan Teknis Geologi Tata Lingkungan (GTL) perlu memiliki struktur baku. Struktur tersebut sebaiknya mencakup identitas objek, dasar permohonan atau kebutuhan, data rujukan, metode, hasil pokok, pembatas utama, rekomendasi, syarat teknis, batas penggunaan, dan penutup. Dengan struktur baku, pembaca kebijakan dapat memahami isi dokumen secara cepat tanpa kehilangan dasar ilmiah.

Tabel 12.2. Unsur utama Pertimbangan Teknis GTL.

Unsur	Isi pokok	Fungsi
Identitas objek	Nama kegiatan, lokasi, pemrakarsa, dan tujuan permohonan.	Menetapkan ruang lingkup pertimbangan.
Dasar data	Daftar data, peta, skala, sumber, dan tahun.	Menunjukkan basis informasi.
Metode ringkas	Pendekatan analisis, parameter, dan cara sintesis.	Menjelaskan cara kesimpulan diperoleh.
Hasil pokok	Status kesesuaian, pembatas utama, dan risiko penting.	Memberi inti penilaian teknis.
Rekomendasi	Syarat teknis, mitigasi, kajian lanjutan, atau alternatif lokasi.	Menjadi dasar keputusan operasional.
Batas penggunaan	Skala, tingkat kepastian, dan keterbatasan kajian.	Mencegah penggunaan hasil di luar ketelitiannya.

12.7 Sistem Informasi GTL

Sistem Informasi GTL adalah perangkat untuk menyimpan, mengelola, memperbarui, dan menyajikan data serta hasil GTL. Sistem ini dapat memuat peta dasar, peta tematik, peta sintesis, metadata, laporan kajian, hasil validasi, pertimbangan teknis, data pemantauan, dan riwayat perubahan. Tujuannya adalah memastikan bahwa informasi GTL tidak tersebar sebagai dokumen terpisah yang sulit ditelusuri.

Sistem informasi penting karena lingkungan geologi dan pemanfaatan ruang dapat berubah. Penggunaan lahan berubah, data bahaya diperbarui, kualitas air tanah dapat menurun, kawasan bernilai geologi dapat mengalami tekanan, dan kebijakan ruang dapat berkembang. Tanpa sistem informasi, pembaruan data sulit dilakukan secara konsisten. Akibatnya, keputusan baru dapat memakai data lama tanpa pemeriksaan yang memadai.

Sistem Informasi GTL juga mendukung transparansi teknis. Setiap peta atau rekomendasi harus memiliki metadata: sumber data, skala, tanggal, metode, penyusun, batas penggunaan, dan status validasi. Metadata membantu pengguna memahami apakah data tersebut cocok untuk keputusan makro, perencanaan rinci, atau keputusan tapak.

Dalam jangka panjang, Sistem Informasi GTL dapat menjadi dasar integrasi dengan sistem informasi tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, air tanah, dan konservasi geologi. Integrasi ini harus memperhatikan kewenangan, keamanan data, hak akses, dan kebutuhan publik. Tidak semua data harus dibuka dalam tingkat detail yang sama, tetapi informasi utama yang diperlukan untuk keselamatan dan perlindungan lingkungan perlu tersedia bagi pengguna yang berwenang.

Tabel 12.3. Komponen Sistem Informasi GTL.

Komponen	Isi	Manfaat
Basis data geologi	Peta geologi, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya, dan nilai geologi.	Menyediakan data dasar yang terkelola.
Metadata	Sumber, skala, metode, tahun, penyusun, dan status validasi.	Menjamin keterbacaan dan batas penggunaan data.
Peta sintesis	Peta kesesuaian, pembatas, zona resapan, kerentanan, dan rekomendasi.	Mendukung keputusan ruang dan lingkungan.
Dokumen teknis	Laporan KGL, Kajian GTL, hasil validasi, dan pertimbangan teknis.	Menjaga keterlacakan keputusan.
Pemantauan	Data perubahan muka air tanah, kualitas air, bahaya, penggunaan lahan, dan kawasan bernilai geologi.	Mendukung pemutakhiran dan evaluasi.

Komponen	Isi	Manfaat
Hak akses	Pengaturan pengguna, tingkat akses, dan keamanan data.	Menjamin data digunakan sesuai kewenangan.

12.8 Metadata, Standar Data, dan Keterlacakan

Metadata adalah informasi tentang data. Dalam GTL, metadata sangat penting karena peta dan data geologi dapat disalahgunakan apabila pengguna tidak mengetahui sumber, skala, metode, dan batas penggunaannya. Peta skala regional, misalnya, tidak boleh digunakan untuk keputusan tapak dengan kepastian tinggi. Tanpa metadata, batas semacam ini sering tidak terlihat.

Standar data diperlukan agar data dari berbagai sumber dapat digunakan bersama. Standar tersebut mencakup sistem koordinat, skala, format, klasifikasi, simbol, atribut, dan cara penamaan. Standar tidak harus membuat semua data menjadi sama, tetapi harus membuat data dapat dibaca, dibandingkan, dan digabungkan secara teknis.

Keterlacakan berarti setiap rekomendasi dapat ditelusuri kembali ke data dan metode. Apabila Pertimbangan Teknis GTL menyatakan suatu lokasi sesuai bersyarat, pembaca harus dapat mengetahui parameter apa yang mendasari kesimpulan tersebut. Apabila suatu kawasan tidak direkomendasikan, alasan teknisnya harus jelas. Keterlacakan adalah dasar akuntabilitas ilmiah dan administratif.

Dalam sistem informasi, metadata dan keterlacakan dapat diwujudkan melalui catatan digital, tautan antara peta dan laporan, riwayat revisi, serta status validasi. Dengan cara ini, GTL tidak hanya menghasilkan informasi, tetapi juga menjaga kejelasan asal-usul dan mutu informasi tersebut.

12.9 Pemantauan dan Pemutakhiran Informasi GTL

Informasi GTL tidak boleh dipahami sebagai hasil sekali jadi. Lingkungan geologi dapat berubah akibat proses alam, perubahan penggunaan lahan, pembangunan, eksploitasi sumber daya, perubahan iklim, atau tekanan pengunjung pada kawasan bernilai geologi. Karena itu, pemantauan dan pemutakhiran menjadi bagian penting dari sistem GTL.

Pemantauan dapat mencakup muka air tanah, kualitas air, penurunan muka tanah, kejadian gerakan tanah, perubahan garis pantai, perubahan penggunaan lahan, tekanan pada kawasan konservasi geologi, atau efektivitas mitigasi. Parameter pemantauan dipilih sesuai pembatas utama dan rekomendasi teknis. Pemantauan yang baik harus terkait langsung dengan risiko atau fungsi lingkungan yang ingin dijaga.

Pemutakhiran dilakukan ketika tersedia data baru, terjadi perubahan besar, terdapat kejadian bencana, ada rencana pembangunan baru, atau hasil pemantauan menunjukkan perubahan kondisi. Pemutakhiran dapat mengubah kelas kesesuaian, syarat teknis, atau kebutuhan pengendalian. Oleh karena itu, sistem informasi harus mampu mencatat versi data dan alasan perubahan.

Dalam tata kelola GTL, pemantauan dan pemutakhiran memperkuat siklus adaptif. Keputusan tidak berhenti setelah pertimbangan teknis diterbitkan. Hasil pelaksanaan dan kondisi lapangan harus kembali menjadi masukan bagi perbaikan data dan rekomendasi berikutnya.

12.10 Akuntabilitas dan Komunikasi Teknis

Akuntabilitas GTL berarti hasil kajian dan rekomendasi dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, teknis, dan administratif. Akuntabilitas tidak hanya bergantung pada nama lembaga atau penyusun, tetapi pada keterbukaan data, kejelasan metode, validasi, dan konsistensi antara hasil analisis dengan rekomendasi.

Komunikasi teknis juga penting karena pengguna GTL tidak selalu berlatar belakang geologi. Perencana, pejabat daerah, pemrakarsa, masyarakat, dan pengelola kawasan memerlukan informasi yang jelas. Bahasa teknis harus diterjemahkan menjadi makna ruang: apa yang boleh, apa yang bersyarat, apa yang harus dibatasi, apa yang

perlu dilindungi, dan apa yang harus dipantau.

Komunikasi risiko harus dilakukan dengan hati-hati. Informasi bahaya geologi, kerentanan air tanah, atau keterbatasan tapak tidak boleh dibuat terlalu menakutkan, tetapi juga tidak boleh dilemahkan. GTL harus menyampaikan tingkat kepastian, keterbatasan data, dan konsekuensi teknis secara jujur. Dengan demikian, keputusan dapat diambil dengan dasar yang lebih baik.

Dokumen GTL yang baik harus memiliki ringkasan eksekutif, peta yang mudah dibaca, tabel rekomendasi, dan penjelasan teknis yang cukup. Bagi pembaca kebijakan, penyajian seperti ini membantu mempercepat pemahaman tanpa menghilangkan dasar ilmiah.

12.11 Hubungan GTL dengan Sistem Informasi Tata Ruang dan Lingkungan

Sistem Informasi GTL sebaiknya tidak berdiri terpisah dari sistem informasi lain. Informasi geologi perlu dapat digunakan dalam sistem informasi tata ruang, sistem informasi lingkungan hidup, sistem informasi kebencanaan, dan basis data pemerintah daerah. Namun, integrasi tersebut memerlukan standar teknis dan kelembagaan.

Dalam tata ruang, informasi GTL dapat menjadi lapisan teknis untuk mendukung RTRW, RDTR, pengaturan zonasi, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Dalam lingkungan hidup, informasi GTL dapat mendukung KLHS, dokumen lingkungan, pengendalian kerusakan lingkungan, serta pemantauan kualitas tanah dan air. Dalam kebencanaan, informasi GTL dapat membantu menghubungkan data bahaya dengan arahan pemanfaatan ruang.

Integrasi sistem informasi harus memperhatikan perbedaan skala dan status data. Data yang belum divalidasi tidak boleh diperlakukan sama dengan data resmi. Peta indikatif perlu diberi keterangan indikatif. Peta rekomendasi perlu menyebutkan syarat penggunaannya. Dengan cara ini, sistem informasi tidak hanya menyajikan data, tetapi juga menjaga makna teknis data tersebut.

Hubungan antarsistem juga dapat memperkuat pembelajaran kelembagaan. Ketika data GTL digunakan dalam tata ruang dan hasilnya dipantau, pengalaman tersebut dapat memperbaiki metode GTL. Sebaliknya, kebutuhan tata ruang dan lingkungan dapat memberi arahan bagi pengumpulan data geologi yang lebih relevan.

12.12 Tantangan Implementasi Kelembagaan GTL

Implementasi kelembagaan GTL menghadapi beberapa tantangan. Tantangan pertama adalah fragmentasi data. Data geologi, air tanah, bahaya, tata ruang, lingkungan, dan kawasan bernilai geologi sering berada pada sistem yang berbeda. Tantangan kedua adalah perbedaan skala dan standar data. Tantangan ketiga adalah keterbatasan kapasitas daerah dalam membaca dan menggunakan informasi geologi.

Tantangan berikutnya adalah kebutuhan validasi terhadap kajian yang disusun oleh pihak lain. Di satu sisi, keterlibatan konsultan dan pemrakarsa diperlukan karena banyak kegiatan membutuhkan kajian. Di sisi lain, hasil kajian harus diperiksa agar tidak semata-mata mengikuti kepentingan proyek. Validasi menjadi mekanisme penyeimbang antara kebutuhan pembangunan dan akuntabilitas teknis.

Tantangan lain adalah menjaga agar GTL tidak dipahami sebagai hambatan perizinan. GTL seharusnya diposisikan sebagai instrumen untuk membantu pembangunan memilih lokasi yang lebih tepat, menetapkan syarat yang jelas, dan mengurangi risiko sejak awal. Jika dikomunikasikan dengan baik, GTL dapat mempercepat keputusan yang berkualitas karena pembatas dan syarat telah diketahui sejak tahap perencanaan.

Untuk menjawab tantangan tersebut, diperlukan pedoman teknis, standar data, peningkatan kapasitas, sistem informasi, mekanisme koordinasi, dan dukungan regulatif yang jelas. Penguatan kelembagaan GTL harus dilakukan bertahap, tetapi dengan arah yang konsisten.

12.13 Kesimpulan Bab

Bab ini menegaskan bahwa GTL tidak hanya memerlukan data dan metode, tetapi juga kelembagaan. Hasil KGL dan Kajian GTL harus dapat divalidasi, diterjemahkan menjadi pertimbangan teknis, disimpan dalam sistem informasi, diperbarui, dan digunakan secara akuntabel dalam keputusan publik.

Kelembagaan GTL berfungsi menghubungkan penyedia data, penyusun kajian, unit validasi, pemerintah daerah, pemangku kepentingan, dan pengambil keputusan. Validasi berfungsi menjamin kecukupan data, ketepatan metode, kesesuaian skala, konsistensi peta, dan keterlacakan rekomendasi. Pertimbangan Teknis GTL berfungsi menjembatani hasil kajian dengan keputusan administratif dan kebijakan.

Sistem Informasi GTL menjadi perangkat penting untuk menjaga kesinambungan pengetahuan. Sistem ini menyimpan data, metadata, peta, hasil kajian, validasi, pertimbangan teknis, pemantauan, dan riwayat pemutakhiran. Dengan sistem informasi, GTL dapat berkembang dari kumpulan laporan menjadi basis pengetahuan yang mendukung tata ruang, lingkungan hidup, konservasi geologi, kebencanaan, dan pembangunan kawasan.

Dengan demikian, Bab 12 menutup Bagian IV dengan menegaskan bahwa GTL harus dibangun sebagai sistem regulatif-operasional. GTL membutuhkan dasar hukum, metode teknis, lembaga yang bekerja, validasi yang kuat, pertimbangan teknis yang jelas, dan sistem informasi yang hidup. Tanpa unsur-unsur tersebut, GTL berisiko berhenti sebagai konsep; dengan unsur-unsur tersebut, GTL dapat menjadi instrumen nyata untuk pembangunan yang aman dan berkelanjutan.

Data yang baik memerlukan lembaga yang mampu menjaganya, metode yang mampu mengujinya, dan sistem informasi yang mampu mewariskannya. Validasi diperlukan agar hasil kajian tidak hanya tampak meyakinkan, tetapi benar secara data, tepat secara metode, sesuai skala, dan dapat ditelusuri. Pertimbangan teknis GTL menjadi jembatan antara hasil analisis dan keputusan. Sistem informasi memastikan bahwa pengetahuan tidak hilang, tidak tercecer, dan dapat diperbarui. Dalam GTL, kelembagaan adalah rumah tempat data, peta, pengalaman, dan tanggung jawab teknis dipelihara bersama.

BAGIAN V

Refleksi, Regenerasi, Dan Arah Strategis Gtl Indonesia

Pengantar Bagian V

Bagian V menutup buku dengan arah penguatan GTL Indonesia. Lampiran teknis yang menyertai buku ini menjadi salah satu bentuk konkret penguatan tersebut, karena menyediakan standar kerja awal yang dapat dikembangkan, diuji, disempurnakan, dan diwariskan kepada geologist muda sebagai praktik geologi lingkungan yang lebih tertib dan operasional.

Bagian V merupakan bagian reflektif dan strategis. Setelah seluruh konsep, metode, kawasan bernilai geologi, regulasi, kelembagaan, validasi, pertimbangan teknis, dan sistem informasi dijelaskan, bagian ini melihat pembelajaran internasional dan merumuskan arah penguatan GTL Indonesia.

Pembanding internasional tidak dimaksudkan untuk disalin secara langsung. Setiap negara memiliki kondisi geologi, sistem hukum, kapasitas kelembagaan, dan kebutuhan pembangunan yang berbeda. Namun, praktik internasional dapat memberi pelajaran mengenai pentingnya standar data, peta bahaya, perencanaan berbasis risiko, infrastruktur data spasial, komunikasi risiko, dan integrasi geosains ke dalam keputusan ruang.

Bab 13 membahas perbandingan internasional pengaturan geologi lingkungan dan perencanaan berbasis risiko. Bab 14 merumuskan arah penguatan GTL Indonesia melalui penguatan definisi, regulasi, standar data, metodologi KGL, validasi, kelembagaan, sistem informasi, kapasitas sumber daya manusia, dan agenda implementasi bertahap.

Tabel V.1 Peta jalan Bagian V.

Bab	Fokus Utama	Pertanyaan Kunci	Keluaran Konseptual
Bab 13	Pembanding internasional	Apa pelajaran utama dari praktik pengaturan geologi lingkungan, data geosains, dan perencanaan berbasis risiko di negara lain?	Prinsip pembanding untuk memperkuat GTL Indonesia: data sahih, peta tematik, pengaturan risiko, standar metode, dan kelembagaan yang jelas.
Bab 14	Arah penguatan GTL Indonesia	Bagaimana GTL Indonesia perlu diperkuat agar menjadi instrumen operasional yang efektif?	Agenda penguatan regulasi, metode KGL, validasi, pertimbangan teknis, sistem informasi, SDM, dan integrasi ke keputusan publik.

Gambar V.1 Bagan alir yang menunjukkan pembanding internasional menuju agenda penguatan GTL Indonesia.

Bagan Alir ini menunjukkan bahwa pembanding internasional terutama berfungsi sebagai cermin metodologis dan kelembagaan. Indonesia tidak harus mengikuti semua instrumen dari negara lain, tetapi dapat mengambil prinsip umum yang relevan: data geologi perlu dapat diakses, peta tematik perlu memiliki fungsi keputusan, metode perlu dapat ditelusuri, dan rekomendasi perlu terhubung dengan instrumen tata ruang serta pengendalian pemanfaatan ruang.

Dengan demikian, Bagian V menjadi penutup strategis buku ini. Bagian ini menegaskan bahwa GTL Indonesia perlu dibangun sebagai sistem yang ilmiah, regulatif, operasional, adaptif, dan mampu menjawab kebutuhan pembangunan aman serta berkelanjutan.

> *Masa depan Geologi Tata Lingkungan tidak hanya ditentukan oleh peta yang semakin rinci atau regulasi yang semakin lengkap, tetapi oleh manusia yang mampu membaca bumi dengan jernih dan menyampaikannya dengan berani. Setiap generasi perlu mewarisi pengetahuan, tetapi juga harus memperbaruinya. GTL Indonesia akan kuat apabila tumbuh bersama kaderisasi, pendidikan lanjut, riset, integritas profesi, dan keberanian menjadikan geologi sebagai suara nurani dalam pembangunan ruang. Bumi memberi tanda; tugas manusia adalah memahaminya sebelum terlambat*

BAB 13

Penguatan Sumber Daya Manusia Geologi Tata Lingkungan

13.1. Pengantar

Geologi Tata Lingkungan tidak hanya dibangun oleh peta, data, pedoman, regulasi, dan perangkat analisis. Ia terutama dibangun oleh manusia yang mampu membaca bumi, memahami ruang, menafsirkan proses geologi, dan menerjemahkan pengetahuan tersebut menjadi arahan yang bermanfaat bagi masyarakat. Tanpa sumber daya manusia yang kuat, Geologi Tata Lingkungan hanya akan menjadi istilah dalam dokumen. Dengan sumber daya manusia yang bermutu, Geologi Tata Lingkungan dapat menjadi cara berpikir, cara bekerja, dan cara mengambil keputusan yang lebih bertanggung jawab terhadap ruang hidup.

Penguatan sumber daya manusia menjadi salah satu agenda terpenting dalam masa depan Geologi Tata Lingkungan. Bidang ini memerlukan ahli yang tidak hanya memahami batuan, tanah, air tanah, bentuk lahan, struktur geologi, dan bahaya geologi, tetapi juga mampu memahami tata ruang, pengelolaan lingkungan, kebijakan publik, sistem informasi geospasial, serta komunikasi risiko. Ahli Geologi Tata Lingkungan harus mampu berdiri di antara ilmu kebumian, perencanaan wilayah, perlindungan lingkungan, dan kebutuhan pembangunan.

Di Indonesia, kebutuhan tersebut semakin mendesak. Pembangunan wilayah terus bergerak, kebutuhan ruang meningkat, konflik pemanfaatan lahan semakin kompleks, tekanan terhadap air tanah dan kawasan resapan semakin besar, serta risiko geologi semakin nyata dalam kehidupan masyarakat. Dalam kondisi demikian, Geologi Tata Lingkungan memerlukan generasi baru yang tidak hanya bekerja sebagai pengumpul data, tetapi juga sebagai penyusun sintesis, pemberi pertimbangan teknis, dan penjaga kewajaran ilmiah dalam keputusan ruang.

Bab ini disusun untuk menegaskan bahwa masa depan Geologi Tata Lingkungan sangat bergantung pada kualitas sumber daya manusianya. Penguatan tersebut perlu dilakukan melalui kaderisasi, pendidikan lanjut, pelatihan lapangan, riset terapan, kolaborasi lintas-keilmuan, dan pembentukan etos profesi. Dengan demikian, Geologi Tata Lingkungan tidak berhenti sebagai pengalaman satu generasi, tetapi berkembang menjadi tradisi keilmuan dan praktik teknis yang diwariskan, diperbarui, dan diperkuat oleh generasi berikutnya.

13.2. Mengajak Generasi Baru Memasuki Geologi Tata Lingkungan

Geologi Tata Lingkungan memerlukan generasi baru yang memiliki minat kuat terhadap hubungan antara bumi, ruang hidup, lingkungan, dan keselamatan manusia. Bidang ini tidak hanya terbuka bagi lulusan geologi, tetapi juga bagi lulusan ilmu kebumian dan ilmu terkait lainnya, seperti geografi, geodesi, ilmu tanah, hidrologi, teknik lingkungan, perencanaan wilayah dan kota, kebencanaan, serta bidang lain yang berhubungan dengan pengelolaan ruang dan sumber daya alam.

Sarjana geologi dan sarjana ilmu kebumian baru perlu melihat Geologi Tata Lingkungan sebagai bidang yang strategis dan relevan dengan kebutuhan pembangunan masa depan. Bidang ini memberi ruang bagi mereka yang ingin bekerja tidak hanya sebagai pemeta geologi, tetapi juga sebagai analis lingkungan geologi, penyusun rekomendasi ruang, pengkaji daya dukung dan daya tampung, penilai risiko geologi, penyusun arahan pengelolaan air tanah, pendukung

KLHS dan dokumen lingkungan, serta perumus pertimbangan teknis bagi pengambilan keputusan.

Mahasiswa geologi perlu didorong untuk mengambil tugas akhir yang berkaitan dengan Geologi Lingkungan dan Geologi Tata Lingkungan. Tema yang dapat dikembangkan sangat luas, antara lain kesesuaian lahan permukiman, daya dukung geologi kawasan, kerentanan air tanah terhadap pencemaran, fungsi resapan, geologi teknik untuk pengembangan wilayah, mikrozonasi kegempaan, gerakan tanah, penurunan tanah, kawasan lindung geologi, geowisata, Geopark, hingga integrasi data geologi dengan tata ruang. Tema-tema tersebut tidak hanya penting secara akademik, tetapi juga memiliki manfaat langsung bagi pemerintah daerah, masyarakat, pengelola kawasan, dan dunia usaha.

Bagi mahasiswa geografi, geodesi, ilmu tanah, dan bidang kebumian lainnya, Geologi Tata Lingkungan menyediakan ruang kolaborasi yang luas. Geografi memberi kekuatan dalam analisis ruang dan hubungan manusia-lingkungan. Geodesi memberi dukungan dalam pemetaan, penginderaan jauh, deformasi permukaan, dan sistem informasi geospasial. Ilmu tanah memberi pemahaman mengenai sifat tanah, infiltrasi, erosi, kesuburan, dan fungsi lahan. Teknik lingkungan memberi perspektif mengenai pengelolaan limbah, kualitas air, daya tampung, dan pemantauan lingkungan. Seluruh disiplin tersebut dapat bertemu dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan.

Dengan demikian, penguatan sumber daya manusia Geologi Tata Lingkungan tidak boleh dipahami semata-mata sebagai kebutuhan satu lembaga. Ini merupakan kebutuhan nasional dan lintas profesi. Indonesia memerlukan generasi baru yang mampu membaca ruang dari dasar geologinya, memahami risiko dan batas lingkungan, serta menerjemahkan pengetahuan tersebut menjadi rekomendasi yang dapat digunakan dalam tata ruang, pengelolaan lingkungan, konservasi geologi, dan mitigasi risiko geologi.

13.3. Kaderisasi Internal dan Penguatan Kelembagaan Badan Geologi

Penguatan Geologi Tata Lingkungan tidak dapat dilepaskan dari keberlanjutan sumber daya manusia di lembaga teknis yang selama ini mengembangkan dan menerapkan kajian geologi lingkungan, termasuk Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi. Pengalaman kelembagaan menunjukkan bahwa penyusunan informasi GTL, kajian geologi lingkungan, rekomendasi pemanfaatan ruang, dan pertimbangan teknis memerlukan kemampuan yang dibangun melalui waktu panjang, pengalaman lapangan, serta pemahaman lintas sektor.

Salah satu tantangan penting adalah keterlambatan kaderisasi. Pada banyak bidang teknis, pengetahuan tidak hanya tersimpan dalam dokumen, peta, dan laporan, tetapi juga dalam pengalaman para ahli senior ketika membaca lapangan, memilih parameter, menilai kewajaran hasil analisis, dan menyusun rekomendasi yang dapat dipertanggungjawabkan. Apabila proses alih pengetahuan tidak dilakukan secara sistematis, sebagian pengalaman tersebut berisiko hilang bersama berakhirnya masa tugas para ahli senior.

Karena itu, penguatan kaderisasi perlu dilakukan melalui beberapa jalur. Pertama, perekrutan tenaga baru perlu diarahkan untuk mengisi kebutuhan bidang geologi lingkungan, hidrogeologi, geologi teknik, geospasial, kebencanaan geologi, konservasi geologi, dan analisis tata ruang. Kedua, tenaga muda perlu memperoleh ruang belajar yang cukup melalui keterlibatan langsung dalam survei lapangan, penyusunan peta tematik, analisis spasial, penyusunan rekomendasi, dan telaah pertimbangan teknis. Ketiga, perlu ada sistem mentoring antara tenaga senior dan tenaga muda agar pengetahuan lapangan dan penalaran teknis dapat diwariskan secara terstruktur.

Pendidikan lanjut juga menjadi kebutuhan strategis. Untuk memperkuat kelembagaan Badan Geologi, pendidikan minimal magister bagi sumber daya manusia inti di bidang GTL perlu didorong secara lebih terarah. Pendidikan doktor juga perlu dipandang sebagai investasi kelembagaan, terutama untuk membangun kapasitas riset, pengembangan metode, penyusunan standar, validasi ilmiah, dan penguatan posisi Badan

Geologi sebagai rujukan nasional dalam Geologi Lingkungan dan Geologi Tata Lingkungan.

Namun, kritik terhadap penguatan sumber daya manusia tidak hanya ditujukan ke internal lembaga. Lingkungan akademik dan profesi di luar Badan Geologi juga perlu mengambil peran lebih besar. Perguruan tinggi perlu memberi ruang yang lebih kuat bagi tugas akhir, tesis, dan disertasi bertema geologi lingkungan, geologi tata lingkungan, daya dukung geologi, kesesuaian lahan, kerentanan air tanah, pengendalian risiko geologi, dan integrasi geologi dengan tata ruang. Dunia konsultan dan organisasi profesi juga perlu memperkuat standar kompetensi agar kajian geologi lingkungan tidak hanya menjadi formalitas dokumen, tetapi benar-benar menjadi dasar teknis dalam pengambilan keputusan.

Dengan demikian, penguatan sumber daya manusia GTL harus dibaca sebagai agenda bersama. Badan Geologi memerlukan kaderisasi internal yang kuat, sementara perguruan tinggi, konsultan, pemerintah daerah, dan komunitas profesi perlu memperluas basis pengetahuan dan praktik GTL. Tanpa ekosistem sumber daya manusia yang luas, Geologi Tata Lingkungan akan sulit berkembang sebagai bidang yang hidup, adaptif, dan mampu menjawab kebutuhan tata ruang, pengelolaan lingkungan, serta mitigasi risiko geologi di Indonesia.

13.4. Kompetensi Dasar Ahli Geologi Tata Lingkungan

Ahli Geologi Tata Lingkungan harus memiliki dasar keilmuan geologi yang kuat. Pemahaman tentang mineral, batuan, struktur geologi, stratigrafi, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, dan proses geologi merupakan fondasi utama. Tanpa fondasi tersebut, kajian geologi lingkungan mudah berubah menjadi analisis spasial semata yang kehilangan penalaran kebumiannya. Sebagaimana ditunjukkan pada Bagan Alir 5.1, ahli Geologi Tata Lingkungan harus mampu bergerak dari pengumpulan data, analisis, hingga sintesis. Kemampuan inilah yang membedakan ahli GTL dari pelaksana teknis yang hanya bekerja pada satu jenis data. Ahli GTL dituntut memahami data dasar, data daya dukung, data bahaya geologi, data non-geologi, dan acuan regulatif, lalu menerjemahkannya menjadi rekomendasi ruang dan lingkungan yang dapat dipertanggungjawabkan.

Kompetensi geologi dasar diperlukan untuk membaca sifat ruang. Batuan dan tanah menentukan daya dukung, kestabilan, kemampuan resapan, dan kerentanan terhadap gangguan. Bentuk lahan menunjukkan proses geomorfologi dan dinamika yang bekerja. Struktur geologi dapat memengaruhi kestabilan lereng, aliran air tanah, dan sebaran zona lemah. Air tanah menunjukkan hubungan antara batuan, curah hujan, topografi, penggunaan lahan, dan kebutuhan masyarakat. Bahaya geologi memperlihatkan batas aman pemanfaatan ruang.

Dalam konteks GTL, kompetensi geologi tidak boleh berhenti pada kemampuan mengenali satuan batuan atau membuat peta geologi. Ahli GTL harus mampu menjawab pertanyaan lanjutan: apa implikasi litologi terhadap permukiman? bagaimana struktur geologi memengaruhi risiko? apakah daerah ini sesuai untuk kawasan industri? bagaimana kondisi air tanah membatasi kegiatan tertentu? apakah lereng ini dapat dikembangkan dengan syarat teknis tertentu? apakah kawasan ini lebih tepat dilindungi daripada dibangun?

Dengan demikian, kompetensi dasar ahli GTL adalah kemampuan menerjemahkan data geologi menjadi makna ruang. Ia harus mampu bergerak dari deskripsi menuju interpretasi, dari interpretasi menuju sintesis, dan dari sintesis menuju rekomendasi. Inilah yang membedakan ahli Geologi Tata Lingkungan dari ahli yang hanya bekerja pada inventarisasi data.

13.5. Kompetensi Lintas-Keilmuan dalam Geologi Tata Lingkungan

Geologi Tata Lingkungan adalah bidang yang secara alamiah bersifat lintas-keilmuan. Ia lahir dari geologi, tetapi bekerja dalam ruang yang dihuni manusia, diatur oleh kebijakan, dipengaruhi oleh ekonomi, dan dibatasi oleh fungsi lingkungan. Karena itu, ahli GTL perlu mengenal keilmuan lain tanpa kehilangan identitas geologinya.

Ilmu tanah penting untuk memahami sifat fisik tanah, infiltrasi, erosi, kesuburan, perubahan kelembapan, dan kemampuan lahan menerima tekanan. Hidrologi dan hidrogeologi diperlukan untuk memahami air permukaan, air tanah, imbuhan, lepasan, kualitas air, dan kerentanan pencemaran. Geodesi dan penginderaan jauh penting untuk pemetaan, pemantauan deformasi permukaan, analisis citra, dan pengelolaan data geospasial. Sistem informasi geografis diperlukan untuk mengintegrasikan peta tematik, melakukan analisis spasial, dan menyusun peta sintesis.

Perencanaan wilayah dan kota penting agar ahli GTL memahami bagaimana informasi geologi digunakan dalam RTRW, RDTR, pengaturan zonasi, intensitas pemanfaatan ruang, dan arahan pengendalian. Teknik lingkungan diperlukan untuk memahami pengelolaan limbah, kualitas air, pemantauan lingkungan, dan daya tampung. Ilmu kebencanaan diperlukan untuk menghubungkan bahaya, kerentanan, kapasitas, dan risiko. Komunikasi risiko diperlukan agar hasil kajian dapat dipahami oleh pengambil keputusan dan masyarakat.

Kompetensi lintas-keilmuan bukan berarti ahli GTL harus menjadi ahli pada semua bidang. Yang diperlukan adalah kemampuan memahami bahasa dasar disiplin lain, bekerja sama dalam tim, dan menyusun sintesis yang dapat diterima secara ilmiah dan digunakan secara operasional. Ahli GTL harus mampu menjadi penghubung antara ahli geologi, perencana ruang, ahli lingkungan, ahli kebencanaan, ahli geospasial, pemerintah daerah, pemrakarsa kegiatan, dan masyarakat.

Di sinilah letak kekuatan Geologi Tata Lingkungan. Ia bukan sekadar ilmu yang melihat bumi dari bawah, tetapi juga ilmu yang membaca hubungan antara bumi, ruang, kebijakan, dan kehidupan manusia.

13.6. Pendidikan Lanjut, Riset, dan Tugas Akhir Geologi Tata Lingkungan

Pendidikan lanjut merupakan salah satu jalan penting untuk memperkuat Geologi Tata Lingkungan. Pendidikan magister dapat memperdalam metodologi, memperluas wawasan lintas-keilmuan, dan membentuk kemampuan analisis yang lebih matang. Pendidikan doktor dapat memperkuat pengembangan teori, metode, standar, dan inovasi dalam GTL. Karena itu, pendidikan lanjut perlu dipandang sebagai investasi jangka panjang, bukan sekadar peningkatan kualifikasi administratif.

Riset Geologi Tata Lingkungan perlu dikembangkan lebih kuat di perguruan tinggi. Tema-tema seperti daya dukung geologi, daya tampung lingkungan geologi, kesesuaian lahan, kerentanan air tanah, resapan, mikrozonasi, deformasi permukaan, gerakan tanah, penurunan tanah, kawasan lindung geologi, geokonservasi, geowisata, dan integrasi geologi dengan tata ruang perlu menjadi bagian dari agenda akademik yang berkelanjutan.

Mahasiswa geologi dapat mengambil tugas akhir yang tidak hanya berfokus pada pemetaan geologi konvensional, tetapi juga pada implikasi geologi bagi ruang dan lingkungan. Mahasiswa geografi dapat mengembangkan analisis spasial dan hubungan manusia-lingkungan. Mahasiswa geodesi dapat memperkuat pemantauan deformasi dan basis data geospasial. Mahasiswa ilmu tanah dapat memperdalam fungsi lahan, infiltrasi, erosi, dan konservasi tanah. Mahasiswa teknik lingkungan dapat meneliti hubungan antara geologi, limbah, kualitas air, dan daya tampung.

Tesis dan disertasi di bidang GTL perlu diarahkan pada pertanyaan-pertanyaan yang dekat dengan kebutuhan nyata. Bagaimana menilai kesesuaian lahan permukiman pada kawasan rawan gerakan tanah? Bagaimana menentukan batas aman pemanfaatan ruang pada daerah resapan? Bagaimana mengintegrasikan peta bahaya geologi ke dalam RDTR? Bagaimana menyusun indeks daya dukung geologi yang dapat diuji? Bagaimana menilai hubungan deformasi permukaan dengan perkembangan kawasan

terbangun? Bagaimana menjaga nilai geologi dalam pengembangan Geopark?

Pertanyaan-pertanyaan semacam itu akan membuat riset tidak berhenti di ruang akademik. Riset akan menjadi bagian dari solusi. Dengan demikian, pendidikan lanjut dan tugas akhir dapat menjadi pintu masuk bagi generasi baru untuk memperkuat Geologi Tata Lingkungan sebagai bidang ilmu, bidang profesi, dan instrumen kebijakan.

13.7. Ahli Geologi Tata Lingkungan sebagai Sintetisator

Ahli Geologi Tata Lingkungan pada dasarnya adalah seorang sintetisator. Ia tidak hanya mengumpulkan data, tetapi menghubungkan data. Ia tidak hanya membuat peta, tetapi membaca makna peta. Ia tidak hanya menyusun laporan, tetapi merumuskan arahan yang dapat digunakan dalam keputusan ruang dan lingkungan.

Dalam proses penyelidikan GTL, data dasar, data daya dukung, data bahaya geologi, data non-geologi, dan acuan peraturan perundang-undangan harus diolah menjadi informasi yang bermakna. Informasi tersebut kemudian disintesis menjadi peta geologi lingkungan, peta kesesuaian, peta pembatas, peta kawasan lindung, peta risiko, atau rekomendasi pemanfaatan ruang. Proses ini memerlukan kemampuan teknis, penalaran ilmiah, dan kebijaksanaan profesional.

Seorang sintetisator harus mampu membedakan antara data yang cukup dan data yang belum cukup. Ia harus mampu menilai apakah hasil model masuk akal secara geologi. Ia harus berani menyatakan ketidakpastian apabila data belum memadai. Ia harus mampu menyusun rekomendasi yang tidak terlalu umum, tetapi juga tidak melampaui ketelitian data. Ia harus memahami bahwa rekomendasi teknis dapat memengaruhi keselamatan manusia, keberlanjutan lingkungan, dan arah pembangunan wilayah.

Peran sintetisator juga menuntut integritas. Ahli GTL sering berada di antara kepentingan pembangunan dan batas lingkungan. Dalam posisi seperti itu, ahli GTL harus menjaga keseimbangan: tidak anti-pembangunan, tetapi juga tidak mengabaikan risiko; tidak berhenti pada larangan, tetapi mampu menawarkan syarat teknis; tidak hanya menunjukkan masalah, tetapi membantu merumuskan jalan keluar. Inilah hakikat profesi Geologi Tata Lingkungan. Ia adalah profesi yang membaca bumi untuk menata ruang hidup.

13.8. Jalur Profesi dan Pengabdian dalam Geologi Tata Lingkungan

Geologi Tata Lingkungan membuka banyak jalur profesi dan pengabdian. Di lembaga pemerintah, bidang ini dibutuhkan untuk penyusunan data, informasi, rekomendasi, validasi, dan pertimbangan teknis. Di pemerintah daerah, GTL diperlukan untuk mendukung RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengendalian pemanfaatan ruang, dan mitigasi risiko. Di perguruan tinggi, GTL dapat dikembangkan sebagai bidang pendidikan, riset, dan pengabdian kepada masyarakat.

Di dunia konsultan, Geologi Tata Lingkungan dibutuhkan untuk kajian kesesuaian lahan, studi tapak, geologi teknik lingkungan, hidrogeologi kawasan, kajian risiko geologi, kajian kawasan industri, kajian TPST, kawasan permukiman, kawasan pesisir, kawasan wisata, dan kawasan strategis. Di dunia usaha, GTL diperlukan untuk memastikan bahwa rencana pengembangan kawasan tidak hanya layak secara ekonomi, tetapi juga aman secara geologi dan bertanggung jawab secara lingkungan.

Di lembaga kebencanaan, GTL berperan dalam menerjemahkan informasi bahaya menjadi arahan pengurangan risiko. Di pengelolaan Geopark dan geowisata, GTL berperan menjaga keseimbangan antara konservasi, edukasi, keselamatan, dan manfaat ekonomi masyarakat. Di organisasi profesi, GTL dapat menjadi bidang penguatan standar kompetensi, etika profesi, dan akuntabilitas teknis.

Dengan banyaknya jalur tersebut, Geologi Tata Lingkungan tidak boleh dipahami sebagai bidang sempit. Ia adalah ruang profesi yang luas, relevan, dan semakin diperlukan. Generasi muda yang memasuki bidang ini akan berhadapan dengan persoalan nyata: bagaimana membangun tanpa merusak, bagaimana memanfaatkan tanpa menghilangkan fungsi lingkungan, bagaimana mengurangi risiko sebelum bencana terjadi, dan bagaimana menjadikan ilmu geologi lebih dekat dengan kebutuhan masyarakat.

13.9. Peta Jalan Penguatan SDM Geologi Tata Lingkungan

Penguatan sumber daya manusia Geologi Tata Lingkungan memerlukan peta jalan yang jelas.

- Pertama, perlu dilakukan pengenalan GTL sejak pendidikan sarjana. Mahasiswa geologi dan ilmu kebumian perlu memahami bahwa geologi tidak hanya digunakan untuk eksplorasi sumber daya, tetapi juga untuk tata ruang, lingkungan hidup, dan mitigasi risiko. Mata kuliah, tugas lapangan, tugas akhir, dan riset terapan perlu memberi ruang lebih besar bagi tema Geologi Lingkungan dan Geologi Tata Lingkungan.
- Kedua, perlu diperkuat pendidikan lanjut pada jenjang magister dan doktor. Pendidikan lanjut harus diarahkan untuk menjawab kebutuhan metode, validasi, standar, dan inovasi GTL. Beasiswa, kerja sama kampus-lembaga, dan riset kolaboratif perlu didorong agar GTL berkembang sebagai bidang akademik yang kokoh.
- Ketiga, perlu dibangun sistem mentoring. Ahli senior memiliki pengalaman lapangan, pengetahuan historis, dan kepekaan teknis yang tidak selalu tertulis dalam laporan. Pengalaman tersebut perlu diwariskan melalui pelibatan tenaga muda dalam survei, diskusi peta, telaah laporan, validasi hasil, dan penyusunan rekomendasi. Mentoring harus menjadi bagian dari budaya kerja, bukan kegiatan tambahan.
- Keempat, perlu disusun standar kompetensi. Ahli GTL harus memiliki kompetensi minimum dalam geologi dasar, hidrogeologi, geologi teknik, geomorfologi, bahaya geologi, analisis spasial, tata ruang, lingkungan hidup, dan komunikasi teknis. Standar ini penting agar mutu kajian GTL dapat dijaga, baik di lembaga pemerintah, perguruan tinggi, maupun dunia konsultan.
- Kelima, perlu diperkuat kolaborasi lintas-lembaga. Badan Geologi, perguruan tinggi, pemerintah daerah, organisasi profesi, lembaga riset, dan dunia usaha perlu bekerja bersama dalam membangun basis data,

mengembangkan metode, melakukan validasi lapangan, dan menyusun rekomendasi. GTL tidak dapat tumbuh kuat apabila bekerja sendiri-sendiri.

- Keenam, perlu dilakukan dokumentasi pengetahuan. Banyak pengalaman lapangan, pertimbangan teknis, dan pembelajaran kelembagaan yang belum terdokumentasi dengan baik. Pengetahuan tersebut perlu ditulis, disusun, dan diwariskan dalam bentuk buku, pedoman, catatan teknis, atlas, basis data, dan bahan ajar. Dengan dokumentasi yang baik, pengalaman satu generasi dapat menjadi fondasi bagi generasi berikutnya.

13.10.Kesimpulan Bab

Penguatan sumber daya manusia merupakan syarat utama keberlanjutan Geologi Tata Lingkungan. Data, peta, regulasi, dan pedoman tidak akan menghasilkan keputusan yang baik tanpa manusia yang mampu membaca, menafsirkan, menyintesis, dan mempertanggungjawabkannya. Karena itu, masa depan GTL sangat ditentukan oleh kemampuan membentuk generasi baru yang berilmu, berintegritas, terbuka terhadap kerja lintas-keilmuan, dan memiliki kepekaan terhadap ruang hidup.

Bab ini menegaskan bahwa penguatan SDM GTL harus dilakukan secara internal dan eksternal. Secara internal, lembaga teknis seperti Badan Geologi memerlukan kaderisasi, pendidikan lanjut, mentoring, dan transfer pengalaman. Secara eksternal, perguruan tinggi, konsultan, pemerintah daerah, organisasi profesi, dan komunitas ilmu kebumian perlu memperluas ruang belajar, riset, dan praktik Geologi Tata Lingkungan.

Geologi Tata Lingkungan adalah bidang yang menuntut kedalaman geologi dan keluasan wawasan. Ahlinya harus memahami bumi, tetapi juga memahami manusia yang hidup di atasnya. Ia harus memahami proses alam, tetapi juga memahami keputusan ruang. Ia harus menguasai data, tetapi juga mampu merumuskan kebijakan teknis. Ia harus bekerja dengan peta, tetapi tidak boleh kehilangan kepekaan terhadap kenyataan lapangan.

Pada akhirnya, Geologi Tata Lingkungan bukan hanya tentang bagaimana bumi dipetakan, tetapi bagaimana ruang hidup ditata dengan lebih bijaksana. Tugas generasi berikutnya adalah meneruskan, menguji, memperbaiki, dan memperluas gagasan ini agar ilmu geologi semakin hadir dalam pembangunan yang aman, berkeadilan, dan berkelanjutan.

BAB 14

Perbandingan Internasional Pengaturan Geologi Lingkungan dan Perencanaan Berbasis Risiko

Membaca pengalaman dunia untuk memperkuat Geologi Tata Lingkungan di Indonesia

> Perbandingan internasional tidak dimaksudkan untuk menyalin sistem negara lain secara utuh, melainkan untuk membaca prinsip-prinsip yang dapat memperkuat Geologi Tata Lingkungan di Indonesia. Di berbagai negara, data geologi, data bahaya, data air tanah, peta kerentanan, dan informasi lingkungan fisik telah digunakan untuk mendukung tata ruang, pengendalian risiko, perlindungan air tanah, dan konservasi kawasan bernilai geologi. Bagi Indonesia yang memiliki dinamika geologi tinggi, pembelajaran ini penting untuk memperkuat GTL sebagai jembatan antara ilmu kebumian, regulasi, kelembagaan, dan keputusan ruang.

GEOLOGICAL SURVEY UNITED STATES

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY UNITED KINGDOM

GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

AUSTRALIAN GEOLOGICAL SURVEY

RISK-INFORMED LAND USE PLANNING GUIDELINES

PELAJARAN UTAMA

Data harus dapat ditelusuri, peta harus dapat digunakan, rekomendasi harus masuk ke sistem kebijakan, dan pemanfaatan ruang harus memperhatikan keselamatan serta keberlanjutan. Membandingkan bukan untuk meniru, tetapi untuk belajar.

KEBIJAKAN DAN RENCANA TATA RUANG
- ☑ DATA TERINTEGRASI
- ☑ ANALISIS RISIKO
- ☑ REKOMENDASI
- ☑ KEPUTUSAN

BERBASIS RISIKO

HERITAGE CONSERVATION

1. DATA GEOLOGI DAN BAHAYA

Peta geologi, sesar aktif, gerakan tanah, banjir, tsunami, dan gunung api menjadi dasar membaca risiko ruang.

2. AIR TANAH DAN KERENTANAN

Cekungan air tanah, zona resapan, kerentanan akuifer, dan kualitas air dipakai untuk melindungi sumber daya air.

3. TATA RUANG BERBASIS RISIKO

Informasi kebumian diterjemahkan menjadi zonasi, pembatasan pemanfaatan, syarat teknis, dan arahan mitigasi.

4. KAWASAN BERNILAI GEOLOGI

Geosite, karst, warisan geologi, dan bentang alam dilindungi sebagai bagian dari pendidikan, identitas, dan konservasi.

Belajar dari dunia, memperkuat GTL Indonesia.

BAB 14

Perbandingan Internasional Pengaturan Geologi Lingkungan dan Perencanaan Berbasis Risiko

14.1. Pengantar

Bab 14 membahas beberapa praktik internasional yang relevan dengan Geologi Tata Lingkungan. Pembahasan ini tidak bertujuan membuat daftar negara secara ensiklopedis, tetapi memilih contoh yang memiliki nilai pembelajaran bagi Indonesia. Fokusnya adalah bagaimana data geologi, data bahaya, data air tanah, peta kerentanan, dan informasi lingkungan fisik digunakan untuk mendukung keputusan ruang, pengendalian risiko, dan perlindungan kawasan bernilai geologi.

Dalam kerangka GTL, perbandingan internasional penting karena Indonesia sedang membangun arsitektur kebijakan yang menempatkan informasi geologi sebagai dasar tata ruang, lingkungan hidup, pengendalian risiko, konservasi geologi, dan pertimbangan teknis. Banyak negara telah lebih dahulu menghubungkan geosains dengan land-use planning, hazard zoning, environmental assessment, spatial data infrastructure, dan risk governance. Pengalaman tersebut dapat menjadi pembanding bagi penguatan kebijakan GTL, pedoman teknis KGL, sistem informasi GTL, serta mekanisme validasi dan pertimbangan teknis.

Bab ini membahas enam orientasi pembanding: geosains untuk perencanaan lahan di Inggris; pengaturan zona sesar aktif dan zona investigasi seismik di California; pengelolaan risiko banjir melalui floodplain management di Amerika Serikat; perencanaan berbasis risiko bahaya alam di Selandia Baru; peta bahaya dan geodata di Swiss; serta infrastruktur data spasial di Uni Eropa. Pembahasan tambahan mengenai Jepang digunakan untuk menunjukkan bagaimana bahaya gerakan massa dapat diterjemahkan menjadi area peringatan dan area kendali yang lebih ketat.

14.2. Mengapa Pembanding Internasional Diperlukan

Pembanding internasional diperlukan karena GTL berada pada simpul antara ilmu, regulasi, dan keputusan ruang. Simpul seperti ini tidak hanya menjadi persoalan Indonesia. Negara lain juga menghadapi tantangan serupa: data geologi sering disusun oleh lembaga teknis, sementara keputusan ruang dibuat oleh perencana, pemerintah daerah, lembaga lingkungan, atau otoritas perizinan. Agar data tersebut benar-benar memengaruhi keputusan, diperlukan mekanisme penerjemahan dari data teknis menjadi informasi operasional.

Ada beberapa alasan mengapa pembanding internasional relevan. Pertama, pembanding membantu memperlihatkan bahwa informasi geologi dapat menjadi instrumen pengaturan, bukan hanya pengetahuan ilmiah. Kedua, pembanding membantu menunjukkan pentingnya peta tematik dan peta bahaya sebagai dasar pengendalian pemanfaatan ruang. Ketiga, pembanding memperjelas bahwa risiko tidak

cukup dikelola melalui respons darurat, tetapi harus dikurangi sejak tahap perencanaan. Keempat, pembanding menegaskan pentingnya sistem informasi spasial, metadata, standar data, dan pemutakhiran berkala.

Namun, pembanding internasional harus digunakan secara kritis. Sistem hukum negara lain tidak selalu dapat diterapkan langsung di Indonesia. Misalnya, zona sesar aktif di California berhubungan dengan sistem hukum, kewenangan negara bagian, dan praktik perizinan setempat. Pendekatan floodplain management di Amerika Serikat berhubungan dengan asuransi banjir, peta banjir federal, dan insentif pembiayaan. Pendekatan Selandia Baru bertumpu pada peran council dan sistem planning berbasis Resource Management Act. Karena itu, yang lebih penting bukan menyalin bentuk hukumnya, tetapi menangkap prinsip operasionalnya.

14.3. Inggris: Geosains, Pemetaan Tematik, dan Perencanaan Lahan

Inggris memberikan contoh penting mengenai penggunaan geosains untuk perencanaan lahan dan pembangunan. British Geological Survey menempatkan informasi bawah permukaan sebagai dasar bagi berbagai layanan masyarakat, antara lain keamanan air, ketahanan terhadap banjir, stabilitas lahan, tanah dan air yang sehat, pasokan mineral, energi, serta agenda transisi energi. Dalam konteks land-use planning and housing, BGS menyediakan data, peta, web viewer, dan alat bantu keputusan untuk berbagai pengguna yang terlibat dalam perencanaan dan pembangunan.

Pelajaran utama dari Inggris adalah pentingnya mengubah data geologi menjadi layanan informasi yang dapat digunakan oleh pengguna non-geolog. Data litologi, geologi teknik, hidrogeologi, mineral, bahaya tanah, dan kondisi bawah permukaan tidak hanya disimpan sebagai arsip ilmiah, tetapi dikemas dalam bentuk peta tematik, basis data, dan produk informasi. Dengan demikian, informasi geologi menjadi bagian dari proses perencanaan, penilaian tapak, investasi, pembangunan perumahan, pengelolaan air, dan pengurangan risiko.

Bagi GTL Indonesia, pengalaman tersebut memperkuat kebutuhan membangun Sistem Informasi GTL yang tidak hanya berisi dokumen, tetapi juga data spasial, metadata, klasifikasi kesesuaian, parameter pembatas, riwayat validasi, dan rekomendasi teknis. Pengguna GTL tidak selalu ahli geologi. Banyak pengguna berasal dari pemerintah daerah, perencana ruang, penyusun KLHS, penyusun dokumen lingkungan, pengelola kawasan, atau pemrakarsa kegiatan. Oleh karena itu, informasi GTL perlu disajikan dalam bahasa teknis yang tetap akurat, tetapi dapat langsung dikaitkan dengan keputusan.

Pengalaman Inggris juga menunjukkan pentingnya peran lembaga geologi nasional sebagai penyedia data otoritatif. Lembaga teknis tidak hanya menghasilkan peta, tetapi juga memastikan bahwa peta tersebut digunakan melalui mekanisme layanan, interpretasi, dan pembaruan. Dalam konteks Indonesia, prinsip ini dapat diterjemahkan menjadi penguatan peran Badan Geologi atau unit teknis terkait dalam penyediaan informasi GTL, validasi kajian, pertimbangan teknis, dan pemutakhiran data.

14.4. Amerika Serikat: Zona Sesar Aktif, Seismic Hazard, dan Floodplain Management

Amerika Serikat memberikan beberapa contoh penting, terutama melalui California dan FEMA. California dikenal memiliki pengaturan khusus terkait sesar aktif melalui Alquist-Priolo Earthquake Fault Zoning Act. California Geological Survey menerbitkan peta resmi zona sesar gempa sebagai dasar pengendalian pembangunan di sekitar sesar aktif. Selain itu, Seismic Hazards Mapping Act mengarahkan delineasi zona yang memerlukan investigasi untuk mengurangi ancaman kegagalan tanah akibat gempa, seperti likuefaksi dan pergerakan lereng akibat gempa.

Pelajaran dari California adalah bahwa informasi geologi struktural dan bahaya seismik dapat diberi konsekuensi ruang yang jelas. Peta sesar aktif tidak hanya menjadi informasi ilmiah, tetapi menjadi dasar pengaturan lokasi pembangunan tertentu. Di dalam zona yang ditetapkan, proyek tertentu harus memenuhi persyaratan penyelidikan

sebelum pembangunan. Prinsip yang relevan bagi GTL Indonesia adalah kebutuhan menghubungkan peta bahaya geologi dengan kewajiban kajian, syarat teknis, pembatasan kegiatan, dan keputusan tapak.

FEMA memberikan contoh lain melalui National Flood Insurance Program dan floodplain management. Walaupun banjir tidak selalu dibahas sebagai bahaya geologi murni, pengendalian ruang pada area banjir memiliki relevansi kuat bagi GTL, terutama pada dataran aluvial, dataran pantai, delta, dan area dengan kendali geomorfologi kuat. Floodplain management memperlihatkan bahwa peta bahaya dapat menjadi dasar regulasi, standar minimum, dan penerapan standar yang lebih tinggi oleh pemerintah lokal.

Dua contoh Amerika Serikat ini menunjukkan bahwa peta bahaya yang baik perlu disertai mekanisme kebijakan. Peta tanpa konsekuensi keputusan sering berakhir sebagai lampiran teknis. Sebaliknya, peta yang terhubung dengan kewajiban kajian, perizinan, desain mitigasi, atau pembatasan penggunaan lahan dapat menjadi instrumen pengurangan risiko. Bagi Indonesia, pelajaran ini sangat penting karena banyak peta bahaya geologi telah tersedia, tetapi tidak selalu masuk secara kuat ke dalam RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, atau pengendalian pemanfaatan ruang.

14.5. Selandia Baru: Perencanaan Berbasis Risiko Bahaya Alam

Selandia Baru merupakan contoh penting dalam perencanaan berbasis risiko untuk bahaya alam. Negara ini menghadapi gempa bumi, tsunami, banjir, gerakan tanah, erosi pantai, dan bahaya vulkanik. Basis hukumnya tetap berakar pada Resource Management Act 1991, sedangkan instrumen nasional yang relevan pada saat penyusunan buku ini adalah Proposed National Policy Statement for Natural Hazard Decision-making (NPS-NHD) yang dikonsultasikan kepada publik pada tahun 2023, bukan instrumen final tahun 2025. Karena statusnya masih berupa usulan kebijakan, rujukan ini digunakan sebagai contoh arah penguatan pengambilan keputusan berbasis risiko, bukan sebagai contoh regulasi final yang telah berlaku.

Pelajaran utama dari Selandia Baru adalah bahwa perencanaan tidak cukup hanya menanyakan apakah bahaya ada atau tidak. Perencanaan perlu menilai tingkat risiko dan konsekuensi kegiatan. Kegiatan dengan konsekuensi rendah mungkin masih dapat ditempatkan pada area tertentu dengan syarat teknis, sedangkan kegiatan yang memiliki konsekuensi tinggi memerlukan standar lebih ketat atau alternatif lokasi. Dengan kata lain, pengendalian ruang bersifat proporsional terhadap tingkat risiko.

Pendekatan ini sangat relevan bagi GTL Indonesia. Dalam praktik KGL, tidak semua bahaya geologi memiliki implikasi yang sama untuk semua kegiatan. Kawasan dengan bahaya sedang mungkin tidak sesuai untuk fasilitas strategis, tetapi masih dapat digunakan untuk kegiatan dengan intensitas rendah dan pengelolaan memadai. Sebaliknya, kawasan dengan bahaya tinggi dapat menjadi faktor penyisih untuk kegiatan yang berisiko tinggi. Karena itu, GTL perlu mengembangkan cara membaca bahaya, risiko, dan jenis kegiatan secara terpadu.

Selandia Baru juga memperlihatkan pentingnya komunikasi risiko. Peta dan analisis teknis harus dapat dipahami oleh pemerintah lokal, masyarakat, pengembang, dan pemilik lahan. Dalam konteks Indonesia, komunikasi risiko ini perlu menjadi bagian dari Pertimbangan Teknis GTL, bukan hanya menjadi lampiran peta. Rekomendasi perlu menyatakan alasan teknis, konsekuensi ruang, pilihan mitigasi, dan batas penggunaan data.

14.6. Swiss: Peta Bahaya, Geodata, dan Pengendalian Risiko

Swiss memberikan contoh mengenai penggunaan peta bahaya dan geodata dalam pengelolaan risiko. Pemerintah federal melalui lembaga lingkungan menyediakan informasi mengenai peta bahaya, geodata, dan portal bahaya alam. Peta bahaya digunakan untuk menunjukkan tingkat bahaya berbagai proses alam, sedangkan geodata menyediakan basis informasi untuk analisis, perencanaan, dan pengambilan keputusan oleh pemerintah serta otoritas lokal.

Pelajaran dari Swiss adalah pentingnya membangun hubungan antara data nasional

dan penerapan lokal. Data nasional membantu memberi kerangka konsisten, sementara keputusan ruang tetap membutuhkan penyesuaian sesuai konteks wilayah. Dalam GTL Indonesia, prinsip ini penting karena data geologi nasional harus dapat digunakan oleh provinsi, kabupaten/kota, dan penyusun dokumen teknis. Namun, skala dan ketelitian data harus selalu dijelaskan agar tidak terjadi penggunaan yang melampaui batas ketelitiannya.

Swiss juga memperlihatkan pentingnya pemutakhiran dan layanan informasi. Bahaya alam dan kondisi lingkungan tidak bersifat statis. Perubahan iklim, pembangunan, perubahan tutupan lahan, pengambilan air tanah, dan proses geologi dapat mengubah tingkat risiko. Karena itu, Sistem Informasi GTL Indonesia perlu dirancang sebagai sistem hidup yang dapat diperbarui, bukan sebagai repositori pasif.

14.7. Uni Eropa: Infrastruktur Data Spasial dan Interoperabilitas

Uni Eropa memberikan pembelajaran melalui INSPIRE Directive. INSPIRE dirancang sebagai infrastruktur informasi spasial untuk kebijakan lingkungan dan kebijakan yang berdampak pada lingkungan. Directive tersebut mencakup 34 tema data spasial yang diperlukan untuk aplikasi lingkungan dan mendorong interoperabilitas lintas negara serta lintas tema. Dalam konteks GTL, INSPIRE relevan bukan karena Indonesia harus mengikuti kerangka Uni Eropa, tetapi karena prinsip standardisasi, metadata, interoperabilitas, dan keterbukaan data sangat penting bagi keputusan ruang berbasis geologi.

GTL membutuhkan banyak jenis data: peta geologi, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya geologi, penggunaan lahan, kawasan lindung, Warisan Geologi, KBAK, KCAG, batas administrasi, infrastruktur, dan data lingkungan. Jika data tersebut memiliki format, skala, metadata, dan sistem referensi yang berbeda tanpa standar yang jelas, sintesis GTL menjadi sulit. INSPIRE mengajarkan bahwa infrastruktur data spasial merupakan bagian dari kebijakan, bukan sekadar urusan teknologi.

Pelajaran ini sangat relevan untuk Sistem Informasi GTL. Sistem informasi tidak cukup hanya menyimpan peta. Sistem tersebut perlu memuat asal data, tanggal pemutakhiran, skala, metode penyusunan, penanggung jawab data, batas penggunaan, dan status validasi. Tanpa metadata yang baik, pengguna tidak dapat menilai apakah data sesuai untuk RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, atau keputusan tapak.

14.8. Jepang: Area Peringatan dan Pengendalian Bahaya Gerakan Massa

Jepang memiliki pengalaman panjang dalam pengelolaan bahaya gerakan massa, aliran material lereng, dan bahaya terkait curah hujan tinggi pada wilayah bergunung. Dalam kerangka pengendalian bencana terkait sedimen, Jepang mengenal area peringatan dan area khusus yang lebih ketat untuk wilayah yang berpotensi menimbulkan dampak serius terhadap penduduk dan bangunan. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa bahaya geologi dapat diterjemahkan ke dalam tingkatan pengaturan yang berbeda.

Pelajaran dari Jepang adalah pentingnya membedakan tingkat pengendalian. Area dengan bahaya tertentu mungkin memerlukan peningkatan kesiapsiagaan, sistem peringatan, dan edukasi publik. Area yang memiliki potensi konsekuensi lebih berat dapat memerlukan pengaturan lebih ketat, termasuk pembatasan pembangunan tertentu, syarat teknis, atau arahan relokasi pada kondisi yang sangat berisiko. Prinsip ini relevan bagi GTL, terutama dalam pengaturan kawasan rawan gerakan tanah, lahar, erosi tebing, atau kawasan dengan pembatas geomorfologi kuat.

Indonesia memiliki banyak kawasan pegunungan, lereng vulkanik, wilayah curah hujan tinggi, dan kawasan berkembang yang berada pada daerah rawan gerakan tanah. Pengalaman Jepang dapat membantu memperkuat pendekatan GTL agar peta bahaya tidak hanya dibaca sebagai informasi, tetapi sebagai dasar kelas pengendalian ruang dan kewajiban mitigasi.

Tabel 14.1 Ringkasan pembanding internasional yang relevan bagi GTL.

Negara / Kerangka	Fokus Praktik	Instrumen Utama	Pelajaran bagi GTL Indonesia
Inggris / BGS	Geosains untuk perencanaan lahan, perumahan, air, tanah, mineral, dan kondisi bawah permukaan.	Data geosains, peta tematik, web viewer, layanan informasi, decision support.	Informasi GTL perlu disajikan sebagai layanan yang dapat digunakan perencana dan pengambil keputusan.
California, Amerika Serikat	Pengaturan zona sesar aktif dan zona investigasi seismik.	Peta resmi zona sesar, zona investigasi, kewajiban kajian tapak.	Data bahaya geologi perlu diberi konsekuensi ruang dan syarat teknis.
FEMA, Amerika Serikat	Floodplain management dan standar minimum pengelolaan area banjir.	Peta banjir, NFIP, standar pengelolaan, penerapan lokal.	Peta bahaya efektif jika terhubung dengan regulasi, insentif, dan pengendalian ruang.
Selandia Baru	Perencanaan berbasis risiko bahaya alam.	National Policy Statement, pendekatan risiko, pengaturan proporsional.	GTL perlu membedakan tingkat risiko dan konsekuensi kegiatan.
Swiss	Peta bahaya, geodata, dan portal informasi bahaya alam.	Hazard maps, geodata, portal nasional, penerapan lokal.	Sistem informasi GTL perlu mutakhir, terstandar, dan dapat digunakan lintas level pemerintahan.
Uni Eropa / INSPIRE	Infrastruktur data spasial untuk kebijakan lingkungan.	Standar data, metadata, interoperabilitas, layanan data spasial.	Metadata dan interoperabilitas harus menjadi bagian dari Sistem Informasi GTL.
Jepang	Area peringatan dan area pengendalian lebih ketat untuk bahaya gerakan massa.	Zona bahaya, sistem peringatan, ketentuan perlindungan penduduk.	Kelas bahaya dapat diterjemahkan menjadi tingkat pengendalian ruang yang berbeda.

14.9. Prinsip Umum yang Dapat Dipetik

Dari berbagai praktik tersebut, terdapat beberapa prinsip umum. Pertama, data geologi dan data bahaya harus memiliki otoritas, metode, dan metadata yang jelas. Tanpa otoritas dan metadata, data sulit dipakai sebagai dasar keputusan publik. Kedua, peta tematik harus diterjemahkan menjadi kelas keputusan. Peta tidak cukup hanya menunjukkan lokasi, tetapi harus memberi implikasi: sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, tidak direkomendasikan, atau memerlukan kajian rinci.

Ketiga, pengendalian ruang perlu berbasis risiko. Tingkat bahaya, paparan, kerentanan, kapasitas, dan konsekuensi kegiatan harus dibaca bersama. Keempat, keputusan tapak memerlukan data yang lebih rinci daripada keputusan regional. Hal ini berlaku di hampir semua negara: peta regional berguna untuk arahan umum, sedangkan pembangunan berisiko tinggi memerlukan investigasi tapak. Kelima, sistem informasi spasial merupakan bagian dari tata kelola. Kualitas keputusan sangat dipengaruhi oleh kualitas data, akses, interoperabilitas, dan pemutakhiran.

Keenam, peran lembaga teknis sangat penting. Lembaga teknis harus menjaga mutu data, menyediakan interpretasi, melakukan validasi, dan memberi pertimbangan teknis. Ketujuh, komunikasi risiko perlu menjadi bagian dari pengambilan keputusan. Peta dan laporan teknis harus dapat dimengerti oleh perencana, pejabat, pemrakarsa, dan masyarakat, tanpa kehilangan dasar ilmiahnya.

Tabel 14.2 Prinsip pembelajaran internasional untuk penguatan GTL Indonesia.

Prinsip Pembanding	Makna Operasional	Implikasi untuk GTL Indonesia
Data otoritatif	Data berasal dari lembaga yang memiliki mandat, metode, dan mekanisme pemutakhiran.	Badan Geologi atau unit teknis perlu memperkuat data dasar, metadata, dan status validasi.
Peta sebagai instrumen keputusan	Peta digunakan untuk menyusun arahan, syarat, dan pembatasan.	Peta GTL perlu dilengkapi kelas kesesuaian, faktor pembatas, dan rekomendasi.
Berbasis risiko	Bahaya dinilai bersama paparan, kerentanan, kapasitas, dan konsekuensi kegiatan.	KGL perlu membedakan kegiatan rendah risiko, berisiko sedang, dan berkonsekuensi tinggi.
Kesesuaian skala	Skala data harus sesuai dengan tingkat keputusan.	RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan tapak strategis perlu tingkat data berbeda.
Interoperabilitas data	Data lintas sektor dapat digabungkan karena standar, format, dan metadata jelas.	Sistem Informasi GTL perlu memakai standar data, metadata, dan sistem referensi yang konsisten.
Validasi teknis	Hasil kajian diperiksa sebelum menjadi dasar keputusan publik.	Pertimbangan Teknis GTL perlu didasarkan pada proses verifikasi dan validasi yang terdokumentasi.

14.10. Relevansi dan Batas Penerapan bagi Indonesia

Relevansi pembanding internasional bagi Indonesia terletak pada prinsip, bukan pada penyalinan bentuk hukum. Indonesia memiliki kondisi geologi yang sangat beragam, sistem pemerintahan berjenjang, dinamika pembangunan cepat, kebutuhan infrastruktur besar, tekanan kawasan perkotaan, wilayah pesisir yang rentan, kawasan karst dan air tanah yang penting, serta kawasan bernilai geologi yang luas. Karena itu, GTL Indonesia perlu dibangun berdasarkan kondisi nasional, tetapi tetap belajar dari praktik baik internasional.

Batas penerapan perlu diperhatikan. Pertama, data Indonesia memiliki tingkat ketersediaan yang berbeda antarwilayah. Beberapa wilayah memiliki data geologi dan bahaya cukup lengkap, sementara wilayah lain memerlukan pemutakhiran. Kedua, sistem tata ruang Indonesia memiliki instrumen khusus seperti RTRW, RDTR, KLHS, Persetujuan Lingkungan, Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Ketiga, kewenangan sektor perlu dihormati. GTL tidak menggantikan tata ruang, lingkungan hidup, sumber daya air, kebencanaan, atau konservasi geologi, tetapi menyediakan jembatan teknis.

Dengan memahami batas tersebut, pembanding internasional dapat digunakan secara produktif. Indonesia dapat memperkuat GTL melalui data yang lebih baik, metode yang lebih transparan, sistem informasi yang interoperabel, mekanisme validasi yang jelas, serta regulasi yang menempatkan GTL sebagai instrumen teknis lintas sektor. Penguatan ini harus tetap mempertimbangkan kapasitas pemerintah daerah, ketersediaan tenaga ahli, dan kebutuhan pembangunan yang nyata.

14.11. Kesimpulan Bab

Perbandingan internasional menunjukkan bahwa data geologi dan data bahaya dapat menjadi dasar penting dalam perencanaan ruang, pengendalian risiko, perlindungan lingkungan, dan pengambilan keputusan publik. Inggris menekankan layanan geosains untuk perencanaan; California menunjukkan pengaturan zona sesar dan zona investigasi seismik; FEMA memperlihatkan hubungan peta banjir dengan pengelolaan area banjir; Selandia Baru menekankan pendekatan berbasis risiko; Swiss memperlihatkan pentingnya peta bahaya dan geodata; Uni Eropa memberi pelajaran tentang interoperabilitas data spasial; dan Jepang memperlihatkan penerjemahan bahaya gerakan massa ke dalam tingkat pengendalian.

Pelajaran umum dari praktik tersebut adalah pentingnya data otoritatif, peta yang memiliki fungsi keputusan, perencanaan berbasis risiko, kesesuaian skala, validasi teknis, sistem informasi spasial, dan komunikasi risiko. Prinsip-prinsip tersebut sangat relevan bagi penguatan GTL Indonesia.

Namun, pembanding internasional harus diterapkan secara selektif. Indonesia perlu mengembangkan GTL berdasarkan kondisi geologi, sistem hukum, kelembagaan, dan kebutuhan pembangunan nasional. Bab berikutnya membahas arah penguatan GTL Indonesia berdasarkan pelajaran internasional dan kebutuhan yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya.

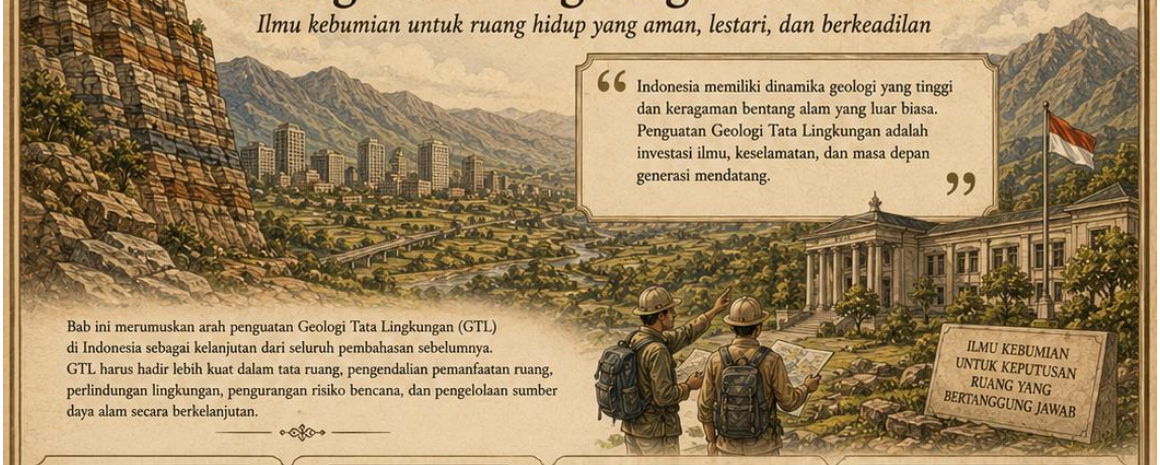
> *Pengalaman negara lain adalah cermin, bukan cetakan. Setiap negara memiliki geologi, hukum, kelembagaan, dan kebutuhan pembangunan yang berbeda, tetapi ada pelajaran bersama yang dapat diambil: data harus sahih, peta harus berguna bagi keputusan, risiko harus dikomunikasikan, dan rekomendasi harus dapat ditindaklanjuti. Perbandingan internasional membantu Indonesia melihat bahwa geosains dapat menjadi bagian penting dari perencanaan modern. Namun, GTL Indonesia harus tumbuh dari tanahnya sendiri, dari gunung apinya, sesarnya, cekungan air tanahnya, pesisirnya, karstnya, dan pengalaman lapangannya. Belajar dari luar penting, tetapi berpijak pada bumi sendiri jauh lebih menentukan.*

BAB 15

Arah Penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia

Ilmu kebumian untuk ruang hidup yang aman, lestari, dan berkeadilan

> Indonesia memiliki dinamika geologi yang tinggi dan keragaman bentang alam yang luar biasa. Penguatan Geologi Tata Lingkungan adalah investasi ilmu, keselamatan, dan masa depan generasi mendatang.



Bab ini merumuskan arah penguatan Geologi Tata Lingkungan (GTL) di Indonesia sebagai kelanjutan dari seluruh pembahasan sebelumnya. GTL harus hadir lebih kuat dalam tata ruang, pengendalian pemanfaatan ruang, perlindungan lingkungan, pengurangan risiko bencana, dan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan.

I. KEBUTUHAN DAN PERAN GTL

GTL sebagai jembatan antara ilmu geologi, regulasi, dan keputusan ruang.

- Ilmu yang relevan
- Regulasi yang tepat
- Keputusan ruang yang bijak

II. PERANGKAT METODOLOGIS

Perangkat ilmiah menjadi dasar penilaian dan pengambilan keputusan yang konsisten.

- Daya dukung & daya tampung
- Pemetaan, skoring, pembobotan
- Analisis spasial
- Air tanah & zona resapan
- Bahaya geologi

III. PERLINDUNGAN DAN PEMANFAATAN BERKELANJUTAN

Kawasan bernilai geologi sebagai warisan, identitas, dan sumber manfaat berkelanjutan.

- Kawasan lindung geologi
- Warisan Geologi, KCAG, KBAK
- Geopark & geowisata
- Konservasi dan edukasi

IV. REGULASI, KELEMBAGAAN, DAN SISTEM INFORMASI

Kerangka kelembagaan, regulasi, KGL, validasi, pertimbangan teknis, dan sistem informasi yang andal dan terintegrasi.

- Regulasi yang mendukung
- Kelembagaan yang kuat
- KGL & validasi kajian
- Pertimbangan teknis
- Sistem informasi GTL terintegrasi

ARAH PENGUATAN GTL DI INDONESIA

PENGUATAN ILMU DAN DATA
Meningkatkan kualitas data geologi, hidrogeologi, dan lingkungan fisik yang terbuka, mutakhir, dan terstandar.

PENGUATAN KELEMBAGAAN DAN KAPASITAS
Memperkuat koordinasi lintas lembaga dan meningkatkan kapasitas SDM geologi tata lingkungan.

INTEGRASI DALAM KEBIJAKAN DAN TATA RUANG
Memastikan informasi GTL menjadi dasar dalam semua tahapan perencanaan dan pengendalian pemanfaatan ruang.

PENGUATAN MITIGASI DAN ADAPTASI
Mengutamakan pengurangan risiko bencana geologi dan adaptasi perubahan iklim dalam setiap keputusan ruang.

PEMANFAATAN BERKELANJUTAN
Mengoptimalkan manfaat sumber daya alam dan warisan geologi tanpa mengurangi daya dukung dan fungsi lingkungan.

PARTISIPASI DAN KOMUNIKASI
Mendorong keterlibatan masyarakat, transparansi informasi, dan komunikasi yang efektif.

GTL YANG KUAT, DATA YANG ANDAL, KEPUTUSAN YANG TEPAT, UNTUK RUANG HIDUP YANG AMAN, LESTARI, DAN BERKEADILAN.

BAB 15

Arah Penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia

15.1 Pengantar

Bab 15 merumuskan arah penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia. Rumusan ini bertolak dari seluruh pembahasan sebelumnya. Bagian I telah menegaskan kebutuhan GTL sebagai jembatan antara ilmu geologi, regulasi, dan keputusan ruang. Bagian II telah menjelaskan perangkat metodologis seperti daya dukung, daya tampung, pemetaan, skoring, pembobotan, analisis spasial, air tanah, zona resapan, dan bahaya geologi. Bagian III telah menempatkan kawasan lindung geologi, Warisan Geologi, KCAG, KBAK, Geopark, dan geowisata sebagai bagian dari perlindungan serta pemanfaatan berkelanjutan. Bagian IV telah membahas regulasi, kelembagaan, KGL, validasi, pertimbangan teknis, dan sistem informasi.

Berdasarkan alur tersebut, penguatan GTL Indonesia perlu dilakukan secara menyeluruh. Penguatan tidak cukup hanya menyusun regulasi baru, tetapi juga harus memperbaiki standar data, metode analisis, kompetensi pelaksana, mekanisme validasi, bentuk pertimbangan teknis, sistem informasi, integrasi ke tata ruang dan dokumen lingkungan, serta pemantauan pelaksanaan. Dengan demikian, GTL dapat bergerak dari konsep menjadi instrumen operasional yang digunakan dalam keputusan publik.

Bab ini membahas arah penguatan melalui beberapa ranah: penguatan definisi dan ruang lingkup; arsitektur regulasi; standar data dan metadata; metodologi KGL; validasi dan pertimbangan teknis; kelembagaan; integrasi ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan perizinan; penguatan Sistem Informasi GTL; pengembangan kapasitas SDM; penguatan komunikasi risiko; serta agenda implementasi bertahap.

15.2 Memperjelas Definisi dan Ruang Lingkup GTL

Penguatan pertama adalah memperjelas definisi dan ruang lingkup GTL. Kejelasan ini penting karena istilah Geologi Lingkungan, KGL, Kajian GTL, Informasi GTL, dan Pertimbangan Teknis GTL dapat saling berdekatan. Tanpa definisi yang tertib, GTL berisiko dipahami sebagai nama baru untuk kegiatan lama, atau sebaliknya dipahami terlalu luas sehingga sulit dioperasionalkan.

Dalam buku ini, GTL dipahami sebagai kerangka sintesis dan penerapan geologi lingkungan untuk mendukung tata ruang, lingkungan hidup, pengendalian risiko geologi, konservasi geologi, pengembangan kawasan, dan pertimbangan teknis. Geologi Lingkungan menjadi basis ilmu; KGL menjadi metode teknis; Kajian GTL menjadi proses sintesis; Pertimbangan Teknis GTL menjadi keluaran untuk keputusan; sedangkan Sistem Informasi GTL menjadi wadah data, informasi, riwayat validasi, dan pemutakhiran.

Ruang lingkup GTL perlu ditegaskan agar tidak tumpang tindih dengan kewenangan sektor lain. GTL tidak menggantikan kewenangan penataan ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, sumber daya air, pertambangan, atau konservasi geologi. GTL memperkuat sektor-sektor tersebut melalui data dan pertimbangan teknis geologi. Dengan posisi seperti ini, GTL menjadi instrumen lintas sektor yang menjaga agar keputusan ruang tidak lepas dari kemampuan dan keterbatasan lingkungan geologi.

15.3 Memperkuat Arsitektur Regulasi GTL

Penguatan regulasi perlu dilakukan secara berjenjang. Pada tingkat kebijakan, diperlukan payung yang menjelaskan kedudukan GTL, tujuan, ruang lingkup, hubungan dengan sektor lain, kelembagaan, jenis produk, dan pemanfaatannya dalam keputusan publik. Pada tingkat teknis, diperlukan pedoman KGL yang menjelaskan data minimum, parameter, skala, metode, penyajian peta, skoring, pembobotan, validasi, dan keluaran rekomendasi.

Arsitektur regulasi GTL idealnya membedakan fungsi payung dan fungsi teknis. Payung regulasi dapat mengatur koordinasi, mandat, kelembagaan, hubungan dengan RTRW/RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengendalian risiko, konservasi geologi, dan sistem informasi. Pedoman teknis dapat mengatur prosedur penyusunan KGL, standar data, format laporan, peta sintesis, matriks rekomendasi, serta tata cara validasi dan pertimbangan teknis.

Kejelasan arsitektur regulasi penting agar GTL tidak menjadi dokumen tambahan yang bersifat sukarela semata. Jika GTL ingin memengaruhi keputusan ruang, maka hubungan antara Informasi GTL, Kajian GTL, Pertimbangan Teknis GTL, dan instrumen formal seperti RTRW, RDTR, KLHS, Persetujuan Lingkungan, serta pengendalian pemanfaatan ruang harus dinyatakan dengan jelas.

15.4 Standar Data, Metadata, dan Skala

Penguatan GTL sangat bergantung pada kualitas data. Data yang diperlukan mencakup peta geologi, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya geologi, air tanah, zona resapan, KBAK, KCAG, Warisan Geologi, Geopark, penggunaan lahan, batas administrasi, infrastruktur, dan data lingkungan pendukung. Data tersebut harus memiliki sumber, metode, skala, tanggal pemutakhiran, penanggung jawab, dan batas penggunaan.

Metadata menjadi bagian penting dari akuntabilitas GTL. Tanpa metadata, pengguna tidak mengetahui apakah suatu data layak untuk RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, atau keputusan tapak. Data skala regional tidak boleh digunakan langsung untuk menyetujui tapak strategis tanpa investigasi lanjutan. Sebaliknya, data tapak yang rinci harus ditempatkan dalam konteks regional agar tidak kehilangan gambaran lingkungan geologi yang lebih luas.

Standar data juga diperlukan untuk interoperabilitas. GTL menggabungkan data dari berbagai sektor dan tingkat pemerintahan. Apabila format, sistem koordinat, klasifikasi, dan metadata tidak seragam, sintesis KGL menjadi tidak konsisten. Karena itu, Sistem Informasi GTL perlu dibangun dengan standar data spasial yang jelas dan dapat dihubungkan dengan sistem informasi tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, dan sumber daya air.

15.5 Penguatan Metodologi KGL

Metodologi KGL perlu diperkuat agar hasil kajian konsisten, dapat diuji, dan dapat digunakan. Penguatan metodologi mencakup pemilihan parameter, penentuan satuan analisis, skoring, pembobotan, analisis spasial, validasi lapangan, uji kewajaran, pengelolaan ketidakpastian, penyusunan kelas kesesuaian, dan perumusan rekomendasi. Skoring dan pembobotan boleh digunakan, tetapi harus dijelaskan dasar ilmiah dan relevansinya dengan tujuan kajian.

Metodologi KGL harus bersifat fleksibel tetapi terstandar. Fleksibel berarti parameter dapat disesuaikan dengan karakter wilayah dan jenis kegiatan. Standar berarti setiap kajian tetap harus memenuhi prinsip minimum: data cukup, skala sesuai, metode jelas, parameter relevan, peta konsisten, dan rekomendasi dapat ditelusuri. Dengan

demikian, KGL tidak berubah menjadi prosedur mekanis, tetapi tetap menjaga penalaran geologi.

Penguatan metodologi juga perlu membedakan objek kajian. KGL untuk peruntukan lahan pada RTRW berbeda dengan KGL untuk RDTR, kawasan industri, TPST, prasarana pesisir, bendungan, fasilitas strategis, Geopark, atau kawasan bernilai geologi. Semakin besar konsekuensi kegiatan, semakin rinci data dan semakin ketat validasi yang diperlukan.

15.6 Validasi dan Pertimbangan Teknis

Validasi merupakan salah satu kunci penguatan GTL. Hasil KGL dan Kajian GTL sering digunakan untuk keputusan yang memiliki konsekuensi sosial, ekonomi, lingkungan, dan keselamatan. Karena itu, hasil kajian perlu diperiksa kecukupan data, kesesuaian skala, ketepatan metode, konsistensi peta, keterlacakan rekomendasi, dan kewajaran kesimpulan.

Pertimbangan Teknis GTL perlu disusun sebagai keluaran yang ringkas tetapi kuat. Dokumen ini harus memuat dasar data, ruang lingkup kajian, metode, hasil sintesis, status kesesuaian, faktor pembatas utama, syarat teknis, rekomendasi, kebutuhan kajian lanjutan, serta batas penggunaan. Pertimbangan teknis bukan pengganti keputusan administratif, tetapi menjadi dasar teknis bagi pejabat atau instansi berwenang.

Mekanisme validasi perlu jelas, terutama untuk kajian yang disusun oleh pihak lain. Pemerintah atau unit teknis harus dapat menilai apakah kajian tersebut memenuhi standar sebelum digunakan. Validasi juga harus terdokumentasi dalam Sistem Informasi GTL, sehingga riwayat data, kajian, rekomendasi, dan keputusan dapat ditelusuri.

15.7 Penguatan Kelembagaan dan Koordinasi

GTL memerlukan kelembagaan yang jelas. Karena sifatnya lintas sektor, GTL perlu menghubungkan lembaga geologi, penataan ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, sumber daya air, konservasi geologi, pemerintah daerah, dan pemangku kepentingan pembangunan. Tanpa koordinasi kelembagaan, hasil GTL dapat berhenti sebagai laporan teknis yang tidak digunakan dalam keputusan.

Penguatan kelembagaan perlu mencakup pembagian peran. Lembaga geologi menyediakan data, metode, validasi, dan pertimbangan teknis. Lembaga tata ruang menggunakan hasil GTL untuk RTRW, RDTR, pengaturan zonasi, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Lembaga lingkungan menggunakan GTL untuk KLHS, dokumen lingkungan, rencana pengelolaan, dan pemantauan. Lembaga kebencanaan menggunakan hasil GTL bersama data bahaya dan risiko. Pemerintah daerah menerjemahkan rekomendasi ke dalam kebijakan wilayah.

Koordinasi juga perlu didukung prosedur. Misalnya, kapan Kajian GTL diperlukan; siapa yang menyusun; siapa yang memvalidasi; bagaimana hasilnya masuk ke RTRW, RDTR, KLHS, dan dokumen lingkungan; bagaimana rekomendasi dipantau; serta bagaimana data diperbarui. Prosedur ini penting agar GTL tidak bergantung pada inisiatif perorangan, tetapi menjadi sistem kerja.

15.8 Integrasi GTL ke Instrumen Kebijakan

Arah penguatan GTL harus memastikan integrasi ke instrumen kebijakan. Dalam RTRW, GTL dapat memberi arahan makro mengenai kawasan yang mendukung, terbatas, rawan, atau perlu dilindungi. Dalam RDTR, GTL dapat diterjemahkan ke ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, ketentuan khusus, dan ITBX. Dalam KLHS, GTL dapat memperkuat penilaian daya dukung, daya tampung, risiko, dan alternatif kebijakan. Dalam dokumen lingkungan, GTL dapat memperkuat analisis dampak terhadap tanah, batuan, air tanah, resapan, bahaya, dan nilai geologi.

Integrasi juga perlu dilakukan pada perizinan dan kegiatan strategis. Kegiatan seperti kawasan industri, TPST, prasarana pesisir, bendungan, fasilitas energi, dan pengembangan kawasan besar memerlukan kajian geologi lingkungan yang lebih rinci. Untuk kegiatan berkonsekuensi tinggi, GTL perlu mendorong kewajiban kajian tapak, investigasi geologi teknik, analisis bahaya,

analisis kerentanan air tanah, dan rencana pemantauan.

Integrasi tersebut harus menjaga batas kewenangan. GTL tidak mengeluarkan izin ruang atau lingkungan, tetapi menyediakan dasar teknis yang digunakan oleh proses perizinan dan pengendalian. Dengan demikian, GTL memperkuat kualitas keputusan tanpa mengambil alih mandat sektor lain.

15.9 Sistem Informasi GTL

Sistem Informasi GTL merupakan instrumen penting untuk menghubungkan data, kajian, validasi, pertimbangan teknis, dan pemantauan. Sistem ini perlu memuat data spasial, dokumen kajian, metadata, peta sintesis, kelas kesesuaian, faktor pembatas, rekomendasi, status validasi, serta riwayat pemutakhiran. Sistem informasi juga perlu dirancang agar dapat digunakan oleh lembaga teknis, pemerintah daerah, penyusun dokumen, dan pengambil keputusan sesuai kewenangan aksesnya.

Sistem Informasi GTL harus dibangun dengan prinsip keterlacakan. Setiap rekomendasi perlu dapat ditelusuri ke data dan metode. Setiap peta perlu memiliki informasi skala, tanggal penyusunan, sumber data, penanggung jawab, dan batas penggunaan. Setiap pertimbangan teknis perlu memiliki riwayat validasi dan dasar analisis. Dengan cara ini, sistem informasi tidak hanya menjadi etalase peta, tetapi menjadi mekanisme akuntabilitas teknis.

Penguatan sistem informasi juga perlu memperhatikan pemutakhiran berkala. Kondisi lingkungan geologi dapat berubah karena pembangunan, perubahan penggunaan lahan, penurunan muka tanah, perubahan garis pantai, aktivitas gunung api, gempa bumi, gerakan tanah, eksploitasi air tanah, dan perubahan iklim. Karena itu, data GTL harus diperbarui sesuai kebutuhan, terutama pada kawasan dengan tekanan pembangunan tinggi dan kawasan berisiko.

15.10 Pengembangan Kapasitas Sumber Daya Manusia

GTL membutuhkan sumber daya manusia lintas keahlian. Ahli geologi lingkungan, geologi teknik, hidrogeologi, geomorfologi, kebencanaan geologi, GIS, perencanaan wilayah, lingkungan hidup, hukum tata ruang, dan kebijakan publik perlu bekerja dalam kerangka yang saling memahami. Karena itu, penguatan GTL tidak cukup melalui regulasi dan sistem informasi, tetapi juga melalui pelatihan, sertifikasi, pedoman teknis, forum teknis, dan pembelajaran bersama.

Pemerintah daerah memerlukan kapasitas untuk membaca informasi GTL. Banyak keputusan ruang berada di tingkat daerah. Jika pemerintah daerah tidak memahami makna peta geologi, kelas kesesuaian, faktor pembatas, atau syarat teknis, maka hasil GTL tidak akan digunakan secara efektif. Oleh karena itu, penguatan kapasitas perlu menjangkau perencana daerah, dinas lingkungan hidup, dinas pekerjaan umum, badan penanggulangan bencana daerah, pengelola kawasan, dan penyusun dokumen.

Perguruan tinggi juga memiliki peran penting. Pendidikan geologi, perencanaan wilayah, lingkungan, dan kebencanaan perlu memperkuat materi geologi tata lingkungan, pemetaan tematik, analisis spasial, penilaian risiko, dan penerjemahan data teknis ke kebijakan. Dengan demikian, GTL tidak hanya berkembang sebagai instrumen pemerintah, tetapi juga sebagai bidang pengetahuan terapan yang didukung komunitas akademik.

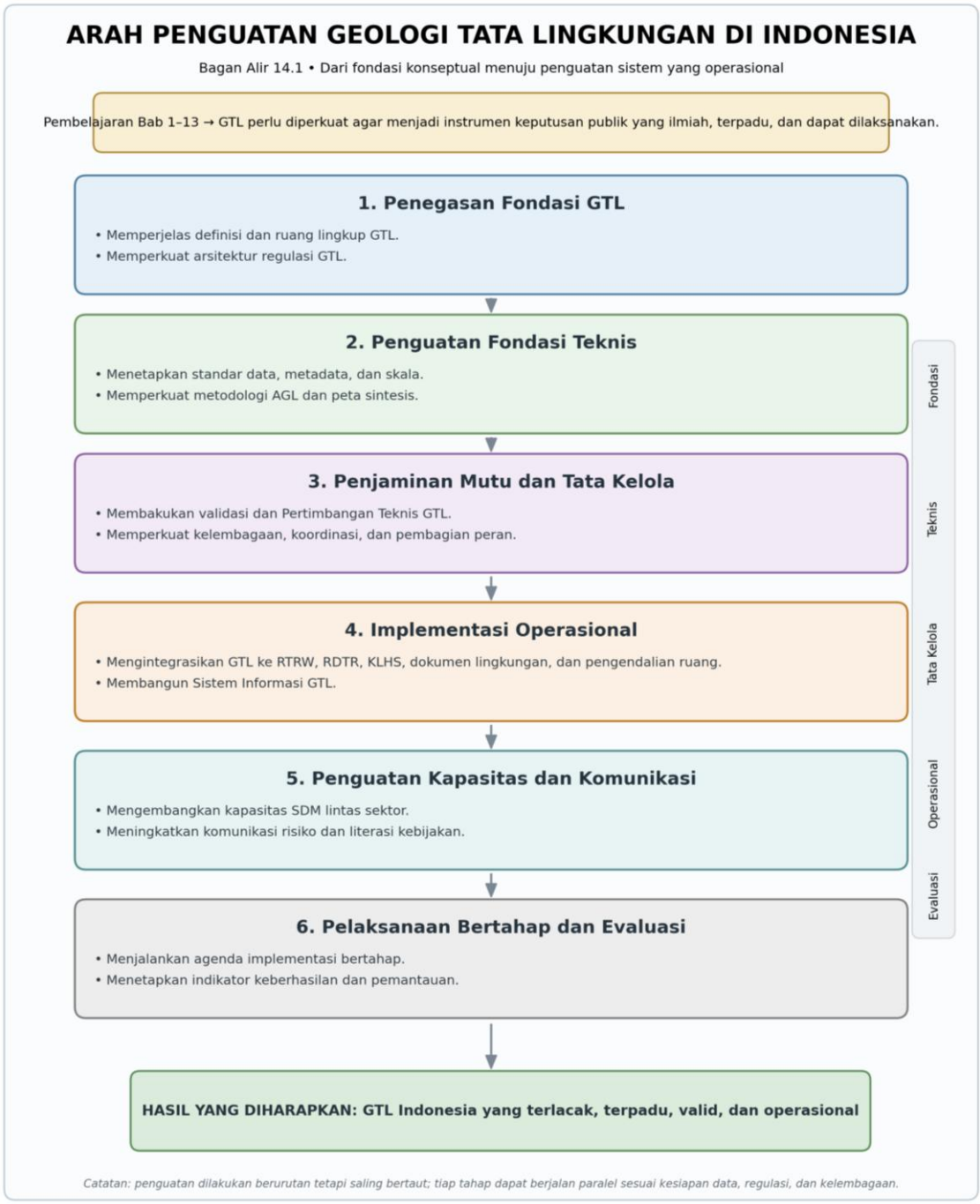
15.11 Komunikasi Risiko dan Literasi Kebijakan

Salah satu tantangan GTL adalah komunikasi. Informasi geologi dapat sangat teknis, sementara keputusan ruang memerlukan bahasa yang dapat dipahami lintas disiplin. Karena itu, GTL perlu mengembangkan format komunikasi yang jelas: peta yang mudah dibaca, legenda yang tidak menyesatkan, narasi rekomendasi yang ringkas, tabel syarat teknis, dan penjelasan mengenai batas penggunaan data.

Komunikasi risiko menjadi penting khususnya untuk bahaya geologi. Masyarakat dan pengambil keputusan perlu memahami bahwa peta bahaya bukan ramalan pasti, tetapi informasi mengenai potensi proses dan tingkat kehati-hatian yang diperlukan. Ketidakpastian harus dijelaskan secara jujur. Pada saat yang sama, ketidakpastian tidak

boleh menjadi alasan untuk mengabaikan risiko.

Literasi kebijakan juga perlu diperkuat. Ahli geologi perlu memahami bagaimana RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan perizinan bekerja. Sebaliknya, perencana dan pejabat perlu memahami bagaimana data geologi disusun, apa batas ketelitiannya, dan bagaimana rekomendasi teknis harus dibaca. GTL bekerja efektif ketika kedua bahasa ini saling bertemu.



Gambar 15.1 Bagan Alir Arah penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia.

Tabel 15.1 Arah penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia.

Ranah Penguatan	Arah Tindakan	Keluaran yang Diharapkan
Regulasi	Menegaskan kedudukan GTL, hubungan dengan sektor, mandat validasi, dan jenis keluaran.	Payung regulasi GTL dan pedoman teknis KGL yang saling terhubung.
Data dan metadata	Menyusun standar data, skala, metadata, format peta, dan batas penggunaan.	Basis data GTL yang sahih, dapat ditelusuri, dan dapat digunakan lintas instrumen.
Metodologi	Membakukan parameter minimum, satuan analisis, skoring, pembobotan, validasi, dan kelas kesesuaian.	KGL yang konsisten, transparan, dan dapat dipertanggungjawabkan.
Kelembagaan	Menetapkan peran lembaga teknis, pengguna kebijakan, pemerintah daerah, dan mekanisme koordinasi.	Alur kerja GTL dari data sampai pertimbangan teknis menjadi jelas.
Sistem informasi	Membangun platform data, dokumen, peta, validasi, pertimbangan teknis, dan pemutakhiran.	Sistem Informasi GTL sebagai basis akuntabilitas teknis.
Kapasitas SDM	Melatih ahli teknis, perencana, penyusun dokumen, dan pemerintah daerah.	Pengguna mampu membaca dan menerapkan informasi GTL.

Untuk memperkuat generalisasi metodologi, agenda penguatan GTL perlu membuka basis pembelajaran lintas wilayah Indonesia. Selain Cekungan Bandung, Dieng, Jakarta, dan Kota Baru Parahyangan, penerapan KGL sebaiknya diperluas pada kawasan pesisir Sumatra, kawasan karst Sulawesi, dataran rendah Kalimantan, wilayah kepulauan kecil, dan kawasan timur Indonesia yang memiliki kombinasi bahaya geologi, keterbatasan air tanah, nilai geologi, serta tekanan pengembangan yang berbeda. Perluasan basis kasus ini penting agar pedoman GTL tidak hanya kuat secara konseptual, tetapi juga teruji pada ragam lingkungan geologi Indonesia.

15.12 Agenda Implementasi Bertahap

Penguatan GTL perlu dilakukan secara bertahap. Pada tahap awal, fokus dapat diarahkan pada penegasan definisi, penyusunan pedoman teknis minimum, inventarisasi data, penyusunan format pertimbangan teknis, dan pembangunan prototipe Sistem Informasi GTL. Tahap ini penting untuk membangun fondasi kelembagaan dan metodologis.

Pada tahap menengah, penguatan dapat diarahkan pada integrasi GTL ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan proses pengendalian pemanfaatan ruang. Pada tahap ini, validasi KGL dan Kajian GTL mulai dibakukan, peta sintesis diperluas, data diperbarui, dan kapasitas pemerintah daerah diperkuat.

Pada tahap lanjut, GTL dapat berkembang menjadi sistem nasional yang terhubung dengan sistem informasi tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, sumber daya air, dan konservasi geologi. Pada tahap ini, GTL tidak hanya merespons permintaan kajian, tetapi juga menjadi sistem peringatan kebijakan: memberi indikasi awal kawasan yang perlu dilindungi, dikendalikan, dikaji rinci, atau dipantau.

Tabel 15.2 Agenda implementasi bertahap penguatan GTL Indonesia.

Tahap	Fokus Implementasi	Kegiatan Utama	Indikator Awal
Jangka pendek	Fondasi regulasi dan data	Penegasan definisi, format Pertimbangan Teknis GTL, inventarisasi data, pedoman parameter minimum, prototipe sistem informasi.	Tersedia pedoman awal, format standar, dan daftar data prioritas.
Jangka menengah	Integrasi ke instrumen kebijakan	Penerapan pada RTRW/RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, validasi kajian, pelatihan daerah, pemutakhiran peta prioritas.	GTL mulai digunakan dalam proses perencanaan dan pengendalian ruang.

Tahap	Fokus Implementasi	Kegiatan Utama	Indikator Awal
Jangka panjang	Sistem nasional GTL	Interoperabilitas dengan sistem tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, sumber daya air, dan konservasi geologi.	Sistem Informasi GTL menjadi rujukan teknis nasional yang diperbarui berkala.

15.13 Indikator Keberhasilan Penguatan GTL

Penguatan GTL perlu memiliki indikator keberhasilan. Indikator tersebut tidak hanya berupa tersusunnya regulasi, tetapi juga penggunaan nyata dalam keputusan. Beberapa indikator yang dapat digunakan adalah tersedianya data GTL yang terstandar, meningkatnya jumlah RTRW dan RDTR yang menggunakan informasi GTL, meningkatnya kualitas KLHS dan dokumen lingkungan berbasis data geologi, adanya mekanisme validasi yang konsisten, meningkatnya penggunaan Pertimbangan Teknis GTL, dan tersedianya Sistem Informasi GTL yang aktif diperbarui.

Indikator lain adalah berkurangnya keputusan ruang yang bertentangan dengan faktor pembatas geologi, meningkatnya perlindungan kawasan resapan dan kawasan bernilai geologi, meningkatnya pemantauan kawasan berisiko, dan meningkatnya kemampuan pemerintah daerah menggunakan informasi geologi. Penguatan GTL juga dapat dinilai dari kualitas komunikasi risiko: apakah peta dan rekomendasi dapat dipahami serta digunakan oleh pengambil keputusan.

Indikator keberhasilan harus disusun secara realistis. Pada tahap awal, keberhasilan dapat berupa tersedianya pedoman dan data prioritas. Pada tahap menengah, keberhasilan dapat berupa integrasi ke dokumen kebijakan. Pada tahap lanjut, keberhasilan dapat diukur dari pengurangan konflik pemanfaatan ruang, peningkatan keselamatan, perlindungan lingkungan geologi, dan penggunaan GTL sebagai bagian normal dari tata kelola pembangunan.

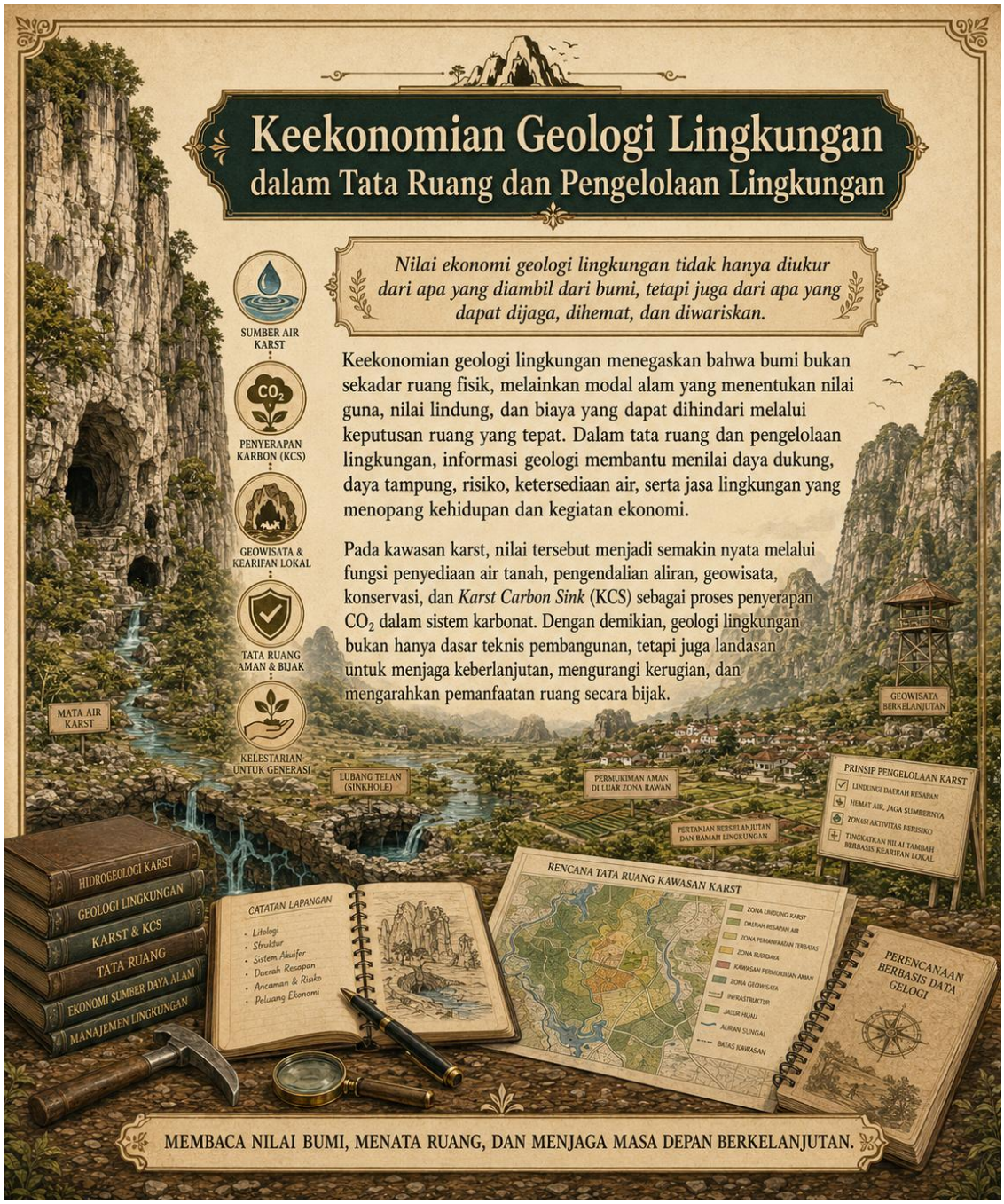
15.14 Kesimpulan Bab

Penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia perlu dilakukan secara menyeluruh. GTL tidak cukup diperkuat melalui narasi konseptual, tetapi harus memiliki definisi jelas, regulasi berjenjang, standar data, metodologi KGL, validasi, pertimbangan teknis, kelembagaan, sistem informasi, kapasitas SDM, dan integrasi ke instrumen kebijakan.

Pelajaran internasional menunjukkan bahwa data geologi dan data bahaya dapat menjadi dasar pengendalian ruang apabila memiliki otoritas, metode, metadata, peta tematik, kelas keputusan, dan konsekuensi regulatif. Indonesia perlu mengambil prinsip tersebut dan menyesuaikannya dengan sistem penataan ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, sumber daya air, konservasi geologi, dan pembangunan wilayah.

Arah penguatan GTL Indonesia dapat diringkas dalam empat kata kunci: keterlacakan, keterpaduan, validitas, dan operasionalitas. Keterlacakan berarti setiap rekomendasi dapat ditelusuri ke data dan metode. Keterpaduan berarti GTL menghubungkan sektor, skala, dan instrumen kebijakan. Validitas berarti hasil kajian diuji melalui data, metode, dan validasi. Operasionalitas berarti hasil GTL dapat digunakan dalam keputusan nyata.

Dengan penguatan tersebut, GTL dapat menjadi instrumen penting untuk membangun tata ruang yang lebih aman, lingkungan geologi yang lebih terlindungi, kawasan bernilai geologi yang terjaga, serta pembangunan yang lebih bertanggung jawab terhadap daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas geologi Indonesia.


Keekonomian Geologi Lingkungan
dalam Tata Ruang dan Pengelolaan Lingkungan
Nilai ekonomi geologi lingkungan tidak hanya diukur dari apa yang diambil dari bumi, tetapi juga dari apa yang dapat dijaga, dihemat, dan diwariskan.
SUMBER AIR KARST
PENYERAPAN KARBON (KCS)
GEOWISATA & KEARIFAN LOKAL
TATA RUANG AMAN & BIJAK
KELESTARIAN UNTUK GENERASI
Keekonomian geologi lingkungan menegaskan bahwa bumi bukan sekadar ruang fisik, melainkan modal alam yang menentukan nilai guna, nilai lindung, dan biaya yang dapat dihindari melalui keputusan ruang yang tepat. Dalam tata ruang dan pengelolaan lingkungan, informasi geologi membantu menilai daya dukung, daya tampung, risiko, ketersediaan air, serta jasa lingkungan yang menopang kehidupan dan kegiatan ekonomi.
Pada kawasan karst, nilai tersebut menjadi semakin nyata melalui fungsi penyediaan air tanah, pengendalian aliran, geowisata, konservasi, dan Karst Carbon Sink (KCS) sebagai proses penyerapan CO_2 dalam sistem karbonat. Dengan demikian, geologi lingkungan bukan hanya dasar teknis pembangunan, tetapi juga landasan untuk menjaga keberlanjutan, mengurangi kerugian, dan mengarahkan pemanfaatan ruang secara bijak.
MATA AIR KARST
LUBANG TELAN (SINKHOLE)
PERMUKIMAN AMAN DI LUAR ZONA RAWAN
PERTANIAN BERKELANJUTAN DAN RAMAH LINGKUNGAN
GEOWISATA BERKELANJUTAN
PRINSIP PENGELOLAAN KARST
LINDUNGI DAERAH RESAPAN
HEMAT AIR, JAGA SUMBERNYA
ZONASI AKTIVITAS BERISIKO
TINGKATKAN NILAI TAMBAH BERBASIS KEARIFAN LOKAL
HIDROGEOLOGI KARST
GEOLOGI LINGKUNGAN
KARST & KCS
TATA RUANG
EKONOMI SUMBER DAYA ALAM
MANAJEMEN LINGKUNGAN
CATATAN LAPANGAN
Litologi
Struktur
Sistem Akuifer
Daerah Resapan
Ancaman & Risiko
Peluang Ekonomi
RENCANA TATA RUANG KAWASAN KARST
ZONA LINDUNG KARST
DAERAH RESAPAN AIR
ZONA PEMANFAATAN TERBATAS
ZONA BUDIDAYA
KAWASAN PERMUKIMAN AMAN
ZONA GEOWISATA
INFRASTRUKTUR
JALUR HIJAU
ALIRAN SUNGAI
BATAS KAWASAN
PERENCANAAN BERBASIS DATA GEOLOGI
MEMBACA NILAI BUMI, MENATA RUANG, DAN MENJAGA MASA DEPAN BERKELANJUTAN.

BAB 16

Keekonomian Geologi Lingkungan dalam Tata Ruang dan Pengelolaan Lingkungan

16.1 Pengantar

Bab ini disusun sebagai penguatan bagian akhir buku Geologi Tata Lingkungan. Setelah fondasi konseptual, metodologi Kajian Geologi Lingkungan, kawasan lindung geologi, Geopark, geowisata, regulasi, kelembagaan, penguatan sumber daya manusia, dan arah strategis GTL dibahas, dimensi keekonomian perlu ditempatkan sebagai simpul penutup yang menunjukkan manfaat nyata GTL bagi keputusan pembangunan. Keekonomian geologi lingkungan tidak dimaksudkan untuk mengubah bumi semata-mata menjadi komoditas, melainkan untuk memperlihatkan bahwa fungsi geologi mempunyai nilai manfaat, nilai perlindungan, nilai keselamatan, dan nilai penghematan biaya yang harus dibaca dalam tata ruang dan pengelolaan lingkungan.

Dalam konteks ini, ekonomi bukan hanya soal pendapatan langsung. Nilai ekonomi geologi lingkungan juga muncul dari biaya yang dapat dihindari ketika ruang direncanakan secara benar, dari kerusakan yang dapat dicegah, dari air tanah yang tetap tersedia, dari risiko geologi yang berkurang, dari kawasan bernilai geologi yang terlindungi, serta dari jasa lingkungan yang selama ini belum banyak dihitung. Salah satu contoh penting adalah Karst Carbon Sink (KCS), yaitu fungsi sistem karst dalam menyerap CO2 melalui proses pelarutan karbonat. Pengalaman penelitian KCS di KBAK Pangandaran Blok Cigugur memberi dasar awal untuk menyusun petunjuk teknis KCS sebagai bagian dari penguatan GTL.

Geologi Tata Lingkungan selama ini sering dipahami sebagai perangkat ilmiah dan teknis untuk menilai daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, kesesuaian ruang, kawasan lindung geologi, bahaya geologi, dan kebutuhan pengendalian pemanfaatan ruang. Pemahaman tersebut benar, tetapi belum lengkap apabila tidak menunjukkan konsekuensi ekonominya. Keputusan ruang yang mengabaikan kondisi geologi dapat menimbulkan biaya sangat besar, baik berupa biaya konstruksi tambahan, biaya pemulihan lingkungan, kerugian akibat bencana, kehilangan sumber air, konflik pemanfaatan ruang, maupun hilangnya nilai geologi yang seharusnya dapat dikelola secara berkelanjutan.

Keekonomian geologi lingkungan diperlukan untuk menerjemahkan fungsi geologi ke dalam bahasa kebijakan yang lebih mudah dipahami oleh pengambil keputusan. Peta bahaya geologi, peta zona resapan, peta kerentanan air tanah, peta kawasan lindung geologi, dan peta kesesuaian ruang bukan hanya dokumen teknis. Semua peta tersebut dapat dibaca sebagai instrumen ekonomi karena membantu menghindari keputusan ruang yang mahal dan berisiko. Dalam pengertian ini, GTL adalah investasi awal untuk mengurangi biaya masa depan.

Pada sisi lain, lingkungan geologi juga menghasilkan manfaat langsung dan tidak langsung. Air tanah mendukung kebutuhan domestik, pertanian, industri, dan pelayanan publik. Kawasan karst menyimpan fungsi hidrologi, fungsi konservasi, nilai geowisata, dan potensi Karst Carbon Sink. Kawasan bernilai geologi mendukung pendidikan, penelitian, identitas wilayah, dan pariwisata berkelanjutan. Kawasan yang dikelola berdasarkan daya dukung geologi dapat menurunkan risiko kerusakan bangunan dan memperpanjang umur prasarana. Semua manfaat tersebut

merupakan bagian dari keekonomian geologi lingkungan.

Gambar 16.1 Kerangka keekonomian geologi lingkungan dalam Geologi Tata Lingkungan.

Dengan demikian, Bab 16 mengusulkan cara membaca GTL melalui tiga pertanyaan ekonomi: manfaat apa yang diberikan oleh lingkungan geologi, biaya apa yang dapat dihindari apabila informasi geologi digunakan sejak awal, dan mekanisme apa yang dapat disiapkan agar perlindungan fungsi geologi memperoleh insentif yang adil. Ketiga pertanyaan ini penting untuk menghubungkan GTL dengan tata ruang, KLHS, dokumen lingkungan, pengendalian pembangunan, serta pembiayaan konservasi berbasis jasa lingkungan.

16.2 Lingkungan Geologi sebagai Modal Alam

Dalam ekonomi lingkungan, modal alam adalah unsur alam yang menghasilkan manfaat bagi manusia, baik secara langsung maupun tidak langsung. Dalam kerangka GTL, lingkungan geologi dapat dipahami sebagai bagian dari modal alam karena tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, kawasan karst, kawasan pesisir, sumber daya geologi, bahaya geologi, dan warisan geologi membentuk dasar bagi keselamatan, produksi, konservasi, dan keberlanjutan wilayah.

Tanah dan batuan bukan hanya media fisik untuk mendirikan bangunan, tetapi juga menentukan biaya fondasi, stabilitas lereng, kemampuan resapan, potensi sumber bahan bangunan, dan kerentanan terhadap pencemaran. Air tanah bukan hanya sumber daya air, tetapi juga aset strategis yang memengaruhi kesehatan masyarakat, ketahanan wilayah, biaya penyediaan air, dan keberlanjutan kegiatan ekonomi. Bentuk lahan bukan hanya rupa permukaan bumi, tetapi juga memberi petunjuk mengenai proses aktif, peluang pemanfaatan, dan batas keselamatan ruang.

Nilai modal alam geologi sering kurang terlihat karena sebagian besar fungsinya bekerja secara tidak langsung. Masyarakat baru menyadari nilai air tanah ketika sumur mengering atau tercemar; nilai daerah resapan ketika banjir meningkat; nilai lereng stabil ketika terjadi gerakan tanah; nilai kawasan karst ketika mata air hilang; dan nilai peta bahaya ketika pembangunan terlanjur menempati kawasan berisiko tinggi. Karena itu, GTL perlu menampilkan nilai geologi tidak hanya sebagai data teknis, tetapi sebagai nilai ekonomi yang berkaitan dengan

penghematan biaya, pencegahan kerusakan, dan perlindungan fungsi jangka panjang.

Konsekuensinya, penilaian ekonomi geologi lingkungan harus tetap berbasis pada karakter geologi. Nilai ekonomi tidak boleh dilepaskan dari litologi, struktur geologi, hidrogeologi, geomorfologi, bahaya, dan fungsi lindung. Jika fungsi geologi disederhanakan menjadi angka ekonomi tanpa membaca proses geologinya, maka kebijakan ekonomi dapat kehilangan dasar ilmiah. Sebaliknya, apabila data geologi hanya berhenti sebagai peta dan laporan tanpa diterjemahkan ke nilai manfaat, maka data tersebut sulit masuk ke keputusan pembangunan.

Tabel 16.1 Unsur lingkungan geologi sebagai modal alam dan sumber nilai ekonomi dalam GTL.

Unsur lingkungan geologi	Fungsi utama	Nilai ekonomi yang dapat dibaca	Risiko bila diabaikan
Tanah dan batuan	Dasar fisik pembangunan, media resapan, media penyaring alami.	Penghematan biaya fondasi, pemilihan lokasi yang efisien, penurunan risiko kerusakan bangunan.	Biaya konstruksi meningkat, kegagalan fondasi, erosi, pencemaran air tanah.
Air tanah dan zona resapan	Penyedia air, fungsi imbuhan, perlindungan kualitas air.	Nilai air baku, pengurangan biaya penyediaan air, perlindungan kesehatan publik.	Penurunan muka air tanah, intrusi air asin, krisis air, biaya pemulihan tinggi.
Bahaya geologi	Informasi batas keselamatan ruang.	Biaya kerugian yang dapat dihindari, pengurangan risiko bencana, penentuan syarat teknis.	Kerusakan aset, korban jiwa, biaya relokasi, konflik ruang.
Karst dan KBAK	Fungsi air, karbon, konservasi, geowisata, edukasi.	Nilai jasa lingkungan, nilai karbon, nilai ekonomi lokal berbasis konservasi.	Hilangnya mata air, penurunan fungsi KCS, konflik tambang-konservasi.
Warisan geologi dan Geopark	Nilai ilmiah, pendidikan, identitas wilayah, pariwisata berkelanjutan.	Pendapatan lokal, nilai edukasi, penguatan citra wilayah, lapangan kerja hijau.	Kerusakan nilai geologi, penurunan daya tarik, kehilangan aset pengetahuan.

16.3 Spektrum Nilai Ekonomi Geologi Lingkungan

Nilai ekonomi geologi lingkungan dapat dibaca melalui beberapa kelompok nilai. Pertama, nilai guna langsung, yaitu manfaat yang dapat digunakan secara nyata seperti air tanah, bahan bangunan, geowisata, dan pemanfaatan bentang alam. Kedua, nilai guna tidak langsung, yaitu manfaat yang muncul melalui fungsi lingkungan seperti resapan air, perlindungan lereng, pengurangan risiko, penyimpanan karbon karst, dan perlindungan kualitas air. Ketiga, nilai pilihan, yaitu nilai dari kemungkinan pemanfaatan pada masa depan apabila fungsi geologi tetap dijaga. Keempat, nilai keberadaan dan warisan, yaitu nilai karena suatu objek geologi tetap ada, dapat dipelajari, dan diwariskan kepada generasi berikutnya.

Dalam tata ruang, nilai-nilai tersebut tidak selalu muncul sebagai pendapatan kas daerah atau transaksi pasar. Banyak nilai geologi justru muncul sebagai biaya yang tidak jadi terjadi. Sebuah kawasan yang tidak dibangun pada zona bahaya tinggi mungkin tidak menghasilkan pendapatan langsung, tetapi menghindarkan biaya kerugian bencana. Daerah resapan yang dijaga mungkin tidak tampak sebagai investasi ekonomi, tetapi mengurangi biaya banjir, penyediaan air, dan penurunan muka air tanah. Kawasan karst yang dilindungi mungkin tidak memberi hasil tambang jangka pendek, tetapi menjaga air, karbon, geowisata, pendidikan, dan fungsi ekologis jangka panjang.

Karena itu, penilaian ekonomi dalam GTL perlu menggabungkan pendekatan valuasi manfaat dan pendekatan biaya yang dihindari. Pendekatan valuasi manfaat

digunakan ketika fungsi geologi dapat dihitung menjadi nilai ekonomi, misalnya nilai karbon KCS, nilai air tanah, nilai kunjungan geowisata, atau nilai jasa interpretasi geologi. Pendekatan biaya yang dihindari digunakan ketika informasi GTL mencegah keputusan ruang yang keliru, misalnya menghindari pembangunan di area berbahaya, menghindari pencemaran air tanah, atau mengurangi biaya rekayasa yang tidak diperlukan.

Pendekatan tersebut juga menuntut kehati-hatian. Tidak semua nilai geologi harus langsung dikonversi menjadi rupiah. Beberapa nilai seperti nilai ilmiah, nilai pendidikan, nilai spiritual, dan nilai warisan mungkin lebih tepat dinyatakan secara kualitatif atau semi-kuantitatif. Yang penting, GTL harus mampu menjelaskan bahwa nilai geologi ada, perlu dipertimbangkan, dan mempunyai konsekuensi terhadap keputusan ruang dan pengelolaan lingkungan.

Tabel 16.2 Spektrum nilai ekonomi geologi lingkungan dalam kerangka GTL.

Jenis nilai	Makna dalam GTL	Contoh indikator	Kemungkinan keluaran kebijakan
Nilai guna langsung	Manfaat yang digunakan langsung oleh masyarakat atau kegiatan ekonomi.	Air tanah, geowisata, sumber bahan bangunan, jasa pemanduan.	Zonasi pemanfaatan, pengendalian intensitas, rencana pengelolaan.
Nilai guna tidak langsung	Manfaat melalui fungsi lingkungan dan pengurangan risiko.	Resapan air, perlindungan lereng, KCS, perlindungan kualitas air.	Kawasan lindung geologi, syarat teknis, insentif konservasi.
Nilai pilihan	Nilai karena fungsi geologi tetap tersedia untuk kebutuhan masa depan.	Cadangan air, potensi pendidikan, potensi riset, geowisata masa depan.	Pembatasan kegiatan berisiko, pemantauan, perlindungan fungsi.
Nilai keberadaan dan warisan	Nilai karena objek geologi tetap ada dan dapat diwariskan.	Warisan geologi, KCAG, geosite, bentang alam khas.	Penetapan kawasan bernilai geologi, interpretasi, konservasi.
Biaya yang dihindari	Kerugian yang dapat dicegah karena data geologi digunakan sejak awal.	Kerugian bencana, biaya relokasi, biaya pemulihan air tanah, biaya perkuatan.	Rekomendasi lokasi, ketentuan khusus RDTR, mitigasi, kajian rinci.

16.4 Nilai Ekonomi Daya Dukung dan Daya Tampung

Daya dukung dan daya tampung geologi memiliki makna ekonomi yang sangat kuat. Daya dukung menunjukkan kemampuan lingkungan geologi menopang kegiatan, sedangkan daya tampung menunjukkan kemampuan menerima tekanan tanpa kehilangan fungsi dan keselamatan. Apabila dua konsep ini digunakan sejak awal, pembangunan dapat memilih lokasi yang lebih tepat, mengurangi biaya teknis yang tidak perlu, serta mencegah beban kerusakan jangka panjang.

Pada kawasan dengan tanah dan batuan yang stabil, biaya fondasi dan risiko kerusakan dapat lebih terkendali. Pada kawasan dengan lereng yang stabil dan drainase yang baik, biaya mitigasi gerakan tanah dan erosi dapat ditekan. Pada kawasan dengan air tanah yang tidak terlalu rentan, kegiatan tertentu masih dapat dirancang dengan pengelolaan lingkungan yang lebih realistis. Sebaliknya, kawasan dengan daya dukung rendah atau daya tampung rendah dapat menimbulkan biaya tambahan yang besar, bahkan dapat menghasilkan kerugian yang lebih tinggi daripada manfaat ekonominya.

Dalam GTL, daya dukung dan daya tampung tidak sebaiknya dipahami sebagai label umum baik atau buruk. Keduanya harus dikaitkan dengan jenis kegiatan. Suatu kawasan mungkin sesuai untuk ruang terbuka dan konservasi, tetapi tidak sesuai untuk kawasan industri. Kawasan lain mungkin sesuai untuk permukiman rendah, tetapi tidak sesuai untuk bangunan bertingkat tanpa investigasi geologi teknik. Dengan pendekatan ini, keekonomian GTL tidak menolak pembangunan, melainkan

menempatkan pembangunan pada ruang yang paling masuk akal secara teknis, ekologis, dan ekonomi.

Daya tampung juga menuntut pembacaan terhadap intensitas. Kegiatan yang sama dapat memberi tekanan berbeda apabila skalanya berubah. Permukiman terbatas mungkin masih sesuai pada suatu kawasan, tetapi permukiman padat dapat melebihi daya tampung air tanah, drainase, dan lereng. Geowisata terbatas dapat mendukung ekonomi lokal, tetapi kunjungan tidak terkendali dapat merusak nilai geologi dan menurunkan keselamatan. Oleh karena itu, keekonomian geologi lingkungan harus selalu terhubung dengan pengaturan intensitas, syarat teknis, dan pemantauan.

16.5 Ekonomi Faktor Pembatas dan Biaya yang Dihindari

Faktor pembatas geologi sering dipahami sebagai hambatan pembangunan. Dalam perspektif keekonomian geologi lingkungan, faktor pembatas justru merupakan informasi ekonomi yang sangat bernilai. Faktor pembatas memberi peringatan awal mengenai biaya, risiko, dan konsekuensi jangka panjang dari suatu keputusan ruang. Dengan membaca faktor pembatas, pengambil keputusan dapat menghindari lokasi yang tidak efisien, mengurangi kebutuhan rekayasa mahal, dan mencegah kerugian lingkungan.

Biaya yang dihindari merupakan salah satu cara paling kuat untuk menjelaskan nilai GTL. Apabila peta bahaya geologi digunakan untuk menghindari pembangunan pada area berisiko tinggi, maka nilai ekonominya bukan hanya terlihat dari dokumen kajian, tetapi dari kerugian yang tidak terjadi. Apabila peta kerentanan air tanah digunakan untuk mengatur lokasi TPST atau kawasan industri, maka nilai ekonominya muncul dari pencemaran yang dapat dicegah. Apabila zona resapan dijaga, nilai ekonominya muncul dari air yang tetap tersedia dan banjir yang dapat dikurangi.

Dalam praktik, biaya yang dihindari dapat mencakup biaya pemulihan lingkungan, biaya kesehatan, biaya perbaikan infrastruktur, biaya relokasi, biaya litigasi, biaya sosial akibat konflik, dan hilangnya peluang ekonomi. Nilai tersebut sering tidak tampak dalam perhitungan awal proyek, tetapi muncul ketika keputusan ruang tidak membaca kondisi geologi. Karena itu, GTL sebaiknya ditempatkan sebagai bagian dari analisis kelayakan pembangunan, bukan sekadar pelengkap teknis.

Tabel 16.3 Faktor pembatas sebagai informasi ekonomi dan dasar pengurangan kerugian.

Faktor pembatas	Risiko ekonomi bila diabaikan	Respons GTL	Nilai ekonomi yang diperoleh
Bahaya geologi tinggi	Kerusakan aset, biaya tanggap darurat, relokasi, korban jiwa.	Pembatasan kegiatan, mitigasi, kajian rinci, zona kehati-hatian.	Kerugian bencana yang dapat dikurangi.
Air tanah rentan	Pencemaran air tanah, biaya pengolahan air, konflik pemanfaatan air.	Syarat pengolahan limbah, pembatasan kegiatan berisiko, pemantauan kualitas.	Biaya pemulihan dan biaya kesehatan yang dapat dihindari.
Daerah resapan penting	Banjir, penurunan imbuhan, turunnya ketersediaan air.	Pengendalian KDB, ruang terbuka, konservasi tanah, pemantauan imbuhan.	Nilai ketersediaan air dan pengurangan limpasan.
Kawasan karst aktif	Hilangnya mata air, turunnya fungsi KCS, kerusakan nilai geologi.	Perlindungan KBAK, zonasi KCS, pembatasan kegiatan merusak.	Nilai air, karbon, geowisata, edukasi, dan konservasi.
Warisan geologi	Hilangnya aset ilmiah dan daya tarik geowisata.	Konservasi, interpretasi, pengaturan akses, daya dukung kunjungan.	Nilai pendidikan, identitas wilayah, dan ekonomi lokal.

Faktor penyisih memiliki nilai ekonomi yang lebih tegas. Ketika suatu kawasan memiliki bahaya sangat tinggi, nilai geologi yang harus dilindungi, atau fungsi resapan yang sangat penting, keputusan untuk tidak membangun justru dapat menjadi keputusan ekonomi yang paling rasional. Dengan demikian, keekonomian geologi lingkungan tidak selalu berarti mencari pemanfaatan ekonomi langsung, tetapi juga memilih untuk menjaga fungsi yang bernilai lebih besar daripada manfaat jangka pendek.

16.6 Air Tanah, Zona Resapan, dan Nilai Ekonomi Fungsi Hidrogeologi

Air tanah merupakan salah satu contoh paling nyata bahwa geologi lingkungan mempunyai nilai ekonomi. Nilai air tanah tidak hanya terletak pada volume air yang dapat diambil, tetapi juga pada fungsi akuifer, daerah imbuhan, kualitas air, keberlanjutan pasokan, dan biaya yang diperlukan untuk memperoleh air alternatif apabila sistem air tanah menurun. Dalam wilayah perkotaan dan kawasan industri, air tanah yang rusak atau menurun kualitasnya dapat menimbulkan biaya sosial-ekonomi yang sangat besar.

Zona resapan adalah bagian dari sistem hidrogeologi yang sering kalah dalam kompetisi pemanfaatan ruang. Lahan resapan dapat terlihat menarik untuk dikembangkan karena posisinya strategis atau topografinya memungkinkan. Namun, apabila fungsi resapan hilang, biaya jangka panjangnya dapat muncul dalam bentuk banjir, turunnya muka air tanah, meningkatnya limpasan, dan berkurangnya cadangan air pada musim kering. Karena itu, perlindungan zona resapan merupakan keputusan ekonomi sekaligus keputusan ekologis.

Dalam ekonomi geologi lingkungan, nilai zona resapan dapat dibaca melalui beberapa pendekatan: nilai air yang disediakan, biaya penyediaan air alternatif, biaya pengendalian banjir, biaya pemulihan kualitas air, dan nilai keberlanjutan kegiatan ekonomi yang bergantung pada air. Pendekatan ini dapat digunakan untuk memperkuat argumentasi dalam RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan peraturan zonasi.

Dalam kerangka GTL, informasi hidrogeologi perlu diterjemahkan ke dalam peta zona resapan, peta kerentanan air tanah, peta zona konservasi air tanah, arahan KDB, syarat pengelolaan limbah, dan parameter pemantauan. Dengan cara ini, nilai ekonomi air tanah tidak berhenti sebagai angka, tetapi menjadi aturan ruang yang dapat dilaksanakan dan diawasi.

16.7 Geopark, Geowisata, dan Ekonomi Konservasi Geologi

Buku GTL telah membahas Geopark dan geowisata sebagai bentuk pemanfaatan berkelanjutan warisan geologi. Dalam Bab 16, pembahasan tersebut diperluas ke dalam kerangka keekonomian geologi lingkungan. Geopark dan geowisata menunjukkan bahwa nilai geologi dapat menghasilkan manfaat ekonomi tanpa harus menghilangkan nilai geologinya. Sebaliknya, nilai ekonomi justru bergantung pada keberhasilan menjaga keaslian, keselamatan, daya tarik, dan kualitas interpretasi kawasan.

Ekonomi Geopark berbeda dari ekonomi ekstraktif. Ekonomi ekstraktif sering mengubah atau menghilangkan objek geologi, sedangkan ekonomi Geopark menjaga objek geologi sebagai sumber pengetahuan, identitas, edukasi, dan kegiatan ekonomi lokal. Manfaat ekonominya dapat muncul dari pemanduan, akomodasi, transportasi lokal, kuliner, produk kreatif, kegiatan pendidikan, penelitian, dan kegiatan konservasi berbasis masyarakat. Namun, semua manfaat tersebut harus tetap berada dalam batas daya dukung dan daya tampung kawasan.

Geowisata juga memberi contoh bahwa nilai ekonomi geologi harus dibangun melalui narasi ilmiah yang benar. Situs geologi yang tidak ditafsirkan hanya menjadi objek pemandangan. Situs geologi yang ditafsirkan dengan baik menjadi ruang pembelajaran, ruang kebanggaan wilayah, dan ruang ekonomi lokal. Dalam hal ini, ahli geologi lingkungan mempunyai peran penting sebagai

penerjemah antara proses geologi dan pengalaman publik.

Dengan demikian, Geopark dan geowisata dapat menjadi pintu masuk untuk menjelaskan ekonomi geologi lingkungan kepada peserta diklat, pemerintah daerah, perencana, dan masyarakat. Namun, Bab 16 juga menegaskan bahwa keekonomian geologi lingkungan tidak hanya Geopark dan geowisata. Air tanah, zona resapan, bahaya geologi, kawasan karst, dan KCS juga merupakan bagian dari nilai ekonomi geologi lingkungan yang perlu dimasukkan ke dalam tata ruang dan pengelolaan lingkungan.

16.8 Karst Carbon Sink sebagai Dimensi Baru Keekonomian Geologi Lingkungan

Karst Carbon Sink (KCS) memperluas pemahaman mengenai nilai ekonomi kawasan karst. Selama ini karst sering dibaca melalui fungsi air tanah, nilai bentang alam, nilai konservasi, dan potensi geowisata. KCS menambahkan dimensi lain, yaitu fungsi sistem karst dalam proses pelarutan karbonat yang berkaitan dengan penyerapan CO2 dan aliran air tanah karst.

Secara konseptual, proses KCS terjadi ketika air hujan berinteraksi dengan CO2 atmosfer dan CO2 tanah, kemudian membentuk larutan yang melarutkan batuan karbonat. Proses ini menghasilkan ion terlarut yang dapat dihitung melalui pendekatan hidrogeokimia, antara lain Chemical Denudation Rate (CDR) dan Carbon Sink Flux (CSF). Dalam kerangka ekonomi geologi lingkungan, nilai tersebut dapat dibaca sebagai indikasi jasa lingkungan karst.

KCS penting bagi GTL karena menunjukkan bahwa kawasan karst tidak hanya memiliki nilai lindung, tetapi juga nilai jasa lingkungan karbon. Jika fungsi ini dapat diukur secara tertib, maka hasilnya dapat memperkuat argumentasi perlindungan kawasan karst, pengendalian perubahan penggunaan lahan, pemantauan mata air, serta integrasi nilai jasa lingkungan ke dalam tata ruang dan dokumen lingkungan.

Bab ini tidak lagi memuat peta, grafik, dan tabel teknis KCS secara rinci agar tidak terjadi pengulangan dengan dokumen Petunjuk Teknis KCS. Uraian pada Bab 16 ditempatkan sebagai kerangka konseptual keekonomian, sedangkan peta lokasi, peta geologi, grafik CDR, grafik CSF, tabel hasil pengukuran, dan tata cara perhitungan rinci ditempatkan pada Juknis KCS sebagai dokumen operasional.

16.9 Kedudukan Petunjuk Teknis KCS sebagai Turunan Operasional Bab 16

Dengan telah disusunnya Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Karst Carbon Sink, posisi Bab 16 perlu disesuaikan. Bab ini berfungsi sebagai jembatan konseptual yang menjelaskan mengapa KCS penting dalam keekonomian geologi lingkungan, sedangkan Juknis KCS berfungsi sebagai panduan kerja untuk inventarisasi, pengukuran, analisis, evaluasi, rekomendasi, validasi, dan pemantauan.

Pembagian peran tersebut penting agar buku GTL tetap rapi secara struktur. Bab 16 tidak perlu mengulang seluruh peta, grafik, dan tabel hasil kajian KCS, karena rincian tersebut lebih tepat ditempatkan pada Juknis. Dalam buku utama, KCS cukup diposisikan sebagai contoh bahwa fungsi geologi dapat memiliki nilai ekonomi lingkungan yang terukur dan dapat digunakan untuk memperkuat tata ruang serta pengelolaan lingkungan.

Contoh KBAK Pangandaran Blok Cigugur tetap penting sebagai rujukan empirik, tetapi perannya dalam Bab 16 dibatasi sebagai ilustrasi konseptual. Pembaca yang memerlukan tahapan kerja, kebutuhan data, parameter lapangan, parameter laboratorium, rumus CDR, rumus CSF, serta format pelaporan dapat merujuk pada Juknis KCS.

Tabel 16.4 Pembagian peran Bab 16 dan Petunjuk Teknis KCS dalam pengembangan keekonomian geologi lingkungan.

Aspek	Posisi dalam Bab 16	Posisi dalam Juknis KCS
Kedudukan KCS	Dijelaskan sebagai bagian dari nilai jasa lingkungan geologi dan ekonomi karst.	Dijelaskan sebagai objek kajian teknis yang memerlukan tahapan kerja, data, metode, dan keluaran operasional.
Peta dan grafik	Tidak diulang secara rinci; hanya dirujuk sebagai contoh pembelajaran.	Disajikan sebagai bahan teknis, termasuk peta lokasi, peta geologi, grafik CDR, grafik CSF, dan tabel hasil analisis.
Metode perhitungan	Dijelaskan secara konseptual agar pembaca memahami makna ekonomi KCS.	Diuraikan sebagai prosedur kerja, mulai dari pengambilan data, analisis laboratorium, perhitungan, klasifikasi, hingga validasi.
Keluaran kebijakan	Dihubungkan dengan tata ruang, KLHS, dokumen lingkungan, dan ekonomi jasa lingkungan.	Diterjemahkan menjadi rekomendasi zonasi, pengendalian, pemantauan, format laporan, dan kebutuhan pemutakhiran data.

16.10 Prinsip Valuasi KCS dan Batas Penggunaannya

Valuasi KCS pada prinsipnya menghubungkan besaran fungsi karbon karst dengan nilai ekonomi indikatif. Dalam bahasa sederhana, semakin besar fluks penyerapan karbon yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, semakin besar pula nilai jasa lingkungan yang dapat dijelaskan kepada perencana, pengelola kawasan, dan pengambil keputusan.

Namun, valuasi KCS harus dibatasi secara jelas. Estimasi nilai ekonomi karbon tidak otomatis sama dengan kredit karbon yang dapat diperdagangkan. Kredit karbon memerlukan mekanisme kebijakan, standar verifikasi, periode pemantauan, pencatatan, serta ketentuan pasar atau regulasi tersendiri. Karena itu, dalam GTL, hasil KCS lebih dahulu digunakan sebagai dasar penguatan perlindungan karst dan pengelolaan lingkungan, bukan sebagai klaim ekonomi yang berdiri sendiri.

Untuk kepentingan tata ruang, nilai KCS dapat digunakan sebagai bukti tambahan bahwa kawasan karst memiliki jasa lingkungan yang perlu dipertahankan. Informasi tersebut dapat memperkuat penetapan kawasan lindung geologi, perlindungan daerah imbuhan, pengendalian perubahan penggunaan lahan, dan pemantauan kualitas serta debit mata air. Tata cara perhitungan rinci, parameter yang digunakan, dan format pelaporan ditempatkan dalam Juknis KCS.

16.11 Integrasi Keekonomian Geologi Lingkungan ke RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan

Agar keekonomian geologi lingkungan tidak berhenti sebagai narasi, informasi nilai ekonomi harus masuk ke instrumen kebijakan. Dalam RTRW, nilai geologi lingkungan dapat digunakan untuk memperkuat argumentasi pola ruang, kawasan lindung geologi, kawasan rawan bencana, kawasan resapan, dan kawasan strategis. Dalam RDTR, nilai tersebut dapat diterjemahkan menjadi ketentuan kegiatan, ketentuan intensitas, ketentuan prasarana, ketentuan khusus, dan syarat teknis pemanfaatan ruang.

Dalam KLHS, ekonomi geologi lingkungan dapat membantu menilai alternatif kebijakan, rencana, dan program. Alternatif pembangunan yang tampak menguntungkan secara ekonomi jangka pendek perlu diuji terhadap kehilangan fungsi geologi, biaya risiko, daya tampung, daya dukung, serta nilai jasa lingkungan yang hilang. Dengan cara ini, KLHS tidak hanya menilai dampak lingkungan secara umum, tetapi juga membaca nilai geologi sebagai dasar keberlanjutan ruang.

Dalam dokumen lingkungan, informasi ekonomi geologi dapat memperkuat RKL-RPL, UKL-UPL, atau dokumen sejenis. Parameter pemantauan tidak hanya mencatat perubahan kualitas lingkungan, tetapi juga menjaga fungsi yang bernilai ekonomi, misalnya debit mata air, kualitas air tanah, kestabilan lereng, perubahan tutupan lahan pada zona resapan, dan indikator KCS pada kawasan karst. Untuk kegiatan pada kawasan karst, petunjuk teknis KCS dapat menjadi rujukan untuk menentukan baseline dan pemantauan fungsi karbon geologis.

Integrasi ini menuntut bahasa yang dapat dipakai oleh perencana dan pengambil keputusan. Oleh karena itu, hasil ekonomi geologi lingkungan sebaiknya tidak hanya disajikan dalam uraian akademik, tetapi juga dalam peta, matriks, kelas prioritas, rekomendasi teknis, dan indikator pemantauan. Keluaran tersebut harus jelas: area mana yang perlu dilindungi, kegiatan apa yang dapat dilakukan dengan syarat, kegiatan apa yang perlu dibatasi, dan indikator apa yang harus dipantau.

Tabel 16.5 Integrasi keekonomian geologi lingkungan ke instrumen tata ruang dan pengelolaan lingkungan.

Instrumen	Peran ekonomi geologi lingkungan	Contoh masukan GTL	Keluaran kebijakan
RTRW	Menjelaskan nilai strategis kawasan berdasarkan fungsi geologi dan risiko.	Peta kawasan lindung geologi, KBAK, zona resapan, bahaya geologi, nilai KCS.	Arahan pola ruang, kawasan strategis, perlindungan fungsi geologi.
RDTR	Menerjemahkan nilai dan pembatas geologi ke aturan rinci.	Kelas kesesuaian, zona prioritas KCS, kerentanan air tanah, faktor penyisih.	Ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, dan ketentuan khusus.
KLHS	Menguji alternatif kebijakan terhadap daya dukung, daya tampung, risiko, dan jasa lingkungan.	Analisis biaya yang dihindari, nilai air, nilai karbon, risiko geologi.	Rekomendasi perbaikan KRP dan skenario pembangunan berkelanjutan.
Dokumen lingkungan	Menetapkan pengelolaan dan pemantauan fungsi geologi.	Baseline air tanah, debit mata air, kualitas air, indikator KCS, peta pembatas.	RKL-RPL, UKL-UPL, parameter pemantauan, tindakan korektif.
Rencana pengelolaan KBAK/Geopark	Mengatur keseimbangan konservasi dan pemanfaatan.	Zona konservasi, zona geowisata, KCS, daya dukung kunjungan, mata air.	Rencana aksi, pengaturan akses, skema insentif, edukasi publik.

16.12 Juknis KCS sebagai Penguatan Operasional Bab 16

Petunjuk Teknis KCS menjadi tindak lanjut operasional dari Bab 16. Jika Bab 16 menjelaskan nilai ekonomi geologi lingkungan pada tingkat konsep dan kebijakan, maka Juknis KCS menjelaskan cara kerja teknis untuk menilai fungsi KCS secara lebih terukur.

Dengan pemisahan tersebut, Bab 16 tetap berperan sebagai bab sintesis dalam buku utama, sedangkan Juknis KCS berperan sebagai panduan pelaksanaan. Juknis memuat tahapan inventarisasi, penentuan titik pengamatan, kebutuhan data minimum, parameter lapangan dan laboratorium, perhitungan CDR dan CSF, klasifikasi fungsi KCS, rekomendasi tata ruang, pengelolaan lingkungan, validasi, dan pemantauan.

Dalam konteks kelembagaan, Juknis KCS juga membuka ruang koordinasi antara unit teknis geologi, pemerintah daerah, pengelola KBAK, pengelola Geopark, laboratorium, akademisi, dan masyarakat. Hasil akhirnya tidak hanya berupa angka karbon, tetapi juga rekomendasi perlindungan karst, arahan pengendalian pemanfaatan ruang, serta dasar pemantauan fungsi jasa lingkungan geologi.

16.13 Implikasi untuk Diklat Pengantar Ekonomi Geologi Lingkungan

Bab 16 dapat menjadi bahan dasar bagi kuliah diklat Pengantar Ekonomi Geologi Lingkungan. Materi diklat dapat dimulai dari gagasan sederhana bahwa setiap ruang mempunyai kondisi geologi, setiap kondisi geologi mempunyai fungsi dan pembatas, dan setiap fungsi maupun pembatas mempunyai konsekuensi ekonomi. Dengan cara ini, peserta diklat tidak langsung masuk ke rumus valuasi, tetapi memahami terlebih dahulu hubungan antara bumi, ruang, risiko, lingkungan, dan biaya.

Alur pembelajaran yang disarankan adalah: pertama, menjelaskan lingkungan geologi sebagai modal alam; kedua, membedakan nilai guna langsung, nilai guna tidak langsung, nilai pilihan, nilai keberadaan, dan biaya yang dihindari; ketiga, menunjukkan contoh ekonomi air tanah, zona resapan, bahaya geologi, Geopark, dan geowisata; keempat, memperkenalkan KCS sebagai contoh baru ekonomi jasa lingkungan geologi; dan kelima, menghubungkan seluruhnya dengan RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan pertimbangan teknis GTL.

KCS dapat dijadikan studi kasus utama dalam diklat karena menggabungkan geologi karbonat, hidrogeologi karst, hidrogeokimia, analisis spasial, valuasi ekonomi, tata ruang, dan pengelolaan lingkungan. Bab 16 dapat digunakan untuk menjelaskan kerangka pikirnya, sedangkan Juknis KCS dapat digunakan untuk latihan membaca data, menghitung indikator utama, menafsirkan hasil, dan menyusun rekomendasi.

Dalam diklat, penting ditegaskan bahwa keekonomian geologi lingkungan bukan ajakan untuk menilai semua hal hanya dengan uang. Tujuannya adalah membuat fungsi geologi terlihat dalam pengambilan keputusan. Jika fungsi geologi tidak diberi nilai, ia sering dianggap kosong dan mudah dikorbankan. Jika nilainya dijelaskan secara ilmiah, fungsi tersebut dapat memperoleh tempat dalam tata ruang, pengelolaan lingkungan, dan pembiayaan pembangunan berkelanjutan.

16.14 Kesimpulan Bab

Keekonomian Geologi Lingkungan memperluas peran GTL dari sekadar kajian teknis menjadi instrumen yang menunjukkan nilai manfaat, nilai perlindungan, dan nilai penghematan biaya dalam pembangunan. Lingkungan geologi bukan hanya dasar fisik ruang, tetapi juga modal alam yang menghasilkan air, stabilitas, keselamatan, nilai geowisata, nilai konservasi, nilai karbon, dan biaya yang dapat dihindari.

Bab ini menegaskan bahwa nilai ekonomi geologi lingkungan dapat dibaca melalui manfaat langsung, manfaat tidak langsung, nilai pilihan, nilai keberadaan, nilai warisan, dan biaya yang dihindari. Dengan demikian, peta geologi lingkungan, peta bahaya, peta zona resapan, peta kawasan lindung geologi, dan peta kesesuaian ruang merupakan instrumen ekonomi karena membantu memilih ruang secara lebih efisien dan aman.

Karst Carbon Sink menjadi contoh penting bahwa kawasan karst mempunyai nilai jasa lingkungan yang dapat dijelaskan secara kuantitatif. Dengan adanya Juknis KCS, pembahasan dalam Bab 16 tidak perlu memuat rincian teknis secara berulang, tetapi cukup menegaskan posisi KCS sebagai jembatan antara ilmu geologi lingkungan, ekonomi jasa lingkungan, tata ruang, dan pengelolaan lingkungan.

Dengan menempatkan Bab 16 sebagai bab terakhir sebelum Epilog, buku GTL memperoleh penutup substantif yang memperlihatkan bahwa GTL tidak hanya benar secara ilmiah dan penting secara regulatif, tetapi juga masuk akal secara ekonomi. Pembangunan yang membaca geologi sejak awal bukan hanya lebih aman dan berkelanjutan, tetapi juga lebih hemat, lebih adil, dan lebih bertanggung jawab terhadap ruang hidup.

Pesan kunci Bab 16

Keekonomian geologi lingkungan bukan upaya menjual fungsi bumi, melainkan cara menunjukkan bahwa bumi mempunyai nilai yang harus dihormati dalam keputusan ruang. Ketika data geologi digunakan sejak awal, pembangunan dapat menghemat biaya, mengurangi risiko, menjaga air, melindungi kawasan bernilai geologi, dan membuka peluang jasa lingkungan yang lebih adil.

EPILOG
Geologi Tata Lingkungan Sebagai Tanggung Jawab Ruang
Pada akhirnya, Geologi Tata Lingkungan adalah tentang tanggung jawab ruang. Tanggung jawab tersebut dimulai dari kesediaan untuk "membaca" ayat-ayat kauniyah yang terhampar di bumi sebelum manusia memutuskan pemanfaatan lahan. Ia menuntut agar data tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, hingga nilai geologi tidak ditempatkan sebagai informasi pinggiran, melainkan sebagai naskah dasar dalam perencanaan ruang dan pengendalian pembangunan. Di balik angka dan koordinat, ada tanggung jawab moral untuk memastikan bahwa ruang hidup yang kita kelola tetap menjadi tempat yang aman bagi manusia.
GEOLOGI TATA LINGKUNGAN
HIDROGEOLOGI
GEOMORFOLOGI
KERENTANAN & RISIKO
PERENCANAAN RUANG
CATATAN LAPANGAN
- Litologi
- Struktur
- Air Tanah
- Bentuk Lahan
- Proses Geologi
- Nilai Geologi
- Kerentanan
RENCANA TATA RUANG WILAYAH
KAWASAN LINDUNG
KAWASAN BUDIDAYA
KAWASAN PERMUKIMAN
KAWASAN INDUSTRI
KAWASAN LINDUNG
GARIS PANTAI
ETIKA PROFESI
TANGGUNG JAWAB UNTUK RUANG DAN KEHIDUPAN
MEMBACA BUMI DENGAN AMANAH, MENATA RUANG DENGAN TANGGUNG JAWAB.

Geologi Tata Lingkungan Sebagai Tanggung Jawab Ruang

Pada akhirnya, Geologi Tata Lingkungan adalah tentang tanggung jawab ruang. Tanggung jawab tersebut dimulai dari kesediaan untuk "membaca" ayat-ayat kaumiyah yang terhampar di bumi sebelum manusia memutuskan pemanfaatan lahan. Ia menuntut agar data tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, hingga nilai geologi tidak ditempatkan sebagai informasi pinggiran, melainkan sebagai naskah dasar dalam perencanaan ruang dan pengendalian pembangunan. Di balik angka dan koordinat, ada tanggung jawab moral untuk memastikan bahwa ruang hidup yang kita kelola tetap menjadi tempat yang aman bagi manusia.

Buku ini telah menunjukkan bahwa GTL tidak berdiri hanya sebagai istilah GTL adalah jembatan yang menghubungkan ilmu (Geologi Lingkungan), metode (Analisis), sintesis (Kajian), hingga menjadi Pertimbangan Teknis sebagai keluaran keputusan. Hubungan ini penting agar geologi tidak berhenti pada deskripsi yang bisu, melainkan hadir secara nyata dalam tata ruang, mitigasi risiko, hingga konservasi. Sebab, menjaga air tanah, melindungi lereng, dan melestarikan kawasan geologi adalah bentuk nyata dari rasa syukur atas karunia ruang hidup yang telah diamanahkan kepada kita.

Tantangan terbesar GTL ke depan bukan hanya menyusun peta yang lebih banyak, tetapi memastikan bahwa rekomendasi tersebut digunakan secara amanah. Setiap skala, skor, dan bobot harus dapat ditelusuri; setiap kajian harus melalui validasi yang jujur. Dengan cara ini, GTL bukan hanya menjadi instrumen penjaminan mutu teknis, melainkan menjadi bentuk kejujuran intelektual dalam pembangunan.

Penguatan GTL juga memerlukan kelembagaan dan keterbukaan. Data geologi perlu dikelola secara terbuka dan diperbarui secara berkala, karena persoalan ruang tidak pernah milik satu disiplin saja. Air tanah, lereng, dan pembangunan saling memengaruhi dalam sebuah sistem besar yang saling berkaitan—sebuah keteraturan yang menuntut kita untuk bekerja secara kolaboratif dan terintegrasi.

Di tengah perubahan iklim, tekanan sumber daya, dan meningkatnya risiko bencana, GTL mempunyai posisi strategis. Ia membangun kesadaran bahwa manusia harus tunduk pada kemampuan lingkungan geologi. Tidak semua lahan harus dibangun dengan intensitas yang sama, dan tidak semua risiko boleh diabaikan hanya karena teknologi tersedia. Di sinilah prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) bertemu dengan kearifan spiritual: bahwa manusia bukan pemilik bumi, melainkan penjaga yang harus berakuntabilitas atas setiap jengkal tanah yang diubahnya.

Epilog ini menutup buku dengan satu penegasan: pembangunan yang baik adalah pembangunan yang mengenal "fitrah" geologinya. Ketika geologi dibaca sejak awal, keputusan menjadi lebih cermat; ketika risiko dikenali lebih dini, mitigasi menjadi lebih efektif; ketika nilai geologi dilindungi, identitas alam tetap terjaga; dan ketika data divalidasi, kebijakan menjadi lebih bermartabat.

Semoga buku ini dapat menjadi pijakan bagi penguatan Geologi Tata Lingkungan di Indonesia. Bukan sebagai dokumen yang berhenti di rak, tetapi sebagai ajakan untuk bekerja: membaca bumi dengan teliti, menyusun keputusan dengan hati-hati, dan membangun ruang hidup yang lebih aman, tertib, dan berkelanjutan. Sebab pada akhirnya, apa yang kita tata di bumi hari ini, adalah warisan yang akan kita pertanggungjawabkan di hadapan generasi mendatang dan di hadapan Sang Pemilik Alam Semesta.

DAFTAR PUSTAKA

A. Peraturan Perundang-undangan dan Dokumen Kebijakan Indonesia

Undang-Undang Nomor 12 Tahun 2011 tentang Pembentukan Peraturan Perundang-undangan, sebagaimana telah diubah terakhir dengan Undang-Undang Nomor 13 Tahun 2022.

Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana.

Undang-Undang Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang, sebagaimana telah diubah melalui Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023.

Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, sebagaimana telah diubah melalui Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023.

Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air.

Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang.

Peraturan Pemerintah Nomor 43 Tahun 2008 tentang Air Tanah.

Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Penataan Ruang.

Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Peraturan Pemerintah Nomor 30 Tahun 2024 tentang Pengelolaan Sumber Daya Air.

Peraturan Presiden Nomor 9 Tahun 2019 tentang Pengembangan Taman Bumi (Geopark).

Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 11 Tahun 2016 tentang Penetapan Kawasan Rawan Bencana Geologi.

Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1 Tahun 2020 tentang Pedoman Penetapan Warisan Geologi (Geoheritage).

Peraturan Menteri Agraria dan Tata Ruang/Kepala Badan Pertanahan Nasional Nomor 21 Tahun 2021 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pemanfaatan Ruang dan Pengawasan Penataan Ruang.

B. Buku dan Literatur Ilmiah Utama

Bell, F. G. 1998. Environmental Geology: Principles and Practice. Oxford: Blackwell Science.

Bell, F. G. 2007. Engineering Geology. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann/Elsevier.

Dowling, R. K., dan Newsome, D. (eds.). 2018. Handbook of Geotourism. Cheltenham: Edward Elgar Publishing.

Fetter, C. W. 2001. Applied Hydrogeology. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Flawn, P. T. 1970. Environmental Geology: Conservation, Land-Use Planning, and Resource Management. New York: Harper & Row.

Gray, M. 2013. Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature. 2nd ed. Chichester: Wiley-Blackwell.

Hiscock, K. M., dan Bense, V. F. 2014. Hydrogeology: Principles and Practice. 2nd ed. Chichester: Wiley-Blackwell.

Hyndman, D., dan Hyndman, D. 2017. Natural Hazards and Disasters. 5th ed. Boston, MA: Cengage Learning.

Keller, E. A. 2012. Introduction to Environmental Geology. 5th ed. Boston: Prentice Hall/Pearson.

Merritts, D. J., De Wet, A., dan Menking, K. 1998. Environmental Geology: An Earth System Science Approach. New York: W. H. Freeman.

Montgomery, C. W. 2011. Environmental Geology. 9th ed. New York: McGraw-Hill.

Pipkin, B. W., Trent, D. D., Hazlett, R., dan Bierman, P. 2014. Geology and the Environment. 7th ed. Belmont, CA: Brooks/Cole, Cengage Learning.

Reynard, E., dan Brilha, J. (eds.). 2018. Geoheritage: Assessment, Protection, and Management. Amsterdam: Elsevier.

C. Artikel, Kajian, dan Literatur Tematik

Barbulescu, A. 2020. Assessing Groundwater Vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like Methods: A Review. Water, 12(5), 1356. https://doi.org/10.3390/w12051356.

Bathrellos, G. D. 2017. Land-use planning and natural hazards. Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science. Oxford University Press.

Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., Chowdhury, P., Ghosh, A., dan Biswas, S. 2021. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin, India with special emphasis on agricultural contamination. Ecotoxicology and Environmental Safety, 214, 112085. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112085.

Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., dan Das, S. 2022. Groundwater vulnerability and contamination risk mapping of semi-arid Totko river basin, India using GIS-based DRASTIC model and AHP techniques. Chemosphere, 307, 135831. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135831.

Brilha, J. 2016. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: A Review. Geoheritage, 8, 119-134. https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3.

Brocx, M., dan Semeniuk, V. 2007. Geoheritage and Geoconservation: History, Definition, Scope and Scale. Journal of the Royal Society of Western Australia, 90, 53-87.

Ellison, R. A. 1998. Environmental Geology in Land Use Planning. British Geological Survey Technical Report WA/97/85. Nottingham: British Geological Survey.

Kozlowski, M., Komorowski, J., dan Wojcik, R. 2019. Applying a Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability to Pollution: A Case Study in Central Poland. Polish Journal of Environmental Studies, 28(3), 1223-1231.

Luan, C., Liu, R., Peng, S., dan Qian, J. 2021. Land-use suitability assessment for urban development using a GIS-based soft computing approach: A case study of Ili Valley, China. Ecological Indicators, 123, 107333. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107333.

Nor, A. N. M., Corstanje, R., Harris, J. A., dan Brewer, T. 2017. Impact of rapid urban expansion on green space structure. Ecological Indicators, 81, 274-284. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.031.

Olafsdottir, R., dan Tverijonaite, E. 2018. Geotourism: A Systematic Literature Review. Geosciences, 8(7), 234. https://doi.org/10.3390/geosciences8070234.

Puntsag, G. 2014. Land Suitability Analysis for Urban and Agricultural Land Using GIS: A Case Study in Hvita to Hvita, Iceland. UNU Land Restoration Training Programme Final Project.

Satouh, A., El Hmaidi, A., dan Larabi, A. 2021. Groundwater vulnerability assessment using DRASTIC-related methods and GIS. Environmental Earth Sciences, 80, 1-17.

Suthar, N., Patel, D., dan Mehta, D. 2024. Land-use suitability assessment for urban development using GIS-based multi-criteria decision-making approach. Sustainable Water Resources Management, 10, 1-17.

Yan, Y., Zhang, L., Li, X., dan Xu, H. 2021. Evaluation of Suitability of Urban Land Using GIS Technology. Sustainability, 13(19), 10521. https://doi.org/10.3390/su131910521.

Zhang, Y., Su, F., dan Yang, D. 2019. A geomorphology and ecology-based approach for landslide-prone land-use planning. Sustainability, 11(3), 721.

D. Rujukan Indonesia dan Publikasi Badan Geologi

Ahmad, D., Rosana, M. F., dan Sulastri, M. 2020. Kesesuaian Lahan Berdasarkan Aspek Geologi Lingkungan untuk Pengembangan Permukiman di Margacinta, Kabupaten Pangandaran. Padjadjaran Geoscience Journal, 4(4).

Ilham, R., dkk. Rekomendasi pengembangan kawasan berbasis pendekatan geologi lingkungan. Entri ini perlu disesuaikan kembali dengan metadata publikasi asli apabila naskah final tetap mempertahankan sitasi Ilham et al. dalam tubuh teks.

Kudiai, S. V., Karapa, E., dan Manalu, J. 2024. Analisis Kesesuaian Lahan Berbasis Geologi Lingkungan untuk Pengembangan Pemukiman di Kota Jayapura. Jurnal Portal Sipil, 13(1), 1-7. https://doi.org/10.58839/jps.v13i1.1344.

Oktariadi, O., dan Andiani. 2021. Geowisata: Model Pariwisata Berkelanjutan. Bandung: Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Oktariadi, O., Memed, M. W., Yuwana, D. A., dan Hidayat, T. 2021. Geologi Lingkungan Cekungan Bandung. Bandung: Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Oktariadi, O., dan Suhendar, R. 2020. Warisan Geologi Nusantara: Kandidat Cagar Alam Geologi. Bandung: Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Badan Geologi. Profil Geologi Lingkungan Jabodetabek-Punjur. Bandung: Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Suhari. 1993. Kajian geologi lingkungan untuk penggunaan lahan dan perencanaan regional Cekungan Bandung. Bandung: Direktorat Geologi Tata Lingkungan.

Umar, dkk. Arahan peruntukan permukiman berdasarkan kriteria geologi. Entri ini perlu disesuaikan kembali dengan metadata publikasi asli apabila naskah final tetap mempertahankan sitasi Umar et al. dalam tubuh teks.

E. Sumber Kelembagaan dan Pembanding Internasional

British Geological Survey. Applied Geology Maps and Sections. Dataset metadata. Nottingham: British Geological Survey. Diakses 29 Mei 2026.

British Geological Survey. Land-use planning and housing: geoscience information for planning and development. Nottingham: British Geological Survey. Diakses 29 Mei 2026.

California Geological Survey. Alquist-Priolo Earthquake Fault Zones. Sacramento: California Department of Conservation. Diakses 29 Mei 2026.

California Geological Survey. Earthquake Zones of Required Investigation. Sacramento: California Department of Conservation. Diakses 29 Mei 2026.

European Parliament and Council of the European Union. 2007. Directive 2007/2/EC establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Official Journal of the European Union, L108, 1-14.

Federal Emergency Management Agency. Floodplain Management and National Flood Insurance Program resources. Washington, DC: FEMA. Diakses 29 Mei 2026.

Federal Office for the Environment Switzerland. Natural Hazards: Maps and Geodata. Bern: FOEN. Diakses 29 Mei 2026.

Ministry for the Environment New Zealand. 2023. Proposed National Policy Statement for Natural Hazard Decision-making. Wellington: Ministry for the Environment. Public consultation 18 September-20 November 2023.

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Japan. Sediment Disaster Warning Areas and Special Warning Areas. Tokyo: MLIT. Diakses 29 Mei 2026.

UNESCO. UNESCO Global Geoparks: concepts, criteria, and guidance. Paris: UNESCO. Diakses 29 Mei 2026.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. Geneva: UNDRR.

GLOSARIUM

Istilah	Pengertian Kerja dalam Buku Ini
Abrasi	Proses pengikisan pantai oleh gelombang, arus, atau dinamika pesisir yang dapat mengubah garis pantai dan memengaruhi keamanan pemanfaatan ruang.
Akresi	Pertambahan daratan di kawasan pantai akibat pengendapan material secara alami atau karena pengaruh kegiatan manusia.
Akuifer	Satuan geologi yang mampu menyimpan dan mengalirkan air tanah dalam jumlah yang berarti bagi pemanfaatan atau fungsi lingkungan.
Kajian Geologi Lingkungan (KGL)	Metode teknis untuk menilai hubungan antara kondisi geologi lingkungan dan rencana pemanfaatan ruang atau kegiatan tertentu.
Air tanah	Air yang terdapat di bawah permukaan tanah dan bergerak dalam sistem geologi tertentu, terutama pada akuifer.
Bahaya geologi	Kondisi atau proses geologi yang berpotensi menimbulkan kerugian bagi manusia, lingkungan, infrastruktur, atau kegiatan ekonomi.
Banjir yang dipengaruhi kondisi geologi	Kejadian genangan atau aliran air berlebih yang dipengaruhi oleh bentuk lahan, tanah, batuan, lereng, drainase alami, dan penggunaan lahan.
Bentang alam	Kenampakan permukaan bumi yang terbentuk oleh proses geologi, geomorfologi, hidrologi, iklim, dan aktivitas manusia.
Cagar Alam Geologi	Kawasan atau objek geologi bernilai penting yang memerlukan perlindungan sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.
Daerah imbuhan	Wilayah tempat air masuk ke dalam sistem air tanah melalui proses infiltrasi dan perkolasi sesuai kondisi geologi setempat.
Daerah lepasan	Wilayah tempat air tanah keluar kembali ke permukaan atau berhubungan dengan mata air, sungai, rawa, pesisir, atau badan air lain.
Daya dukung geologi	Kemampuan lingkungan geologi untuk menopang kegiatan manusia, prasarana, dan fungsi ruang tertentu secara aman dan berkelanjutan.
Daya tampung geologi	Kemampuan lingkungan geologi menerima tekanan, perubahan, limbah, beban, atau gangguan tanpa kehilangan fungsi dan keselamatannya.
Dokumen lingkungan	Dokumen yang digunakan untuk menilai, mengelola, dan memantau dampak kegiatan terhadap lingkungan sesuai ketentuan yang berlaku.
Faktor pembatas geologi	Kondisi geologi yang mengurangi atau membatasi kelayakan suatu ruang untuk kegiatan tertentu, tetapi pada kondisi tertentu masih dapat dikelola melalui syarat teknis.
Faktor pendukung geologi	Unsur geologi yang memberi peluang atau dukungan bagi pemanfaatan ruang, seperti kestabilan lahan, ketersediaan air, atau nilai geologi.
Faktor penyisih	Kondisi geologi atau lingkungan geologi yang membuat kegiatan tertentu sebaiknya dihindari atau diarahkan ke lokasi lain.
Geodiversity	Keragaman unsur abiotik alam, termasuk batuan, mineral, fosil, tanah, bentuk lahan, dan proses geologi.
Geoheritage	Nilai warisan geologi yang memiliki kepentingan ilmiah, pendidikan, estetika, budaya, atau konservasi.
Geologi lingkungan	Bidang ilmu yang mengkaji hubungan antara kondisi dan proses geologi dengan lingkungan hidup serta aktivitas manusia.
Geologi Tata Lingkungan (GTL)	Kerangka sintesis dan penerapan geologi lingkungan untuk mendukung tata ruang, lingkungan hidup, pengendalian risiko geologi, konservasi geologi, dan pertimbangan teknis.

Istilah	Pengertian Kerja dalam Buku Ini
Geomorfologi	Ilmu yang mempelajari bentuk lahan, proses pembentuknya, dan perkembangannya dari waktu ke waktu.
Geopark	Wilayah geografis yang memiliki Warisan Geologi dan dikelola secara terpadu untuk konservasi, edukasi, dan pembangunan ekonomi masyarakat secara berkelanjutan.
Geosite	Lokasi yang memiliki nilai geologi penting dan dapat menjadi objek kajian, perlindungan, edukasi, atau geowisata.
Geowisata	Kegiatan wisata berbasis nilai geologi yang menggabungkan interpretasi, pendidikan, konservasi, keselamatan, dan manfaat bagi masyarakat lokal.
Hidrogeologi	Cabang ilmu geologi yang mempelajari air tanah, termasuk keberadaan, aliran, kualitas, imbuhan, dan hubungan dengan lingkungan geologi.
Informasi GTL	Data geologi lingkungan yang telah diolah, dianalisis, disintesis, dan dikemas agar dapat digunakan dalam keputusan ruang dan lingkungan.
Infiltrasi	Proses masuknya air dari permukaan tanah ke dalam lapisan tanah atau batuan bagian atas.
Intrusi air asin	Masuknya air asin ke sistem air tanah tawar, terutama pada kawasan pesisir yang dipengaruhi tekanan pemanfaatan atau perubahan muka air tanah.
ITBX	Matriks ketentuan pemanfaatan ruang yang membedakan kegiatan yang diizinkan, diizinkan bersyarat, terbatas, atau tidak direkomendasikan.
Kajian GTL	Proses sintesis data dan kajian geologi lingkungan untuk mendukung keputusan tata ruang, lingkungan hidup, pembangunan kawasan, konservasi, atau pengendalian risiko.
Kapasitas risiko	Kemampuan sistem, lembaga, masyarakat, atau prasarana untuk mengurangi, menghadapi, dan memulihkan dampak bahaya.
Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK)	Kawasan karst yang memiliki fungsi pengaturan alami dan nilai penting sehingga memerlukan perlindungan dan pengelolaan khusus.
Kawasan Cagar Alam Geologi (KCAG)	Kawasan yang ditetapkan untuk melindungi objek atau nilai geologi penting sesuai ketentuan yang berlaku.
Kawasan lindung geologi	Kawasan yang memiliki fungsi perlindungan geologi, baik karena nilai, fungsi, kerentanan, maupun bahaya yang harus dikendalikan.
Kawasan rawan bencana geologi	Kawasan yang memiliki tingkat bahaya geologi tertentu dan memerlukan pengaturan ruang, mitigasi, serta pemantauan.
Kelas kesesuaian ruang	Kategori hasil penilaian yang menunjukkan apakah suatu ruang sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, tidak sesuai, atau memerlukan kajian rinci.
Kerentanan air tanah	Tingkat kemudahan air tanah terpengaruh pencemar atau tekanan lingkungan berdasarkan kondisi hidrogeologi dan penggunaan lahan.
Kerentanan risiko	Tingkat kelemahan unsur manusia, fisik, lingkungan, ekonomi, atau kelembagaan terhadap bahaya tertentu.
Ketidakpastian	Keterbatasan pengetahuan atau data dalam kajian geologi yang perlu dinyatakan agar rekomendasi tidak melampaui tingkat ketelitian data.
KLHS	Kajian Lingkungan Hidup Strategis, yaitu instrumen untuk memastikan prinsip pembangunan berkelanjutan menjadi dasar kebijakan, rencana, dan program.
Konservasi geologi	Upaya perlindungan, pengelolaan, dan pemanfaatan terbatas nilai geologi agar fungsi dan nilainya tetap terjaga.

Istilah	Pengertian Kerja dalam Buku Ini
Likuefaksi	Peristiwa ketika tanah jenuh air kehilangan kekuatan secara signifikan akibat guncangan, sehingga dapat merusak bangunan dan prasarana.
Matriks rekomendasi	Tabel yang menghubungkan kelas kesesuaian, faktor pembatas, syarat teknis, dan tindak lanjut pengendalian.
Metadata	Informasi tentang data, antara lain sumber, skala, metode, waktu penyusunan, penanggung jawab, dan batas penggunaannya.
Mitigasi geologi	Tindakan untuk mengurangi dampak bahaya geologi melalui pengaturan ruang, desain teknis, pemantauan, edukasi, atau langkah lain yang relevan.
Pemetaan tematik	Penyajian peta berdasarkan satu tema tertentu, seperti litologi, lereng, air tanah, bahaya geologi, zona resapan, atau nilai geologi.
Pembobotan	Pemberian tingkat pengaruh relatif pada parameter yang digunakan dalam analisis kesesuaian, kerentanan, atau pembatas ruang.
Pengendalian pemanfaatan ruang	Upaya memastikan pemanfaatan ruang sesuai rencana, ketentuan, syarat teknis, dan batas lingkungan yang telah ditetapkan.
Penginderaan jauh	Teknik memperoleh informasi permukaan bumi menggunakan sensor dari wahana udara atau satelit tanpa kontak langsung dengan objek.
Penurunan muka tanah	Turunnya permukaan tanah akibat proses alami atau aktivitas manusia, antara lain pemadatan sedimen, beban bangunan, atau pengambilan air tanah.
Perkolasi	Pergerakan air ke bagian lebih dalam setelah melewati zona tanah bagian atas.
Permeabilitas	Kemampuan tanah atau batuan meneruskan air atau fluida lain melalui media geologi.
Pertimbangan Teknis GTL	Keluaran teknis yang memuat hasil penilaian, status kesesuaian, faktor pembatas, syarat teknis, rekomendasi, dan kebutuhan tindak lanjut.
Peta bahaya geologi	Peta yang menunjukkan tingkat atau sebaran potensi bahaya geologi pada suatu wilayah sesuai skala dan metode penyusunannya.
Peta sintesis	Peta hasil penggabungan beberapa parameter atau peta tematik untuk menghasilkan informasi kesesuaian, pembatas, risiko, atau rekomendasi ruang.
RDTR	Rencana Detail Tata Ruang, yaitu rencana tata ruang rinci yang digunakan sebagai dasar pengaturan zonasi dan pemanfaatan ruang.
Rekomendasi operasional	Arahan teknis yang dapat dilaksanakan, dipantau, dan digunakan dalam keputusan ruang atau pengelolaan lingkungan.
Resapan air	Proses masuknya air ke dalam tanah atau batuan yang dapat mendukung imbuhan air tanah sesuai kondisi setempat.
Risiko geologi	Kemungkinan kerugian yang timbul dari interaksi bahaya geologi, unsur terpapar, kerentanan, dan kapasitas.
RTRW	Rencana Tata Ruang Wilayah, yaitu rencana tata ruang yang mengatur struktur ruang dan pola ruang pada tingkat wilayah tertentu.
Satuan analisis	Unit spasial yang digunakan untuk menggabungkan data dan menilai karakter lingkungan geologi dalam KGL atau Kajian GTL.
Sesar aktif	Struktur geologi yang menunjukkan potensi pergerakan pada masa geologi kini dan dapat berimplikasi terhadap keselamatan pemanfaatan ruang.
Sistem Informasi GTL	Sistem yang menyimpan, mengelola, memperbarui, dan menyajikan data serta informasi GTL untuk mendukung keputusan publik.

Istilah	Pengertian Kerja dalam Buku Ini
Skala peta	Perbandingan jarak pada peta dengan jarak sebenarnya di lapangan, yang menentukan tingkat ketelitian dan batas penggunaan peta.
Skoring	Pemberian nilai pada kelas parameter untuk menunjukkan tingkat dukungan, pembatas, kerentanan, atau kesesuaian terhadap tujuan analisis.
Tata ruang	Sistem perencanaan, pemanfaatan, dan pengendalian pemanfaatan ruang sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.
Tumpangsusun peta	Teknik analisis spasial untuk menggabungkan beberapa peta tematik guna menghasilkan informasi sintesis.
Validasi	Pemeriksaan mutu data, metode, peta, dan rekomendasi agar hasil kajian dapat digunakan secara bertanggung jawab.
Warisan Geologi	Objek atau kawasan geologi yang memiliki nilai penting untuk ilmu pengetahuan, pendidikan, budaya, estetika, konservasi, atau pengembangan berkelanjutan.
Zona resapan	Wilayah yang memiliki fungsi memasukkan air ke sistem air tanah dan perlu diperhatikan dalam tata ruang serta pengendalian kegiatan.
Zona rawan	Wilayah yang memiliki tingkat bahaya tertentu sehingga pemanfaatannya memerlukan syarat, pembatasan, mitigasi, atau kajian rinci.

Petunjuk Pelaksanaan Kajian Geologi Lingkungan

Lampiran teknis ini disusun sebagai bagian integral dari buku Geologi Tata Lingkungan. Fungsinya adalah menjembatani narasi konseptual, metodologis, regulatif, dan kelembagaan pada bab utama dengan tata cara kerja teknis yang dapat digunakan oleh geologist muda, penyusun kajian, pemerintah daerah, dan pemangku kepentingan teknis. Bagian lampiran juga memuat perangkat kerja untuk membaca sistem hulu-tengah-hilir, pengendalian banjir, pemulihan neraca air, pengendalian pemanfaatan ruang, dan penerapan KGL terpadu pada kawasan pengembangan kota baru. Adanya lampiran pada buku ini tidak dimaksudkan sebagai tambahan administratif, melainkan sebagai perangkat penerapan GTL dan KGL dalam kasus nyata peruntukan lahan, kawasan, tapak, prasarana, konservasi geologi, dan fasilitas berisiko.

Untuk memudahkan pembaca, setiap lampiran perlu dibaca setelah bab utama yang relevan. Lampiran tidak menggantikan analisis profesional dan validasi teknis, tetapi menyediakan pola kerja, data minimum, parameter, keluaran, daftar periksa, dan hubungan dengan instrumen kebijakan yang dapat disesuaikan menurut skala kajian dan kondisi setempat.

Seluruh petunjuk teknis dibaca bersama Bab 5 mengenai pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial; Bab 6 mengenai air tanah, zona resapan, dan neraca air; Bab 7 mengenai bahaya geologi; Bab 10 mengenai kedudukan regulatif; Bab 11 mengenai KGL untuk peruntukan lahan, kawasan, tapak, prasarana, pemanfaatan energi geologi, dan pengendalian pemanfaatan ruang; serta Bab 12 mengenai kelembagaan, validasi, pertimbangan teknis, sistem informasi, pemantauan, dan pemutakhiran. Dengan cara ini, lampiran teknis berperan sebagai jembatan dari konsep menuju tindakan, termasuk untuk kawasan PLTP yang membutuhkan pemisahan analitis antara sistem panas bumi, sistem air tanah dangkal, mata air masyarakat, dan risiko sosial-lingkungan.

Tabel LT.1 Peta hubungan lampiran teknis dengan bab utama buku GTL.

Lampiran	Tema petunjuk teknis	Bab utama terkait	Fungsi operasional dalam buku
Lampiran 1	Pedoman Umum Kajian Geologi Lingkungan	Bab 4, Bab 5, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman metodologis umum untuk menyusun Kajian Geologi Lingkungan secara sistematis, mulai dari penetapan tujuan, skala data, sintesis parameter, penilaian ITBX, validasi, sampai pemantauan hasil kajian.
Lampiran 2	Petunjuk Teknis KGL untuk Daerah Resapan Air	Bab 5, Bab 6, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman penerapan KGL pada daerah resapan air untuk menilai fungsi imbuhan, neraca air, kondisi hidrogeologi, tekanan pemanfaatan ruang, serta arahan perlindungan dan pemulihan fungsi resapan.
Lampiran 3	Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Permukiman Perkotaan	Bab 4, Bab 5, Bab 7, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman penilaian kesesuaian lahan permukiman perkotaan berdasarkan daya dukung geologi lingkungan, kondisi fisik lahan, risiko geologi, ketersediaan air, dan kebutuhan pengendalian intensitas ruang.

Lampiran	Tema petunjuk teknis	Bab utama terkait	Fungsi operasional dalam buku
Lampiran 4	Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Permukiman Nonperkotaan	Bab 4, Bab 5, Bab 7, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman penerapan KGL pada kawasan peruntukan nonperkebunan, termasuk prasarana lokal, sumber air, lahan pertanian, bahaya geologi, dan arahan pengendalian pemanfaatan ruang.
Lampiran 5	Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Industri	Bab 5, Bab 7, Bab 10, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman operasional untuk menilai daya dukung kawasan industri, mencakup kondisi geologi, hidrogeologi, air tanah, risiko geologi, faktor pembatas, fasilitas teknis, pengaturan zonasi, dan matriks ITBX.
Lampiran 6	Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Peruntukan Pertambangan	Bab 3, Bab 4, Bab 7, Bab 10, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman penilaian potensi pembatas geologi lingkungan pada kawasan peruntukan pertambangan, termasuk aspek kelayakan ruang, risiko geologi, perlindungan lingkungan, reklamasi, dan arahan pascatambang.
Lampiran 7	Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Gunung Api Aktif	Bab 3, Bab 4, Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 8, Bab 9, Bab 10, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman penerapan KGL pada kawasan gunung api aktif untuk menilai tingkat bahaya, zona risiko, kapasitas ruang, kebutuhan mitigasi, pengendalian pemanfaatan ruang, dan kesiapsiagaan masyarakat.
Lampiran 8	Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Giant Sea Wall atau Prasarana Perlindungan Pesisir Strategis	Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman KGL untuk tapak giant sea wall atau prasarana perlindungan pesisir strategis, mencakup bahaya pesisir, tanah lunak, amblesan, air tanah, stabilitas tapak, dampak lingkungan, dan pemantauan jangka panjang.
Lampiran 9	Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir	Bab 5, Bab 7, Bab 10, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman kehati-hatian tinggi dalam penapisan tapak PLTN melalui analisis geologi, seismotektonik, bahaya geologi, hidrogeologi, kesesuaian ruang, validasi teknis, dan pertimbangan keselamatan jangka panjang.
Lampiran 10	Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Geopark	Bab 3, Bab 8, Bab 9, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman penerapan KGL untuk kawasan geopark dalam menilai warisan geologi, geosite, daya dukung geowisata, risiko geologi, konservasi, edukasi, pengelolaan ruang, dan pemantauan kawasan.
Lampiran 11	Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Bentang Alam Karst	Bab 3, Bab 6, Bab 8, Bab 9, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman perlindungan fungsi karst, tata air, nilai geologi, zona pemanfaatan terbatas, pemulihan fungsi lingkungan, pengendalian kegiatan, serta matriks ITBX pada kawasan bentang alam karst.
Lampiran 12	Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Cagar Alam Geologi	Bab 3, Bab 8, Bab 9, Bab 10, Bab 12	Menjadi pedoman perlindungan nilai geologi penting pada KCAG, mencakup inventarisasi geosite, penilaian signifikansi, risiko, zonasi perlindungan, rekomendasi teknis, validasi, dan integrasi tata ruang.
Lampiran 13	Petunjuk Teknis KGL untuk Tempat Pengolahan Sampah Terpadu	Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman penerapan KGL untuk tempat pengolahan sampah terpadu, mencakup kesesuaian tapak, kerentanan air tanah, hidrogeologi, bahaya geologi, pengendalian lindi, sistem pemantauan, dan pengelolaan pascaoperasi.
Lampiran 14	Petunjuk Teknis Terpadu KGL dan Pemantauan Partisipatif Sidik Jari Air untuk Kawasan PLTP	Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman terpadu KGL dan pemantauan partisipatif sidik jari air pada kawasan PLTP untuk menilai kesesuaian kawasan, sistem hidrogeologi, perubahan debit dan kualitas air, risiko operasi,

Lampiran	Tema petunjuk teknis	Bab utama terkait	Fungsi operasional dalam buku
			penerimaan sosial, dan tindak korektif berbasis data.
Lampiran 15	Petunjuk Teknis KGL untuk Karst Carbon Sink (KCS)	Bab 3, Bab 6, Bab 8, Bab 9, Bab 10, Bab 11, Bab 12, Bab 16	Menjadi pedoman penerapan KGL pada karst carbon sink untuk menilai fungsi karst dalam penyimpanan karbon, tata air, konservasi ekosistem, potensi jasa lingkungan, kerentanan kawasan, dan arahan pengelolaan berkelanjutan.
Lampiran 16	Petunjuk Teknis KGL Hulu-Tengah-Hilir untuk Pengendalian Banjir, Pemulihan Neraca Air, Dan Pengendalian Pemanfaatan Ruang.	Bab 4, Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 10, Bab 11, Bab 12	Menjadi pedoman KGL hulu–tengah–hilir untuk pengendalian banjir, pemulihan neraca air, dan pengendalian pemanfaatan ruang melalui analisis DAS/sub-DAS, fungsi resapan, limpasan, bahaya geologi, kesesuaian ruang, intervensi teknis, serta pemantauan adaptif.
Lampiran 17	Penerapan KGL Terpadu Skala Rinci untuk Kawasan Pengembangan Kota Baru	Bab 4, Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 10, Bab 11, Bab 12	Menjadi contoh penerapan KGL terpadu skala rinci pada kawasan pengembangan kota baru, mulai dari penapisan awal, inventarisasi data, pemetaan tematik, analisis terpadu, validasi lapangan, rekomendasi teknis, hingga pemantauan kawasan.

Cara Membaca Lampiran Teknis

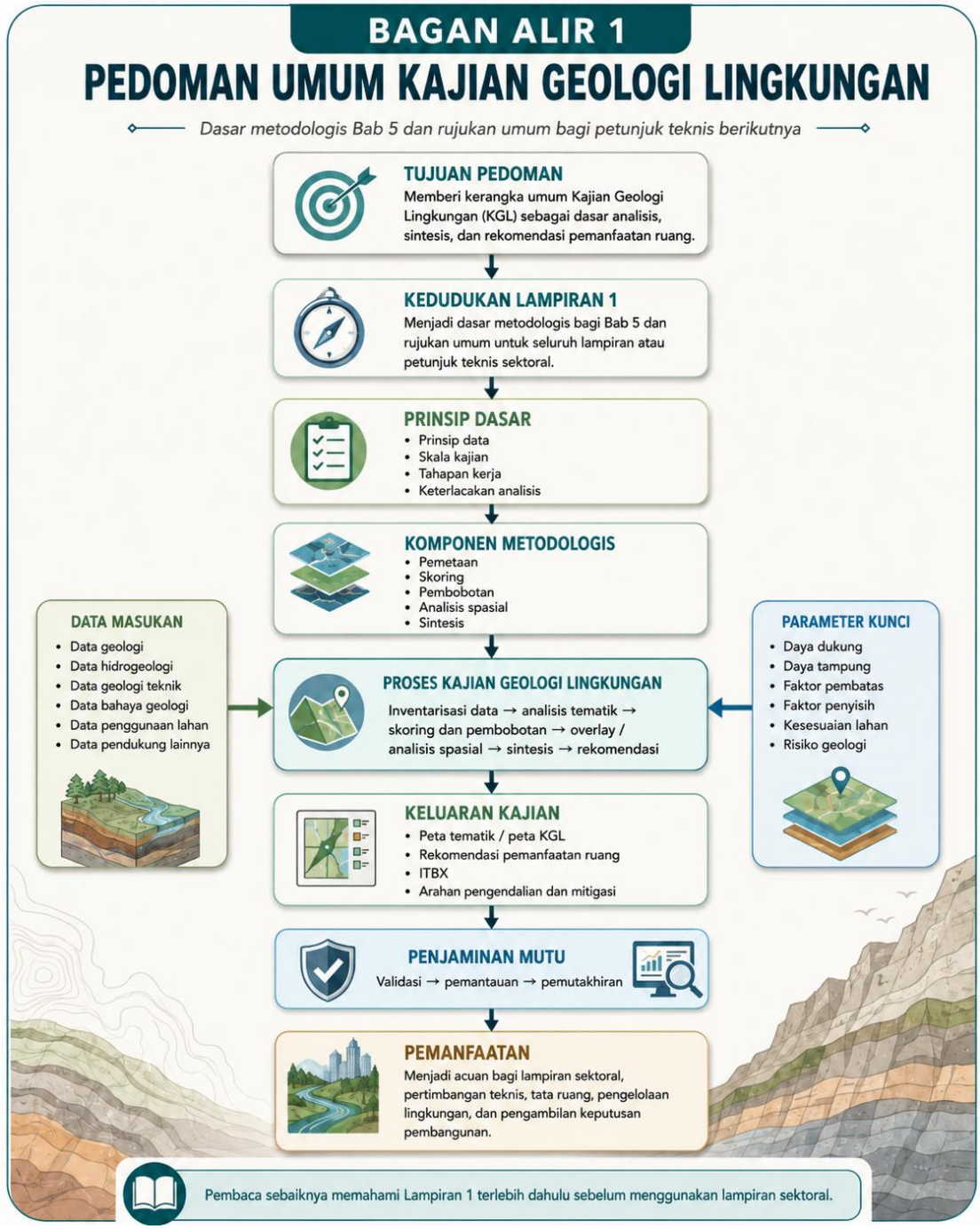
Contoh-contoh peta yang disisipkan dalam buku ini dimaksudkan sebagai ilustrasi operasional, bukan sebagai template tunggal yang harus diterapkan secara seragam. Pada praktiknya, setiap produk GTL tetap perlu menyesuaikan tujuan kajian, skala, kualitas data, dan konteks wilayah yang dianalisis.

Setiap lampiran dibaca sebagai modul kerja. Pembaca dapat memulai dari kedudukan lampiran, memahami data minimum dan parameter utama, memeriksa metode skoring dan pembobotan, menilai faktor pembatas dan faktor penyisih, lalu menerjemahkan hasilnya ke dalam peta, rekomendasi teknis, matriks ITBX, validasi, dan pemantauan.

Dalam penerapan lapangan, lampiran tidak boleh dipakai secara mekanis. Skor, bobot, kelas kesesuaian, dan ITBX harus dikalibrasi terhadap skala kajian, ketersediaan data, kondisi geologi setempat, konsekuensi kegiatan, dan hasil validasi teknis. Apabila data belum memadai, keluaran yang tepat adalah rekomendasi kajian rinci atau penundaan keputusan, bukan kesimpulan yang terlalu pasti.

Tabel LT.2 Struktur baku pembacaan setiap lampiran.

Unsur	Fungsi dalam lampiran teknis
Kedudukan dan tujuan	Menjelaskan mengapa lampiran diperlukan dan keputusan apa yang didukung.
Data minimum dan metadata	Menjamin data dapat ditelusuri, sesuai skala, dan dapat digunakan secara bertanggung jawab.
Parameter dan satuan analisis	Menetapkan unsur geologi lingkungan yang relevan dengan objek kajian.
Skoring, pembobotan, dan faktor penyisih	Mengubah data menjadi kelas kesesuaian tanpa menghilangkan penalaran geologi.
Rekomendasi teknis dan ITBX	Menerjemahkan hasil KGL ke arahan pemanfaatan ruang dan pengendalian.
Validasi, pemantauan, dan pemutakhiran	Menjamin hasil kajian tetap sahih, dapat diperiksa, dan diperbarui.



Gambar L1.1. Bagan Alir Pedoman Umum Kajian Geologi Lingkungan

Lampiran 1:

Pedoman Umum Kajian Geologi Lingkungan

Lampiran 1 menjadi dasar metodologis bagi Bab 5 dan menjadi rujukan umum untuk semua petunjuk teknis berikutnya. Pembaca sebaiknya memahami lampiran ini sebelum menggunakan lampiran sektoral karena di dalamnya terdapat prinsip data, skala, tahapan, skoring, pembobotan, sintesis, rekomendasi, ITBX, validasi, pemantauan, dan pemutakhiran.

Tabel L1.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 4, Bab 5, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Kerangka metodologis umum, skala, data, sintesis, rekomendasi, ITBX, validasi, dan pemutakhiran.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L1.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

A. Kedudukan Pedoman Umum

Pedoman Umum Kajian Geologi Lingkungan merupakan acuan metodologis bagi penyusunan seluruh petunjuk teknis kajian geologi lingkungan untuk berbagai peruntukan lahan dan kawasan. Pedoman ini mengatur prinsip, data, tahapan, parameter umum, metode sintesis, penentuan zona kesesuaian lahan, penyusunan rekomendasi teknis, matriks ITBX, pelaporan, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran hasil analisis.

Pedoman ini berlaku sebagai dasar bersama bagi petunjuk teknis daerah resapan air, kawasan permukiman perkotaan, kawasan permukiman nonperkotaan, kawasan industri, kawasan peruntukan pertambangan, tapak prasarana perlindungan pesisir strategis, tapak PLTN, kawasan geopark, Kawasan Bentang Alam Karst, dan Kawasan Cagar Alam Geologi.

Dengan adanya pedoman umum ini, setiap kajian geologi lingkungan untuk peruntukan lahan tertentu harus menggunakan kerangka metodologis yang seragam, tetapi tetap dapat menyesuaikan parameter, bobot, klasifikasi,

dan rekomendasi teknis menurut karakter kawasan yang dianalisis.

B. Maksud dan Tujuan

Pedoman ini dimaksudkan untuk memberikan acuan teknis yang seragam dalam melaksanakan Kajian Geologi Lingkungan agar hasilnya dapat digunakan untuk penataan ruang, pengelolaan lingkungan hidup, penyusunan peraturan zonasi, pengendalian pemanfaatan ruang, dan penyiapan rekomendasi teknis.

Tujuan Pedoman Umum ini adalah:

- menyeragamkan pendekatan kajian geologi lingkungan lintas peruntukan lahan;
- menjamin keterlacakan data, metode, peta, dan rekomendasi teknis;
- menyediakan dasar teknis bagi penyusunan zona kesesuaian lahan;
- menyediakan dasar penerjemahan hasil analisis ke dalam pengaturan zonasi dan matriks ITBX;
- mendukung integrasi hasil kajian geologi lingkungan ke dalam RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang;
- menjadi acuan dalam validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran hasil analisis.

C. Ruang Lingkup

Ruang lingkup Pedoman Umum meliputi kerangka konseptual, data dan informasi dasar, skala peta, satuan analisis, tahapan analisis, faktor pendukung, faktor pembatas, faktor penyisih, skoring dan pembobotan, sintesis zona kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, matriks ITBX, format laporan, format peta, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran.

II. KERANGKA KONSEPTUAL KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

A. Lingkungan Geologi sebagai Faktor Pendukung dan Faktor Pembatas

Lingkungan geologi memiliki fungsi ganda. Pertama, lingkungan geologi menjadi faktor pendukung karena menyediakan tanah, batuan, bentuk lahan, sumber daya air, bahan galian, energi, bentang alam, dan nilai geologi yang dapat dimanfaatkan untuk pembangunan. Kedua, lingkungan geologi menjadi faktor pembatas karena memuat bahaya geologi, keterbatasan daya dukung, kerentanan air, perubahan bentuk lahan, dan nilai geologi yang harus dilindungi.

Kajian Geologi Lingkungan dilakukan untuk menyeimbangkan kedua fungsi tersebut. Suatu kawasan tidak dinilai hanya berdasarkan potensi pemanfaatannya, tetapi juga berdasarkan tingkat pembatas, risiko, fungsi lindung, kemampuan mitigasi, dan konsekuensi lingkungan apabila dimanfaatkan.

B. Kesesuaian Lahan sebagai Hasil Sintesis

Zona kesesuaian lahan merupakan hasil sintesis dari data geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, sumber daya air sebagai bahan analisis, bahaya geologi, penggunaan lahan, tata ruang, dan data pendukung lain. Zona kesesuaian lahan menunjukkan tingkat kesesuaian suatu wilayah terhadap peruntukan tertentu, serta syarat atau pembatas yang harus dipenuhi apabila wilayah tersebut dimanfaatkan.

Peta zona kesesuaian lahan tidak boleh berhenti sebagai produk kartografis. Peta tersebut harus diterjemahkan ke dalam rekomendasi teknis, arahan pengaturan zonasi, dan matriks ITBX sehingga dapat digunakan oleh pemerintah daerah dan pemangku kepentingan dalam perencanaan dan pengendalian pemanfaatan ruang.

C. Hubungan dengan Tata Ruang dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

Kajian Geologi Lingkungan mendukung penataan ruang melalui penyediaan informasi mengenai daya dukung geologi, faktor pembatas geologi, bahaya geologi, daerah resapan air, kawasan lindung geologi, dan kawasan yang memerlukan syarat teknis pemanfaatan ruang. Hasil analisis digunakan dalam penyusunan dan peninjauan kembali RTRW, RDTR, peraturan zonasi, serta pengendalian kesesuaian kegiatan pemanfaatan ruang.

Dalam pengelolaan lingkungan hidup, hasil Kajian Geologi Lingkungan dapat digunakan sebagai bahan penyusunan KLHS, AMDAL, UKL-UPL, persetujuan lingkungan, rencana pengelolaan lingkungan, dan rencana pemantauan lingkungan. Penggunaan hasil analisis tersebut tidak menggantikan instrumen lingkungan hidup, tetapi memperkuat dasar teknisnya dari sudut lingkungan geologi.

D. Kedudukan Data Sumber Daya Air

Data sumber daya air, baik air permukaan maupun air tanah, digunakan sebagai bahan sintesis geologi lingkungan. Pedoman ini tidak mengatur pengelolaan dan konservasi air tanah sebagai rezim perizinan atau pengusahaan, karena hal tersebut telah diatur dalam peraturan perundang-undangan bidang sumber daya air. Namun, informasi sumber daya air tetap diperlukan untuk menilai fungsi resapan, neraca air, kesesuaian lahan, kerentanan kawasan, dan arahan pengendalian pemanfaatan ruang.

Dalam konteks daerah resapan air, data sumber daya air digunakan untuk menyusun peta zona resapan air, menghitung kesetimbangan air, menilai kekritisan zona resapan, serta merumuskan arahan KDB/BCR, KDH, dan ITBX pada zona resapan sangat tinggi, tinggi, sedang, rendah, dan sangat rendah.

III. DATA DAN INFORMASI DASAR

A. Jenis Data

Kajian Geologi Lingkungan harus menggunakan data yang sesuai dengan tujuan analisis, skala peta, karakter kawasan, dan peruntukan lahan. Data yang digunakan harus memiliki sumber yang jelas, metadata, tahun pembuatan atau pemutakhiran, metode pengambilan, serta batas ketelitian.

Tabel L1.3 Jenis Data Umum untuk Analisis KGL

Kelompok Data	Contoh Data	Kegunaan dalam Analisis
Geologi	litologi, struktur geologi, stratigrafi, satuan batuan, endapan permukaan	menilai sifat dasar lingkungan geologi, daya dukung, dan pembatas alami
Geomorfologi	bentuk lahan, elevasi, kemiringan lereng, proses permukaan	menentukan satuan lahan, potensi resapan, kerentanan, dan kesesuaian pemanfaatan
Geologi teknik	sifat tanah dan batuan, daya dukung, kompresibilitas, stabilitas lereng	menilai keamanan bangunan, prasarana, dan tapak kegiatan
Hidrogeologi dan sumber daya air	akuifer, mata air, aliran air permukaan, daerah imbuhan, daerah lepasan, zona resapan	menilai fungsi air sebagai bagian dari sintesis geologi lingkungan
Bahaya geologi	gempa bumi, tsunami, gunung api, gerakan tanah, likuefaksi, penurunan muka tanah, banjir, rob, abrasi	menetapkan faktor pembatas dan kebutuhan mitigasi
Tata ruang dan penggunaan lahan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, tutupan lahan, intensitas pemanfaatan ruang	menilai kesesuaian dengan kebijakan ruang dan kebutuhan pengendalian
Lingkungan hidup dan sosial-ekonomi	kawasan lindung, kawasan budidaya, fasilitas umum, kepadatan penduduk, kegiatan ekonomi	menilai keterpaparan, sensitivitas, dan penerapan rekomendasi teknis

B. Kualitas, Metadata, dan Keterlacakan Data

Setiap data yang digunakan harus dapat ditelusuri sumbernya. Metadata paling sedikit memuat nama data, penyusun, tahun, skala, sistem koordinat, metode pengumpulan, tingkat ketelitian, status pemutakhiran, dan batas penggunaan. Data yang tidak memenuhi persyaratan keterlacakan hanya dapat digunakan sebagai indikasi awal dan harus diverifikasi melalui data tambahan atau survei lapangan.

Apabila terdapat perbedaan antar sumber data, penyusun analisis wajib melakukan klarifikasi teknis dengan membandingkan skala, tahun pembuatan, metode, dan kesesuaian dengan kondisi lapangan. Data yang lebih rinci, lebih mutakhir, dan

tervalidasi lapangan harus diberi bobot kepercayaan lebih tinggi.

Tabel L1.4. Skala Peta untuk Tingkatan Analisis KGL

Tingkat Analisis	Skala Rujukan	Kegunaan	Catatan
Nasional/pulau	1:1.000.000 s.d. 1:250.000	arah kebijakan makro dan prioritas kajian	tidak digunakan untuk keputusan tapak
Provinsi/regional	1:250.000 s.d. 1:100.000	arahan regional dan sinkronisasi RTRW provinsi	perlu pendetailan untuk RDTR
Kabupaten/kota	1:100.000 s.d. 1:50.000	dukungan RTRW kabupaten/kota	parameter kunci harus diverifikasi
Kawasan/RDTR	1:25.000 s.d. 1:5.000	penentuan zona dan arahan pengaturan zonasi	memerlukan data rinci dan validasi lapangan
Tapak	1:5.000 atau lebih rinci	keputusan desain dan syarat teknis tapak	wajib survei rinci sesuai kebutuhan

D. Satuan Analisis

Satuan analisis adalah satuan ruang yang digunakan untuk menilai kesesuaian lahan. Satuan analisis dapat dibentuk dari kombinasi satuan geologi, satuan bentuk lahan, kemiringan lereng, kondisi tanah, kondisi air, penggunaan lahan, dan batas rencana tata ruang. Pemilihan satuan analisis harus disesuaikan dengan skala peta dan tujuan analisis.

Untuk analisis skala kawasan dan tapak, satuan analisis harus cukup rinci agar mampu membedakan perbedaan daya dukung, faktor pembatas, dan arahan pemanfaatan ruang. Untuk analisis daerah resapan air, satuan analisis harus mampu menangkap perbedaan litologi, kemiringan lereng, penggunaan lahan, curah hujan, kondisi tanah, dan hubungan air permukaan dengan air tanah.

IV. TAHAPAN UMUM KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

Kajian Geologi Lingkungan dilaksanakan melalui tahapan sistematis agar hasilnya dapat diuji dan digunakan dalam pengambilan keputusan. Tahapan umum berlaku untuk seluruh petunjuk teknis peruntukan lahan, dengan penyesuaian parameter sesuai objek analisis.

- Penetapan tujuan dan peruntukan analisis: menentukan peruntukan lahan, batas wilayah, skala, produk yang dihasilkan, dan kebutuhan pengambilan keputusan.
- Kompilasi dan evaluasi data: mengumpulkan data primer dan sekunder, mengevaluasi kualitas data, serta menyiapkan basis data geospasial.
- Penyusunan peta tematik awal: menyusun peta geologi, geomorfologi, geologi teknik, sumber daya air, bahaya geologi, penggunaan lahan, dan peta pendukung lain.
- Survei lapangan: memverifikasi data, mengidentifikasi kondisi aktual, mengukur parameter penting, dan mencatat indikasi faktor pendukung serta faktor pembatas.
- Analisis faktor pendukung: menilai potensi lingkungan geologi yang mendukung peruntukan lahan.
- Analisis faktor pembatas: menilai kondisi yang membatasi, mensyaratkan, atau meningkatkan risiko pemanfaatan ruang.
- Penetapan faktor penyisih: menentukan wilayah yang harus dikeluarkan atau dibatasi karena fungsi lindung, bahaya tinggi, atau ketentuan peraturan perundang-undangan.
- Skoring dan pembobotan: memberikan nilai pada parameter dan bobot sesuai tingkat pengaruh terhadap peruntukan lahan.
- Sintesis kesesuaian lahan: menggabungkan seluruh parameter menjadi zona kesesuaian lahan.

- Penyusunan rekomendasi teknis dan ITBX: menerjemahkan zona kesesuaian lahan ke dalam syarat teknis, arahan zonasi, dan matriks ITBX.
- Validasi teknis: memeriksa kecukupan data, metode, peta, dan rekomendasi sebelum digunakan.

V. FAKTOR PENDUKUNG, FAKTOR PEMBATAS, DAN FAKTOR PENYISIH

A. Faktor Pendukung

Faktor pendukung adalah kondisi lingkungan geologi yang meningkatkan kelayakan suatu wilayah untuk peruntukan tertentu. Faktor pendukung dapat berbeda menurut jenis peruntukan lahan, tetapi secara umum mencakup kondisi tanah dan batuan yang stabil, kemiringan lereng yang sesuai, ketersediaan air yang memadai, fungsi resapan yang baik, bahaya geologi rendah, dan aksesibilitas teknis yang memungkinkan.

B. Faktor Pembatas

Faktor pembatas adalah kondisi lingkungan geologi yang menurunkan tingkat kesesuaian lahan, menimbulkan syarat teknis, atau membatasi jenis kegiatan yang dapat dilakukan. Faktor pembatas dapat berupa bahaya geologi, keterbatasan daya dukung tanah dan batuan, kerentanan air, penurunan muka tanah, intrusi air asin, banjir, rob, gerakan tanah, likuefaksi, abrasi, atau kondisi lain yang meningkatkan risiko.

C. Faktor Penyisih

Faktor penyisih adalah faktor yang menyebabkan wilayah tertentu tidak direkomendasikan untuk peruntukan yang dianalisis atau hanya dapat dimanfaatkan secara sangat terbatas. Faktor penyisih dapat berasal dari fungsi lindung, kawasan bernilai geologi, kawasan rawan bahaya tinggi, daerah resapan dengan fungsi perlindungan utama, sempadan, dan ketentuan tata ruang atau peraturan perundang-undangan.

Tabel L1.5. Jenis Faktor dalam KGL

Jenis Faktor	Makna	Contoh Parameter	Pengaruh terhadap Zona
Pendukung	meningkatkan kelayakan pemanfaatan	lereng landai, tanah stabil, resapan baik, bahaya rendah	menaikkan kelas kesesuaian
Pembatas	membatasi atau mensyaratkan pemanfaatan	banjir, gerakan tanah, penurunan muka tanah, intrusi asin	menurunkan kelas atau menambah syarat
Penyisih	mengeluarkan atau membatasi wilayah tertentu	kawasan lindung geologi, sempadan, zona bahaya tinggi	menjadi terbatas atau tidak sesuai

VI. SKORING, PEMBOBOTAN, DAN SINTESIS

A. Skoring Parameter

Skoring digunakan untuk memberi nilai terhadap setiap parameter. Skor dapat menggunakan skala 1 sampai dengan 5 atau skala lain yang ditetapkan dalam petunjuk teknis. Nilai tinggi diberikan pada kondisi yang mendukung peruntukan lahan, sedangkan nilai rendah diberikan pada kondisi yang menjadi pembatas.

Tabel L1.6. Nilai Skoring Parameter

Skor	Makna Umum	Implikasi Teknis
5	sangat mendukung	dapat dimanfaatkan dengan syarat umum
4	mendukung	dapat dimanfaatkan dengan pengendalian ringan
3	cukup mendukung	memerlukan syarat teknis dan pemantauan
2	membatasi	pemanfaatan terbatas dan memerlukan mitigasi ketat
1	sangat membatasi	tidak direkomendasikan atau hanya untuk fungsi tertentu

B. Pembobotan Parameter

Pembobotan digunakan untuk menunjukkan tingkat kepentingan setiap parameter terhadap peruntukan lahan yang dianalisis. Parameter yang secara langsung menentukan keselamatan, fungsi lindung, atau kelayakan teknis harus memiliki bobot lebih tinggi. Bobot ditetapkan berdasarkan dasar ilmiah, pengalaman teknis, ketentuan peraturan perundang-undangan, dan validasi ahli.

Nilai sintesis dapat dihitung dengan menjumlahkan hasil perkalian skor parameter dan bobot parameter. Apabila terdapat faktor penyisih, hasil skoring tidak dapat digunakan untuk menaikkan kelas kesesuaian pada wilayah yang secara hukum atau teknis harus dibatasi.

C. Sintesis Zona Kesesuaian Lahan

Sintesis zona kesesuaian lahan dilakukan dengan menggabungkan nilai faktor pendukung, faktor pembatas, dan faktor penyisih. Sintesis dilakukan melalui tumpang susun peta tematik, penilaian matriks, penghitungan skor, dan interpretasi teknis. Hasil sintesis harus diperiksa kembali terhadap kondisi lapangan dan ketentuan tata ruang.

Tabel L1.7. Hirarki Zona Kesesuaian Lahan dalam KGL

Zona Kesesuaian	Karakter Umum	Arahan Pemanfaatan
Sangat sesuai	daya dukung baik, pembatas rendah	diarahkan untuk pemanfaatan sesuai peruntukan dengan syarat umum
Sesuai	pembatas masih dapat dikendalikan	dapat dimanfaatkan dengan pengendalian teknis normal
Sesuai bersyarat	terdapat pembatas penting	dapat dimanfaatkan jika syarat teknis dipenuhi
Terbatas	pembatas kuat atau fungsi lindung tertentu	hanya untuk kegiatan tertentu dan pemantauan ketat
Tidak sesuai	risiko tinggi, fungsi lindung utama, atau pembatas tidak dapat diterima	tidak direkomendasikan untuk peruntukan yang dianalisis

VII. REKOMENDASI TEKNIS DAN MATRIKS ITBX

A. Rekomendasi Teknis

Rekomendasi teknis merupakan keluaran utama Kajian Geologi Lingkungan. Rekomendasi teknis harus memuat zona kesesuaian lahan, faktor pendukung utama, faktor pembatas utama, faktor penyisih, syarat pemanfaatan ruang, kebutuhan mitigasi, kebutuhan pemantauan, serta tindak lanjut dalam tata ruang dan pengelolaan lingkungan.

Rekomendasi teknis harus disusun dalam bahasa yang operasional agar dapat diterjemahkan ke dalam keputusan ruang. Setiap rekomendasi harus menjelaskan apa yang dapat dilakukan, apa yang harus dibatasi, syarat teknis yang wajib dipenuhi, dan parameter yang harus dipantau.

B. Matriks ITBX

Matriks ITBX digunakan untuk menerjemahkan peta kesesuaian lahan ke dalam arahan kegiatan. Matriks ini memuat kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan pada setiap zona kesesuaian lahan. Matriks ITBX harus mempertimbangkan daya dukung, faktor pembatas, fungsi lindung, bahaya geologi, kemampuan mitigasi, dan ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L1.8. Matriks ITBX dalam KGL

Kode	Makna	Kriteria Umum
I	Diizinkan	kegiatan sesuai dengan daya dukung dan tidak menimbulkan pembatas penting
T	Terbatas	kegiatan dapat dilakukan dengan batasan intensitas, luas, waktu, lokasi, atau teknologi

Kode	Makna	Kriteria Umum
B	Bersyarat	kegiatan hanya dapat dilakukan setelah memenuhi syarat teknis tertentu
X	Tidak diperbolehkan	kegiatan tidak dapat dilakukan karena fungsi lindung, risiko tinggi, atau pembatas tidak dapat diterima

Tabel L1.9. Matriks Generik Hubungan Zona dan ITBX

Jenis Kegiatan	Sangat Sesuai	Sesuai	Sesuai Bersyarat	Terbatas	Tidak Sesuai
Kegiatan utama sesuai peruntukan	I	I/B	B	T/B	X
Kegiatan pendukung berisiko rendah	I	I	B	T	X
Kegiatan dengan potensi dampak sedang	B	B	B/T	T	X
Kegiatan dengan potensi dampak tinggi	B/T	T/B	T/X	X	X
Kegiatan yang mengganggu fungsi lindung	X	X	X	X	X

Matriks generik ini menjadi acuan awal. Rincian jenis kegiatan dan kode ITBX harus disesuaikan dalam masing-masing petunjuk teknis berdasarkan karakter peruntukan lahan dan ketentuan tata ruang yang berlaku.

VIII. FORMAT LAPORAN DAN PETA

A. Format Laporan

Laporan Kajian Geologi Lingkungan paling sedikit memuat:

- pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, dan dasar pelaksanaan;
- metode analisis, sumber data, skala peta, dan satuan analisis;
- kondisi geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, sumber daya air, bahaya geologi, penggunaan lahan, dan tata ruang;
- analisis faktor pendukung, faktor pembatas, dan faktor penyisih;
- metode skoring, pembobotan, dan sintesis;
- peta zona kesesuaian lahan dan uraian setiap zona;
- rekomendasi teknis dan arahan mitigasi;
- matriks ITBX;
- rencana pemantauan dan pemutakhiran;
- kesimpulan dan tindak lanjut.

B. Format Peta

Peta hasil Kajian Geologi Lingkungan harus disajikan dalam format geospasial dan format cetak. Setiap peta harus memuat judul, skala, sistem koordinat, sumber data, legenda, arah utara, tahun penyusunan, penyusun, dan keterangan teknis yang diperlukan.

Peta minimum yang disajikan meliputi peta lokasi, peta geologi, peta geomorfologi, peta geologi teknik apabila diperlukan, peta sumber daya air yang relevan, peta bahaya geologi, peta faktor penyisih, peta zona kesesuaian lahan, dan peta rekomendasi teknis. Untuk peruntukan tertentu, jenis peta dapat ditambah sesuai petunjuk teknis.

IX. VALIDASI TEKNIS

Validasi teknis dilakukan untuk memastikan bahwa hasil Kajian Geologi Lingkungan layak digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Validasi teknis dilakukan terhadap kecukupan data, kesesuaian skala, ketepatan metode, konsistensi analisis, keterlacakan sumber data, kesahihan peta, kelayakan rekomendasi teknis, dan kesesuaian matriks ITBX.

Tabel L1.10. Aspek Validasi Teknis

Aspek Validasi	Pertanyaan Pemeriksaan	Keluaran
Data	Apakah data cukup, mutakhir, dan dapat ditelusuri?	catatan kecukupan data

Aspek Validasi	Pertanyaan Pemeriksaan	Keluaran
Metode	Apakah metode sesuai dengan tujuan dan skala analisis?	status kesesuaian metode
Peta	Apakah peta konsisten dan sesuai sistem geospasial?	peta valid atau perlu revisi
Sintesis	Apakah penggabungan parameter konsisten dengan pembobotan?	catatan sintesis
Rekomendasi	Apakah rekomendasi dapat diterapkan dalam tata ruang?	status kelayakan
ITBX	Apakah matriks ITBX sesuai zona dan pembatas?	status kelayakan ITBX

Status validasi teknis dapat berupa valid, valid dengan perbaikan, dikembalikan untuk dilengkapi, atau tidak valid. Hasil validasi dituangkan dalam berita acara atau dokumen validasi teknis.

X. PEMANTAUAN DAN PEMUTAKHIRAN

Pemantauan dilakukan terhadap parameter yang mempengaruhi zona kesesuaian lahan dan rekomendasi teknis. Parameter pemantauan dapat meliputi perubahan penggunaan lahan, perubahan zona resapan air, kondisi air permukaan dan air tanah sebagai bahan sintesis geologi lingkungan, penurunan muka tanah, gerakan tanah, banjir, rob, intrusi air asin, perubahan garis pantai, perubahan kualitas lingkungan, serta parameter lain yang ditetapkan dalam petunjuk teknis.

Pemutakhiran hasil Kajian Geologi Lingkungan dilakukan secara berkala atau sewaktu-waktu apabila terdapat perubahan tata ruang, perubahan penggunaan lahan, kejadian bencana, perubahan kondisi geologi lingkungan, pembangunan strategis, perubahan data sumber daya air, perubahan tingkat bahaya geologi, atau temuan teknis baru.

Hasil pemantauan dan pemutakhiran harus digunakan untuk memperbaiki peta kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, dan matriks ITBX. Apabila hasil pemantauan menunjukkan peningkatan risiko atau penurunan fungsi lingkungan, rekomendasi teknis wajib ditinjau kembali.

XI. KETENTUAN PENERAPAN PADA PETUNJUK TEKNIS

Setiap petunjuk teknis kajian geologi lingkungan untuk peruntukan lahan tertentu wajib mengikuti Pedoman Umum ini. Penyesuaian parameter, bobot, skor, kelas kesesuaian, dan matriks ITBX hanya dapat dilakukan sepanjang tidak bertentangan dengan prinsip umum yang diatur dalam Lampiran ini.

Dalam hal terdapat kebutuhan teknis yang belum diatur dalam Pedoman Umum ini, penyusun analisis dapat menggunakan metode ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan dengan syarat metode tersebut dijelaskan secara terbuka, didukung data yang memadai, dan dapat divalidasi secara teknis.

XII. PENUTUP

Pedoman Umum Kajian Geologi Lingkungan ini menjadi dasar metodologis bagi seluruh lampiran petunjuk teknis peruntukan lahan. Konsistensi penerapan pedoman ini diperlukan agar hasil kajian geologi lingkungan dapat digunakan secara efektif dalam penataan ruang, pengelolaan lingkungan hidup, pengendalian pemanfaatan ruang, dan perlindungan keselamatan masyarakat.

Lampiran 2:

Petunjuk Teknis KGL untuk Daerah Resapan Air

Lampiran 2 merupakan perangkat operasional Bab 6. Isinya membantu menerjemahkan konsep air tanah dan zona resapan menjadi peta zona resapan, arahan KDB/BCR, KDH, rekayasa peresapan, pengaturan ITBX, serta pemantauan fungsi resapan.

Tabel L2.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 5, Bab 6, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Penerapan KGL untuk zona resapan, neraca air, KDB/BCR, KDH, ITBX, dan pemantauan fungsi resapan.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L2.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

1.1 Kedudukan Petunjuk Teknis

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Daerah Resapan Air disusun sebagai acuan nasional dalam melakukan inventarisasi, pemetaan, analisis, sintesis, dan penyusunan rekomendasi teknis terhadap daerah yang memiliki fungsi meresapkan air hujan dan air permukaan ke dalam sistem tanah dan batuan. Petunjuk teknis ini menjadi dasar teknis bagi penyusunan RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, pengendalian pemanfaatan ruang, dan program pemulihan neraca air.

Petunjuk teknis ini tidak dimaksudkan untuk mengambil alih rezim pengelolaan sumber daya air atau perizinan air tanah. Data air permukaan, air tanah, mata air, sungai, hujan, limpasan, dan infiltrasi digunakan sebagai bahan sintesis geologi lingkungan untuk menilai kemampuan alami suatu wilayah dalam meresapkan air dan menjaga fungsi tata air wilayah.

Dalam konteks perencanaan ruang, peta zona resapan air menjadi dasar untuk menentukan batas pemanfaatan ruang, intensitas kawasan terbangun, kewajiban ruang terbuka hijau, rekayasa peresapan, dan pengendalian kegiatan yang berpotensi menurunkan fungsi resapan air.

1.2 Maksud

Petunjuk teknis ini dimaksudkan sebagai pedoman bagi Pemerintah Pusat, pemerintah daerah, Badan Geologi, pelaksana kajian, perguruan tinggi, konsultan, pemrakarsa, dan pemangku kepentingan dalam menyusun kajian geologi lingkungan untuk daerah resapan air secara terukur, terstandar, dan dapat diverifikasi.

1.3 Tujuan

- menentukan zona resapan air berdasarkan parameter geologi lingkungan, geomorfologi, tanah, curah hujan, tutupan lahan, pola penyaluran air, dan data sumber daya air yang relevan;
- membedakan zona resapan sangat tinggi, tinggi, sedang, rendah, dan sangat rendah;
- menilai kekritisan zona resapan berdasarkan perbandingan antara potensi resapan alami dan tekanan pemanfaatan ruang;
- menyediakan dasar teknis untuk perhitungan neraca air, KDB/BCR, KDH, dan rekayasa peresapan;
- menyusun rekomendasi teknis pengendalian pemanfaatan ruang pada daerah resapan air;
- menyusun arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX untuk setiap zona resapan air; dan
- menyediakan format laporan, peta, basis data, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup petunjuk teknis ini meliputi pengumpulan data, pemetaan parameter, survei lapangan, penilaian parameter, skoring dan pembobotan, sintesis zona resapan air, analisis neraca air, penilaian kekritisan zona resapan, arahan KDB/BCR dan KDH, rekomendasi teknis, matriks ITBX, pelaporan, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran.

1.5 Istilah Teknis

Tabel L2.3. Istilah Teknis dan Pengertiannya

Istilah	Pengertian
Daerah resapan air	wilayah yang secara geologi, geomorfologi, tanah, dan tata air memiliki kemampuan meresapkan air hujan atau air permukaan ke dalam tanah dan batuan sehingga mendukung fungsi imbuhan air tanah serta mengurangi limpasan permukaan.
Zona resapan sangat tinggi	zona yang memiliki kemampuan alami sangat besar dalam meresapkan air dan secara umum harus dipertahankan sebagai wilayah perlindungan fungsi resapan utama.
Zona resapan tinggi	zona yang memiliki kemampuan tinggi dalam meresapkan air dan sering berperan sebagai wilayah transisi antara daerah imbuhan dan daerah luahan pada kaki gunung atau kaki perbukitan.
Zona resapan sedang	zona yang masih memiliki fungsi resapan, tetapi telah dipengaruhi pembatas alami atau tekanan pemanfaatan lahan sehingga memerlukan pengendalian pemanfaatan ruang.
Zona resapan rendah	zona yang kemampuan resapannya rendah karena kondisi litologi, tanah, morfologi, tutupan lahan, atau sifat permukaan yang cenderung menghasilkan limpasan.
Zona resapan sangat rendah	zona yang secara alami atau akibat perubahan lahan memiliki fungsi peresapan sangat terbatas, sehingga pengelolaan ruang lebih diarahkan pada pengendalian limpasan dan penyediaan prasarana tampungan.
Kekritisan zona resapan	tingkat gangguan atau tekanan terhadap fungsi resapan yang dinilai dari potensi resapan alami, tutupan lahan, luas bidang kedap, limpasan, kualitas tata air, dan perubahan pemanfaatan ruang.
Neraca air	perhitungan keseimbangan antara masukan air, kehilangan melalui evapotranspirasi, limpasan, infiltrasi, dan perubahan simpanan air dalam satuan wilayah tertentu.

Istilah	Pengertian
KDB/BCR	perbandingan antara luas dasar bangunan atau luas bidang terbangun terhadap luas bidang tanah dalam satuan perencanaan.
KDH	persentase minimum ruang terbuka hijau atau ruang berfungsi peresapan pada satuan perencanaan.

II. PRINSIP DAN KERANGKA ANALISIS

I2.1 Prinsip Umum

- berbasis satuan bentang lahan dan satuan geologi lingkungan;
- memisahkan fungsi data air sebagai bahan sintesis geologi lingkungan dari kewenangan pengelolaan sumber daya air;
- mengutamakan perlindungan zona resapan sangat tinggi dan tinggi;
- mengendalikan perubahan tutupan lahan yang meningkatkan bidang kedap dan limpasan;
- mengintegrasikan hasil analisis ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, dan pengendalian pemanfaatan ruang;
- menghubungkan peta zona resapan dengan neraca air, KDB/BCR, KDH, dan kewajiban rekayasa peresapan;
- memperhatikan bahaya geologi yang dapat membatasi atau mensyaratkan penggunaan teknologi peresapan; dan
- menghasilkan peta, tabel rekomendasi, dan matriks ITBX yang dapat digunakan secara operasional oleh pemerintah daerah.

2.2 Kerangka Konseptual

Analisis daerah resapan air dilakukan dengan menilai kemampuan alami wilayah untuk menerima, menahan, meresapkan, dan meneruskan air ke dalam tanah dan batuan. Kemampuan tersebut dikontrol oleh litologi, struktur atau kelurusan, ketebalan dan sifat tanah, bentuk lahan, kemiringan lereng, curah hujan, pola penyaluran air, tutupan lahan, dan hubungan dengan sistem mata air, sungai, serta akuifer setempat.

Wilayah dengan potensi resapan tinggi tidak selalu bebas bahaya. Pada kawasan gunung api, kaki gunung, atau perbukitan, zona resapan tinggi dapat berimpitan dengan bahaya erosi, gerakan tanah, banjir bandang, aliran lahar, atau kawasan konservasi. Oleh karena itu, peta zona resapan harus dibaca bersama peta bahaya geologi, peta tata ruang, dan peta faktor penyisih.

Hasil akhir analisis bukan hanya peta zona resapan, tetapi juga rekomendasi pengendalian pemanfaatan ruang. Zona resapan sangat tinggi dan tinggi harus diprioritaskan sebagai ruang lindung atau budidaya terbatas, sedangkan zona sedang, rendah, dan sangat rendah memerlukan strategi pengendalian limpasan, pemulihan neraca air, dan rekayasa peresapan sesuai karakter geologi lingkungannya.

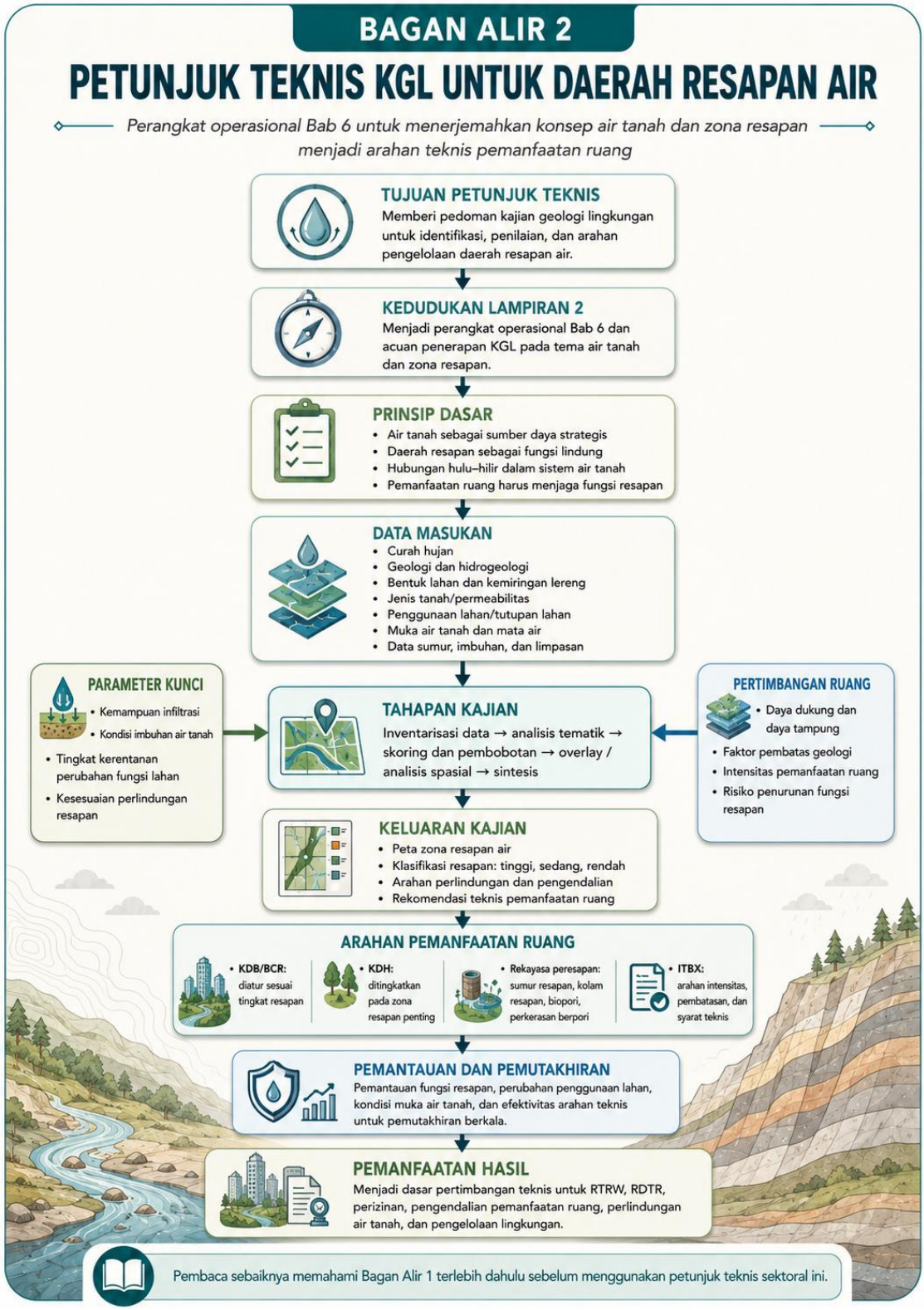
2.3 Hubungan dengan Neraca Air dan Intensitas Pemanfaatan Ruang

Secara sederhana, neraca air wilayah dapat dinyatakan sebagai:

$$P = ET + Q + I + \Delta S$$

dengan P sebagai curah hujan, ET sebagai evapotranspirasi, Q sebagai limpasan, I sebagai infiltrasi atau peresapan, dan ΔS sebagai perubahan simpanan air. Dalam konteks geologi lingkungan, perubahan tutupan lahan yang meningkatkan bidang kedap akan menaikkan Q dan menurunkan I, sehingga fungsi resapan dan keseimbangan air wilayah menurun.

Arahan KDB/BCR dan KDH harus ditetapkan berdasarkan hasil analisis zona resapan dan neraca air. Pada zona resapan sangat tinggi dan tinggi, intensitas kawasan terbangun harus rendah dan disertai kewajiban ruang terbuka, vegetasi, peresapan buatan, serta pengelolaan limpasan di tapak. Pada zona resapan sedang hingga sangat rendah, arahan KDB/BCR dan KDH tetap diperlukan, tetapi penekanan teknisnya dapat bergeser dari perlindungan resapan utama menuju pengendalian limpasan dan kualitas lingkungan.



Gambar L-2 Bagan Alir Petunjuk Teknis KGLuntuk daerah Resapan Air

III. DATA DAN INFORMASI DASAR

3.1 Data Minimum

Tabel L2.4. Kelompok Data dan Rinciannya

Kelompok Data	Rincian
Geologi dan litologi	jenis batuan, tingkat pelapukan, rekahan, kelulusan relatif, sebaran endapan lepas, struktur geologi, dan kelurusan.
Geomorfologi	bentuk lahan, posisi lereng, kaki gunung, dataran aluvial, kipas aluvial, lembah sungai, dataran banjir, dan satuan bentang lahan lain.
Kemiringan lereng	kelas lereng, arah lereng, kerapatan kontur, potensi erosi, dan kemampuan menerima air hujan.
Tanah dan sifat infiltrasi	tekstur tanah, ketebalan tanah, kandungan bahan organik, permeabilitas, laju infiltrasi, dan sifat permukaan.
Curah hujan	rerata tahunan, intensitas hujan, durasi hujan, distribusi musiman, dan data stasiun hujan terdekat.
Pola penyaluran air	jaringan sungai, kerapatan drainase, arah aliran permukaan, sub-DAS, daerah tangkapan, dan lokasi genangan.
Hidrogeologi sebagai bahan sintesis	cekungan air tanah, akuifer, muka air tanah, mata air, sumur, potensi air tanah, daerah imbuhan, dan daerah luahan.
Tutupan dan penggunaan lahan	vegetasi, hutan, pertanian, permukiman, industri, jalan, lahan terbangun, dan bidang kedap.
Bahaya geologi	gerakan tanah, erosi, banjir, lahar, sesar aktif, penurunan muka tanah, dan bahaya lain yang relevan.
Tata ruang dan lingkungan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, kawasan budidaya, sempadan, dan rencana pembangunan.

3.2 Data Lapangan

- deskripsi satuan batuan dan tanah serta tingkat pelapukan;
- pengukuran kemiringan lereng dan pemeriksaan kondisi permukaan;
- inventarisasi mata air, sumur, badan air, dan daerah genangan;
- pengamatan hubungan antara lereng, aliran permukaan, vegetasi, dan pemanfaatan lahan;
- uji infiltrasi atau uji permeabilitas sederhana pada lokasi perwakilan;
- pengamatan indikasi erosi, gerakan tanah, banjir, dan sedimentasi;
- dokumentasi foto berkoordinat dan titik kontrol lapangan;
- wawancara teknis terbatas mengenai riwayat mata air, genangan, banjir, dan perubahan penggunaan lahan.

3.3 Skala Peta

Tabel L2.5. Tingkat kajian, Skala Peta, dan Kegunaannya

Tingkat Kajian	Skala Peta	Kegunaan
Kabupaten/kota	1:50.000 sampai 1:25.000	RTRW, arahan umum daerah resapan, dan prioritas perlindungan.
Kawasan strategis/kecamatan	1:25.000 sampai 1:10.000	RDTR, kawasan prioritas, dan rencana pengendalian.
Subkawasan/tapak	1:10.000 sampai 1:5.000 atau lebih rinci	peraturan zonasi, KDB/BCR, KDH, desain peresapan, dan validasi tapak.

IV. TAHAPAN ANALISIS

4.1 Tahap Persiapan

- menetapkan tujuan analisis dan keluaran yang diperlukan;
- menetapkan batas wilayah kajian berdasarkan batas administrasi, DAS/sub-DAS, satuan geologi, satuan bentang lahan, atau kombinasi yang paling relevan;
- menetapkan skala peta dan satuan analisis;
- menyiapkan daftar data, format basis data, dan rencana survei lapangan; dan
- menentukan kebutuhan koordinasi dengan instansi tata ruang, lingkungan hidup, pekerjaan umum, sumber daya air, dan pemerintah daerah.

4.2 Kompilasi dan Evaluasi Data

Data sekunder dikompilasi dalam basis data geospasial. Setiap data harus dilengkapi sumber, tahun, skala, metode perolehan, dan tingkat ketelitian. Data yang berbeda skala atau tahun harus dievaluasi sebelum digunakan dalam analisis tumpang susun.

4.3 Pemetaan Parameter Tematik

Peta parameter tematik paling sedikit meliputi peta litologi dan bahan permukaan, peta geomorfologi, peta kemiringan lereng, peta curah hujan, peta tanah atau laju infiltrasi, peta pola penyaluran air, peta kelurusan, peta tutupan lahan, peta mata air dan badan air, peta bahaya geologi, dan peta tata ruang.

4.4 Survei dan Validasi Lapangan

Survei lapangan dilakukan untuk memeriksa kesesuaian data sekunder dengan kondisi nyata, memperbaiki batas satuan, mengukur parameter kunci, dan memastikan bahwa peta zona resapan yang dihasilkan tidak hanya benar secara spasial, tetapi juga logis secara geologi lingkungan.

4.5 Skoring dan Pembobotan

Skoring dan pembobotan dilakukan terhadap parameter yang mempengaruhi kemampuan resapan. Nilai skor menunjukkan tingkat dukungan parameter terhadap resapan, sedangkan bobot menunjukkan tingkat kepentingan relatif parameter tersebut. Bobot dapat disesuaikan berdasarkan karakter wilayah, ketersediaan data, dan hasil validasi teknis, tetapi harus dijelaskan dalam laporan.

Tabel L2.6. Parameter, Bobot Indikatif, dan Dasar Pertimbangan

Parameter	Bobot Indikatif (%)	Dasar Pertimbangan
Litologi dan kelulusan relatif batuan/tanah	25	Kemampuan batuan/tanah menerima dan meneruskan air.
Kemiringan lereng dan posisi bentuk lahan	15	Kemampuan menahan air hujan dan peluang terjadinya limpasan.
Sifat tanah dan laju infiltrasi	15	Tekstur, ketebalan tanah, permeabilitas, dan kemampuan peresapan.
Curah hujan	15	Besarnya masukan air yang berpotensi menjadi resapan atau limpasan.
Tutupan lahan dan vegetasi	10	Kemampuan vegetasi dan permukaan lahan mengurangi limpasan dan meningkatkan peresapan.
Pola penyaluran air dan kerapatan drainase	10	Hubungan antara peresapan, aliran permukaan, dan pelepasan air.
Kelurusan, rekahan, dan struktur geologi	5	Jalur preferensial aliran air bawah permukaan apabila secara geologi relevan.
Mata air dan indikator hidrogeologi	5	Indikasi fungsi imbuhan/luahan dan konektivitas sistem air tanah.

4.6 Perhitungan Indeks Potensi Resapan

Indeks Potensi Resapan dihitung dengan menjumlahkan hasil perkalian skor dan bobot seluruh parameter yang digunakan. Rumus umum yang dapat digunakan adalah:

$$IPR = \Sigma (Wi \times Si) / \Sigma (Wi \times Smax) \times 100$$

dengan IPR sebagai Indeks Potensi Resapan, Wi sebagai bobot parameter ke-i, Si sebagai skor parameter ke-i, dan Smax sebagai skor maksimum. Nilai IPR kemudian diklasifikasikan menjadi zona resapan sangat tinggi, tinggi, sedang, rendah, dan sangat rendah. Batas kelas dapat disesuaikan secara kuantil, interval alami, atau ambang teknis berdasarkan validasi lapangan.

Tabel L2.7. Nilai IPR Indikatif

Nilai IPR Indikatif	Kelas Zona Resapan	Arahan Umum
≥ 80	Sangat tinggi	Perlindungan resapan utama; intensitas terbangun sangat rendah; wajib pengendalian ketat.
65 - <80	Tinggi	Perlindungan resapan dan pemanfaatan terbatas; wajib KDB/BCR rendah dan KDH tinggi.
45 - <65	Sedang	Pemanfaatan bersyarat; wajib rekayasa peresapan dan pengendalian limpasan.
25 - <45	Rendah	Fungsi peresapan terbatas; fokus pada pengendalian limpasan dan kualitas lingkungan.
<25	Sangat rendah	Bukan prioritas resapan alami; perlu tampungan, drainase, dan pengelolaan air permukaan.

4.7 Sintesis dengan Faktor Penyisih dan Bahaya Geologi

Peta potensi resapan harus disintesis dengan peta faktor penyisih dan peta bahaya geologi. Zona yang memiliki potensi resapan tinggi tetapi berada pada kawasan rawan gerakan tanah, jalur lahar, sempadan sungai, kawasan lindung, atau kawasan dengan pembatas tata ruang harus diberi arahan pemanfaatan yang lebih ketat. Dengan demikian, zona resapan tinggi tidak otomatis menjadi zona yang dapat dibangun, melainkan harus dipertahankan atau dimanfaatkan terbatas sesuai fungsi perlindungannya.

V. ZONA RESAPAN AIR

5.1 Klasifikasi Zona

Tabel L2.8. Klasifikasi Zona Resapan dan Arah Pemanfaatan

Zona	Ciri Umum	Arahan Pemanfaatan
Zona Resapan Sangat Tinggi	Batuan/tanah berkelulusan tinggi, lereng/bentuk lahan mendukung, tutupan vegetasi baik, curah hujan cukup, dan fungsi imbuhan dominan.	Kawasan lindung, hutan, RTH ekologis, pertanian konservasi, pendidikan, penelitian, dan kegiatan sangat terbatas.
Zona Resapan Tinggi	Kemampuan resapan tinggi, umumnya pada lereng atas, kaki gunung, kipas aluvial, atau zona transisi imbuhan-luahan.	Pemanfaatan terbatas dengan KDB/BCR rendah, KDH tinggi, rekayasa peresapan, dan pengendalian limpasan.
Zona Resapan Sedang	Kemampuan resapan masih penting, tetapi sebagian dibatasi tanah, lereng, penggunaan lahan, atau perubahan permukaan.	Pemanfaatan bersyarat dengan kewajiban RTH, sumur resapan, parit resapan, kolam resapan, dan drainase berwawasan lingkungan.
Zona Resapan Rendah	Kemampuan resapan rendah; limpasan relatif lebih dominan.	Pemanfaatan dapat lebih fleksibel sesuai tata ruang, tetapi wajib pengendalian limpasan, tampungan, dan kualitas air.

Zona	Ciri Umum	Arahan Pemanfaatan
Zona Resapan Sangat Rendah	Fungsi resapan alami sangat terbatas atau permukaan sangat kedap.	Fokus pada pengelolaan air permukaan, tampungan, drainase, dan pencegahan genangan/pencemaran.

5.2 Zona Resapan Sangat Tinggi

Zona resapan sangat tinggi merupakan wilayah yang harus diprioritaskan sebagai daerah perlindungan fungsi resapan. Pemanfaatan ruang pada zona ini harus dibatasi secara ketat. Kegiatan yang meningkatkan bidang kedap, mengubah morfologi secara luas, mengurangi vegetasi, atau memutus konektivitas aliran air bawah permukaan harus tidak direkomendasikan, kecuali untuk kepentingan publik yang sangat terbatas dan telah dinyatakan layak melalui validasi teknis.

5.3 Zona Resapan Tinggi

Zona resapan tinggi merupakan wilayah yang masih memiliki fungsi resapan penting dan dapat berperan sebagai zona transisi antara daerah imbuhan dan daerah luahan, terutama di kaki gunung atau kaki perbukitan. Pemanfaatan ruang dapat dilakukan secara terbatas dan bersyarat, dengan kewajiban mempertahankan vegetasi, membatasi KDB/BCR, menyediakan KDH tinggi, serta menerapkan rekayasa peresapan dan pengendalian limpasan.

5.4 Zona Resapan Sedang

Zona resapan sedang merupakan wilayah yang masih berfungsi meresapkan air, tetapi lebih mudah mengalami penurunan fungsi akibat perubahan lahan. Pada zona ini, pemanfaatan ruang harus disertai pengendalian bidang kedap, peningkatan RTH, sistem drainase berwawasan lingkungan, dan peresapan buatan sesuai kelayakan geologi lingkungan.

5.5 Zona Resapan Rendah dan Sangat Rendah

Zona resapan rendah dan sangat rendah tidak dapat dijadikan dasar untuk mengabaikan pengelolaan air. Meskipun fungsi resapan alami terbatas, kawasan ini tetap memerlukan pengendalian limpasan, tampungan, drainase, perlindungan kualitas air, dan pencegahan genangan. Pada wilayah perkotaan, zona ini dapat menjadi prioritas untuk prasarana pengendalian air permukaan, sepanjang tidak bertentangan dengan tata ruang dan tidak meningkatkan risiko lingkungan.

VI. NERACA AIR, KDB/BCR, KDH, DAN KEKRITISAN ZONA RESAPAN

6.1 Analisis Neraca Air

Analisis neraca air dilakukan untuk menilai perubahan komponen air akibat perubahan tutupan lahan. Perhitungan dapat menggunakan metode sederhana berbasis curah hujan, evapotranspirasi, limpasan, dan infiltrasi, atau metode hidrologi yang lebih rinci apabila data tersedia. Hasil neraca air digunakan untuk menetapkan kebutuhan pemulihan fungsi resapan pada satuan perencanaan.

Pada kawasan yang akan dikembangkan, analisis neraca air sekurang-kurangnya membandingkan kondisi sebelum dan sesudah perubahan pemanfaatan lahan. Selisih antara infiltrasi alami dan infiltrasi pascapembangunan menjadi dasar untuk menentukan kebutuhan rekayasa peresapan, ruang terbuka, kolam resapan, parit resapan, sumur resapan, atau teknologi lain yang sesuai.

6.2 Arahan KDB/BCR dan KDH

Arahan KDB/BCR dan KDH harus ditetapkan berdasarkan zona resapan, neraca air, bahaya geologi, dan ketentuan tata ruang. Angka dalam tabel berikut bersifat indikatif dan harus dikalibrasi melalui kajian rinci serta ketentuan RDTR setempat.

Tabel L2.9. Klasifikasi Arahan KDB/BCR dan KDH

Zona Resapan	KDB/BCR Indikatif (%)	KDH Indikatif (%)	Catatan
Sangat tinggi	0 - 10/15	≥ 70 - 80	Hanya kegiatan sangat terbatas; perlindungan fungsi resapan utama.
Tinggi	10/15 - 25	≥ 60 - 70	Pemanfaatan terbatas; wajib rekayasa peresapan dan pengendalian limpasan.
Sedang	25 - 40	≥ 40 - 60	Pemanfaatan bersyarat; wajib pemulihan neraca air di tapak.
Rendah	40 - 60	≥ 20 - 40	Pengendalian limpasan, tampungan, dan kualitas air.
Sangat rendah	sesuai RDTR dengan pengendalian teknis	sesuai RDTR	Fokus pada drainase, tampungan, dan pengurangan genangan.

6.3 Kekritisan Zona Resapan

Kekritisan zona resapan dinilai dengan membandingkan potensi resapan alami dengan tekanan pemanfaatan ruang. Zona resapan sangat tinggi yang telah berubah menjadi kawasan terbangun padat dapat diklasifikasikan sebagai sangat kritis, sedangkan zona resapan tinggi dengan perubahan lahan sedang dapat diklasifikasikan sebagai kritis atau mulai kritis tergantung luas bidang kedap, ketersediaan RTH, dan kinerja rekayasa peresapan.

Tabel L2.10. Klasifikasi Kekritisan Zona Resapan

Kelas Kekritisan	Kriteria Umum	Tindak Lanjut
Tidak kritis	Potensi resapan sesuai dengan tutupan lahan; fungsi resapan masih terjaga.	Pertahankan fungsi dan lakukan pemantauan.
Mulai kritis	Terdapat perubahan tutupan lahan, tetapi fungsi resapan masih dapat dipulihkan.	Kendalikan KDB/BCR; tingkatkan KDH; wajibkan rekayasa peresapan.
Kritis	Penurunan fungsi resapan nyata; limpasan meningkat; neraca air terganggu.	Batasi kegiatan baru; lakukan pemulihan neraca air dan rehabilitasi vegetasi.
Sangat kritis	Zona resapan penting telah berubah dominan menjadi bidang kedap atau mengalami gangguan berat.	Moratorium kegiatan tertentu; rehabilitasi; evaluasi tata ruang; pemulihan prioritas.

VII. REKOMENDASI TEKNIS DAN PENGATURAN ZONASI

7.1 Rekomendasi Teknis

Rekomendasi teknis disusun untuk setiap zona resapan dan harus memuat arahan pengendalian pemanfaatan ruang, batas intensitas terbangun, kewajiban RTH, kebutuhan rekayasa peresapan, perlindungan mata air, perlindungan sempadan sungai, pengendalian bahaya geologi, dan kebutuhan pemantauan.

7.2 Arahan Rekayasa Peresapan dan Pemulihan Neraca Air

Tabel L2.11. Klasifikasi Zona Resapan dan Arahan Rekayasa

Zona	Arahan Rekayasa/Manajemen
Zona resapan sangat tinggi	konservasi vegetatif, perlindungan mata air, pembatasan ketat bangunan, jalur hijau ekologis, pemantauan perubahan lahan.
Zona resapan tinggi	sumur resapan dangkal, parit resapan, kolam resapan, rorak, vegetasi konservasi, pembatasan bidang kedap, pemulihan neraca air.

Zona	Arahan Rekayasa/Manajemen
Zona resapan sedang	sumur resapan, biopori, rain garden, drainase berwawasan lingkungan, peningkatan RTH, tampungan air hujan.
Zona resapan rendah	kolam tampungan, situ buatan, drainase terkendali, pemanenan air hujan, pengendalian kualitas limpasan.
Zona resapan sangat rendah	tampungan air permukaan, prasarana drainase, pengendalian genangan, pemanfaatan air hujan, perlindungan kualitas air.

7.3 Matriks ITBX Indikatif

Matriks berikut merupakan contoh awal. Pemerintah daerah dapat menyesuaikan jenis kegiatan sesuai nomenklatur RDTR dan karakter wilayah, sepanjang tidak menurunkan fungsi perlindungan zona resapan.

Tabel L2.12. Matriks ITBX Indikatif Daerah Resapan Air

Jenis Kegiatan/Pemanfaatan	Sangat Tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah	Sangat Rendah	Catatan Syarat
Hutan, RTH ekologis, ruang konservasi vegetatif	I	I	I	I	I	Dipertahankan dan dipulihkan bila menurun.
Pertanian konservasi/perkebunan rendah input	B	B	I	I	T	Harus menjaga tutupan tanah, mengendalikan erosi, dan tidak mencemari air.
Pendidikan, penelitian, dan pemantauan lingkungan	I	I	I	I	I	Tidak mengubah fungsi resapan.
Geowisata/ekowisata terbatas	B	B	B	T	T	Dibatasi daya dukung dan prasarana tidak kedap berlebihan.
Hunian kepadatan sangat rendah	B	B	T	I	I	Wajib KDB/BCR rendah, KDH tinggi, dan rekayasa peresapan.
Hunian kepadatan sedang/tinggi	X	B	B	T	I	Tidak dianjurkan pada zona sangat tinggi; harus mengikuti RDTR dan neraca air.
Perdagangan, jasa, dan perkantoran	X	B	B	T	I	Wajib pengendalian bidang kedap dan drainase berwawasan lingkungan.
Kawasan industri, pergudangan, dan logistik	X	X	B	B	T	Dilarang pada zona resapan utama; wajib pengendalian limpasan dan pencemaran.
Pertambangan, galian bahan bangunan, dan perubahan morfologi luas	X	X	B	B	T	Harus menghindari zona penting resapan dan kawasan bernilai lindung.
Jalan, parkir, dan prasarana permukaan kedap luas	X	B	B	B	T	Wajib permukaan permeabel, saluran resapan, dan kompensasi neraca air.
Sumur resapan, parit resapan, kolam resapan, dan rain garden	I	I	I	B	T	Harus sesuai kondisi geologi teknik, muka air tanah, dan kualitas air.
Situ, embung, tampungan air hujan, dan pemanenan air	B	I	I	I	I	Desain disesuaikan dengan lereng, tanah, bahaya geologi, dan tata air.

Jenis Kegiatan/Pemanfaatan	Sangat Tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah	Sangat Rendah	Catatan Syarat
TPA, limbah B3, dan kegiatan berisiko pencemaran tinggi	X	X	X	B	B	Hanya dapat dipertimbangkan jika kajian rinci menyatakan aman.

Keterangan: I = diizinkan; T = terbatas; B = bersyarat; X = tidak diperbolehkan.

VIII. KELUARAN ANALISIS

8.1 Peta Wajib

- peta lokasi dan batas wilayah kajian;
- peta geologi dan bahan permukaan;
- peta geomorfologi dan kemiringan lereng;
- peta tanah atau laju infiltrasi;
- peta curah hujan;
- peta pola penyaluran air dan sub-DAS;
- peta kelurusan atau struktur geologi apabila relevan;
- peta tutupan dan penggunaan lahan;
- peta hidrogeologi, mata air, dan data sumber daya air yang relevan sebagai bahan sintesis;
- peta bahaya geologi dan faktor penyisih;
- peta zona resapan air;
- peta kekritisan zona resapan;
- peta arahan KDB/BCR dan KDH; dan
- peta rekomendasi pengaturan zonasi dan ITBX.

8.2 Laporan Teknis

Laporan teknis paling sedikit memuat ringkasan eksekutif, pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, metode, data dan sumber data, kondisi geologi lingkungan, analisis parameter, hasil skoring dan pembobotan, peta zona resapan, neraca air, kekritisan zona resapan, arahan KDB/BCR dan KDH, rekomendasi teknis, matriks ITBX, rencana pemantauan, kesimpulan, dan lampiran data.

8.3 Basis Data Digital

Keluaran digital wajib disusun dalam sistem informasi geografis yang memuat layer spasial, tabel atribut, metadata, sumber data, tahun data, skala, metode, dan riwayat pemutakhiran. Seluruh layer harus dapat ditelusuri ke sumber data dan hasil survei lapangan.

IX. VALIDASI TEKNIS, PEMANTAUAN, & PEMUTAKHIRAN

9.1 Validasi Teknis

Hasil analisis yang digunakan untuk RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, atau keputusan pemanfaatan ruang wajib melalui validasi teknis oleh Badan Geologi. Validasi teknis meliputi kecukupan data, kesesuaian skala, ketepatan metode, konsistensi peta, kelayakan skoring dan pembobotan, kesesuaian rekomendasi, dan kelayakan matriks ITBX.

9.2 Pemantauan

Pemantauan dilakukan untuk memastikan bahwa fungsi resapan tetap terjaga dan rekomendasi teknis dilaksanakan. Parameter pemantauan meliputi perubahan tutupan lahan, perubahan bidang kedap, perubahan kondisi mata air, genangan, banjir, erosi, gerakan tanah, penurunan muka tanah bila relevan, dan efektivitas rekayasa peresapan.

9.3 Pemutakhiran

Peta zona resapan dan rekomendasi teknis wajib dimutakhirkan paling sedikit setiap 5 (lima) tahun atau lebih cepat apabila terjadi perubahan penggunaan lahan yang signifikan, revisi tata ruang, kejadian bencana, pembangunan strategis, perubahan data sumber daya air, atau temuan teknis baru.

X. PENUTUP

Petunjuk teknis ini menjadi acuan substantif nasional dalam melakukan Kajian Geologi Lingkungan untuk Daerah Resapan Air. Penerapan petunjuk teknis ini diharapkan menghasilkan peta zona resapan air dan rekomendasi pengendalian pemanfaatan ruang yang objektif, terukur, dapat diverifikasi, dan dapat langsung diterjemahkan ke dalam RTRW, RDTR,

peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, serta matriks ITBX.

Karena data, metode, teknologi pemetaan, dan kebutuhan pengendalian ruang terus berkembang, petunjuk teknis ini perlu ditinjau kembali secara berkala. Pemutakhiran dilakukan dengan tetap menjaga kesinambungan substansi, keseragaman metode, dan keselarasan dengan peraturan perundang-undangan.

LAMPIRAN FORMAT RINGKAS

Tabel L2.13. Contoh struktur tabel hasil zona resapan air per administrasi

Kecamatan/Desa	Sangat Tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah	Sangat Rendah	Keterangan Prioritas
...	... ha	... ha	... ha	... ha	... ha	...

Tabel L2.14. Contoh struktur tabel rekomendasi KDB/BCR dan KDH

Zona Resapan	KDB/BCR Maksimum	KDH Minimum	Kewajiban Teknis	Status ITBX Dominan
Sangat tinggi	... %	... %	...	...
Tinggi	... %	... %	...	...
Sedang	... %	... %	...	...

Tabel L2.15. Contoh daftar layer digital

Nama Layer	Format	Skala	Sumber	Tahun	Keterangan
zona_resapan_air	shp/gpkg	...	...	...	kelas: ST, T, S, R, SR
kekritisan_resapan	shp/gpkg	...	...	...	kelas: tidak kritis, mulai kritis, kritis, sangat kritis
rekomendasi_itbx	shp/gpkg	...	...	...	kode I/T/B/X

Lampiran 3:

Petunjuk Teknik KGL untuk Kawasan Permukiman Permukiman Perkotaan

Lampiran 3 menerapkan Bab5, Bab 7, dan Bab 11 pada konteks permukiman perkotaan. Fokus utamanya Adalah kesesuaian lahan, intensitas pemanfaatan, prasarana dasar, POTENSI bahaya geologi, fungsi resapan dan pengendalian ruang pada Kawasan terbangun

Tabel L3.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 4, Bab 5, Bab 7, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Penilaian kesesuaian lahan permukiman kota, intensitas ruang, prasarana dasar, mitigasi, dan pengendalian.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L3.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

A. Kedudukan Petunjuk Teknis

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Permukiman Perkotaan merupakan bagian tidak terpisahkan dari Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan. Petunjuk teknis ini digunakan sebagai acuan operasional untuk menilai kesesuaian lahan, daya dukung geologi, faktor pembatas geologi, bahaya geologi, kebutuhan mitigasi, dan arahan pengendalian pemanfaatan ruang pada kawasan permukiman perkotaan.

Petunjuk teknis ini berlaku untuk kawasan permukiman perkotaan yang berada di wilayah daratan, wilayah pesisir, wilayah dataran banjir, kawasan perkotaan baru, kawasan perkotaan yang telah berkembang, serta subkawasan perkotaan yang mengalami tekanan pemanfaatan ruang tinggi. Untuk kawasan perkotaan pesisir, prinsip dalam petunjuk teknis ini perlu dilengkapi dengan parameter pesisir, rob, perubahan garis pantai, intrusi air asin, penurunan muka tanah, serta sistem drainase dan perlindungan pesisir.

Kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman perkotaan tidak dimaksudkan untuk menggantikan RTRW, RDTR, KLHS, AMDAL, persetujuan lingkungan, atau perizinan sektoral. Analisis ini menjadi dasar teknis untuk memastikan bahwa peruntukan ruang, intensitas pemanfaatan, prasarana dasar, dan pengaturan zonasi disusun sesuai karakter lingkungan geologi, daya dukung, dan tingkat risiko yang dapat diterima.

B. Maksud dan Tujuan

Petunjuk teknis ini dimaksudkan untuk menyeragamkan tata cara kajian geologi lingkungan bagi kawasan permukiman perkotaan agar hasilnya dapat digunakan secara konsisten dalam perencanaan ruang, peraturan zonasi, penyusunan rekomendasi teknis, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

menentukan zona kesesuaian lahan untuk kawasan permukiman perkotaan berdasarkan daya dukung geologi dan faktor pembatas geologi;

mengidentifikasi kawasan yang dapat dikembangkan, kawasan yang dapat dikembangkan dengan syarat, kawasan terbatas, dan kawasan yang tidak direkomendasikan untuk fungsi permukiman perkotaan;

menetapkan arahan teknis untuk KDB/BCR, KDH, KLB, kepadatan, sistem drainase, sanitasi, air baku, prasarana dasar, mitigasi bahaya, dan pemantauan;

menerjemahkan hasil kajian geologi lingkungan ke dalam arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX;

menyediakan dasar teknis bagi pemerintah daerah, pemrakarsa, dan pemangku kepentingan dalam mengendalikan pemanfaatan ruang kawasan permukiman perkotaan.

C. Ruang Lingkup

Ruang lingkup petunjuk teknis ini meliputi kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman perkotaan beserta fungsi pendukungnya, termasuk hunian, prasarana dasar, fasilitas sosial, fasilitas umum, perdagangan dan jasa skala lingkungan, ruang terbuka, jaringan jalan lingkungan, drainase, sanitasi, penyediaan air baku, dan utilitas perkotaan.

analisis data geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, sumber daya air, bahaya geologi, penggunaan lahan, dan tata ruang;

- penetapan satuan analisis kawasan, subkawasan, dan tapak prasarana permukiman perkotaan;
- penilaian daya dukung geologi, faktor pembatas geologi, faktor penyisih, dan tingkat keterpaparan penduduk serta prasarana;
- penentuan zona kesesuaian lahan dan rekomendasi teknis;
- penyusunan arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX;
- penyusunan laporan, peta, basis data digital, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran.

Tabel L3.3. Istilah dan Pengertian Operasional

Istilah	Pengertian operasional
Kawasan permukiman perkotaan	bagian kawasan perkotaan yang digunakan atau direncanakan untuk hunian, prasarana dasar, fasilitas umum, fasilitas sosial, kegiatan ekonomi skala lingkungan, ruang terbuka, dan utilitas perkotaan.
Subkawasan permukiman	bagian kawasan permukiman perkotaan yang dinilai sebagai satuan evaluasi berdasarkan kesamaan kondisi geologi, bentuk lahan, tata air, bahaya geologi, dan pola pemanfaatan ruang.
Tapak prasarana permukiman	bagian tertentu dalam subkawasan permukiman yang digunakan atau direncanakan untuk prasarana air minum, drainase, sanitasi, persampahan, jalan lingkungan, fasilitas kesehatan, fasilitas pendidikan, ruang terbuka, dan prasarana evakuasi.
Daya dukung geologi permukiman	kemampuan lingkungan geologi untuk mendukung hunian, prasarana dasar, dan aktivitas perkotaan tanpa menimbulkan risiko yang tidak dapat diterima.
Pembatas geologi permukiman	kondisi geologi, geologi teknik, hidrogeologi, bahaya geologi, dan kondisi tata air yang membatasi atau mensyaratkan pengembangan permukiman.

II. PRINSIP DAN KERANGKA ANALISIS

A. Prinsip Analisis

Kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman perkotaan dilaksanakan dengan prinsip kehati-hatian, keterpaduan, berbasis data, bertahap, dapat diverifikasi, dan operasional. Prinsip operasional berarti hasil analisis harus dapat diterjemahkan menjadi peta kesesuaian lahan, syarat teknis, pembatas pemanfaatan ruang, arahan KDB/BCR, KDH, KLB, ketentuan mitigasi, dan matriks ITBX.

- keselamatan penduduk dan keberlanjutan fungsi kawasan permukiman menjadi pertimbangan utama;
- analisis harus membaca hubungan geologi, air, tanah, batuan, bentuk lahan, prasarana, dan kegiatan manusia sebagai satu sistem;
- pengembangan kawasan permukiman tidak boleh menghilangkan fungsi kawasan lindung, fungsi resapan air, koridor drainase utama, sempadan, dan ruang aman;
- pada kawasan pesisir dan dataran rendah, penurunan muka tanah, rob, banjir, intrusi air asin, dan kapasitas drainase harus dinilai secara terpadu;
- pada kawasan lereng dan perbukitan, kestabilan lereng, erosi, gerakan tanah, akses evakuasi, dan ketersediaan air baku harus menjadi dasar pembatasan intensitas.

B. Satuan Analisis

Satuan analisis dapat berupa kawasan, subkawasan, blok perencanaan, satuan bentuk lahan, satuan geologi teknik, satuan hidrogeologi, atau tapak prasarana. Pemilihan satuan analisis harus disesuaikan dengan tujuan kajian dan skala peta yang digunakan.

Tabel L3.4. Peringkat Analisis dalam KGL Permukiman Perkotaan

Tingkat analisis	Penggunaan utama	Keluaran teknis
Kawasan perkotaan	penapisan awal dan arahan makro pengembangan permukiman	peta arahan umum, kawasan prioritas, dan kawasan pembatas utama
Subkawasan permukiman	penilaian kesesuaian lahan dan pengaturan fungsi ruang	kelas kesesuaian, syarat teknis, dan arahan intensitas
Blok atau zona RDTR	integrasi ke peraturan zonasi dan matriks ITBX	ketentuan I, T, B, X dan arahan KDB/BCR, KDH, KLB
Tapak prasarana	verifikasi teknis untuk fasilitas umum, jalan, drainase, sanitasi, rumah susun, dan ruang evakuasi	parameter desain, mitigasi, dan rencana pemantauan

C. Hubungan dengan Tata Ruang dan ITBX

Hasil kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman perkotaan wajib digunakan sebagai masukan teknis dalam penyusunan atau peninjauan isiko RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Peta kesesuaian lahan harus diterjemahkan ke dalam arahan kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan.

Hubungan antara zona kesesuaian lahan dan ITBX harus mempertimbangkan daya dukung geologi, isiko pembatas geologi, fungsi lindung, isiko bahaya, ketersediaan air baku, kemampuan drainase, sanitasi, akses evakuasi, serta kemampuan pemantauan dan pengendalian oleh pemerintah daerah atau pengelola kawasan.

III. DATA DAN INFORMASI DASAR

Kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman perkotaan wajib menggunakan data dasar yang memadai, mutakhir, dapat ditelusuri sumbernya, dan sesuai dengan skala perencanaan. Data sekunder digunakan untuk penapisan awal, sedangkan data primer digunakan untuk verifikasi, studi rinci, dan penetapan rekomendasi teknis.

Tabel L3.5. Data dan Analisis dalam KGL Permukiman Perkotaan

Kelompok data	Data minimum	Kegunaan teknis
Geologi	satuan batuan, struktur geologi, sejarah geologi, bahan permukaan	menilai sifat dasar lahan, potensi daya dukung, dan pembatas geologi
Geomorfologi	bentuk lahan, elevasi, kemiringan lereng, posisi terhadap sungai, isiko, dataran banjir, dan kaki lereng	menilai potensi genangan, kestabilan, drainase alami, dan fungsi resapan
Geologi teknik	daya dukung tanah dan batuan, kompresibilitas, potensi konsolidasi, stabilitas lereng, nilai sondir/CPT, SPT, data laboratorium	menentukan kelayakan tapak, tipe fondasi, kebutuhan perbaikan tanah, dan batas intensitas bangunan
Hidrogeologi dan sumber daya air	akuifer, muka air tanah, mata air, zona resapan, kualitas air, air permukaan, jaringan air minum, daerah imbuhan dan lepasan	menilai ketersediaan air baku, perlindungan fungsi resapan, dan dampak pemanfaatan ruang terhadap tata air
Bahaya geologi	gempa bumi, tsunami, likuefaksi, gerakan tanah, banjir, rob, penurunan muka tanah, abrasi, intrusi air asin, gunung api sesuai lokasi	menentukan isiko isiko dan kebutuhan mitigasi
Tata ruang dan lingkungan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, kawasan lindung, sempadan, kawasan rawan bencana	menyelaraskan hasil analisis dengan kebijakan ruang dan isikoy lingkungan
Prasarana dan isiko-spasial	kepadatan penduduk, jaringan jalan, drainase, sanitasi, persampahan, fasilitas umum, fasilitas isiko, jalur evakuasi	menilai keterpaparan, kebutuhan pelayanan, dan kemampuan pengendalian

IV. TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

A. Tahap Persiapan dan Kompilasi Data

- Tahap persiapan dilakukan untuk menetapkan tujuan kajian, batas wilayah, isiko kedalaman analisis, kebutuhan data, dan satuan analisis. Kompilasi data dilakukan untuk isiko model awal mengenai hubungan antara geologi, bentuk lahan, tata air, bahaya geologi, prasarana dasar, dan pola pemanfaatan ruang.
- Mengumpulkan dan mengevaluasi data peta, laporan teknis, citra penginderaan jauh, data kebencanaan, data sumber daya air, dan data tata ruang;
- Risiko berbasis data geospasial awal;
- mengidentifikasi isiko pembatas utama dan isiko penyisih;
- menentukan subkawasan prioritas untuk survei lapangan dan studi rinci.

B. Tahap Penyelidikan Lapangan

Penyelidikan lapangan dilakukan untuk memverifikasi data sekunder dan memperoleh data primer. Kegiatan lapangan disesuaikan dengan skala kajian, kondisi wilayah, dan risiko. Pada kawasan yang telah terbangun, pengamatan kondisi prasarana, pola genangan, retakan bangunan, kerusakan jalan, kualitas sanitasi, dan kapasitas drainase menjadi bagian penting dari penyelidikan.

- Pemetaan geologi dan bentuk lahan rinci;
- pengamatan tanah dan batuan permukaan serta indikasi ketidakstabilan lahan;
- pengukuran elevasi dan pola aliran permukaan;
- inventarisasi mata air, muka air tanah dangkal, sumber air baku, dan kualitas air yang relevan;
- pengujian geoteknik lapangan dan/atau laboratorium sesuai kebutuhan;
- inventarisasi kejadian banjir, rob, gerakan tanah, likuefaksi, penurunan muka tanah, intrusi air asin, atau bahaya lain;

- verifikasi kawasan lindung, sempadan, ruang terbuka, dan fungsi resapan air.

C. Tahap Analisis Parameter

Analisis parameter dilakukan terhadap faktor pendukung, faktor pembatas, dan faktor penyisih. Faktor pendukung dan faktor pembatas diberi skor dan bobot sesuai peran relatifnya. Faktor penyisih digunakan sebagai dasar eliminasi atau pembatasan sebelum klasifikasi akhir ditetapkan.

Parameter yang dapat diukur secara kuantitatif dinilai menggunakan data numerik, seperti kemiringan lereng, elevasi, jarak terhadap sumber bahaya, kedalaman genangan, laju penurunan muka tanah, kedalaman muka air tanah, nilai geoteknik, dan kualitas air. Parameter yang memerlukan penilaian ahli dinilai melalui interpretasi teknis berbasis data lapangan dan peta tematik.

D. Tahap Sintesis dan Penentuan Zona Kesesuaian

Sintesis dilakukan melalui tumpang susun peta tematik, skoring, pembobotan, dan validasi ahli. Skor akhir dapat dihitung dengan menjumlahkan hasil perkalian nilai parameter dan bobot parameter. Hasil sintesis dinyatakan sebagai zona kesesuaian lahan untuk kawasan permukiman perkotaan.

Faktor penyisih diterapkan sebelum atau sesudah proses skoring sesuai karakter datanya. Apabila suatu wilayah berada pada kawasan lindung, kawasan rawan bahaya sangat tinggi, sempadan yang wajib dilindungi, atau kawasan dengan tidak dapat diterima, wilayah tersebut tidak diklasifikasikan sebagai zona sesuai walaupun skor beberapa parameter pendukung baik.

V. PARAMETER PENILAIAN

A. Faktor Daya Dukung Geologi

Faktor daya dukung geologi digunakan untuk menilai kemampuan lahan mendukung fungsi permukiman perkotaan, prasarana dasar, dan kegiatan pendukungnya. Pada kawasan permukiman perkotaan, daya dukung geologi harus dinilai dengan tata air, sanitasi, akses, dan keterpaparan penduduk.

Tabel L3.6. Komponen Faktor Daya Dukung Geologi dalam KGL Permukiman Perkotaan

Komponen	Indikator minimum	Arah penilaian
Morfologi dan elevasi	kemiringan lereng, elevasi relatif, posisi terhadap dataran banjir, lembah, kaki lereng, atau pantai	semakin stabil, mudah dikeringkan, dan aman dari genangan, semakin tinggi kesesuaian
Tanah dan batuan	jenis tanah dan batuan, ketebalan tanah lunak, kompresibilitas, daya dukung, potensi konsolidasi	semakin kuat dan stabil, semakin tinggi kesesuaian
Kondisi air dan resapan	ketersediaan air baku, zona resapan air, muka air tanah, kualitas air, hubungan air permukaan dan air tanah	semakin memadai tanpa merusak fungsi resapan dan tata air, semakin tinggi kesesuaian
Drainase alami	arah aliran, kapasitas pelepasan air, posisi terhadap sungai, saluran utama, dan daerah genangan	semakin mudah dikendalikan dan tidak memperbesar risiko hilir, semakin tinggi kesesuaian
Kestabilan tapak	indikasi retakan tanah, erosi tebing sungai atau pantai, deformasi permukaan, kerusakan prasarana berulang	semakin stabil dan mudah dipantau, semakin tinggi kesesuaian

B. Faktor Bahaya Geologi dan Lingkungan Perkotaan

Faktor bahaya geologi digunakan untuk menilai potensi gangguan terhadap keselamatan penduduk, bangunan, prasarana dasar, dan keberlanjutan fungsi permukiman. Bahaya yang dinilai disesuaikan dengan kondisi wilayah.

Gambar L-3 Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Permukiman Perkotaan

Tabel L3.7. Komponen Faktor Bahaya Geologi dalam KGL Permukiman Perkotaan

Komponen bahaya	Indikator minimum	Arah pengendalian
Gempa bumi	intensitas guncangan, kelas situs, potensi amplifikasi, jarak terhadap sumber gempa	standar bangunan tahan gempa, pembatasan fungsi rentan, verifikasi geoteknik
Likuefaksi	material jenuh air, muka air tanah dangkal, nilai CPT/SPT, riwayat kejadian, tingkat guncangan	perbaikan tanah, pembatasan bangunan bertingkat, pemantauan muka air tanah
Gerakan tanah	kemiringan lereng, litologi, ketebalan tanah pelapukan, curah hujan, penggunaan lahan, riwayat kejadian	pembatasan intensitas, perlindungan lereng, drainase lereng, relokasi fungsi rentan
Banjir dan rob	kedalaman, frekuensi, durasi, kapasitas drainase, elevasi terhadap muka air, riwayat genangan	ruang retensi, elevasi aman, drainase adaptif, pembatasan hunian rentan
Penurunan muka tanah	laju perubahan elevasi, pola spasial, penyebab dominan, dampak pada prasarana	pengendalian beban, penguatan prasarana, pemantauan elevasi, pembatasan pemanfaatan air tanah sesuai regulasi sektor
Intrusi air asin	DHL, klorida, posisi terhadap pantai, arah aliran air tanah, kualitas air baku	prioritas air permukaan/perpipaan, perlindungan sumber air, pemantauan kualitas air
Abrasi dan tsunami	perubahan garis pantai, jarak terhadap pantai, elevasi, potensi landaan, jalur evakuasi	garis aman, zona evakuasi, pembatasan fungsi rentan, perlindungan pesisir selektif

C. Faktor Nongeologi dan Keterpaparan

Faktor nongeologi digunakan untuk membaca tingkat keterpaparan, kebutuhan pelayanan, dan kemampuan pengendalian kawasan. Faktor ini tidak menggantikan analisis geologi, tetapi memperkuat penentuan risiko dan prioritas tindak lanjut.

Tabel L3.8. Komponen Faktor Nongeologi dalam KGL Permukiman Perkotaan

Komponen	Indikator minimum	Makna teknis
Kepadatan penduduk	jumlah penduduk, kepadatan hunian, kelompok rentan, aktivitas harian	semakin tinggi keterpaparan, semakin tinggi kebutuhan mitigasi dan pelayanan dasar
Prasarana air minum	cakupan layanan, kapasitas, sumber air baku, rencana pengembangan	menentukan ketergantungan kawasan terhadap sumber air tertentu
Drainase dan sanitasi	kapasitas saluran, daerah genangan, sistem pengolahan air limbah, risiko pencemaran	menentukan kelayakan kawasan dari sisi kesehatan lingkungan
Akses dan evakuasi	jaringan jalan, jalur evakuasi, ruang aman, akses layanan darurat	menentukan kemampuan tanggap darurat dan keselamatan penduduk
Tata ruang	kesesuaian RTRW/RDTR, intensitas ruang, kawasan lindung, sempadan, fungsi sekitar	menentukan integrasi rekomendasi ke pengaturan zonasi

D. Faktor Penyisih

Faktor penyisih digunakan untuk mengeluarkan atau membatasi wilayah tertentu dari peruntukan permukiman perkotaan. Faktor penyisih tidak dihitung sebagai skor biasa, tetapi menjadi dasar eliminasi, pembatasan, atau penetapan syarat sangat ketat.

- kawasan lindung geologi, kawasan perlindungan setempat, sempadan pantai, sempadan sungai, sempadan mata air, dan kawasan yang wajib dipertahankan fungsi lindungnya;
- zona resapan air sangat tinggi atau tinggi yang secara tata ruang ditetapkan sebagai fungsi perlindungan;

- kawasan rawan bahaya geologi sangat tinggi yang tidak dapat dikendalikan secara layak;
- kawasan dengan tanah dasar sangat tidak stabil untuk fungsi hunian intensif;
- kawasan dengan genangan berulang yang tidak memiliki solusi pengendalian yang layak;
- kawasan yang secara hukum tidak diperuntukkan untuk permukiman perkotaan.

VI. SKORING, PEMBOBOTAN, DAN KLASIFIKASI

Skoring dan pembobotan digunakan untuk menyusun penilaian yang terukur. Bobot dapat disesuaikan menurut karakter wilayah, skala kajian, ketersediaan data, dan tujuan perencanaan. Pada kawasan perkotaan pesisir, bobot bahaya geologi dan tata air perlu diperbesar. Pada kawasan lereng, bobot gerakan tanah dan kestabilan lereng perlu diperbesar. Pada kawasan padat, bobot keterpaparan penduduk dan prasarana perlu diperhatikan.

Tabel L3.9. Bobot Acuan Faktor Berpengaruh dalam KGL Permukiman Perkotaan

Faktor	Bobot acuan	Catatan penerapan
Daya dukung geologi	30-40%	menilai kemampuan dasar lahan untuk hunian, prasarana, dan layanan perkotaan
Bahaya geologi dan tata air	35-45%	dinaikkan pada kawasan rawan banjir, rob, gerakan tanah, likuefaksi, penurunan muka tanah, atau intrusi asin
Faktor nongeologi dan keterpaparan	15-25%	membaca kepadatan, prasarana, sanitasi, layanan air minum, akses evakuasi, dan kerentanan sosial
Faktor penyisih	tidak diskor	digunakan sebagai eliminasi atau pembatas sebelum kelas akhir ditetapkan

Klasifikasi akhir paling sedikit menggunakan lima kelas: sangat sesuai, sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, dan tidak sesuai. Untuk kebutuhan RDTR, kelas tersebut dapat diterjemahkan menjadi zona atau subzona dengan ketentuan I, T, B, dan X.

Tabel L3.10. Klasifikasi dan Arah Kesesuaian lahan dalam KGL Permukiman Perkotaan

Kelas	Makna teknis	Tindak lanjut
Sangat sesuai	daya dukung baik, pembatas rendah, bahaya rendah, prasarana dapat dikembangkan secara normal	dapat diarahkan untuk permukiman perkotaan dengan standar teknis umum
Sesuai	daya dukung memadai, pembatas rendah sampai sedang, risiko dapat dikendalikan	dapat dikembangkan dengan syarat teknis umum, drainase memadai, sanitasi layak, dan pemantauan sesuai kebutuhan
Sesuai bersyarat	masih dapat dikembangkan tetapi memerlukan syarat teknis, mitigasi, pembatas intensitas, atau pemantauan khusus	syarat wajib dimasukkan ke RDTR, peraturan zonasi, desain kawasan, dan dokumen lingkungan
Terbatas	pembatas geologi kuat sehingga hanya fungsi tertentu atau intensitas rendah yang dapat diterima	fungsi hunian intensif dibatasi; diarahkan untuk ruang terbuka, prasarana tertentu, atau kegiatan rendah risiko
Tidak sesuai	terdapat pembatas fatal, fungsi lindung, atau risiko yang tidak dapat diterima	fungsi permukiman perkotaan tidak direkomendasikan; perlu dialihkan atau dipertahankan sebagai fungsi lindung

VII. ARAHAN ZONA KESESUAIAN LAHAN

A. Zona Sangat Sesuai dan Sesuai

Zona sangat sesuai dan sesuai dapat diarahkan untuk pengembangan permukiman perkotaan sepanjang memenuhi standar prasarana dasar, sanitasi, drainase, air baku, akses, ruang terbuka, dan ketentuan bangunan. Pada zona ini, pengaturan intensitas tetap harus mempertimbangkan neraca air, kapasitas drainase, KDH, dan kebutuhan pengendalian limpasan.

B. Zona Sesuai Bersyarat

Zona sesuai bersyarat masih dapat digunakan untuk permukiman perkotaan apabila syarat teknis dipenuhi. Syarat dapat berupa pembatasan KDB/BCR, peningkatan KDH, penyediaan ruang retensi, perbaikan tanah, peninggian elevasi lantai, penguatan drainase, pengendalian sanitasi, pembatasan bangunan bertingkat, atau penyediaan jalur evakuasi.

C. Zona Terbatas

Zona terbatas hanya dapat dimanfaatkan untuk fungsi rendah risiko atau fungsi pendukung yang tidak meningkatkan keterpaparan penduduk. Pada zona ini, permukiman padat, rumah susun, fasilitas vital, dan fasilitas untuk kelompok rentan harus dibatasi atau tidak direkomendasikan.

D. Zona Tidak Sesuai

Zona tidak sesuai tidak direkomendasikan untuk fungsi permukiman perkotaan. Zona ini dapat dipertahankan sebagai kawasan lindung, ruang terbuka pengendali air, sempadan, kawasan resapan, zona konservasi, zona evakuasi, atau fungsi lain yang tidak menambah risiko terhadap penduduk.

VIII. ARAHAN PENGATURAN ZONASI DAN ITBX

Arahan pengaturan zonasi harus menerjemahkan zona kesesuaian lahan ke dalam kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan. Matriks ITBX berikut merupakan contoh acuan umum yang harus disesuaikan dengan karakter geologi lingkungan setempat, RTRW, RDTR, dan ketentuan sektor terkait.

Tabel L3.11. Zonasi dan ITBX dalam KGL Permukiman Perkotaan

Jenis kegiatan	Sangat sesuai/sesuai	Sesuai bersyarat	Terbatas/tidak sesuai
Hunian kepadatan rendah	I	B: wajib drainase, sanitasi, KDH, dan pengendalian limpasan	T/X: hanya pada bagian aman atau tidak direkomendasikan
Hunian kepadatan sedang	I/B: sesuai kapasitas prasarana dan daya dukung	B: wajib kajian teknis rinci dan pembatasan intensitas	X pada zona bahaya tinggi atau fungsi lindung
Rumah susun atau hunian vertikal	B: wajib verifikasi geoteknik dan prasarana	B/T: hanya jika syarat fondasi, drainase, air baku, evakuasi terpenuhi	X pada tanah tidak stabil, genangan berat, atau bahaya tinggi
Fasilitas pendidikan dan kesehatan	I/B: wajib akses dan ruang aman	B: wajib mitigasi dan evakuasi	X untuk zona bahaya tinggi atau akses darurat tidak memadai
Perdagangan dan jasa skala lingkungan	I	B: wajib prasarana parkir, drainase, air baku, dan pengelolaan limbah	T/X sesuai tingkat bahaya dan daya dukung
Prasarana drainase, ruang retensi, dan ruang terbuka	I	I/B: diarahkan sebagai fungsi pengendali	I/T: diprioritaskan jika mendukung pengurangan risiko
Kegiatan yang menutup fungsi resapan penting	B/T sesuai neraca air dan KDH	T: sangat dibatasi	X pada zona resapan sangat tinggi dan fungsi lindung

Arahan KDB/BCR, KDH, dan Intensitas

Arahan KDB/BCR, KDH, dan intensitas pemanfaatan ruang harus mempertimbangkan kelas kesesuaian lahan, fungsi resapan, kapasitas drainase, bahaya geologi, serta ketersediaan prasarana dasar. Nilai berikut merupakan acuan teknis awal dan harus disesuaikan dengan ketentuan RDTR, peraturan zonasi, dan hasil analisis neraca air setempat.

Tabel L3.12. Arahan KDB dan KDH dalam KGL Permukiman Perkotaan

Zona kesesuaian	Arahan KDB/BCR	Arahan KDH	Catatan teknis
Sangat sesuai	dapat mengikuti RDTR dengan pengendalian limpasan	minimal mengikuti RDTR; dianjurkan diperkuat pada kawasan resapan	wajib menjaga drainase dan kualitas lingkungan
Sesuai	mengikuti RDTR dengan pembatasan pada bagian rawan genangan atau lereng	ditingkatkan apabila berada pada kawasan resapan atau hulu drainase	wajib sistem sanitasi dan drainase memadai
Sesuai bersyarat	dibatasi sesuai hasil kajian teknis dan neraca air	ditingkatkan untuk mengimbangi peningkatan permukaan kedap air	wajib mitigasi, ruang retensi, dan pemantauan
Terbatas	rendah atau sangat rendah sesuai pembatas utama	tinggi; diprioritaskan untuk ruang terbuka atau fungsi pengendali	hunian padat dan fasilitas vital dibatasi
Tidak sesuai	tidak direkomendasikan untuk fungsi permukiman	dipertahankan sebagai fungsi lindung atau pengendali	fungsi permukiman dialihkan

IX. KETENTUAN KHUSUS KAWASAN PERMUKIMAN PERKOTAAN

A. Permukiman Perkotaan Pesisir

Pada kawasan permukiman perkotaan pesisir, kajian geologi lingkungan wajib memperhatikan interaksi wilayah darat, muara, pantai, air tanah pesisir, sistem drainase, rob, banjir, intrusi air asin, penurunan muka tanah, dan perubahan garis pantai. Kesesuaian lahan tidak cukup ditentukan oleh kondisi tanah setempat, tetapi harus membaca kemampuan kawasan melepaskan air, mempertahankan kualitas lingkungan, dan melindungi penduduk dari risiko berulang.

Tabel L3.13. Ketentuan Khusus Permukiman Perkotaan Pesisir

Pembatas dominan	Parameter minimum	Arahan teknis
Rob dan banjir	kedalaman, frekuensi, durasi, kapasitas drainase, elevasi aman	ruang retensi, peninggian terbatas, drainase adaptif, pembatasan hunian rentan
Penurunan muka tanah	laju tahunan, dampak pada jalan dan jaringan utilitas, hubungan dengan beban bangunan	pembatasan intensitas, fondasi sesuai, pemantauan elevasi, penguatan prasarana
Intrusi air asin	DHL, klorida, arah aliran air tanah, sumber air baku	prioritas layanan air perpipaan, pengendalian pemanfaatan air tanah sesuai regulasi sektor
Perubahan garis pantai	tren perubahan multiwaktu, abrasi, akresi, kondisi muara	garis aman, perlindungan selektif, pembatasan fungsi intensif

B. Permukiman Perkotaan pada Dataran Banjir dan Daerah Resapan

Pada dataran banjir, pengembangan permukiman harus memastikan adanya ruang pengendalian air, kapasitas drainase, jalur evakuasi, dan pengurangan limpasan. Pada daerah resapan air, pengembangan permukiman harus membatasi peningkatan permukaan kedap air, mempertahankan KDH tinggi, menyediakan rekayasa peresapan yang

sesuai, dan tidak menurunkan fungsi resapan utama.

C. Permukiman Perkotaan pada Lereng dan Perbukitan

Pada lereng dan perbukitan, kesesuaian permukiman ditentukan oleh kemiringan lereng, sifat tanah dan batuan, ketebalan tanah pelapukan, aliran permukaan, tingkat curah hujan, dan riwayat gerakan tanah. Hunian intensif, fasilitas vital, dan prasarana dengan beban besar harus dibatasi pada zona gerakan tanah sedang sampai tinggi kecuali tersedia pembuktian teknis yang memadai dan mitigasi yang layak.

D. Permukiman Campuran dengan Perdagangan, Jasa, dan Perkantoran

Kawasan permukiman perkotaan yang bercampur dengan perdagangan, jasa, dan perkantoran memiliki kebutuhan air, drainase, parkir, akses, sanitasi, dan energi yang lebih besar dibanding hunian biasa. Oleh karena itu, analisis harus menilai daya dukung tanah dan batuan, kapasitas prasarana, dampak peningkatan permukaan kedap air, potensi genangan, serta kebutuhan evakuasi pada jam padat aktivitas.

X. STANDAR KELUARAN

Keluaran kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman perkotaan paling sedikit berupa laporan teknis, peta tematik, peta sintesis, peta zona kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, dan matriks ITBX. Seluruh peta harus memiliki metadata, sumber data, skala, sistem koordinat, tanggal pemutakhiran, dan penanggung jawab teknis.

Tabel L3.14. Tahapan kegiatan dalam KGL Permukiman Perkotaan

Tahap	Data/kegiatan utama	Keluaran wajib
Penapisan awal	kompilasi data geologi, bentuk lahan, bahaya, sumber daya air, tata ruang, citra, dan data prasarana	peta penapisan, daftar pembatas utama, subkawasan prioritas
Studi rinci	survei lapangan, peta tematik, skoring, pembobotan, validasi data	peta kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, arahan KDB/BCR, KDH, dan ITBX
Verifikasi tapak	pengujian geoteknik, analisis drainase, sanitasi, air baku, akses evakuasi, dan mitigasi	parameter desain, syarat teknis, rencana pemantauan, dan catatan validasi

XI. FORMAT LAPORAN DAN PETA

A. Format Laporan

- pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, dan kedudukan kajian;
- metode, data, sumber data, skala peta, dan satuan analisis;
- kondisi geologi, bentuk lahan, geologi teknik, hidrogeologi, sumber daya air, bahaya geologi, prasarana, dan tata ruang;
- analisis faktor pendukung, faktor pembatas, faktor nongeologi, dan faktor penyisih;
- skoring, pembobotan, dan sintesis zona kesesuaian lahan;
- rekomendasi teknis, arahan pengaturan zonasi, dan matriks ITBX;
- rencana pemantauan dan pemutakhiran;
- kesimpulan serta lampiran data dan peta.

B. Format Peta

- peta lokasi dan batas kawasan kajian;
- peta geologi dan bentuk lahan;
- peta geologi teknik apabila tersedia atau diperlukan;
- peta hidrogeologi dan sumber daya air yang relevan;
- peta zona resapan air, apabila berpengaruh terhadap permukiman;
- peta bahaya geologi dan bahaya terkait tata air;
- peta faktor penyisih;
- peta zona kesesuaian lahan;

- peta rekomendasi teknis dan arahan pengaturan zonasi.

XII. VALIDASI, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAKHIRAN

A. Validasi Teknis

Validasi teknis dilakukan terhadap kecukupan data, kesesuaian metode, ketepatan skala peta, keterlacakan data, konsistensi skoring dan pembobotan, ketepatan kelas kesesuaian, kelayakan rekomendasi teknis, dan kesesuaian matriks ITBX dengan karakter geologi lingkungan. Hasil validasi dituangkan dalam catatan teknis atau berita acara validasi.

B. Pemantauan

Pemantauan dilakukan untuk memastikan rekomendasi teknis tetap sesuai dengan perubahan kondisi kawasan. Pada zona sesuai bersyarat dan terbatas, pemantauan harus menjadi bagian dari kewajiban pengelolaan kawasan atau izin pemanfaatan ruang.

Tabel L3.15. Pemantauan dan Frekuensi Acuan dalam KGL Permukiman Perkotaan

Parameter pemantauan	Tujuan	Frekuensi acuan
banjir, rob, dan genangan	menilai efektivitas drainase dan ruang pengendalian air	tahunan atau setelah kejadian besar
penurunan muka tanah dan deformasi permukaan	menilai dampak pembebanan dan perubahan elevasi kawasan	tahunan atau sesuai tingkat risiko
kualitas air dan sanitasi	menilai risiko pencemaran dan kesehatan lingkungan	berkala sesuai rekomendasi
gerakan tanah dan kestabilan lereng	menilai keselamatan kawasan lereng	musim hujan dan setelah kejadian ekstrem
perubahan penggunaan lahan dan KDH	menilai kepatuhan terhadap pengaturan zonasi	tahunan atau saat evaluasi RDTR

C. Pemutakhiran

Pemutakhiran dilakukan paling sedikit apabila terdapat perubahan tata ruang, perubahan penggunaan lahan, kejadian bencana, perubahan prasarana utama, perubahan pola genangan, perubahan kondisi sumber daya air, atau temuan teknis baru. Pemutakhiran wajib memperbarui basis data, peta, kelas kesesuaian, rekomendasi teknis, dan matriks ITBX.

XIII. PENUTUP

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Permukiman Perkotaan menjadi dasar operasional untuk memastikan bahwa pengembangan permukiman dilakukan sesuai daya dukung geologi, memperhitungkan faktor pembatas dan bahaya geologi, menjaga fungsi tata air dan lingkungan, serta melindungi keselamatan penduduk. Petunjuk teknis ini dapat disempurnakan berdasarkan perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi pemetaan, hasil pemantauan, dan kebutuhan harmonisasi kebijakan nasional.

Lampiran 4:

Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Permukiman Nonperkotaan

Lampiran 4 melengkapi Lampiran 3 dengan konteks permukiman nonperkotaan. Petunjuk ini penting untuk membaca hubungan antara lahan, air, lereng, penggunaan ruang, bahaya geologi, dan kebutuhan prasarana pada kawasan yang tekanan pembangunannya berbeda dari kawasan perkotaan.

Tabel L4.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 4, Bab 5, Bab 7, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Penerapan KGL untuk hunian nonperkotaan, prasarana lokal, sumber air, lahan pertanian, bahaya, dan fungsi resapan.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L4.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

A. Kedudukan Petunjuk Teknis

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Permukiman Nonperkotaan merupakan bagian tidak terpisahkan dari Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan. Petunjuk teknis ini digunakan sebagai acuan operasional untuk menilai kesesuaian lahan, daya dukung geologi, faktor pembatas geologi, bahaya geologi, faktor nongeologi, faktor penyisih, kebutuhan mitigasi, dan arahan pengendalian pemanfaatan ruang pada kawasan permukiman nonperkotaan.

Kawasan permukiman nonperkotaan mencakup permukiman perdesaan, permukiman peralihan kota-desa, pusat pelayanan lokal, serta lingkungan hunian yang masih memiliki hubungan kuat dengan lahan pertanian, kebun, kawasan resapan air, mata air, lereng, sungai, dan prasarana dasar berskala lokal. Kajian geologi lingkungan diperlukan untuk memastikan bahwa pengembangan permukiman berlangsung

aman, sehat, hemat biaya rekayasa, dan tidak mengurangi fungsi lingkungan geologi yang penting.

Petunjuk teknis ini tidak menggantikan RTRW, RDTR, KLHS, AMDAL, persetujuan lingkungan, atau perizinan sektoral. Petunjuk teknis ini menjadi dasar teknis untuk memberi masukan terhadap perencanaan ruang, penetapan zona kesesuaian lahan, arahan KDB/BCR dan KDH, pengaturan zonasi, serta matriks kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan.

B. Maksud dan Tujuan

Petunjuk teknis ini dimaksudkan untuk menyeragamkan tata cara kajian geologi lingkungan bagi kawasan permukiman nonperkotaan agar hasil kajian dapat digunakan secara konsisten dalam penataan ruang, peraturan zonasi, penyusunan rekomendasi teknis, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

- menentukan tingkat kesesuaian lahan untuk kawasan permukiman nonperkotaan berdasarkan daya dukung geologi, faktor pembatas geologi, faktor nongeologi, dan faktor penyisih;
- mengidentifikasi lahan yang dapat dikembangkan, dapat dikembangkan dengan syarat, terbatas, atau tidak direkomendasikan untuk fungsi permukiman nonperkotaan;
- menetapkan arahan teknis untuk sumber air, sanitasi, drainase lokal, perlindungan mata air, perlindungan zona resapan, stabilitas lereng, mitigasi bahaya geologi, dan pemantauan;
- menerjemahkan hasil kajian geologi lingkungan ke dalam arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX;
- menyediakan dasar teknis bagi pemerintah daerah, desa, pemrakarsa, dan masyarakat dalam mengendalikan pengembangan permukiman nonperkotaan.

C. Ruang Lingkup

Ruang lingkup petunjuk teknis ini meliputi kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman nonperkotaan dan fungsi pendukungnya, termasuk hunian perdesaan, prasarana air minum, sanitasi, jalan lokal, fasilitas sosial, fasilitas umum, ruang terbuka, lahan pekarangan, kegiatan ekonomi lokal, dan prasarana mitigasi bahaya geologi.

- analisis data geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, sumber daya air, bahaya geologi, penggunaan lahan, tanah, curah hujan, dan tata ruang;
- penetapan satuan analisis kawasan, subkawasan, satuan bentuk lahan, dan tapak prasarana lokal;
- penilaian faktor sumber daya geologi, faktor bahaya geologi, faktor nongeologi, dan faktor penyisih;
- penentuan zona kesesuaian lahan dan rekomendasi teknis;
- penyusunan arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX;
- penyusunan laporan, peta, basis data digital, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran.

D. Pengertian Operasional

Tabel L4.3. Istilah dan Pengertian Operasional

Istilah	Pengertian operasional
Kawasan permukiman nonperkotaan	kawasan hunian di luar kawasan perkotaan yang memiliki fungsi utama sebagai tempat tinggal masyarakat perdesaan atau peralihan kota-desa beserta prasarana, sarana, ruang terbuka, dan kegiatan ekonomi lokal.
Subkawasan permukiman nonperkotaan	bagian kawasan permukiman nonperkotaan yang dinilai sebagai satuan evaluasi berdasarkan kesamaan kondisi geologi, bentuk lahan, tata air, bahaya geologi, penggunaan lahan, dan pola hunian.
Daya dukung geologi permukiman nonperkotaan	kemampuan lingkungan geologi untuk mendukung hunian, prasarana lokal, dan kegiatan masyarakat tanpa menimbulkan risiko yang tidak dapat diterima.

Istilah	Pengertian operasional
Faktor pembatas geologi	kondisi geologi, bentuk lahan, geologi teknik, hidrogeologi, bahaya geologi, atau tata air yang membatasi atau mensyaratkan pengembangan permukiman nonperkotaan.
Faktor penyisih	kondisi yang mengeluarkan atau membatasi suatu wilayah dari rencana permukiman karena fungsi lindung, bahaya tinggi, ketentuan hukum, atau nilai lingkungan penting.

II. PRINSIP DAN KERANGKA ANALISIS

A. Prinsip Analisis

Kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman nonperkotaan dilaksanakan dengan prinsip kehati-hatian, keterpaduan, berbasis data, sesuai skala, mudah diverifikasi, dan dapat diterapkan dalam pengendalian ruang. Prinsip tersebut diperlukan karena permukiman nonperkotaan sering bergantung pada sumber air lokal, berada dekat dengan lahan pertanian, lereng, sungai, mata air, daerah resapan, dan pada beberapa wilayah berada pada kawasan rawan bencana geologi.

- keselamatan penduduk dan kesehatan lingkungan menjadi dasar utama penilaian;
- fungsi air, tanah, batuan, bentuk lahan, mata air, dan kawasan resapan harus dibaca sebagai satu sistem lingkungan geologi;
- pengembangan permukiman tidak boleh menurunkan fungsi kawasan lindung, daerah resapan air, sempadan sungai, sempadan mata air, dan lahan bernilai perlindungan;
- kawasan rawan bahaya geologi tinggi harus dibatasi atau tidak direkomendasikan untuk hunian baru;
- hasil analisis wajib dapat diterjemahkan menjadi peta kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, arahan KDB/BCR, KDH, dan matriks ITBX.

B. Satuan Analisis

Satuan analisis dapat berupa satuan bentuk lahan, satuan geologi teknik, satuan hidrogeologi, desa, subkawasan permukiman, blok rencana, atau tapak prasarana lokal. Pemilihan satuan analisis harus mempertimbangkan tujuan kajian, skala peta, tingkat kedetilan data, dan kebutuhan pengambilan keputusan.

Tabel L4.4. Satuan Analisis KGL Non Perkotaan

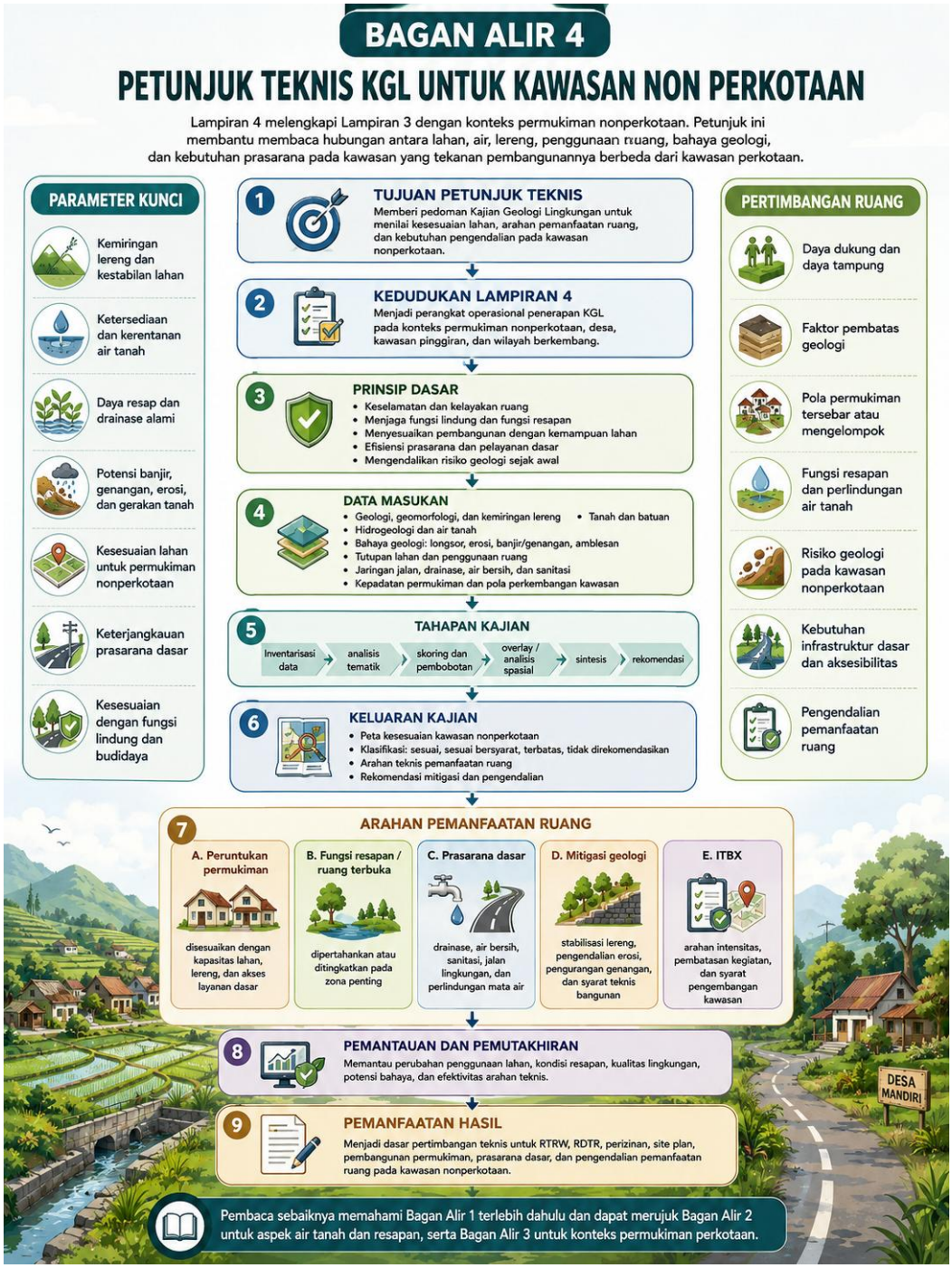
Tingkat analisis	Penggunaan utama	Keluaran teknis
Kawasan nonperkotaan	penapisan awal dan arahan umum pengembangan permukiman	peta arahan umum, wilayah prioritas, dan wilayah pembatas utama
Subkawasan/desa	penilaian kesesuaian lahan dan arahan fungsi ruang lokal	kelas kesesuaian, syarat teknis, dan arahan intensitas
Blok rencana	integrasi ke RDTR, peraturan zonasi, atau rencana tata ruang setempat	ketentuan ITBX, arahan KDB/BCR, KDH, dan pembatas ruang
Tapak prasarana	verifikasi untuk air minum, sanitasi, jalan lokal, fasilitas sosial, fasilitas umum, dan ruang evakuasi	parameter desain, mitigasi, dan pemantauan

C. Hubungan dengan Tata Ruang dan ITBX

Peta kesesuaian lahan hasil kajian geologi lingkungan harus menjadi masukan teknis untuk RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, rencana pembangunan desa, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Pada tingkat operasional, hasil analisis harus diterjemahkan menjadi arahan kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan sesuai karakter setiap zona.

Hubungan antara zona kesesuaian lahan dan ITBX harus mempertimbangkan daya dukung geologi, faktor pembatas geologi,

fungsi lindung, ketersediaan air, nilai lahan pertanian, kemampuan sanitasi, akses evakuasi, dan kemampuan pengawasan oleh pemerintah daerah atau pemerintah desa.



Gambar L-4 Bagan Alir KGL untuk kawasan Non Perkotaan

III. DATA DAN INFORMASI DASAR

Kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman nonperkotaan wajib menggunakan data dasar yang memadai, mutakhir, dapat ditelusuri sumbernya, dan sesuai dengan skala perencanaan. Data sekunder digunakan untuk penapisan awal, sedangkan data primer digunakan untuk verifikasi, studi rinci, dan penetapan rekomendasi teknis.

Tabel L4.5. Data Dasar Utama KGL Non Perkotaan

Kelompok data	Data minimum	Kegunaan teknis
Geologi	satuan batuan, struktur geologi, bahan permukaan, pelapukan, dan karakter material setempat	menilai kemampuan dasar lahan, potensi pembatas, dan kebutuhan penyelidikan lanjutan
Geomorfologi	bentuk lahan, elevasi, kemiringan lereng, posisi terhadap sungai, dataran banjir, kaki lereng, pantai, atau lembah	menilai genangan, kestabilan, aliran permukaan, dan fungsi resapan
Geologi teknik	sifat tanah dan batuan, daya dukung, kedalaman lapisan pendukung, potensi kembang-susut, kompresibilitas, dan kestabilan lereng	menentukan kelayakan hunian, prasarana, fondasi sederhana, dan kebutuhan mitigasi
Hidrogeologi dan sumber daya air	mata air, sumur, akuifer dangkal, muka air tanah, kualitas air, sungai, irigasi, embung, daerah resapan, dan daerah lepasan	menilai ketersediaan air, perlindungan sumber air, dan dampak perubahan lahan terhadap tata air
Bahaya geologi	gempa bumi, tsunami bila relevan, gerakan tanah, likuefaksi, erupsi gunung api, banjir, erosi, abrasi bila relevan, dan penurunan muka tanah setempat	menentukan tingkat risiko dan kebutuhan pembatasan atau mitigasi
Tanah dan lahan	kesuburan tanah, lahan pertanian produktif, lahan basah beririgasi teknis, tutupan lahan, dan penggunaan lahan	menilai dampak perubahan lahan dan fungsi perlindungan pangan serta lingkungan
Tata ruang dan lingkungan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, sempadan, kawasan rawan bencana, KLHS, dokumen lingkungan	menyelaraskan hasil analisis dengan kebijakan ruang dan instrumen lingkungan
Sosial dan prasarana lokal	kepadatan hunian, jalan lokal, air minum, sanitasi, persampahan, fasilitas umum, fasilitas sosial, dan jalur evakuasi	menilai keterpaparan, kebutuhan pelayanan dasar, dan kemampuan pengendalian

IV. TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

A. Tahap Persiapan dan Kompilasi Data

- Tahap persiapan dilakukan untuk menetapkan tujuan kajian, batas wilayah, skala analisis, satuan analisis, kebutuhan data, dan metode penilaian. Kompilasi data dilakukan untuk menyusun model awal mengenai hubungan antara geologi, bentuk lahan, sumber air, bahaya geologi, prasarana dasar, dan pola pemanfaatan ruang nonperkotaan.
- mengumpulkan peta geologi, peta geomorfologi, peta hidrogeologi, peta bahaya geologi, peta lereng, peta tanah, peta penggunaan lahan, dan peta tata ruang;
- mengidentifikasi kawasan lindung, daerah resapan air, sempadan sungai, sempadan mata air, lahan pertanian beririgasi teknis, dan kawasan rawan bencana;
- menyusun daftar kebutuhan data lapangan untuk memverifikasi kondisi sumber air, lereng, tanah, batuan, sanitasi, dan prasarana lokal;
- menentukan satuan analisis yang akan digunakan dalam skoring, pembobotan, dan sintesis spasial.

B. Tahap Penyelidikan Lapangan

Penyelidikan lapangan dilakukan untuk memverifikasi data sekunder, memperoleh

data primer, dan memastikan bahwa hasil analisis mencerminkan kondisi aktual. Kegiatan lapangan disesuaikan dengan skala kajian dan kompleksitas wilayah.

- pemetaan geologi dan geomorfologi permukaan;
- pengukuran kemiringan lereng, elevasi relatif, dan kondisi aliran permukaan;
- inventarisasi mata air, sumur, sungai, jaringan irigasi, dan sumber air baku lokal;
- pengamatan sifat tanah dan batuan untuk kebutuhan hunian serta prasarana lokal;
- identifikasi indikasi gerakan tanah, retakan tanah, erosi, banjir, genangan, likuefaksi, atau bahaya geologi lain;
- pengamatan sanitasi, drainase lokal, akses jalan, fasilitas umum, dan jalur evakuasi;
- pengambilan contoh tanah atau air apabila diperlukan untuk pembuktian teknis.

C. Tahap Analisis dan Sintesis

Analisis dilakukan dengan menggabungkan metode kuantitatif dan kualitatif. Metode kuantitatif digunakan untuk parameter yang dapat diukur, seperti kemiringan lereng, jarak ke sumber air, kedalaman muka air tanah, nilai daya dukung tanah, tingkat bahaya, atau luas kawasan pembatas. Metode kualitatif digunakan untuk penilaian ahli terhadap karakter geologi lingkungan yang tidak dapat dinilai hanya dengan angka.

Sintesis dilakukan melalui skoring, pembobotan, tumpang susun spasial berbasis Sistem Informasi Geografis, dan validasi ahli. Faktor penyisih tidak diberi skor, tetapi digunakan sebagai dasar eliminasi atau pembatas sebelum kelas kesesuaian akhir ditetapkan.

Tabel L4.6. Data Dasar Utama KGL Non Perkotaan

Faktor	Komponen utama	Keluaran teknis
Sumber daya geologi	sumber daya air, kemiringan lereng, sifat tanah dan batuan, kesuburan tanah, fungsi resapan	kelas daya dukung dan syarat teknis dasar
Bahaya geologi	gempa bumi, tsunami bila relevan, gerakan tanah, likuefaksi, erupsi gunung api, banjir, erosi, abrasi bila relevan	kelas bahaya dan kebutuhan mitigasi
Faktor nongeologi	curah hujan, nilai pertanian, akses, prasarana dasar, kepadatan hunian, fasilitas lokal	tingkat keterpaparan dan prioritas pengendalian
Faktor penyisih	kawasan lindung, sempadan, mata air penting, lahan pertanian beririgasi teknis, kawasan rawan bencana tinggi, kawasan bernilai konservasi	eliminasi atau pembatasan fungsi

V. KRITERIA ANALISIS KESESUAIAN LAHAN

A. Faktor Sumber Daya Geologi

Faktor sumber daya geologi digunakan untuk menilai kemampuan lingkungan geologi mendukung permukiman nonperkotaan. Komponen yang dinilai paling sedikit meliputi sumber daya air, kemiringan lereng, sifat keteknikan tanah dan batuan, kesuburan tanah, serta fungsi resapan air.

Tabel L4.7. Komponen Faktor Sumber Daya Geologi dalam KGL Non Perkotaan

Komponen	Indikator minimum	Arah penilaian
Sumber daya air	ketersediaan air permukaan, mata air, air tanah dangkal, kualitas air, kontinuitas pasokan, jarak ke sumber air	semakin andal dan terlindungi, semakin tinggi kesesuaian
Kemiringan lereng	kelas lereng, bentuk lereng, potensi erosi, kemudahan pembangunan dan akses	semakin datar sampai landai dan stabil, semakin tinggi kesesuaian

Komponen	Indikator minimum	Arah penilaian
Tanah dan batuan	daya dukung, kedalaman lapisan pendukung, pelapukan, potensi kembang-susut, permeabilitas, kestabilan lokal	semakin stabil dan mudah dikendalikan, semakin tinggi kesesuaian
Kesuburan tanah	nilai pertanian, lahan pangan produktif, lahan basah beririgasi teknis, dan fungsi ekonomi lokal	perlu diperlakukan sebagai pembatas apabila perubahan menjadi permukiman menurunkan fungsi pangan atau ekonomi lokal
Fungsi resapan air	litologi, lereng, tanah, tutupan lahan, curah hujan, dan hubungan dengan mata air atau akuifer	fungsi resapan tinggi perlu dilindungi dan dibatasi intensitas pemanfaatannya

B. Faktor Bahaya Geologi

Faktor bahaya geologi digunakan untuk menilai kemungkinan gangguan terhadap keselamatan penduduk, bangunan, prasarana lokal, dan keberlanjutan fungsi permukiman. Komponen bahaya disesuaikan dengan lokasi kajian dan kondisi geologi setempat.

Tabel L4.8. Komponen Faktor Bahaya Geologi dalam KGL Non Perkotaan

Komponen bahaya	Indikator minimum	Arah pengendalian
Gempa bumi	intensitas guncangan, jenis tanah, kedekatan dengan sumber gempa, catatan kerusakan	standar bangunan sederhana tahan gempa, pembatasan fungsi rentan
Tsunami	elevasi, jarak dari pantai, riwayat landaan, jalur evakuasi, ruang aman	pembatasan hunian baru pada zona landaan tinggi dan penyediaan evakuasi
Gerakan tanah	kemiringan lereng, litologi, struktur geologi, curah hujan, tutupan lahan, retakan, sejarah kejadian	pengendalian lereng, drainase, vegetasi, dan pembatasan hunian pada zona bahaya tinggi
Likuefaksi	material lepas jenuh air, muka air tanah dangkal, tingkat guncangan, data CPT/SPT bila tersedia	pembatasan fungsi rentan dan kebutuhan perbaikan tanah pada tapak tertentu
Erupsi gunung api	zona bahaya, aliran lahar, abu, awan panas sesuai peta bahaya resmi	mengikuti zona bahaya dan jalur evakuasi yang ditetapkan
Banjir dan erosi	kedalaman, frekuensi, durasi, jarak terhadap sungai, kapasitas aliran, erosi tebing	pembatasan sempadan, peningkatan drainase, dan ruang retensi lokal

C. Faktor Nongeologi

Faktor nongeologi digunakan untuk membaca tingkat keterpaparan dan kebutuhan operasional kawasan permukiman nonperkotaan. Komponen yang dinilai meliputi curah hujan, nilai lahan pertanian, kepadatan penduduk, aksesibilitas, prasarana air minum, sanitasi, drainase, fasilitas umum, fasilitas sosial, serta kesiapan jalur evakuasi.

D. Faktor Penyisih

Faktor penyisih digunakan untuk meniadakan atau membatasi pemanfaatan ruang sebelum proses skoring akhir dilakukan. Faktor penyisih harus diperiksa pada tahap awal agar rencana permukiman tidak ditempatkan pada kawasan yang secara hukum, ekologis, atau teknis harus dilindungi.

- kawasan lindung, kawasan konservasi, kawasan cagar alam geologi, kawasan bentang alam karst, dan kawasan bernilai geologi penting;
- sempadan sungai, sempadan danau, sempadan mata air, serta kawasan sekitar sumber air baku;
- daerah resapan air dengan fungsi perlindungan tinggi;
- lahan pertanian beririgasi teknis dan lahan pangan produktif yang ditetapkan untuk dipertahankan;
- kawasan rawan bencana tinggi yang tidak layak dimitigasi untuk hunian;
- kawasan bergambut, pantai berhutan mangrove, dan kawasan perlindungan setempat lainnya;

- kawasan yang secara tata ruang tidak diperuntukkan untuk permukiman.

VI. SKORING, PEMBOBOTAN, DAN PENENTUAN ZONA KESESUAIAN

Penilaian kesesuaian lahan dilakukan dengan memberikan nilai dan bobot terhadap setiap parameter. Nilai menunjukkan kondisi parameter, sedangkan bobot menunjukkan tingkat kepentingan parameter terhadap kelayakan kawasan permukiman nonperkotaan. Total skor diperoleh dari penjumlahan hasil perkalian nilai dan bobot seluruh parameter yang dinilai.

Jumlah kelas kesesuaian dapat menggunakan tiga, lima, atau tujuh kelas sesuai tujuan kajian, skala peta, sebaran data, dan kebutuhan rekomendasi. Untuk penyelarasan dengan Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan, klasifikasi minimum menggunakan lima kelas: sangat sesuai, sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, dan tidak sesuai.

Tabel L4.9. Zona Kesesuaian Lahan dalam KGL Non Perkotaan

Zona kesesuaian	Makna teknis	Tindak lanjut
Sangat sesuai	daya dukung geologi baik, pembatas rendah, sumber air tersedia, bahaya rendah, dan tidak terdapat faktor penyisih	dapat diarahkan untuk permukiman nonperkotaan dengan ketentuan umum
Sesuai	dapat digunakan untuk permukiman dengan syarat teknis umum dan pemantauan sesuai kebutuhan	dapat dikembangkan dengan standar teknis dasar
Sesuai bersyarat	masih dapat digunakan, tetapi memerlukan syarat teknis, mitigasi, pembatasan intensitas, atau pemantauan	syarat wajib dimasukkan dalam rencana ruang dan peraturan zonasi
Terbatas	memiliki pembatas kuat sehingga hanya fungsi tertentu atau intensitas rendah yang dapat diterima	pemanfaatan dibatasi dan memerlukan verifikasi teknis
Tidak sesuai	memiliki faktor penyisih, bahaya tinggi, daya dukung rendah, atau risiko tidak dapat diterima	tidak direkomendasikan untuk permukiman nonperkotaan baru

Tabel L4.10. Bobot Acuan Faktor-Faktor dalam KGL Non Perkotaan

Faktor	Bobot acuan	Catatan penerapan
Sumber daya geologi	35-45%	ditingkatkan pada wilayah yang sangat bergantung pada sumber air lokal, tanah produktif, atau lereng
Bahaya geologi	35-45%	ditingkatkan pada wilayah lereng, kaki gunung api, dataran banjir, pesisir, atau zona rawan gempa/tsunami
Faktor nongeologi	10-20%	digunakan untuk membaca keterpaparan, prasarana dasar, dan nilai lahan pertanian
Faktor penyisih	tidak diskor	digunakan sebagai eliminasi atau pembatas sebelum kelas akhir ditetapkan

VII. ARAHAN PENGATURAN ZONASI DAN MATRIKS ITBX

Setiap zona kesesuaian lahan wajib diterjemahkan ke dalam arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX. Arahan tersebut harus memperhatikan fungsi permukiman, prasarana dasar, kegiatan ekonomi lokal, perlindungan kawasan lindung, perlindungan daerah resapan air, perlindungan mata air, mitigasi bahaya geologi, serta kemampuan pemerintah daerah atau pemerintah desa dalam melakukan pengendalian.

Tabel L4.11. ITBX pada Zona Kesesuaian Lahan dalam KGL Non Perkotaan

Zona kesesuaian	Kegiatan diizinkan (I)	Kegiatan terbatas/bersyarat (T/B)	Kegiatan tidak diperbolehkan (X)
Sangat sesuai	hunian rendah sampai sedang, fasilitas sosial, fasilitas umum, prasarana dasar, ruang terbuka, kegiatan ekonomi lokal	usaha kecil yang tidak mencemari; peningkatan kepadatan dengan syarat layanan air, sanitasi, dan drainase memadai	kegiatan berbahaya, pencemar berat, atau perubahan fungsi yang bertentangan dengan tata ruang
Sesuai	hunian, prasarana dasar, fasilitas umum, kegiatan ekonomi lokal terkendali	peningkatan kepadatan, fasilitas skala lokal, dan jalan lokal dengan syarat teknis	kegiatan yang menurunkan kualitas air, merusak sumber air, atau meningkatkan bahaya
Sesuai bersyarat	hunian terbatas dan prasarana dasar yang memenuhi syarat teknis	hunian baru dengan pembatasan KDB/BCR, kewajiban KDH, pengendalian drainase, sanitasi aman, dan mitigasi bahaya	hunian padat, bangunan rentan, atau kegiatan yang memperbesar risiko
Terbatas	ruang terbuka, pertanian, konservasi lokal, prasarana ringan yang aman	hunian eksisting dengan pengurangan risiko; prasarana lokal dengan verifikasi teknis	permukiman baru berintensitas sedang sampai tinggi dan fasilitas rentan
Tidak sesuai	konservasi, ruang aman, perlindungan sumber air, pemulihan lingkungan	pemanfaatan eksisting hanya untuk pengurangan risiko dan pemulihan	permukiman baru, fasilitas rentan, dan kegiatan yang meningkatkan keterpaparan

VIII. ARAHAN TEKNIS KHUSUS KAWASAN PERMUKIMAN NONPERKOTAAN

A. Kawasan Lereng dan Perbukitan

Pada kawasan lereng dan perbukitan, pengembangan permukiman nonperkotaan harus memperhatikan kestabilan lereng, aliran permukaan, erosi, kemampuan drainase, akses evakuasi, dan ketersediaan sumber air. Hunian baru tidak direkomendasikan pada lereng dengan bahaya gerakan tanah tinggi atau pada lokasi yang menunjukkan indikasi ketidakstabilan.

- membatasi KDB/BCR pada lereng sedang sampai terjal;
- mempertahankan vegetasi dan ruang resapan;
- mengendalikan pemotongan lereng dan perubahan alur air;
- mewajibkan drainase lereng yang aman dan tidak memusatkan aliran ke hunian;
- menetapkan jalur evakuasi dan ruang aman pada kawasan rawan gerakan tanah.

B. Kawasan Dataran Banjir dan Sekitar Sungai

Pada dataran banjir dan sekitar sungai, analisis harus menilai frekuensi banjir, kedalaman genangan, durasi, kapasitas saluran alami, sempadan sungai, dan dampak perubahan tutupan lahan. Pengembangan permukiman harus menghindari sempadan sungai dan ruang yang dibutuhkan untuk pelepasan air.

- menetapkan sempadan sungai dan ruang pengendalian banjir sebagai faktor penyisih atau pembatas;
- mewajibkan elevasi lantai aman pada zona sesuai bersyarat;
- mengutamakan ruang terbuka dan fungsi retensi lokal;
- melarang penutupan alur air alami yang masih berfungsi.

C. Kawasan Sekitar Mata Air dan Daerah Resapan

Kawasan sekitar mata air dan daerah resapan air merupakan bagian penting dari sistem lingkungan geologi. Pengembangan permukiman pada kawasan ini harus diarahkan untuk mempertahankan fungsi imbuhan, menjaga kualitas air, dan mencegah peningkatan limpasan permukaan.

- menetapkan sempadan mata air dan daerah perlindungan sumber air sebagai faktor penyisih atau pembatas kuat;
- membatasi KDB/BCR dan meningkatkan KDH pada zona resapan tinggi;
- mewajibkan sanitasi aman yang tidak mencemari air tanah dangkal atau mata air;
- mengendalikan penggunaan bahan kimia rumah tangga, limbah domestik, dan kegiatan ekonomi lokal yang berpotensi mencemari sumber air;
- mendorong rekayasa peresapan yang sesuai kondisi geologi setempat.

D. Kawasan Pesisir Nonperkotaan dan Pulau Kecil

Pada kawasan pesisir nonperkotaan dan pulau kecil, kajian geologi lingkungan harus menilai abrasi, tsunami, banjir pesisir, intrusi air asin, ketersediaan air tawar, sanitasi, dan perlindungan ekosistem pesisir. Pengembangan permukiman baru harus menghindari zona bahaya tinggi dan kawasan perlindungan setempat.

- membatasi hunian baru pada zona landaan tsunami tinggi, abrasi aktif, atau kekurangan air tawar yang tidak dapat dikendalikan;
- memprioritaskan perlindungan sumber air tawar lokal dan sanitasi aman;
- menetapkan jalur evakuasi dan ruang aman;
- mengintegrasikan perlindungan pantai alami dengan rencana permukiman.

E. Kawasan Peralihan Kota-Desa

Kawasan peralihan kota-desa sering mengalami tekanan perubahan lahan dari pertanian menjadi permukiman. Kajian geologi lingkungan harus menilai daya dukung tanah dan batuan, ketersediaan air, fungsi resapan, nilai lahan pertanian, sanitasi, drainase, dan risiko peningkatan kepadatan hunian.

- mencegah perubahan lahan yang menghilangkan fungsi resapan penting atau lahan pangan produktif yang harus dipertahankan;
- mengendalikan peningkatan kepadatan melalui arahan KDB/BCR, KDH, dan prasarana dasar;
- mewajibkan sistem sanitasi yang aman dan tidak mencemari air tanah dangkal;
- menetapkan pengembangan bertahap sesuai daya dukung dan kapasitas prasarana.

IX. STANDAR KELUARAN, VALIDASI, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAKHIRAN

A. Standar Keluaran

Hasil kajian geologi lingkungan untuk kawasan permukiman nonperkotaan wajib dituangkan dalam laporan teknis, peta, basis data digital, rekomendasi teknis, dan matriks ITBX. Setiap peta wajib memuat skala, sistem koordinat, sumber data, tahun data, dan penanggung jawab teknis.

Tabel L4.12. Jenis Keluaran dan Muatan Minimum dalam KGL Non Perkotaan

Jenis keluaran	Muatan minimum
Laporan teknis	pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, metode, data, kondisi geologi lingkungan, analisis faktor, sintesis, rekomendasi, ITBX, pemantauan, dan kesimpulan
Peta tematik	geologi, geomorfologi, lereng, sumber daya air, hidrogeologi, bahaya geologi, penggunaan lahan, faktor penyisih, dan tata ruang
Peta sintesis	peta zona kesesuaian lahan, peta rekomendasi teknis, peta pembatas, dan peta arahan pengaturan zonasi
Basis data digital	data spasial dan atribut dengan metadata, riwayat pembaruan, dan keterlacakan sumber data
Matriks ITBX	kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan untuk setiap zona kesesuaian

B. Validasi Teknis

Validasi teknis dilakukan oleh unit yang berwenang di bidang geologi lingkungan untuk memastikan kecukupan data, kesesuaian metode, konsistensi skoring dan pembobotan, ketepatan peta kesesuaian, kelayakan rekomendasi teknis, dan keterpaduan dengan tata ruang serta pengendalian pemanfaatan ruang.

- valid tanpa perbaikan;
- valid dengan perbaikan;
- dikembalikan untuk dilengkapi;
- tidak valid karena data, metode, atau rekomendasi tidak memenuhi persyaratan teknis.

C. Pemantauan

Pemantauan dilakukan untuk memastikan bahwa rekomendasi teknis tetap sesuai dengan perubahan kondisi fisik wilayah, perubahan pemanfaatan ruang, dan dinamika bahaya geologi. Pemantauan wajib dilakukan pada kawasan sesuai bersyarat, terbatas, kawasan sekitar mata air, daerah resapan penting, kawasan rawan gerakan tanah, dataran banjir, kawasan pesisir, dan kawasan yang mengalami perubahan lahan cepat.

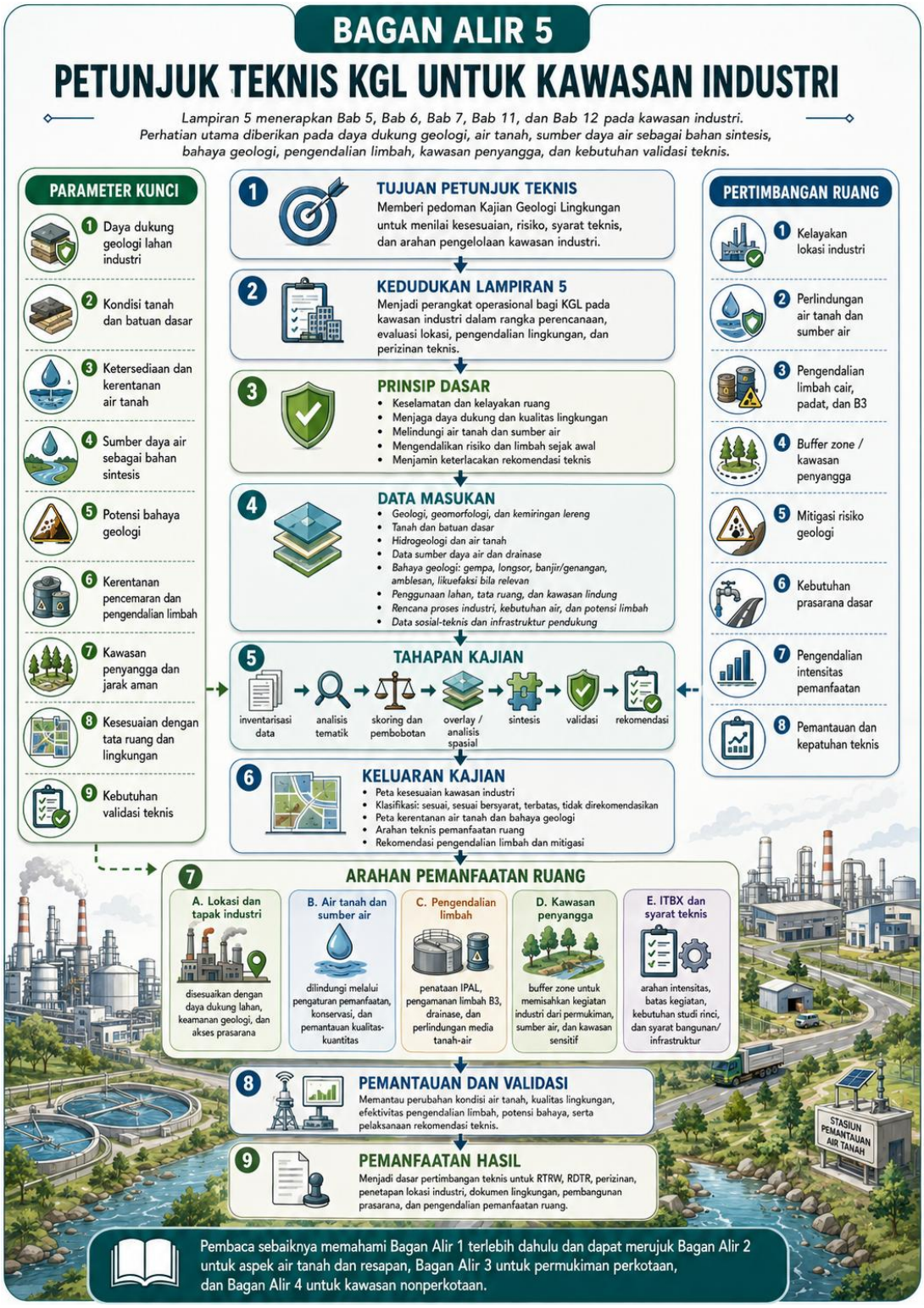
- perubahan penggunaan lahan dan tutupan lahan;
- kondisi sumber air, mata air, dan kualitas air lokal;
- fungsi resapan dan perubahan limpasan permukaan;
- stabilitas lereng, erosi, dan indikasi gerakan tanah;
- kejadian banjir, genangan, abrasi, atau gangguan pesisir bila relevan;
- kinerja sanitasi, drainase, dan prasarana dasar;
- pelaksanaan syarat teknis dalam peraturan zonasi dan izin pemanfaatan ruang.

D. Pemutakhiran

Pemutakhiran dilakukan paling sedikit satu kali dalam lima tahun atau lebih cepat apabila terdapat perubahan tata ruang, perubahan penggunaan lahan, kejadian bencana, perubahan sumber air, perubahan tingkat bahaya, pembangunan prasarana besar, atau temuan teknis baru. Pemutakhiran wajib memperbarui peta, basis data, kelas kesesuaian, rekomendasi teknis, dan matriks ITBX.

X. PENUTUP

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Permukiman Nonperkotaan menjadi dasar operasional untuk memastikan bahwa pengembangan permukiman nonperkotaan dilakukan sesuai daya dukung geologi, memperhitungkan bahaya geologi, melindungi sumber air dan daerah resapan, mempertahankan fungsi lingkungan penting, serta menjaga keselamatan dan kesehatan masyarakat. Petunjuk teknis ini dapat disempurnakan berdasarkan perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi pemetaan, hasil pemantauan, dan kebutuhan harmonisasi kebijakan nasional.



Gambar L-5 Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Industri

Lampiran 5:

Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Industri

Lampiran 5 menerapkan Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, dan Bab 12 pada kawasan industri. Perhatian utama diberikan pada daya dukung geologi, air tanah, sumber daya air sebagai bahan sintesis, bahaya geologi, pengendalian limbah, kawasan penyangga, dan kebutuhan validasi teknis.

Tabel L5.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 5, Bab 7, Bab 10, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Pedoman operasional untuk daya dukung kawasan industri, faktor penyisih, fasilitas berisiko, pengaturan zonasi, dan ITBX.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L5.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kawasan industri merupakan salah satu peruntukan ruang yang mempunyai intensitas pemanfaatan lahan tinggi, kebutuhan air dan energi besar, ketergantungan pada jaringan logistik dan utilitas, serta potensi dampak lingkungan yang memerlukan pengendalian sejak tahap perencanaan. Oleh karena itu, penetapan kawasan industri tidak cukup didasarkan pada ketersediaan lahan, akses transportasi, atau kedekatan dengan pusat ekonomi, tetapi harus memperhatikan daya dukung geologi, faktor pembatas geologi, bahaya geologi, kondisi hidrogeologi, sumber daya air sebagai bahan sintesis geologi lingkungan, serta keterkaitan dengan kawasan lindung dan permukiman di sekitarnya.

Kajian Geologi Lingkungan untuk kawasan industri disusun untuk menilai kesesuaian lahan, menetapkan syarat teknis, mengidentifikasi pembatas, mengarahkan mitigasi, dan menerjemahkan hasil kajian ke dalam pengaturan zonasi serta matriks ITBX. Dengan demikian, hasil analisis tidak berhenti

sebagai deskripsi kondisi lahan, tetapi menjadi instrumen teknis dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, persetujuan lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Petunjuk Teknis ini menggunakan pendekatan umum yang berlaku untuk kawasan industri di berbagai wilayah, serta memuat ketentuan khusus untuk kawasan industri pesisir, kawasan industri dengan fasilitas berisiko tinggi, kawasan industri yang berhubungan dengan pelabuhan, dan kawasan industri pada lahan hasil reklamasi. Pendekatan tersebut disusun dengan memperhatikan pengalaman penyusunan pedoman geologi lingkungan untuk kawasan industri Pantura Jawa, yang menekankan pentingnya pembacaan kawasan industri sebagai sistem darat, muara, pesisir, sumber daya air, tanah dasar, jaringan utilitas, dan kawasan terpapar di sekitarnya.

B. Kedudukan Lampiran

Lampiran ini merupakan Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Industri yang menjadi bagian tidak terpisahkan dari Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral tentang Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan. Ketentuan dalam Lampiran ini digunakan bersama dengan Lampiran I tentang Pedoman Umum Kajian Geologi Lingkungan.

II. KEDUDUKAN, MAKSUD, TUJUAN, DAN RUANG LINGKUP

A. Kedudukan

Petunjuk Teknis ini berkedudukan sebagai acuan operasional bagi pelaksanaan, penelaahan, validasi, dan pemanfaatan hasil Kajian Geologi Lingkungan untuk kawasan industri, baik pada tahap penapisan awal, studi kesesuaian rinci, verifikasi tapak, penyusunan rekomendasi teknis, maupun penyusunan arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX.

B. Maksud

Petunjuk Teknis ini dimaksudkan untuk menyeragamkan metode analisis, data minimum, parameter penilaian, klasifikasi zona kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, format keluaran, serta pemanfaatan hasil Kajian Geologi Lingkungan untuk kawasan industri.

C. Tujuan

- menilai kesesuaian lahan kawasan industri berdasarkan daya dukung geologi, faktor pembatas, faktor penyisih, bahaya geologi, dan kebutuhan pengendalian lingkungan;
- menetapkan dasar teknis bagi penentuan lokasi, fungsi, intensitas pemanfaatan ruang, dan syarat pembangunan kawasan industri;
- mengidentifikasi kawasan yang sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, atau tidak sesuai untuk fungsi industri;
- menyusun rekomendasi teknis untuk RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang; dan
- menyusun arahan matriks ITBX untuk kegiatan industri, prasarana pendukung, utilitas, kawasan penyangga, dan kegiatan nonindustri yang berhubungan dengan kawasan industri.

D. Ruang Lingkup

Ruang lingkup Petunjuk Teknis ini meliputi kawasan peruntukan industri, kawasan industri terencana, kawasan industri yang telah berkembang, kawasan industri pesisir, kawasan industri berbasis pelabuhan, kawasan industri yang memiliki fasilitas berisiko tinggi, kawasan pergudangan dan logistik yang menjadi bagian dari sistem industri, prasarana air baku, instalasi pengolahan air limbah, jaringan utilitas, koridor transportasi, serta kawasan penyangga di sekitarnya.

III. KERANGKA ANALISIS DAN PRINSIP PENILAIAN

A. Kerangka Analisis

Kajian Geologi Lingkungan untuk kawasan industri dilakukan melalui integrasi antara

data geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, sumber daya air, bahaya geologi, penggunaan lahan, tata ruang, kondisi lingkungan, prasarana, dan karakter kegiatan industri. Analisis dilakukan untuk menjawab tiga pertanyaan pokok: apakah lahan mampu mendukung fungsi industri; apakah pembatas dan bahaya geologi dapat dikendalikan; dan bagaimana syarat teknis, pembatas, serta pengaturan zonasi harus ditetapkan agar pemanfaatan ruang tetap aman dan berkelanjutan.

B. Prinsip Penilaian

- berbasis data geologi lingkungan yang terukur, dapat ditelusuri, dan dapat divalidasi;
- mempertimbangkan daya dukung tanah dan batuan, sumber daya air, fungsi resapan, dan hubungan kawasan industri dengan wilayah sekitar;
- memperhitungkan bahaya geologi, bahaya pesisir, dan risiko berantai terhadap fasilitas industri, utilitas, permukiman, dan lingkungan;
- menerapkan faktor penyisih sebelum penilaian akhir zona kesesuaian lahan;
- membedakan kawasan industri ringan, menengah, berat, fasilitas berisiko tinggi, prasarana pendukung, dan kawasan penyangga;
- menghasilkan rekomendasi teknis yang dapat langsung diterjemahkan ke dalam pengaturan zonasi dan matriks ITBX; dan
- mendorong pemantauan dan pemutakhiran data secara berkala, terutama pada kawasan yang dinyatakan sesuai bersyarat atau terbatas.

IV. DATA DAN INFORMASI DASAR

Data dan informasi dasar paling sedikit meliputi data geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, sumber daya air permukaan dan air tanah sebagai bahan sintesis geologi lingkungan, bahaya geologi, penggunaan lahan, tutupan lahan, tata ruang, jaringan prasarana, kawasan lindung, kawasan permukiman, dan data lingkungan hidup yang relevan.

Tabel L5.3. Kelompok data dan Informasi Dasar dalam KGL Kawasan Industri

Kelompok Data	Data Minimum	Kegunaan dalam Analisis
Geologi dan geomorfologi	litologi, struktur geologi, bentuk lahan, kemiringan lereng, elevasi, proses geomorfik aktif	menentukan daya dukung, pembatas fisik, dan satuan analisis lahan
Geologi teknik	sifat tanah dan batuan, kedalaman lapisan pendukung, potensi konsolidasi, stabilitas lereng/timbunan, kerentanan fondasi	menilai kemampuan lahan menerima beban bangunan, jalan, utilitas, tangki, gudang, dan prasarana industri
Hidrogeologi dan sumber daya air	CAT, daerah resapan, daerah lepasan, muka air tanah, kualitas air, sumber air permukaan, kapasitas air baku	menilai keterbatasan air, risiko gangguan sistem air, dan kebutuhan pembatasan pemanfaatan air tanah
Bahaya geologi	gempa bumi, likuefaksi, gerakan tanah, banjir, rob, penurunan muka tanah, intrusi air asin, abrasi, perubahan garis pantai	menetapkan pembatas utama, kebutuhan mitigasi, dan tingkat risiko kawasan industri
Tata ruang dan lingkungan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, kawasan permukiman, kawasan pertanian, dokumen lingkungan	menilai kesesuaian rencana industri dengan peruntukan ruang dan daya dukung lingkungan

Kelompok Data	Data Minimum	Kegunaan dalam Analisis
Prasarana dan sosial-spasial	jalan, pelabuhan, rel, jaringan energi, drainase, air minum, sanitasi, permukiman, fasilitas umum	menilai keterpaparan, kebutuhan penyangga, dan konsekuensi kegagalan fungsi kawasan industri

V. TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

A. Tahap I - Penapisan Awal

Tahap I dilakukan untuk menyaring wilayah yang layak dilanjutkan ke analisis rinci, wilayah yang memerlukan data tambahan, dan wilayah yang harus dieliminasi karena faktor penyisih atau pembatas fatal. Penapisan dilakukan melalui kompilasi data sekunder, tumpang susun peta tematik, telaah tata ruang, dan verifikasi lapangan secukupnya.

- mengidentifikasi kawasan industri yang secara spasial sesuai dengan rencana tata ruang;
- menyisihkan kawasan lindung, sempadan, daerah resapan penting, kawasan rawan bahaya sangat tinggi, dan kawasan yang tidak sesuai secara hukum;
- mengidentifikasi pembatas utama seperti tanah lunak, gerakan tanah, banjir, rob, penurunan muka tanah, intrusi asin, atau kedekatan dengan permukiman;
- menetapkan kawasan prioritas untuk studi kesesuaian rinci.

B. Tahap II - Studi Kesesuaian Rinci

Tahap II dilakukan pada kawasan prioritas untuk menilai daya dukung geologi, bahaya geologi, kerentanan lingkungan, kebutuhan air, risiko pencemaran, kebutuhan penyangga, dan syarat teknis pengembangan. Tahap ini harus menghasilkan peta zona kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, dan arahan awal ITBX.

C. Tahap III - Verifikasi Tapak dan Parameter Teknis

Tahap III dilakukan apabila kawasan atau bagian kawasan dinyatakan sesuai bersyarat atau terbatas, atau apabila terdapat rencana fasilitas dengan beban besar, fasilitas berisiko tinggi, tangki, terminal, pelabuhan, instalasi pengolahan limbah, utilitas utama, atau struktur penting lain. Verifikasi tapak menghasilkan parameter teknis untuk desain fondasi, perbaikan tanah, drainase, pengamanan banjir, perlindungan pesisir, pengendalian pencemaran, dan pemantauan.

VI. PARAMETER PENILAIAN KESESUAIAN LAHAN

A. Faktor Daya Dukung Geologi

Faktor daya dukung geologi digunakan untuk menilai kemampuan lahan mendukung fungsi industri dan prasarana pendukung. Parameter utama meliputi kondisi tanah dan batuan, morfologi, kemiringan lereng, stabilitas lahan, kedalaman muka air tanah, drainase alami, ketersediaan air baku, serta hubungan kawasan dengan daerah resapan dan kawasan lindung.

Tabel L5.4. Parameter Utama dalam KGL Kawasan Industri

Kelompok Data	Data Minimum	Kegunaan dalam Analisis
Geologi dan geomorfologi	litologi, struktur geologi, bentuk lahan, kemiringan lereng, elevasi, proses geomorfik aktif	menentukan daya dukung, pembatas fisik, dan satuan analisis lahan
Geologi teknik	sifat tanah dan batuan, kedalaman lapisan pendukung, potensi konsolidasi, stabilitas lereng/timbunan, kerentanan fondasi	menilai kemampuan lahan menerima beban bangunan, jalan, utilitas, tangki, gudang, dan prasarana industri
Hidrogeologi dan sumber daya air	CAT, daerah resapan, daerah lepasan, muka air tanah, kualitas air, sumber air permukaan, kapasitas air baku	menilai keterbatasan air, risiko gangguan sistem air, dan kebutuhan pembatasan pemanfaatan air tanah

Kelompok Data	Data Minimum	Kegunaan dalam Analisis
Bahaya geologi	gempa bumi, likuefaksi, gerakan tanah, banjir, rob, penurunan muka tanah, intrusi air asin, abrasi, perubahan garis pantai	menetapkan pembatas utama, kebutuhan mitigasi, dan tingkat risiko kawasan industri
Tata ruang dan lingkungan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, kawasan permukiman, kawasan pertanian, dokumen lingkungan	menilai kesesuaian rencana industri dengan peruntukan ruang dan daya dukung lingkungan
Prasarana dan sosial-spasial	jalan, pelabuhan, rel, jaringan energi, drainase, air minum, sanitasi, permukiman, fasilitas umum	menilai keterpaparan, kebutuhan penyangga, dan konsekuensi kegagalan fungsi kawasan industri

Tabel L5.5. Peran Faktor Daya Dukung Geologi dalam KGL Kawasan Industri

Komponen	Indikator Penilaian	Arah Rekomendasi
Tanah dan batuan	ketebalan tanah lunak, daya dukung, potensi konsolidasi, stabilitas timbunan, kedalaman lapisan pendukung	semakin stabil dan mudah dikendalikan, semakin tinggi kesesuaian
Morfologi dan lereng	kemiringan lereng, elevasi, posisi terhadap dataran banjir atau dataran pesisir	lereng landai-stabil dan tidak rawan genangan lebih sesuai untuk industri
Sumber daya air	ketersediaan air permukaan, kapasitas jaringan air baku, jarak ke sumber air, kualitas air	prioritas diberikan pada sumber air permukaan dan sistem perpipaan yang andal
Drainase alami	arah aliran, kapasitas pelepasan air, koneksi ke sungai, kanal, atau muara	kawasan harus menjaga koridor pelepasan air dan tidak memperbesar risiko genangan
Fungsi resapan	zona resapan air, tutupan lahan, kemampuan infiltrasi, peran imbuhan	zona resapan sangat tinggi dan tinggi dibatasi untuk fungsi industri intensif

B. Faktor Bahaya Geologi dan Lingkungan

Faktor bahaya geologi digunakan untuk menilai potensi gangguan terhadap keselamatan, keberlanjutan fungsi industri, dan keamanan kawasan sekitar. Parameter yang digunakan disesuaikan dengan konteks wilayah, jenis industri, serta keterpaparan prasarana dan masyarakat.

Tabel L5.6. Peran Faktor Kendala Geologi dalam KGL Kawasan Industri

Bahaya/Pembatas	Indikator Minimum	Implikasi Teknis
Gempa bumi	intensitas guncangan, kondisi tanah setempat, amplifikasi, standar desain seismik	desain struktur dan utilitas wajib mengikuti tingkat bahaya tapak
Likuefaksi	material jenuh air, muka air tanah dangkal, data CPT/SPT, tingkat guncangan	perlu perbaikan tanah atau pembatasan fasilitas rentan
Gerakan tanah	kemiringan lereng, litologi, struktur geologi, penggunaan lahan, curah hujan	fungsi industri intensif dibatasi pada lereng rentan
Banjir dan rob	kedalaman, frekuensi, durasi, jalur aliran, kapasitas drainase	memerlukan ruang retensi, elevasi aman, dan sistem drainase adaptif
Penurunan muka tanah	laju perubahan elevasi, penyebab dominan, pembebanan, pengambilan air tanah	mewajibkan pemantauan dan pembatasan bangunan/fasilitas rentan
Intrusi air asin	DHL, klorida, arah aliran air tanah, kedekatan dengan pantai/muara	membatasi pengambilan air tanah dan mengarahkan sumber air alternatif
Risiko pencemaran	permeabilitas tanah, kedalaman muka air tanah, kerentanan akuifer, jarak ke sumur dan sungai	memerlukan perlindungan lapisan dasar, sistem pengendalian limbah, dan pemantauan kualitas air

C. Faktor Nongeologi

Faktor nongeologi digunakan untuk membaca keterpaparan dan kebutuhan operasional kawasan industri. Komponen yang dinilai meliputi kepadatan penduduk sekitar, jarak terhadap permukiman dan fasilitas umum, akses transportasi, ketersediaan jaringan energi, status tata ruang, kapasitas prasarana, dan sensitivitas lingkungan di sekitar kawasan.

D. Faktor Penyisih

Faktor penyisih digunakan untuk mengeluarkan atau membatasi wilayah tertentu sebelum skoring akhir dilakukan. Faktor penyisih mencakup kawasan lindung, KCAG, KBAK, daerah resapan air dengan fungsi perlindungan sangat tinggi, sempadan pantai, sempadan sungai, sempadan mata air, kawasan rawan bencana sangat tinggi, sumber air baku, kawasan konservasi, dan wilayah yang menurut ketentuan tata ruang tidak diperuntukkan bagi industri.

VII. SKORING, PEMBOBOTAN, DAN KLASIFIKASI ZONA KESESUAIAN LAHAN

Skoring dan pembobotan dilakukan setelah faktor penyisih diterapkan. Parameter yang dinilai diberi skor sesuai tingkat dukungan atau tingkat pembatasnya. Bobot ditetapkan berdasarkan peran parameter terhadap keberhasilan dan keselamatan pengembangan kawasan industri. Untuk kawasan pesisir, dataran banjir, tanah lunak, atau kawasan dengan fasilitas berisiko tinggi, bobot bahaya geologi, geologi teknik, dan tata air dapat ditingkatkan.

Tabel L5.7. Bobot acuan faktor berpengaruh dalam KGL Kawasan Industri

Faktor	Bobot Acuan	Catatan Penerapan
Daya dukung geologi	25-35%	ditingkatkan pada kawasan dengan bangunan berat, fasilitas logistik besar, atau kebutuhan fondasi khusus
Bahaya geologi dan lingkungan	30-40%	ditingkatkan pada kawasan rawan banjir, rob, likuefaksi, gerakan tanah, atau penurunan muka tanah
Sumber daya air dan hidrogeologi	15-25%	ditingkatkan pada kawasan dengan kebutuhan air besar atau kerentanan akuifer tinggi
Faktor nongeologi	10-20%	digunakan untuk membaca keterpaparan, tata ruang, prasarana, dan sensitivitas sosial-lingkungan
Faktor penyisih	tidak diskor	digunakan sebagai eliminasi atau pembatas sebelum kelas akhir ditetapkan

Tabel L5.8. Makna Kelas Kesesuaian Lahan dalam KGL Kawasan Industri

Kelas Kesesuaian	Makna Teknis	Tindak Lanjut
Sangat sesuai	daya dukung baik, pembatas rendah, risiko dapat dikendalikan dengan standar umum	dapat diarahkan untuk kawasan industri dengan standar teknis umum dan pemantauan dasar
Sesuai	daya dukung cukup baik dan pembatas masih dapat diterima	dapat digunakan dengan syarat teknis umum dan pengelolaan lingkungan rutin
Sesuai bersyarat	terdapat pembatas yang masih dapat dikelola melalui rekayasa, mitigasi, pembatasan, dan pemantauan	wajib memuat syarat teknis dalam RDTR, desain kawasan, dokumen lingkungan, dan rekomendasi teknis
Terbatas	pembatas kuat; hanya jenis industri tertentu atau intensitas rendah yang dapat diterima	fungsi industri berat dan fasilitas berisiko tinggi dibatasi; wajib pemantauan berkala
Tidak sesuai	terdapat faktor penyisih, pembatas fatal, atau risiko yang tidak dapat diterima	fungsi industri tidak direkomendasikan; diarahkan untuk fungsi lindung, penyangga, pemulihan, atau fungsi lain yang sesuai

VIII. PENGATURAN ZONASI DAN MATRIKS ITBX

Zona kesesuaian lahan wajib diterjemahkan ke dalam arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX. Matriks ITBX disusun untuk memastikan bahwa rekomendasi geologi lingkungan dapat digunakan langsung dalam peraturan zonasi, pengendalian pemanfaatan ruang, dan penilaian kegiatan pemanfaatan ruang.

Tabel L5.9. ITBX Kesesuaian Lahan dalam KGL Kawasan Industri

Zona Kesesuaian	Industri Ringan/Menengah	Industri Berat/Fasilitas Berisiko Tinggi	Prasarana Pendukung dan Utilitas	Arahan Utama
Sangat sesuai	I	B	I	memenuhi standar teknis umum, pengendalian lingkungan, dan pemantauan dasar
Sesuai	I	B	I/T	memerlukan syarat teknis umum, pengelolaan drainase, air baku, dan limbah
Sesuai bersyarat	B	B/X	B	wajib memenuhi mitigasi, pembatasan intensitas, pengendalian air, penyangga, dan pemantauan
Terbatas	T/B	X	T/B	hanya kegiatan tertentu; industri berat dan fasilitas berisiko tinggi tidak direkomendasikan
Tidak sesuai	X	X	X/T	fungsi industri tidak diperbolehkan; dapat diarahkan untuk lindung, penyangga, atau pemulihan sesuai ketentuan

Keterangan: I = diizinkan; T = terbatas; B = bersyarat; X = tidak diperbolehkan. Penentuan akhir tetap harus memperhatikan RTRW, RDTR, peraturan zonasi, persetujuan lingkungan, dan ketentuan sektor terkait.

IX. KETENTUAN KHUSUS KAWASAN INDUSTRI PESISIR, FASILITAS BERISIKO TINGGI, DAN KAWASAN INDUSTRI PADA LAHAN HASIL REKLAMASI

A. Kawasan Industri Pesisir

Kawasan industri pesisir harus dinilai sebagai sistem yang menghubungkan wilayah darat, muara, pantai, perairan dangkal, drainase, sumber air, dan kawasan belakang. Analisis wajib memperhatikan perubahan garis pantai, abrasi, akresi, rob, banjir, tanah dasar lunak, penurunan muka tanah, intrusi air asin, dinamika muara, serta potensi gangguan terhadap sistem pelepasan air.

B. Fasilitas Berisiko Tinggi

Fasilitas berisiko tinggi seperti tangki, instalasi bahan berbahaya, terminal, pelabuhan, pembangkit, jaringan pipa, dan instalasi pengolahan limbah wajib ditempatkan pada zona yang memiliki daya dukung tinggi, risiko geologi dapat dikendalikan, akses evakuasi dan penanganan darurat memadai, serta zona penyangga yang cukup terhadap permukiman dan fasilitas umum. Pada zona sesuai bersyarat atau terbatas, fasilitas tersebut hanya dapat direkomendasikan apabila hasil verifikasi tapak menunjukkan risiko dapat dikendalikan secara teknis dan kelembagaan.

C. Kawasan Industri pada Lahan Hasil Reklamasi

Kawasan industri pada lahan hasil reklamasi hanya dapat direkomendasikan apabila tersedia pembuktian geologi teknik, hidrogeologi, dan geologi pesisir yang memadai. Kajian wajib menilai

kondisi tanah dasar sebelum reklamasi, karakter material timbunan, umur dan tingkat pemadatan lahan, potensi konsolidasi, stabilitas tepi, perubahan arus, dinamika sedimen, risiko rob dan banjir, serta hubungan reklamasi dengan sistem drainase dan kualitas air.

D. Kawasan Industri yang Berdekatan dengan Permukiman atau Kawasan Lindung

Kawasan industri yang berdekatan dengan permukiman, fasilitas umum, daerah resapan, sumber air baku, KCAG, KBAK, kawasan konservasi, atau kawasan rawan bencana wajib memiliki zona penyangga, syarat pengendalian limbah, pengendalian lalu lintas, pemantauan kualitas air dan tanah, serta rencana tanggap darurat. Apabila zona penyangga tidak dapat dipenuhi, kegiatan industri tertentu harus dibatasi atau tidak direkomendasikan.

X. KELUARAN, PELAPORAN, VALIDASI TEKNIS, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAKHIRAN

A. Keluaran Wajib

- laporan teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk kawasan industri;
- peta geologi lingkungan dan peta tematik pendukung;
- peta faktor penyisih;
- peta zona kesesuaian lahan kawasan industri;
- peta rekomendasi teknis dan pengaturan zonasi;
- matriks ITBX;
- basis data geospasial beserta metadata; dan
- rencana pemantauan dan pemutakhiran.

B. Format Laporan

Laporan paling sedikit memuat pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, metode, data dan sumber data, kondisi geologi lingkungan, analisis daya dukung, analisis bahaya geologi, analisis sumber daya air sebagai bahan sintesis geologi lingkungan, faktor penyisih, sintesis kesesuaian lahan, rekomendasi teknis, matriks ITBX, rencana pemantauan, kesimpulan, dan lampiran data.

C. Validasi Teknis

Validasi teknis dilakukan terhadap kecukupan data, ketepatan metode, kesesuaian skala, konsistensi interpretasi, kesahihan peta, kesesuaian rekomendasi teknis, dan kelayakan matriks ITBX. Hasil validasi dituangkan dalam berita acara atau dokumen validasi yang menjadi dasar pemanfaatan hasil analisis.

D. Pemantauan dan Pemutakhiran

Pemantauan dilakukan terhadap parameter yang berpengaruh terhadap zona kesesuaian dan rekomendasi teknis, antara lain perubahan penggunaan lahan, banjir, rob, penurunan muka tanah, gerakan tanah, kualitas air, muka air tanah, intrusi air asin, kondisi drainase, kinerja prasarana, dan indikasi pencemaran. Pemutakhiran dilakukan paling sedikit 1 (satu) kali dalam 5 (lima) tahun atau lebih cepat apabila terdapat perubahan kondisi lapangan, perubahan tata ruang, kejadian bencana, pembangunan fasilitas berisiko tinggi, atau temuan teknis baru.

XI. PENUTUP

Petunjuk Teknis ini menjadi acuan operasional untuk memastikan bahwa pengembangan kawasan industri dilakukan sesuai daya dukung geologi, memperhatikan faktor pembatas dan bahaya geologi, menjaga fungsi sumber daya air dan daerah resapan sebagai bahan sintesis geologi lingkungan, melindungi kawasan sekitar, serta menghasilkan pengaturan zonasi dan matriks ITBX yang dapat digunakan dalam pengendalian pemanfaatan ruang. Petunjuk Teknis ini dapat disempurnakan berdasarkan perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi pemetaan, hasil pemantauan, dan kebutuhan harmonisasi kebijakan nasional.

Lampiran 6:

Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Peruntukan Pertambangan

Lampiran 6 menghubungkan GTL dengan peruntukan pertambangan melalui pembacaan potensi sumber daya, daya dukung, faktor pembatas, faktor penyisih, pemulihan, dan pengendalian ruang. Lampiran ini perlu dibaca dengan prinsip kehati-hatian terhadap fungsi resapan, kawasan lindung geologi, dan keselamatan masyarakat.

Tabel L6.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 3, Bab 4, Bab 7, Bab 10, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Pedoman penilaian potensi, pembatas lingkungan geologi, prioritas pemanfaatan, zonasi pertambangan, pemulihan, dan ITBX.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L6.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

Petunjuk Teknis ini disusun sebagai acuan operasional dalam melaksanakan Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Peruntukan Pertambangan (KPP). Pedoman ini menempatkan informasi geologi lingkungan sebagai dasar untuk menilai kelayakan ruang, menetapkan zona kesesuaian, menentukan syarat teknis, serta mengarahkan pengendalian pemanfaatan ruang pada wilayah yang memiliki potensi mineral, batubara, bukan logam, batuan, dan sumber daya geologi lain yang terkait dengan kegiatan pertambangan.

KPP tidak cukup ditentukan oleh keberadaan komoditas tambang. Kelayakan ruang untuk pertambangan harus dinilai berdasarkan hubungan antara potensi sumber daya geologi, kondisi morfologi, sifat tanah dan batuan, keairan, daerah resapan air, mata air, sungai, kawasan lindung, kawasan permukiman, lahan produktif, bahaya geologi, dampak lingkungan,

aksesibilitas, serta kemungkinan pengelolaan pascatambang.

Kajian Geologi Lingkungan untuk KPP bertujuan agar kegiatan pertambangan dapat ditempatkan pada ruang yang secara geologi lingkungan paling layak, paling terkendali dampaknya, dan paling memungkinkan untuk dipulihkan setelah kegiatan berakhir. Dengan demikian, pedoman ini tidak menggantikan perizinan sektor pertambangan, tetapi menjadi dasar teknis untuk perencanaan tata ruang, penetapan zona, pengendalian kegiatan, dan penyusunan rekomendasi lingkungan geologi.

II. KEDUDUKAN, MAKSUD, TUJUAN, DAN RUANG LINGKUP

A. Kedudukan

Petunjuk Teknis ini merupakan bagian dari Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan dan digunakan sebagai acuan dalam penyusunan kajian geologi lingkungan untuk KPP pada skala wilayah, kawasan, zona, dan tapak kegiatan pertambangan.

Petunjuk Teknis ini dapat digunakan oleh Pemerintah Pusat, pemerintah daerah, Badan Geologi, pemrakarsa, tenaga ahli, konsultan, perguruan tinggi, dan pihak lain yang melaksanakan atau menelaah kajian geologi lingkungan untuk kebutuhan tata ruang, pengendalian pemanfaatan ruang, dan penilaian kelayakan KPP.

B. Maksud

Petunjuk Teknis ini dimaksudkan untuk menyeragamkan tata cara inventarisasi, pemetaan, analisis, sintesis, penilaian kelayakan, penyusunan peta zonasi, rekomendasi teknis, dan matriks ITBX untuk Kawasan Peruntukan Pertambangan.

C. Tujuan

- menentukan potensi kelayakan KPP berdasarkan aspek geologi lingkungan;
- menetapkan prioritas pemanfaatan ruang KPP berdasarkan sumber daya geologi, kondisi lahan, aksesibilitas, dan risiko lingkungan;
- menyusun zona pemanfaatan ruang pertambangan yang meliputi zona kegiatan utama, zona penyangga, zona pendukung, zona pemulihan, dan zona yang tidak direkomendasikan;
- menyediakan dasar teknis untuk penyusunan RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang;
- menerjemahkan hasil kajian geologi lingkungan ke dalam matriks ITBX yang dapat digunakan sebagai perangkat pengendalian ruang.

D. Ruang Lingkup

Ruang lingkup Petunjuk Teknis ini meliputi kajian geologi lingkungan untuk mineral logam, mineral bukan logam, batuan, batubara, dan kegiatan pertambangan lain sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan. Untuk minyak dan gas bumi serta panas bumi, pedoman ini dapat digunakan secara terbatas sebagai bahan pertimbangan geologi lingkungan, tanpa mengurangi ketentuan teknis dan perizinan sektor masing-masing.

- data dan informasi dasar Kawasan Peruntukan Pertambangan;
- tahapan penyelidikan dan analisis;
- penilaian potensi kelayakan;
- penentuan prioritas pemanfaatan ruang;
- penentuan zona kesesuaian geologi lingkungan;
- penyusunan rekomendasi teknis dan matriks ITBX;
- pelaporan, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran.

III. PRINSIP DAN KERANGKA ANALISIS

- Kajian Geologi Lingkungan untuk KPP dilaksanakan dengan prinsip kehati-hatian, berbasis data, bertahap, terukur, dapat diverifikasi, berorientasi pada perlindungan lingkungan, dan dapat diterjemahkan ke dalam pengaturan zonasi.
- Pertambangan hanya dapat diarahkan pada ruang yang secara geologi lingkungan memiliki potensi sumber daya dan pembatas yang dapat dikendalikan.
- Daerah resapan air, mata air penting, kawasan lindung geologi, kawasan rawan bencana tinggi, sempadan sungai, kawasan konservasi, lahan produktif bernilai tinggi, dan kawasan permukiman padat dan sedang harus diperlakukan sebagai faktor pembatas atau faktor penyisih sesuai tingkat kepentingannya.
- Kedalaman dan metode penambangan harus mempertimbangkan muka air tanah, sistem akuifer, risiko pencemaran, stabilitas lereng, serta dampak terhadap masyarakat dan lingkungan sekitar.
- Kegiatan pada tapak pertambangan harus memiliki arahan pascatambang sejak tahap perencanaan kawasan maupun tapak, termasuk pemulihan lahan, pengamanan lahan maupun lereng, pengelolaan air bersih dan limbah, serta pemanfaatan kembali lahan sesuai kondisi akhir yang direncanakan.
- Hasil analisis harus dapat diturunkan menjadi peta zona, daftar syarat teknis, matriks ITBX, dan rekomendasi tindak lanjut.

Tabel L6.3. Aspek Berpengaruh dalam KGL KPP

Aspek	Makna dalam analisis	Keluaran teknis
Sumber daya geologi	Jenis, sebaran, kualitas, dan tingkat keyakinan potensi bahan tambang.	Peta potensi bahan tambang dan kelas sumber daya.
Daya dukung geologi	Kemampuan morfologi, tanah, batuan, dan tata air mendukung kegiatan tambang.	Kelas daya dukung dan syarat teknis pemanfaatan.
Faktor pembatas	Bahaya geologi, daerah resapan, mata air, sungai, kawasan lindung, permukiman, lahan produktif, dan pembatas lain.	Daftar pembatas dan tingkat kendali yang diperlukan.
Faktor penyisih	Kawasan yang harus dieliminasi atau dibatasi tegas berdasarkan fungsi lindung, bahaya tinggi, atau ketentuan hukum.	Peta eliminasi dan zona yang tidak direkomendasikan.
Prioritas pemanfaatan	Penilaian gabungan antara potensi sumber daya, kondisi lahan, akses, dan manfaat ekonomi.	Kawasan prioritas utama, cadangan, dan berpotensi.
Zonasi dan ITBX	Terjemahan hasil analisis menjadi aturan pemanfaatan ruang.	Zona kegiatan, zona penyangga, zona pendukung, zona pemulihan, dan matriks ITBX.

IV. DATA DAN INFORMASI DASAR

Kajian Geologi Lingkungan untuk KPP paling sedikit menggunakan data geologi, sumber daya mineral atau batubara, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, sumber daya air, bahaya geologi, penggunaan lahan, kawasan lindung, permukiman, infrastruktur, tata ruang, dan data sosial-ekonomi yang relevan.

Tabel L6.4. Kelompok Data dan Kegunaannya dalam KGL KPP

Kelompok data	Komponen minimum	Kegunaan
Geologi dan sumber daya	Peta geologi, sebaran bahan tambang, jenis komoditas, kualitas, perkiraan sumber daya, data eksplorasi.	Menentukan potensi dan batas awal Kawasan Peruntukan Pertambangan.
Morfologi dan topografi	Elevasi, kemiringan lereng, bentuk lahan, satuan bentang alam, keterjangkauan lokasi.	Menilai kemudahan kegiatan, risiko erosi, dan arah pemulihan lahan.
Tanah dan batuan	Sifat fisik, tebal tanah penutup, tingkat pelapukan, stabilitas lereng, kekuatan massa batuan.	Menilai metode tambang, risiko lereng, dan kebutuhan pengamanan.
Hidrogeologi dan sumber daya air	Muka air tanah, akuifer, daerah resapan, mata air, sungai, kualitas air, hubungan air tanah-air permukaan.	Menilai risiko gangguan tata air, pencemaran, dan kebutuhan pengendalian.
Bahaya geologi	Gerakan tanah, banjir, gempa bumi, letusan gunung api, erosi, penurunan muka tanah, likuefaksi bila relevan.	Menilai tingkat risiko dan kebutuhan mitigasi.
Penggunaan lahan dan tata ruang	RTRW, RDTR, kawasan lindung, lahan pertanian, permukiman, fasilitas umum, kawasan budaya, pariwisata.	Menilai kesesuaian ruang dan faktor penyisih.
Sosial-ekonomi dan akses	Akses jalan, jarak ke konsumen, tenaga kerja, kegiatan ekonomi lokal, potensi konflik pemanfaatan ruang.	Menentukan prioritas pemanfaatan dan arahan pengelolaan.
Lingkungan dan pascatambang	Kondisi lingkungan awal, potensi dampak, rencana reklamasi, rencana pemulihan air dan lahan.	Menentukan kewajiban pengendalian dan pemulihan.

V. TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

Kajian Geologi Lingkungan untuk KPP dilaksanakan melalui tiga tahap utama, yaitu penentuan potensi kelayakan, penentuan prioritas pemanfaatan ruang, dan pengaturan zonasi pada kawasan prioritas.

A. Tahap I - Penentuan Potensi Kelayakan Kawasan Peruntukan Pertambangan

Tahap I bertujuan menginventarisasi dan menganalisis potensi sumber daya bahan tambang serta kondisi geologi lingkungan yang mendukung atau membatasi pemanfaatannya. Tahap ini menghasilkan delineasi awal KPP berdasarkan potensi geologi dan pembatas lingkungan.

- mengumpulkan peta geologi, laporan eksplorasi, data sumber daya, peta tata ruang, data penggunaan lahan, data kawasan lindung, dan data lingkungan;
- melakukan verifikasi lapangan pada lokasi potensi bahan tambang dan lokasi kegiatan yang telah berjalan;
- mengamati jenis komoditas, sebaran, kualitas, kondisi morfologi, sifat tanah dan batuan, keairan, bahaya geologi, dan penggunaan lahan;
- menilai hubungan lokasi potensi tambang dengan daerah resapan air, mata air, sungai, hulu DAS, kawasan lindung, permukiman, dan prasarana penting;
- menyusun peta potensi kelayakan KPP dan rekomendasi awal.

Tabel L6.5. Kriteria GL utama pada Kelompok Komoditas dalam KGL KPP

Kelompok komoditas	Kriteria geologi lingkungan utama	Arahan teknis
Mineral bukan logam dan batuan	Tidak berada pada daerah resapan air penting, tidak dekat dengan mata air utama, tidak mengganggu hulu sungai, tidak memotong sistem air tanah penting, tidak berada pada kawasan lindung.	Diprioritaskan pada lahan yang pembatasnya rendah, tanah penutup relatif tipis, produktivitas pertanian rendah, dan dapat dipulihkan menjadi bentuk lahan yang aman.

Kelompok komoditas	Kriteria geologi lingkungan utama	Arahan teknis
Mineral logam dan batubara	Dapat memiliki kedalaman kegiatan lebih besar, tetapi wajib mempertimbangkan akuifer, dewatering, stabilitas lereng, air asam tambang, dan dampak hilir.	Dapat direkomendasikan apabila dampak terhadap air, permukiman, dan kawasan lindung dapat dikendalikan serta rencana pascatambang jelas.
Kegiatan energi bawah permukaan terkait	Harus mempertimbangkan hubungan dengan air tanah, struktur geologi, bahaya geologi, tata ruang, dan keselamatan masyarakat.	Digunakan sebagai bahan pertimbangan geologi lingkungan dan tidak menggantikan ketentuan teknis sektor terkait.

B. Tahap II - Penentuan Prioritas Pemanfaatan Ruang

Tahap II bertujuan menentukan prioritas pemanfaatan ruang pada kawasan yang telah memiliki potensi kelayakan. Penilaian dilakukan dengan menggabungkan kelas sumber daya, faktor lahan, pangsa pasar atau kebutuhan pembangunan, dan pencapaian daerah.

Tabel L6.6. Kriteria dan Penilaian dalam KGL KPP

Kriteria	Parameter penilaian	Arah penilaian
Kelas sumber daya	Hipotetik, tereka, terunjuk, terukur, atau klasifikasi lain sesuai standar yang berlaku.	Semakin tinggi tingkat keyakinan dan kualitas data, semakin tinggi prioritas.
Faktor lahan	Daerah resapan air, mata air, hulu sungai, kawasan lindung, lahan pertanian, permukiman, kawasan rawan bencana, pariwisata, dan infrastruktur.	Semakin sedikit pembatas dan semakin mudah dikendalikan, semakin tinggi prioritas.
Pangsa pasar atau kebutuhan	Kebutuhan bahan tambang, kedekatan dengan konsumen, kontribusi terhadap pembangunan daerah, dan nilai ekonomi.	Semakin tinggi kebutuhan dan nilai manfaat, semakin tinggi prioritas.
Pencapaian daerah	Kemiringan medan, ketersediaan akses, jarak ke jalan utama, dan kebutuhan prasarana baru.	Semakin mudah dicapai tanpa mengganggu permukiman dan fungsi lingkungan, semakin tinggi prioritas.

Hasil penilaian prioritas dapat dinyatakan sebagai Kawasan Pertambangan Prioritas Utama, Kawasan Pertambangan Cadangan, dan Kawasan Pertambangan Berpotensi. Klasifikasi tersebut digunakan untuk menentukan wilayah yang perlu dianalisis lebih rinci dan wilayah yang harus dibatasi atau ditunda pengembangannya sampai data teknis memadai.

C. Tahap III - Pengaturan Zonasi Kawasan Prioritas

Tahap III bertujuan menerjemahkan hasil kajian geologi lingkungan ke dalam peta zonasi dan naskah pengaturan zonasi. Zonasi pertambangan disusun untuk membedakan ruang kegiatan utama, ruang penyangga, ruang pendukung, ruang pemulihan, serta ruang yang tidak direkomendasikan.

- menyusun peta zona berdasarkan sintesis potensi sumber daya, daya dukung, faktor pembatas, faktor penyisih, dan prioritas pemanfaatan;
- menentukan kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan untuk setiap zona;
- menetapkan syarat teknis kegiatan, pengelolaan air, pengamanan lereng, pengendalian erosi, perlindungan mata air, pengelolaan limbah, dan pemulihan lahan;
- menyusun matriks ITBX untuk digunakan dalam RDTR, peraturan zonasi, dokumen lingkungan, dan rekomendasi teknis.

Gambar L-6 Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Peruntukan Pertambangan

VI. PARAMETER PENILAIAN DAN FAKTOR PENYISIH

Tabel L6.7. Parameter Daya Dukung dan Potensi Sumber Daya

Parameter	Indikator minimum	Arah penilaian
Potensi bahan tambang	Jenis, kualitas, luas sebaran, ketebalan, tingkat keyakinan data, dan kelayakan teknis awal.	Semakin tinggi potensi dan keyakinan data, semakin tinggi nilai kelayakan.
Morfologi	Kemiringan lereng, posisi terhadap lembah, punggungan, dataran, dan akses topografi.	Medan yang lebih aman, terkendali, dan mudah dipulihkan diberi nilai lebih baik.
Tanah dan batuan	Kekuatan, tingkat pelapukan, kestabilan lereng, tebal tanah penutup, dan kemudahan pemulihan.	Semakin stabil dan semakin mudah dikelola, semakin tinggi nilai.
Keairan	Muka air tanah, mata air, sungai, daerah resapan, kualitas air, potensi air asam, dan risiko pencemaran.	Semakin rendah risiko terhadap sistem air, semakin tinggi nilai.
Akses dan prasarana	Kedekatan dengan jalan, kebutuhan jalur khusus, jarak ke konsumen, dan potensi gangguan pada masyarakat.	Akses yang baik dan tidak membebani permukiman diberi nilai lebih baik.

Tabel L6.8. Parameter Bahaya dan Dampak Geologi Lingkungan

Parameter	Indikator minimum	Arah pengendalian
Gerakan tanah	Kemiringan lereng, litologi, pelapukan, struktur geologi, sejarah kejadian.	Pembatasan bukaan, pengamanan lereng, drainase lereng, dan pemantauan.
Erosi dan sedimentasi	Kemiringan, tutupan lahan, curah hujan, jenis tanah, hubungan dengan sungai.	Pengendalian limpasan, perangkap sedimen, dan perlindungan alur air.
Banjir	Riwayat genangan, kedekatan dengan sungai, dataran banjir, kapasitas aliran.	Larangan atau pembatasan pada dataran banjir aktif dan perlindungan koridor air.
Kualitas air	DHL, pH, logam terlarut, padatan tersuspensi, indikasi air asam tambang.	Pengolahan air, pemisahan aliran bersih dan tercemar, pemantauan berkala.
Air tanah	Kedalaman muka air, akuifer, hubungan dengan pemakaian masyarakat, potensi dewatering.	Pembatasan kedalaman, pengelolaan dewatering, dan perlindungan akuifer masyarakat.
Kedekatan dengan kawasan sensitif	Mata air, resapan, kawasan lindung, permukiman, fasilitas umum, lahan pangan, situs budaya.	Penyisihan, zona penyangga, atau syarat teknis ketat.

C. Faktor Penyisih

Faktor penyisih merupakan faktor yang digunakan untuk mengeluarkan atau membatasi wilayah tertentu dari rekomendasi Kawasan Peruntukan Pertambangan. Faktor penyisih tidak dinilai dengan skor, tetapi dipakai sebagai keputusan awal sebelum sintesis akhir dilakukan.

- kawasan lindung geologi, KCAG, KBAK, dan kawasan konservasi lain sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan;
- daerah resapan air sangat tinggi dan tinggi yang berpengaruh penting terhadap tata air;
- mata air utama, sempadan mata air, sempadan sungai, sempadan danau, dan sumber air baku;
- kawasan rawan bencana geologi tinggi yang tidak dapat dikendalikan secara memadai;
- permukiman padat, fasilitas umum, prasarana vital, dan bangunan penting dengan jarak aman yang tidak terpenuhi;
- lahan pertanian pangan berkelanjutan, hutan lindung, kawasan pariwisata strategis, cagar budaya, dan kawasan lain yang secara hukum memiliki pembatas kuat;

- kawasan dengan risiko pencemaran air tanah atau air permukaan yang tidak dapat dikendalikan.

VII. SKORING, PEMBOBOTAN, DAN KLASIFIKASI ZONA

Skoring dan pembobotan dilakukan untuk memperoleh nilai sintesis geologi lingkungan. Bobot dapat disesuaikan menurut jenis komoditas, skala analisis, kualitas data, dan karakter lingkungan setempat. Faktor penyisih tetap diberlakukan sebagai ketentuan awal sebelum nilai akhir ditetapkan.

Tabel L6.9. Bobot acuan faktor faktor berpengaruh dalam KGL KPP

Faktor	Bobot acuan	Catatan penerapan
Potensi sumber daya geologi	30-40%	Bobot ditingkatkan pada tahap prioritas pemanfaatan ruang apabila data sumber daya telah terverifikasi.
Daya dukung geologi	20-30%	Menilai morfologi, tanah, batuan, keairan, dan kemampuan lahan menerima kegiatan.
Bahaya dan dampak geologi lingkungan	20-30%	Bobot ditingkatkan pada kawasan dengan gerakan tanah, erosi tinggi, banjir, atau risiko air.
Faktor nongeologi	10-20%	Menilai akses, kedekatan pasar, permukiman, lahan produktif, dan manfaat sosial-ekonomi.
Faktor penyisih	Tidak diskor	Digunakan untuk eliminasi atau pembatasan sebelum skor akhir ditetapkan.

Tabel L6.10. ITBX pada kelas kesesuaian lahan dalam KGL KPP

Kelas	Makna teknis	Tindak lanjut
Sangat sesuai / dapat diberi izin	Potensi sumber daya baik, daya dukung memadai, pembatas rendah, dan tidak bertentangan dengan faktor penyisih.	Dapat diarahkan untuk kegiatan pertambangan dengan syarat teknis umum dan rencana pemulihan.
Sesuai bersyarat / dapat diberi izin bersyarat	Potensi sumber daya ada, tetapi terdapat pembatas yang harus dikelola dengan syarat teknis.	Dapat dilaksanakan setelah memenuhi syarat pengendalian air, lereng, jarak aman, pemantauan, dan pemulihan.
Terbatas	Hanya bagian tertentu atau jenis kegiatan tertentu yang dapat diterima karena pembatas kuat.	Kegiatan intensif dibatasi; perlu desain khusus, zona penyangga, dan pemantauan ketat.
Tidak sesuai / tidak dapat diberi izin	Faktor penyisih kuat, risiko tidak dapat diterima, atau konflik ruang tidak dapat diselesaikan secara teknis.	Tidak direkomendasikan untuk kegiatan pertambangan pada peruntukan yang dianalisis.

VIII. ARAHAN ZONASI DAN MATRIKS ITBX

Zonasi Kawasan Peruntukan Pertambangan disusun berdasarkan hasil sintesis geologi lingkungan. Zonasi paling sedikit memuat zona kegiatan utama, zona penyangga, zona pendukung, zona pemulihan, dan zona yang tidak direkomendasikan. Setiap zona wajib dilengkapi arahan kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan.

Tabel L6.11. Arahan Zonasi ITBX dalam KGL KPP

Zona	Fungsi utama	Arahan umum
Zona kegiatan utama	Ruang untuk kegiatan penggalian atau produksi sesuai komoditas dan metode yang disetujui.	Diizinkan apabila memenuhi syarat teknis, pengelolaan air, pengamanan lereng, dan rencana pemulihan.
Zona penyangga	Ruang antara kegiatan utama dengan permukiman, sungai, mata air, lahan produktif, fasilitas umum, atau kawasan sensitif.	Kegiatan dibatasi untuk mereduksi dampak dan menjaga keselamatan ruang sekitar.
Zona pendukung	Ruang untuk jalan tambang, penyimpanan sementara, bengkel, kantor, pengolahan awal, dan fasilitas pendukung lain.	Diizinkan bersyarat dengan pengendalian debu, kebisingan, air limpasan, dan keselamatan.
Zona pemulihan	Ruang yang telah selesai dimanfaatkan atau memerlukan pemulihan fungsi lahan dan air.	Wajib dilakukan pemulihan, stabilisasi lereng, pengelolaan air, revegetasi, atau fungsi pascatambang yang disetujui.
Zona tidak direkomendasikan	Ruang dengan faktor penyisih atau risiko tidak dapat diterima.	Kegiatan pertambangan tidak diperbolehkan untuk peruntukan yang dianalisis.

Tabel L6.12. ITBX pada berbagai jenis kegiatan dalam KGL KPP

Jenis kegiatan	Zona kegiatan utama	Zona penyangga	Zona pendukung	Zona pemulihan	Zona tidak direkomendasikan
Kegiatan produksi	B	X	X	X	X
Pengolahan awal	T/B	X	B	X	X
Jalan dan prasarana tambang	B	T/B	B	T	X
Pengelolaan air tambang	B	B	B	B	X
Pemulihan lahan	B	B	B	I	B
Permukiman baru	X	X	X	X	X
Konservasi dan perlindungan sumber air	T	I	T	I	I
Penelitian dan pemantauan	I	I	I	I	I

Keterangan: I = diizinkan; T = terbatas; B = bersyarat; X = tidak diperbolehkan. Matriks ini merupakan contoh minimum dan harus disesuaikan dengan jenis komoditas, metode kegiatan, karakter tapak, tingkat risiko, dan ketentuan peraturan perundang-undangan.

IX. KETENTUAN KHUSUS MENURUT JENIS KOMODITAS

A. Mineral Bukan Logam dan Batuan

Untuk mineral bukan logam dan batuan, penilaian geologi lingkungan harus menekankan morfologi, kestabilan lereng, tebal tanah penutup, hubungan dengan daerah resapan, mata air, sungai, lahan pertanian, permukiman, dan rencana bentuk akhir lahan. Kegiatan harus diarahkan agar setelah pemanfaatan selesai, lahan dapat dipulihkan menjadi kondisi yang aman dan dapat digunakan kembali sesuai rencana tata ruang.

B. Mineral Logam dan Batubara

Untuk mineral logam dan batubara, penilaian harus menekankan kedalaman

kegiatan, metode tambang, pengelolaan air tambang, potensi air asam, stabilitas lereng, risiko pencemaran, hubungan dengan akuifer masyarakat, serta kewajiban pemantauan jangka panjang. Pada kegiatan bawah permukaan, analisis wajib memperhatikan amblesan, retakan permukaan, perubahan aliran air tanah, dan keselamatan permukiman di atas atau di sekitar area kegiatan.

C. Kawasan yang Bersinggungan dengan Daerah Resapan, KBAK, KCAG, dan Warisan Geologi

Apabila potensi pertambangan berada pada atau berdekatan dengan daerah resapan air penting, KBAK, KCAG, kawasan lindung geologi, atau warisan geologi, analisis wajib dilakukan dengan tingkat kehati-hatian tinggi. Kegiatan hanya dapat direkomendasikan apabila tidak menurunkan fungsi perlindungan, tidak merusak nilai utama geologi, tidak mengganggu mata air, dan tidak meningkatkan risiko terhadap masyarakat serta lingkungan sekitar.

X. PELAPORAN, VALIDASI TEKNIS, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAKHIRAN

A. Format Laporan

Laporan Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Peruntukan Pertambangan (KPP) paling sedikit memuat pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, metode, data dan sumber data, kondisi geologi lingkungan, potensi bahan tambang, faktor pendukung, faktor pembatas, faktor penyisih, skoring dan pembobotan, sintesis zona kesesuaian, rekomendasi teknis, matriks ITBX, rencana pemantauan, dan kesimpulan.

B. Peta dan Basis Data

Peta keluaran paling sedikit meliputi peta lokasi, peta geologi, peta sebaran bahan tambang, peta geomorfologi, peta hidrogeologi atau sumber daya air, peta bahaya geologi, peta penggunaan lahan, peta faktor penyisih, peta zona kesesuaian geologi lingkungan, peta zonasi pertambangan, dan peta rekomendasi teknis. Seluruh peta wajib memiliki sistem koordinat, skala, metadata, sumber data, dan tanggal pemutakhiran.

Tabel L6.13. Tahapan penentuan KPP dalam KGL

Tahap	Data minimum	Keluaran wajib
Tahap I - potensi kelayakan	Peta geologi, data sumber daya, peta morfologi, peta tata ruang, data penggunaan lahan, kawasan lindung, bahaya geologi.	Peta potensi kelayakan KPP dan daftar pembatas awal.
Tahap II - prioritas pemanfaatan	Data kelas sumber daya, lahan, pangsa pasar/kebutuhan, akses, sosial-ekonomi, konflik ruang.	Peta prioritas pemanfaatan dan klasifikasi kawasan utama, cadangan, atau berpotensi.
Tahap III - pengaturan zonasi	Data rinci tapak, hasil verifikasi lapangan, komponen geologi lingkungan, faktor penyisih, rencana kegiatan.	Peta zonasi, matriks ITBX, syarat teknis, dan rencana pemantauan.

C. Validasi Teknis

Hasil analisis yang digunakan untuk penyusunan tata ruang, RDTR, peraturan zonasi, rekomendasi teknis, atau pengendalian pemanfaatan ruang wajib melalui Validasi Teknis. Validasi Teknis meliputi kecukupan data, kesesuaian metode, konsistensi skoring dan pembobotan, kesahihan peta, ketepatan rekomendasi, serta kelayakan matriks ITBX.

D. Pemantauan dan Pemutakhiran

Pemantauan dilakukan terhadap perubahan bentuk lahan, kestabilan lereng, kualitas air, muka air tanah, sedimentasi, erosi, banjir, kualitas udara, kebisingan, kondisi zona penyangga, perkembangan pemulihan lahan, serta kepatuhan terhadap rekomendasi teknis. Pemutakhiran wajib dilakukan apabila terdapat perubahan tata ruang, perluasan kegiatan, perubahan metode

tambang, kejadian bencana, pencemaran, atau temuan teknis baru yang mempengaruhi rekomendasi geologi lingkungan.

XI. PENUTUP

Petunjuk Teknis ini menjadi acuan untuk memastikan bahwa Kawasan Peruntukan Pertambangan ditetapkan dan dimanfaatkan berdasarkan potensi sumber daya geologi, daya dukung geologi, faktor pembatas, faktor penyisih, risiko lingkungan, dan kemampuan pemulihan. Penerapan petunjuk teknis ini diharapkan dapat memperkuat keterpaduan antara pertambangan, tata ruang, perlindungan lingkungan, dan kepentingan masyarakat.

Petunjuk Teknis ini dapat disempurnakan sesuai perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi pemetaan, standar data, praktik pemulihan pascatambang, dan kebutuhan harmonisasi dengan peraturan perundang-undangan.

Gambar L-7. Bagan Alir Petunjuk teknis KGL untuk Kawasan Gunung Api Aktif

LAMPIRAN 7

Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Gunung Api Aktif

Petunjuk teknis ini disusun sebagai perangkat operasional Kajian Geologi Lingkungan untuk kawasan gunung api aktif. Naskah ini mengembangkan acuan Juknis GL Gunung Api Aktif 22 Desember 2024 dan menyesuaikannya dengan format lampiran teknis dalam Buku Geologi Tata Lingkungan. Fokus utama petunjuk ini adalah menerjemahkan data bahaya gunung api, sumber daya geologi, fungsi lingkungan, serta rencana pemanfaatan ruang menjadi kelas kesesuaian, faktor pembatas, faktor penyisih, syarat teknis, dan rekomendasi pengelolaan yang dapat digunakan dalam RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, dan pertimbangan teknis GTL.

Kedudukan Lampiran Dalam Buku GTL

Lampiran 7 ini berkedudukan sebagai perangkat operasional untuk menerapkan Bab 3 mengenai lingkungan geologi sebagai fondasi ruang hidup; Bab 4 mengenai daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas; Bab 5 mengenai pemetaan, skoring, pembobotan, dan analisis spasial; Bab 6 mengenai air tanah dan zona resapan; Bab 7 mengenai bahaya geologi dan pengendalian pemanfaatan ruang; Bab 8 dan Bab 9 mengenai perlindungan nilai geologi, Geopark, dan geowisata; Bab 10 dan Bab 11 mengenai kedudukan regulatif serta KGL untuk peruntukan lahan, kawasan, tapak, dan prasarana; serta Bab 12 mengenai kelembagaan, validasi, pertimbangan teknis, dan sistem informasi GTL. Dengan kedudukan tersebut, kawasan gunung api aktif tidak dibaca semata-mata sebagai kawasan rawan bencana, tetapi sebagai sistem geologi lingkungan yang memiliki sumber daya, fungsi lindung, nilai geologi, risiko, dan kebutuhan pengendalian ruang.

Dalam konteks tata ruang, petunjuk teknis ini membantu menjawab pertanyaan praktis: bagian mana dari kawasan gunung api aktif yang dapat dimanfaatkan, bagian mana yang masih dapat dimanfaatkan dengan syarat teknis, bagian mana yang perlu dibatasi, dan bagian mana yang tidak direkomendasikan untuk kegiatan tertentu. Jawaban tersebut harus selalu mengacu pada data bahaya gunung api yang sahih, peta kawasan rawan bencana, kondisi geologi lingkungan, penggunaan lahan, status perlindungan kawasan, dan rencana pembangunan yang akan dinilai.

Tabel L7.1. Hubungan Petunjuk Teknis KGA Aktif dengan bab utama Buku GTL

Bab utama	Keterkaitan dengan Juknis KGA Aktif	Implikasi operasional
Bab 5 Pemetaan dan analisis spasial	Menjadi dasar pemilihan parameter, skoring, pembobotan, tumpang susun peta, dan validasi spasial.	Setiap kelas kesesuaian harus dapat ditelusuri ke data tematik dan metode analisis.
Bab 6 Air tanah dan zona resapan	Menjelaskan pentingnya mata air, akuifer vulkanik, daerah imbuhan, drainase, dan kualitas air.	Ketersediaan serta perlindungan air menjadi syarat utama permukiman, relokasi, pertanian, dan layanan publik.

Bab utama	Keterkaitan dengan Juknis KGA Aktif	Implikasi operasional
Bab 7 Bahaya geologi	Menjadi dasar membaca KRB gunung api, lahar, awan panas, lava, abu, gas, gempa vulkanik, gerakan tanah, banjir, dan risiko ikutan.	Bahaya geologi menjadi faktor pembatas atau penyisih sesuai tingkat ancaman dan jenis kegiatan.
Bab 11 KGL untuk kawasan dan tapak	Memberi kerangka penapisan, kajian kawasan, kajian tapak, syarat teknis, dan rekomendasi operasional.	Keluaran dapat digunakan untuk RTRW, RDTR, dokumen lingkungan, relokasi, prasarana, dan pengembangan kawasan.
Bab 12 Validasi dan pertimbangan teknis	Menjadi dasar pemeriksaan mutu data, metode, rekomendasi, dan komunikasi teknis.	Kajian yang digunakan untuk keputusan publik harus tervalidasi dan memiliki metadata yang jelas.

Ringkasan Penggunaan

Petunjuk teknis ini digunakan oleh unit teknis geologi, pemerintah daerah, penyusun rencana tata ruang, penyusun KLHS dan dokumen lingkungan, konsultan, akademisi, pengelola kawasan, serta pemrakarsa kegiatan untuk menilai kesesuaian ruang pada kawasan gunung api aktif. Penggunaannya terutama penting pada kawasan permukiman eksisting, rencana relokasi, prasarana strategis, kawasan budidaya, kawasan pertanian, kawasan wisata, kawasan lindung geologi, kawasan konservasi, serta wilayah yang berada pada pengaruh langsung maupun tidak langsung aktivitas gunung api.

Petunjuk ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan kewenangan lembaga kebencanaan gunung api dalam menetapkan status aktivitas, rekomendasi kedaruratan, atau peta kawasan rawan bencana. Petunjuk ini menggunakan data tersebut sebagai acuan penting dalam Kajian Geologi Lingkungan, kemudian menerjemahkannya menjadi arahan pemanfaatan ruang, syarat teknis, rencana pengelolaan, dan kebutuhan pemantauan dalam kerangka GTL.

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia berada pada wilayah geologi yang sangat dinamis dan memiliki banyak gunung api aktif. Kondisi ini memberi dua makna sekaligus. Pada satu sisi, kawasan gunung api menyediakan tanah yang subur, sumber air, bahan bangunan, energi panas bumi, bentang alam bernilai, warisan geologi, dan peluang geowisata. Pada sisi lain, kawasan tersebut juga menghadirkan bahaya erupsi, aliran piroklastik, lava, lahar, abu vulkanik, gas, gempa vulkanik, gerakan tanah, banjir, erosi, dan ancaman ikutan yang dapat memengaruhi keselamatan masyarakat serta keberlanjutan pemanfaatan ruang.

Dalam praktik pembangunan, kawasan sekitar gunung api sering menjadi ruang hidup yang padat. Permukiman, pertanian, jalur transportasi, fasilitas pelayanan umum, kawasan wisata, kawasan industri kecil, jaringan energi, serta sumber air masyarakat dapat berada dalam wilayah yang dipengaruhi aktivitas vulkanik. Kondisi tersebut menuntut Kajian Geologi Lingkungan yang tidak hanya menyatakan suatu kawasan rawan atau tidak rawan, tetapi mampu menerjemahkan tingkat bahaya, daya dukung, daya tampung, dan faktor pembatas ke dalam keputusan ruang yang operasional.

Petunjuk teknis ini disusun untuk memperkuat keterhubungan antara data gunung api dan tata ruang. Dalam kerangka GTL, peta bahaya gunung api, peta KRB, data geologi lingkungan, data hidrogeologi, data geologi teknik, data penggunaan lahan, dan data sosial-ekonomi perlu dibaca bersama. Hasil pembacaan tersebut harus menghasilkan rekomendasi yang dapat digunakan untuk mengendalikan pemanfaatan ruang, merencanakan relokasi,

menentukan syarat teknis, menjaga fungsi lingkungan, dan mengurangi risiko sejak tahap perencanaan.

1.2 Kedudukan

Petunjuk teknis KGL KGA Aktif berkedudukan sebagai acuan operasional untuk menilai kawasan yang berada dalam pengaruh gunung api aktif. Kedudukan ini mencakup penilaian regional untuk arahan tata ruang, penilaian kawasan untuk pengembangan atau pengendalian pemanfaatan, dan penilaian tapak untuk kegiatan tertentu yang memerlukan pertimbangan teknis lebih rinci.

Petunjuk ini menggunakan istilah kawasan gunung api aktif sebagai ruang yang dipengaruhi oleh sistem vulkanik aktif, baik pada tubuh gunung api, lereng, kaki gunung, dataran sekitar, jalur sungai lahar, wilayah sebaran abu, wilayah yang berpotensi terkena gas, maupun area lain yang ditetapkan atau diindikasikan dalam peta bahaya dan peta KRB. Batas kajian tidak hanya mengikuti batas administrasi, tetapi harus mengikuti batas proses geologi dan potensi dampak terhadap ruang.

1.3 Maksud

Petunjuk teknis ini dimaksudkan sebagai pedoman untuk menyusun Kajian Geologi Lingkungan pada kawasan gunung api aktif secara tertib, terukur, dapat ditelusuri, dan dapat dipertanggungjawabkan. Pedoman ini mengarahkan penyusun kajian agar mampu mengintegrasikan data bahaya gunung api, sumber daya geologi, air tanah, bentuk lahan, tanah dan batuan, penggunaan lahan, kawasan lindung, serta rencana kegiatan menjadi rekomendasi teknis yang relevan bagi tata ruang dan pengelolaan lingkungan.

1.4 Tujuan

Tujuan petunjuk teknis ini adalah:

- memberi tata cara penapisan awal kawasan gunung api aktif berdasarkan KRB, bahaya ikutan, status perlindungan, dan rencana pemanfaatan ruang;
- menentukan data minimum, parameter, sumber data, dan metadata yang diperlukan dalam KGL KGA Aktif;
- menjelaskan cara menilai daya dukung geologi, daya tampung, faktor pembatas, dan faktor penyisih pada kawasan gunung api aktif;
- memberi arahan skoring, pembobotan, tumpang susun peta, validasi lapangan, dan uji kewajaran rekomendasi;
- menyusun kelas kesesuaian ruang yang dapat diterjemahkan ke dalam pengaturan zonasi, syarat teknis, mitigasi, dan pemantauan;
- menghubungkan hasil KGL KGA Aktif dengan RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, kawasan lindung geologi, relokasi permukiman, dan pertimbangan teknis GTL;
- menyediakan format laporan, matriks rekomendasi, dan daftar periksa mutu untuk penggunaan teknis dan kebijakan.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup petunjuk teknis ini meliputi penapisan kawasan, pengumpulan data sekunder, survei lapangan, penyusunan peta tematik, penilaian parameter, skoring dan pembobotan, analisis spasial, klasifikasi kesesuaian, penyusunan rekomendasi, validasi, pelaporan, pemantauan, dan pemutakhiran data. Ruang lingkup wilayah meliputi kawasan puncak, lereng, kaki gunung, dataran sekitar, jalur aliran lahar, kawasan rawan abu, kawasan terdampak gas, wilayah yang berhubungan dengan air tanah vulkanik, serta kawasan permukiman atau kegiatan ekonomi yang berada pada pengaruh gunung api aktif.

Ruang lingkup kegiatan mencakup permukiman, relokasi, prasarana dasar, pariwisata dan geowisata, pertanian, kawasan lindung geologi, kawasan konservasi, pertambangan bahan bangunan vulkanik, panas bumi, jalan, jembatan, fasilitas sosial, fasilitas umum, dan kegiatan lain yang memerlukan pertimbangan geologi lingkungan. Untuk kegiatan berisiko tinggi, kajian harus diperkuat dengan investigasi tapak yang lebih rinci.

1.6 Istilah Teknis

Tabel L7.2. Istilah teknis kunci dalam KGL KGA Aktif.

Istilah	Makna operasional dalam petunjuk teknis
KGA Aktif	Kawasan gunung api aktif yang dipengaruhi proses vulkanik, baik secara langsung maupun melalui bahaya ikutan dan fungsi lingkungan geologi.
KRB Gunung Api	Kawasan rawan bencana gunung api yang menunjukkan tingkat bahaya berdasarkan acuan teknis kebencanaan gunung api.
Bahaya primer	Bahaya yang berkaitan langsung dengan erupsi, seperti aliran piroklastik, lava, lontaran material, abu vulkanik, gas, dan awan panas.
Bahaya ikutan	Bahaya yang dapat muncul akibat kondisi vulkanik dan lingkungan sekitarnya, seperti lahar, banjir, gerakan tanah, erosi, penurunan kualitas air, dan gangguan drainase.
Faktor pembatas	Kondisi geologi atau lingkungan yang membatasi pemanfaatan ruang dan memerlukan syarat teknis atau pembatasan.
Faktor penyisih	Kondisi yang membuat suatu kegiatan tidak tepat ditempatkan pada lokasi tertentu karena risiko, fungsi lindung, atau perlindungan nilai geologi.
Kelas kesesuaian	Kategori hasil KGL yang menunjukkan apakah ruang sesuai, sesuai bersyarat, terbatas, tidak direkomendasikan, atau memerlukan kajian rinci.
Matriks ITBX	Matriks arahan kegiatan yang menunjukkan kegiatan diizinkan, terbatas, bersyarat, atau tidak diperbolehkan berdasarkan kelas kesesuaian dan pembatas geologi.

II PRINSIP DASAR KGL KGA AKTIF

KGL KGA Aktif dilaksanakan dengan prinsip bahwa kawasan gunung api aktif harus dibaca sebagai sistem geologi lingkungan. Sistem ini mengandung sumber daya, fungsi lingkungan, nilai geologi, potensi ekonomi, dan risiko. Oleh karena itu, penilaian tidak boleh hanya berorientasi pada bahaya, tetapi juga tidak boleh mengabaikan bahaya. Keseimbangan antara pemanfaatan, perlindungan, mitigasi, dan pemantauan menjadi inti rekomendasi GTL.

Tabel L7.3. Prinsip dasar KGL pada kawasan gunung api aktif.

Prinsip	Penjelasan operasional	Implikasi terhadap rekomendasi
Berbasis data sahih	KRB, peta bahaya, data aktivitas gunung api, geologi, hidrogeologi, geologi teknik, dan penggunaan lahan harus jelas sumber, skala, tahun, dan keterbatasannya.	Rekomendasi tidak boleh melampaui ketelitian data.
Kehati-hatian	Pada kawasan dengan bahaya tinggi atau data belum cukup, keputusan harus mengutamakan keselamatan dan kebutuhan kajian rinci.	Kegiatan tertentu dapat dibatasi, ditunda, atau diarahkan ke lokasi alternatif.
Keterlacakan	Setiap kelas kesesuaian harus dapat ditelusuri ke parameter, skor, bobot, peta tematik, dan observasi lapangan.	Hasil kajian dapat diuji dan divalidasi.
Kesatuan bahaya dan daya dukung	Sumber daya air, kesuburan tanah, bahan bangunan, dan nilai geowisata harus dibaca bersama bahaya primer dan bahaya ikutan.	Rekomendasi bersifat seimbang antara peluang dan pembatas.
Pengendalian ruang	Hasil KGL harus diterjemahkan menjadi arahan tata ruang, ketentuan khusus, syarat teknis, mitigasi, dan pemantauan.	Produk kajian dapat digunakan dalam RTRW, RDTR, KLHS,

Prinsip	Penjelasan operasional	Implikasi terhadap rekomendasi
		dokumen lingkungan, dan pertimbangan teknis.
Validasi dan komunikasi	Hasil kajian harus diverifikasi secara teknis dan dikomunikasikan dengan bahasa yang dapat dipahami pengambil keputusan.	Risiko salah tafsir dapat dikurangi.

Prinsip penting lain adalah pemisahan antara peta bahaya dan peta rekomendasi KGL. Peta bahaya menjelaskan potensi proses yang dapat merugikan, sedangkan peta rekomendasi KGL menjelaskan implikasi proses tersebut terhadap pemanfaatan ruang tertentu. Keduanya saling berkaitan, tetapi tidak identik. Suatu lokasi dengan bahaya rendah belum tentu langsung sesuai untuk semua kegiatan apabila memiliki pembatas air tanah, lereng, status perlindungan, atau keterbatasan akses. Sebaliknya, lokasi dengan pembatas tertentu tidak selalu tertutup untuk semua pemanfaatan apabila jenis kegiatan, intensitas, desain, dan pemantauannya sesuai.

III DATA MINIMUM, SUMBER DATA, DAN META DATA

Data minimum KGL KGA Aktif harus mencakup data kebencanaan gunung api, data geologi lingkungan, data sumber daya, data bahaya ikutan, data penggunaan lahan, data tata ruang, data sosial-ekonomi, serta data rencana kegiatan. Semua data harus dilengkapi metadata paling sedikit berisi sumber data, tahun, skala, metode penyusunan, ketelitian, status pembaruan, dan batas penggunaan. Tanpa metadata yang jelas, hasil analisis dapat sulit diverifikasi.

Tabel L7.4. Data minimum KGL KGA Aktif.

Kelompok data	Data minimum	Fungsi dalam analisis
Kebencanaan gunung api	Peta KRB, peta bahaya, sejarah erupsi, jalur lahar, sebaran abu, status aktivitas, rekomendasi teknis kebencanaan.	Menentukan faktor pembatas, faktor penyisih, dan syarat mitigasi.
Geologi dan geomorfologi	Peta geologi, satuan batuan vulkanik, fasies gunung api, struktur geologi, bentuk lahan, lereng, jaringan sungai.	Menilai karakter fisik, sumber daya, kestabilan, dan jalur proses geomorfologi.
Hidrogeologi dan air	Mata air, sumur, akuifer, daerah imbuhan, kualitas air, debit, kedalaman muka air tanah, drainase.	Menilai ketersediaan air, perlindungan sumber air, dan daya tampung lingkungan.
Geologi teknik	Sifat tanah dan batuan, kestabilan lereng, tanah lunak, ketebalan endapan lepas, potensi penurunan, daya dukung fondasi.	Menentukan kelayakan tapak, kebutuhan investigasi rinci, dan syarat teknis konstruksi.
Bahaya ikutan	Gerakan tanah, banjir, erosi, lahar hujan, sedimentasi sungai, likuefaksi, gempa, gangguan kualitas air.	Menentukan pembatas tambahan selain bahaya erupsi utama.
Tata ruang dan perlindungan	RTRW, RDTR, KLHS, kawasan lindung, kawasan konservasi, kawasan lindung geologi, KCAG, KBAK bila terkait, geosite, Geopark.	Menentukan konsistensi rekomendasi dengan kebijakan ruang dan perlindungan kawasan.
Sosial-ekonomi dan aset terpapar	Permukiman, fasilitas umum, prasarana, lahan pertanian, mata pencaharian, jalur evakuasi, kawasan wisata, data penduduk.	Menilai konsekuensi ruang, kebutuhan relokasi, prioritas mitigasi, dan komunikasi risiko.

Kelompok data	Data minimum	Fungsi dalam analisis
Rencana kegiatan	Jenis kegiatan, luas lokasi, intensitas pemanfaatan, tahap pembangunan, kebutuhan air, limbah, prasarana, dan standar desain.	Menentukan parameter relevan dan tingkat kedalaman kajian.

3.1 Data KRB dan Bahaya Gunung Api

Data KRB dan bahaya gunung api menjadi acuan utama karena menyatakan wilayah yang berpotensi terdampak proses vulkanik. Dalam KGL, data ini harus digunakan secara hati-hati. KRB tidak boleh hanya diperlakukan sebagai peta latar, tetapi harus menjadi dasar penapisan kegiatan, penentuan faktor penyisih, dan penyusunan syarat mitigasi. Informasi KRB perlu dibaca bersama sejarah kejadian, karakter letusan, arah aliran sungai, topografi, pola angin dominan, dan distribusi permukiman.

3.2 Data Sumber Daya Geologi

Data sumber daya geologi mencakup sumber daya air, tanah subur, bahan bangunan vulkanik, energi panas bumi, bentang alam bernilai, serta nilai geologi yang berhubungan dengan sejarah vulkanisme. Data ini penting agar KGL tidak hanya menghasilkan larangan, tetapi juga dapat mengarahkan pemanfaatan yang sesuai. Sumber daya geologi harus dibaca bersama batas daya dukung dan daya tampung agar pemanfaatannya tidak meningkatkan risiko atau merusak fungsi lingkungan.

3.3 Data Penggunaan Lahan dan Aset Terpapar

Penggunaan lahan dan aset terpapar menentukan konsekuensi keputusan ruang. Kawasan yang sama dapat memiliki implikasi berbeda apabila digunakan untuk hutan lindung, pertanian, permukiman padat, sekolah, fasilitas kesehatan, industri, wisata, atau prasarana strategis. Oleh karena itu, KGL harus menyajikan hubungan antara kelas bahaya, kelas kesesuaian, jenis kegiatan, dan tingkat konsekuensi jika terjadi gangguan vulkanik atau bahaya ikutan.

IV PARAMETER, FAKTOR PENYISIH, DAN PENILAIAN

Penilaian KGL KGA Aktif menggunakan dua kelompok utama, yaitu faktor penyisih dan faktor dinilai. Faktor penyisih digunakan untuk menandai kondisi yang secara prinsip tidak sesuai atau memerlukan pembatasan kuat. Faktor dinilai digunakan untuk menyusun skor kesesuaian berdasarkan daya dukung, daya tampung, sumber daya, bahaya, dan faktor non-geologi yang relevan. Pemilihan parameter harus disesuaikan dengan tujuan kajian, skala, dan jenis kegiatan.

4.1 Faktor Penyisih

Faktor penyisih harus diterapkan sebelum perhitungan skor akhir. Jika suatu lokasi berada pada kondisi penyisih, maka hasil skor yang tampak tinggi tidak boleh langsung digunakan untuk menyatakan lokasi tersebut sesuai. Faktor penyisih berfungsi sebagai penjaga keselamatan, kepatuhan regulatif, dan perlindungan fungsi lingkungan.

Tabel L7.5. Contoh faktor penyisih pada KGL KGA Aktif.

Faktor penyisih	Indikasi kondisi	Implikasi rekomendasi
KRB dengan bahaya sangat tinggi	Area berpotensi terdampak langsung proses erupsi berbahaya sesuai peta dan rekomendasi teknis kebencanaan.	Kegiatan permukiman baru, fasilitas vital, dan kegiatan padat pengunjung tidak direkomendasikan.
Jalur lahar utama	Sungai atau alur yang menjadi lintasan lahar dan material vulkanik.	Pemanfaatan ruang permanen dibatasi kuat; diperlukan ruang aliran, pengendalian, dan sistem peringatan.

Faktor penyisih	Indikasi kondisi	Implikasi rekomendasi
Kawasan lindung dan konservasi	Hutan lindung, taman nasional, cagar alam, kawasan lindung geologi, KCAG, kawasan bernilai geologi utama.	Mengikuti ketentuan perlindungan; kegiatan budidaya baru dibatasi atau tidak diperbolehkan.
Sumber air penting	Mata air utama, daerah imbuhan, atau sumber air masyarakat yang sensitif.	Kegiatan berpotensi mencemari atau mengurangi fungsi air tidak direkomendasikan tanpa perlindungan khusus.
Tapak dengan ketidakpastian tinggi	Data belum cukup, indikasi bahaya tinggi, atau kondisi bawah permukaan belum diketahui untuk kegiatan berisiko tinggi.	Keputusan ditunda sampai investigasi rinci selesai.

4.2 Faktor Dinilai

Faktor dinilai dikelompokkan menjadi faktor sumber daya geologi, faktor bahaya geologi, faktor lingkungan fisik, faktor penggunaan lahan, dan faktor sosial-prasarana. Pada kajian regional, jumlah parameter dapat lebih terbatas. Pada kajian tapak, parameter harus lebih rinci dan dapat memerlukan pengukuran lapangan, uji laboratorium, atau kajian geologi teknik.

Tabel L7.6. Parameter utama yang dinilai dalam KGL KGA Aktif.

Kelompok parameter	Contoh parameter	Makna penilaian
Sumber daya geologi	Sumber air, kesuburan tanah, bahan bangunan, bentang alam, nilai geologi, panas bumi.	Menunjukkan peluang pemanfaatan dan nilai yang perlu dikelola.
Bahaya gunung api	KRB, lahar, awan panas, lava, abu, gas, lontaran material, gempa vulkanik.	Menunjukkan pembatas utama dan kebutuhan mitigasi.
Bahaya ikutan	Gerakan tanah, banjir, erosi, sedimentasi sungai, likuefaksi, penurunan kualitas air.	Menunjukkan risiko tambahan yang dapat muncul sebelum, saat, atau sesudah erupsi.
Daya dukung fisik	Sifat tanah dan batuan, kemiringan lereng, ketebalan endapan, kestabilan, drainase.	Menentukan kelayakan teknis dan kebutuhan desain.
Daya tampung lingkungan	Ketersediaan air, kualitas air, daerah imbuhan, kapasitas drainase, sensitivitas ekosistem.	Menentukan batas intensitas dan syarat pengelolaan.
Sosial-prasarana	Permukiman, fasilitas umum, jalan, jalur evakuasi, lahan relokasi, aset strategis.	Menentukan konsekuensi, prioritas tindakan, dan kebutuhan komunikasi risiko.

4.3 Skoring dan Pembobotan

Skoring digunakan untuk memberi nilai pada kelas parameter berdasarkan tingkat dukungan atau pembatasnya terhadap kegiatan tertentu. Pembobotan digunakan untuk memberi tingkat kepentingan relatif antarparameter. Untuk KGL KGA Aktif, parameter bahaya gunung api, jalur lahar, kestabilan lereng, ketersediaan air, dan status perlindungan umumnya mempunyai bobot tinggi. Namun, bobot harus disesuaikan dengan jenis kegiatan. Kajian relokasi permukiman memiliki orientasi berbeda dari kajian geowisata, kawasan pertanian, atau prasarana jalan.

Skala nilai dapat menggunakan 1 sampai 5 dengan makna sangat membatasi sampai sangat mendukung, atau menggunakan skala lain sesuai kebutuhan. Yang paling penting adalah penjelasan makna setiap nilai. Skor tidak boleh dipakai untuk menutupi ketidakpastian data. Apabila data bahaya atau data tapak belum memadai, hasil skoring harus disertai rekomendasi kajian rinci.

Tabel L7.7. Contoh skala penilaian parameter

Nilai	Makna dukungan atau pembatas	Implikasi umum
5	Sangat mendukung atau pembatas sangat rendah.	Dapat dipertimbangkan untuk kegiatan dengan syarat umum.
4	Mendukung dengan pembatas ringan.	Dapat digunakan dengan syarat teknis sederhana.
3	Sedang atau memerlukan perhatian teknis.	Perlu syarat teknis dan pemantauan.
2	Membatasi atau memerlukan pengendalian kuat.	Pemanfaatan terbatas, perlu kajian rinci atau desain mitigasi.
1	Sangat membatasi atau tidak sesuai untuk kegiatan tertentu.	Tidak direkomendasikan atau memerlukan alternatif lokasi.

V TAHAPAN PELAKSANAAN

Tahapan pelaksanaan KGL KGA Aktif disusun sebagai siklus kerja mulai dari penapisan hingga pemutakhiran. Siklus ini penting karena kawasan gunung api aktif bersifat dinamis. Data bahaya, penggunaan lahan, kondisi sungai, sumber air, dan tingkat kerentanan masyarakat dapat berubah. Oleh karena itu, KGL tidak hanya menghasilkan laporan sekali selesai, tetapi juga harus mendorong sistem pemantauan dan pembaruan informasi.

Tabel L7.8. Tahapan pelaksanaan KGL KGA Aktif.

Tahap	Uraian kegiatan	Keluaran
1. Penapisan awal	Menentukan apakah lokasi berada dalam pengaruh gunung api aktif, KRB, jalur lahar, kawasan lindung, atau wilayah yang memerlukan kajian rinci.	Peta penapisan, daftar isu utama, kebutuhan data.
2. Kompilasi data	Mengumpulkan peta, laporan, data kebencanaan, data geologi, data air, tata ruang, penggunaan lahan, dan rencana kegiatan.	Basis data awal dan metadata.
3. Survei lapangan	Memeriksa kondisi fisik, sumber air, lereng, sungai, penggunaan lahan, aset terpapar, serta titik validasi peta.	Catatan lapangan, foto, titik koordinat, pembaruan interpretasi.
4. Pemetaan tematik	Menyusun peta KRB, bahaya ikutan, sumber daya, daya dukung, daya tampung, faktor penyisih, dan penggunaan lahan.	Peta tematik siap analisis.
5. Skoring dan pembobotan	Memberi nilai dan bobot parameter sesuai jenis kegiatan dan tujuan kajian.	Tabel parameter, skor, bobot, dan dasar penilaian.
6. Analisis spasial	Melakukan tumpang susun peta, sintesis, uji kewajaran, dan identifikasi konflik ruang.	Peta kelas kesesuaian dan peta pembatas utama.
7. Validasi teknis	Memeriksa konsistensi hasil dengan data KRB, kondisi lapangan, pengetahuan lokal, dan regulasi.	Catatan validasi dan perbaikan rekomendasi.
8. Rekomendasi	Menyusun arahan ruang, syarat teknis, mitigasi, pemantauan, dan matriks ITBX.	Rekomendasi KGL KGA Aktif dan dasar pertimbangan teknis.
9. Pemutakhiran	Memperbarui data sesuai perubahan aktivitas gunung api, kejadian baru, dan perubahan penggunaan lahan.	Sistem informasi dan revisi rekomendasi.

Kelas kesesuaian KGL KGA Aktif harus menunjukkan hubungan antara karakter geologi, tingkat bahaya, daya dukung, daya tampung, status perlindungan, dan jenis kegiatan. Kelas kesesuaian tidak boleh dibaca sebagai izin langsung. Kelas tersebut menjadi dasar teknis untuk menyusun rekomendasi, syarat, pembatasan, dan kebutuhan kajian lanjutan.

Tabel L7.9. Kelas kesesuaian ruang pada KGL KGA Aktif.

Kelas	Makna teknis	Arahan umum
Sesuai	Kondisi geologi mendukung, pembatas rendah, berada di luar zona bahaya tinggi, dan tidak bertentangan dengan fungsi lindung.	Dapat dimanfaatkan dengan syarat umum dan pemantauan dasar.
Sesuai bersyarat	Kondisi masih dapat mendukung kegiatan, tetapi terdapat pembatas yang harus dikendalikan.	Memerlukan syarat teknis, pengendalian intensitas, drainase, perlindungan air, dan pemantauan.
Terbatas	Pembatas cukup kuat, bahaya atau fungsi lindung perlu diperhatikan, dan intensitas pemanfaatan harus rendah.	Kegiatan dibatasi jenis, skala, dan intensitasnya; kajian rinci dapat diwajibkan.
Tidak direkomendasikan	Terdapat bahaya tinggi, faktor penyisih, fungsi lindung penting, atau risiko tidak sebanding dengan manfaat kegiatan.	Kegiatan baru tidak diarahkan; perlu alternatif lokasi atau fungsi perlindungan.
Memerlukan kajian rinci	Data belum cukup, konsekuensi kegiatan tinggi, atau indikasi risiko belum dapat dipastikan.	Keputusan ditunda sampai investigasi dan validasi teknis selesai.

6.1 Hubungan Kelas Kesesuaian dengan KRB Gunung Api

KRB gunung api harus menjadi acuan utama dalam menentukan arahan ruang. Pada KRB dengan tingkat bahaya tinggi, permukiman baru, fasilitas vital, sekolah, rumah sakit, kawasan padat pengunjung, dan prasarana strategis harus diperlakukan dengan kehati-hatian sangat tinggi. Pada KRB dengan tingkat bahaya lebih rendah, beberapa pemanfaatan masih dapat dipertimbangkan apabila jenis kegiatan, intensitas, jalur evakuasi, sistem peringatan, dan syarat teknis terpenuhi. Di luar KRB, kajian tetap perlu membaca bahaya ikutan, seperti lahar, banjir, gerakan tanah, abu, dan gangguan air.

Prinsip dasarnya adalah bahwa KRB bukan satu-satunya parameter, tetapi parameter yang sangat menentukan. Kelas kesesuaian akhir harus menyatakan apakah pembatas utama berasal dari bahaya gunung api, bahaya ikutan, daya dukung tanah dan batuan, air tanah, status perlindungan kawasan, atau kombinasi beberapa faktor. Dengan cara ini, rekomendasi menjadi lebih jelas dan dapat diterjemahkan ke dalam tindakan pengendalian.

6.2 Matriks ITBX Indikatif

Matriks ITBX digunakan untuk menerjemahkan kelas kesesuaian ke dalam arahan kegiatan. Matriks ini harus disesuaikan dengan RTRW, RDTR, ketentuan kebencanaan, dan peraturan sektoral. Tabel berikut bersifat indikatif dan perlu disempurnakan sesuai lokasi, skala kajian, status KRB, dan jenis kegiatan.

Tabel KL7.10. Matriks ITBX indikatif pada kawasan gunung api aktif.

Jenis kegiatan	Sesuai	Sesuai bersyarat	Terbatas	Tidak direkomendasikan
Permukiman baru	I	B: mengikuti standar tapak, drainase, air, dan evakuasi	T: skala rendah, kajian rinci, mitigasi wajib	X pada bahaya tinggi atau faktor penyisih
Relokasi permukiman	I jika aman dan tersedia air	B: perlu kajian tapak dan sosial-prasarana	T: hanya untuk fungsi sementara atau rendah risiko	X apabila berada pada bahaya tinggi
Pertanian	I	B: pengendalian erosi dan air	T: jenis tanaman dan teknik konservasi dibatasi	X pada area yang harus steril keselamatan
Geowisata	I untuk zona aman	B: pembatasan pengunjung, jalur aman, informasi risiko	T: akses terbatas dan berbasis pemandu	X pada zona bahaya tinggi saat kondisi tidak aman
Prasarana strategis	B setelah kajian rinci	B dengan standar desain dan mitigasi tinggi	T: perlu alternatif trase atau desain khusus	X pada faktor penyisih dan bahaya sangat tinggi
Pertambangan material lahar	B: mengikuti rekomendasi teknis dan keselamatan	B: pengendalian sungai, alat, waktu operasi	T: hanya pengelolaan terbatas	X jika mengganggu perlindungan atau keselamatan
Kawasan lindung geologi	I untuk perlindungan dan penelitian	B: edukasi dan geowisata terbatas	T: akses dan kegiatan dikendalikan	X untuk kegiatan yang merusak nilai utama

VII REKOMENDASI TEKNIS MENURUT OBJEK KEPUTUSAN

Rekomendasi KGL KGA Aktif harus dibedakan menurut objek keputusan. Rekomendasi untuk RTRW tidak sama dengan rekomendasi untuk RDTR, relokasi permukiman, geowisata, atau tapak prasarana strategis. Perbedaan ini berkaitan dengan skala, konsekuensi, dan tingkat kedalaman data.

Tabel L7.11 Rekomendasi teknis menurut objek keputusan.

Objek keputusan	Fokus rekomendasi	Keluaran yang diharapkan
RTRW	Arahan makro kawasan lindung, kawasan budidaya, kawasan rawan bencana, kawasan resapan, dan kawasan bernilai geologi.	Peta arahan ruang berbasis KGL, pembatas utama, dan prioritas pengendalian.
RDTR	Ketentuan kegiatan, intensitas, prasarana, ketentuan khusus, jalur evakuasi, dan syarat pemanfaatan.	Matriks ITBX, ketentuan khusus berbasis KRB dan pembatas geologi.
KLHS	Penilaian keberlanjutan kebijakan dan alternatif ruang terhadap bahaya, air, fungsi lindung, dan risiko.	Masukan daya dukung, daya tampung, dan risiko geologi.
Dokumen lingkungan	Penilaian dampak kegiatan terhadap tanah, batuan, air, lereng, drainase, dan risiko bahaya.	Rencana pengelolaan dan pemantauan lingkungan geologi.
Relokasi permukiman	Kesesuaian tapak, keamanan dari bahaya, ketersediaan air, akses, drainase, kestabilan, dan penerimaan sosial.	Daftar lokasi prioritas, syarat teknis, dan kebutuhan investigasi rinci.

Objek keputusan	Fokus rekomendasi	Keluaran yang diharapkan
Geowisata dan kawasan bernilai geologi	Keselamatan, interpretasi geologi, daya dukung pengunjung, perlindungan nilai, dan akses.	Zonasi kunjungan, pembatasan, jalur aman, dan informasi risiko.
Prasarana strategis	Kestabilan, bahaya, air, fungsi kritis, konsekuensi kegagalan, dan rencana darurat.	Kajian tapak rinci, desain mitigasi, pemantauan, dan rencana kontinjensi.

7.1. Rekomendasi untuk Relokasi Permukiman

Relokasi permukiman harus diarahkan pada lokasi yang aman dari bahaya utama dan bahaya ikutan, memiliki daya dukung tanah dan batuan yang memadai, tersedia air, memiliki akses prasarana, tidak mengganggu kawasan lindung, dan dapat diterima secara sosial. Penilaian relokasi tidak cukup hanya mencari lahan kosong. Lokasi harus dinilai berdasarkan keselamatan jangka panjang, ketersediaan sumber daya, kelayakan lingkungan, dan kesinambungan mata pencaharian masyarakat.

Parameter penting untuk relokasi meliputi posisi terhadap KRB, jarak terhadap jalur lahar, kemiringan lereng, kestabilan tanah, potensi banjir, ketersediaan air bersih, drainase, akses evakuasi, status lahan, penggunaan lahan sekitar, dan kesesuaian dengan rencana tata ruang. Jika lokasi berada pada pembatas sedang, rekomendasi harus menyebut syarat teknis secara eksplisit, misalnya pengendalian drainase, desain fondasi, pengelolaan air, atau penguatan jalur evakuasi.

7.2. Rekomendasi untuk Kawasan Lindung Geologi dan Geowisata

Kawasan gunung api aktif sering memiliki nilai geologi yang tinggi, seperti kawah, kaldera, aliran lava tua, endapan piroklastik, manifestasi panas bumi, bentang alam vulkanik, mata air, dan panorama geologi. Nilai tersebut perlu dilindungi sekaligus dapat dimanfaatkan untuk pendidikan dan geowisata yang terkendali. KGL harus membantu menentukan area yang perlu dilindungi, area yang dapat dikunjungi, syarat keselamatan, batas akses, dan rencana pemantauan.

Pengembangan geowisata pada KGA Aktif harus selalu memperhatikan informasi aktivitas gunung api, jalur aman, titik kumpul, rute evakuasi, kapasitas kunjungan, fasilitas informasi, dan mekanisme penutupan sementara saat kondisi tidak aman. Rekomendasi geowisata tidak boleh hanya menonjolkan daya tarik visual, tetapi harus memasukkan keselamatan dan perlindungan nilai geologi sebagai syarat utama.

7.3. Rekomendasi untuk Pemanfaatan Material Vulkanik

Pemanfaatan material vulkanik, terutama pasir dan batu pada alur lahar atau endapan vulkanik tertentu, dapat memiliki manfaat ekonomi dan teknis. Namun, kegiatan ini harus dikendalikan agar tidak merusak stabilitas sungai, mengganggu fungsi pengaliran, menurunkan keselamatan pekerja, atau meningkatkan risiko pada permukiman sekitar. Rekomendasi harus mencakup batas lokasi, volume, waktu operasi, teknik pengambilan, perlindungan tebing sungai, keselamatan pekerja, dan pemantauan pasca-kegiatan

VIII PEMANTAUAN, VALIDASI, DAN PEMUTAKHIRAN

Pemantauan diperlukan karena kawasan gunung api aktif bersifat berubah. Perubahan dapat berasal dari aktivitas vulkanik, curah hujan, banjir lahar, gerakan tanah, erosi, perubahan penggunaan lahan, atau pembangunan baru. Pemantauan juga penting untuk mengevaluasi apakah rekomendasi teknis berjalan efektif.

Tabel L7.12 Parameter pemantauan KGL KGA Aktif.

Aspek pemantauan	Parameter yang diamati	Frekuensi indikatif
Bahaya gunung api	Status aktivitas, rekomendasi teknis kebencanaan, perubahan KRB, kejadian abu, gas, lahar, dan aliran material.	Mengikuti informasi resmi; diperiksa ulang setiap ada perubahan status atau kejadian.
Air dan drainase	Debit mata air, kualitas air, kondisi sungai, kapasitas drainase, indikasi sedimentasi.	Minimal dua kali setahun dan setelah kejadian hujan ekstrem atau lahar.
Lereng dan tanah	Retakan tanah, gerakan tanah, erosi, perubahan tebing sungai, kestabilan tapak.	Berkala dan setelah kejadian hujan besar atau gempa.
Penggunaan lahan	Perubahan permukiman, pembukaan lahan, pertambangan material, wisata, prasarana baru.	Tahunan atau sesuai dinamika kawasan.
Kepatuhan rekomendasi	Pelaksanaan syarat teknis, jalur evakuasi, rambu, sistem peringatan, pemantauan lingkungan.	Berkala sesuai dokumen pengelolaan.
Data sosial dan aset	Perubahan jumlah penduduk, fasilitas umum, aset strategis, jalur evakuasi, lokasi rentan.	Tahunan dan saat penyusunan atau revisi tata ruang.

8.1 Validasi Teknis

Validasi teknis dilakukan untuk memastikan bahwa hasil KGL dapat digunakan dalam pengambilan keputusan. Validasi mencakup pemeriksaan sumber data, skala, kesesuaian metode, kelengkapan parameter, kebenaran lokasi, konsistensi dengan KRB, ketepatan kelas kesesuaian, dan kewajaran rekomendasi. Validasi tidak hanya memeriksa angka, tetapi juga memeriksa apakah penalaran geologi di balik rekomendasi sudah kuat.

Validasi sebaiknya dilakukan melalui telaah dokumen, pemeriksaan peta, peninjauan lapangan terbatas, diskusi teknis dengan ahli gunung api dan geologi lingkungan, serta konfirmasi dengan pemerintah daerah dan masyarakat setempat. Pada lokasi dengan konsekuensi tinggi, validasi dapat mensyaratkan kajian tambahan.

8.2 Pemutakhiran

Pemutakhiran informasi harus dilakukan apabila terdapat perubahan status aktivitas gunung api, kejadian erupsi, perubahan peta KRB, lahar besar, banjir besar, gerakan tanah, perubahan tata ruang, pembangunan besar, atau perubahan penggunaan lahan yang signifikan. Pemutakhiran juga diperlukan saat data lama tidak lagi mencerminkan kondisi saat ini. Dalam sistem GTL, hasil pemutakhiran harus masuk ke basis data dan menjadi dasar revisi rekomendasi

IX FORMAT LAPORAN DAN KELUARAN

Laporan KGL KGA Aktif harus disusun dengan struktur yang memudahkan penelusuran data, metode, hasil, dan rekomendasi. Laporan tidak boleh hanya berisi peta dan uraian umum, tetapi harus menjelaskan hubungan antara parameter, kelas kesesuaian, faktor pembatas, faktor penyisih, dan tindakan yang direkomendasikan.

Tabel L7.13. Struktur laporan KGL KGA Aktif.

Bagian laporan	Muatan minimum
Ringkasan eksekutif	Tujuan kajian, lokasi, isu utama, kelas kesesuaian, rekomendasi pokok, dan syarat utama.
Pendahuluan	Latar belakang, maksud, tujuan, ruang lingkup, dasar hukum, dan kedudukan kajian.

Bagian laporan	Muatan minimum
Data dan metode	Sumber data, metadata, parameter, metode skoring, pembobotan, analisis spasial, dan validasi.
Kondisi geologi lingkungan	Geologi, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, sumber daya, bahaya, penggunaan lahan, dan sosial-prasarana.
Analisis kesesuaian	Faktor penyisih, faktor pembatas, skor, bobot, peta tematik, peta sintesis, dan kelas kesesuaian.
Rekomendasi	Arahan ruang, syarat teknis, mitigasi, pemantauan, matriks ITBX, dan kebutuhan kajian rinci.
Lampiran data	Tabel lapangan, foto, koordinat, metadata, daftar peta, dan daftar periksa validasi.

9.1 Produk Peta

Produk peta paling sedikit mencakup peta lokasi, peta KRB atau bahaya gunung api, peta geologi dan geomorfologi, peta lereng, peta hidrogeologi atau sumber air, peta bahaya ikutan, peta penggunaan lahan, peta faktor penyisih, peta pembatas utama, peta kelas kesesuaian, dan peta rekomendasi ruang. Untuk kajian tapak, peta harus dilengkapi hasil survei lapangan dan informasi skala yang sesuai.

9.2 Produk Tabel dan Matriks

Produk tabel dan matriks paling sedikit mencakup daftar data dan metadata, tabel parameter, tabel skor dan bobot, matriks faktor penyisih, tabel kelas kesesuaian, matriks ITBX, daftar syarat teknis, daftar parameter pemantauan, serta daftar periksa mutu. Produk ini penting agar rekomendasi tidak hanya tersaji dalam peta, tetapi dapat langsung digunakan dalam proses perencanaan dan pengendalian.

X DAFTAR PERIKSA MUTU

Tabel L7.14. Daftar periksa mutu KGL KGA Aktif.

Unsur yang diperiksa	Pertanyaan pemeriksaan	Status
KRB dan bahaya	Apakah peta KRB dan data bahaya terbaru telah digunakan dan disebutkan sumbernya?	Ya/Tidak/Catatan
Metadata	Apakah setiap peta memiliki skala, tahun, sumber, dan batas penggunaan?	Ya/Tidak/Catatan
Faktor penyisih	Apakah faktor penyisih diperiksa sebelum skoring akhir?	Ya/Tidak/Catatan
Parameter	Apakah parameter sesuai dengan jenis kegiatan dan tujuan kajian?	Ya/Tidak/Catatan
Skoring dan bobot	Apakah dasar skor dan bobot dijelaskan secara teknis?	Ya/Tidak/Catatan
Validasi lapangan	Apakah peta dan kelas kesesuaian diuji dengan data lapangan?	Ya/Tidak/Catatan
Rekomendasi	Apakah rekomendasi dapat dilaksanakan, dipantau, dan ditelusuri ke data?	Ya/Tidak/Catatan
Konsistensi tata ruang	Apakah rekomendasi konsisten dengan RTRW, RDTR, KLHS, dan ketentuan perlindungan?	Ya/Tidak/Catatan
Komunikasi risiko	Apakah informasi risiko disampaikan dengan bahasa yang dapat dipahami pengguna?	Ya/Tidak/Catatan

XI PENUTUP

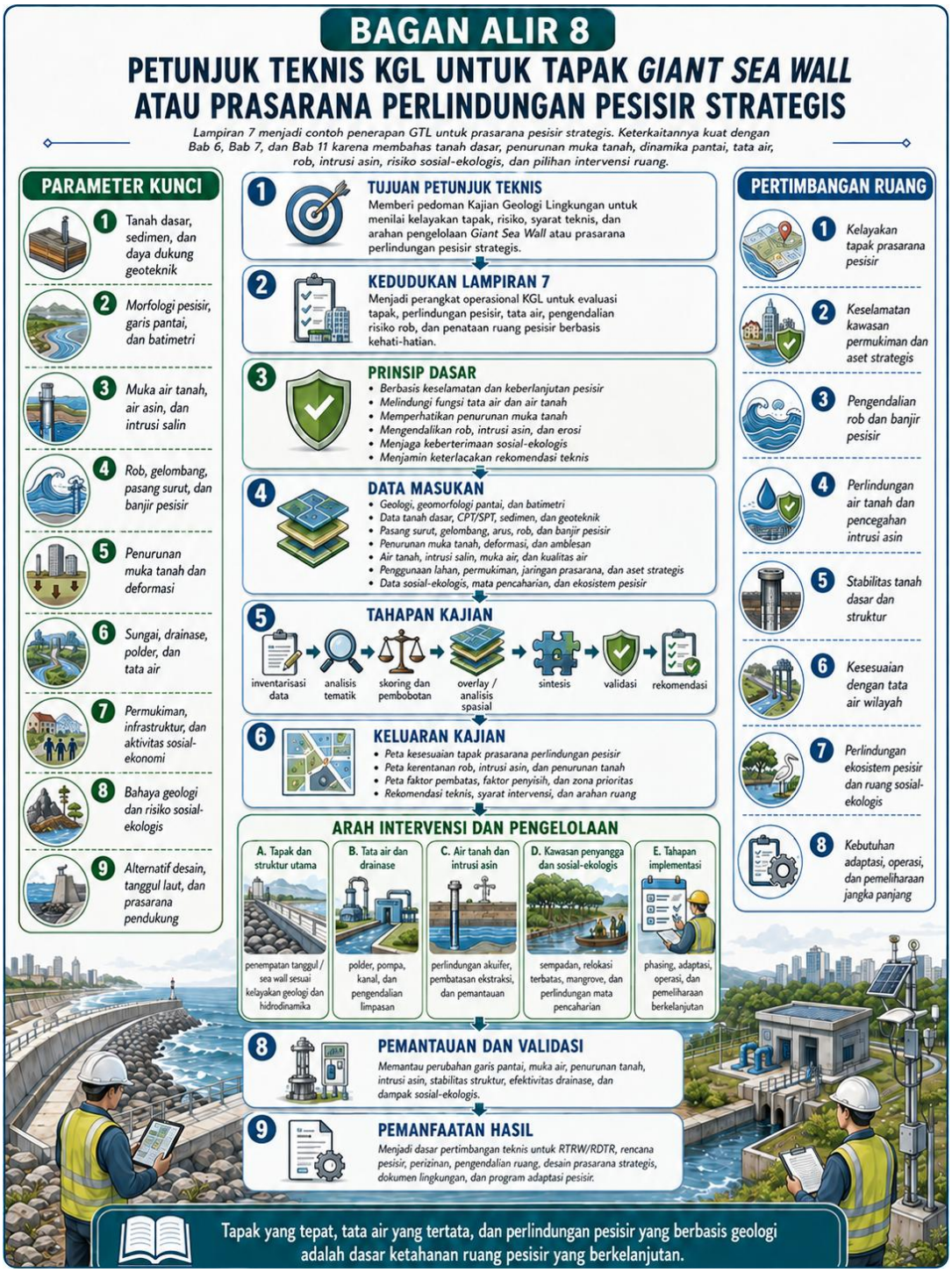
Petunjuk Teknis KGL KGA Aktif menempatkan kawasan gunung api aktif sebagai ruang geologi lingkungan yang harus dibaca secara utuh. Gunung api tidak hanya

menghadirkan bahaya, tetapi juga menyediakan sumber daya air, tanah subur, bahan bangunan, energi, nilai geologi, pendidikan, dan geowisata. Namun, seluruh peluang tersebut hanya dapat dimanfaatkan secara bertanggung jawab apabila batas keselamatan, daya dukung, daya tampung, faktor pembatas, dan faktor penyisih dibaca sejak awal.

Dalam kerangka GTL, hasil KGL KGA Aktif harus menjadi dasar untuk menata ruang yang lebih aman, mengelola lingkungan secara lebih hati-hati, melindungi kawasan bernilai geologi, mengurangi risiko, dan memperkuat kesiapsiagaan wilayah. Rekomendasi yang baik bukan hanya menyebut lokasi sesuai atau tidak sesuai, tetapi menjelaskan mengapa demikian, syarat apa yang diperlukan, risiko apa yang harus dikendalikan, dan data apa yang harus terus dipantau.

Dengan petunjuk teknis ini, penyusunan kajian geologi lingkungan pada kawasan gunung api aktif diharapkan menjadi lebih tertib, terukur, dan dapat dipertanggungjawabkan. Petunjuk ini dapat disempurnakan sesuai perkembangan data gunung api, teknologi pemantauan, metode analisis spasial, kebutuhan tata ruang, dan pengalaman penerapan di berbagai wilayah Indonesia.

Kata kunci operasional: kawasan gunung api aktif harus dibaca sebagai ruang yang memiliki peluang dan pembatas sekaligus. Tata ruang yang baik tidak meniadakan dinamika gunung api, tetapi menempatkan kegiatan manusia pada ruang yang sesuai, dengan syarat teknis yang jelas, mitigasi yang dapat dilaksanakan, dan pemantauan yang berkelanjutan.



Gambar L8.1 Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Giant Sea Wall

LAMPIRAN 8:

Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Giant Sea Wall atau Prasarana Perlindungan Pesisir Strategis

Lampiran 8 menjadi contoh penerapan GTL untuk prasarana pesisir strategis. Keterkaitannya kuat dengan Bab 6, Bab 7, dan Bab 11 karena membahas tanah dasar, penurunan muka tanah, dinamika pantai, tata air, rob, intrusi asin, risiko sosial-ekologis, dan pilihan intervensi ruang.

Tabel L8.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Pedoman geologi lingkungan untuk prasarana pesisir strategis berbasis ruas, sistem darat-muara-laut, bahaya pesisir, dan pemantauan.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L8.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

A. Kedudukan Petunjuk Teknis

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Tapak Giant Sea Wall (GSW) atau Prasarana Perlindungan Pesisir Strategis merupakan bagian dari Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan yang digunakan untuk menilai kelayakan, kesesuaian, pembatas, syarat teknis, dan arahan pengendalian pemanfaatan ruang pada rencana perlindungan pesisir berskala strategis.

Petunjuk Teknis ini tidak menggantikan studi kelayakan rekayasa rinci, analisis hidrodinamika rinci, AMDAL, KLHS, perizinan pemanfaatan ruang laut, atau perizinan sektoral lainnya. Petunjuk Teknis ini berfungsi

sebagai dasar geologi lingkungan untuk memastikan bahwa keputusan perlindungan pesisir didasarkan pada karakter tanah dasar, geologi Kuarter, dinamika pantai, penurunan muka tanah, tata air darat, sedimentasi, intrusi asin, bahaya geologi, dan kerentanan sosial-ekologis.

Dalam konteks perlindungan pesisir strategis, Giant Sea Wall tidak boleh dipahami semata-mata sebagai struktur linier penahan air laut. Giant Sea Wall harus dibaca sebagai bagian dari sistem perlindungan pesisir terpadu yang menghubungkan wilayah belakang, daerah aliran sungai, muara, pantai, perairan dangkal, sistem drainase, sistem pompa, kualitas air, sedimen, ekosistem pesisir, serta pola pemanfaatan ruang di darat dan laut.

B. Maksud dan Tujuan

Petunjuk Teknis ini dimaksudkan sebagai acuan bagi Pemerintah Pusat, pemerintah daerah, Badan Geologi, instansi teknis, pengelola program perlindungan pesisir, pemrakarsa, perguruan tinggi, konsultan, dan pihak terkait dalam melaksanakan kajian geologi lingkungan untuk tapak Giant Sea Wall atau prasarana perlindungan pesisir strategis.

Tujuan Petunjuk Teknis ini adalah:

- menyeragamkan parameter dan tahapan kajian geologi lingkungan untuk tapak perlindungan pesisir strategis;
- menentukan kelayakan ruas, subkawasan, dan tapak prasarana perlindungan pesisir berdasarkan daya dukung geologi dan bahaya geologi-pesisir;
- membedakan jenis intervensi yang sesuai, yaitu perlindungan struktural keras, perlindungan kombinasi, peningkatan sistem polder dan drainase, pemulihan pesisir berbasis alam, atau pembatasan pemanfaatan ruang;
- menetapkan dasar teknis untuk integrasi hasil analisis ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, AMDAL, rencana zonasi wilayah pesisir, dan program perlindungan pesisir;
- menyusun arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX berdasarkan kelas kesesuaian geologi lingkungan; dan
- menetapkan kebutuhan pemantauan, evaluasi, dan pemutakhiran pada tahap pra-konstruksi, konstruksi, operasi, dan pasca-operasi.

C. Ruang Lingkup

Ruang lingkup Petunjuk Teknis ini meliputi kajian geologi lingkungan untuk:

- tapak Giant Sea Wall atau tanggul laut strategis;
- tanggul pantai, tanggul sungai-muara, sistem polder, rumah pompa, pintu air, kanal, kolam retensi, dan prasarana pengendalian rob;
- struktur pelindung pantai, pemecah gelombang, pengaman muara, pengendalian abrasi, dan restorasi perlindungan alami pesisir;
- koridor pesisir yang dipengaruhi perubahan garis pantai, banjir rob, penurunan muka tanah, intrusi asin, dan perubahan morfologi muara;
- ruas pesisir dengan permukiman, kawasan industri, pelabuhan, pusat logistik, prasarana vital, dan kawasan strategis yang membutuhkan perlindungan pesisir; dan
- wilayah belakang yang berhubungan langsung dengan sistem drainase, aliran sungai, air baku, sanitasi, dan ruang evakuasi.

D. Pengertian Operasional

Tabel L8.3. Istilah dan pengertian operasional dalam KGL Giant Sea Wall (GSW)

Istilah	Pengertian operasional
Giant Sea Wall	Prasarana perlindungan pesisir berskala besar yang direncanakan untuk menahan atau mengendalikan pengaruh laut, rob, gelombang, dan/atau genangan pesisir terhadap kawasan daratan di belakangnya.
Prasarana perlindungan pesisir strategis	Tanggul laut, tanggul pantai, polder, rumah pompa, pintu air, kanal, struktur pengendali abrasi, pengaman muara, dan prasarana lain yang berfungsi melindungi kawasan strategis dari bahaya pesisir.
Ruas pesisir	Bagian pantai yang dinilai sebagai satuan evaluasi berdasarkan kesamaan geologi, geomorfologi, dinamika sedimen, bahaya pesisir, tata air, dan pola pemanfaatan ruang.
Tapak prasarana	Lokasi spesifik yang direncanakan untuk pembangunan struktur, utilitas, akses konstruksi, atau fasilitas pendukung perlindungan pesisir.
Pembatas fatal	Kondisi geologi lingkungan atau kombinasi risiko yang menyebabkan suatu ruas atau tapak tidak direkomendasikan untuk intervensi tertentu karena risiko tidak dapat dikendalikan secara layak.
Clearance geologi lingkungan	Pernyataan teknis bahwa suatu ruas atau tapak telah memenuhi persyaratan geologi lingkungan minimum untuk dilanjutkan ke tahap pra-desain atau desain rinci dengan syarat tertentu.

II. PRINSIP DAN KERANGKA ANALISIS

A. Prinsip Dasar

Kajian geologi lingkungan untuk tapak Giant Sea Wall atau prasarana perlindungan pesisir strategis dilaksanakan berdasarkan prinsip sebagai berikut:

- berbasis ruas, yaitu setiap ruas pesisir dinilai menurut karakter geologi, geomorfologi, tata air, sedimentasi, dan tingkat risikonya sendiri;
- berbasis sistem, yaitu perlindungan pesisir dinilai sebagai interaksi darat-muara-laut yang melibatkan DAS, drainase, muara, pantai, perairan dangkal, dan wilayah belakang;
- berbasis risiko, yaitu keputusan teknis mempertimbangkan kombinasi bahaya, keterpaparan penduduk dan aset, kemampuan mitigasi, serta konsekuensi kegagalan;
- berbasis bukti, yaitu setiap rekomendasi harus dapat ditelusuri ke data, peta, pengamatan lapangan, hasil uji, atau model teknis yang dapat diverifikasi;
- tidak menyederhanakan GSW sebagai solusi tunggal, melainkan membandingkan dengan kombinasi poldernya, peninggian lokal, pengelolaan sedimen, perlindungan alami, pengendalian pemanfaatan ruang, dan adaptasi kawasan;
- adaptif terhadap perubahan, karena garis pantai, elevasi daratan, pola banjir, intrusi asin, dan kondisi sosial-ekologis dapat berubah cepat; dan
- operasional, sehingga hasil analisis dapat diterjemahkan ke dalam zona kesesuaian, syarat teknis, prioritas ruas, matriks ITBX, dan rencana pemantauan.

B. Kerangka Analisis

Kerangka analisis dibangun untuk menjawab lima pertanyaan teknis. Pertama, apakah suatu ruas pesisir membutuhkan intervensi perlindungan struktural atau lebih tepat diarahkan pada penguatan tata air, pemulihan pesisir, pembatasan pemanfaatan ruang, atau kombinasi tindakan. Kedua, apakah kondisi geologi dan tanah dasar dapat mendukung struktur yang direncanakan. Ketiga, apakah intervensi dapat mengurangi risiko tanpa memindahkan risiko ke wilayah

lain. Keempat, apakah operasi prasarana dapat dipertahankan dalam jangka panjang seiring penurunan muka tanah dan perubahan garis pantai. Kelima, bagaimana hasil analisis diturunkan menjadi rekomendasi teknis, pengaturan zonasi, dan matriks ITBX.

Tabel L8.4. Komponen analisis dalam KGL GSW

Komponen analisis	Pertanyaan teknis utama	Keluaran
Geologi Kuarter dan tanah dasar	Apakah tanah dasar dapat mendukung struktur dan utilitas yang direncanakan?	kelas daya dukung, kebutuhan investigasi geoteknik, rekomendasi fondasi dan perbaikan tanah
Dinamika pantai dan sedimen	Apakah struktur akan mengubah garis pantai, arus, gelombang, dan distribusi sedimen?	peta tren abrasi-akresi, neraca sedimen, rekomendasi bentuk perlindungan
Penurunan muka tanah dan tata air	Apakah perlindungan pesisir tetap efektif bila elevasi daratan terus menurun?	peta laju penurunan, kebutuhan polder, pompa, pengendalian limpasan, dan pemantauan elevasi
Hidrologi, muara, dan drainase	Apakah air dari darat dapat tetap dilepaskan secara aman setelah intervensi?	rekomendasi kanal, pintu air, rumah pompa, ruang retensi, dan koridor aliran
Risiko sosial-ekologis	Apakah intervensi menimbulkan dampak terhadap masyarakat, ekosistem, kualitas air, dan mata pencaharian?	syarat perlindungan sosial-ekologis, kebutuhan konsultasi, dan rencana pengelolaan

III. DATA DAN INFORMASI DASAR

Kajian geologi lingkungan untuk tapak Giant Sea Wall atau prasarana perlindungan pesisir strategis wajib menggunakan data yang memadai, dapat ditelusuri, dan sesuai skala perencanaan. Data harus mencakup aspek geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi sebagai bahan sintesis, hidrologi, dinamika pantai, sosial-spasial, tata ruang, serta riwayat perubahan pesisir.

A. Data Minimum

Tabel L8.5. Kelompok data dalam KGL GSW

Kelompok data	Data minimum	Kegunaan utama
Geologi dan geologi Kuarter	peta geologi, sebaran endapan aluvial, sedimen pantai, sedimen muara, ketebalan tanah lunak, stratigrafi dangkal	menilai tanah dasar, kebutuhan fondasi, dan kerentanan terhadap penurunan diferensial
Geomorfologi pesisir	bentuk pantai, dataran delta, dataran pasang surut, muara, tanggul alam, tambak, rawa, dan perubahan bentuk lahan	menentukan satuan evaluasi dan pembatas geomorfologi
Geologi teknik dan geoteknik	CPT/CPTu, SPT, pemboran, uji laboratorium tanah, permeabilitas, konsolidasi, kuat geser, data muka air tanah dangkal	menetapkan daya dukung, potensi likuefaksi, konsolidasi, dan parameter desain awal
Penurunan muka tanah	InSAR, GNSS, pengukuran elevasi berkala, riwayat kerusakan prasarana, data pengambilan air tanah sebagai informasi pendukung	menilai keberlanjutan fungsi struktur dan kebutuhan pemantauan elevasi
Hidrologi dan drainase	DAS, debit sungai, banjir, rob, backwater, kapasitas drainase, lokasi pintu air, pompa, kanal, dan kolam retensi	menjamin air darat tetap dapat dikeluarkan dan risiko genangan tidak meningkat

Kelompok data	Data minimum	Kegunaan utama
Hidrodinamika dan laut dangkal	pasang surut, gelombang, arus, batimetri, morfologi dasar perairan dangkal, data badai dan gelombang ekstrem	menilai beban laut, perubahan arus, dan stabilitas struktur pesisir
Sedimen dan garis pantai	tren abrasi-akresi, pasokan sedimen sungai, kondisi muara, pengaruh bendungan, perubahan garis pantai multiwaktu	menentukan desain berbasis neraca sedimen dan dampak antarruas
Kualitas air dan intrusi asin	DHL, klorida, salinitas air tanah dangkal, kualitas air permukaan, potensi akumulasi polutan	menilai risiko penurunan kualitas lingkungan di sisi darat dan laut
Tata ruang dan sosial-spasial	RTRW, RDTR, RZWP3K, KKPRL, penggunaan lahan, kepadatan penduduk, aset strategis, mata pencaharian, kawasan sensitif	menilai keterpaparan dan integrasi rekomendasi ke pengendalian ruang

B. Skala Peta dan Ketelitian

Skala peta disesuaikan dengan tingkat keputusan. Penapisan regional dapat menggunakan skala 1:250.000 sampai 1:100.000. Studi kelayakan ruas prioritas menggunakan skala paling kecil 1:50.000 atau lebih rinci. Verifikasi tapak prasarana menggunakan skala operasional sesuai kebutuhan desain, umumnya 1:10.000, 1:5.000, atau lebih rinci untuk tapak struktur dan utilitas penting.

Semua peta wajib dilengkapi sistem koordinat, sumber data, tanggal akuisisi, metode interpretasi, penanggung jawab teknis, dan tingkat ketelitian. Data multiwaktu harus menyebutkan periode pengamatan agar tren perubahan dapat dievaluasi secara benar.

IV. TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

A. Tahap I - Penapisan Awal Koridor dan Ruas Pesisir

Tahap I dilakukan untuk menyaring koridor dan ruas pesisir yang dapat dilanjutkan ke studi rinci, ruas yang memerlukan data tambahan, dan ruas yang harus dieliminasi dari rencana intervensi tertentu karena memiliki pembatas fatal. Penapisan awal dilakukan dengan tumpang susun data geologi, geomorfologi, penurunan muka tanah, perubahan garis pantai, banjir, rob, intrusi asin, tata ruang, penggunaan lahan, dan aset strategis.

Tabel L8.6. Keluaran Tahap I dalam KGL GSW

Keluaran Tahap I	Isi minimum
Peta penapisan awal	kelas ruas yang layak ditelaah lebih lanjut, ruas yang memerlukan data tambahan, dan ruas yang tidak direkomendasikan untuk intervensi tertentu
Daftar pembatas utama	penurunan muka tanah, tanah lunak, abrasi, defisit sedimen, genangan rob, intrusi asin, gangguan muara, dan keterpaparan sosial
Prioritas ruas	urutan ruas yang perlu studi rinci berdasarkan risiko, nilai aset, kebutuhan perlindungan, dan kecukupan data
Rekomendasi data tambahan	jenis survei, uji lapangan, pemantauan, dan model teknis yang diperlukan sebelum keputusan lanjutan

B. Tahap II - Studi Kelayakan Rinci Ruas Prioritas

Tahap II dilaksanakan pada ruas prioritas untuk membuktikan kelayakan geologi lingkungan secara lebih rinci. Studi ini wajib menilai apakah perlindungan struktural keras, perlindungan kombinasi, polder, peninggian lokal, pemulihan pesisir, atau pembatasan pemanfaatan ruang merupakan pilihan yang paling tepat.

- pemetaan geologi dan geomorfologi rinci;
- penyelidikan geologi teknik dan geoteknik bawah permukaan;
- kajian penurunan muka tanah dan proyeksi pengaruhnya terhadap umur layanan prasarana;
- kajian hidrologi, drainase, rob, dan kemampuan pelepasan air darat;
- kajian pasang surut, gelombang, arus, batimetri, dan morfologi perairan dangkal;
- kajian perubahan garis pantai, abrasi-akresi, suplai sedimen, dan pengaruh DAS serta muara;
- kajian intrusi asin, kualitas air, dan potensi akumulasi air tercemar di sisi darat;
- kajian keterpaparan penduduk, prasarana vital, kawasan industri, pelabuhan, dan aset strategis; dan
- penyusunan kelas kesesuaian, syarat teknis, serta matriks ITBX.

C. Tahap III - Verifikasi Tapak Rinci dan Parameter Desain

Tahap III dilakukan apabila ruas atau tapak telah dinyatakan dapat dilanjutkan tetapi masih memerlukan pembuktian teknis untuk parameter desain. Tahap ini tidak menggantikan desain rekayasa rinci, tetapi memberikan batas geologi lingkungan yang harus dipenuhi dalam desain.

Tabel L8.7. Obyek verifikasi dalam KGL GSW

Objek verifikasi	Parameter yang perlu dibuktikan
Tanggul laut atau tanggul pantai	kedalaman lapisan pendukung, penurunan total dan diferensial, stabilitas lereng tanggul, respon terhadap gelombang, dan kebutuhan perlindungan kaki struktur
Polder, rumah pompa, dan pintu air	kapasitas pelepasan air, elevasi operasional, risiko backwater, keandalan saat rob, dan risiko penurunan muka tanah
Kanal dan saluran utama	stabilitas tebing saluran, sedimentasi, hubungan dengan muara, kualitas air, dan kebutuhan pemeliharaan
Struktur di muara	morfologi muara, potensi sedimentasi, perubahan arus, kebutuhan pengaturan alur, dan dampak ke ruas sekitar
Ruas dengan pemulihan pesisir	kesesuaian lahan untuk vegetasi pelindung, ketersediaan sedimen, pasang surut, kualitas air, dan ruang adaptasi pesisir

D. Keputusan Teknis Setiap Tahap

Setiap tahap analisis wajib menghasilkan keputusan teknis sementara. Keputusan tersebut dapat berupa: dilanjutkan ke tahap berikutnya; dilanjutkan dengan syarat data atau mitigasi tambahan; diarahkan pada alternatif perlindungan lain; dibatasi untuk intervensi tertentu; atau tidak direkomendasikan karena pembatas fatal.

V. PARAMETER PENILAIAN DAN KRITERIA KESESUAIAN

Tabel L8.8. Faktor Daya Dukung Geologi

Parameter	Indikator minimum	Arah penilaian
Tanah dasar dan batuan	ketebalan tanah lunak, kedalaman lapisan pendukung, kuat geser, kompresibilitas, konsolidasi, nilai CPT/SPT	semakin stabil dan semakin rendah penurunan, semakin tinggi kesesuaian
Geomorfologi pantai	dataran delta, muara, dataran pasang surut, elevasi relatif, kemiringan, ruang adaptasi	semakin rendah pembatas geomorfologi, semakin tinggi kesesuaian
Kestabilan tapak	indikasi penurunan diferensial, erosi tepi, deformasi permukaan, riwayat kerusakan prasarana	semakin stabil, semakin tinggi kesesuaian

Parameter	Indikator minimum	Arah penilaian
Ketersediaan ruang operasi	ruang untuk tanggul, kanal, pompa, kolam retensi, akses pemeliharaan, dan jalur evakuasi	semakin memadai ruang operasi, semakin tinggi kesesuaian
Konektivitas sistem tata air	hubungan drainase, sungai, muara, kanal, dan laut	semakin terjaga pelepasan air, semakin tinggi kesesuaian

Tabel L8.9. Faktor Bahaya Geologi di wilayah Pesisir

Bahaya	Indikator minimum	Implikasi pengendalian
Penurunan muka tanah	laju tahunan, pola spasial, penyebab dominan, proyeksi umur layanan prasarana	pembatasan desain, pemantauan elevasi, penyesuaian sistem pompa dan drainase
Rob dan banjir	kedalaman, frekuensi, durasi, luas genangan, kapasitas drainase, backwater	polder, pompa, ruang retensi, peninggian lokal, dan pembatasan fungsi rentan
Abrasi-akresi dan perubahan garis pantai	tren multiwaktu, laju perubahan, kondisi muara, energi gelombang, pasokan sedimen	pemilihan tipe perlindungan, garis aman, dan mitigasi dampak antarruas
Intrusi asin dan kualitas air	DHL, klorida, salinitas, muka air tanah dangkal, kualitas air permukaan	perlindungan sumber air, pengelolaan drainase, dan pencegahan akumulasi air tercemar
Likuefaksi dan gempa	material jenuh air, muka air tanah, nilai CPT/SPT, tingkat guncangan, deformasi permanen	perbaikan tanah, standar fondasi, dan pembatasan struktur rentan
Gelombang ekstrem dan pasang surut	tinggi gelombang rencana, periode ulang, elevasi pasang, run-up, overtopping	tinggi struktur, freeboard, bentuk struktur, dan zona aman

C. Faktor Nongeologi

Faktor nongeologi digunakan untuk membaca keterpaparan, urgensi perlindungan, dan kemampuan operasional. Faktor ini meliputi kepadatan penduduk, nilai aset strategis, pelabuhan, kawasan industri, jaringan transportasi, prasarana air minum, sanitasi, jaringan listrik, fasilitas sosial, mata pencaharian pesisir, status tata ruang, kepastian lahan, serta kapasitas kelembagaan untuk mengoperasikan pompa, pintu air, dan prasarana pemeliharaan.

D. Faktor Penyisih

Faktor penyisih digunakan untuk mengeluarkan atau membatasi ruas dan tapak sebelum dilakukan penilaian akhir. Faktor penyisih tidak diberi skor, tetapi menjadi dasar eliminasi atau pembatasan keras.

- kawasan lindung, kawasan konservasi, sempadan pantai, sempadan sungai, sempadan muara, dan kawasan perlindungan setempat;
- zona dengan pembatas fatal yang tidak dapat dikendalikan secara teknis;
- ruas dengan risiko gabungan sangat tinggi terhadap penduduk dan prasarana yang tidak memiliki ruang mitigasi memadai;
- ruas yang intervensinya berpotensi menghambat pelepasan air darat secara signifikan;
- tapak yang dapat memperluas abrasi atau mengubah sedimen pada ruas sekitar secara tidak dapat diterima;
- ruas yang bertentangan dengan RTRW, RDTR, RZWP3K, atau ketentuan pemanfaatan ruang laut; dan
- kawasan dengan nilai ekologis atau sosial tinggi yang harus dipertahankan sebagai pelindung alami atau ruang adaptasi.

E. Skoring dan Pembobotan

Skoring dan pembobotan dilakukan setelah faktor penyisih diterapkan. Bobot dapat disesuaikan dengan tujuan analisis, skala data, dan karakter ruas. Pada kawasan dengan penurunan muka tanah dan rob dominan, bobot bahaya geologi-pesisir harus lebih besar. Pada tapak struktur berat, bobot geologi teknik dan tanah dasar harus ditingkatkan. Pada ruas yang berhubungan dengan muara,

bobot hidrologi, drainase, dan sedimen harus diperbesar.

Tabel L8.10. Bobot acuan faktor faktor penentu dalam KGL GSW

Faktor	Bobot acuan	Catatan penerapan
Daya dukung geologi dan geoteknik	25-35%	ditingkatkan pada tapak struktur berat dan tanah lunak
Bahaya geologi-pesisir	35-50%	ditingkatkan pada ruas dengan rob, penurunan muka tanah, abrasi, dan perubahan garis pantai aktif
Hidrologi, drainase, dan sedimen	15-25%	ditingkatkan pada muara, delta, dan kawasan yang bergantung pada pompa
Faktor nongeologi dan keterpaparan	10-20%	digunakan untuk menentukan prioritas, syarat sosial, dan pengendalian kawasan
Faktor penyisih	tidak diskor	digunakan sebagai eliminasi atau pembatas sebelum kelas akhir ditetapkan

VI. KLASIFIKASI KESESUAIAN DAN REKOMENDASI TEKNIS

A. KELAS KESESUAIAN LAHAN

Tabel L8.11. Kelas, Makna Teknis, dan Tindak Lanjut pad Zona Kesesuaian Lahan

Kelas	Makna teknis	Tindak lanjut
Sesuai	Ruas atau tapak memiliki daya dukung memadai, bahaya dapat diterima, dan intervensi perlindungan pesisir dapat dilakukan dengan standar teknis umum dan pemantauan.	dapat dilanjutkan ke pra-desain dengan tetap memenuhi ketentuan teknis dan lingkungan
Sesuai bersyarat	Ruas atau tapak masih memungkinkan untuk intervensi, tetapi memerlukan syarat teknis, mitigasi, pemantauan, atau kombinasi perlindungan tertentu.	wajib dilengkapi investigasi rinci, pengendalian risiko, dan integrasi dalam tata ruang serta dokumen lingkungan
Terbatas	Ruas atau tapak memiliki pembatas kuat sehingga hanya dapat digunakan untuk intervensi tertentu, intensitas terbatas, atau alternatif non-struktural dan kombinasi.	fungsi struktural besar dibatasi; prioritas pada polder lokal, pemulihan pesisir, pengelolaan tata air, atau adaptasi ruang
Tidak sesuai	Ruas atau tapak memiliki pembatas fatal atau risiko tidak dapat diterima untuk intervensi yang direncanakan.	intervensi harus dialihkan, ditunda, atau diganti dengan pendekatan lain sesuai hasil analisis

B. Jenis Rekomendasi Teknis

Rekomendasi teknis harus menyatakan jenis intervensi yang paling sesuai untuk setiap ruas. Rekomendasi tidak boleh hanya menyebut aman atau tidak aman, tetapi harus menetapkan pilihan teknis, syarat, batas, dan kebutuhan pemantauan.

Tabel L8.12. Tipe rekomendasi dalam KGL GSW

Tipe rekomendasi	Kondisi penerapan	Contoh arahan
Perlindungan struktural strategis	aset sangat penting, risiko tinggi, daya dukung dapat dibuktikan, dan tata air dapat dikelola	tanggul laut/tanggul pantai dengan fondasi sesuai, polder, pintu air, pompa, dan pemantauan jangka panjang
Perlindungan kombinasi	struktur diperlukan tetapi risiko ekologis, sedimen, atau tata air masih signifikan	kombinasi tanggul lokal, peninggian, restorasi mangrove, pengelolaan sedimen, dan drainase adaptif
Penguatan sistem tata air	ancaman utama berasal dari banjir, rob masuk melalui saluran, dan penurunan muka tanah	polder, rumah pompa, kanal, kolam retensi, pintu air, dan pengendalian pemanfaatan ruang

Tipe rekomendasi	Kondisi penerapan	Contoh arahan
Pemulihan pesisir berbasis alam	ruas masih memiliki ruang ekologis dan suplai sedimen memadai	pemulihan mangrove, sabuk hijau, pengendalian abrasi lunak, dan pembatasan pembangunan baru
Adaptasi dan pengendalian ruang	risiko tinggi dan perlindungan struktural tidak sebanding	pembatasan pemanfaatan, pengurangan keterpaparan, relokasi terbatas, dan penetapan ruang aman

C. Clearance Geologi Lingkungan

Ruas atau tapak yang akan dilanjutkan ke pra-desain, desain rinci, pengadaan, atau konstruksi prasarana perlindungan pesisir strategis harus memperoleh clearance geologi lingkungan. Clearance diberikan apabila data minimum terpenuhi, analisis telah divalidasi, pembatas utama telah diidentifikasi, rekomendasi teknis jelas, dan risiko sisa dapat dikelola.

Clearance geologi lingkungan dapat berupa: layak dilanjutkan; layak dilanjutkan dengan syarat; dikembalikan untuk kelengkapan data; diarahkan pada alternatif intervensi lain; atau tidak direkomendasikan untuk intervensi yang diusulkan.

VII. PENGATURAN ZONASI DAN MATRIKS ITBX

Hasil kajian geologi lingkungan wajib diterjemahkan ke dalam arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX. Matriks ITBX digunakan untuk menghubungkan kelas kesesuaian, faktor pembatas, dan pilihan intervensi dengan kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, atau tidak diperbolehkan.

Tabel L8.13. Pengaturan Zonasi dan matriks ITBX dalam KGL GSW

Zona geologi lingkungan	I - Diizinkan	T - Terbatas	B - Bersyarat	X - Tidak diperbolehkan
Zona perlindungan struktural dapat dipertimbangkan	tanggul/polder/pompa sesuai desain; akses pemeliharaan; pemantauan	fungsi komersial pendukung terbatas	bangunan baru wajib memenuhi elevasi aman, drainase, dan standar fondasi	kegiatan yang menutup koridor air atau mengganggu operasi prasarana
Zona perlindungan kombinasi	pemulihan vegetasi pesisir; tanggul lokal; pengendalian tata air	prasarana skala terbatas	struktur keras wajib disertai analisis sedimen dan dampak antarruas	reklamasi atau struktur panjang tanpa kajian rinci
Zona tata air dan retensi	kanal, kolam retensi, pompa, ruang terbuka biru-hijau, jalur evakuasi	bangunan utilitas tertentu	pemanfaatan wajib menjaga kapasitas tampungan dan pelepasan air	alih fungsi yang mengurangi kapasitas tata air
Zona pemulihan pesisir	restorasi mangrove, perlindungan alami, pendidikan, pemantauan	akses wisata terbatas	kegiatan ekonomi lokal wajib berbasis daya dukung	struktur yang merusak fungsi pelindung alami
Zona tidak sesuai untuk intervensi struktural	pemantauan, konservasi, pengurangan keterpaparan	akses pemeliharaan dan keselamatan	kegiatan eksisting wajib dievaluasi dan dikendalikan	pembangunan struktur strategis baru atau peningkatan intensitas ruang

VIII. KETENTUAN KHUSUS RUAS PESISIR

Ruas pesisir yang berbeda memerlukan pendekatan berbeda. Oleh karena itu, Petunjuk Teknis ini menetapkan arahan khusus berdasarkan tipe ruas yang umum dijumpai pada wilayah pesisir strategis.

Tabel L8.14. Ketentuan khusus ruas pesisir dalam KGL GSW

Tipe ruas	Pembatas dominan	Arahan geologi lingkungan
Metropolitan pesisir padat	penurunan muka tanah, rob, drainase, intrusi asin, keterpaparan penduduk dan aset tinggi	polder selektif, penguatan layanan air permukaan/perpipaan, pemantauan elevasi, pembatasan intensitas baru
Dataran delta dan muara	tanah lunak, sedimentasi, backwater, perubahan alur muara	kajian sedimen dan muara, perlindungan koridor aliran, pembatasan struktur yang menghambat pelepasan air
Ruas abrasi aktif	perubahan garis pantai, gelombang, defisit sedimen, kerusakan pelindung alami	kombinasi struktur selektif, pemulihan pelindung alami, pengelolaan sedimen, dan garis aman
Ruas akresional atau relatif stabil	perubahan tren sedimen, alih fungsi lahan pesisir, tekanan pembangunan	pemantauan garis pantai, pengendalian pemanfaatan ruang, perlindungan fungsi alami
Kawasan industri dan pelabuhan pesisir	beban struktur berat, tanah lunak, rob, banjir, risiko utilitas dan kualitas air	investigasi geoteknik rinci, elevasi aman, pemisahan zona risiko, dan pengelolaan drainase industri
Ruas reklamasi atau rencana reklamasi	tanah dasar lunak, konsolidasi, stabilitas tepi, perubahan arus dan sedimen	verifikasi tapak rinci, pemantauan penurunan, kajian hidrodinamika, dan pengendalian tata air

A. Ketentuan Khusus Tanggul Laut dan Tanggul Pantai

Tanggul laut dan tanggul pantai hanya dapat direkomendasikan apabila hasil analisis menunjukkan bahwa tanah dasar mampu mendukung struktur dengan risiko yang dapat dikendalikan, perubahan garis pantai dapat diterima, pelepasan air darat tetap terjamin, dan operasi prasarana dapat dipertahankan dalam jangka panjang. Pada ruas dengan penurunan muka tanah aktif, desain wajib memperhitungkan proyeksi perubahan elevasi selama umur layanan prasarana.

B. Ketentuan Khusus Sistem Polder, Rumah Pompa, dan Pintu Air

Sistem polder, rumah pompa, dan pintu air wajib dinilai sebagai sistem operasional jangka panjang, bukan hanya struktur tunggal. Kajian harus menilai kapasitas tampungan, kapasitas pompa, skenario kegagalan listrik atau operasi, sedimentasi saluran, kualitas air, kebutuhan akses pemeliharaan, dan hubungan dengan perubahan elevasi akibat penurunan muka tanah.

C. Ketentuan Khusus Pemulihan Pesisir Berbasis Alam

Pemulihan pesisir berbasis alam dapat direkomendasikan pada ruas yang masih memiliki ruang ekologis, kualitas air yang dapat mendukung, dan kondisi sedimen yang memungkinkan. Rekomendasi ini dapat berupa pemulihan mangrove, perlindungan dataran pasang surut, penataan tambak ramah lingkungan, pengelolaan sedimen, dan pembatasan pemanfaatan ruang baru pada zona sensitif.

D. Ketentuan Khusus Wilayah Belakang Tanggul

Wilayah belakang tanggul wajib dianalisis secara khusus karena berpotensi mengalami ketergantungan pada pompa, akumulasi air permukaan, penurunan kualitas air, dan peningkatan risiko genangan apabila tata air tidak dikelola. Rekomendasi geologi lingkungan harus memuat syarat kapasitas drainase, ruang retensi, jalur evakuasi, akses pemeliharaan, dan batas pemanfaatan ruang di kawasan berisiko.

IX. PELAPORAN, VALIDASI, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAKHIRAN

A. Format Laporan

Laporan kajian geologi lingkungan untuk tapak Giant Sea Wall atau prasarana perlindungan pesisir strategis paling sedikit memuat: pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, metode, data dan sumber data, kondisi geologi lingkungan, analisis ruas, analisis daya dukung, analisis bahaya, analisis tata air, analisis sedimen dan garis pantai, analisis sosial-ekologis, sintesis kesesuaian, rekomendasi teknis, matriks ITBX, rencana pemantauan, dan lampiran data.

B. Peta dan Keluaran Digital

- peta lokasi dan batas ruas analisis;
- peta geologi dan geomorfologi pesisir;
- peta geologi teknik dan tanah dasar;
- peta penurunan muka tanah dan proyeksi elevasi relatif;
- peta banjir, rob, dan sistem drainase;
- peta perubahan garis pantai, abrasi-akresi, dan dinamika sedimen;
- peta intrusi asin dan kualitas air yang relevan;
- peta keterpaparan penduduk, prasarana vital, dan aset strategis;
- peta zona kesesuaian geologi lingkungan untuk intervensi perlindungan pesisir;
- peta rekomendasi teknis dan arahan pengaturan zonasi.

C. Validasi Teknis

Validasi teknis dilakukan oleh unit yang berwenang di bidang geologi lingkungan. Validasi meliputi pemeriksaan kecukupan data, kesesuaian skala, ketepatan metode, konsistensi interpretasi, keterlacakan sumber data, kesahihan peta, kesesuaian rekomendasi dengan karakter ruas, serta kelayakan matriks ITBX. Hasil validasi dituangkan dalam berita acara atau catatan teknis.

D. Pemantauan

Pemantauan dilakukan untuk memastikan bahwa rekomendasi tetap sesuai dengan perubahan kondisi lapangan. Pemantauan paling sedikit mencakup penurunan muka tanah, perubahan garis pantai, rob, banjir, kapasitas drainase, kualitas air, intrusi asin, sedimentasi muara, kinerja pompa, kondisi struktur, vegetasi pelindung, dan perubahan pemanfaatan ruang.

Tabel L8.15. Metode pemantauan parameter dalam KGL GSW

Parameter	Metode pemantauan	Frekuensi minimum
Penurunan muka tanah	InSAR, GNSS, pengukuran elevasi berkala, survei geodetik	tahunan atau lebih sering pada ruas kritis
Garis pantai dan abrasi-akresi	citra satelit, UAV, survei garis pantai, pengamatan lapangan	tahunan dan setelah kejadian ekstrem
Rob, banjir, dan drainase	pengukuran tinggi genangan, durasi, kapasitas saluran, catatan operasi pompa	musiman dan saat kejadian besar
Kualitas air dan intrusi asin	DHL, klorida, salinitas, kualitas air permukaan	semesteran atau sesuai tingkat risiko
Kinerja prasarana	inspeksi struktur, deformasi, retakan, fungsi pompa, pintu air, dan kanal	semesteran dan setelah kejadian ekstrem

E. Pemutakhiran

Pemutakhiran analisis dilakukan paling sedikit setiap 5 tahun atau lebih cepat apabila terjadi perubahan signifikan berupa peningkatan laju penurunan muka tanah, perluasan rob, perubahan garis pantai, perubahan RTRW/RDTR/RZWP3K, pembangunan prasarana baru, kejadian gempa, gelombang ekstrem, kegagalan prasarana, atau temuan teknis baru yang mempengaruhi kelayakan ruas.

X. PENUTUP

Petunjuk Teknis ini menjadi dasar operasional untuk memastikan bahwa rencana Giant Sea Wall atau prasarana perlindungan pesisir strategis disusun berdasarkan daya dukung geologi, bahaya geologi-pesisir, dinamika sedimen, tata air darat, penurunan muka tanah, dan risiko sosial-ekologis. Dengan demikian, perlindungan pesisir tidak diarahkan sebagai solusi tunggal yang seragam, tetapi sebagai sistem perlindungan terpadu yang selektif, adaptif, dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Petunjuk Teknis ini dapat disempurnakan sesuai perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi pemetaan, data pemantauan, hasil evaluasi lapangan, perubahan kebijakan tata ruang, dan kebutuhan harmonisasi dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Gambar L9.1. Bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Pembangkit Litrik Tenaga Nuklir

LAMPIRAN 9:

Petunjuk Teknis KGL untuk Tapak Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Lampiran 9 menunjukkan kebutuhan standar kehati-hatian tinggi untuk tapak fasilitas strategis. Lampiran ini berkaitan erat dengan Bab 7, Bab 11, dan Bab 12 karena menuntut data rinci, validasi kuat, dokumentasi yang terlacak, dan rekomendasi yang dapat diuji secara teknis.

Tabel L9.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 5, Bab 7, Bab 10, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Pedoman kehati-hatian tinggi untuk penapisan, studi tapak strategis, validasi teknis, zona penyangga, dan pertimbangan ruang.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L9.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

A. Kedudukan Petunjuk Teknis

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Tapak Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir merupakan bagian dari Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan yang digunakan untuk menilai kesesuaian, kelayakan, pembatas, syarat teknis, dan arahan pengendalian pemanfaatan ruang bagi calon tapak PLTN.

Petunjuk Teknis ini disusun sebagai acuan teknis di bidang geologi lingkungan dan tidak menggantikan kewenangan keselamatan nuklir, perizinan instalasi nuklir, AMDAL, perizinan berusaha, studi rekayasa rinci, atau ketentuan teknis yang menjadi kewenangan otoritas pengawas nuklir. Hasil kajian geologi lingkungan menjadi masukan substantif untuk memastikan bahwa calon tapak dinilai secara berlapis berdasarkan kondisi geologi, seismotektonik, geologi teknik, hidrogeologi, bahaya geologi, tata ruang, serta risiko

eksternal yang dapat mempengaruhi keselamatan jangka panjang.

Dalam konteks PLTN, kajian geologi lingkungan harus ditempatkan sebagai instrumen kehati-hatian tinggi. Penetapan tapak tidak cukup hanya memenuhi ketersediaan lahan dan akses infrastruktur, tetapi harus membuktikan bahwa tapak tidak mengandung pembatas keselamatan yang tidak dapat diterima, memiliki kondisi fondasi yang dapat direkayasa secara aman, mempunyai sistem air tanah yang dapat dipahami dan dipantau, serta dapat diintegrasikan ke dalam pengaturan ruang dan zona penyangga yang terkendali.

B. Maksud dan Tujuan

Petunjuk Teknis ini dimaksudkan sebagai acuan bagi Pemerintah Pusat, pemerintah daerah, Badan Geologi, otoritas teknis terkait, lembaga penelitian, perguruan tinggi, badan usaha, konsultan, dan pihak lain dalam melaksanakan kajian geologi lingkungan untuk calon tapak PLTN.

Tujuan Petunjuk Teknis ini adalah:

- menyeragamkan parameter, tahapan, metode, keluaran, dan standar mutu kajian geologi lingkungan tapak PLTN;
- menyaring calon tapak berdasarkan kriteria geologi, seismotektonik, geologi teknik, hidrogeologi, bahaya geologi, dan kesesuaian tata ruang;
- menetapkan dasar teknis untuk klasifikasi tapak menjadi layak, layak bersyarat, perlu investigasi tambahan, atau tidak layak;
- menyediakan data dan rekomendasi geologi lingkungan bagi penentuan parameter desain awal, pengendalian ruang, zona inti, zona penyangga, dan matriks ITBX;
- mendukung koordinasi antara Badan Geologi, otoritas pengawas nuklir, pemerintah daerah, dan instansi terkait dalam proses evaluasi tapak;
- menjamin bahwa seluruh data, peta, model, dan rekomendasi dapat diverifikasi melalui validasi teknis, pengendalian mutu, dan telaah sejawat.

C. Ruang Lingkup

Ruang lingkup Petunjuk Teknis ini meliputi:

- penyaringan awal calon tapak melalui evaluasi regional dan penapisan pembatas keselamatan geologi;
- studi kelayakan rinci tapak melalui karakterisasi geologi struktur, seismotektonik, geologi teknik, hidrogeologi, dan bahaya geologi eksternal;
- konfirmasi teknis tapak untuk parameter desain, apabila hasil studi kelayakan menunjukkan perlunya pembuktian tambahan;
- analisis khusus tapak pesisir, apabila calon tapak berada di wilayah pantai, muara, pulau kecil, atau area yang dipengaruhi dinamika laut;
- penyusunan peta kesesuaian tapak, rekomendasi teknis, zona inti, zona penyangga, dan matriks ITBX;
- pelaporan, validasi teknis, integrasi data geospasial, pemantauan, dan pemutakhiran.

D. Pengertian Operasional

Tabel L9.3. Istilah dan pengertian operasional

Istilah	Pengertian operasional
Tapak PLTN	Area yang diusulkan untuk pembangunan PLTN beserta area penyangga, koridor utilitas, akses darurat, fasilitas pendukung, dan ruang yang secara teknis perlu dikendalikan berdasarkan hasil analisis.
Sesar kritis untuk keselamatan	Sesar yang berdasarkan bukti geologi, geomorfologi, seismotektonik, atau paleoseismologi berpotensi mempengaruhi keselamatan tapak dan harus dinilai secara khusus.
Safe Shutdown Earthquake	Gempa rencana keselamatan yang digunakan sebagai salah satu dasar penentuan parameter desain sistem keselamatan reaktor sesuai ketentuan otoritas pengawas nuklir.

Istilah	Pengertian operasional
Peak Ground Acceleration	Percepatan tanah puncak yang digunakan dalam analisis bahaya seismik dan respons tapak.
Likuefaksi	Kehilangan kuat geser tanah jenuh air akibat guncangan sehingga tanah tidak mampu mempertahankan dukungan terhadap beban secara memadai.
Akuifer utama	Satuan hidrogeologi penting yang menyimpan dan mengalirkan air tanah serta harus dinilai dalam kaitannya dengan perlindungan air tanah dan potensi transport kontaminan.
Zona inti	Area utama PLTN yang memuat fasilitas utama, sistem keselamatan, utilitas internal, dan area keamanan yang wajib dikendalikan secara ketat.
Zona penyangga	Area di sekitar zona inti yang ditetapkan berdasarkan hasil analisis risiko, pengendalian pemanfaatan ruang, akses evakuasi, dan perlindungan keselamatan tapak.

II. PRINSIP DAN KERANGKA ANALISIS

A. Prinsip Dasar

- Kajian geologi lingkungan untuk tapak PLTN dilaksanakan berdasarkan prinsip kehati-hatian tinggi, berbasis bukti ilmiah, berlapis, dapat diverifikasi, multidisiplin, dan terintegrasi dengan keselamatan nuklir serta penataan ruang.
- Kehati-hatian tinggi: setiap pembatas yang berpengaruh terhadap keselamatan harus dibuktikan secara memadai sebelum tapak dinyatakan layak.
- Bertahap: penilaian dilakukan dari tingkat regional, tingkat tapak, sampai konfirmasi teknis parameter desain.
- Berbasis bukti: semua kesimpulan harus didasarkan pada data lapangan, data laboratorium, data geofisika, data geospasial, atau model yang dapat ditelusuri.
- Multidisiplin: analisis memadukan geologi, seismotektonik, geologi teknik, hidrogeologi, geologi pesisir, hidrologi, tata ruang, dan manajemen risiko.
- Eliminatif dan evaluatif: pembatas fatal digunakan untuk menolak tapak sejak awal, sedangkan pembatas yang masih dapat dikendalikan dinilai melalui syarat teknis.
- Operasional: hasil analisis harus dapat diturunkan menjadi kelas kelayakan, rekomendasi teknis, zona pengendalian, dan matriks ITBX.

B. Kerangka Penilaian

Kerangka penilaian terdiri atas tiga lapis. Lapis pertama adalah penyaringan awal untuk menyingkirkan calon tapak yang bertentangan dengan kriteria keselamatan dasar. Lapis kedua adalah studi kelayakan rinci untuk membuktikan kondisi tapak secara kuantitatif. Lapis ketiga adalah konfirmasi teknis parameter desain dan pengendalian ruang bagi tapak yang masih memerlukan pembuktian tambahan.

Tabel L9.4. Lapis penilaian dan keluaran utama dalam KGL PLTN

Lapis penilaian	Tujuan	Keluaran utama
Penyaringan awal	Menyaring wilayah calon tapak berdasarkan bahaya geologi fatal, hidrogeologi awal, geoteknik awal, kesesuaian tata ruang, dan risiko eksternal.	daftar tapak lolos, lolos bersyarat, atau tidak lolos; peta sintesis awal; daftar isu lanjutan
Studi kelayakan rinci	Membuktikan karakter geologi, sesar, bahaya gempa, fondasi, likuefaksi, hidrogeologi, dan tapak pesisir secara rinci.	model tapak 3D, parameter seismik dan geoteknik, model hidrogeologi, rekomendasi kelayakan
Konfirmasi teknis	Memastikan parameter desain dan pengendalian ruang pada bagian tapak yang masih memiliki ketidakpastian teknis.	parameter desain final, syarat mitigasi, zona inti, zona penyangga, dan matriks ITBX

C. Komponen Utama Analisis

Tabel L9.5. Parameter yang dinilai pada komponen utama dalam KGL PLTN

Komponen	Parameter yang dinilai	Implikasi keputusan
Geologi dan geomorfologi	litologi, stratigrafi, bentuk lahan, evolusi tapak, kestabilan permukaan, indikasi struktur	penentuan satuan tapak dan kebutuhan investigasi rinci
Seismotektonik	sumber gempa, sesar aktif, sesar kritis untuk keselamatan, PGA, respons spektrum, SSE	penentuan kelayakan seismik dan parameter desain
Geologi teknik	stratigrafi teknik, daya dukung, konsolidasi, kecepatan gelombang geser, potensi likuefaksi, stabilitas fondasi	rekomendasi fondasi, perbaikan tanah, dan batas konstruksi
Hidrogeologi	satuan akuifer, muka air tanah, arah aliran, gradien hidraulik, kualitas air tanah, potensi transport kontaminan	perlindungan air tanah, desain pemantauan, dan pembatas pemanfaatan ruang
Bahaya eksternal lain	banjir, rob, tsunami, gerakan tanah, aktivitas vulkanik, gelombang ekstrem, abrasi, intrusi asin	eliminasi, syarat mitigasi, atau kebutuhan kajian khusus
Tata ruang dan ITBX	kesesuaian RTR, RDTR, kawasan lindung, koridor evakuasi, zona penyangga, kegiatan eksisting	pengendalian pemanfaatan ruang dan rancangan pengaturan zonasi

III. DATA DAN INFORMASI DASAR

A. Data Minimum

Data yang digunakan dalam kajian geologi lingkungan tapak PLTN harus memenuhi ketelitian, keterlacakan, dan kecukupan sesuai tahap kajian. Data minimum mencakup data regional, data tapak, data bawah permukaan, data pengujian, data geospasial, dan data tata ruang.

Tabel L9.6. Kelompok data dan informasi dasar dalam KGL PLTN

Kelompok data	Data minimum	Kegunaan utama
Geologi regional dan tapak	peta geologi, peta geomorfologi, stratigrafi, struktur geologi, sejarah geologi Kuarter, data singkapan dan titik bor	menyusun model geologi dan dasar penilaian pembatas tapak
Seismotektonik	katalog gempa, sumber gempa, peta sesar aktif, data paleoseismologi, data geodetik bila tersedia	menetapkan bahaya gempa, status sesar, PGA, dan SSE
Geologi teknik	pemboran inti, CPT/CPTu, SPT, uji laboratorium, profil Vs dan Vp, data muka air tanah, data deformasi	menilai fondasi, likuefaksi, stabilitas, dan kebutuhan perbaikan tanah
Hidrogeologi	peta hidrogeologi, data sumur, piezometer, uji pemompaan, uji pemulihan, tracer test bila diperlukan, kualitas air tanah	menyusun model aliran air tanah dan perlindungan akuifer
Bahaya eksternal	peta banjir, rob, tsunami, gunung api, gerakan tanah, intrusi asin, abrasi, perubahan garis pantai, curah hujan ekstrem	menentukan eliminasi, syarat mitigasi, dan desain pengamanan tapak
Tata ruang dan lingkungan	RTRWN, RTRW provinsi, RTRW kabupaten/kota, RDTR, RZWP3K, kawasan lindung, sempadan, persetujuan lingkungan, data kependudukan	menilai kesesuaian ruang, zona penyangga, dan ITBX

B. Skala dan Ketelitian

Tabel L9.7. Tahapan kegiatan dalam KGL PLTN

Tahap	Skala peta indikatif	Ketentuan data
Penyaringan awal	1:250.000 sampai 1:50.000	cukup untuk evaluasi regional dan eliminasi awal; wajib dilengkapi verifikasi lapangan terbatas

Tahap	Skala peta indikatif	Ketentuan data
Studi kelayakan rinci	1:25.000 sampai 1:5.000	wajib memuat data primer, investigasi bawah permukaan, dan pengujian teknis yang memadai
Konfirmasi teknis tapak	1:5.000 sampai 1:2.000 atau lebih rinci sesuai kebutuhan desain	wajib memuat titik investigasi, parameter desain, zona inti, zona penyangga, dan koridor teknis

IV. TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

A. Tahap I - Penyaringan Awal Calon Tapak

Tahap penyaringan awal bertujuan menilai kelayakan regional calon tapak dan menyingkirkan tapak yang memiliki pembatas fatal. Tahap ini dilaksanakan sebelum investigasi rinci agar sumber daya teknis difokuskan pada tapak yang masih dapat dipertimbangkan.

Tabel L9.8. Jenis kegiatan dalam KGL PLTN

Kegiatan	Metode utama	Keluaran wajib
Kompilasi data regional	kajian literatur, peta geologi, peta bahaya, peta tata ruang, citra satelit, DEM, data kegempaan, data hidrogeologi	basis data awal dan peta tematik regional
Interpretasi struktur dan geomorfologi	analisis DEM multi-arah, citra resolusi memadai, pemetaan kelurusan geomorfik, verifikasi lapangan	peta indikasi struktur dan pembatas morfologi
Kajian seismotektonik awal	inventarisasi sumber gempa, katalog gempa, PSHA awal, telaah sesar regional	peta seismotektonik awal dan nilai PGA awal
Kajian hidrogeologi awal	survei sumur, pengukuran muka air tanah, kualitas air, identifikasi akuifer, penilaian kerentanan awal	peta kesesuaian hidrogeologi awal
Kajian geoteknik awal	observasi tanah dan batuan, uji awal SPT/CPT bila diperlukan, identifikasi tanah lunak dan likuefaksi awal	peta pembatas geoteknik awal
Gate tata ruang	overlay RTRWN, RTRW provinsi, RTRW kabupaten/kota, RDTR, RZWP3K, kawasan lindung dan sempadan	status Go, Kuning, atau No-Go beserta catatan pasal/peta rujukan

B. Kriteria Eliminasi Tahap I

Tapak tidak dapat dilanjutkan apabila terdapat salah satu atau lebih pembatas yang secara teknis tidak dapat diterima atau tidak realistis dikendalikan. Kriteria eliminasi bersifat konservatif dan dapat diperketat sesuai ketentuan otoritas pengawas nuklir.

Tabel L9.9. Kriteria eliminasi tahap 1 dalam KGL PLTN

Pembatas	Indikator eliminasi	Tindak lanjut
Sesar kritis untuk keselamatan	indikasi kuat sesar aktif atau struktur yang berpotensi mempengaruhi tapak dan tidak dapat dibuktikan aman pada tahap awal	tidak lolos atau wajib pembuktian khusus sebelum tahap lanjutan
Bahaya gunung api	tapak berada pada zona bahaya produk vulkanik yang tidak dapat diterima untuk fasilitas nuklir	tidak lolos
Gerakan tanah aktif	ketidakstabilan lereng yang tidak dapat dikendalikan secara memadai	tidak lolos atau hanya dapat lanjut dengan pembatas sangat ketat
Banjir, rob, tsunami, atau bahaya pesisir	elevasi dan posisi tapak menunjukkan risiko tidak dapat diterima atau perlindungan tidak realistis	tidak lolos atau perlu kajian alternatif lokasi
Hidrogeologi sangat rentan	sistem akuifer tidak terlindungi dan berpotensi menjadi lintasan cepat transport kontaminan	tidak lolos atau wajib pembuktian hidrogeologi rinci

Pembatas	Indikator eliminasi	Tindak lanjut
Ketidaksesuaian tata ruang mutlak	tapak bertentangan secara tegas dengan dokumen tata ruang dan tidak realistis disesuaikan	tidak lolos

C. Tahap II - Studi Kelayakan Rinci

Tahap studi kelayakan rinci dilaksanakan terhadap calon tapak yang telah lolos penyaringan awal. Tahap ini bertujuan membuktikan secara kuantitatif seluruh parameter geologi lingkungan yang relevan bagi keselamatan tapak.

Tabel L9.10. Studi kelayakan rinci dalam KGL PLTN

Subkajian	Ruang lingkup teknis	Keluaran
Geologi struktur dan seismotektonik	pemetaan geologi rinci, paleoseismologi, geofisika resolusi tinggi, PSHA, DSHA bila diperlukan, analisis respons tapak	status sesar, PGA, SSE, spektrum respons, peta struktur rinci
Geologi teknik dan fondasi	pemboran inti, logging, SPT/CPTu, uji laboratorium, profil Vs dan Vp, analisis likuefaksi, stabilitas fondasi	model geoteknik, rekomendasi fondasi, kebutuhan perbaikan tanah, parameter desain
Hidrogeologi kuantitatif	uji pemompaan, uji pemulihan, piezometer, kualitas air tanah, model aliran air tanah 3D, transport kontaminan	parameter akuifer, peta potensiometri, model 3D, rekomendasi pemantauan
Bahaya eksternal lain	banjir, rob, tsunami, gelombang ekstrem, intrusi asin, gerakan tanah, aktivitas vulkanik, dan bahaya lain sesuai lokasi	peta bahaya, syarat mitigasi, rekomendasi pengendalian ruang
Tata ruang dan pengaturan zona	analisis kesesuaian RTR/RDTR/RZWP3K, zona inti, zona penyangga, koridor evakuasi, dan ITBX	paket masukan teknis untuk peraturan zonasi dan pengendalian pemanfaatan ruang

D. Tahap III - Konfirmasi Teknis Tapak

Tahap konfirmasi teknis dilakukan apabila hasil Tahap II menunjukkan bahwa tapak dapat dipertimbangkan, tetapi masih terdapat parameter desain atau pembatas tertentu yang memerlukan pembuktian tambahan. Tahap ini dapat mencakup tambahan pemboran inti, geofisika rinci, uji dinamik, uji hidrogeologi tambahan, pemantauan piezometer, analisis stabilitas khusus, atau kajian pesisir rinci.

Keluaran Tahap III berupa parameter desain final yang digunakan untuk penetapan tapak, rekomendasi mitigasi, batas zona inti, batas zona penyangga, syarat pengendalian pemanfaatan ruang, serta daftar parameter yang harus dipantau sepanjang siklus hidup fasilitas.

V. PARAMETER TEKNIS DAN METODE ANALISIS

A. Geologi Struktur, Sesar Kritis, dan Seismotektonik

Analisis geologi struktur dan seismotektonik merupakan komponen utama dalam penilaian tapak PLTN. Seluruh struktur geologi yang berpotensi mempengaruhi tapak wajib diidentifikasi, dipetakan, diverifikasi, dan diklasifikasikan berdasarkan bukti geologi muda, geomorfologi, data kegempaan, geofisika, serta paleoseismologi.

Tabel L9.11. Metode dan analisis kelayakan rinci dalam KGL PLTN

Metode		Tujuan	Keluaran
Pemetaan geologi rinci		mengidentifikasi litologi, kontak satuan, struktur, dan indikasi deformasi permukaan	peta geologi rinci dan inventarisasi struktur

Metode		Tujuan	Keluaran
Interpretasi citra dan DEM		mengidentifikasi kelurusan morfologi dan indikasi struktur yang perlu diverifikasi	peta indikasi struktur dan rencana verifikasi
Geofisika resolusi tinggi		menggambarkan kondisi bawah permukaan, batuan dasar, dan struktur tersembunyi	penampang geofisika dan interpretasi struktur
Paleoseismologi		menilai riwayat pergerakan struktur dan umur kejadian geologi muda	laporan sejarah deformasi dan status sesar
PSHA/DSHA		menentukan bahaya gempa dan parameter desain seismik	PGA, respons spektrum, dan SSE

B. Geologi Teknik, Fondasi, dan Likuefaksi

Analisis geologi teknik bertujuan membuktikan bahwa tanah dan batuan fondasi dapat mendukung fasilitas PLTN secara aman terhadap beban statik, dinamik, dan beban jangka panjang. Parameter yang dinilai mencakup stratigrafi teknik, daya dukung, konsolidasi, kuat geser, kekakuan, deformasi, profil kecepatan gelombang, dan potensi likuefaksi.

Tabel L9.12. Analisis Geologi teknik dalam KGL PLTN

Parameter	Data utama	Implikasi teknis
Daya dukung dan stabilitas fondasi	pemboran inti, SPT/CPTu, uji laboratorium, uji kuat geser, data batuan dasar	rekomendasi tipe fondasi dan kebutuhan perbaikan tanah
Kompresibilitas dan penurunan diferensial	uji konsolidasi, stratigrafi tanah, data pembebanan rencana	batas deformasi dan kebutuhan desain mitigasi
Profil Vs dan respons tapak	downhole, crosshole, MASW, mikrozonasi seismik bila diperlukan	klasifikasi tapak dan respons spektrum
Likuefaksi	SPT/CPTu, muka air tanah, gradasi tanah, input gempa rencana	zona rentan dan syarat perbaikan tanah
Stabilitas lereng dan tepi tapak	pemetaan lereng, sifat tanah dan batuan, data air tanah, riwayat gerakan tanah	pembatas lokasi, desain lereng, dan pemantauan

C. Hidrogeologi Kuantitatif dan Transport Kontaminan

Kajian hidrogeologi kuantitatif dilakukan untuk memahami satuan akuifer, arah aliran air tanah, parameter hidraulik, kualitas air tanah dasar, konektivitas antara air tanah dan air permukaan, serta potensi lintasan transport kontaminan dalam skenario terburuk. Kajian ini tidak dimaksudkan sebagai pengelolaan air tanah umum, melainkan sebagai bagian dari perlindungan lingkungan geologi tapak.

Tabel L9.13. Analisis Hidrogeologi dalam KGL PLTN

Parameter	Metode	Keluaran
Satuan hidrostratigrafi	pemboran, logging, korelasi litologi, geofisika, data sumur	model hidrostratigrafi tapak
Arah dan gradien aliran	piezometer, pengukuran muka air tanah multiwaktu, peta potensiometri	peta arah aliran dan gradien hidraulik
Parameter akuifer	pumping test, slug test, uji pemulihan, analisis hidraulik	nilai K, T, S, dan parameter model
Kualitas air tanah dasar	pengambilan contoh air, analisis kimia, parameter fisika-kimia	baseline kualitas air tanah

Parameter	Metode	Keluaran
Transport kontaminan	model aliran air tanah 3D, simulasi skenario terburuk, analisis sensitivitas	estimasi lintasan dan waktu transport potensial

D. Tapak Pesisir

Untuk tapak yang berada di pesisir, analisis wajib memperhitungkan tsunami, rob, banjir, gelombang ekstrem, abrasi, perubahan garis pantai, sedimentasi, intrusi asin, interaksi air tanah dan air laut, batimetri dangkal, serta kestabilan koridor intake dan outfall. Penilaian tapak pesisir tidak boleh hanya berbasis elevasi saat ini, tetapi harus memperhitungkan perubahan garis pantai, penurunan muka tanah, dan kinerja prasarana pesisir dalam jangka panjang.

- Kajian tsunami mencakup sumber tsunami, ketinggian landaan, waktu tiba, jalur evakuasi, dan elevasi aman fasilitas penting.
- Kajian rob dan banjir mencakup elevasi rencana, kapasitas drainase, backwater, kebutuhan pompa atau pintu air, serta ketergantungan pada sistem perlindungan pesisir.
- Kajian perubahan garis pantai mencakup citra multiwaktu, data sedimen, proses abrasi-akresi, dan dampaknya terhadap struktur pesisir.
- Kajian intake-outfall mencakup batimetri, arus, gelombang, kualitas air, sedimentasi, dan potensi gangguan operasi.

VI. PENENTUAN KELAS KELAYAKAN TAPAK

Kelas kelayakan tapak ditetapkan melalui sintesis seluruh parameter geologi lingkungan. Penilaian dilakukan dengan menggabungkan kriteria eliminasi, skoring dan pembobotan, analisis ahli, validasi teknis, serta kesesuaian tata ruang. Pembatas fatal berlaku sebagai dasar penolakan tanpa menunggu nilai skor akhir.

Tabel L9.14. Klasifikasi kelayakan tapak dalam KGL PLTN

Kelas	Makna teknis	Tindak lanjut
Layak	Tapak memenuhi persyaratan pokok dan tidak terdapat pembatas keselamatan yang tidak dapat diterima.	dapat dilanjutkan ke tahap desain dengan persyaratan umum dan pemantauan standar
Layak bersyarat	Tapak masih dapat dipertimbangkan tetapi memerlukan syarat teknis, mitigasi, pembatas ruang, atau pemantauan ketat.	syarat teknis wajib dimasukkan ke desain, dokumen lingkungan, peraturan zonasi, dan rencana pemantauan
Perlu investigasi tambahan	Data belum cukup untuk menyimpulkan kelayakan atau terdapat ketidakpastian pada parameter penting.	wajib dilakukan investigasi tambahan sebelum keputusan final
Tidak layak	Terdapat pembatas fatal, ketidaksesuaian tata ruang mutlak, atau risiko yang tidak dapat diterima.	tapak dieliminasi dari pilihan lokasi PLTN

A. Bobot Indikatif

Bobot penilaian dapat disesuaikan menurut kondisi geologi tapak, tingkat kedetilan data, dan ketentuan otoritas pengawas. Namun, untuk PLTN bobot keselamatan geologi dan seismotektonik harus ditempatkan dominan karena konsekuensi risikonya tinggi.

Tabel L9.15. Bobot indikatif faktor faktor penentu dalam KGL PLTN

Faktor	Bobot indikatif	Catatan penerapan
Geologi struktur dan seismotektonik	30-40%	menjadi faktor dominan untuk penilaian sesar kritis, PGA, dan SSE
Geologi teknik dan fondasi	25-30%	menilai stabilitas, likuefaksi, deformasi, dan kebutuhan perbaikan tanah
Hidrogeologi dan perlindungan air tanah	15-25%	menilai akuifer, arah aliran, transport kontaminan, dan pemantauan
Bahaya eksternal lain	10-20%	meliputi tsunami, banjir, rob, gunung api, gerakan tanah, dan bahaya pesisir
Tata ruang dan pengendalian kawasan	5-10%	menjamin integrasi ke RTR/RDTR/RZWP3K dan peraturan zonasi
Faktor penyisih	tidak diskor	digunakan sebagai eliminasi atau pembatas sebelum kelas akhir ditetapkan

VII. REKOMENDASI TEKNIS, ZONASI, DAN ITBX

Setiap hasil kajian geologi lingkungan tapak PLTN wajib dilengkapi rekomendasi teknis yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan tapak, penyusunan desain awal, pengendalian pemanfaatan ruang, penyusunan RDTR atau peraturan zonasi, serta koordinasi dengan otoritas pengawas nuklir dan pemerintah daerah.

A. Isi Rekomendasi Teknis

- status kelayakan tapak dan alasan teknisnya;
- pembatas utama dan pembatas yang masih memerlukan investigasi lanjutan;
- parameter desain awal untuk bahaya gempa, fondasi, hidrogeologi, dan bahaya eksternal lain;
- batas zona inti, zona penyangga, koridor evakuasi, koridor utilitas, dan ruang pengamanan;
- syarat teknis untuk kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan;
- rencana pemantauan geologi lingkungan sepanjang pra-konstruksi, konstruksi, operasi, dan pasca-operasi;
- kebutuhan koordinasi dengan BAPETEN, pemerintah daerah, instansi tata ruang, lingkungan hidup, kebencanaan, dan pengelola wilayah pesisir apabila relevan.

B. Struktur Zona

Tabel L9.16. Kisi kisi rekomendasi teknis dalam KGL PLTN

Zona	Fungsi	Arahan pengendalian
ZC-1 Zona inti keselamatan	fasilitas utama PLTN, sistem keselamatan, dan struktur terkait keselamatan	pemanfaatan sangat terbatas; kegiatan nonkeselamatan tidak diperbolehkan
ZC-2 Zona penunjang operasi	bangunan penunjang, utilitas internal, bengkel, gudang teknis, dan fasilitas operasional	diizinkan terbatas dengan syarat keselamatan dan akses terkendali
ZC-3 Koridor teknis pesisir	intake, outfall, kanal, pompa, fasilitas pendingin, atau struktur pesisir pada tapak pesisir	diatur khusus agar tidak mengganggu hidrodinamika dan mutu air

Zona	Fungsi	Arahan pengendalian
ZC-4 Zona eksklusi dan keamanan	setback, akses pengamanan, pos pengawasan, dan area kendali keamanan	pemanfaatan lain tidak diperbolehkan kecuali mendukung keamanan
ZB-A Zona penyangga dekat	area pengendalian intensif di sekitar zona inti	hunian baru dan fasilitas sensitif dibatasi ketat
ZB-B Zona penyangga antara	area transisi yang masih membutuhkan pengendalian kegiatan	kegiatan tertentu dapat bersyarat dengan pembatas teknis
ZB-C Zona penyangga luar	area pengendalian makro dan kesiapsiagaan	kegiatan umum dapat dilakukan sepanjang tidak mengganggu keselamatan dan evakuasi

C. Matriks ITBX Acuan

Tabel L9.17. Acuan Matriks ITBX dalam KGL PLTN

Jenis pemanfaatan	ZC-1	ZC-2	ZC-3	ZC-4	ZB-A	ZB-B	ZB-C
Fasilitas inti PLTN dan sistem keselamatan	I	T	T	I	T	T	T
Bangunan penunjang operasi dan utilitas internal	X	I	T	I	T	B	B
Hunian baru	X	X	X	X	X	B	B
Fasilitas umum sensitif	X	X	X	X	X	B	B
Perdagangan dan jasa intensitas sedang	X	B	X	X	T	B	B
Industri berisiko tinggi	X	X	X	X	X	X	B
Ruang terbuka hijau pelindung	X	T	T	T	I	I	I
Koridor evakuasi dan akses darurat	I	I	I	I	I	I	I
Koridor utilitas keselamatan	T	I	I	I	I	I	I

Keterangan: I = diizinkan; T = terbatas; B = bersyarat; X = tidak diperbolehkan. Matriks ini merupakan acuan awal dan wajib dikalibrasi berdasarkan hasil kajian geologi lingkungan, analisis keselamatan, peraturan zonasi daerah, serta ketentuan otoritas pengawas nuklir.

VIII. PELAPORAN, VALIDASI, DAN PENGELOLAAN DATA

A. Struktur Laporan

Tabel L9.18. Volume, isi pokok, dan keluaran laporan dalam KGL PLTN

Volume	Isi pokok	Keluaran
Volume I	Evaluasi geologi, geomorfologi, struktur, seismotektonik, dan bahaya geologi	peta geologi rinci, status sesar, PSHA/DSHA, PGA, SSE, peta bahaya
Volume II	Evaluasi geologi teknik, fondasi, likuefaksi, dan parameter dinamik	log pemboran, hasil uji laboratorium, model geoteknik, rekomendasi fondasi
Volume III	Evaluasi hidrogeologi kuantitatif dan perlindungan air tanah	peta potensiometri, parameter akuifer, model aliran 3D, analisis transport potensial
Volume IV	Kesesuaian tata ruang, zona inti, zona penyangga, ITBX, dan rekomendasi teknis	peta zonasi, matriks ITBX, klausul pengendalian, rencana pemantauan
Lampiran digital	basis data geospasial, data mentah, hasil uji, foto lapangan, metadata, model, dan dokumen QA/QC	geodatabase, PDF peta, tabel data, dan arsip metadata

B. Validasi Teknis

Setiap hasil kajian geologi lingkungan tapak PLTN wajib melalui validasi teknis oleh unit yang berwenang di bidang geologi lingkungan dan, untuk aspek keselamatan nuklir, dikoordinasikan dengan otoritas pengawas nuklir sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan. Validasi dilakukan

terhadap kecukupan data, kesesuaian metode, konsistensi interpretasi, keterlacakan peta, kesesuaian rekomendasi, dan kelayakan tindak lanjut.

- validasi dokumen dan data, meliputi kelengkapan laporan, data mentah, metadata, dan peta tematik;
- validasi teknis, meliputi metode pengambilan data, pengujian, analisis, model, dan interpretasi;
- validasi lapangan, meliputi pemeriksaan lokasi kunci, titik bor, titik uji, titik pengamatan struktur, dan batas zona;
- telaah sejawat oleh ahli geologi struktur, seismotektonik, geologi teknik, hidrogeologi, geologi lingkungan, dan geologi pesisir apabila relevan;
- rekalkulasi atau uji banding untuk parameter kritis seperti PGA, SSE, status sesar, faktor keamanan fondasi, dan model aliran air tanah.

C. Pengelolaan Data Geospasial

Seluruh data wajib dikelola dalam sistem informasi geospasial tapak yang memiliki metadata, pengendalian versi, sistem koordinat yang seragam, standar penamaan layer, dan ketentuan akses sesuai tingkat sensitivitas data. Basis data geospasial menjadi rujukan tunggal untuk penapisan, desain, validasi, pemantauan, dan pemutakhiran.

Tabel L9.19. Pengelolaan data geospasial dalam KGL PLTN

Layer minimum	Atribut wajib
batas tapak, zona inti, zona penyangga, koridor evakuasi, dan koridor utilitas	sumber, tanggal, skala, status validasi, penanggung jawab data
geologi, geomorfologi, struktur, sesar, titik bor, geofisika, dan geoteknik	metode, tanggal akuisisi, ketelitian posisi, kedalaman, hasil uji
hidrogeologi, piezometer, kualitas air tanah, potensiometri, dan model aliran	parameter, satuan, periode pengukuran, metode analisis
bahaya geologi, banjir, rob, tsunami, pesisir, dan bahaya eksternal lain	kelas bahaya, sumber, asumsi, ketidakpastian
tata ruang, kawasan lindung, sempadan, dan peraturan zonasi	dokumen rujukan, pasal terkait, status keselarasan

IX. PEMANTAUAN DAN PEMUTAKHIRAN

Pemantauan geologi lingkungan tapak PLTN dilakukan untuk memastikan bahwa rekomendasi teknis tetap sesuai dengan perubahan kondisi tapak, perubahan pemanfaatan ruang, perkembangan data, dan dinamika bahaya geologi. Pemantauan dilakukan sejak pra-konstruksi dan dilanjutkan sepanjang siklus hidup fasilitas sesuai ketentuan keselamatan nuklir.

Tabel L9.20. Parameter dan metode indikatif dalam KGL PLTN

Parameter pemantauan	Metode indikatif	Tujuan
aktivitas seismik dan deformasi permukaan	jaringan seismik lokal, GNSS, InSAR, survei geodetik	mendeteksi perubahan tektonik dan deformasi yang relevan
muka air tanah dan kualitas air tanah	piezometer, pengukuran berkala, analisis kualitas air	memantau arah aliran, kualitas dasar, dan indikasi perubahan sistem air tanah
stabilitas fondasi dan deformasi tanah	instrumen geoteknik, settlement marker, inclinometer bila diperlukan	memastikan perilaku fondasi dan tanah tetap dalam batas desain
bahaya pesisir untuk tapak pantai	pemantauan garis pantai, pasang surut, gelombang, rob, intrusi asin, dan batimetri	menilai perubahan pesisir dan kinerja koridor teknis
kegiatan di zona penyangga	audit pemanfaatan ruang, inspeksi koridor evakuasi, pembaruan data tata ruang	menjamin pengendalian ruang tetap efektif

Pemutakhiran analisis wajib dilakukan paling sedikit setiap 5 (lima) tahun atau lebih cepat apabila terjadi gempa signifikan, perubahan tata ruang, temuan struktur baru, perubahan kualitas atau arah aliran air tanah, perubahan garis pantai yang bermakna, pembangunan besar di sekitar tapak, atau perubahan standar keselamatan nasional dan internasional.

X. PENUTUP

Petunjuk Teknis ini menjadi acuan operasional dalam penyusunan kajian geologi lingkungan untuk tapak PLTN. Penerapan petunjuk teknis ini diharapkan menghasilkan penilaian tapak yang objektif, terukur, dapat diverifikasi, dan dapat diintegrasikan dengan keselamatan nuklir, tata ruang, pengelolaan lingkungan hidup, serta pengendalian pemanfaatan ruang.

Petunjuk Teknis ini bersifat dinamis dan dapat disempurnakan sesuai perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi investigasi, standar keselamatan, regulasi nasional, dan pengalaman praktik evaluasi tapak. Setiap penyempurnaan harus tetap mempertahankan prinsip kehati-hatian tinggi, keterlacakan data, validasi teknis, dan perlindungan keselamatan masyarakat serta lingkungan.

Lampiran 10:

Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Geopark

Lampiran 10 merupakan perangkat operasional Bab 8 dan Bab 9. Petunjuk ini membantu menilai kesesuaian kawasan geopark, kelayakan geosite, daya dukung pengunjung, zona perlindungan, zona pelayanan, matriks ITBX, dan pemantauan pengembangan geowisata.

Tabel L10.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 3, Bab 8, Bab 9, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Pedoman pengelolaan geosite, geowisata terkendali, daya dukung pengunjung, zonasi geowisata, konservasi, edukasi, dan pemantauan.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L10.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

A. Kedudukan Petunjuk Teknis

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Geopark merupakan bagian dari Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan yang digunakan untuk menilai kesesuaian lahan, daya dukung, faktor pembatas, faktor penyisih, kelayakan geosite sebagai objek geowisata, serta arahan pengendalian pemanfaatan ruang pada kawasan geopark.

Petunjuk Teknis ini tidak menggantikan mekanisme penetapan geopark, penetapan warisan geologi, penilaian destinasi pariwisata, penetapan kawasan lindung, atau kewenangan pengelolaan kawasan oleh pemerintah daerah dan pengelola geopark. Petunjuk Teknis ini berfungsi sebagai acuan geologi lingkungan agar pengembangan geopark berjalan selaras dengan konservasi geologi, pendidikan kebumian, geowisata terkendali, keselamatan pengunjung, pemberdayaan masyarakat lokal, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Dalam kerangka geologi tata lingkungan, kawasan geopark harus dipahami sebagai ruang yang memadukan geodiversity, biodiversity, cultural diversity, konservasi, edukasi, dan pembangunan ekonomi lokal. Oleh karena itu, kajian geologi lingkungan tidak hanya menilai daya tarik geologi, tetapi

juga menilai apakah ruang tersebut aman, mampu menerima intensitas kunjungan, tidak merusak nilai geologi, dan dapat diintegrasikan ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, rencana pengelolaan lingkungan, serta program pemberdayaan masyarakat.

B. Maksud dan Tujuan

Petunjuk Teknis ini dimaksudkan sebagai acuan bagi Pemerintah Pusat, pemerintah daerah, Badan Geologi, pengelola geopark, perguruan tinggi, lembaga penelitian, konsultan, komunitas lokal, dan pihak terkait dalam melaksanakan kajian geologi lingkungan untuk kawasan geopark.

Tujuan Petunjuk Teknis ini adalah:

- menyeragamkan data, parameter, metode analisis, klasifikasi, peta keluaran, dan rekomendasi teknis untuk kawasan geopark;
- menentukan kesesuaian lahan kawasan geopark berdasarkan daya dukung geologi, bahaya geologi, faktor nongeologi, dan faktor penyisih;
- menilai kelayakan geosite sebagai objek geowisata berdasarkan keunikan geologi, status lahan, tata kelola, aksesibilitas, daya dukung, keselamatan, dan kesiapan interpretasi;
- menyusun arahan pengendalian pemanfaatan ruang, zona prioritas, zona perlindungan geosite, zona pelayanan, zona pengembangan terbatas, dan matriks ITBX;
- menjamin bahwa pengembangan geowisata tidak menurunkan nilai utama geologi, fungsi lindung, kualitas lingkungan, dan keselamatan pengunjung;
- menyediakan dasar teknis untuk integrasi geopark, geosite, dan geowisata ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, dan rencana induk pengelolaan geopark.

C. Ruang Lingkup

Ruang lingkup Petunjuk Teknis ini meliputi:

- inventarisasi dan penilaian awal geodiversity, geosite, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya geologi, dan kondisi lingkungan pendukung;
- penentuan kesesuaian lahan kawasan geopark;
- penilaian kelayakan geosite sebagai objek geowisata;
- penilaian daya dukung pengunjung dan kebutuhan pengelolaan risiko geowisata;
- pengendalian pemanfaatan ruang pada geosite dan kawasan geowisata prioritas;
- penyusunan rekomendasi teknis, peta zonasi, dan matriks ITBX;
- pelaporan, validasi teknis, pemantauan, pemutakhiran, dan integrasi basis data geospasial.

D. Pengertian Operasional

Tabel L10.3. Istilah dan Pengertian Operasional

Istilah	Pengertian operasional
Geopark	Wilayah geografis tunggal atau gabungan yang memiliki geosite dan bentang alam bernilai, terkait geodiversity, biodiversity, dan cultural diversity, serta dikelola untuk konservasi, edukasi, dan pembangunan ekonomi masyarakat secara berkelanjutan.
Geosite	Situs atau tempat yang memiliki keunikan geologi, nilai ilmiah, nilai pendidikan, nilai estetika, nilai budaya, atau nilai penting lain yang dapat menjadi dasar konservasi, edukasi, dan geowisata.
Warisan Geologi	Keragaman geologi yang telah dinilai memiliki makna penting karena keunikan, kelangkaan, keterwakilan proses geologi, nilai ilmiah, nilai pendidikan, atau nilai penting bagi sejarah bumi.
Geowisata	Kegiatan wisata yang memanfaatkan fenomena kebumian dan lingkungannya sebagai daya tarik utama, disertai interpretasi, pelayanan, keselamatan, dan pengelolaan yang tidak menurunkan nilai geologi.

Istilah	Pengertian operasional
Kawasan Geowisata Prioritas	Bagian kawasan geopark yang berdasarkan hasil analisis dinilai mempunyai potensi pengembangan geowisata paling tinggi dan memerlukan pengaturan ruang, akses, layanan, keselamatan, dan pemantauan secara khusus.
Zona Perlindungan Geosite	Area yang memuat objek utama geologi dan ruang sekitarnya yang harus dipertahankan agar nilai geologi, fungsi lindung, dan keselamatan pengunjung tetap terjaga.
Daya Dukung Pengunjung	Kemampuan geosite dan lingkungan sekitarnya untuk menerima kegiatan kunjungan tanpa menimbulkan degradasi nilai geologi, kerusakan lingkungan, penurunan mutu pengalaman, atau risiko keselamatan yang tidak dapat diterima.
Interpretasi Kebumian	Penyampaian informasi geologi, proses bumi, sejarah alam, risiko, dan nilai konservasi kepada pengunjung melalui media, pemandu, jalur edukasi, pusat informasi, atau sarana pembelajaran lain.

II. PRINSIP DAN KERANGKA ANALISIS

A. Prinsip Analisis

Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Geopark dilaksanakan berdasarkan prinsip konservasi, edukasi, pemberdayaan masyarakat, keselamatan, keberlanjutan ekonomi lokal, dan kehati-hatian terhadap nilai geologi yang tidak dapat diperbarui. Setiap rencana pemanfaatan geosite wajib dibaca sebagai interaksi antara nilai geologi, daya dukung fisik, akses, tata kelola, dan kemungkinan dampak terhadap masyarakat serta lingkungan.

> ***Pengembangan geopark tidak boleh hanya dilihat sebagai pengembangan destinasi pariwisata. Geopark harus dikelola sebagai kawasan pembelajaran bumi dan ruang ekonomi lokal yang bertumpu pada perlindungan nilai geologi. Oleh sebab itu, kajian geologi lingkungan harus mampu membedakan geosite yang dapat dikunjungi secara umum, geosite yang hanya dapat dikunjungi terbatas, geosite yang perlu perlindungan ketat, dan geosite yang belum siap dikembangkan karena pembatas geologi, lingkungan, status lahan, atau tata kelola.***

B. Kerangka Tiga Tahap

Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Geopark dilaksanakan melalui tiga tahap utama:

Tabel L10.4. Tahapan KGL untuk Kawasan Geopark

Tahap	Fokus analisis	Keluaran utama
Tahap I	Penentuan kesesuaian lahan kawasan geopark berdasarkan faktor sumber daya geologi, bahaya geologi, faktor nongeologi, dan faktor penyisih.	Peta kesesuaian lahan kawasan geopark, daftar pembatas utama, dan arahan kawasan yang dapat dilanjutkan ke penilaian geosite.
Tahap II	Penilaian kelayakan geosite sebagai objek geowisata berdasarkan keunikan geologi, status lahan, tata kelola, aksesibilitas, interpretasi, dan keselamatan.	Peringkat kelayakan geosite, daftar kawasan geowisata prioritas, dan kebutuhan penguatan konservasi serta pelayanan.
Tahap III	Pengendalian pemanfaatan ruang kawasan geowisata prioritas melalui zonasi, matriks ITBX, daya dukung pengunjung, dan rencana pemantauan.	Zonasi geologi lingkungan, matriks ITBX, rekomendasi teknis, dan rencana pengelolaan serta pemantauan.

Gambar L10.1 Bagan Alir Petunjuk teknis KGL untuk Kawasan Geopark

C. Hubungan Warisan Geologi, KCAG, dan Geopark

Geosite yang memiliki nilai warisan geologi menjadi dasar ilmiah utama dalam pengembangan geopark. Namun, apabila suatu warisan geologi memerlukan perlindungan ruang yang mengikat dalam RTRW, RDTR, dan peraturan zonasi, maka status perlindungan ruangnya perlu ditindaklanjuti melalui mekanisme penetapan Kawasan Cagar Alam Geologi sesuai ketentuan peraturan perundang-undangan.

Dengan demikian, hubungan operasionalnya disusun secara berjenjang. Pertama, keragaman geologi diinventarisasi dan dinilai sebagai geosite atau warisan geologi. Kedua, geosite yang memiliki kebutuhan perlindungan ruang ditetapkan atau diusulkan sebagai KCAG. Ketiga, geosite dan/atau KCAG yang berada dalam kawasan geopark dikelola untuk konservasi, edukasi, geowisata, dan pemberdayaan masyarakat secara terkendali. Petunjuk Teknis ini menempatkan kajian geologi lingkungan sebagai jembatan antara nilai ilmiah geosite dan pengendalian pemanfaatan ruang.

III. DATA DASAR DAN SATUAN ANALISIS

A. Data Dasar

Analisis kawasan geopark nasional maupun global paling sedikit menggunakan data dasar sebagai berikut:

Tabel L10.5. Data dasar dan satuan analisis pada KGL Kawasan Geopark

Kelompok data	Data minimum	Kegunaan
Geologi dan geodiversity	Peta geologi, litologi, struktur geologi, stratigrafi, proses geologi, geosite, warisan geologi, dan tema geologi utama.	Menentukan nilai geologi, keterwakilan proses bumi, dan dasar interpretasi kebumian.
Geomorfologi	Bentuk lahan, kemiringan lereng, elevasi, proses permukaan, dinamika sungai, pantai, danau, atau gunung api apabila relevan.	Menilai daya tarik bentang alam, akses, stabilitas, dan pembatas pemanfaatan.
Hidrogeologi dan sumber daya air	Mata air, sungai, danau, air tanah, kualitas air, daerah resapan, dan keterkaitan geosite dengan sistem air.	Menilai ketersediaan air, perlindungan sumber air, dan risiko gangguan akibat kunjungan.
Geologi teknik	Sifat tanah dan batuan, kestabilan lereng, daya dukung tapak, kondisi jalur akses, dan risiko deformasi permukaan.	Menilai keamanan fasilitas, jalur kunjungan, titik pandang, dan sarana pendukung.
Bahaya geologi	Gempa bumi, tsunami, gunung api, gerakan tanah, erosi, banjir, rob, likuefaksi, gas berbahaya alami, atau bahaya lain sesuai konteks geologi.	Menetapkan pembatas, mitigasi, jalur evakuasi, dan kategori pemanfaatan.
Biodiversity dan cultural diversity	Keanekaragaman hayati, budaya, sejarah, arkeologi, tradisi lokal, dan ekonomi kreatif.	Menilai keterpaduan geopark dan potensi pemberdayaan masyarakat.
Tata ruang dan status lahan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, kawasan budidaya, status penguasaan lahan, dan kebijakan sektoral.	Menilai keselarasan pengembangan dan kebutuhan penetapan zona.
Pariwisata dan sosial ekonomi	Akses, sarana-prasarana, jumlah pengunjung, pengelola, produk lokal, pemandu, pusat informasi, dan rencana pengembangan.	Menilai kelayakan pelayanan, kapasitas pengelolaan, dan manfaat ekonomi lokal.

B. Satuan Analisis

Satuan analisis kawasan geopark dapat berupa kawasan geopark, geoarea, geosite, jalur geowisata, kawasan pelayanan, kawasan penyangga, dan tapak fasilitas pendukung. Penentuan satuan analisis harus mempertimbangkan kesamaan karakter geologi, tingkat kerentanan, aksesibilitas, pola

kunjungan, status lahan, dan rencana pemanfaatan ruang.

Untuk kebutuhan RTRW dan RDTR, hasil analisis harus dapat diterjemahkan menjadi peta kesesuaian lahan dan peta pengaturan zonasi. Untuk kebutuhan pengelolaan geopark, hasil analisis harus dapat diterjemahkan menjadi prioritas konservasi, rencana interpretasi, pengaturan kunjungan, pengamanan geosite, serta program pemberdayaan masyarakat.

IV. TAHAP I - PENENTUAN KESESUAIAN LAHAN KAWASAN GEOPARK

A. Tujuan Tahap I

Tahap I bertujuan menilai kesesuaian lahan kawasan geopark secara menyeluruh sebelum dilakukan penilaian rinci terhadap geosite tertentu. Tahap ini digunakan untuk menentukan bagian kawasan yang mendukung pengembangan geowisata, bagian kawasan yang memerlukan syarat teknis, bagian kawasan yang harus dibatasi, dan bagian kawasan yang harus dipertahankan sebagai fungsi lindung atau keselamatan.

B. Parameter Penilaian

Tabel L10.6. Penilaian parameter utama pada faktor berpengaruh dalam KGL Geopark

Faktor	Parameter utama	Arah penilaian
Sumber daya geologi	Keberadaan geosite, nilai geodiversity, sumber daya air, kemiringan lereng, sifat tanah dan batuan, kestabilan tapak, serta daya tarik bentang alam.	Semakin tinggi nilai geologi, semakin baik kestabilan, dan semakin memadai sumber daya pendukung, semakin tinggi kesesuaian.
Bahaya geologi	Gerakan tanah, erosi, banjir, gunung api, gempa, tsunami, rob, likuefaksi, gas alami, atau bahaya lain yang relevan.	Semakin tinggi bahaya dan semakin sulit mitigasi, semakin rendah kesesuaian.
Faktor nongeologi	Akses, status tata ruang, kesiapan pengelolaan, prasarana dasar, dukungan masyarakat, akses evakuasi, dan kemampuan pelayanan.	Semakin baik pengelolaan dan prasarana pendukung, semakin tinggi kesesuaian.
Faktor penyisih	Kawasan lindung ketat, zona bahaya sangat tinggi, area dengan status lahan bermasalah, kawasan yang tidak sesuai tata ruang, atau geosite yang sangat rentan.	Digunakan sebagai pembatas atau eliminasi sebelum skor akhir ditetapkan.

C. Skoring dan Pembobotan

Penilaian dilakukan melalui skoring, pembobotan, dan tumpang susun spasial. Nilai parameter diberikan dalam rentang 1 sampai 5, dengan nilai 5 menunjukkan kondisi paling mendukung dan nilai 1 menunjukkan kondisi paling tidak mendukung. Bobot disesuaikan dengan tujuan analisis, kompleksitas geologi, dan tingkat kerentanan kawasan.

Tabel L10.7. Bobot acuan faktor faktor berpengaruh dalam KGL Geopark

Faktor	Bobot acuan	Catatan penerapan
Sumber daya geologi dan nilai geosite	35-45%	Bobot ditingkatkan pada kawasan yang tujuan utamanya konservasi dan edukasi geologi.
Bahaya geologi dan keselamatan	25-35%	Bobot ditingkatkan pada kawasan dengan lereng curam, gunung api, pantai rawan tsunami, gerakan tanah, atau kunjungan intensif.
Faktor nongeologi dan tata kelola	15-25%	Bobot digunakan untuk membaca kesiapan akses, pengelola, interpretasi, pelayanan, dan dukungan masyarakat.
Faktor penyisih	Tidak diskor	Digunakan sebagai pembatas atau eliminasi sebelum penetapan kelas akhir.

D. Klasifikasi Kesesuaian Lahan

Tabel L10.8. Klasifikasi Kesesuaian lahan dalam KGL Geopark

Kelas	Makna teknis	Tindak lanjut
Sangat sesuai	Memiliki nilai geologi tinggi, bahaya rendah hingga sedang, akses memadai, dan tata kelola siap.	Dapat diarahkan sebagai kawasan prioritas pengembangan geowisata dengan pengendalian konservasi.
Sesuai	Memiliki kondisi geologi dan lingkungan yang mendukung, tetapi masih memerlukan penguatan prasarana atau pengelolaan.	Dapat dikembangkan dengan syarat teknis umum, interpretasi, dan pemantauan.
Sesuai bersyarat	Memiliki nilai geologi atau potensi geowisata, tetapi terdapat pembatas bahaya, akses, status lahan, atau kapasitas pengelolaan.	Wajib memenuhi syarat mitigasi, pembatasan kunjungan, pengamanan lokasi, dan penguatan pengelola.
Terbatas	Memiliki pembatas kuat sehingga hanya fungsi tertentu yang dapat dilakukan.	Diarahkan untuk penelitian, pendidikan terbatas, atau kunjungan terkendali.
Tidak sesuai	Mengandung pembatas fatal, risiko keselamatan tidak dapat diterima, atau berpotensi merusak nilai geologi.	Tidak direkomendasikan untuk pengembangan geowisata umum.

V. TAHAP II - PENILAIAN KELAYAKAN GEOSITE SEBAGAI OBJEK GEOWISATA

A. Tujuan Tahap II

Tahap II bertujuan menilai apakah geosite yang telah diinventarisasi dan berada pada kawasan dengan kesesuaian memadai dapat dikembangkan sebagai objek geowisata. Tidak semua geosite dapat langsung dikembangkan untuk kunjungan umum. Sebagian geosite mungkin lebih tepat untuk penelitian, pendidikan terbatas, perlindungan ketat, atau pengembangan bertahap setelah tata kelola dan keselamatan diperkuat.

B. Faktor Penentu Kelayakan Geosite

Penilaian kelayakan geosite sebagai objek geowisata dilakukan berdasarkan empat faktor utama, yaitu keunikan keragaman geologi, status lahan, tata kelola, dan pencapaian daerah. Keempat faktor tersebut harus dibaca bersama dengan daya dukung, risiko keselamatan, kesiapan interpretasi, dan kemampuan masyarakat lokal memperoleh manfaat secara berkelanjutan.

Tabel L10.9. Indikator minimum dan penilaian faktor faktor Geopark dalam KGL

Faktor	Indikator minimum	Makna penilaian
Keunikan keragaman geologi	Nilai ilmiah, kelangkaan, keterwakilan proses geologi, keutuhan objek, nilai estetika, keterbacaan proses bumi, dan hubungan dengan tema geopark.	Menentukan nilai utama geosite dan prioritas konservasi.
Status lahan	Kesesuaian dengan RTRW/RDTR, status kawasan lindung, status penguasaan lahan, konflik pemanfaatan, dan kemungkinan penetapan KCAG bila diperlukan.	Menentukan kepastian ruang dan dasar hukum pengelolaan.
Tata kelola	Keberadaan pengelola, rencana pengelolaan, pemandu, interpretasi, perawatan, pengamanan, pemantauan, dan pelibatan masyarakat.	Menentukan kesiapan operasional dan keberlanjutan manfaat.
Pencapaian daerah	Kondisi akses, jarak, sarana keselamatan, jalur evakuasi, informasi pengunjung, dan kesesuaian prasarana dengan daya dukung.	Menentukan kelayakan kunjungan dan kebutuhan pengendalian intensitas.

C. Penilaian Keunikan Keragaman Geologi

Penilaian keunikan keragaman geologi paling sedikit mempertimbangkan nilai ilmiah, nilai pendidikan, keterwakilan proses geologi, kelangkaan pada tingkat lokal, nasional, atau internasional, keutuhan objek, kondisi fisik, dan kemampuan objek menjelaskan sejarah bumi. Geosite dengan

nilai warisan geologi tinggi harus diprioritaskan untuk konservasi dan interpretasi, bukan semata-mata untuk peningkatan jumlah kunjungan.

Tabel L10.10. Indikator minimum dan penilaian faktor faktor Geopark dalam KGL

Peringkat nilai geologi	Kriteria umum	Arahan pemanfaatan
Internasional	Mewakili fenomena geologi penting yang memiliki pembanding terbatas di tingkat dunia dan nilai ilmiah sangat tinggi.	Konservasi ketat, interpretasi berkualitas tinggi, kunjungan terkendali, dan kemungkinan penguatan status perlindungan ruang.
Nasional	Memiliki nilai penting untuk sejarah geologi Indonesia, pendidikan, dan penelitian lintas wilayah.	Konservasi, edukasi, geowisata terkendali, dan integrasi ke tata ruang daerah.
Regional	Mewakili proses atau bentuk geologi penting pada satu wilayah atau provinsi.	Pengembangan geowisata edukatif dengan batas daya dukung dan pemantauan.
Lokal	Memiliki nilai pendidikan dan daya tarik lokal, tetapi keterwakilan ilmiahnya lebih terbatas.	Pengembangan wisata edukatif lokal dengan interpretasi sederhana dan pengelolaan komunitas.

D. Penilaian Status Lahan dan Tata Ruang

Status lahan harus dinilai sejak awal karena geowisata hanya dapat dikembangkan secara berkelanjutan apabila tidak bertentangan dengan fungsi ruang, hak atas tanah, kawasan lindung, dan ketentuan peraturan zonasi. Geosite yang memiliki nilai warisan geologi tinggi dan memerlukan perlindungan ruang wajib direkomendasikan untuk proses penetapan atau penguatan perlindungan melalui instrumen yang tersedia, termasuk KCAG apabila memenuhi kriteria.

Tabel L10.11. Penilaian status lahan dan tata ruang dalam dalam KGL Geopark

Kondisi status lahan	Kelas operasional	Tindak lanjut
Selaras dengan RTRW/RDTR, berada pada kawasan pariwisata, kawasan lindung yang memperbolehkan edukasi, atau kawasan yang telah memiliki dasar pengelolaan.	Mudah	Dapat dilanjutkan dengan rencana pengelolaan, zonasi, dan pengaturan kunjungan.
Belum tercantum jelas dalam dokumen tata ruang tetapi tidak bertentangan dengan fungsi ruang.	Sedang	Memerlukan konsultasi tata ruang, penyesuaian dokumen, atau penguatan kebijakan daerah.
Berada pada kawasan dengan konflik pemanfaatan, kegiatan ekstraktif, risiko tinggi, atau status hak yang belum jelas.	Sulit	Memerlukan penyelesaian status lahan, pembatasan sementara, atau alternatif pengembangan.
Bertentangan dengan fungsi lindung, keselamatan, atau ketentuan hukum yang tidak dapat disesuaikan.	Tidak layak operasional	Tidak direkomendasikan untuk geowisata umum sampai status dan risiko diselesaikan.

E. Penilaian Tata Kelola dan Pencapaian Daerah

Tata kelola mencakup kemampuan pengelola dalam menjaga nilai geologi, menyediakan interpretasi, mengatur kunjungan, menjaga keselamatan, melibatkan masyarakat, dan memantau perubahan kondisi geosite. Pencapaian daerah tidak hanya berarti kemudahan akses, tetapi juga mencakup keamanan jalur, kesiapan informasi, jalur evakuasi, dan kesesuaian prasarana dengan karakter geologi lingkungan.

Tabel L10.12. Penilaian tata Kelola dan pencapaian daerah dalam KGL Geopark

Komponen	Indikator	Arah rekomendasi
Kelembagaan pengelola	Struktur pengelola, pembagian tugas, SOP, pembiayaan, dan koordinasi dengan desa atau pemerintah daerah.	Penguatan kelembagaan sebelum promosi kunjungan besar.
Interpretasi kebumian	Papan informasi, pemandu, narasi geologi, pusat informasi, media digital, dan materi pendidikan.	Wajib tersedia untuk geosite prioritas.
Keselamatan pengunjung	Jalur aman, pembatas fisik, peringatan bahaya, titik kumpul, sistem komunikasi, dan evakuasi.	Menjadi syarat untuk geosite dengan bahaya sedang hingga tinggi.
Akses dan pelayanan	Kondisi jalan, parkir, sanitasi, air bersih, pengelolaan sampah, dan ruang istirahat.	Dikembangkan sesuai daya dukung dan tidak merusak nilai geologi.
Manfaat masyarakat lokal	Pelibatan pemandu lokal, produk lokal, ekonomi kreatif, edukasi, dan pembagian manfaat.	Menjadi indikator kelayakan sosial-ekonomi.

E. Klasifikasi Kelayakan Geosite

Tabel L10.13. Klasifikasi Kelayakan Geosite dalam KGL Geopark

Kelas geosite	Makna teknis	Tindak lanjut
Prioritas I	Nilai geologi tinggi, status ruang relatif jelas, tata kelola memadai, akses aman, dan siap untuk geowisata edukatif terkendali.	Ditetapkan sebagai kawasan geowisata prioritas dengan zonasi rinci dan matriks ITBX.
Prioritas II	Nilai geologi baik, tetapi masih memerlukan penguatan interpretasi, akses, pengamanan, atau tata kelola.	Dikembangkan bertahap setelah syarat teknis dipenuhi.
Prioritas III	Nilai geologi dapat digunakan untuk edukasi lokal, tetapi pembatas dan kesiapan pengelola masih terbatas.	Diarahkan untuk edukasi terbatas, penelitian, atau pengembangan jangka panjang.
Perlindungan khusus	Nilai geologi sangat penting atau rentan sehingga kunjungan umum berpotensi menurunkan nilai utama.	Diarahkan untuk konservasi, penelitian terbatas, dan penetapan perlindungan ruang.
Tidak direkomendasikan	Risiko keselamatan, status lahan, atau pembatas lingkungan tidak dapat diterima.	Tidak dibuka untuk geowisata umum.

VI. TAHAP III - PENGENDALIAN PEMANFAATAN RUANG KAWASAN GEOWISATA PRIORITAS

A. Tujuan Tahap III

Tahap III bertujuan menerjemahkan hasil penilaian geologi lingkungan dan kelayakan geosite menjadi pengendalian pemanfaatan ruang. Keluaran tahap ini harus dapat digunakan untuk penyusunan rencana pengelolaan geopark, RDTR, peraturan zonasi, rencana tapak geowisata, rencana interpretasi, program keselamatan, dan pemantauan berkala.

B. Struktur Zona Geowisata Prioritas

Tabel L10.14. Pengaturan Zonasi dalam KGL Geopark

Zona	Fungsi utama	Arahan pengendalian
Zona Perlindungan Geosite	Melindungi objek geologi utama, nilai ilmiah, dan kondisi fisik yang menjadi dasar penetapan geosite.	Kegiatan dibatasi untuk konservasi, penelitian, pendidikan terbatas, interpretasi terkendali, dan pemantauan.

Zona	Fungsi utama	Arahan pengendalian
Zona Penyangga Geosite	Mengurangi tekanan langsung terhadap objek utama dan mengendalikan aktivitas di sekitar geosite.	Kegiatan pelayanan dan jalur kunjungan dapat dilakukan dengan syarat tidak mengganggu nilai geologi.
Zona Pelayanan Geowisata	Menampung fasilitas informasi, parkir terbatas, sanitasi, pusat pemandu, dan kegiatan ekonomi lokal.	Fasilitas dikendalikan berdasarkan daya dukung, KDB/BCR, KDH, sanitasi, dan pengelolaan limbah.
Zona Pengembangan Terbatas	Menampung kegiatan ekonomi lokal, jalur edukasi, dan layanan wisata yang tidak harus berada dekat objek utama.	Kegiatan diizinkan dengan syarat tata kelola, keamanan, dan pemantauan.
Zona Pemulihan	Memulihkan area yang mengalami degradasi fisik, pencemaran, erosi, atau tekanan kunjungan berlebih.	Kegiatan wisata umum dibatasi sampai pemulihan memenuhi kriteria teknis.

C. Matriks ITBX Kawasan Geopark

Tabel L10.15. Perlindungan Geosite melalui ITBX dalam KGL Geopark

Jenis kegiatan	Perlindungan geosite	Penyangga	Pelayanan	Pengembangan terbatas	Pemulihan
Penelitian geologi dan pemantauan	I	I	I	I	I
Pendidikan kebumian terbimbing	B	I	I	I	T
Kunjungan wisata umum	T	B	I	I	X
Pembangunan pusat informasi	X	B	I	B	X
Parkir dan fasilitas komersial terbatas	X	T	B	B	X
Akomodasi skala besar	X	X	T	B	X
Kegiatan ekstraktif yang menurunkan nilai geologi	X	X	X	X	X
Pengambilan sampel geologi untuk penelitian	B	B	T	T	B
Perbaikan jalur dan pengamanan keselamatan	B	I	I	I	B
Kegiatan budaya lokal yang tidak merusak geosite	T	B	I	I	T
Pemulihan lingkungan dan revegetasi	B	I	I	I	I

Keterangan: I = diizinkan; T = terbatas; B = bersyarat; X = tidak diperbolehkan. Penetapan akhir setiap kategori harus disesuaikan dengan karakter geosite, status lahan, bahaya geologi, daya dukung pengunjung, dan ketentuan peraturan perundang-undangan.

D. Syarat Teknis Pemanfaatan

- Setiap kegiatan yang diklasifikasikan terbatas atau bersyarat wajib memenuhi syarat teknis sesuai karakter geosite. Syarat teknis tersebut paling sedikit meliputi:
  - batas jumlah pengunjung per hari atau per sesi kunjungan berdasarkan daya dukung geosite;
  - pengaturan jalur kunjungan yang tidak merusak objek utama geologi dan tidak meningkatkan risiko keselamatan;
  - penyediaan interpretasi kebumian yang menjelaskan nilai geologi, risiko, dan aturan perilaku pengunjung;

- larangan tindakan yang mengubah, memindahkan, mencoret, memecah, atau mengambil bagian objek geologi tanpa izin penelitian;
- pengaturan sanitasi, limbah, air bersih, dan prasarana pelayanan agar tidak mencemari tanah, air permukaan, air tanah, dan lingkungan geosite;
- penetapan area aman, jalur evakuasi, tanda peringatan, dan SOP kondisi darurat;
- kewajiban pemantauan perubahan kondisi fisik situs geologi atau geosite, tekanan kunjungan, dan efektivitas pengelolaan.

VII. REKOMENDASI TEKNIS DAN INTEGRASI TATA RUANG

A. Rekomendasi Teknis

Hasil analisis wajib dituangkan dalam rekomendasi teknis yang paling sedikit memuat kelas kesesuaian lahan kawasan geopark, peringkat kelayakan geosite, faktor pendukung, faktor pembatas, faktor penyisih, zona pengendalian, matriks ITBX, syarat teknis, program pemantauan, dan kebutuhan tindak lanjut.

Rekomendasi teknis harus membedakan secara jelas antara arahan konservasi, arahan pendidikan, arahan geowisata, arahan pemanfaatan terbatas, arahan pemulihan, dan arahan penguatan tata kelola. Rekomendasi juga harus menyatakan geosite yang perlu diprioritaskan untuk penguatan status perlindungan ruang, termasuk kemungkinan usulan penetapan sebagai KCAG apabila memenuhi kriteria dan memerlukan pengamanan ruang yang lebih kuat.

B. Integrasi dengan RTRW, RDTR, dan Rencana Pengelolaan

Hasil kajian geologi lingkungan kawasan geopark digunakan sebagai bahan teknis untuk penyusunan atau peninjauan kembali RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, rencana induk geopark, rencana pengelolaan geosite, rencana interpretasi, dan program pemberdayaan masyarakat.

Tabel L10.16. Integrasi produk KGL Geopark dalam Tata Ruang dan Pengelolaan lingkungan

Produk keluaran	Pemanfaatan dalam tata ruang dan pengelolaan
Peta kesesuaian lahan kawasan geopark	Menentukan kawasan yang dapat dikembangkan, dibatasi, dipulihkan, atau dilindungi.
Peta geosite dan nilai warisan geologi	Menjadi dasar penetapan tema interpretasi, konservasi, dan kemungkinan penguatan perlindungan ruang.
Peta zonasi geowisata prioritas	Menjadi masukan langsung bagi RDTR, peraturan zonasi, dan rencana pengelolaan geopark.
Matriks ITBX	Menentukan kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan pada setiap zona.
Rekomendasi teknis	Menjadi dasar syarat pemanfaatan, pengaturan daya dukung, keselamatan, pemantauan, dan pemutakhiran.

BAB VIII. STANDAR KELUARAN, VALIDASI, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAKHIRAN

A. Standar Keluaran

- Keluaran kajian geologi lingkungan untuk kawasan geopark paling sedikit meliputi:
- laporan kajian geologi lingkungan kawasan geopark;
- peta geologi, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya geologi, geosite, dan geodiversity;
- peta kesesuaian lahan kawasan geopark;
- peta kelayakan geosite sebagai objek geowisata;

- peta zonasi geowisata prioritas;
- matriks ITBX dan syarat teknis pemanfaatan;
- basis data geospasial dengan metadata lengkap;
- rencana pemantauan dan pemutakhiran.

B. Format Laporan

Tabel L10.17. Pelaporan dan isi minimum dalam KGL Geopark

Bagian laporan	Isi minimum
Pendahuluan	Latar belakang, tujuan, ruang lingkup, lokasi, dasar kebijakan, dan hubungan dengan pengembangan geopark.
Metode	Data, skala peta, satuan analisis, skoring, pembobotan, tumpang susun, verifikasi lapangan, dan validasi.
Kondisi geologi lingkungan	Geologi, geomorfologi, geodiversity, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya geologi, tata ruang, sosial-ekonomi, dan tata kelola.
Analisis kesesuaian lahan	Faktor sumber daya geologi, bahaya geologi, faktor nongeologi, faktor penyisih, dan klasifikasi kesesuaian.
Analisis kelayakan geosite	Keunikan geologi, status lahan, tata kelola, pencapaian daerah, daya dukung, keselamatan, dan interpretasi.
Zonasi dan ITBX	Zona perlindungan, penyangga, pelayanan, pengembangan terbatas, pemulihan, dan matriks ITBX.
Rekomendasi teknis	Arahan konservasi, edukasi, geowisata, pengendalian ruang, pemantauan, dan tindak lanjut.

C. Validasi Teknis

Hasil kajian geologi lingkungan kawasan geopark wajib melalui validasi teknis oleh unit yang berwenang di bidang geologi lingkungan. Validasi teknis paling sedikit menilai kecukupan data, kesesuaian metode, ketepatan skala peta, keterlacakan sumber data, konsistensi penilaian geosite, ketepatan faktor penyisih, kelayakan rekomendasi, dan kesesuaian matriks ITBX.

Validasi juga harus memastikan bahwa pengembangan geowisata tidak menurunkan nilai geologi yang menjadi dasar pengembangan geopark. Untuk geosite dengan nilai warisan geologi tinggi, validasi teknis harus memberi catatan apakah diperlukan penguatan status perlindungan ruang, pembatasan kunjungan, atau kajian lanjutan.

D. Pemantauan dan Pemutakhiran

Pemantauan dilakukan untuk memastikan bahwa kondisi geosite, keselamatan pengunjung, daya dukung, dan efektivitas pengendalian ruang tetap sesuai dengan rekomendasi teknis. Pemantauan dilakukan secara berkala dan lebih sering pada geosite yang memiliki tekanan kunjungan tinggi, bahaya geologi sedang hingga tinggi, atau nilai warisan geologi yang rentan.

Tabel L10.18. Parameter Pemantauan dan indikator utama dalam KGL Geopark

Parameter pemantauan	Indikator Utama
Kondisi fisik geosite	Perubahan bentuk, kerusakan permukaan, erosi, retakan, pelapukan, dan gangguan akibat aktivitas pengunjung.
Keselamatan pengunjung	Kejadian kecelakaan, kondisi jalur, tanda peringatan, titik aman, dan kesiapan evakuasi.
Tekanan kunjungan	Jumlah pengunjung, pola kunjungan, kepadatan pada titik sensitif, dan kepatuhan terhadap jalur.
Kualitas lingkungan	Sampah, sanitasi, kualitas air, gangguan vegetasi, dan perubahan kondisi sekitar geosite.
Tata kelola	Pelaksanaan SOP, keberadaan pemandu, pemeliharaan interpretasi, pelibatan masyarakat, dan tindak lanjut pengaduan.

Parameter pemantauan	Indikator Utama
Efektivitas ITBX	Kepatuhan kegiatan terhadap zona, syarat teknis, dan larangan pemanfaatan.

Pemutakhiran wajib dilakukan paling sedikit setiap 5 tahun atau lebih cepat apabila terjadi bencana, peningkatan kunjungan yang signifikan, perubahan tata ruang, perubahan status lahan, penetapan geosite baru, perubahan status warisan geologi, atau temuan teknis yang mengubah kelas kesesuaian dan rekomendasi pengelolaan.

IX. PENUTUP

Petunjuk Teknis ini menjadi acuan operasional untuk memastikan bahwa pengembangan kawasan geopark dilaksanakan berdasarkan daya dukung geologi, nilai warisan geologi, keselamatan pengunjung, konservasi, edukasi, geowisata terkendali, dan pemberdayaan masyarakat lokal. Dengan pedoman ini, geosite tidak hanya dipromosikan sebagai daya tarik wisata, tetapi juga dikelola sebagai aset ilmu kebumian yang harus dilindungi dan diwariskan.

Penerapan Petunjuk Teknis ini diharapkan memperkuat hubungan antara kajian geologi lingkungan, penataan ruang, rencana pengelolaan geopark, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Hasil analisis harus menjadi dasar teknis yang dapat ditindaklanjuti oleh pemerintah daerah, pengelola geopark, masyarakat, dan pemangku kepentingan dalam membangun geopark yang aman, berkelanjutan, dan berwawasan konservasi

Gambar L11.1. Bagan Alir Petunjuk teknis KGL untuk KBAK

Lampiran 11:

Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Bentang Alam Karst

Lampiran 11 memperkuat pembahasan Bab 6 dan Bab 8 dengan memberi tata cara analisis Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK). Fokusnya adalah fungsi hidrogeologi karst, nilai geologi, kerentanan, pengaturan pemanfaatan terbatas, perlindungan mata air, pemulihan, dan pemantauan.

Tabel L11.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 3, Bab 6, Bab 8, Bab 9, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Pedoman perlindungan fungsi karst, tata air, nilai geologi, zona pemanfaatan terbatas, pemulihan, dan matriks ITBX.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L11.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Bentang Alam Karst disusun sebagai acuan operasional dalam menilai, memetakan, mengendalikan, dan memanfaatkan ruang pada kawasan karst yang memiliki fungsi lindung geologi. Pedoman ini menempatkan Kawasan Bentang Alam Karst sebagai satuan ruang geologi yang bernilai ilmiah, hidrogeologi, ekologis, budaya, pendidikan, dan penghidupan masyarakat, sehingga pemanfaatannya harus dilakukan secara hati-hati, berbasis data, dan tidak menurunkan fungsi utama kawasan.

Kawasan Bentang Alam Karst memiliki karakter khas karena terbentuk melalui proses pelarutan pada batuan karbonat atau batuan mudah larut lain, menghasilkan bentuk eksokarst dan endokarst tertentu, sistem aliran air yang khas, mata air, serta bentang alam yang bernilai tinggi. Keunikan tersebut menjadikan KBAK sebagai bagian penting dari kawasan lindung geologi dan sebagai dasar pengendalian pemanfaatan

ruang, terutama untuk menjaga fungsi tata air, nilai geologi, serta keselamatan masyarakat.

Petunjuk teknis ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan ketentuan penetapan KBAK, perizinan sektor, dokumen lingkungan, atau rencana tata ruang. Petunjuk teknis ini digunakan sebagai dasar kajian geologi lingkungan agar KBAK yang telah atau akan ditetapkan dapat diterjemahkan ke dalam rekomendasi teknis, peta kesesuaian pemanfaatan ruang, arahan pengaturan zonasi, dan matriks ITBX.

II. KEDUDUKAN, MAKSUD, TUJUAN, RUANG LINGKUP, DAN ISTILAH

2.1. Kedudukan

Petunjuk Teknis ini merupakan bagian dari Lampiran Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral tentang Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan. Kedudukannya adalah sebagai acuan teknis bagi Badan Geologi, pemerintah daerah, tenaga ahli, konsultan, perguruan tinggi, pengelola kawasan, dan pemangku kepentingan lain dalam melakukan kajian geologi lingkungan pada Kawasan Bentang Alam Karst.

2.2. Maksud

Petunjuk Teknis ini dimaksudkan untuk memberikan tata cara yang seragam dalam mengidentifikasi komponen geologi karst, menilai fungsi lindung, menganalisis pembatas pemanfaatan ruang, menyusun rekomendasi teknis, dan menetapkan arahan pengaturan zonasi pada KBAK.

2.3. Tujuan

- menjamin bahwa kajian geologi lingkungan KBAK dilakukan berdasarkan data geologi, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya geologi, tata ruang, dan kondisi sosial-ekonomi yang relevan;
- menentukan tingkat kesesuaian pemanfaatan ruang pada KBAK berdasarkan fungsi lindung geologi, fungsi tata air, daya dukung, daya tampung, dan tingkat kerentanan;
- menyusun arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX pada zona perlindungan utama, zona pemanfaatan terbatas, zona penyangga, dan zona pemulihan;
- mendukung integrasi KBAK ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, rencana pengelolaan kawasan, geowisata, pendidikan kebumian, dan pemberdayaan masyarakat lokal;
- menyediakan format pelaporan, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran data KBAK.

2.4. Ruang Lingkup

- inventarisasi dan verifikasi bentuk eksokarst dan endokarst;
- penilaian fungsi hidrogeologi, mata air, sungai bawah tanah, daerah imbuhan, dan daerah lepasan;
- penilaian nilai ilmiah, pendidikan, konservasi, geowisata, dan budaya;
- penilaian daya dukung, kerentanan, bahaya geologi, dan tekanan pemanfaatan ruang;
- penentuan zona kesesuaian pemanfaatan ruang dan arahan ITBX;
- penyusunan rekomendasi teknis untuk pengendalian pemanfaatan ruang dan pemulihan kawasan;
- pelaporan, validasi teknis, pemantauan, dan pemutakhiran data.

2.5. Istilah Operasional

Tabel L11.3. Istilah dan Makna Operasional

Istilah	Makna Operasional
Kawasan Bentang Alam Karst	Kawasan karst yang menunjukkan bentuk eksokarst dan endokarst tertentu, memiliki nilai ilmiah, hidrogeologi, ekologis, konservasi, budaya, dan/atau fungsi perlindungan air tanah.
Eksokarst	Bentuk karst yang tampak di permukaan, antara lain bukit karst, lembah kering, telaga karst, mata air, serta bentuk permukaan lain akibat proses pelarutan.
Endokarst	Bentuk karst bawah permukaan, antara lain gua, sungai bawah tanah, saluran pelarutan, dan speleothem yang bernilai ilmiah, hidrogeologi, atau geowisata.
Fungsi hidrogeologi karst	Fungsi kawasan karst dalam menerima, menyimpan, mengalirkan, dan melepaskan air melalui sistem rekahan, saluran pelarutan, mata air, dan sungai bawah tanah.
Zona perlindungan utama	Bagian KBAK yang harus dipertahankan karena memuat komponen karst penting, fungsi tata air utama, nilai ilmiah tinggi, atau kerentanan tinggi.
Zona pemanfaatan terbatas	Bagian KBAK yang dapat dimanfaatkan untuk penelitian, pendidikan, geowisata terkendali, dan kegiatan masyarakat yang tidak menurunkan fungsi geologi.
Zona penyangga	Ruang pengendali di sekitar komponen KBAK penting yang berfungsi meredam tekanan pemanfaatan ruang dan melindungi fungsi utama kawasan.
Zona pemulihan	Bagian KBAK yang telah mengalami penurunan fungsi dan memerlukan tindakan pemulihan, pengendalian kegiatan, dan pemantauan berkala.

III. PRINSIP ANALISIS DAN KERANGKA PENILAIAN KBAK

3.1 Prinsip Analisis

- perlindungan fungsi geologi dan hidrogeologi sebagai prinsip utama;
- kehati-hatian tinggi karena perubahan pada satu bagian sistem karst dapat mempengaruhi mata air, sungai bawah tanah, kualitas air, dan kestabilan kawasan;
- berbasis data lapangan, data spasial, dan interpretasi ilmiah yang dapat diverifikasi;
- membaca KBAK sebagai sistem yang terhubung antara permukaan, bawah permukaan, daerah imbuhan, daerah lepasan, dan kawasan sekitar;
- mengutamakan pencegahan kerusakan dibandingkan pemulihan setelah fungsi geologi menurun;
- mengintegrasikan hasil analisis ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, AMDAL, persetujuan lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang;
- mendukung pemanfaatan terbatas untuk penelitian, pendidikan, geowisata, dan pemberdayaan masyarakat lokal sepanjang tidak menurunkan fungsi lindung.

3.2 Kerangka Penilaian

Kerangka penilaian KBAK menggunakan pendekatan berlapis. Pertama, dilakukan penapisan terhadap kawasan yang memiliki status lindung, fungsi tata air penting, atau komponen karst bernilai tinggi. Kedua, dilakukan inventarisasi rinci terhadap eksokarst, endokarst, mata air, sungai bawah tanah, serta hubungan hidrogeologi. Ketiga, dilakukan sintesis kesesuaian pemanfaatan ruang untuk menghasilkan peta zonasi teknis dan matriks ITBX.

Tabel L11.4. Kerangka penilaian dalam KGL KBAK

Kelompok Penilaian	Komponen Utama	Keluaran Teknis
Nilai geologi karst	eksokarst, endokarst, keunikan bentuk, nilai ilmiah, nilai pendidikan, nilai budaya	peta komponen karst penting dan kelas nilai geologi

Kelompok Penilaian	Komponen Utama	Keluaran Teknis
Fungsi hidrogeologi	daerah imbuhan, daerah lepasan, mata air, sungai bawah tanah, arah aliran, kualitas air	peta fungsi tata air karst dan rekomendasi perlindungan
Kerentanan dan pembatas	kerentanan pencemaran, perubahan tata air, gerakan tanah, banjir lokal, kestabilan lereng, tekanan kegiatan	peta pembatas dan tingkat kerentanan
Kesesuaian pemanfaatan	kesesuaian geowisata, penelitian, pendidikan, prasarana terbatas, kegiatan masyarakat	peta kesesuaian pemanfaatan ruang dan matriks ITBX
Pengendalian dan pemulihan	zona rusak, kegiatan tidak sesuai, kebutuhan penghijauan, pengamanan mata air, pembatasan kegiatan	rencana pengendalian, pemulihan, dan pemantauan

IV. DATA DASAR DAN TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN KBAK

4.1 Data Dasar

Tabel L11.5. Jenis data, muatan minimum, dan kegunaan dalam KGL KBAK

Jenis Data	Muatan Minimum	Kegunaan
Geologi	litologi, stratigrafi, struktur geologi, sebaran batuan karbonat atau batuan mudah larut, sejarah geologi	menentukan dasar pembentukan dan batas awal kawasan karst
Geomorfologi karst	bentuk eksokarst, pola elevasi, kemiringan lereng, bentuk lembah, telaga karst, mata air	menilai keunikan, kerentanan, dan fungsi bentang alam
Endokarst	gua, sungai bawah tanah, saluran pelarutan, speleothem, hubungan dengan mata air	menilai fungsi bawah permukaan dan potensi geowisata terbatas
Hidrogeologi	daerah imbuhan, daerah lepasan, muka air tanah, mata air, debit, kualitas air, arah aliran	menetapkan fungsi tata air dan kebutuhan perlindungan
Geologi teknik	sifat tanah dan batuan, kestabilan lereng, daya dukung, potensi amblesan lokal, kerentanan lereng	menilai keselamatan kegiatan dan prasarana terbatas
Bahaya geologi	gerakan tanah, gempa bumi, banjir lokal, erosi, kerentanan perubahan permukaan	menentukan pembatas pemanfaatan dan syarat mitigasi
Tata ruang dan penggunaan lahan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, kawasan budidaya, kegiatan eksisting	menilai kesesuaian hukum dan kebutuhan pengendalian
Sosial-ekonomi dan budaya	mata pencaharian, akses masyarakat, situs budaya, kegiatan wisata, kebutuhan air	menyusun rekomendasi yang dapat diterapkan secara sosial
Lingkungan hidup	tutupan vegetasi, kualitas air, habitat sensitif, tekanan pencemaran, lokasi pemulihan	menentukan arahan konservasi dan pemulihan

4.2 Tahapan Analisis

Kajian geologi lingkungan Kawasan bentang Alam karst (KBAK) dilaksanakan melalui tiga tahap utama yang bersifat berurutan tetapi dapat dilakukan secara iteratif apabila data lapangan menunjukkan kebutuhan penyelidikan tambahan.

Tabel L11.6. Jenis data, muatan minimum, dan kegunaan dalam KGL KBAK

Tahap	Tujuan	Kegiatan Utama	Keluaran
Tahap I - Penapisan Awal	menentukan batas indikatif KBAK dan mengidentifikasi komponen penting	kompilasi peta geologi, citra, DEM, data mata air, data tata ruang, status kawasan, dan survei pengenalan	peta indikatif KBAK, daftar komponen penting, daftar isu prioritas
Tahap II - Inventarisasi dan Penilaian Rinci	menilai nilai geologi, fungsi hidrogeologi, kerentanan, dan pembatas pemanfaatan	pemetaan eksokarst dan endokarst, survei mata air, uji	peta komponen KBAK, peta fungsi tata air, peta kerentanan, basis data

Tahap	Tujuan	Kegiatan Utama	Keluaran
		kualitas air, pemetaan bahaya, verifikasi penggunaan lahan	
Tahap III - Sintesis Kesesuaian dan ITBX	menetapkan zona pemanfaatan ruang dan rekomendasi pengendalian	skoring, pembobotan, pertimbangan ahli, integrasi SIG, penyusunan rekomendasi, matriks ITBX	peta zona kesesuaian, rekomendasi teknis, matriks ITBX, rencana pemantauan

4.3 Satuan Analisis

Satuan analisis dapat berupa satuan morfologi karst, satuan hidrogeologi, batas sub-DAS, batas administratif, batas KBAK yang telah ditetapkan, atau satuan ruang teknis lain yang paling mampu menjelaskan hubungan antara komponen karst dan pemanfaatan ruang. Untuk RDTR dan peraturan zonasi, satuan analisis harus diturunkan ke skala rinci sesuai kebutuhan pengendalian ruang.

V. PARAMETER PENILAIAN KBAK

5.1 Parameter Utama

Tabel L11.7. Indikator minimum parameter KBAK dalam KGL

Parameter	Indikator Minimum	Arah Penilaian
Keunikan eksokarst	bentuk karst permukaan, nilai ilmiah, nilai pendidikan, keterwakilan proses geologi, keutuhan bentuk	semakin unik dan utuh, semakin tinggi kebutuhan perlindungan
Keunikan endokarst	gua, sungai bawah tanah, speleothem, nilai ilmiah, akses aman, kerentanan terhadap gangguan	semakin penting dan rentan, semakin tinggi pembatasan pemanfaatan
Fungsi tata air	mata air permanen, daerah imbuhan, daerah lepasan, debit, kualitas air, hubungan antar unsur hidrogeologi	semakin strategis bagi air masyarakat dan ekosistem, semakin tinggi perlindungan
Kerentanan pencemaran	kedalaman sistem air, jenis tutupan, aktivitas di atas kawasan, potensi limbah, jarak terhadap sumber pencemar	semakin rentan, semakin ketat pengendalian kegiatan
Bahaya geologi	gerakan tanah, amblesan lokal, banjir lokal, kerentanan lereng, gempa bumi, erosi	semakin tinggi bahaya, semakin rendah kesesuaian untuk kegiatan intensif
Tekanan pemanfaatan ruang	pertambangan, bangunan baru, jalan baru, wisata massal, pertanian intensif, limbah domestik	semakin tinggi tekanan, semakin besar kebutuhan pengendalian dan pemulihan
Kesesuaian tata ruang	status kawasan lindung, peraturan zonasi, RDTR, kawasan budidaya sekitar, hak kelola, rencana pembangunan	semakin selaras dengan fungsi lindung, semakin mudah pengendalian
Potensi pemanfaatan terbatas	penelitian, pendidikan, geowisata terkendali, jalur interpretasi, usaha masyarakat rendah dampak	dapat diterima apabila tidak menurunkan fungsi utama KBAK

5.2 Faktor Penyisih

Faktor penyisih digunakan untuk menetapkan bagian kawasan yang tidak dapat diarahkan untuk pemanfaatan tertentu sebelum dilakukan penilaian skor. Faktor penyisih pada KBAK paling sedikit meliputi:

- mata air utama dan sempadan perlindungannya;
- sungai bawah tanah dan jalur aliran yang berhubungan langsung dengan sumber air masyarakat;
- gua atau komponen endokarst dengan nilai ilmiah, budaya, pendidikan, atau keselamatan tinggi;
- komponen eksokarst dengan nilai keunikan tinggi dan tingkat kerentanan tinggi;

- lereng karst yang tidak stabil atau sangat rentan terhadap perubahan bentuk;
- kawasan yang secara hukum ditetapkan sebagai kawasan lindung atau kawasan yang tidak boleh dialihkan fungsinya;
- zona yang telah mengalami penurunan fungsi dan memerlukan pemulihan sebelum dipertimbangkan untuk kegiatan terbatas.

Skoring dan pembobotan yang digunakan untuk menyusun sintesis zona kesesuaian pemanfaatan ruang. Bobot dapat disesuaikan dengan tujuan kajian, skala peta, dan tingkat kerentanan kawasan, tetapi fungsi hidrogeologi dan nilai geologi harus memperoleh bobot dominan karena merupakan dasar perlindungan KBAK.

5.3. Skoring dan Pembobotan

Tabel L11.8. Bobot acuan faktor faktor penentu dalam KGL KBAK

Kelompok Faktor	Bobot Acuan	Catatan Penerapan
Nilai geologi dan keunikan karst	25-30%	ditingkatkan pada kawasan dengan nilai ilmiah, pendidikan, budaya, atau geowisata tinggi
Fungsi hidrogeologi dan tata air	30-40%	menjadi bobot dominan pada kawasan yang memasok mata air atau air masyarakat
Kerentanan dan bahaya geologi	20-25%	ditingkatkan pada kawasan rentan pencemaran, gerakan tanah, atau amblesan lokal
Tekanan pemanfaatan dan faktor sosial	10-15%	digunakan untuk membaca kebutuhan pengendalian, pemulihan, dan pemberdayaan masyarakat
Faktor penyisih	tidak diskor	digunakan sebagai eliminasi atau pembatas wajib sebelum penetapan kelas akhir

VI. KLASIFIKASI KESESUAIAN, ARAHAN ZONASI, DAN MATRIKS ITBX

6.1 Klasifikasi Zona Kesesuaian Pemanfaatan Ruang

Tabel L11.9. Kelas, makna teknis, dan tindak lanjut dalam KGL KBAK

Kelas/Zona	Makna Teknis	Tindak Lanjut
Zona Perlindungan Utama	bagian KBAK dengan nilai geologi, fungsi tata air, atau kerentanan sangat tinggi	dipertahankan sebagai fungsi lindung; hanya penelitian dan pemantauan dengan syarat ketat
Zona Pemanfaatan Terbatas	bagian KBAK yang dapat dimanfaatkan secara rendah dampak untuk pendidikan, penelitian, dan geowisata terkendali	wajib memiliki jalur, kapasitas kunjungan, panduan keselamatan, dan pemantauan
Zona Penyangga	bagian kawasan sekitar komponen penting yang berfungsi mengurangi tekanan pemanfaatan ruang	dapat digunakan untuk fasilitas pendukung terbatas dengan syarat teknis
Zona Pemulihan	bagian KBAK yang telah mengalami penurunan fungsi atau tekanan kegiatan tinggi	diprioritaskan untuk pemulihan, penghijauan, pengendalian kegiatan, dan evaluasi berkala
Zona Tidak Sesuai untuk Kegiatan Tertentu	bagian kawasan yang tidak dapat menerima kegiatan tertentu karena pembatas hukum, nilai lindung, atau risiko tinggi	kegiatan yang menurunkan fungsi KBAK tidak diperbolehkan

6.2 Arahan Pengaturan Zonasi

Arahan pengaturan zonasi pada KBAK disusun untuk memastikan bahwa kegiatan yang diperbolehkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan dapat langsung diterjemahkan ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, rencana pengelolaan kawasan, dokumen lingkungan, dan mekanisme pengendalian pemanfaatan ruang.

Tabel L11.10. Arahan pengaturan zonasi KBAK dalam KGL

Jenis Pemanfaatan	Perlindungan Utama	Pemanfaatan Terbatas	Penyangga	Pemulihan
Penelitian ilmu kebumian	B	I	I	B
Pendidikan kebumian	B	I	I	B
Geowisata terkendali	X	B	T	X
Jalur interpretasi ringan	B	I	I	B
Fasilitas informasi skala kecil	X	B	T	X
Pemanfaatan air masyarakat yang telah ada	B	B	B	B
Pertanian tradisional rendah dampak	X	T	I	B
Permukiman baru	X	X	B	X
Bangunan skala besar	X	X	X	X
Industri dan gudang besar	X	X	X	X
Pertambangan terbuka	X	X	X	X
Pembuangan limbah atau sampah	X	X	X	X
Pemulihan vegetasi dan tata air	I	I	I	I
Pemantauan mata air dan kualitas air	I	I	I	I

Keterangan: I = diizinkan; T = terbatas; B = bersyarat; X = tidak diperbolehkan. Kode B harus selalu diikuti syarat teknis, batas kapasitas, lokasi kegiatan, rencana mitigasi, dan program pemantauan.

6.3 Klausul Teknis Minimum ITBX

- kegiatan yang diizinkan tetap wajib menjaga fungsi tata air, nilai geologi, kualitas air, dan keselamatan pengunjung;
- kegiatan terbatas hanya dapat dilakukan pada zona yang telah dinilai mampu menerima kegiatan rendah dampak;
- kegiatan bersyarat wajib disertai rencana teknis, kapasitas kegiatan, rencana keselamatan, perlindungan mata air, serta pemantauan;
- kegiatan yang tidak diperbolehkan mencakup kegiatan yang mengubah bentuk utama karst, menurunkan kualitas air, mengganggu aliran bawah permukaan, atau memperbesar risiko keselamatan;
- setiap rencana pemanfaatan baru wajib diperiksa terhadap peta KBAK, peta komponen karst penting, peta fungsi hidrogeologi, dan peraturan zonasi.

VII. KETENTUAN KHUSUS PEMANFAATAN, PENGENDALIAN, DAN PEMULIHAN KBAK

7.1 Pemanfaatan untuk Geowisata dan Pendidikan

Pemanfaatan KBAK untuk geowisata dan pendidikan hanya dapat dilakukan apabila tidak menurunkan nilai utama kawasan, tidak mengganggu mata air atau sungai bawah tanah, tidak mengubah komponen karst penting, dan dapat menjamin keselamatan pengunjung. Pengembangan geowisata wajib berbasis interpretasi geologi, edukasi konservasi, kapasitas kunjungan, keterlibatan masyarakat lokal, dan pemantauan kondisi kawasan.

7.2 Pengendalian Kegiatan Pertambangan dan Kegiatan Berisiko Tinggi

Kegiatan pertambangan terbuka, industri besar, pembuangan limbah, atau kegiatan lain yang dapat mengubah bentuk utama karst, mengganggu sistem tata air, atau menurunkan kualitas air pada zona perlindungan utama KBAK tidak diperbolehkan. Pada bagian luar KBAK atau zona penyangga, setiap kegiatan harus membuktikan bahwa tidak terdapat hubungan negatif terhadap mata air, sungai bawah tanah, komponen karst penting, dan keselamatan masyarakat.

7.3 Perlindungan Mata Air dan Sistem Tata Air

Mata air dan sistem aliran air karst merupakan objek pengendalian utama. Setiap kegiatan di KBAK wajib memperhatikan sempadan mata air, daerah imbuhan, daerah lepasan, arah aliran, kualitas air, dan kebutuhan masyarakat. Kegiatan yang berpotensi mencemari air, menurunkan debit mata air, atau mengubah pola aliran tidak boleh ditempatkan pada zona perlindungan utama dan harus dibatasi secara ketat pada zona lain.

7.4 Keterkaitan dengan KCAG, Warisan Geologi, dan Geopark

Apabila di dalam KBAK terdapat situs geologi penting, warisan geologi, atau kawasan geowisata bernilai tinggi, kajian geologi lingkungan harus menilai apakah objek tersebut memerlukan perlindungan sebagai KCAG atau menjadi bagian dari pengembangan Geopark. KBAK tetap diposisikan sebagai instrumen perlindungan bentang alam karst dan fungsi hidrogeologi, sedangkan KCAG melindungi objek geologi tertentu yang memiliki nilai ilmiah, pendidikan, budaya, atau geowisata tinggi.

7.5 Pemulihan KBAK

Pemulihan dilakukan pada bagian KBAK yang mengalami penurunan fungsi akibat perubahan bentuk, kehilangan vegetasi, pencemaran, gangguan mata air, atau kegiatan yang tidak sesuai. Pemulihan dapat mencakup penghijauan, pengendalian limpasan, pengamanan mata air, penutupan akses kegiatan tidak sesuai, penataan jalur geowisata, dan pemantauan kualitas air serta kestabilan lereng.

VIII. PELAPORAN, VALIDASI TEKNIS, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAKHIRAN

8.1 Format Laporan

- ringkasan eksekutif;
- pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, dan dasar hukum;
- metodologi dan sumber data;
- kondisi geologi, geomorfologi karst, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya geologi, dan tata ruang;
- hasil inventarisasi eksokarst, endokarst, mata air, sungai bawah tanah, dan komponen penting lain;
- analisis nilai geologi, fungsi tata air, kerentanan, faktor pembatas, dan faktor penyisih;
- peta zona kesesuaian pemanfaatan ruang dan matriks ITBX;
- rekomendasi teknis, rencana pengendalian, rencana pemulihan, dan rencana pemantauan;
- lampiran data, peta, foto lapangan, dan basis data geospasial.

8.2 Peta Wajib

Tabel L11.11. Skala acuan skala peta dalam KGL KBAK

Peta	Skala Acuan	Keterangan
peta lokasi dan batas kajian	sesuai tingkat kajian	memuat batas administrasi, batas teknis, dan akses
peta geologi dan struktur	1:50.000 atau lebih rinci	memuat satuan batuan dan struktur geologi
peta geomorfologi karst	1:25.000 atau lebih rinci	memuat eksokarst dan satuan bentuk lahan
peta endokarst dan mata air	skala rinci sesuai data	memuat gua, sungai bawah tanah, mata air, dan hubungan hidrogeologi
peta fungsi hidrogeologi	1:25.000 atau lebih rinci	memuat daerah imbuhan, lepasan, arah aliran, dan kualitas air
peta bahaya dan kerentanan	1:25.000 atau lebih rinci	memuat bahaya geologi dan kerentanan pencemaran
peta kesesuaian pemanfaatan ruang	skala RDTR atau kebutuhan kawasan	memuat zona perlindungan, pemanfaatan terbatas, penyangga, dan pemulihan
peta rekomendasi teknis	skala operasional	memuat ITBX, syarat teknis, dan lokasi prioritas pemantauan

8.3 Validasi Teknis

Validasi teknis dilakukan untuk memastikan kecukupan data, ketepatan metode, kesesuaian skala, konsistensi interpretasi, dan kelayakan rekomendasi. Validasi harus menilai keterhubungan antara peta geologi, data eksokarst, data endokarst, data mata air, peta hidrogeologi, peta tata ruang, serta matriks ITBX.

8.4 Pemantauan dan Pemutakhiran

Pemantauan KBAK dilakukan paling sedikit terhadap kondisi mata air, kualitas air, perubahan tutupan lahan, kestabilan lereng, tekanan kegiatan, jumlah pengunjung, kondisi jalur geowisata, dan efektivitas pemulihan.

Pemutakhiran dilakukan paling sedikit setiap 5 tahun atau lebih cepat apabila terdapat perubahan tata ruang, kegiatan baru, kerusakan kawasan, penurunan debit mata air, penurunan kualitas air, bencana, atau temuan geologi baru.

Tabel L11.12. Kelas, makna teknis, dan tindak lanjut dalam KGL KBAK

Objek Pemantauan	Parameter Minimum	Frekuensi Acuan
mata air	debit, kualitas air, kondisi sekitar mata air, tekanan kegiatan	semesteran atau sesuai kerentanan
sungai bawah tanah	kualitas air, indikasi gangguan aliran, hubungan dengan mata air	tahunan atau setelah kejadian penting
komponen eksokarst dan endokarst	kondisi fisik, akses, kerusakan, perubahan penggunaan lahan	tahunan
geowisata	kapasitas kunjungan, keselamatan, sampah, perubahan kondisi jalur	semesteran
zona pemulihan	vegetasi, stabilitas lereng, kualitas air, penurunan tekanan kegiatan	semesteran
tata ruang	kesesuaian kegiatan dengan RDTR, izin, dan matriks ITBX	tahunan

IX. PENUTUP

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Kawasan Bentang Alam Karst menjadi acuan operasional untuk memastikan bahwa KBAK dikelola sebagai kawasan lindung geologi yang memiliki fungsi ilmiah, hidrogeologi, konservasi, pendidikan,

geowisata, dan pemberdayaan masyarakat. Hasil analisis tidak boleh berhenti pada peta inventarisasi, tetapi harus diterjemahkan menjadi zona kesesuaian pemanfaatan ruang, rekomendasi teknis, matriks ITBX, rencana pengendalian, serta program pemantauan dan pemutakhiran.

Penerapan petunjuk teknis ini diharapkan memperkuat keterhubungan antara KBAK, tata ruang, pengelolaan lingkungan hidup, geowisata terkendali, perlindungan mata air, dan keselamatan masyarakat. Pedoman ini dapat disempurnakan sesuai perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi pemetaan, data lapangan, dan kebutuhan harmonisasi peraturan perundang-undangan.

Tabel L11.13. LAMPIRAN: Format Checklist Inventarisasi KBAK

No.	Komponen	Data yang Dikumpulkan	Status	Catatan
1	Eksokarst	bentuk permukaan, lokasi, dimensi, kondisi, nilai ilmiah		
2	Endokarst	gua, sungai bawah tanah, speleothem, akses, kondisi keselamatan		
3	Mata air	lokasi, debit, kualitas air, pemanfaatan, sempadan		
4	Hidrogeologi	daerah imbuhan, daerah lepasan, arah aliran, konektivitas		
5	Bahaya geologi	gerakan tanah, amblesan lokal, banjir lokal, erosi		
6	Penggunaan lahan	permukiman, pertanian, wisata, tambang, fasilitas umum		
7	Status tata ruang	RTRW, RDTR, kawasan lindung, perizinan, konflik ruang		
8	Pemanfaatan masyarakat	air, wisata, budaya, pendidikan, ekonomi lokal		
9	Tekanan lingkungan	pencemaran, perubahan tutupan, sampah, kegiatan tidak sesuai		
10	Kebutuhan pengendalian	zona lindung, zona penyangga, pemulihan, pemantauan		

Tabel L11.14. LAMPIRAN: Format Matriks Keputusan Teknis KBAK

Zona/Bagian Kawasan	Faktor Dominan	Kelas Rekomendasi	Kode ITBX Utama	Syarat Teknis	Tindak Lanjut
	nilai geologi / fungsi air / kerentanan / tekanan kegiatan				
	nilai geologi / fungsi air / kerentanan / tekanan kegiatan				
	nilai geologi / fungsi air / kerentanan / tekanan kegiatan				
	nilai geologi / fungsi air / kerentanan / tekanan kegiatan				

Lampiran 12:

Petunjuk Teknis KGL untuk Kawasan Cagar Alam Geologi

Lampiran 12 menjadi perangkat teknis Bab 8. Lampiran ini menjelaskan bagaimana nilai warisan geologi dan kebutuhan perlindungan ruang diterjemahkan menjadi inventarisasi, penilaian, zonasi, rekomendasi teknis, ITBX, dan pemantauan Kawasan Cagar Alam Geologi (KCAG).

Tabel L12.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 3, Bab 8, Bab 9, Bab 10, Bab 12
Fungsi operasional	Pedoman perlindungan nilai geologi penting, zonasi teknis KCAG, daftar kegiatan, syarat teknis, validasi, dan integrasi tata ruang.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L12.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kawasan Cagar Alam Geologi yang selanjutnya disebut KCAG merupakan bagian dari kawasan lindung geologi yang ditetapkan untuk melindungi nilai penting geologi, baik berupa keunikan batuan dan fosil, keunikan bentang alam, maupun keunikan proses geologi. Perlindungan tersebut diperlukan karena unsur geologi yang memiliki nilai ilmiah, pendidikan, konservasi, budaya, dan geowisata bersifat tidak dapat diperbarui dalam skala waktu manusia.

Dalam sistem penataan ruang nasional, KCAG merupakan nomenklatur perlindungan ruang bagi situs, objek, atau keunikan geologi. Oleh karena itu, warisan geologi yang telah diinventarisasi dan dinilai memiliki makna penting perlu ditindaklanjuti melalui proses penetapan KCAG apabila akan diintegrasikan secara mengikat ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, pengembangan geowisata,

pendidikan kebumian, dan pemberdayaan masyarakat lokal.

Petunjuk teknis ini disusun sebagai acuan operasional untuk melaksanakan kajian geologi lingkungan pada KCAG. Analisis dimaksud tidak hanya menilai nilai keunikan geologi, tetapi juga menilai daya dukung kawasan, tingkat kerentanan, bahaya geologi, keterpaparan pengunjung, kecukupan akses, status lahan, tata kelola, kebutuhan perlindungan, serta bentuk pemanfaatan terbatas yang masih dapat dilakukan tanpa menurunkan nilai utama geologi.

Dengan demikian, Petunjuk Teknis ini menjadi penghubung antara penetapan KCAG, pengaturan zonasi, rekomendasi geologi lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang. Hasil analisis diharapkan dapat digunakan sebagai dasar bagi Pemerintah Pusat, pemerintah daerah, pengelola kawasan, perguruan tinggi, konsultan, dan pemangku kepentingan lain dalam menjaga KCAG sebagai aset ilmu kebumian, ruang belajar, dan modal pengembangan berkelanjutan berbasis konservasi.

1.2 Kedudukan Lampiran

Lampiran ini merupakan bagian tidak terpisahkan dari Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral tentang Pedoman Teknis Kajian Geologi Lingkungan. Lampiran ini mengatur tata cara kajian geologi lingkungan khusus untuk KCAG, termasuk inventarisasi, penilaian, klasifikasi zona, penyusunan rekomendasi teknis, pengaturan zonasi, matriks ITBX, pelaporan, validasi, pemantauan, dan pemutakhiran.

II. KEDUDUKAN, MAKSUD, TUJUAN, RUANG LINGKUP, DAN ISTILAH OPERASIONAL

2.1 Maksud

Petunjuk Teknis ini dimaksudkan untuk menyediakan pedoman yang seragam, terukur, dan dapat diverifikasi dalam melaksanakan kajian geologi lingkungan untuk KCAG, baik pada tahap penilaian awal, penyusunan arahan pemanfaatan ruang, maupun pengendalian pemanfaatan kawasan yang telah ditetapkan.

2.2 Tujuan

- menetapkan tata cara kajian geologi lingkungan pada KCAG secara sistematis dan operasional;
- menyediakan parameter teknis untuk menilai nilai keunikan geologi, daya dukung, bahaya geologi, dan kerentanan kawasan;
- menyusun klasifikasi zona perlindungan, zona penyangga, zona pemanfaatan terbatas, dan zona pemulihan fungsi geologi;
- menerjemahkan hasil analisis menjadi arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX;
- memperkuat integrasi KCAG ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, dokumen lingkungan, geowisata, pendidikan kebumian, dan pemberdayaan masyarakat lokal.

2.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup Petunjuk Teknis ini meliputi kajian geologi lingkungan untuk kawasan yang telah ditetapkan sebagai KCAG, kawasan yang diusulkan sebagai KCAG, kawasan warisan geologi yang memerlukan perlindungan ruang, dan kawasan bernilai geologi yang akan dimanfaatkan secara terbatas untuk penelitian, pendidikan, konservasi, budaya, geowisata, atau pengembangan geopark.

2.4 Istilah Operasional

Tabel L12.3. Istilah dan Definisi Oparasional

Istilah	Definisi operasional
KCAG	Kawasan lindung geologi yang ditetapkan untuk melindungi cagar alam geologi karena memiliki nilai keunikan, kelangkaan, nilai ilmiah, pendidikan, konservasi, budaya, atau geowisata.
Cagar Alam Geologi	Objek atau kawasan geologi yang memiliki nilai penting karena keunikan batuan, fosil, bentang alam, proses geologi, atau rekaman sejarah bumi.
Warisan Geologi	Keragaman geologi yang memiliki nilai ilmiah, pendidikan, budaya, estetika, atau nilai penting lain dan menjadi dasar ilmiah bagi perlindungan atau pengembangan kawasan.
Geokonservasi	Upaya perlindungan, pemeliharaan, pemanfaatan terbatas, pemantauan, dan pemulihan nilai geologi agar tidak mengalami penurunan fungsi dan makna.
Zona inti perlindungan	Bagian KCAG yang memuat nilai geologi utama dan harus dilindungi secara ketat dari kegiatan yang dapat menurunkan nilai atau integritas geologi.
Zona penyangga	Bagian kawasan yang berfungsi meredam tekanan kegiatan terhadap zona inti perlindungan.
Zona pemanfaatan terbatas	Bagian kawasan yang dapat dimanfaatkan untuk kegiatan yang tidak menurunkan nilai geologi, seperti pendidikan, penelitian, interpretasi, dan geowisata terkendali.
Zona pemulihan fungsi geologi	Bagian kawasan yang memerlukan tindakan pemulihan karena mengalami gangguan, kerusakan, atau penurunan kualitas visual, ilmiah, keselamatan, atau fungsi lingkungan geologi.

III. PRINSIP ANALISIS DAN KERANGKA PENILAIAN

3.1 Prinsip Analisis

- berbasis nilai geologi utama yang menjadi dasar penetapan KCAG;
- mengutamakan perlindungan dan pencegahan penurunan nilai geologi;
- mengintegrasikan konservasi, pendidikan, penelitian, budaya, dan geowisata secara terkendali;
- memperhatikan daya dukung kawasan dan keselamatan masyarakat serta pengunjung;
- berbasis data spasial, lapangan, dokumentasi ilmiah, dan validasi teknis;
- dapat diterjemahkan menjadi pengaturan zonasi, matriks ITBX, rekomendasi teknis, dan rencana pengelolaan kawasan;
- adaptif terhadap perubahan kondisi kawasan, tekanan pemanfaatan, dan hasil pemantauan berkala.

3.2 Kerangka Penilaian

Kerangka penilaian KCAG dilakukan dengan memadukan tiga pendekatan. Pertama, pendekatan nilai geologi untuk memastikan alasan ilmiah dan konservasi yang mendasari perlindungan kawasan. Kedua, pendekatan geologi lingkungan untuk menilai daya dukung, bahaya geologi, kerentanan, dan keselamatan. Ketiga, pendekatan pengendalian ruang untuk menentukan kegiatan yang dapat diizinkan, dibatasi, disyaratkan, atau tidak diperbolehkan pada setiap zona.

Tabel L12.4. Kerangka penilaian dalam KGL KCAG

Kelompok penilaian	Komponen utama	Keluaran teknis
Nilai geologi	keunikan batuan dan fosil, bentang alam, proses geologi, struktur geologi penting, nilai ilmiah, nilai pendidikan	kelas nilai geologi dan dasar perlindungan

Kelompok penilaian	Komponen utama	Keluaran teknis
Daya dukung geologi	stabilitas lahan, kondisi tanah dan batuan, morfologi, air, akses aman, kapasitas kunjungan	kelas daya dukung dan syarat pemanfaatan
Bahaya geologi	gempa bumi, tsunami, gerakan tanah, erupsi gunung api, banjir, abrasi, longsoran tebing, gas berbahaya alami bila relevan	kelas bahaya dan kebutuhan mitigasi
Status ruang dan tata kelola	status lahan, RTRW/RDTR, akses, kelembagaan pengelola, dukungan masyarakat, rencana pengelolaan	kelas kesiapan pengelolaan
Faktor penyisih	kawasan yang secara hukum atau teknis harus dilindungi ketat, area berbahaya tinggi, area dengan kerentanan tinggi	eliminasi atau pembatasan pemanfaatan tertentu

Gambar L12.1 Bagan Alir Petunjuk teknis KGL untuk KCAG

IV. DATA DASAR DAN STANDAR INFORMASI MINIMUM

Kajian geologi lingkungan untuk KCAG wajib menggunakan data yang cukup untuk menilai nilai geologi, batas kawasan, kondisi lingkungan geologi, potensi pemanfaatan terbatas, serta risiko terhadap objek geologi dan manusia. Data harus memiliki sumber yang jelas, skala memadai, metadata, dan dapat diverifikasi di lapangan.

Tabel L12.5. Jenis data dasar dalam KGL KCAG

Jenis data	Isi minimum	Kegunaan analisis
Geologi	litologi, stratigrafi, umur batuan, struktur, fosil, mineral, proses pembentukan, sejarah geologi	menilai nilai keunikan dan dasar penetapan KCAG
Geomorfologi	satuan bentuk lahan, elevasi, lereng, proses pembentuk, kondisi visual, perubahan morfologi	menilai nilai bentang alam dan kerentanan fisik
Hidrogeologi dan sumber daya air	mata air, aliran permukaan, kondisi air tanah yang relevan, kualitas air, hubungan dengan objek geologi	menilai fungsi air dan kebutuhan perlindungan
Bahaya geologi	gempa, tsunami, gunung api, gerakan tanah, banjir, abrasi, gas alami, atau bahaya lain sesuai lokasi	menilai keselamatan pengunjung dan syarat pemanfaatan
Tata ruang dan status lahan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, kepemilikan/penguasaan lahan, izin eksisting	menilai keselarasan ruang dan dasar pengendalian
Sosial dan ekonomi lokal	akses, pemanfaatan eksisting, kegiatan masyarakat, nilai budaya, rencana geowisata, daya dukung kunjungan	menilai kelayakan pemanfaatan terbatas dan pemberdayaan masyarakat
Dokumentasi ilmiah	publikasi, laporan penyelidikan, foto, koordinat objek, profil geologi, hasil penilaian warisan geologi	menjamin keterlacakan dan validasi nilai geologi

V. TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

5.1 Tahap I: Inventarisasi dan Penapisan Awal

Tahap I bertujuan mengidentifikasi objek geologi utama, batas awal kawasan, kondisi tata ruang, potensi konflik pemanfaatan, serta bahaya geologi awal. Tahap ini menjadi dasar untuk menentukan lokasi yang perlu dianalisis lebih rinci dan bagian kawasan yang harus dilindungi sejak awal.

- kompilasi peta geologi, geomorfologi, bahaya geologi, RTRW/RDTR, status lahan, dan laporan warisan geologi;
- inventarisasi objek geologi utama beserta koordinat, deskripsi ilmiah, dokumentasi foto, dan akses;
- penapisan terhadap kegiatan eksisting yang dapat menurunkan nilai geologi;
- penyusunan peta awal nilai geologi, batas indikatif kawasan, dan faktor penyisih;
- penetapan kebutuhan survei rinci, data tambahan, dan konsultasi pemangku kepentingan.

5.2 Tahap II: Penilaian Rinci Nilai Geologi dan Kesesuaian Lingkungan

Tahap II bertujuan membuktikan nilai geologi, menetapkan zona teknis, dan menilai kemampuan kawasan untuk mendukung kegiatan konservasi, penelitian, pendidikan, geowisata terkendali, serta pemberdayaan masyarakat. Penilaian dilakukan melalui survei lapangan, analisis spasial, penilaian ahli, dan validasi data.

- pemetaan rinci objek geologi, batas objek, akses, titik pandang, serta kondisi fisik kawasan;
- penilaian keunikan, kelangkaan, keutuhan, nilai ilmiah, nilai pendidikan, dan nilai interpretasi;
- penilaian bahaya geologi, stabilitas lahan, keselamatan pengunjung, dan risiko terhadap objek geologi;
- penilaian kapasitas kunjungan, kebutuhan jalur interpretasi, sarana edukasi, dan perlindungan fisik objek;

- penyusunan peta zona inti perlindungan, zona penyangga, zona pemanfaatan terbatas, dan zona pemulihan.

5.3 Tahap III: Pengendalian Pemanfaatan Ruang dan Rekomendasi Teknis

Tahap III bertujuan menerjemahkan hasil analisis menjadi arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX. Tahap ini harus menghasilkan rekomendasi yang dapat diadopsi ke dalam RTRW, RDTR, peraturan zonasi, rencana pengelolaan kawasan, dokumen lingkungan, rencana geowisata, dan program edukasi kebumian.

- penetapan kelas zona dan kegiatan yang dapat dilakukan pada setiap zona;
- penyusunan matriks ITBX dan klausul pengendalian pemanfaatan ruang;
- penentuan syarat teknis akses, fasilitas interpretasi, keselamatan, dan pemantauan;
- penentuan bagian kawasan yang harus dipulihkan atau ditutup sementara dari pemanfaatan;
- penyusunan rencana pemantauan dan pemutakhiran data.

VI. PARAMETER PENILAIAN KAWASAN CAGAR ALAM GEOLOGI

6.1 Parameter Nilai Geologi

Tabel L12.6. Penilaian parameter keunikan geologi dalam KGL KCAG

Parameter	Indikator penilaian	Arah penilaian
Keunikan batuan dan fosil	jenis batuan penting, fosil, umur geologi, jejak kehidupan lampau, nilai paleoantropologi atau arkeologi, tipe geologi khas	semakin langka, utuh, dan bernilai ilmiah, semakin tinggi prioritas perlindungan
Keunikan bentang alam	bentuk alam khas, nilai estetika, representasi proses pembentukan, keterbacaan sejarah geologi, nilai interpretasi	semakin jelas keterwakilan proses geologi dan nilai edukasi, semakin tinggi nilai kawasan
Keunikan proses geologi	proses aktif atau rekaman proses masa lalu, manifestasi panas bumi, sumber api alami, solfatara, fumarola, geyser, atau proses lain yang bernilai	semakin penting bagi ilmu pengetahuan dan pendidikan, semakin tinggi kebutuhan perlindungan
Struktur geologi penting	lipatan, sesar, ketidakselarasan, kontak geologi, atau unsur struktur yang menjelaskan sejarah geologi daerah	dinilai sebagai unsur pendukung utama apabila menjadi tema interpretasi kawasan
Keutuhan objek	tingkat keterjagaan bentuk, akses ilmiah, kondisi visual, dan gangguan fisik	semakin utuh dan mudah diinterpretasi, semakin tinggi kelas nilai

6.2 Parameter Daya Dukung dan Keselamatan

Tabel L12.7. Parameter, Indikator minimum, dan arah rekomendasi dalam KGL KCAG

Parameter	Indikator minimum	Arah rekomendasi
Stabilitas lahan	lereng, erosi, potensi runtuhan tebing, kondisi batuan, kondisi tanah penutup	menentukan batas aman akses dan fasilitas
Akses dan jalur kunjungan	kemiringan jalur, jarak tempuh, titik rawan, kebutuhan pagar pengaman, titik evakuasi	menentukan pola kunjungan dan kapasitas layanan
Air dan sanitasi	ketersediaan air, risiko pencemaran, lokasi fasilitas sanitasi, jarak terhadap mata air dan badan air	menentukan syarat fasilitas pendukung
Daya dukung kunjungan	luas area aman, sensitivitas objek, intensitas kunjungan, waktu tinggal, kapasitas pemandu	menentukan batas kunjungan dan sistem reservasi bila diperlukan
Keterpaparan bahaya	gempa, tsunami, gunung api, gerakan tanah, banjir, abrasi, gas alami, atau bahaya lokal lain	menentukan mitigasi, peringatan, dan rute evakuasi

6.3 Parameter Status Ruang dan Tata Kelola

Tabel L12.8. Parameter, Indikator minimum, dan makna teknis dalam KGL KCAG

Parameter	Indikator minimum	Makna teknis
Status penetapan	sudah ditetapkan KCAG, masih berupa warisan geologi, atau masih kandidat	menentukan kebutuhan penetapan dan penguatan dasar hukum
Kesesuaian tata ruang	kesesuaian dengan RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, kawasan budidaya, dan rencana sektoral	menentukan peluang integrasi ke pengendalian ruang
Status lahan	penguasaan lahan, konflik pemanfaatan, izin yang sudah ada, kegiatan eksisting	menentukan kebutuhan koordinasi dan pengendalian
Kelembagaan pengelola	pemerintah daerah, pengelola kawasan, masyarakat lokal, komunitas, perguruan tinggi, atau badan pengelola	menentukan kesiapan implementasi rekomendasi
Rencana pengelolaan	rencana konservasi, interpretasi, edukasi, keselamatan, pembiayaan, pemantauan, dan pemulihan	menentukan kelayakan pemanfaatan terbatas

6.4 Faktor Penyisih

Faktor penyisih digunakan untuk menetapkan bagian kawasan yang tidak dapat dimanfaatkan untuk kegiatan tertentu karena nilai perlindungan sangat tinggi, bahaya tidak dapat diterima, atau terdapat ketentuan hukum yang membatasi pemanfaatan. Faktor penyisih tidak diberi skor, tetapi digunakan sebagai dasar eliminasi atau pembatasan sebelum kelas zona ditetapkan.

Tabel L12.9. Penggunaan faktor Penyisih dalam KGL KCAG

Faktor penyisih	Contoh kondisi	Implikasi
Nilai geologi utama sangat sensitif	objek geologi mudah rusak, bernilai ilmiah tinggi, atau menjadi dasar utama penetapan KCAG	ditetapkan sebagai zona inti perlindungan
Bahaya geologi tinggi	tebing tidak stabil, area rawan tsunami, area rawan erupsi, banjir berulang, atau bahaya lain sesuai lokasi	akses dibatasi atau hanya untuk penelitian khusus
Ketidaksesuaian tata ruang	fungsi ruang eksisting tidak selaras dengan perlindungan KCAG	memerlukan revisi pengaturan ruang atau pembatasan pemanfaatan
Kegiatan eksisting berdampak tinggi	pertambangan, industri, penggalian material, pembangunan permanen, atau kegiatan yang mengubah objek	dihentikan, dikendalikan, atau diarahkan ke pemulihan

VII. KLASIFIKASI ZONA, ARAHAN PEMANFAATAN, DAN MATRIKS ITBX

7.1 Klasifikasi Zona

Tabel L12.10. Pengaturan zonasi pada kelas kesesuaian lahan dalam KGL KCAG

Zona	Makna teknis	Arahan umum
Zona Inti Perlindungan	bagian KCAG yang memuat objek atau nilai geologi utama	dilindungi ketat; pemanfaatan hanya untuk penelitian, pemantauan, dan edukasi sangat terbatas
Zona Penyangga	bagian kawasan yang melindungi zona inti dari tekanan kegiatan sekitar	kegiatan terbatas yang tidak menurunkan nilai geologi dan berfungsi meredam dampak
Zona Pemanfaatan Terbatas	bagian kawasan yang dapat menerima kegiatan edukasi, interpretasi, geowisata terkendali, dan fasilitas ringan	diizinkan dengan batas kapasitas, desain ringan, dan persyaratan keselamatan

Zona	Makna teknis	Arahan umum
Zona Pemulihan Fungsi Geologi	bagian kawasan yang mengalami gangguan atau penurunan kualitas	diprioritaskan untuk pemulihan, penutupan sementara, atau pembatasan kegiatan
Zona Tidak Direkomendasikan untuk Pemanfaatan	bagian yang mengandung bahaya tinggi atau risiko kerusakan tidak dapat diterima	kegiatan umum tidak diperbolehkan; hanya pemantauan atau tindakan pengamanan

7.2 Matriks ITBX

Matriks ITBX digunakan untuk menerjemahkan hasil kajian geologi lingkungan ke dalam kegiatan yang diizinkan, terbatas, bersyarat, dan tidak diperbolehkan. Penyesuaian lokal dapat dilakukan berdasarkan karakter objek geologi, tingkat bahaya, status tata ruang, kapasitas pengelolaan, dan hasil validasi teknis.

Tabel L12.11. Matriks ITBX pada berbagai peruntukan ruang dalam KGL KCAG

Jenis pemanfaatan	Zona inti	Zona penyangga	Zona pemanfaatan terbatas	Zona pemulihan	Zona tidak direkomendasikan
Penelitian ilmu kebumian	B	I	I	B	B
Pendidikan kebumian terpandu	T	I	I	B	X
Pemantauan dan konservasi	I	I	I	I	B
Geowisata terkendali	T	B	I	T	X
Fasilitas interpretasi ringan	X	B	B	X	X
Jalur interpretasi tanpa pekerjaan berat	B	B	I	B	X
Bangunan permanen baru	X	T	B	X	X
Pertambangan dan pengambilan material	X	X	X	X	X
Industri dan pergudangan	X	X	X	X	X
Permukiman baru	X	T	T	X	X
Pertanian eksisting skala lokal	X	B	B	T	X
Ruang terbuka hijau konservasi	B	I	I	I	B
Kegiatan budaya lokal yang tidak merusak	B	B	I	T	X

Keterangan: I = diizinkan; T = terbatas; B = bersyarat; X = tidak diperbolehkan.

7.3 Syarat Teknis Minimum

- setiap kegiatan pada zona inti harus menjaga objek geologi utama dan tidak boleh mengubah, mengambil, menutup, atau mengaburkan nilai ilmiah objek;
- setiap kegiatan pendidikan dan geowisata wajib menggunakan jalur yang ditetapkan, pemanduan, papan interpretasi, dan pengaturan kapasitas kunjungan;
- fasilitas pendukung harus ditempatkan di luar zona inti dan

dirancang ringan, reversibel, serta tidak mengganggu nilai visual dan ilmiah kawasan;

- kegiatan yang berpotensi menimbulkan getaran, penggalian, pencemaran, perubahan drainase, atau perubahan bentuk objek harus dilarang pada zona inti dan zona penyangga;
- setiap kawasan wajib memiliki rencana keselamatan, rute evakuasi, titik kumpul aman, sistem informasi bahaya, dan prosedur penutupan sementara ketika kondisi tidak aman.

VIII. KETENTUAN KHUSUS BERDASARKAN TIPE KEUNIKAN GEOLOGI

Tabel L12.12. Ketentuan khusus dalam KGL KCAG

Tipe KCAG	Fokus perlindungan	Ketentuan khusus
Keunikan batuan dan fosil	batuan, fosil, mineral, kontak geologi, rekaman umur, jejak kehidupan lampau	dilarang mengambil contoh tanpa izin; penelitian harus terdokumentasi; lokasi penting diberi pengaman dan informasi ilmiah
Keunikan bentang alam	bentuk alam khas, panorama, keterbacaan proses pembentukan, hubungan dengan sejarah geologi	pembangunan fasilitas harus menjaga keterlihatan dan tidak mengubah karakter utama bentang alam
Keunikan proses geologi	proses aktif, manifestasi panas bumi, sumber api alami, solfatara, fumarola, geyser, atau proses geologi lain	akses harus memperhatikan bahaya gas, suhu, stabilitas tanah, dan keselamatan pengunjung
KCAG pesisir	tebing pantai, teras pantai, laguna, pantai unik, endapan pantai, perubahan garis pantai	perlu analisis tsunami, abrasi, gelombang ekstrem, jalur evakuasi, dan batas aman kunjungan
KCAG terkait geopark	geosite bernilai konservasi, edukasi, geowisata, budaya, dan pemberdayaan masyarakat	harus selaras dengan rencana induk geopark dan tidak menggantikan status perlindungan KCAG
KCAG terkait KBAK	keunikan bentang alam karst, sistem air, mata air, dan nilai konservasi	harus menjaga fungsi hidrogeologi dan mematuhi ketentuan KBAK yang berlaku

IX. PELAPORAN, VALIDASI TEKNIS, DAN BASIS DATA GEOSPASIAL

9.1 Format Laporan

Laporan kajian geologi lingkungan untuk KCAG disusun secara sistematis dan dapat ditelusuri. Laporan paling sedikit memuat pendahuluan, maksud dan tujuan, ruang lingkup, metode, data dan sumber data, kondisi geologi, nilai geologi utama, kajian geologi lingkungan, analisis bahaya, analisis tata ruang, klasifikasi zona, matriks ITBX, rekomendasi teknis, rencana pemantauan, dan lampiran data.

9.2 Peta Wajib

- peta lokasi dan batas kawasan;
- peta geologi dan objek geologi utama;
- peta geomorfologi;
- peta bahaya geologi yang relevan;
- peta tata ruang dan status lahan;
- peta nilai geologi dan sensitivitas objek;
- peta klasifikasi zona perlindungan dan pemanfaatan terbatas;
- peta rekomendasi teknis dan pengaturan zonasi.

9.3 Validasi Teknis

Validasi teknis dilakukan oleh unit yang berwenang di bidang geologi lingkungan untuk memastikan kecukupan data, ketepatan metode, keterlacakan sumber data, konsistensi interpretasi, kesesuaian skala peta, ketepatan klasifikasi zona, dan kelayakan rekomendasi teknis. Hasil validasi dituangkan dalam berita acara atau catatan teknis yang memuat status validasi dan tindak lanjut yang harus dipenuhi.

9.4 Basis Data Geospasial

Seluruh hasil analisis wajib dikelola dalam basis data geospasial yang memuat layer geologi, geomorfologi, objek geologi, batas kawasan, bahaya geologi, tata ruang, zona perlindungan, zona pemanfaatan terbatas, rekomendasi teknis, serta metadata yang memuat sumber, skala, tanggal akuisisi, penanggung jawab, dan status validasi.

X. PEMANTAUAN, PEMUTAKHIRAN, DAN PEMULIHAN FUNGSI GEOLOGI

10.1 Pemantauan

Pemantauan KCAG dilakukan untuk memastikan bahwa nilai geologi utama, kondisi keselamatan, fungsi perlindungan, dan efektivitas pengaturan zonasi tetap terjaga. Pemantauan dilakukan secara berkala paling sedikit 1 (satu) kali dalam 1 (satu) tahun atau lebih sering apabila terdapat tekanan pemanfaatan tinggi, kejadian bahaya geologi, peningkatan kunjungan, atau indikasi penurunan kualitas kawasan.

Tabel L12.13. Pemantauan dalam KGL KCAG

Parameter pemantauan	Indikator	Tindak lanjut
Kondisi objek geologi	perubahan bentuk, kerusakan, pengambilan material, gangguan visual, atau hilangnya akses ilmiah	pengamanan, pembatasan akses, atau pemulihan
Kondisi bahaya geologi	retakan tanah, tebing tidak stabil, genangan, erosi, aktivitas gas atau panas alami	penutupan sementara, pemasangan tanda bahaya, atau kajian rinci
Kunjungan dan aktivitas	jumlah pengunjung, jalur yang digunakan, kepatuhan terhadap aturan, dampak terhadap objek	pengaturan kapasitas dan pemanduan
Fasilitas dan akses	kondisi jalur, papan interpretasi, pagar pengaman, titik aman, sanitasi	perbaikan fasilitas sesuai prinsip konservasi
Kepatuhan tata ruang	kegiatan baru, bangunan, izin, atau perubahan pemanfaatan lahan	penegasan pengendalian ruang dan koordinasi lintas instansi

10.2 Pemutakhiran

Pemutakhiran analisis dilakukan paling sedikit 1 (satu) kali dalam 5 (lima) tahun atau lebih cepat apabila terdapat perubahan tata ruang, perubahan kondisi lapangan, penetapan baru warisan geologi, perubahan status kawasan, peningkatan intensitas pemanfaatan, kejadian bencana, atau temuan ilmiah baru yang berpengaruh terhadap nilai dan batas kawasan.

10.3 Pemulihan Fungsi Geologi

Pemulihan dilakukan pada bagian kawasan yang mengalami gangguan fisik, penurunan kualitas visual, penurunan akses ilmiah, kerusakan fasilitas, atau tekanan pemanfaatan yang tidak sesuai. Pemulihan dapat berupa pembatasan akses, penataan jalur, pengangkatan material asing, pemulihan vegetasi pendukung tanpa menutup objek geologi, penguatan interpretasi, dan penghentian kegiatan yang menurunkan nilai kawasan.

X. PENUTUP

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk KCAG ini menjadi acuan operasional dalam menghubungkan penetapan kawasan lindung geologi dengan pengendalian pemanfaatan ruang. Dengan adanya petunjuk teknis ini, perlindungan KCAG tidak berhenti pada penetapan formal, tetapi berlanjut pada pengaturan zona, pemanfaatan terbatas, pengelolaan risiko, pendidikan kebumian, geowisata terkendali, pemberdayaan masyarakat lokal, pemantauan, dan pemulihan fungsi geologi.

Pelaksanaan petunjuk teknis ini perlu dilakukan secara kolaboratif oleh Pemerintah Pusat, pemerintah daerah, pengelola kawasan, akademisi, tenaga ahli, komunitas lokal, dan masyarakat. Setiap pemanfaatan KCAG harus menjaga nilai utama geologi sebagai dasar

perlindungan dan memastikan bahwa manfaat ekonomi, pendidikan, budaya, dan wisata tidak mengorbankan fungsi konservasi geologi.

LAMPIRAN OPERASIONAL:

Tabel L12.14. A. Checklist Analisis KCAG

No.	Komponen pemeriksaan	Status	Catatan
1	Objek geologi utama telah diidentifikasi dan didokumentasikan		
2	Batas kawasan dan zona teknis telah dipetakan		
3	Nilai keunikan batuan, fosil, bentang alam, atau proses geologi telah dinilai		
4	Bahaya geologi dan keselamatan pengunjung telah dianalisis		
5	Status tata ruang dan status lahan telah diverifikasi		
6	Zona inti, penyangga, pemanfaatan terbatas, dan pemulihan telah ditetapkan		
7	Matriks ITBX telah disusun		
8	Rencana pemantauan dan pemutakhiran telah disiapkan		

Tabel L12.15. B. Format Ringkas Rekomendasi Teknis

Elemen rekomendasi	Isi minimum
Identitas kawasan	nama kawasan, lokasi administratif, koordinat, luas indikatif, status penetapan
Nilai utama geologi	tema geologi, objek utama, dasar ilmiah, nilai pendidikan dan konservasi
Zona teknis	zona inti perlindungan, zona penyangga, zona pemanfaatan terbatas, zona pemulihan
Kegiatan yang diperbolehkan	penelitian, pendidikan, konservasi, pemantauan, geowisata terkendali sesuai zona
Kegiatan yang dibatasi	kegiatan yang hanya dapat dilakukan dengan syarat teknis, pengawasan, dan kapasitas tertentu
Kegiatan yang tidak diperbolehkan	kegiatan yang mengubah, mengambil, menutup, mencemari, atau menurunkan nilai geologi
Syarat teknis	akses, keselamatan, fasilitas ringan, daya dukung kunjungan, pengelolaan limbah, dan pemantauan
Tindak lanjut	integrasi RTRW/RDTR, peraturan zonasi, rencana pengelolaan, pemulihan, dan validasi teknis

Gambar L-13 bagan Alir Petunjuk Teknis KGL untuk TPST

Lampiran 13:

Petunjuk Teknis KGL untuk Tempat Pengolahan Sampah Terpadu

Lampiran 13 menerapkan Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, dan Bab 12 pada tapak TPST. Fokusnya adalah kesesuaian tapak, kerentanan air tanah, sifat tanah dan batuan, arah aliran, bahaya geologi, syarat pengendalian pencemaran, serta pemantauan jangka panjang.

Tabel L13.1. Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, Bab 12
Fungsi operasional	Pedoman pemilihan lokasi TPST, kerentanan air tanah, faktor penyisih, tapak, syarat pengendalian, ITBX, dan pemantauan.
Cara penggunaan	Gunakan sebagai petunjuk kerja teknis setelah membaca kerangka metode pada Bab 5, prinsip tematik pada Bab 6 dan/atau Bab 7, serta mekanisme kelembagaan-validasi pada Bab 11 dan Bab 12.
Status dalam buku	Lampiran lengkap-terstruktur; menjadi bagian dari transfer pengetahuan teknis dan tidak menggantikan kebutuhan validasi lapangan atau ketentuan peraturan perundang-undangan.

Tabel L13.2. Daftar periksa awal pembaca

Pertanyaan kendali	Status/ruang catatan
Apakah tujuan kajian dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data minimum, skala, dan metadata telah tersedia?	
Apakah faktor pembatas dan faktor penyisih telah diperiksa sebelum skoring akhir?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, ITBX, atau pertimbangan teknis?	
Apakah hasil kajian membutuhkan validasi teknis atau pemutakhiran data?	

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

A. Kedudukan

Petunjuk Teknis ini berkedudukan sebagai acuan operasional untuk melaksanakan Kajian Geologi Lingkungan pada rencana TPST dan fasilitas persampahan yang memerlukan penilaian kesesuaian lahan. Pedoman ini tidak menggantikan kewenangan sektor persampahan, penataan ruang, lingkungan hidup, pekerjaan umum, kesehatan, atau perizinan, tetapi menyediakan dasar geologi lingkungan agar penetapan lokasi dan pengendalian pemanfaatan ruang dapat dilakukan secara ilmiah, terukur, dan dapat diverifikasi.

Dalam konteks persampahan modern, TPST tidak hanya dipahami sebagai lokasi penimbunan residu, tetapi sebagai kawasan prasarana yang dapat mencakup penerimaan, pemilahan, pengolahan biologis, pengomposan, pendauran ulang, pengolahan material menjadi bahan bakar turunan, pengolahan air lindi, pengelolaan gas, fasilitas antara, area residu akhir, jaringan jalan

operasi, drainase, kolam pengendali, instalasi pengolahan air limbah, dan zona penyangga lingkungan.

B. Maksud dan Tujuan

Petunjuk Teknis ini dimaksudkan untuk menyeragamkan tata cara Kajian Geologi Lingkungan bagi TPST dan fasilitas persampahan yang memerlukan dukungan data geologi, geomorfologi, geologi teknik, hidrogeologi, bahaya geologi, tata air, dan penggunaan lahan.

C. Tujuan Petunjuk Teknis ini adalah:

- menentukan zona kesesuaian lahan untuk TPST berdasarkan daya dukung geologi, faktor pembatas, dan faktor penyisih;
- mengurangi risiko pencemaran air tanah, air permukaan, tanah, dan lingkungan sekitar melalui pemilihan lokasi yang tepat;
- menetapkan lokasi prioritas yang dapat ditindaklanjuti untuk kajian rinci, desain teknis, dokumen lingkungan, dan perizinan;
- memberikan dasar teknis bagi RTRW, RDTR, peraturan zonasi, KLHS, AMDAL, persetujuan lingkungan, dan pengendalian pemanfaatan ruang;
- menyusun arahan pengaturan zonasi dan matriks ITBX untuk zona inti, zona penyangga, zona prasarana, zona pemantauan, dan zona pembatas.

D. Ruang Lingkup

Ruang lingkup Petunjuk Teknis ini meliputi:

- analisis kelayakan regional lokasi TPST;
- pemilihan lokasi prioritas pada zona layak tinggi atau zona yang paling memungkinkan secara geologi lingkungan;
- analisis rinci tapak TPST, termasuk analisis geologi detail, kerentanan pencemaran air tanah, air lindi, dan kestabilan lahan;
- analisis daya dukung tanah dan batuan untuk fasilitas penerimaan, bangunan pengolahan, instalasi pengolahan air lindi, area residu, jalan operasi, dan prasarana pendukung;
- penyusunan peta zona kesesuaian, rekomendasi teknis, pengaturan zonasi, matriks ITBX, standar keluaran peta, format laporan, validasi, pemantauan, dan pemutakhiran.

E. Istilah Operasional

Tabel L13.3. Istilah dan Pengertian Operasional

Istilah	Pengertian operasional
TPST	Tempat Pengolahan Sampah Terpadu, yaitu lokasi untuk kegiatan pengumpulan, pemilahan, penggunaan ulang, pendauran ulang, pengolahan, dan/atau pemrosesan akhir residu sampah secara terpadu.
Residu	Sisa hasil pengolahan sampah yang belum dapat dimanfaatkan kembali dan memerlukan pengelolaan akhir sesuai ketentuan teknis.
Air lindi	Cairan hasil kontak antara air dengan sampah atau residu yang berpotensi membawa unsur pencemar dan harus dikendalikan.
Zona inti TPST	Bagian kawasan yang digunakan untuk kegiatan utama pengolahan sampah, pengolahan air lindi, fasilitas residu, dan prasarana operasi.
Zona penyangga	Ruang pengaman yang memisahkan kegiatan TPST dari permukiman, fasilitas sensitif, sumber air, kawasan lindung, atau penggunaan lahan yang rentan.
Kelayakan regional	Penilaian awal berbasis peta dan data spasial untuk menemukan wilayah yang layak, layak sedang, layak rendah, dan tidak layak.
Kelayakan rinci tapak	Penilaian teknis pada lokasi prioritas berdasarkan data primer geologi, hidrogeologi, geologi teknik, kualitas air, dan kondisi lingkungan sekitar.

II. PRINSIP ANALISIS DAN KERANGKA PENILAIAN

A. Prinsip Analisis

- Kehati-hatian tinggi, karena kesalahan lokasi TPST dapat memicu pencemaran air tanah dan air permukaan, gangguan kesehatan lingkungan, serta konflik sosial.
- Berbasis sistem geologi lingkungan, yaitu membaca litologi, tanah, air, bentuk lahan, arah aliran, muka air tanah, bahaya geologi, dan penggunaan lahan sebagai satu kesatuan analisis.
- Bertahap, dari kelayakan regional, pemilihan lokasi prioritas, sampai penilaian rinci tapak.
- Berbasis faktor penyisih, sehingga lokasi yang bertentangan dengan fungsi lindung, sumber air, kawasan rawan tinggi, atau ketentuan ruang dapat dieliminasi sejak awal.
- Operasional, sehingga hasil analisis dapat diterjemahkan menjadi zona kesesuaian lahan, persyaratan teknis, arahan mitigasi, matriks ITBX, dan rencana pemantauan.

B. Kerangka Penilaian

Kerangka penilaian TPST menggunakan empat kelompok analisis, yaitu faktor daya dukung geologi, faktor bahaya dan kerentanan lingkungan, faktor nongeologi, dan faktor penyisih. Faktor daya dukung, bahaya, dan nongeologi dapat diberi skor dan bobot. Faktor penyisih digunakan sebagai pembatas langsung sebelum penetapan kelas akhir.

Tabel L13.4. Kerangka Penilaian Faktor Faktor Utama dalam KGL TPST

Faktor	Komponen minimum	Keluaran teknis
Daya dukung geologi	litologi, tanah, ketebalan pelapukan, kemiringan lereng, kondisi geomorfologi, muka air tanah, kedalaman akuifer, drainase alami, kestabilan tapak	kelas kemampuan lahan dan syarat teknis dasar
Bahaya dan kerentanan	banjir, gerakan tanah, gempa, likuefaksi, erosi, kerentanan pencemaran air tanah, kedekatan terhadap badan air, potensi rembesan air lindi	kelas pembatas dan kebutuhan mitigasi
Faktor nongeologi	akses jalan, jarak angkut, penggunaan lahan, permukiman, fasilitas sensitif, status lahan, rencana tata ruang, nilai sosial-ekonomi	prioritas lokasi dan tingkat penerimaan ruang

III. DATA DASAR DAN SKALA PETA

Tabel L13.5. Data Dasar Minimum dalam KGL TPST

Kelompok data	Data minimum	Fungsi dalam analisis
Geologi	peta geologi, litologi, struktur geologi, satuan batuan, sifat kedap atau permeabel, pelapukan	menilai kemampuan alami menahan atau meneruskan air lindi dan stabilitas tapak
Geomorfologi	bentuk lahan, kemiringan lereng, elevasi, posisi terhadap dataran banjir dan lembah	menilai risiko aliran permukaan, erosi, dan kestabilan
Hidrogeologi	akuifer, muka air tanah, arah aliran, gradien hidraulik, mata air, sumur, kualitas air tanah	menilai kerentanan pencemaran dan perlindungan sumber air
Hidrologi dan tata air	sungai, saluran, danau/waduk, banjir, debit, drainase, curah hujan	menilai hubungan TPST dengan air permukaan dan limpasan
Geologi teknik	SPT/CPT, sifat fisik-mekanik tanah, daya dukung, kompresibilitas, stabilitas lereng, potensi penurunan	menilai fondasi, area residu, kolam lindi, dan bangunan pendukung
Bahaya geologi	gerakan tanah, gempa, likuefaksi, erosi, banjir bandang, gunung api apabila relevan	menilai pembatas keselamatan dan syarat mitigasi

Kelompok data	Data minimum	Fungsi dalam analisis
Tata ruang dan lahan	RTRW, RDTR, peraturan zonasi, kawasan lindung, permukiman, fasilitas umum, lahan pertanian, cagar budaya	menilai keselarasan ruang dan faktor penyisih
Persampahan dan sosial	timbulan sampah, cakupan layanan, rute angkut, kapasitas rencana, penerimaan sosial, status lahan	menilai kebutuhan kapasitas, akses, dan prioritas lokasi

Tabel L13.6. Skala Peta dalam KGL TPST

Tahap	Skala acuan	Keluaran
Kelayakan regional	1:100.000 sampai 1:50.000 atau lebih rinci apabila tersedia	peta zona layak tinggi, sedang, rendah, dan tidak layak
Pemilihan lokasi prioritas	1:50.000 sampai 1:25.000	peta alternatif lokasi dan prioritas tindak lanjut
Kelayakan rinci tapak	1:25.000, 1:10.000, atau lebih rinci sesuai kompleksitas	peta geologi detail, hidrogeologi, geologi teknik, dan rekomendasi tapak
Desain teknis prasarana	skala operasional sesuai kebutuhan DED	parameter fondasi, kestabilan, drainase, pengolahan air lindi, dan pemantauan

IV. TAHAPAN KAJIAN GEOLOGI LINGKUNGAN

A. Tahap I - Kelayakan Regional TPST

Tahap I bertujuan menghasilkan peta kelayakan regional untuk menemukan wilayah yang secara geologi lingkungan paling memungkinkan untuk TPST. Analisis dilakukan melalui kompilasi data, verifikasi lapangan secukupnya, penilaian faktor yang diberi skor, dan penerapan faktor penyisih.

Faktor yang diberi skor paling sedikit meliputi:

- litologi dan sifat kemampuan alami menahan aliran air lindi;
- ketebalan tanah penutup dan tingkat pelapukan;
- kemiringan lereng dan kestabilan bentuk lahan;
- kedalaman muka air tanah dan karakter akuifer;
- jarak terhadap sungai, danau, mata air, sumur penduduk, dan sumber air baku;
- potensi banjir, gerakan tanah, erosi, likuefaksi, dan bahaya geologi lain;
- aksesibilitas, penggunaan lahan, kesesuaian tata ruang, dan keterpaparan masyarakat.

B. Faktor Penyisih Regional

Faktor penyisih tidak diberi skor, tetapi digunakan untuk menetapkan wilayah tidak layak atau memerlukan pembatasan ketat. Faktor penyisih wajib mengikuti ketentuan peraturan perundang-undangan dan hasil penilaian teknis setempat.

Tabel L13.7. Faktor penyisih Regional Dalam KGL TPST

Faktor penyisih	Arahan keputusan
Kawasan lindung atau konservasi	Tidak layak untuk TPST kecuali terdapat ketentuan khusus yang sah dan tidak menurunkan fungsi lindung.
Sempadan sungai, danau, waduk, mata air, dan pantai	Tidak layak atau wajib mengikuti jarak aman sesuai ketentuan teknis dan peraturan yang berlaku.
Sumber air baku dan daerah tangkapan penting	Tidak layak untuk fasilitas yang berpotensi menghasilkan air lindi atau pencemar.
Muka air tanah sangat dangkal dan akuifer rentan	Tidak layak atau hanya dapat dipertimbangkan dengan perlindungan teknis sangat ketat apabila tidak ada alternatif lain.
Daerah banjir tinggi atau aliran lahar	Tidak layak apabila risiko tidak dapat dikendalikan secara realistis.

Faktor penyisih	Arahan keputusan
Gerakan tanah aktif atau lereng tidak stabil	Tidak layak untuk fasilitas inti dan area residu.
Permukiman padat dan fasilitas sensitif	Wajib dipisahkan dengan zona penyangga dan tidak boleh menimbulkan gangguan kesehatan lingkungan.
Ketidaksesuaian RTRW/RDTR	Tidak dapat dilanjutkan sebelum ada kepastian kesesuaian ruang.

C. Penentuan Kelas Kelayakan Regional

Setelah skor parameter dijumlahkan dan faktor penyisih diterapkan, wilayah diklasifikasikan menjadi zona kelayakan tinggi, zona kelayakan sedang, zona kelayakan rendah, dan zona tidak layak. Kelas kelayakan dapat dihitung dengan pembagian rentang skor:

A = (Q3 - Q1) / 3; zona rendah = Q1 sampai Q1 + A; zona sedang = Q1 + A sampai Q1 + 2A; zona tinggi = Q1 + 2A sampai Q3. Q3 adalah skor maksimum dan Q1 adalah skor minimum setelah parameter yang relevan ditetapkan.

D. Tahap II - Pemilihan Lokasi Prioritas

Tahap II bertujuan memilih satu atau lebih lokasi prioritas dari zona kelayakan tinggi atau zona yang secara teknis paling memungkinkan. Pemilihan lokasi prioritas menggabungkan hasil kelayakan regional dengan kriteria operasional, sosial, ekonomi, dan kelembagaan.

Tabel L13.8. Penentuan Kelas Kelayakan Regional dalam KGL TPST

Parameter prioritas	Indikator	Makna teknis
Kelayakan regional	kelas kelayakan tinggi atau sedang-tinggi	prioritas utama diberikan pada zona dengan pembatas rendah
Luas lahan efektif	luas memenuhi kapasitas rencana, kebutuhan prasarana, dan zona penyangga	lokasi yang terlalu kecil tidak diprioritaskan
Akses jalan	tersedia jalan operasi atau dapat ditingkatkan tanpa membebani permukiman padat	mengurangi dampak lalu lintas dan biaya
Status dan penguasaan lahan	status jelas, konflik rendah, proses pengadaan realistis	mengurangi risiko implementasi
Dampak terhadap pertanian dan fungsi produktif	menghindari lahan sangat produktif atau bernilai pangan tinggi	melindungi fungsi ekonomi lokal
Jarak terhadap permukiman dan fasilitas sensitif	tersedia pemisah ruang yang memadai	melindungi kesehatan dan kenyamanan masyarakat
Ketersediaan air dan tata air	tidak mengganggu sumber air baku dan tidak berada pada jalur aliran utama yang rentan	mengurangi risiko pencemaran
Kesesuaian tata ruang	selaras dengan RTRW/RDTR atau dapat diakomodasi secara legal	menjadi prasyarat tindak lanjut

E. Tahap III - Kelayakan Rinci Tapak

Tahap III dilakukan pada lokasi prioritas untuk menetapkan kelayakan rinci tapak dan syarat teknis. Tahap ini wajib menghasilkan pembuktian geologi detail, penilaian risiko pencemaran air tanah, analisis kestabilan lahan, dan rekomendasi teknis untuk desain TPST.

- pemetaan geologi detail dan satuan tanah-batuan pada skala rinci;
- penyelidikan hidrogeologi, termasuk muka air tanah, arah aliran, gradien, kualitas air, dan hubungan dengan sumur, mata air, serta badan air;
- penilaian potensi pencemaran air tanah oleh air lindi menggunakan metode parametrik, antara lain Le Grand atau metode setara yang dijelaskan asumsi dan bobotnya;
- penyelidikan geologi teknik melalui SPT/CPT, uji laboratorium, analisis daya

dukung, penurunan, stabilitas lereng, dan kestabilan area residu;

- analisis drainase, limpasan, banjir, pengendalian air hujan, dan kapasitas tampungan pengolahan air lindi;
- penyusunan rekomendasi desain dasar untuk pelapis dasar, pengendalian rembesan, pengolahan air lindi, pengelolaan gas, dan pemantauan.

V. PARAMETER TEKNIS DAN METODE PENILAIAN

A. Parameter Daya Dukung dan Kerentanan

Tabel L13.9. Indikator minimum pada Parameter Utama dalam KGL TPST

Parameter	Indikator minimum	Arah penilaian
Litologi dan permeabilitas	jenis batuan/tanah, rekahan, sifat kedap, ketebalan lapisan pelindung	semakin rendah peluang rembesan, semakin tinggi kesesuaian
Muka air tanah	kedalaman, fluktuasi musiman, kedekatan dengan akuifer produktif	muka air tanah lebih dalam dan terlindungi lebih disukai
Arah aliran air tanah	gradien hidraulik dan arah aliran terhadap sumur, mata air, sungai	aliran menjauhi sumber air penting lebih disukai
Geomorfologi dan lereng	kemiringan, elevasi, kerawanan erosi, posisi terhadap dataran banjir	lereng stabil dan tidak tergenang lebih disukai
Geologi teknik	daya dukung, kompresibilitas, stabilitas, potensi penurunan	tapak stabil lebih disukai
Bahaya geologi	banjir, gerakan tanah, gempa, likuefaksi, erosi, gunung api	bahaya rendah lebih disukai
Jarak terhadap badan air	sungai, danau, waduk, mata air, saluran irigasi	jarak lebih aman dan ada pemisah alami lebih disukai
Penggunaan lahan sekitar	permukiman, sekolah, fasilitas kesehatan, pertanian, kawasan lindung	keterpaparan rendah lebih disukai

B. Skoring dan Pembobotan

Skoring dilakukan dengan menetapkan intensitas kepentingan parameter dan bobot kelas kondisi. Intensitas menunjukkan tingkat kepentingan parameter terhadap kelayakan TPST, sedangkan bobot kelas menunjukkan kondisi baik, sedang, atau buruk. Nilai parameter dihitung dari perkalian intensitas dan bobot kelas.

Tabel L13.10. Penskoran dalam KGL TPST

Intensitas	Makna	Keterangan
5	sangat penting	parameter berhubungan langsung dengan risiko pencemaran atau keselamatan tapak
4	penting	parameter sangat mempengaruhi biaya pengendalian dan mitigasi
3	sedang	parameter mempengaruhi kelayakan tetapi masih dapat dikendalikan
2	rendah	parameter pendukung yang tidak dominan
1	sangat rendah	parameter pelengkap

Tabel L13.11. Pembobotan dalam KGL TPST

Bobot kelas	Kelas kondisi	Makna
3	baik	kondisi mendukung atau pembatas rendah
2	sedang	kondisi masih dapat diterima dengan syarat teknis
1	buruk	kondisi membatasi kuat dan memerlukan mitigasi berat

C. Penilaian Kerentanan Pencemaran Air Tanah

Analisis kerentanan pencemaran air tanah wajib dilakukan pada lokasi prioritas dan lokasi rinci. Metode Le Grand dapat digunakan sebagai salah satu metode parametrik, karena mempertimbangkan kedalaman muka air tanah, kemiringan muka air tanah, jarak horizontal terhadap sumber pencemar, kemampuan lapisan di atas muka air tanah, dan permeabilitas akuifer. Metode lain dapat digunakan sepanjang parameternya setara, asumsi dan pembobotannya dijelaskan, serta hasilnya dapat diverifikasi.

Tabel L13.12. Penilaian Kerentanan Pencemaran Air Tanah dalam KGL TPST

Parameter	Data pendukung	Makna teknis
Kedalaman muka air tanah	pengukuran sumur, piezometer, bor dangkal	muka air tanah dangkal meningkatkan kerentanan
Kemiringan muka air tanah	kontur muka air tanah dan gradien	gradien tinggi dapat mempercepat perpindahan pencemar
Jarak ke sumber air	sumur, mata air, sungai, danau, rawa, irigasi	jarak dekat meningkatkan risiko
Kemampuan lapisan penutup	tekstur tanah, lempung, kepadatan, ketebalan zona tak jenuh	lapisan pelindung tebal dan relatif kedap lebih baik
Permeabilitas akuifer	uji permeabilitas, uji pemompaan, deskripsi litologi	akuifer permeabel meningkatkan potensi penyebaran pencemar

D. Analisis Geologi Teknik dan Kestabilan Tapak

- Analisis geologi teknik dilakukan untuk memastikan bahwa fasilitas TPST, instalasi pengolahan air lindi, area residu, bangunan operasi, jalan internal, dan prasarana pendukung memiliki dasar teknis yang aman. Kajian meliputi daya dukung tanah, penurunan, stabilitas lereng, stabilitas timbunan residu, kestabilan tanggul pengendali, serta risiko deformasi permukaan.
- Analisis fondasi bangunan dan instalasi menggunakan data SPT/CPT, uji laboratorium, dan parameter fisik-mekanik tanah.
- Analisis kestabilan lereng dilakukan pada area penggalian, lereng alam, tanggul pengendali, dan area residu.
- Analisis penurunan total dan diferensial wajib dilakukan pada tanah lunak, tanah organik, atau area dengan beban operasi besar.
- Analisis pengendalian air permukaan dan air lindi wajib memastikan tidak ada aliran tak terkendali menuju sumber air atau permukiman.

VI. ZONA KESESUAIAN LAHAN DAN REKOMENDASI TEKNIS

A. Klasifikasi Zona Kesesuaian Lahan

Tabel L13.13. Klasifikasi Zona Kesesuaian Lahan dalam KGL TPST

Kelas	Makna teknis	Tindak lanjut
Sangat sesuai / layak tinggi	daya dukung baik, kerentanan pencemaran rendah, bahaya rendah, tata ruang selaras	dapat diprioritaskan dengan standar teknis umum dan pengendalian rutin
Sesuai / layak sedang	pembatas sedang dan masih dapat dikendalikan	dapat digunakan dengan syarat teknis dan pemantauan
Sesuai bersyarat / layak rendah	pembatas kuat, memerlukan rekayasa dan pengendalian khusus	hanya untuk fungsi tertentu dan wajib disertai mitigasi rinci
Terbatas	hanya sebagian fungsi TPST yang dapat diterima	fasilitas inti dan residu akhir dibatasi; prasarana pendukung dapat dipertimbangkan

Kelas	Makna teknis	Tindak lanjut
Tidak sesuai / tidak layak	bertentangan dengan faktor penyisih atau risiko tidak dapat diterima	tidak direkomendasikan untuk TPST

B. Rekomendasi Teknis Minimum

Setiap hasil Kajian Geologi Lingkungan untuk TPST wajib memuat rekomendasi teknis paling sedikit mengenai:

- kelas kesesuaian lahan dan batas area yang direkomendasikan;
- bagian kawasan yang dapat digunakan untuk penerimaan, pemilahan, pengolahan, residu akhir, pengolahan air lindi, prasarana, dan zona penyangga;
- syarat pelapis dasar, pengumpulan air lindi, instalasi pengolahan air lindi, dan sistem pemantauan kualitas air;
- syarat drainase, pengendalian limpasan, pengendalian banjir, dan perlindungan badan air;
- syarat fondasi, kestabilan lereng, stabilitas area residu, dan perbaikan tanah apabila diperlukan;
- kebutuhan zona penyangga terhadap permukiman, fasilitas sensitif, sumber air, kawasan lindung, dan lahan pertanian produktif;
- rencana pemantauan air tanah, air permukaan, air lindi, gas, stabilitas lahan, bau, debu, dan lalu lintas operasi.

VII. PENGATURAN ZONASI DAN MATRIKS ITBX

A. Struktur Zona Operasional TPST

Hasil kajian geologi lingkungan harus diterjemahkan ke dalam arahan pengaturan zonasi. Struktur zona operasional TPST paling sedikit meliputi zona inti, zona pengolahan, zona residu, zona prasarana, zona penyangga, zona pemantauan, dan zona yang tidak diperbolehkan.

Tabel L13.14. Struktur Zona Operasional dalam KGL TPST

Kode	Zona	Fungsi utama
ZI	Zona inti TPST	penerimaan, pemilahan, pengolahan utama, pengolahan air lindi, utilitas utama
ZR	Zona residu	area pengelolaan residu akhir yang memerlukan proteksi geologi dan hidrogeologi ketat
ZP	Zona prasarana pendukung	jalan operasi, kantor, bengkel, gudang, drainase, kolam pengendali, fasilitas keamanan
ZB	Zona penyangga	ruang pengaman terhadap permukiman, fasilitas sensitif, sumber air, kawasan lindung, dan lahan sekitar
ZM	Zona pemantauan	sumur pantau, titik kontrol air permukaan, titik pantau gas, pengamatan stabilitas
ZX	Zona tidak sesuai	kawasan yang harus dikeluarkan dari fungsi TPST karena faktor penyisih atau risiko tinggi

B. Matriks ITBX Acuan

Tabel L13.15. Matriks ITBX acuan dalam KGL TPST

Jenis kegiatan	ZI	ZR	ZB	ZX	Klausul teknis
Penerimaan dan pemilahan sampah	I	T	B	X	wajib dilengkapi pengendalian bau, drainase, dan lantai kedap
Pengolahan biologis/kompos	I	B	B	X	wajib mengendalikan air lindi, bau, dan vektor penyakit
Pengolahan RDF atau material daur ulang	I	B	B	X	wajib memenuhi standar keselamatan, pengendalian debu, dan air limbah

Jenis kegiatan	ZI	ZR	ZB	ZX	Klausul teknis
Area residu akhir	B	I	X	X	hanya pada bagian dengan perlindungan hidrogeologi dan geoteknik memadai
Instalasi pengolahan air lindi	I	I	B	X	wajib berada pada zona aman dan mudah dipantau
Sumur pantau dan titik pemantauan	I	I	I	B	wajib tersedia di hulu dan hilir aliran air tanah
Permukiman baru	X	X	B	X	tidak diperbolehkan pada zona inti dan residu; dibatasi pada zona penyangga
Fasilitas pendidikan/kesehatan	X	X	X	X	tidak direkomendasikan di sekitar zona operasi TPST
Pertanian pangan intensif	X	X	B	X	dibatasi apabila ada risiko pencemaran tanah atau air
Ruang terbuka hijau pengaman	T	T	I	B	direkomendasikan sebagai pemisah, resapan terkendali, dan estetika kawasan
Koridor evakuasi dan akses darurat	I	I	I	B	wajib dipertahankan

Keterangan: I = diizinkan; T = terbatas; B = bersyarat; X = tidak diperbolehkan. Matriks ini merupakan acuan awal dan harus disesuaikan dengan hasil kajian geologi lingkungan rinci, rencana tata ruang, dan ketentuan teknis sektor persampahan.

VIII. KETENTUAN KHUSUS TPST DAN FASILITAS RESIDU

A. Ketentuan untuk TPST Berbasis Pengolahan Terpadu

TPST berbasis pengolahan terpadu harus dinilai menurut kombinasi fungsi pengolahan yang direncanakan. Fasilitas dengan dominasi pemilahan dan daur ulang memiliki kebutuhan geologi lingkungan yang berbeda dari fasilitas yang mempunyai area residu akhir, pengolahan air lindi besar, atau pengolahan termal. Oleh karena itu, penyusun wajib menjelaskan jenis teknologi, kapasitas, residu, potensi air lindi, kebutuhan air, kebutuhan drainase, dan rencana pemantauan.

B. Ketentuan untuk Area Residu Akhir

Area residu akhir merupakan bagian yang paling sensitif dari TPST. Penempatan area ini wajib didahului kajian hidrogeologi dan geologi teknik rinci, termasuk perlindungan dasar, sistem pengumpulan air lindi, sistem pemantauan, kestabilan lereng, dan pengelolaan air hujan. Area residu akhir tidak boleh ditempatkan pada zona dengan muka air tanah sangat dangkal, akuifer rentan, daerah banjir aktif, kawasan resapan penting, kawasan rawan gerakan tanah aktif, atau kawasan yang secara tata ruang tidak memperbolehkan fungsi tersebut.

C. Ketentuan untuk TPST di Wilayah Pesisir, Dataran Banjir, dan Lereng

- Pada wilayah pesisir, analisis wajib memasukkan rob, intrusi air asin, muka air tanah dangkal, salinitas, banjir, penurunan muka tanah, dan akses evakuasi.
- Pada dataran banjir, lokasi hanya dapat dipertimbangkan apabila tersedia pengendalian banjir, elevasi aman, perlindungan air lindi, dan rencana operasi saat keadaan darurat.
- Pada lereng, analisis wajib memastikan kestabilan lereng, pengendalian erosi, drainase lereng, dan stabilitas fasilitas pada kondisi jenuh air.
- Pada kawasan dengan tanah lunak, analisis wajib menilai daya dukung, penurunan, kebutuhan perbaikan tanah, dan integritas prasarana pengolahan air lindi.

IX. PELAPORAN, VALIDASI, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAKHIRAN

A. Format Laporan

Laporan Kajian Geologi Lingkungan untuk TPST paling sedikit memuat: pendahuluan, tujuan, ruang lingkup, dan deskripsi rencana TPST;

- metode, sumber data, skala peta, dan ketidakpastian data;

- kondisi geologi, geomorfologi, hidrogeologi, geologi teknik, bahaya geologi, tata air, penggunaan lahan, dan tata ruang;
- analisis kelayakan regional, pemilihan lokasi prioritas, dan kelayakan rinci tapak;
- analisis potensi pencemaran air tanah dan air permukaan;
- analisis kestabilan lahan dan daya dukung fasilitas;
- peta zona kesesuaian, peta faktor penyisih, peta rekomendasi teknis, dan matriks ITBX;
- rencana pemantauan, pemutakhiran, dan tindak lanjut.

B. Peta dan Data Digital

Tabel L13.16. Produk peta dan data digital dalam KGL TPST

Jenis peta	Isi minimum
Peta lokasi dan batas kajian	batas administrasi, batas tapak, jaringan jalan, rute operasi
Peta geologi dan geomorfologi	litologi, bentuk lahan, struktur, lereng, elevasi
Peta hidrogeologi	muka air tanah, arah aliran, akuifer, mata air, sumur, kualitas air
Peta bahaya geologi	banjir, gerakan tanah, gempa, likuefaksi, erosi, bahaya lain
Peta faktor penyisih	kawasan lindung, sempadan, sumber air, permukiman, fasilitas sensitif
Peta zona kesesuaian	layak tinggi, sedang, rendah, terbatas, tidak layak
Peta rekomendasi teknis dan ITBX	zona inti, residu, prasarana, penyangga, pemantauan, tidak sesuai

C. Validasi Teknis

Hasil analisis wajib divalidasi oleh unit yang berwenang di bidang geologi lingkungan. Validasi teknis meliputi pemeriksaan kecukupan data, kesesuaian metode, ketepatan skala, konsistensi skoring, keabsahan peta, ketepatan faktor penyisih, kelayakan rekomendasi teknis, dan keterpaduan dengan RTRW/RDTR, dokumen lingkungan, serta rencana pengelolaan sampah.

D. Pemantauan dan Pemutakhiran

Pemantauan dilakukan pada tahap pra-konstruksi, konstruksi, operasi, pascaoperasi, dan pemulihan. Parameter pemantauan paling sedikit meliputi muka air tanah, kualitas air tanah, kualitas air permukaan, air lindi, stabilitas lereng, penurunan lahan, gas, drainase, bau, debu, dan perubahan penggunaan lahan sekitar.

Tabel L13.17. Validasi Teknis dalam KGL TPST

Komponen	Parameter	Frekuensi acuan
Air tanah	muka air tanah, pH, DHL, klorida, nitrat, amonia, logam berat relevan, indikator organik	sekurang-kurangnya 2 kali setahun atau sesuai dokumen lingkungan
Air permukaan	kualitas air hulu-hilir, debit, sedimen, indikasi pencemaran	berkala dan setelah kejadian hujan ekstrem
Air lindi	debit, kualitas, kinerja pengolahan, potensi limpasan	berkala sesuai kapasitas operasi
Stabilitas lahan	retakan, deformasi, penurunan, erosi, stabilitas tanggul dan lereng	berkala dan setelah hujan ekstrem atau gempa
Lingkungan sekitar	bau, debu, vektor penyakit, lalu lintas, keluhan masyarakat	berkala dan responsif terhadap pengaduan

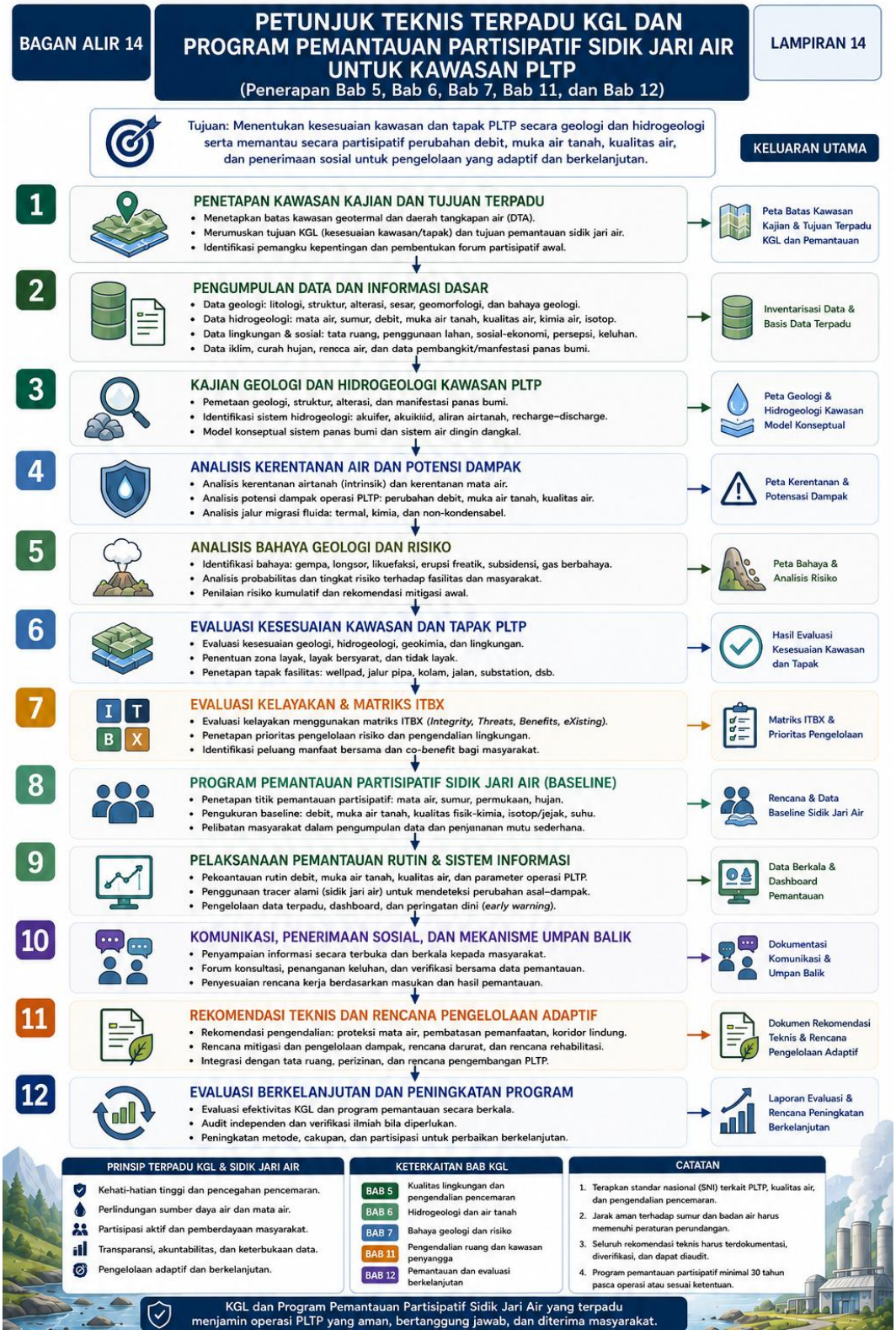
Pemutakhiran analisis dilakukan paling sedikit setiap lima tahun atau lebih cepat apabila terjadi perubahan kapasitas TPST, perubahan teknologi, perubahan tata ruang, pencemaran terindikasi, bencana, kegagalan

prasarana, atau perubahan signifikan pada kondisi geologi lingkungan.

XI. PENUTUP

Petunjuk Teknis ini menjadi acuan dalam memastikan bahwa penetapan lokasi TPST dan fasilitas persampahan tidak hanya didasarkan pada ketersediaan lahan, tetapi juga pada kesesuaian geologi lingkungan, perlindungan air tanah dan air permukaan, keselamatan tapak, keterpaduan tata ruang, dan keberterimaan lingkungan. Dengan pendekatan bertahap, lokasi yang tidak layak dapat dieliminasi sejak awal, lokasi prioritas dapat dipilih secara objektif, dan lokasi terpilih dapat dirancang dengan syarat teknis yang memadai.

Pedoman ini dapat disempurnakan sesuai perkembangan teknologi pengolahan sampah, ilmu geologi lingkungan, standar persampahan, ketentuan penataan ruang, dan kebutuhan pengendalian lingkungan di daerah.



Gambar L14.1 Bagan Alir Pettunjuk Teknis KGL untuk Kawasan PLTP

Petunjuk Teknis Terpadu KGL dan Program Pemantauan Partisipatif Sidik Jari Air untuk Kawasan PLTP

Lampiran 14 menerapkan Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, dan Bab 12 pada kawasan PLTP. Lampiran ini memadukan dua kebutuhan yang semula dapat berdiri sendiri, yaitu Kajian Geologi Lingkungan untuk kesesuaian kawasan dan tapak PLTP serta Program Pemantauan Partisipatif Sidik Jari Air untuk menjawab isu debit mata air, muka air tanah, kualitas air, dan penerimaan sosial masyarakat.

Dengan padu-serasi ini, Lampiran 14 tidak hanya menjadi petunjuk teknis pemilihan kawasan dan tapak, tetapi juga perangkat pengelolaan lingkungan geologi yang mengatur baseline, titik pantau, parameter pemantauan, forum data, mekanisme keluhan, tindakan korektif, validasi, dan sistem informasi. Pendekatan ini penting karena pengembangan PLTP berada pada lingkungan geologi yang kompleks dan sering beririsan dengan sumber air yang digunakan masyarakat.

Lampiran ini berkedudukan sebagai perangkat operasional Bab 11 mengenai KGL untuk kawasan, tapak, dan prasarana, dengan dukungan metodologis dari Bab 5, kerangka hidrogeologi dari Bab 6, kerangka bahaya geologi dari Bab 7, serta kerangka validasi dan sistem informasi dari Bab 12. Dengan demikian, Lampiran 14 harus dibaca sebagai contoh penerapan GTL pada kegiatan energi geologi yang menuntut integrasi antara analisis tapak, perlindungan air, pengendalian risiko, dan komunikasi publik.

Tabel L14.1 Kedudukan Lampiran dalam Buku GTL.

Bab utama	Hubungan dengan Lampiran 14	Keluaran yang dipakai
Bab 5	Menjadi dasar pemetaan, skoring, pembobotan, analisis spasial, faktor penyisih, dan peta sintesis PLTP.	Parameter, skor, bobot, peta kesesuaian, peta pembatas, dan rekomendasi.
Bab 6	Menjadi dasar pemahaman air tanah dangkal, daerah imbuhan, mata air, MAT, dan kerentanan air.	Baseline debit, MAT, kualitas air, zona perlindungan sumber air, dan titik pantau.
Bab 7	Menjadi dasar penilaian bahaya geologi pada kawasan vulkanik/tektonik dan prasarana PLTP.	Arahan mitigasi bahaya geologi, zona kehati-hatian, dan pemantauan.
Bab 11	Menjadi kerangka penerapan KGL untuk kawasan PLTP, tapak sumur, jalur pipa, fasilitas pembangkit, dan prasarana pendukung.	Kelas kesesuaian, faktor pembatas, syarat teknis, dan pertimbangan kegiatan.
Bab 12	Menjadi dasar kelembagaan, validasi, pertimbangan teknis, sistem informasi, forum data, dan audit teknis.	Daftar periksa mutu, laporan berkala, basis data, dan mekanisme tindak lanjut.

Ringkasan Penggunaan

Petunjuk teknis terpadu ini digunakan untuk menilai, memantau, dan mengomunikasikan hubungan antara pengembangan PLTP dan lingkungan geologi, terutama sumber air masyarakat. Prinsip dasarnya adalah bahwa keterkaitan antara PLTP dan perubahan debit atau MAT tidak boleh diasumsikan. Hubungan tersebut harus

diuji melalui baseline, pemantauan berkala, pembandingan dengan titik kontrol, analisis sidik jari air, dan forum data yang dapat diikuti masyarakat.

Petunjuk ini tidak dimaksudkan untuk membela atau menolak PLTP secara apriori. Petunjuk ini dimaksudkan untuk membangun pembuktian bersama, memperkuat kepercayaan publik, memperjelas batas antara data dan persepsi, serta menyiapkan tindakan korektif apabila ditemukan indikasi dampak.

Tabel L14.2 Istilah dan singkatan kunci.

Istilah/Singkatan	Makna kerja dalam Lampiran 14
PLTP	Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi.
KGL	Kajian Geologi Lingkungan untuk menilai hubungan kondisi geologi dengan rencana kegiatan atau pemanfaatan ruang.
MAT	Muka air tanah pada sumur pantau atau sumur masyarakat terpilih.
Sidik jari air	Ciri gabungan fisik, kimia, dan isotop air yang digunakan untuk membedakan asal, proses, dan kemungkinan percampuran air.
Baseline	Kondisi awal sebelum kegiatan utama berlangsung, digunakan sebagai pembanding perubahan.
Titik kontrol	Titik pembanding di luar area pengaruh langsung kegiatan, digunakan untuk membedakan perubahan regional/musiman dari perubahan lokal.
Manifestasi panas bumi	Gejala permukaan yang menunjukkan sistem panas bumi, misalnya mata air panas, tanah hangat, fumarol, atau gas.
Forum data	Pertemuan berkala untuk membaca hasil pemantauan bersama masyarakat dan pihak terkait.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pengembangan PLTP berada pada lingkungan geologi yang umumnya kompleks. Kawasan panas bumi sering berkaitan dengan sistem vulkanik atau tektonik, struktur geologi, alterasi hidrotermal, manifestasi permukaan, daerah imbuhan, mata air, penggunaan air masyarakat, kawasan hutan, dan bahaya geologi. Karena itu, komunikasi mengenai air pada kawasan PLTP tidak dapat hanya menggunakan pendekatan sosialisasi umum. Dibutuhkan pendekatan geologi lingkungan yang terbuka, terukur, dan dapat dipahami masyarakat.

Salah satu isu yang paling sering muncul adalah persepsi masyarakat bahwa PLTP menyebabkan debit mata air menurun atau MAT pada sumur penduduk turun. Persepsi tersebut tidak boleh diabaikan karena berkaitan langsung dengan kebutuhan dasar masyarakat. Namun, secara ilmiah, perubahan debit dan MAT tidak dapat disimpulkan secara seragam. Perubahan dapat dipengaruhi oleh curah hujan, musim kemarau, perubahan penggunaan lahan, perubahan daerah imbuhan, peningkatan pemakaian air, konstruksi jalan dan fasilitas, maupun kegiatan panas bumi itu sendiri.

Oleh sebab itu, petunjuk teknis ini menyusun cara kerja yang membedakan antara dugaan, indikasi, dan pembuktian teknis. Kuncinya adalah pemantauan

partisipatif: masyarakat dilibatkan dalam identifikasi sumber air, pengukuran lapangan, pembacaan hasil, dan tindak lanjut. Dengan cara ini, data tidak hanya menjadi milik pengembang atau pemerintah, tetapi menjadi dasar dialog teknis yang dapat diterima oleh para pihak.

B. Kedudukan

Petunjuk Teknis Terpadu ini berkedudukan sebagai acuan operasional untuk melaksanakan KGL pada kawasan PLTP sekaligus melaksanakan Program Pemantauan Partisipatif Sidik Jari Air. Petunjuk ini tidak menggantikan kewenangan sektor panas bumi, sumber daya air, lingkungan hidup, penataan ruang, atau dokumen lingkungan, tetapi melengkapinya dari sisi geologi lingkungan, validasi hidrogeologi, komunikasi risiko, dan pertimbangan teknis GTL.

Dalam kerangka GTL, PLTP tidak dipahami hanya sebagai fasilitas pembangkit listrik, tetapi sebagai kegiatan pemanfaatan energi geologi yang berinteraksi dengan sistem batuan, struktur geologi, fluida panas bumi, air tanah dangkal, air permukaan, mata air, bahaya geologi, tata ruang, dan kehidupan masyarakat sekitar.

C. Maksud dan Tujuan

Petunjuk Teknis Terpadu ini dimaksudkan untuk menyeragamkan tata cara KGL bagi kawasan PLTP sejak tahap penapisan, pengembangan lapangan, pembangunan prasarana, operasi, pemantauan, sampai evaluasi berkala, sekaligus menyediakan tata cara pemantauan partisipatif yang dapat menjelaskan hubungan atau ketidakterkaitan antara air tanah dangkal masyarakat dan sistem panas bumi.

Tabel L14.3 Tujuan dan penjelasan operasional Lampiran 14.

Tujuan	Penjelasan operasional
Menentukan kesesuaian kawasan dan tapak PLTP	Menilai daya dukung geologi, daya tampung, faktor pembatas, dan faktor penyisih untuk wilayah kerja, tapak sumur, jalur pipa, fasilitas pembangkit, jalan akses, dan prasarana pendukung.
Melindungi sumber air masyarakat	Mengenali mata air, sumur penduduk, air permukaan, daerah imbuhan, titik lepasan, dan penggunaan air masyarakat sebagai parameter utama dalam KGL.
Membedakan sistem air	Membedakan sistem panas bumi, manifestasi panas bumi, air tanah dangkal, air hujan, air permukaan, dan mata air melalui model konseptual dan sidik jari air.
Menyusun baseline dan pemantauan	Menetapkan kondisi awal debit, MAT, kualitas air, curah hujan, penggunaan air, dan perubahan lahan sebelum kegiatan utama.
Menguatkan komunikasi risiko	Menyediakan forum data, grafik sederhana, mekanisme keluhan, dan tindak lanjut yang dapat dipahami masyarakat.
Menyediakan dasar pertimbangan teknis GTL	Memberi dasar bagi RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengawasan, validasi, dan pertimbangan teknis geologi lingkungan.

D. Ruang Lingkup

Ruang lingkup petunjuk teknis mencakup kawasan prospek panas bumi, wilayah kerja, area pengembangan, tapak sumur produksi, tapak sumur injeksi, jalur pipa, tapak pembangkit, jalan akses, jaringan transmisi, fasilitas pendukung, zona penyangga permukiman, mata air, sumur penduduk, air permukaan, manifestasi panas bumi, daerah imbuhan, daerah lepasan, dan titik kontrol.

Petunjuk teknis berlaku untuk tahap pra-konstruksi, eksplorasi rinci, konstruksi, operasi, pemantauan berkala, evaluasi keluhan, tindakan korektif, dan pemutakhiran sistem informasi. Pada lokasi yang kegiatan PLTP-nya sudah berjalan, baseline dapat disusun secara retrospektif dari data historis, dokumen lingkungan, catatan masyarakat, data hujan, dan pengukuran awal yang dilakukan sesegera mungkin.

II. PRINSIP ANALISIS TERPADU

KGL kawasan PLTP dilaksanakan berdasarkan prinsip kehati-hatian, keterlacakan data, pemisahan sistem hidrogeologi, pengendalian risiko, pemantauan sebelum dan sesudah operasi, serta komunikasi publik berbasis data. Dalam konteks PLTP, prinsip tersebut harus diperluas menjadi pendekatan pembuktian bersama karena isu air sering menjadi pusat penerimaan atau penolakan masyarakat.

Tabel L14.4 Prinsip analisis terpadu KGL dan sidik jari air PLTP.

Prinsip	Makna dalam KGL PLTP	Implikasi pelaksanaan
Kehati-hatian	Kesimpulan tidak dibuat dari dugaan atau satu kali pengukuran.	Gunakan baseline, titik kontrol, data multi-musim, dan kajian tambahan bila data belum cukup.
Keterlacakan	Setiap rekomendasi harus dapat ditelusuri ke data, metode, dan penalaran geologi.	Sumber data, skala, alat, tanggal, dan batas interpretasi dicatat.
Pemisahan sistem air	Reservoir panas bumi, air tanah dangkal, mata air, air hujan, dan air permukaan dibaca sebagai sistem yang perlu dibedakan.	Susun model konseptual geologi-hidrogeologi dan sidik jari air.
Partisipatif	Masyarakat ikut mengenali sumber air, mengikuti pengukuran, membaca hasil, dan menyampaikan keluhan.	Bentuk forum data dan dokumentasikan berita acara.
Adaptif	Pengelolaan diperbaiki ketika data menunjukkan perubahan penting.	Tetapkan status indikasi, audit teknis, dan tindakan korektif.

III. KERANGKA PENILAIAN KGL KAWASAN PLTP

Kerangka penilaian PLTP menggunakan lima lapis analisis. Lapis pertama adalah penilaian sistem geologi dan panas bumi. Lapis kedua adalah penilaian hidrogeologi dangkal, mata air, dan sumber air masyarakat. Lapis ketiga adalah penilaian bahaya geologi dan geologi teknik. Lapis keempat adalah penilaian kesesuaian kawasan dan tapak. Lapis kelima adalah pemantauan partisipatif, komunikasi risiko, dan tindakan korektif.

Tabel L14.5 Kerangka penilaian terpadu kawasan PLTP

Lapis analisis	Fokus kerja	Keluaran
Sistem geologi dan panas bumi	Litologi, struktur geologi, zona alterasi, manifestasi panas bumi, reservoir, batuan penudung, dan area operasi.	Model geologi-panas bumi dan peta zona kehati-hatian.
Hidrogeologi dangkal dan sumber air masyarakat	Akuifer dangkal, mata air, sumur, air permukaan, imbuhan, lepasan, MAT, kualitas air, dan penggunaan air.	Peta sumber air, baseline, model konseptual hidrogeologi, dan titik pantau.
Bahaya geologi dan geologi teknik	Gerakan tanah, gunung api, gempa, sesar aktif, erosi, gas alami, kestabilan lereng, dan daya dukung tanah/batuan.	Peta pembatas, syarat mitigasi, dan rekomendasi investigasi rinci.
Kesesuaian kawasan dan tapak	Tapak sumur, jalur pipa, pembangkit, jalan akses, jaringan transmisi, fasilitas pendukung, dan zona penyangga.	Kelas kesesuaian, faktor penyisih, syarat teknis, dan arahan ruang.
Pemantauan partisipatif dan tindak lanjut	Debit, MAT, kualitas lapangan, kimia air, isotop bila diperlukan, curah hujan, keluhan, dan forum data.	Status indikasi perubahan, laporan berkala, tindakan korektif, dan basis data.

IV. DATA MINIMUM, SUMBER DATA, DAN METADATA

Data minimum KGL PLTP harus mencakup aspek geologi, panas bumi, hidrogeologi, air masyarakat, geologi teknik, bahaya geologi, tata ruang, lingkungan hidup, sosial-air, dan data kegiatan PLTP. Setiap data harus memiliki metadata yang menjelaskan sumber, tahun, skala, metode, penyusun, dan batas penggunaannya.

Tabel L14.6 Data minimum KGL dan pemantauan PLTP.

Kelompok data	Data minimum	Catatan penggunaan
Geologi dan struktur	Peta geologi, struktur geologi, sesar, rekahan, zona alterasi, geomorfologi, dan manifestasi panas bumi.	Menjadi dasar model konseptual dan zona kehati-hatian.
Panas bumi	Wilayah kerja, area prospek, sumur produksi/injeksi, jalur pipa, fasilitas pembangkit, data tekanan dan temperatur yang dapat dibuka sesuai ketentuan.	Mendukung penilaian hubungan kegiatan dengan perubahan lingkungan.
Hidrogeologi	Akuifer, daerah imbuhan, daerah lepasan, mata air, sumur penduduk, MAT, arah aliran, kualitas air, dan kerentanan air tanah.	Menjadi dasar perlindungan air masyarakat dan sidik jari air.
Bahaya geologi	KRB gunung api, gerakan tanah, gempa, sesar aktif, erosi, gas alami, dan bahaya lain yang relevan.	Menentukan faktor pembatas, faktor penyisih, dan mitigasi.
Geologi teknik	Daya dukung tanah/batuan, kestabilan lereng, tanah lunak, potensi amblesan, dan kondisi fondasi.	Diperlukan untuk tapak sumur, pipa, pembangkit, dan jalan akses.
Tata ruang dan lingkungan	RTRW/RDTR, kawasan lindung, dokumen lingkungan, penggunaan lahan, kawasan hutan, dan status penguasaan lahan.	Menentukan kesesuaian kebijakan dan syarat pemanfaatan.
Sosial-air	Pengguna air, sumber air prioritas, persepsi perubahan, sejarah keluhan, dan pola pemakaian air.	Menjadi dasar pemilihan titik pantau partisipatif.
Meteorologi	Curah hujan, musim, suhu udara, dan data iklim lokal.	Membedakan variasi musiman dari perubahan lokal.

V. TAHAPAN PELAKSANAAN TERPADU

Tahapan pelaksanaan terpadu disusun sebagai siklus kerja. Program tidak berhenti setelah peta dan laporan disusun, tetapi berlanjut ke baseline, pemantauan berkala, interpretasi, forum data, dan tindakan korektif. Siklus ini memungkinkan perubahan yang terjadi selama konstruksi atau operasi dikenali lebih dini.

Tabel L14.7 Tahapan pelaksanaan terpadu.

Tahap	Tujuan	Keluaran minimum
1. Penapisan regional	Mengenali kesesuaian awal kawasan PLTP berdasarkan data regional.	Peta indikatif, daftar pembatas, dan kebutuhan kajian rinci.
2. Pemetaan sumber air	Mengenali sumber air yang penting bagi masyarakat dan titik pembanding.	Peta sumber air dan daftar titik prioritas.
3. Penyusunan model konseptual	Menjelaskan hubungan air hujan, akuifer dangkal, mata air, struktur geologi, manifestasi panas bumi, dan fasilitas PLTP.	Model konseptual geologi-hidrogeologi yang dapat dipahami masyarakat.
4. Analisis tapak dan prasarana	Menilai tapak sumur, jalur pipa, fasilitas pembangkit, jalan akses, dan zona penyangga.	Kelas kesesuaian, faktor pembatas, faktor penyisih, dan syarat teknis.

Tahap	Tujuan	Keluaran minimum
5. Baseline	Merekam kondisi sebelum kegiatan utama atau sebelum perubahan yang dikhawatirkan.	Data awal multi-musim, termasuk debit, MAT, kualitas air, hujan, dan penggunaan air.
6. Pemantauan berkala	Mengikuti perubahan debit, MAT, kualitas air, dan kondisi kegiatan.	Rangkaian data bulanan atau sesuai risiko.
7. Analisis sidik jari air	Membedakan karakter air dan menilai indikasi percampuran atau perubahan.	Grafik, tabel perbandingan, interpretasi teknis, dan status indikasi.
8. Forum data dan tindak lanjut	Menyampaikan hasil secara terbuka, menerima klarifikasi, dan menetapkan respons.	Berita acara, rencana tindak lanjut, audit, perlindungan mata air, atau tindakan korektif.

VI. DESAIN TITIK PANTAU DAN BASELINE

A. Prinsip Pemilihan Titik Pantau

Titik pantau dipilih untuk mewakili sumber air masyarakat, titik pembanding alami, titik yang berpotensi terpengaruh kegiatan, dan titik kontrol di luar area pengaruh langsung. Desain titik pantau harus disepakati dalam forum awal agar masyarakat memahami mengapa titik tertentu dipilih dan mengapa titik lain tidak dijadikan prioritas.

Tabel L14.8 Jenis titik pantau dan fungsi interpretasinya.

Jenis titik	Contoh	Fungsi interpretasi
Mata air masyarakat	Mata air desa, sumber irigasi, sumber air bak penampung.	Menilai perubahan debit dan kualitas air yang langsung dirasakan masyarakat.
Sumur penduduk terpilih	Sumur gali atau sumur bor masyarakat yang digunakan rutin.	Menilai MAT dan kualitas air tanah dangkal.
Sungai atau saluran alami	Sungai kecil, aliran lereng, air permukaan sekitar.	Pembanding hubungan air permukaan dan respons hujan.
Air hujan	Penakar hujan dan contoh air hujan musiman.	Pembanding komposisi imbuhan dan variasi musim.
Manifestasi panas bumi	Mata air panas, uap, atau air termal yang aman diakses.	Pembanding ciri air/fluida termal.
Titik kontrol	Sumber air di luar area pengaruh langsung.	Membedakan perubahan regional/musiman dari perubahan lokal.

B. Baseline

Baseline harus disusun sebelum konstruksi besar atau sebelum operasi yang dapat menimbulkan kekhawatiran. Baseline ideal mencakup minimal satu siklus musim, tetapi untuk lokasi berkonflik tinggi dianjurkan lebih panjang. Apabila kegiatan sudah berjalan, baseline retrospektif dapat disusun dari data historis, catatan masyarakat, data hujan, data dokumen lingkungan, dan pengukuran awal yang dilakukan sesegera mungkin.

Tabel L14.9 Kebutuhan baseline minimum.

Komponen baseline	Data minimum	Frekuensi awal yang disarankan
Debit mata air	Debit sesaat dengan metode yang sama, catatan penggunaan, foto titik ukur.	Bulanan; dua mingguan pada musim kering atau lokasi sensitif.
MAT	Kedalaman muka air pada sumur pantau/sumur terpilih dan elevasi titik ukur.	Bulanan; lebih rapat jika ada keluhan.

Komponen baseline	Data minimum	Frekuensi awal yang disarankan
Kualitas lapangan	Suhu, pH, EC, TDS, kekeruhan sederhana, bau atau indikasi visual.	Bersamaan dengan pengukuran debit/MAT.
Kualitas laboratorium	Ion utama, parameter penanda, dan isotop bila diperlukan.	Per musim atau semester; lebih rapat pada lokasi prioritas.
Curah hujan	Hujan harian dari penakar lokal atau stasiun terdekat.	Harian bila memungkinkan.
Penggunaan air	Jumlah pengguna, jenis penggunaan, musim kebutuhan tinggi, penambahan sumur atau pompa.	Triwulanan atau saat perubahan penting.
Perubahan lahan	Pembukaan lahan, jalan, drainase, fasilitas, area kedap air.	Triwulanan dan setelah kegiatan konstruksi besar.

VII. PARAMETER TEKNIS DAN SIDIK JARI AIR

Parameter pemantauan dibagi menjadi parameter lapangan, parameter laboratorium, parameter hidrometeorologi, parameter kegiatan, dan parameter sosial-pemanfaatan air. Pembagian ini penting karena perubahan debit atau MAT jarang dapat dijelaskan dari satu data saja.

Tabel L14.10 Parameter lapangan minimum.

Parameter	Alat/metode	Makna praktis	Frekuensi
Debit mata air	Ember ukur dan stopwatch, pelimpah sederhana, current meter kecil, atau metode lain yang konsisten.	Menilai perubahan pasokan air masyarakat.	Bulanan; lebih rapat pada musim kering.
MAT	Water level meter atau pita ukur sesuai kondisi sumur.	Menilai perubahan air tanah dangkal.	Bulanan.
Suhu	Termometer lapangan atau multiparameter meter.	Membedakan air dingin, hangat, termal, dan perubahan lokal.	Setiap kunjungan.
pH	pH meter terkalibrasi.	Menilai sifat asam-basa dan perubahan kualitas.	Setiap kunjungan.
EC	Conductivity meter terkalibrasi.	Indikator kandungan ion terlarut.	Setiap kunjungan.
TDS	Meter lapangan atau konversi dari EC.	Indikator zat terlarut total.	Setiap kunjungan.
Catatan visual	Foto tetap, bau, warna, endapan, perubahan sekitar titik.	Merekam perubahan yang dapat dilihat masyarakat.	Setiap kunjungan.

Tabel L14.11 Parameter laboratorium yang disarankan.

Kelompok parameter	Parameter	Kegunaan
Ion utama	Na, K, Ca, Mg, Cl, SO4, HCO3.	Membedakan tipe air dan proses geokimia.
Parameter penanda termal	Silika, boron, litium, fluorida, arsen bila relevan.	Mendukung identifikasi pengaruh air/fluida termal pada beberapa sistem.
Kualitas dasar	Fe, Mn, NO3, NH4, COD/BOD bila relevan, mikrobiologi untuk air konsumsi.	Membedakan pengaruh geologi dari sumber pencemar domestik atau kegiatan lain.
Isotop stabil	$\delta^{18}O$ dan $\delta^{2}H$.	Menilai asal air, elevasi imbuhan, dan kemungkinan percampuran.
Tritium	Tritium.	Menilai air relatif muda atau lama, terutama pada kasus penting.

Tabel L14.12 Parameter penjelas sebab-akibat.

Parameter penjelas	Mengapa penting	Sumber data
Curah hujan	Debit dan MAT sering berubah mengikuti imbuhan musiman.	Penakar lokal, BMKG, stasiun proyek.
Tahap kegiatan PLTP	Perubahan perlu dibandingkan dengan eksplorasi, konstruksi, pengeboran, operasi, dan injeksi.	Log kegiatan pengembang.
Perubahan penggunaan lahan	Pembangunan jalan dan fasilitas dapat mengubah limpasan dan imbuhan lokal.	Citra, survei lapangan, laporan konstruksi.
Penggunaan air masyarakat	Penambahan pompa atau kebutuhan air dapat menurunkan MAT lokal.	Survei sosial-teknis dan catatan desa.
Kegiatan lain	Pertanian, peternakan, pariwisata, pertambangan, industri lokal.	Pemerintah desa/daerah dan observasi lapangan.

VIII. PROTOKOL PENGUKURAN DAN PENGAMBILAN CONTOH AIR

Sebelum pengukuran lapangan, tim harus memastikan daftar titik, alat, lembar data, botol contoh, label, rantai kendali contoh, alat pelindung diri, dan jadwal komunikasi dengan masyarakat telah siap. Semua alat ukur lapangan harus dikalibrasi atau diperiksa dengan larutan standar sesuai petunjuk alat.

Pengukuran debit mata air harus menggunakan metode yang sama pada titik yang sama agar data dapat dibandingkan. Pengukuran MAT harus menggunakan titik acuan tetap, mencatat apakah sumur sedang dipompa, dan tidak menyimpulkan tren dari satu kali pengukuran. Pengambilan contoh air harus mengikuti prinsip representatif, bersih, berlabel jelas, dan terdokumentasi.

Tabel L14.13 Format kode contoh air.

Unsur kode	Contoh	Keterangan
Jenis titik	MA, SM, SG, AH, MP, TK	MA: mata air; SM: sumur; SG: sungai; AH: air hujan; MP: manifestasi panas bumi; TK: titik kontrol.
Nomor titik	01, 02, 03	Nomor tetap untuk setiap titik.
Tanggal	2026-05-05	Tanggal pengambilan contoh.
Putaran	P1, P2, P3	Putaran pemantauan.
Contoh lengkap	MA-01-2026-05-05-P1	Contoh dari mata air nomor 01 pada putaran pertama.

IX. ANALISIS, INDIKASI PERUBAHAN, DAN TELAAH SEBAB-AKIBAT

Analisis data dilakukan bertahap dari data lapangan sederhana menuju interpretasi hidrogeologi dan geokimia. Tujuan analisis bukan mencari satu penyebab tunggal secara tergesa-gesa, melainkan menyusun bukti yang dapat membedakan variasi alami, perubahan penggunaan lahan, pemanfaatan air, dan potensi pengaruh kegiatan PLTP.

Tabel L14.14 Analisis minimum dan bentuk penyajian

Analisis	Data yang digunakan	Bentuk penyajian untuk masyarakat
Debit vs curah hujan	Debit mata air dan hujan.	Grafik debit dan hujan per bulan.
MAT vs curah hujan	MAT dan hujan.	Grafik MAT dan hujan per bulan.

Analisis	Data yang digunakan	Bentuk penyajian untuk masyarakat
Kualitas air lapangan	Suhu, pH, EC, TDS.	Tabel perbandingan antar titik dan grafik sederhana.
Tipe air	Ion utama.	Diagram atau tabel tipe air yang disederhanakan.
Indikasi termal	Suhu, silika, boron, fluorida, klorida, sulfat.	Ringkasan apakah air masyarakat mendekati atau berbeda dari air termal.
Isotop	$\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, tritium bila tersedia.	Penjelasan asal dan kemungkinan percampuran dengan ilustrasi sederhana.
Telaah kegiatan	Tahap PLTP, konstruksi, penggunaan air, perubahan lahan.	Kronologi peristiwa dan data air.

Tabel L14.15 Status indikasi perubahan.

Status	Kondisi data	Tindak lanjut
Normal	Debit, MAT, dan kualitas air berada dalam kisaran baseline dan mengikuti pola musim.	Pemantauan rutin dilanjutkan.
Perlu perhatian	Terdapat perubahan kecil atau keluhan awal, tetapi masih dapat dijelaskan oleh musim atau penggunaan air.	Pengukuran dipercepat dan komunikasi diperkuat.
Waspada	Perubahan melebihi kisaran baseline atau berbeda dari titik kontrol, tetapi penyebab belum jelas.	Telaah sebab-akibat, verifikasi lapangan, dan analisis tambahan.
Perlu evaluasi rinci	Perubahan konsisten, tidak sesuai pola musim, dan berkorelasi dengan kegiatan tertentu.	Audit hidrogeologi, penambahan titik pantau, dan evaluasi pengelolaan.
Tindakan korektif	Terdapat bukti memadai bahwa kegiatan berkontribusi terhadap perubahan yang merugikan masyarakat.	Perbaikan pengelolaan, perlindungan sumber air, air alternatif, dan pemantauan intensif.

Tabel L14.16 Matriks telaah sebab-akibat

Kemungkinan penyebab	Indikator pendukung	Data pembeda
Musim/iklim	Debit turun saat kemarau dan pulih setelah hujan.	Curah hujan lokal, titik kontrol, data beberapa musim.
Perubahan penggunaan lahan	Perubahan mulai setelah pembukaan area, jalan, atau perubahan drainase.	Peta perubahan lahan, foto lapangan, catatan konstruksi.
Peningkatan pemakaian air	MAT turun pada sumur dengan pompa lebih intensif atau pengguna bertambah.	Survei pemakaian air, data pompa, jumlah pengguna.
Gangguan lokal sumber air	Titik mata air tertutup sedimen, rusak, atau alirannya dialihkan.	Inspeksi titik, dokumentasi foto, keterangan warga.
Indikasi pengaruh PLTP	Perubahan terjadi setelah tahap tertentu, tidak mengikuti titik kontrol, dan didukung perubahan sidik jari air.	Log kegiatan, data kimia/isotop, MAT, debit, audit teknis.
Campuran beberapa faktor	Perubahan tidak dapat dijelaskan oleh satu faktor.	Analisis terpadu dan pemantauan tambahan.

X. KELAS KESESUAIAN, REKOMENDASI TEKNIS, DAN TINDAKAN KOREKTIF

Kelas kesesuaian kawasan PLTP harus disusun dengan mempertimbangkan kesesuaian geologi, hidrogeologi, bahaya geologi, fungsi air masyarakat, tata ruang, dan kesiapan pemantauan. Kelas kesesuaian tidak boleh hanya menilai potensi energi, tetapi harus menilai apakah kegiatan dapat

dilakukan dalam batas daya dukung, daya tampung, dan risiko yang dapat dikelola.

Tabel L14.17 Kelas kesesuaian kawasan PLTP dalam KGL.

Kelas	Makna KGL	Implikasi rekomendasi
Sesuai	Pembatas geologi rendah dan sumber air masyarakat dapat dilindungi dengan syarat umum.	Kegiatan dapat diproses dengan rencana pengelolaan dan pemantauan rutin.
Sesuai bersyarat	Kegiatan masih dapat dilakukan, tetapi terdapat pembatas air, lereng, bahaya, tata ruang, atau sosial yang harus dikelola.	Wajib syarat teknis, baseline, pemantauan partisipatif, dan validasi berkala.
Terbatas	Pembatas cukup kuat sehingga kegiatan hanya dapat dilakukan pada area dan intensitas tertentu.	Perlu pembatasan tapak, zona penyangga, kajian rinci, dan tindakan pengendalian khusus.
Tidak direkomendasikan	Terdapat faktor penyisih, sumber air penting yang tidak dapat dilindungi, bahaya tinggi, atau konflik ruang yang tidak dapat dimitigasi.	Kegiatan diarahkan ke lokasi alternatif atau rencana perlu diubah mendasar.
Memerlukan kajian rinci	Data belum cukup untuk keputusan final.	Keputusan ditunda sampai kajian hidrogeologi, geologi teknik, bahaya, atau sidik jari air selesai.

Rekomendasi teknis KGL untuk kawasan PLTP harus memuat arahan kesesuaian kawasan, syarat perlindungan mata air, syarat pemantauan sumur penduduk, perlindungan daerah imbuhan, pengendalian drainase, stabilitas lereng, pengelolaan fluida, evaluasi injeksi kembali, zona penyangga, komunikasi risiko, dan kebutuhan kajian lanjutan. Rekomendasi harus dapat ditelusuri ke parameter dan dapat dipantau.

Tabel L14.18 Pilihan tindakan korektif.

Pilihan tindakan korektif	Kondisi pemicu	Catatan pelaksanaan
Pemantauan intensif	Perubahan debit/MAT mulai melebihi kisaran baseline atau muncul keluhan penting.	Tambah frekuensi dan titik pembanding.
Audit hidrogeologi independen	Perubahan konsisten dan penyebab belum jelas.	Melibatkan ahli hidrogeologi, panas bumi, dan geologi lingkungan.
Perlindungan mata air prioritas	Sumber air masyarakat berpotensi terganggu.	Penataan area sekitar mata air, pengendalian aktivitas, dan pemulihan fungsi imbuhan.
Evaluasi tata air permukaan	Perubahan muncul setelah jalan, drainase, atau area kerja dibangun.	Perbaiki saluran, resapan lokal, dan limpasan.
Evaluasi integritas sumur dan fluida	Indikasi mengarah ke aspek teknis PLTP.	Memeriksa konstruksi sumur, casing, penyemenan, dan pengelolaan fluida.
Evaluasi pola injeksi kembali	Ada indikasi perubahan tekanan atau pola aliran yang relevan.	Didasarkan pada kajian reservoir dan geologi lingkungan.
Penyediaan air alternatif	Sumber air masyarakat terdampak dan pemulihan memerlukan waktu.	Dilakukan sebagai tindakan sosial-teknis sementara atau permanen sesuai hasil kajian.

XI. KOMUNIKASI PUBLIK DAN FORUM DATA

Komunikasi publik harus berbasis data yang dapat dipahami. Forum data bukan kegiatan seremonial, melainkan ruang membaca hasil pemantauan, mendengar

penjelasan masyarakat, dan menyepakati tindak lanjut. Forum data harus menghindari bahasa yang defensif dan tidak menyederhanakan persoalan teknis.

Tabel L14.19 Format komunikasi hasil.

Bentuk komunikasi	Isi yang disampaikan	Catatan
Papan data desa	Grafik debit, MAT, hujan, dan kualitas lapangan.	Gunakan bahasa sederhana dan satuan yang jelas.
Lembar ringkas triwulanan	Status titik pantau, perubahan penting, tindak lanjut.	Dibagikan kepada masyarakat dan pemerintah desa.
Forum data semesteran	Penjelasan teknis lebih lengkap dan diskusi keluhan.	Hadirkan tim teknis, pengembang, pemda, dan perwakilan warga.
Laporan teknis tahunan	Data lengkap, interpretasi, QA/QC, rekomendasi.	Untuk regulator, pengembang, dan arsip kelembagaan.
Kunjungan lapangan bersama	Pengecekan sumber air yang dikeluhkan.	Membantu mengurangi jarak antara data teknis dan pengalaman warga.

Kalimat komunikasi yang disarankan: "Kita tidak menyimpulkan dari dugaan. Kita ukur bersama, bandingkan dengan baseline, lihat musim dan titik kontrol, lalu tentukan apakah perubahan masih wajar, perlu perhatian, atau memerlukan tindakan korektif."

XII. MEKANISME KELUHAN, PELAPORAN, VALIDASI, DAN SISTEM INFORMASI

Keluhan masyarakat harus diterima sebagai data awal yang perlu diverifikasi. Mekanisme keluhan yang baik membuat masyarakat tidak perlu menyampaikan masalah melalui konflik terbuka, sementara pengembang dan pemerintah memperoleh informasi dini mengenai potensi perubahan.

Tabel L14.20 Alur penanganan keluhan.

Tahap	Batas waktu disarankan	Keluaran
Penerimaan keluhan	Hari yang sama.	Nomor registrasi, lokasi, nama pelapor, jenis keluhan.
Verifikasi awal	1-3 hari kerja.	Pemeriksaan titik, foto, pengukuran lapangan awal.
Pembandingan data	Maksimal 7 hari kerja.	Perbandingan dengan baseline, hujan, titik kontrol, dan kegiatan.
Forum klarifikasi	Maksimal 14 hari kerja untuk keluhan penting.	Penjelasan hasil awal dan rencana tindak lanjut.
Evaluasi rinci	Sesuai kompleksitas.	Analisis tambahan, laboratorium, audit bila perlu.
Tindakan korektif	Segera setelah bukti cukup.	Perbaikan pengelolaan, air alternatif, perlindungan sumber air, atau tindakan lain.

Pelaporan program harus memisahkan antara data mentah, data terverifikasi, interpretasi teknis, dan rekomendasi. Pemisahan ini penting agar pembaca dapat membedakan fakta pengukuran dari penafsiran. Seluruh data harus memiliki metadata: lokasi, tanggal, metode, alat, operator, kondisi cuaca, dan catatan mutu.

Tabel L14.21 Jenis laporan.

Jenis laporan	Periode	Isi minimum
Catatan lapangan	Setiap kunjungan.	Formulir titik, pengukuran, foto, catatan warga, kondisi alat.
Laporan bulanan	Bulanan.	Ringkasan debit, MAT, kualitas lapangan, hujan, keluhan, dan tindak lanjut.

Jenis laporan	Periode	Isi minimum
Laporan triwulanan untuk masyarakat	Triwulanan.	Grafik sederhana, status titik, pertanyaan warga, rencana berikutnya.
Laporan semesteran teknis	Semesteran.	Analisis laboratorium, interpretasi, pembandingan titik kontrol, dan status indikasi.
Laporan tahunan	Tahunan.	Evaluasi baseline, tren, validasi, rekomendasi pengelolaan, dan pemutakhiran model konseptual.

Validasi dilakukan pada tiga tingkat. Tingkat pertama adalah validasi lapangan, yaitu pemeriksaan apakah titik, alat, metode, dan pencatatan sudah benar. Tingkat kedua adalah validasi laboratorium, yaitu pemeriksaan kelengkapan contoh, rantai kendali, blanko, duplikat, dan kewajaran hasil. Tingkat ketiga adalah validasi interpretasi, yaitu pemeriksaan apakah kesimpulan sesuai data, skala, geologi setempat, dan batas ketidakpastian.

Data program perlu dikelola dalam sistem informasi yang memuat titik pantau, hasil pengukuran, dokumen foto, data laboratorium, grafik, berita acara forum, keluhan, dan tindak lanjut. Sebagian informasi dapat dibuka untuk publik, sedangkan informasi yang sensitif dapat dibatasi sesuai aturan. Sistem informasi harus dirancang agar data dapat dibandingkan lintas waktu.

XIII. DAFTAR PERIKSA MUTU

Tabel L14.22 Daftar periksa mutu perencanaan program.

No.	Pertanyaan pemeriksaan perencanaan program	Ya/Tidak/Catatan
1	Apakah tujuan program dan area kerja sudah disepakati?	
2	Apakah masyarakat telah dilibatkan dalam identifikasi sumber air?	
3	Apakah titik kontrol telah dipilih?	
4	Apakah baseline mencakup debit, MAT, kualitas air, hujan, dan penggunaan air?	
5	Apakah protokol pengukuran dan pengambilan contoh telah ditulis?	
6	Apakah laboratorium dan parameter analisis telah ditentukan?	
7	Apakah mekanisme forum data telah disepakati?	
8	Apakah mekanisme keluhan dan tindak lanjut telah tersedia?	

Tabel L14.23 Daftar periksa mutu data lapangan.

No.	Pertanyaan pemeriksaan data lapangan	Ya/Tidak/Catatan
1	Apakah kode titik dan koordinat tercatat benar?	
2	Apakah alat ukur telah dikalibrasi atau diperiksa?	
3	Apakah debit atau MAT diukur dengan metode yang sama seperti periode sebelumnya?	
4	Apakah kondisi cuaca dan hujan sebelumnya dicatat?	
5	Apakah penggunaan air saat pengukuran dicatat?	
6	Apakah foto titik dan catatan lapangan tersimpan?	
7	Apakah contoh air diberi label sesuai formulir?	

No.	Pertanyaan pemeriksaan data lapangan	Ya/Tidak/Catatan
8	Apakah penyimpangan prosedur dicatat?	

Tabel L14.24 Daftar periksa mutu interpretasi.

No.	Pertanyaan pemeriksaan interpretasi	Ya/Tidak/Catatan
1	Apakah kesimpulan menggunakan lebih dari satu parameter?	
2	Apakah perubahan dibandingkan dengan baseline dan titik kontrol?	
3	Apakah curah hujan dan musim diperhitungkan?	
4	Apakah penggunaan air masyarakat diperhitungkan?	
5	Apakah tahap kegiatan PLTP diperiksa dalam kronologi?	
6	Apakah keterbatasan data dinyatakan jelas?	
7	Apakah status indikasi perubahan ditetapkan secara proporsional?	
8	Apakah rekomendasi tindak lanjut dapat dilaksanakan dan dipantau?	

XIV. FORMULIR KERJA

Tabel L14.25. Formulir Inventarisasi sumber air masyarakat.

Isian	Keterangan
Kode titik	
Nama lokal sumber air	
Jenis sumber air	Mata air/sumur/sungai/air hujan/manifestasi panas bumi/titik kontrol
Koordinat dan elevasi	
Pemanfaatan utama	Air minum/rumah tangga/irigasi/peternakan/lainnya
Jumlah pengguna atau wilayah layanan	
Riwayat perubahan menurut masyarakat	
Kondisi sekitar titik	
Foto dan sketsa lokasi	
Nama pencatat dan tanggal	

Tabel L14.26. Formulir Pengukuran berkala.

Parameter	Hasil	Satuan/Catatan
Kode titik		
Tanggal dan jam		
Nama pengukur		
Cuaca saat pengukuran		
Hujan 24-72 jam sebelumnya		
Debit mata air		L/detik atau satuan lain
Kedalaman MAT		m dari titik acuan

Parameter	Hasil	Satuan/Catatan
Suhu		°C
pH		
EC		µS/cm
TDS		mg/L
Kondisi visual		
Catatan masyarakat		
Foto titik		

Tabel L14.27. Formulir Rantai kendali contoh air.

Isian	Keterangan
Kode contoh	
Kode titik	
Jenis contoh	Kimia umum/isotop/parameter khusus
Tanggal dan jam pengambilan	
Nama pengambil	
Jenis botol/pengawet	
Suhu contoh saat diterima lab	
Laboratorium penerima	
Tanggal diterima	
Tanda tangan penyerahan/penerimaan	

Tabel L14.28. Formulir Registrasi keluhan sumber air.

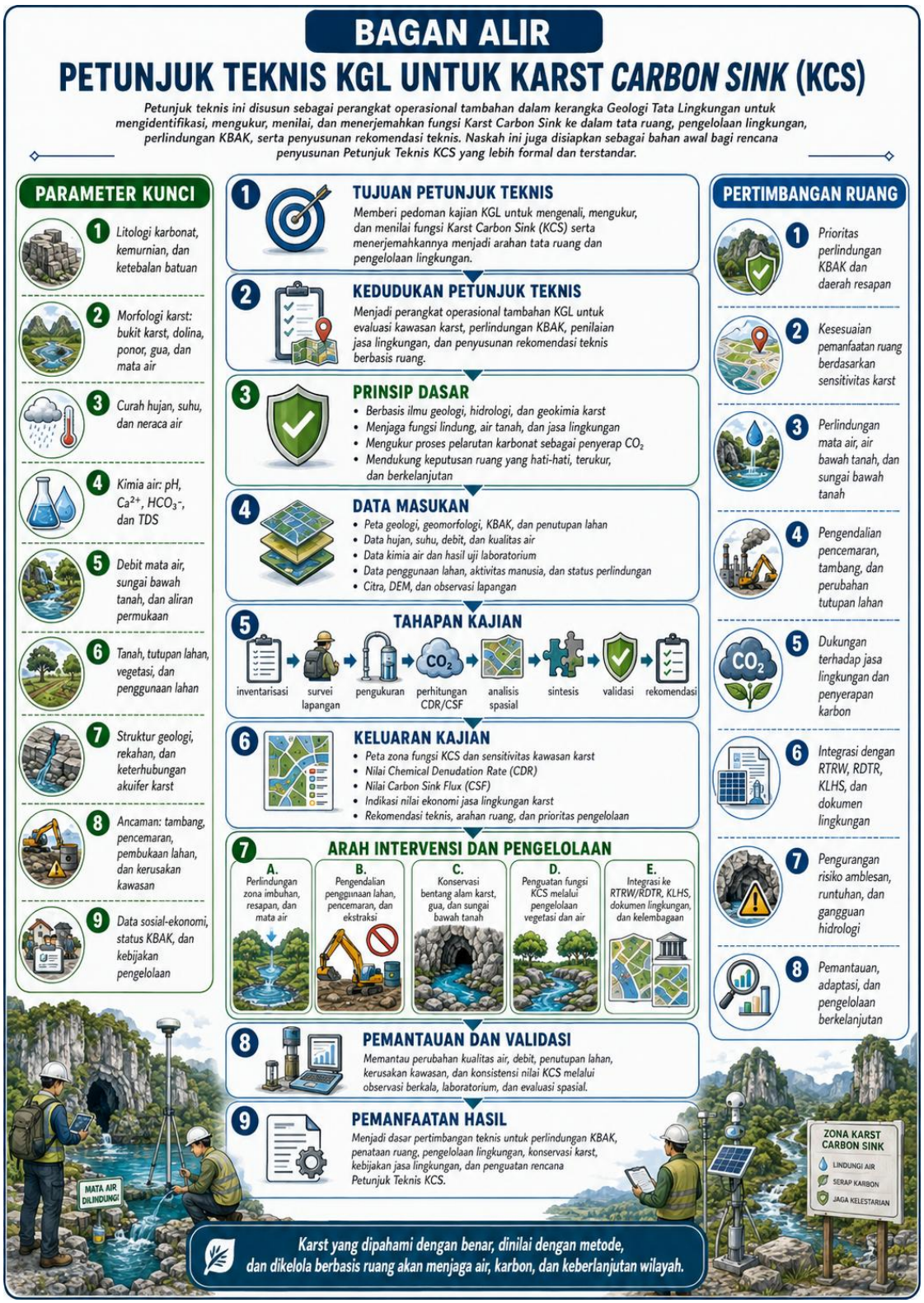
Isian	Keterangan
Nomor keluhan	
Nama pelapor/perwakilan	
Desa/lokasi	
Sumber air yang dikeluhkan	
Jenis keluhan	Debit turun/MAT turun/kualitas berubah/air keruh/bau/lainnya
Tanggal mulai dirasakan	
Kondisi sebelum perubahan	
Dokumentasi pendukung	Foto, video, catatan, saksi
Tindak lanjut awal	
Status akhir	

Tabel L14.29. Formulir Berita acara forum data.

Isian	Keterangan
Tanggal dan tempat	
Peserta utama	
Data yang dipaparkan	
Pertanyaan masyarakat	
Jawaban/tanggapan teknis	
Poin yang belum terjawab	
Rencana tindak lanjut	
Penanggung jawab	
Waktu penyelesaian	
Tanda tangan perwakilan	

XV. PENUTUP

Petunjuk Teknis Terpadu ini menjadi acuan untuk memastikan bahwa pengelolaan kawasan PLTP tidak hanya berorientasi pada pemanfaatan energi, tetapi juga pada perlindungan air tanah, mata air, keselamatan geologi, keterbukaan data, dan penerimaan sosial. Dengan memadukan KGL kawasan PLTP dan Program Pemantauan Partisipatif Sidik Jari Air, pengembangan PLTP dapat bergerak dari perdebatan persepsi menuju pembuktian, pengelolaan, dan akuntabilitas.



Gambar L15.1. Bagan Alir Petunjuk teknis KGL untuk KCS

Lampiran 15:

Petunjuk Teknis KGL untuk Karst Carbon Sink

Petunjuk teknis ini disusun sebagai perangkat operasional tambahan dalam kerangka Geologi Tata Lingkungan untuk mengidentifikasi, mengukur, menilai, dan menerjemahkan fungsi Karst Carbon Sink (KCS) ke dalam tata ruang, pengelolaan lingkungan, perlindungan KBAK, serta penyusunan rekomendasi teknis. Naskah ini juga disiapkan sebagai bahan awal bagi rencana penyusunan Petunjuk Teknis KCS yang lebih formal dan terstandar.

Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Lampiran ini merupakan pengembangan dari pembahasan mengenai kawasan lindung geologi, geowisata, air tanah, zona resapan, dan keekonomian geologi lingkungan. KCS ditempatkan sebagai contoh jasa lingkungan geologi yang dapat dikuantifikasi melalui pendekatan hidrogeokimia dan dihubungkan dengan nilai ekonomi karbon, perlindungan fungsi karst, serta pengendalian pemanfaatan ruang.

Daftar periksa awal pembaca

- Apakah kawasan yang dikaji berada pada atau berhubungan dengan KBAK, kawasan karst, mata air karst, atau sistem hidrogeologi karbonat?
- Apakah tersedia peta geologi, peta hidrogeologi, peta KBAK, data mata air, data penggunaan lahan, dan rencana tata ruang?
- Apakah tersedia data debit, pH, suhu, konduktivitas listrik, TDS, kesadahan, Ca2+, HCO3-, serta data pendukung kualitas air?
- Apakah tujuan kajian diarahkan untuk pemetaan fungsi KCS, valuasi ekonomi karbon, perlindungan karst, atau penyusunan rekomendasi tata ruang?
- Apakah hasil kajian akan dipakai untuk RTRW, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, pengelolaan KBAK, Geopark, atau pertimbangan teknis GTL?

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

1.1. kedudukan Petunjuk Teknis

Petunjuk Teknis Kajian Geologi Lingkungan untuk Karst Carbon Sink (KCS) disusun sebagai acuan kerja dalam melakukan inventarisasi, pengukuran, analisis, evaluasi, dan penyusunan rekomendasi terhadap fungsi penyerapan karbon pada sistem karst. Dalam kerangka GTL, KCS tidak diperlakukan sebagai isu karbon yang berdiri sendiri, tetapi sebagai bagian dari fungsi lingkungan geologi yang terkait dengan batuan karbonat, air tanah, mata air, proses pelarutan, tata ruang, perlindungan KBAK, dan pengelolaan lingkungan.

Petunjuk teknis ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan pedoman konservasi karbon, kebijakan perdagangan karbon, atau pengaturan pengelolaan sumber daya air. Petunjuk ini memberi kerangka geologi lingkungan untuk menilai bagaimana proses karst menyerap karbon melalui interaksi antara air, CO2, tanah, vegetasi, batuan karbonat, dan aliran air tanah. Hasilnya digunakan untuk memperkuat keputusan ruang dan pengelolaan kawasan, terutama pada kawasan karst yang memiliki fungsi air tanah, nilai geologi, serta potensi jasa lingkungan.

Dalam konteks tata ruang, informasi KCS dapat menjadi dasar tambahan untuk menentukan prioritas perlindungan KBAK, pengendalian perubahan penggunaan lahan, pengaturan kegiatan budidaya, pemantauan

mata air, serta penguatan argumen keekonomian geologi lingkungan. KCS juga dapat memperkaya dokumen KLHS dan dokumen lingkungan karena menunjukkan bahwa karst tidak hanya bernilai dari sisi air tanah dan geowisata, tetapi juga dari fungsi karbon yang dapat dinilai secara kuantitatif.

1.2 Maksud

Petunjuk teknis ini dimaksudkan sebagai pedoman bagi unit teknis geologi, pemerintah daerah, penyusun kajian, perguruan tinggi, konsultan, pengelola kawasan, dan pemangku kepentingan dalam menyusun kajian KCS secara terukur, dapat diverifikasi, dan dapat dihubungkan dengan tata ruang serta pengelolaan lingkungan.

1.3 Tujuan

Tujuan petunjuk teknis ini adalah:

- mengidentifikasi kawasan karst yang memiliki potensi fungsi KCS berdasarkan kondisi geologi, hidrogeologi, mata air, dan tutupan lahan;
- menentukan data minimum dan parameter pengukuran untuk kuantifikasi KCS;
- menghitung laju denudasi kimiawi atau Chemical Denudation Rate (CDR) sebagai indikator proses pelarutan karbonat;
- menghitung Carbon Sink Flux (CSF) sebagai estimasi fluks penyerapan karbon pada sistem mata air karst;
- menilai potensi nilai ekonomi karbon secara indikatif dengan mempertimbangkan harga karbon yang digunakan dalam kebijakan atau skenario analisis;
- menyusun kelas prioritas fungsi KCS sebagai dasar perlindungan, pengendalian pemanfaatan ruang, dan pemantauan;
- menyediakan format keluaran berupa peta, tabel parameter, hasil perhitungan, rekomendasi GTL, serta daftar periksa validasi.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup petunjuk teknis ini meliputi penapisan kawasan, pengumpulan data sekunder, survei lapangan, pengukuran debit dan parameter fisika-kimia air, pengambilan sampel, analisis laboratorium, perhitungan CDR dan CSF, valuasi ekonomi karbon indikatif, klasifikasi fungsi KCS, penyusunan rekomendasi tata ruang, pengendalian pemanfaatan kawasan, pelaporan, validasi, pemantauan, dan pemutakhiran data.

1.5 Istilah Teknis

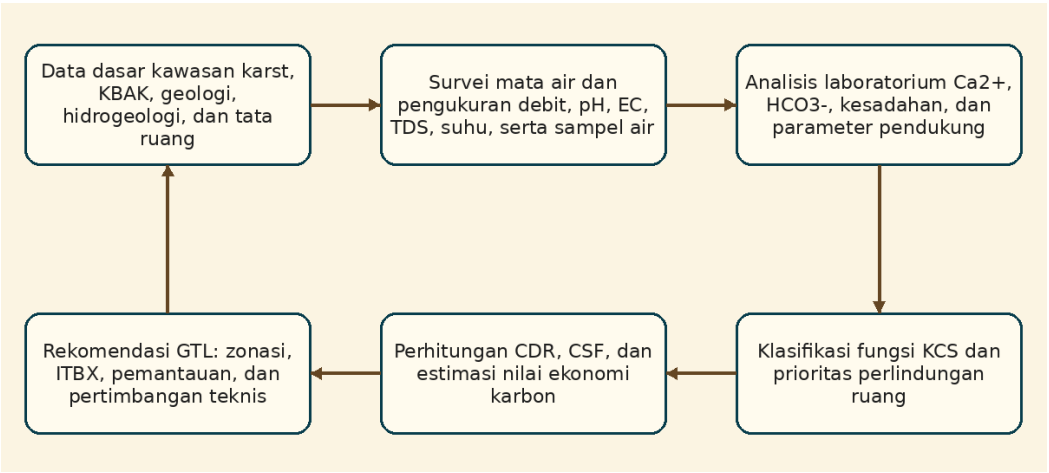
Tabel L15.1. Istilah teknis dan pengertian operasional

Istilah	Pengertian operasional dalam petunjuk teknis
Karst Carbon Sink (KCS)	Fungsi sistem karst dalam menyerap dan memindahkan karbon melalui proses pelarutan batuan karbonat yang dikontrol oleh air, CO2 tanah, batuan, dan aliran air tanah.
Chemical Denudation Rate (CDR)	Laju pelarutan kimiawi batuan karbonat yang dinyatakan sebagai ketebalan material karbonat yang terlarut per satuan waktu, umumnya dalam mm per seribu tahun.
Carbon Sink Flux (CSF)	Estimasi jumlah CO2 yang diserap atau dipindahkan oleh sistem karst dalam satuan massa per satuan waktu atau per satuan luas.
Mata air karst	Titik keluarnya air tanah dari sistem karbonat yang menjadi lokasi penting untuk pengukuran debit dan parameter hidrogeokimia.
Valuasi ekonomi karbon	Perhitungan indikatif nilai ekonomi dari fluks karbon berdasarkan harga karbon tertentu atau skenario kebijakan yang digunakan.
KBAK	Kawasan Bentang Alam Karst yang memiliki fungsi lindung, fungsi hidrogeologi, nilai geologi, serta potensi jasa lingkungan yang perlu dikelola secara hati-hati.

II. PRINSIP DAN KERANGKA ANALISIS

2.1 Prinsip Umum

- berbasis pada satuan geologi, satuan hidrogeologi, sistem mata air, dan konteks tata ruang kawasan;
- menggunakan data yang dapat ditelusuri, diukur ulang, dan diverifikasi melalui pengamatan lapangan serta analisis laboratorium;
- membedakan fungsi KCS sebagai jasa lingkungan geologi dari klaim kredit karbon yang memerlukan mekanisme kebijakan tersendiri;
- menghubungkan hasil kuantifikasi KCS dengan perlindungan KBAK, pengendalian perubahan penggunaan lahan, dan pemantauan mata air;
- mengutamakan prinsip kehati-hatian pada kawasan dengan fungsi air tanah, nilai geologi, dan kerentanan lingkungan yang tinggi;
- menempatkan hasil KCS sebagai penguat rekomendasi GTL, bukan sebagai satu-satunya dasar penetapan ruang.



Gambar L15.2. Kerangka petunjuk teknis Karst Carbon Sink dalam Geologi Tata Lingkungan.

2.2 Kerangka KCS dalam GTL

Dalam GTL, KCS ditempatkan sebagai bagian dari nilai jasa lingkungan geologi. Nilai ini lahir dari hubungan antara proses pelarutan batuan karbonat, sistem air tanah, tutupan lahan, tanah, vegetasi, mata air, dan pemanfaatan ruang. Dengan demikian, KCS bukan hanya fenomena kimia air, tetapi proses ruang yang dipengaruhi oleh kondisi geologi dan cara manusia mengelola kawasan karst.

KCS perlu dibaca bersama fungsi utama karst yang lain, yaitu fungsi air tanah, fungsi penyimpan dan pengalir air, fungsi nilai geologi, fungsi geowisata, dan fungsi perlindungan bentang alam. Jika fungsi KCS tinggi, maka kawasan tersebut memiliki argumen tambahan untuk dikelola secara lebih hati-hati karena kehilangan tutupan lahan, perubahan aliran permukaan, pencemaran, atau perubahan sistem mata air dapat menurunkan manfaat jasa lingkungan geologi.

2.3 Hubungan KCS dengan Tata Ruang dan Pengelolaan Lingkungan

Tabel L15.2. Implikasi pengelolaan dalam berbagai Aspek GTL dalam KGL KCS

Aspek GTL	Pertanyaan teknis	Keluaran KCS yang diperlukan	Implikasi pengelolaan
Tata ruang	Apakah kawasan karst perlu diprioritaskan sebagai ruang lindung atau ruang budidaya terbatas?	Peta fungsi KCS, peta mata air, kelas prioritas KCS.	Arahan pola ruang, ketentuan khusus, dan pengendalian kegiatan.

KLHS	Apakah rencana kebijakan dapat menurunkan fungsi KCS?	Analisis potensi dampak terhadap mata air, tutupan lahan, dan proses pelarutan.	Alternatif kebijakan, rekomendasi mitigasi, dan indikator pemantauan.
Dokumen lingkungan	Apakah kegiatan berpotensi mengganggu kualitas dan debit air karst?	Data baseline debit, kualitas air, CDR, CSF, dan titik pantau.	Rencana pengelolaan, rencana pemantauan, dan syarat teknis.
KBAK dan Geopark	Bagaimana KCS memperkuat nilai lindung dan edukasi kawasan?	Narasi jasa lingkungan, peta lokasi, grafik CDR-CSF, dan valuasi indikatif.	Perlindungan geosite, interpretasi publik, dan pembatasan tekanan pemanfaatan.

III DATA DAN PARAMETER

3.1. Data Minimum

Tabel L15.3. Jenis data minimum pada kelompok data utama dalam KGL KCS

Kelompok data	Jenis data minimum	Sumber data yang disarankan	Fungsi dalam analisis
Geologi	Peta geologi, litologi karbonat, struktur geologi, satuan geomorfologi.	Peta geologi, survei lapangan, citra, DEM.	Menentukan satuan analisis dan kontrol geologi terhadap sistem karst.
Hidrogeologi	Mata air, debit, arah aliran indikatif, daerah imbuhan, kualitas air.	Inventarisasi mata air, data dinas teknis, pengukuran lapangan.	Menentukan titik analisis KCS dan hubungan air tanah dengan proses pelarutan.
Hidrogeokimia	pH, suhu, EC, TDS, kesadahan, Ca2+, HCO3-, alkalinitas, parameter pendukung.	Pengukuran lapangan dan laboratorium.	Menghitung CDR dan mendukung estimasi CSF.
Penggunaan lahan	Tutupan lahan, kawasan terbangun, pertanian, hutan, kawasan lindung.	Citra, RTRW/RDTR, survei lapangan.	Menilai tekanan pemanfaatan ruang terhadap fungsi KCS.
Regulasi dan tata ruang	Batas KBAK, RTRW, RDTR, kawasan lindung, izin atau rencana kegiatan.	Dokumen pemerintah, BIG, KLHK, ATR/BPN, ESDM, pemerintah daerah.	Menghubungkan hasil KCS dengan instrumen pengendalian ruang.
Ekonomi karbon	Harga karbon, skenario valuasi, satuan nilai, asumsi konversi.	Kebijakan karbon, literatur, skenario kajian.	Menghitung nilai ekonomi indikatif fungsi KCS.

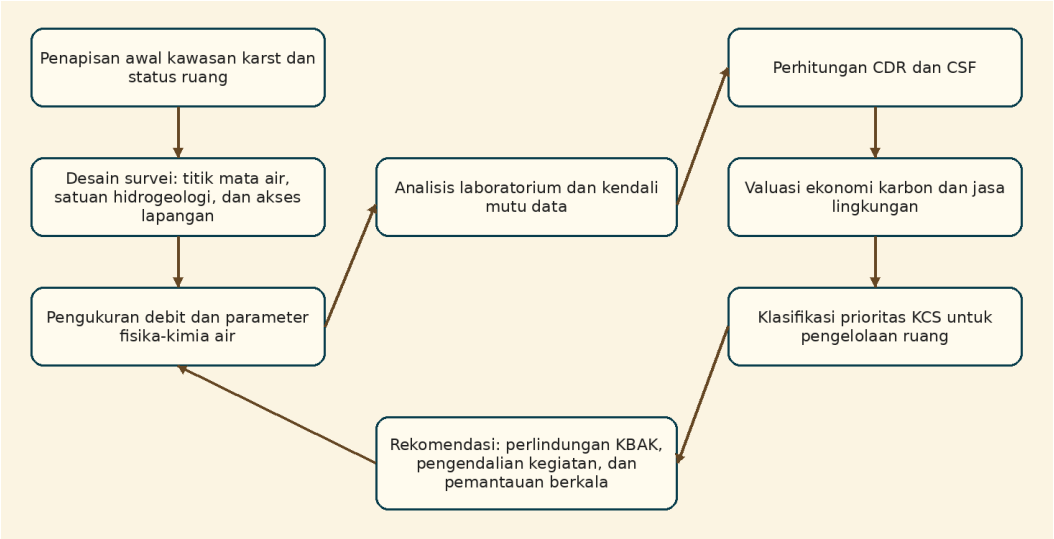
3.2 Parameter Lapangan

Pengukuran lapangan paling sedikit mencakup koordinat titik, elevasi, debit mata air, suhu air, pH, konduktivitas listrik, TDS, kondisi fisik mata air, penggunaan lahan sekitar, indikasi tekanan kegiatan, dan dokumentasi foto. Pengukuran sebaiknya dilakukan pada musim yang mewakili kondisi hidrologi kawasan. Untuk kajian yang membutuhkan ketelitian lebih tinggi, pengukuran perlu dilakukan pada musim hujan dan musim kemarau agar variasi debit dan hidrogeokimia dapat dibaca secara lebih baik.

3.3 Parameter Laboratorium

Analisis laboratorium paling sedikit mencakup kesadahan sebagai CaCO3, Ca2+, HCO3-, alkalinitas, dan parameter kualitas air pendukung. Parameter tambahan seperti Mg2+, Na+, K+, Cl-, SO42-, NO3-, dan isotop dapat digunakan apabila kajian diarahkan untuk memahami sumber air, jalur aliran, pengaruh pencampuran, atau kontrol geokimia yang lebih rinci.

IV TAHAPAN PELAKSANAAN



Gambar L15.3. Alur teknis kuantifikasi KCS dan integrasi ke tata ruang.

Tabel L15.4. Tahapan pelaksanaan dalam KGL KCS

Tahap	Kegiatan utama	Keluaran
1. Penapisan awal	Menentukan status kawasan, batas kajian, keberadaan karst, mata air, KBAK, dan rencana pemanfaatan ruang.	Peta kerja awal dan daftar kebutuhan data.
2. Desain survei	Menentukan titik mata air, titik kontrol, jadwal pengukuran, parameter, dan metode pengambilan sampel.	Rencana survei dan protokol lapangan.
3. Pengukuran lapangan	Mengukur debit dan parameter fisika-kimia air, mencatat kondisi lingkungan sekitar titik, dan mendokumentasikan lokasi.	Formulir lapangan dan data primer.
4. Analisis laboratorium	Menganalisis Ca2+, HCO3-, kesadahan, alkalinitas, dan parameter pendukung.	Tabel hasil laboratorium dan kendali mutu.
5. Perhitungan CDR dan CSF	Menghitung laju denudasi kimiawi dan fluks penyerapan karbon.	Tabel CDR, CSF, grafik, dan peta prioritas.
6. Valuasi ekonomi	Mengalikan CSF dengan harga karbon atau skenario nilai ekonomi yang dipilih.	Nilai ekonomi karbon indikatif.
7. Sintesis GTL	Menghubungkan hasil KCS dengan tata ruang, perlindungan KBAK, dan pengelolaan lingkungan.	Rekomendasi ruang, ITBX indikatif, dan rencana pemantauan.

V METODE KUANTIFIKASI KCS

5.1 Konsep Hidrogeokimia KCS

KCS berangkat dari proses pelarutan batuan karbonat oleh air yang mengandung CO2. Secara konseptual, CO2 dari atmosfer dan tanah bereaksi dengan air membentuk asam karbonat lemah. Air tersebut kemudian melarutkan kalsium karbonat dan menghasilkan ion kalsium serta bikarbonat yang terbawa dalam aliran air tanah. Sebagian karbon dipindahkan dalam bentuk bikarbonat terlarut. Karena itu, mata air karst menjadi lokasi penting untuk membaca jejak proses KCS melalui debit dan komposisi kimia air.

5.2 Perhitungan CDR

CDR digunakan untuk memperkirakan tingkat pelarutan kimiawi batuan karbonat. Nilai CDR dihitung dari konsentrasi hasil pelarutan, debit atau limpasan, luas daerah imbuhan atau satuan analisis, serta faktor konversi satuan. Dalam petunjuk teknis ini, rumus operasional harus ditetapkan secara

eksplisit sesuai data yang tersedia, metode laboratorium, dan satuan yang digunakan. Setiap hasil CDR wajib disertai satuan, sumber data, asumsi, dan batas ketidakpastian.

5.3 Perhitungan CSF

CSF dihitung untuk memperkirakan jumlah CO2 yang diserap atau dipindahkan oleh sistem karst dalam satuan waktu. Perhitungan CSF harus diturunkan dari CDR atau dari massa karbon terlarut yang dihitung berdasarkan debit dan konsentrasi ion terkait. Dalam setiap laporan, penyusun wajib menjelaskan apakah CSF dinyatakan sebagai ton CO2 per tahun, ton CO2 per hektar per tahun, atau satuan lain yang digunakan. Perbedaan satuan harus dijaga agar tidak menimbulkan salah tafsir dalam valuasi ekonomi.

5.4 Valuasi Ekonomi Karbon

Valuasi ekonomi karbon dilakukan secara indikatif dengan mengalikan CSF dengan harga karbon yang dipilih. Harga karbon dapat berasal dari kebijakan nasional, pasar karbon sukarela, atau skenario kajian. Karena harga karbon berubah menurut waktu, mekanisme, dan standar, nilai ekonomi KCS harus disebut sebagai estimasi berbasis skenario, bukan nilai tetap. Valuasi ini berguna untuk menunjukkan nilai jasa lingkungan geologi dan memperkuat argumen perlindungan kawasan, tetapi tidak otomatis sama dengan klaim kredit karbon.

VI KLASIFIKASI FUNGSI KCS DAN PRIORITAS PENGELOLAAN

6.1 Prinsip Klasifikasi

Klasifikasi fungsi KCS dilakukan untuk membantu pembaca kebijakan memahami wilayah atau titik mata air yang perlu diprioritaskan. Kelas dapat disusun berdasarkan nilai CDR, CSF, debit, kestabilan kualitas air, fungsi KBAK, tekanan penggunaan lahan, dan keterkaitan dengan kawasan lindung atau Geopark. Klasifikasi sebaiknya tidak hanya mengandalkan satu parameter karena fungsi KCS sangat dipengaruhi oleh hubungan antarparameter.

Tabel L15.5. Prinsip Klasifikasi dalam KGL KCS

Kelas fungsi KCS	Kriteria umum	Implikasi GTL
Sangat tinggi	CDR/CSF tinggi, debit relatif kuat, kualitas data baik, berada pada kawasan karst penting atau KBAK.	Prioritas perlindungan, pembatasan perubahan penggunaan lahan, pemantauan berkala, dan dasar penguatan kawasan lindung.
Tinggi	CDR/CSF tinggi atau sedang-tinggi, fungsi mata air penting, tekanan kawasan mulai meningkat.	Pengendalian kegiatan, syarat teknis, perlindungan mata air, dan penguatan RTH/resapan.
Sedang	Nilai CDR/CSF menengah atau data masih memerlukan penguatan.	Pemanfaatan dapat dilakukan dengan syarat pengelolaan dan data perlu diperbarui.
Rendah	CDR/CSF rendah atau sistem karst kurang aktif menurut data yang tersedia.	Tetap dipantau, terutama bila berada pada kawasan bertekanan pembangunan.
Belum dapat dinilai	Data debit, kimia air, atau batas satuan analisis belum memadai.	Wajib dilakukan survei tambahan sebelum menjadi dasar keputusan ruang.

VII REKOMENDASI TATA RUANG DAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN

7.1 Arahan Umum

Hasil kajian KCS harus diterjemahkan menjadi rekomendasi yang operasional. Rekomendasi tidak cukup menyatakan bahwa suatu kawasan memiliki nilai KCS tinggi, tetapi harus menjelaskan tindakan pengelolaan yang diperlukan. Tindakan tersebut dapat berupa perlindungan mata air, pembatasan perubahan tutupan lahan, pengendalian kegiatan yang berisiko

mencemari air tanah, penguatan kawasan lindung geologi, pemantauan kualitas air, atau pengaturan pemanfaatan dalam RTRW dan RDTR.

Tabel L15.6. Arahan pemanfaatan ruang dalam KGL KCS

Kelas KCS	Arahan pemanfaatan ruang	Ketentuan pengelolaan lingkungan	Pemantauan
Sangat tinggi	Diarahkan sebagai kawasan lindung geologi, perlindungan mata air, atau budidaya sangat terbatas.	Kegiatan yang menurunkan kualitas air dan tutupan lahan dikendalikan ketat.	Debit, pH, EC, TDS, Ca2+, HCO3-, kesadahan, dan tutupan lahan dipantau berkala.
Tinggi	Pemanfaatan dapat dilakukan secara terbatas dengan syarat teknis dan pengendalian intensitas.	Pengendalian limbah, konservasi tanah, perlindungan sempadan mata air, dan pengaturan drainase.	Pemantauan minimal dua kali setahun atau sesuai kebutuhan kawasan.
Sedang	Pemanfaatan bersyarat dengan kewajiban pengelolaan air dan pengendalian perubahan lahan.	Pengelolaan limpasan, perlindungan vegetasi, dan pengawasan kegiatan berisiko.	Pemantauan tahunan dan pembaruan data.
Rendah	Mengikuti ketentuan tata ruang dengan tetap memperhatikan fungsi hidrogeologi.	Pengelolaan umum dan pencegahan pencemaran.	Pemantauan periodik sesuai tekanan kegiatan.

7.2 Integrasi ke RTRW, RDTR, KLHS, dan Dokumen Lingkungan

- Dalam RTRW, hasil KCS dapat memperkuat penetapan kawasan lindung geologi, kawasan resapan, dan kawasan bernilai jasa lingkungan geologi.
- Dalam RDTR, hasil KCS dapat diterjemahkan menjadi ketentuan khusus, pembatasan kegiatan, persyaratan teknis, dan indikator pemantauan.
- Dalam KLHS, hasil KCS dapat digunakan untuk menilai dampak kebijakan terhadap fungsi karst, air tanah, karbon, dan keberlanjutan kawasan.
- Dalam dokumen lingkungan, hasil KCS dapat menjadi baseline untuk rencana pengelolaan dan pemantauan lingkungan geologi.
- Dalam pengelolaan KBAK dan Geopark, hasil KCS dapat memperkuat narasi konservasi, edukasi publik, dan ekonomi jasa lingkungan.

VIII FORMAT LAPORAN DAN KELUARAN

Tabel L15.7. Bab laporan dan isi minimum dalam KGL KCS

Bab laporan	Isi minimum
Ringkasan eksekutif	Tujuan, lokasi, metode singkat, hasil utama CDR-CSF, nilai ekonomi indikatif, rekomendasi ruang.
Pendahuluan	Latar belakang, kedudukan kajian, maksud, tujuan, ruang lingkup, dan dasar penggunaan hasil.
Kondisi kawasan	Geologi, hidrogeologi, KBAK, mata air, penggunaan lahan, tata ruang, dan tekanan pemanfaatan.
Metode	Desain survei, parameter, pengambilan sampel, analisis laboratorium, perhitungan CDR-CSF, valuasi, validasi.
Hasil	Tabel data, grafik CDR, grafik CSF, peta titik, kelas fungsi KCS, dan nilai ekonomi indikatif.
Sintesis GTL	Implikasi terhadap tata ruang, KBAK, pengelolaan lingkungan, dan pemantauan.
Rekomendasi	Arahan ruang, syarat teknis, prioritas perlindungan, kebutuhan kajian lanjutan, dan rencana pemantauan.
Lampiran data	Formulir lapangan, hasil laboratorium, dokumentasi foto, metadata, dan perhitungan.

IX VALIDASI, PEMANTAUAN, DAN PEMUTAHIRAN

9.1 Validasi Teknis

Validasi teknis dalam KGL KCS dilakukan untuk memastikan bahwa data, metode, hasil perhitungan, dan rekomendasi dapat digunakan secara bertanggung jawab. Validasi mencakup pemeriksaan lokasi titik, konsistensi debit, kewajaran parameter kimia air, ketepatan satuan, kesesuaian rumus, kelengkapan metadata, keterlacakan sumber data, serta kesesuaian rekomendasi dengan hasil analisis.

Tabel L15.8. Validasi Teknis dalam KGL KCS

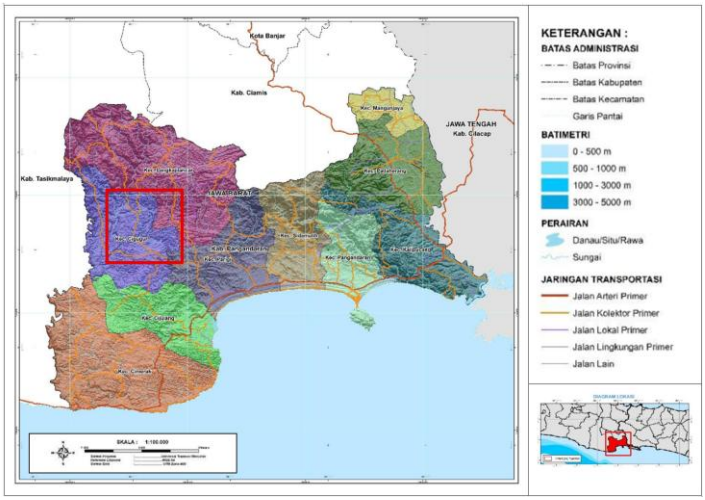
Aspek validasi	Pertanyaan pemeriksaan
Data lokasi	Apakah koordinat, elevasi, dan deskripsi titik sudah benar dan dapat ditemukan ulang?
Debit dan musim	Apakah pengukuran debit mencerminkan kondisi hidrologi yang dijelaskan dalam laporan?
Kimia air	Apakah data pH, EC, TDS, kesadahan, Ca2+, HCO3-, dan alkalinitas konsisten secara hidrogeokimia?
Perhitungan	Apakah rumus, satuan, konversi, dan asumsi CDR-CSF ditulis secara terbuka?
Valuasi	Apakah harga karbon, skenario, dan batas penggunaan nilai ekonomi dijelaskan?
Rekomendasi	Apakah rekomendasi ruang dapat ditelusuri ke kelas KCS dan kondisi GTL kawasan?

9.2 Pemantauan Berkala

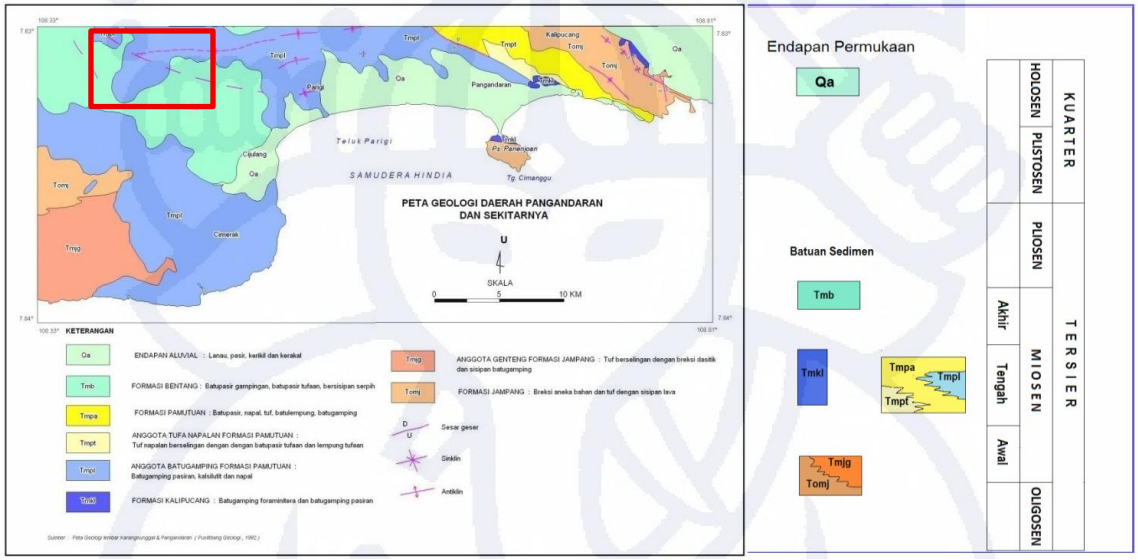
Pemantauan KCS perlu dilakukan secara berkala karena debit, kualitas air, tutupan lahan, dan tekanan kegiatan dapat berubah. Untuk kawasan prioritas tinggi, pemantauan disarankan minimal dua kali dalam setahun dengan mewakili musim hujan dan musim kemarau. Untuk kawasan dengan tekanan pembangunan tinggi, pemantauan dapat dilakukan lebih sering dan dikaitkan dengan kewajiban pengelolaan lingkungan.

X CONTOH PENERAPAN: KBAK PANGANDARAN BLOK CIGUGUR

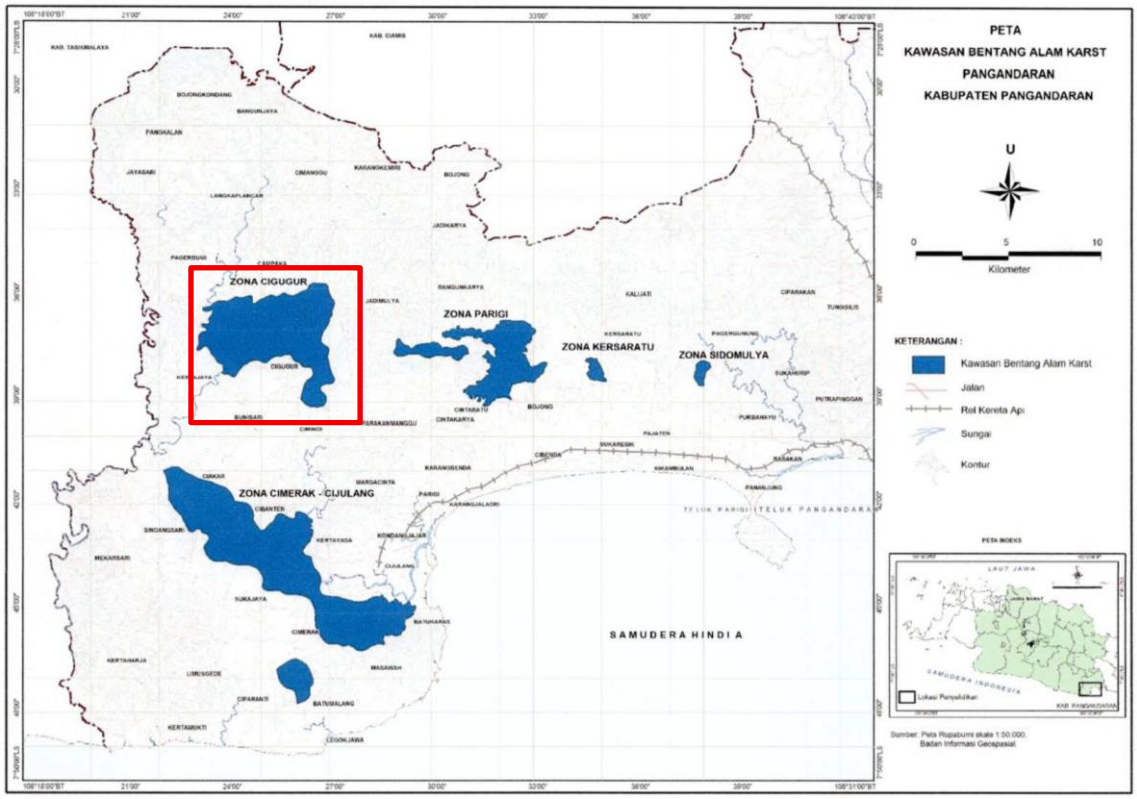
Contoh penerapan berikut diambil sebagai bahan pembelajaran dari kajian KCS pada KBAK Pangandaran Blok Cigugur. Kajian tersebut menunjukkan bahwa pendekatan hidrogeokimia dapat digunakan untuk menghitung CDR, CSF, dan nilai ekonomi karbon indikatif pada sistem mata air karst. Hasilnya tidak hanya penting bagi kajian ilmiah, tetapi juga dapat memperkuat perlindungan KBAK dan rekomendasi GTL



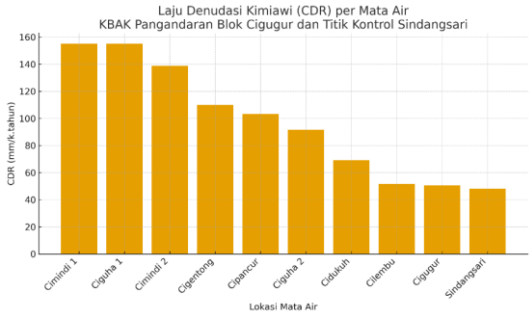
Gambar L15.4. Peta administrasi Kecamatan Cigugur, Pangandaran, lokasi kaian KCS (kotak Merah



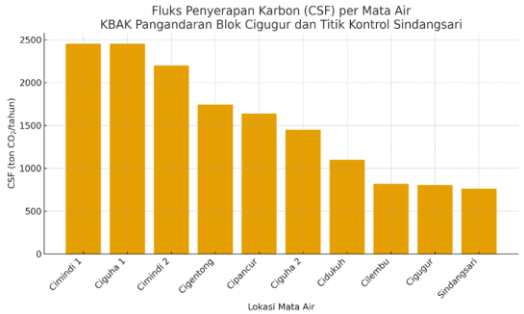
Gambar L15.5. Peta geologi daerah Pangandaran sebagai dasar pembacaan satuan karbonat dan kontrol geologi.



Gambar L15.6. Sebaran KBAK di wilayah Pangandaran dan Blok Cigugur (dalam kotak merh sebagai konteks lokasi pengukuran KCS.



Gambar L15.7. Contoh grafik CDR per mata air pada KBAK Pangandaran Blok Cigugur dan titik kontrol.



Gambar L15.8. Contoh grafik CSF per mata air pada KBAK Pangandaran Blok Cigugur dan titik kontrol.

Hasil kajian menunjukkan bahwa nilai CDR pada mata air dalam KBAK Blok Cigugur berada pada kisaran 50,7 sampai 155,3 mm per seribu tahun, dengan rata-rata sekitar 103,0 mm per seribu tahun. Nilai CSF per mata air berkisar dari ratusan hingga lebih dari 2.000 ton CO2 per tahun, dengan nilai tertinggi pada mata air Cimindi 1 dan Ciguha 1. Valuasi ekonomi karbon pada titik dengan nilai tertinggi menunjukkan estimasi sekitar Rp393 juta per tahun untuk masing-masing titik, sedangkan rata-rata kawasan menunjukkan estimasi sekitar Rp260,8 juta per tahun berdasarkan skenario harga karbon yang digunakan dalam kajian.

Tabel L15.9. Contoh ringkasan hasil CDR, CSF, dan nilai ekonomi karbon indikatif pada KBAK Pangandaran Blok Cigugur.

Peringkat	Lokasi pengamatan	Kesadahan (ppm CaCO3)	pH	CDR (mm/k.tahun)	CSF (ton CO2/tahun)	Potensi nilai karbon
1	Cimindi 1	300	6,94	155,3	2.456	Rp393,0 juta/tahun
2	Ciguha 1	300	6,64	155,3	2.456	Rp393,0 juta/tahun
3	Cimindi 2	268	7,01	138,8	2.199	Rp351,8 juta/tahun
4	Cigentong	213	6,89	110,1	1.745	Rp279,2 juta/tahun
5	Cipancur	200	6,94	103,5	1.641	Rp262,6 juta/tahun

Contoh Cigugur memperlihatkan bahwa fungsi KCS dapat menjadi jembatan antara kajian geologi lingkungan, keekonomian jasa lingkungan, dan tata ruang. Titik dengan CDR dan CSF tinggi tidak boleh hanya dibaca sebagai lokasi dengan nilai karbon besar, tetapi sebagai indikator bahwa sistem karst bekerja aktif dan perlu dijaga dari perubahan yang dapat mengganggu aliran air, kualitas air, dan proses pelarutan karbonat. Dalam konteks GTL, hasil seperti ini dapat digunakan untuk memperkuat perlindungan mata air, pengendalian kawasan budidaya, pengelolaan Geopark, dan penyusunan pertimbangan teknis.

XI PENUTUP

Petunjuk teknis KCS menempatkan karst sebagai sistem geologi lingkungan yang memiliki fungsi air, fungsi ruang, nilai geologi, dan jasa lingkungan karbon. Dengan pendekatan yang terukur, KCS dapat dihitung melalui data hidrogeokimia, debit mata air, CDR, CSF, dan valuasi ekonomi karbon indikatif. Namun, hasil tersebut harus selalu

ditempatkan dalam kerangka GTL yang lebih luas: perlindungan fungsi karst, pengendalian pemanfaatan ruang, pengelolaan lingkungan, dan akuntabilitas teknis.

KCS tidak dimaksudkan untuk mengubah karst menjadi sekadar komoditas karbon. Sebaliknya, KCS memberi bahasa kuantitatif untuk menunjukkan bahwa melindungi karst memiliki nilai ilmiah, ekologis, sosial, dan ekonomi. Bila fungsi ini dibaca sejak awal dalam tata ruang, maka keputusan pembangunan dapat lebih cermat, lebih bertanggung jawab, dan lebih menghargai kerja alam yang selama ini sering tidak terlihat dalam perhitungan ekonomi konvensional.

Gambar L16.1. Bagan alir petunujuk teknis Hulu-Tengah-Hilir untuk pengendalian banji, pemulihan neraca air, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Petunjuk Teknis KGL Hulu-Tengah-Hilir untuk Pengendalian Banjir, Pemulihan Neraca Air, dan Pengendalian Pemanfaatan Ruang

Kedudukan lampiran dalam Buku GTL

Lampiran 16 ditempatkan sebagai petunjuk teknis umum yang dapat diterapkan pada berbagai wilayah Indonesia. Lampiran ini menjadi perangkat operasional untuk menerjemahkan Kajian Geologi Lingkungan (KGL) ke dalam pengendalian banjir, pemulihan neraca air, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Naskah petunjuk teknis

I. PENDAHULUAN

1.1. Kedudukan Petunjuk Teknis

Petunjuk teknis ini merupakan perangkat operasional dalam Kajian Geologi Lingkungan untuk membaca hubungan antara kondisi geologi, geomorfologi, hidrogeologi, tanah, sistem sungai, tutupan lahan, dan pemanfaatan ruang dalam satu kesatuan hulu-tengah-hilir.

Dalam perspektif Geologi Tata Lingkungan, banjir tidak hanya dipahami sebagai luapan air di wilayah hilir. Banjir merupakan gejala dari ketidakseimbangan sistem ruang dan sistem air, terutama ketika kawasan resapan menurun, limpasan meningkat, ruang air berkurang, dan pengendalian pemanfaatan ruang tidak berjalan efektif.

Petunjuk teknis ini disusun agar hasil KGL dapat diterjemahkan menjadi arahan teknis yang langsung dapat digunakan dalam penyusunan RTRW, RDTR, peraturan zonasi, pengendalian perizinan, pemulihan neraca air, rehabilitasi kawasan kritis, dan pemantauan lintas wilayah.

Tabel L16.1. Kedudukan Lampiran 16 dalam Buku GTL.

Aspek	Penjelasan operasional
Posisi dalam Buku GTL	Perangkat operasional untuk menerapkan prinsip geologi lingkungan pada pengendalian banjir, neraca air, dan pengendalian ruang.
Sifat petunjuk	Umum dan adaptif, sehingga dapat digunakan pada DAS besar, kawasan metropolitan, perkotaan pesisir, kawasan pegunungan, kawasan karst, kawasan vulkanik, daerah cepat tumbuh, dan wilayah rawan banjir.
Fungsi utama	Mengubah data geologi lingkungan menjadi peta fungsi ruang, kelas kesesuaian, arahan pengendalian, pilihan intervensi, dan indikator pemantauan.
Keterkaitan bab	Berkaitan dengan Bab 5 mengenai data dan analisis, Bab 6 mengenai hidrogeologi, Bab 7 mengenai bahaya geologi, Bab 11 mengenai KGL untuk tata ruang, dan Bab 12 mengenai pemantauan serta evaluasi berkelanjutan.

1.2. Tujuan

Tujuan utama petunjuk teknis ini adalah menyediakan metode kerja KGL untuk membaca, menilai, dan mengendalikan hubungan antara kondisi geologi lingkungan dan sistem tata air dalam satu kesatuan hulu-tengah-hilir.

- Mengidentifikasi faktor geologi lingkungan yang memengaruhi banjir, limpasan permukaan, resapan air, erosi, sedimentasi, dan kestabilan lahan.
- Menilai fungsi hulu sebagai kawasan tangkapan air, kawasan resapan, pengendali limpasan, pengendali erosi, dan penjaga aliran dasar.
- Menilai wilayah tengah sebagai ruang transisi aliran yang sering mengalami tekanan konversi lahan dan peningkatan kawasan kedap air.
- Menilai wilayah hilir sebagai penerima beban aliran, dataran banjir, wilayah pesisir, atau kawasan perkotaan yang rentan terhadap genangan.
- Menyusun arahan pemulihan neraca air berdasarkan kondisi geologi, hidrogeologi, tanah, morfologi, tutupan lahan, dan kebutuhan pengendalian ruang.
- Menentukan kelas kesesuaian pemanfaatan ruang berdasarkan daya dukung, daya tampung, risiko geologi, dan fungsi hidrologis.
- Menyediakan dasar teknis bagi pengendalian pemanfaatan ruang, perizinan, rehabilitasi lingkungan, dan pemantauan berkala.

1.3. Ruang Lingkup

Tabel L16.2. Ruang lingkup Petunjuk Teknis KGL Hulu-Tengah-Hilir.

Aspek	Penjelasan operasional
Lingkup wilayah	DAS, sub-DAS, cekungan air tanah, kawasan imbuhan, kawasan hulu, wilayah transisi, dataran banjir, kawasan pesisir, kawasan perkotaan, kawasan karst, kawasan vulkanik, dan wilayah strategis yang memiliki keterkaitan sistem air.
Lingkup substansi	Geologi, geomorfologi, tanah, hidrogeologi, curah hujan, aliran permukaan, air tanah, erosi, sedimentasi, gerakan tanah, amblesan, banjir, tutupan lahan, penggunaan lahan, pola ruang, struktur ruang, dan pengendalian pemanfaatan ruang.
Lingkup analisis	Fungsi hulu, fungsi wilayah tengah, fungsi hilir, neraca air, kawasan resapan, limpasan permukaan, kapasitas tampungan, risiko geologi, kesesuaian pemanfaatan ruang, dan kebutuhan intervensi teknis.
Lingkup rekomendasi	Perlindungan kawasan, pengendalian pemanfaatan ruang, pembatasan kegiatan, pemulihan neraca air, konservasi tanah-air, pengendalian banjir, perbaikan drainase, pemantauan, dan evaluasi berkala.

II. PRINSIP DASAR

2.1 Banjir sebagai gejala ketidakseimbangan sistem ruang dan air

Banjir tidak hanya disebabkan oleh kapasitas sungai atau drainase yang terbatas. Pada banyak wilayah, banjir muncul karena perubahan tutupan lahan, berkurangnya resapan, meningkatnya limpasan, hilangnya ruang tampung, sedimentasi, amblesan, dan ketidaksesuaian pemanfaatan ruang.

2.2 Hulu, tengah, dan hilir sebagai satu sistem

Wilayah hulu berfungsi menerima hujan, meresapkan air, menahan limpasan, dan menjaga aliran dasar. Wilayah tengah berperan

sebagai ruang transisi dan pengendali limpasan. Wilayah hilir menerima akumulasi debit, sehingga sangat dipengaruhi oleh kondisi hulu dan tengah.

2.3 Pemulihan neraca air sebagai dasar pengendalian

Neraca air menggambarkan hubungan antara hujan, infiltrasi, limpasan, evapotranspirasi, pengisian air tanah, aliran dasar, dan tampungan. Pemulihan neraca air menjadi dasar untuk mengurangi banjir sekaligus menjaga ketersediaan air pada musim kering.

2.4 Pemanfaatan ruang mengikuti fungsi geologi lingkungan

Setiap ruang memiliki fungsi lingkungan, seperti resapan, lindung, tampungan, aliran, penyangga, atau pembatas karena risiko geologi. Tata ruang harus menghormati fungsi tersebut agar tidak menimbulkan peningkatan risiko.

2.5 Intervensi teknis berbasis kondisi setempat

Tidak semua wilayah cocok untuk teknik resapan atau tampungan tertentu. Pilihan tindakan harus mempertimbangkan permeabilitas tanah, kedalaman muka air tanah, kestabilan lereng, kualitas air, potensi pencemaran, kondisi geologi, dan keselamatan wilayah sekitar

III. DATA DAN INFORMASI DASAR

Data dan informasi dasar disusun dalam sistem informasi spasial agar setiap parameter dapat ditumpangsusunkan, dinilai, dan diterjemahkan menjadi arahan ruang. Data minimal yang diperlukan adalah sebagai berikut.

- Peta geologi, struktur geologi, litologi, dan satuan batuan.
- Peta geomorfologi, bentuklahan, kemiringan lereng, jenis tanah, tekstur tanah, permeabilitas, dan ketebalan tanah pelapukan.
- Peta hidrogeologi, cekungan air tanah, kawasan imbuhan, mata air, sumur, muka air tanah, debit, dan kualitas air.
- Data curah hujan, iklim, sungai, drainase alami, drainase buatan, situ, dan tampungan air lainnya.
- Data banjir historis, wilayah genangan, erosi, sedimentasi, gerakan tanah, amblesan, dan bahaya geologi lain yang relevan.
- Peta tutupan lahan, penggunaan lahan, kawasan terbangun, intensitas bangunan, RTRW, RDTR, dan rencana pengembangan kawasan.
- Data infrastruktur pengendali banjir, kelembagaan, perizinan, sosial-ekonomi, kependudukan, dan konflik pemanfaatan ruang.

IV. TAHAPAN PETUNJUK TEKNIS

Tabel L16.3. Bagan alur operasional Petunjuk Teknis KGL Hulu-Tengah-Hilir.

Tahap	Kegiatan utama	Keluaran utama
1	Penetapan wilayah kajian hulu-tengah-hilir	Peta wilayah kajian dan batas sistem hidrologi-geologi lingkungan
2	Pengumpulan dan penyusunan basis data KGL	Basis data geologi lingkungan, hidrologi, hidrogeologi, tata ruang, dan risiko banjir
3	Analisis fungsi hulu dan kawasan resapan	Peta fungsi hulu, kawasan resapan prioritas, dan arahan konservasi
4	Analisis wilayah tengah sebagai ruang transisi aliran	Peta pengendalian limpasan wilayah tengah dan arahan pemanfaatan ruang
5	Analisis wilayah hilir, dataran banjir, dan pesisir	Peta risiko banjir hilir-pesisir dan arahan pengendalian ruang
6	Evaluasi neraca air	Peta neraca air, defisit resapan, dan prioritas pemulihan

Tahap	Kegiatan utama	Keluaran utama
7	Analisis bahaya geologi pendukung pengendalian banjir	Peta bahaya geologi terkait banjir dan rekomendasi mitigasi
8	Penilaian kesesuaian pemanfaatan ruang berbasis KGL	Peta kesesuaian pemanfaatan ruang berbasis KGL
9	Penentuan intervensi teknis berbasis kondisi setempat	Matriks intervensi teknis berdasarkan kondisi geologi lingkungan
10	Integrasi ke tata ruang dan pengendalian pemanfaatan ruang	Arahan integrasi ke RTRW, RDTR, peraturan zonasi, dan pengendalian perizinan
11	Pemantauan, evaluasi, dan pelaporan	Laporan pemantauan dan evaluasi pengendalian banjir serta pemulihan neraca air
12	Penyesuaian kebijakan dan pengendalian adaptif	Rencana pengendalian adaptif dan pembaruan rekomendasi KGL

Tahap 1. Penetapan Wilayah Kajian Hulu-Tengah-Hilir

Menetapkan batas kajian berdasarkan DAS, sub-DAS, cekungan air tanah, kawasan imbuhan, alur sungai utama, dataran banjir, wilayah genangan, dan kawasan pesisir yang terhubung secara hidrologis.

Batas kajian tidak boleh hanya mengikuti administrasi. Batas administrasi tetap digunakan untuk kebutuhan kelembagaan, tetapi analisis utama harus mengikuti sistem air dan geologi lingkungan.

Pertanyaan kunci tahap ini: dari mana sumber air berasal, di mana resapan utama berada, di mana limpasan meningkat, di mana aliran terkonsentrasi, dan di mana wilayah penerima beban banjir berada.

Tahap 2. Pengumpulan dan Penyusunan Basis Data KGL

Tahap ini membangun basis data terpadu yang mencakup kondisi alamiah, kondisi terbangun, dan arah rencana pemanfaatan ruang.

Data geologi dan geomorfologi digunakan untuk memahami karakter batuan, tanah, struktur geologi, bentuklahan, kestabilan lereng, dan potensi bencana.

Data hidrogeologi digunakan untuk memahami kawasan resapan, aliran air tanah, muka air tanah, akuifer, mata air, dan keterkaitan air tanah dengan air permukaan.

Tahap 3. Analisis Fungsi Hulu dan Kawasan Resapan

Wilayah hulu dianalisis sebagai kawasan penerima hujan, kawasan resapan, pengendali limpasan, pengendali erosi, penyangga aliran dasar, dan penentu kualitas hidrologis wilayah hilir.

Analisis mencakup tutupan lahan, kemiringan lereng, kapasitas infiltrasi, ketebalan tanah pelapukan, kerentanan erosi, potensi gerakan tanah, kawasan resapan, dan kesesuaian pemanfaatan ruang.

Wilayah hulu dengan fungsi resapan baik perlu dipertahankan. Wilayah hulu yang telah menurun fungsinya perlu dipulihkan melalui konservasi vegetatif, konservasi mekanik, pembatasan alih fungsi lahan, dan pengendalian pemanfaatan ruang.

Tahap 4. Analisis Wilayah Tengah sebagai Ruang Transisi Aliran

Wilayah tengah sering mengalami perubahan penggunaan lahan yang cepat. Kenaikan luas kawasan kedap air mempercepat aliran menuju hilir dan meningkatkan debit puncak.

Analisis mencakup perubahan tutupan lahan, kondisi sempadan sungai, kapasitas tampungan lokal, ruang terbuka hijau, jaringan drainase, dan kebutuhan retensi atau detensi.

Wilayah tengah perlu diarahkan sebagai zona pengendali limpasan. Pengembangan baru harus disertai kewajiban pengendalian air hujan, penambahan ruang resapan, retensi lokal, dan perlindungan ruang air.

Tahap 5. Analisis Wilayah Hilir, Dataran Banjir, dan Pesisir

Wilayah hilir merupakan penerima beban aliran dari hulu dan tengah. Risiko banjir meningkat bila kapasitas drainase terbatas, terjadi sedimentasi, ruang tampung berkurang, atau terjadi amblesan dan pengaruh pasang laut.

Analisis mencakup sebaran genangan, frekuensi banjir, kapasitas sungai dan drainase, dataran banjir, ruang air, amblesan, pengaruh pasang laut, dan kepadatan kawasan terbangun.

Pengendalian hilir harus dikaitkan dengan pengurangan beban limpasan dari hulu dan tengah, perlindungan ruang banjir, pemulihan tampungan, serta pembatasan kegiatan pada ruang yang sangat rentan.

Tahap 6. Evaluasi Neraca Air

Evaluasi neraca air menilai hubungan antara curah hujan, infiltrasi, limpasan permukaan, evapotranspirasi, pengisian air tanah, aliran dasar, dan tampungan.

Evaluasi ini mengidentifikasi wilayah surplus limpasan, defisit resapan, penurunan cadangan air tanah, penurunan aliran dasar, dan penurunan kapasitas tampungan.

Wilayah surplus limpasan diarahkan untuk retensi dan detensi. Wilayah defisit resapan diarahkan untuk pemulihan kawasan imbuhan dan peningkatan infiltrasi. Wilayah dengan penurunan muka air tanah memerlukan pengendalian pengambilan air tanah dan penilaian kelayakan imbuhan buatan.

Tahap 7. Analisis Bahaya Geologi Pendukung Pengendalian Banjir

Banjir sering berkaitan dengan erosi, sedimentasi, gerakan tanah, amblesan, tanah lunak, ketidakstabilan lereng, dan kerentanan pesisir.

Analisis bahaya geologi digunakan untuk menentukan wilayah yang dapat memperbesar risiko banjir, mengganggu fungsi sungai, merusak infrastruktur pengendali, atau meningkatkan kerentanan masyarakat.

Hasil analisis ini menjadi dasar pemilihan lokasi infrastruktur pengendali banjir, perlindungan lereng, pembatasan pemanfaatan ruang, dan prioritas rehabilitasi kawasan kritis.

Tahap 8. Penilaian Kesesuaian Pemanfaatan Ruang Berbasis KGL

Penilaian kesesuaian ruang menggabungkan hasil analisis hulu, tengah, hilir, neraca air, bahaya geologi, hidrogeologi, dan tata ruang.

Kelas kesesuaian dapat dibedakan menjadi kawasan lindung hidrologis-geologis, kawasan pemanfaatan terbatas, kawasan pemanfaatan bersyarat, dan kawasan yang tidak direkomendasikan untuk pengembangan intensif.

Hasil penilaian harus dapat diterjemahkan menjadi peraturan zonasi, prasyarat perizinan, arahan rehabilitasi, dan kewajiban pemantauan.

Tahap 9. Penentuan Intervensi Teknis Berbasis Kondisi Setempat

Intervensi teknis dipilih berdasarkan karakter wilayah, bukan ditetapkan seragam untuk semua lokasi.

Pilihan intervensi meliputi perlindungan kawasan resapan, retensi dan detensi air, konservasi tanah dan air, sistem resapan buatan, pengendalian kawasan terbangun, pengendalian air tanah, dan pengendalian amblesan.

Setiap intervensi harus diuji terhadap permeabilitas tanah, kedalaman muka air tanah, stabilitas lereng, kualitas air, risiko pencemaran, kondisi geologi, dan keselamatan wilayah sekitar.

Tahap 10. Integrasi ke Tata Ruang dan Pengendalian Pemanfaatan Ruang

Hasil KGL harus masuk ke RTRW, RDTR, peraturan zonasi, pengendalian perizinan, rencana rehabilitasi, dan program infrastruktur.

Integrasi dilakukan melalui penetapan kawasan lindung geologi dan hidrogeologi, kawasan rawan banjir, kawasan rawan gerakan tanah, kawasan rawan erosi, kawasan rawan amblesan, dan kawasan prioritas pemulihan neraca air.

Dalam tata ruang, hasil KGL harus menjawab ruang mana yang dilindungi, ruang mana yang dapat dimanfaatkan terbatas, ruang mana yang memerlukan syarat teknis, dan ruang mana yang harus dikendalikan ketat.

Tahap 11. Pemantauan, Evaluasi, dan Pelaporan

Pemantauan diperlukan untuk memastikan bahwa pengendalian banjir dan pemulihan neraca air berjalan efektif.

Indikator pemantauan meliputi perubahan tutupan lahan, kawasan kedap air, debit puncak, debit dasar, muka air tanah, kualitas air, kapasitas tampungan, kejadian banjir, erosi, sedimentasi, gerakan tanah, amblesan, dan kepatuhan pemanfaatan ruang.

Untuk wilayah strategis, data pemantauan perlu dihimpun dalam sistem informasi bersama agar dapat digunakan untuk evaluasi berkala lintas wilayah.

Tahap 12. Penyesuaian Kebijakan dan Pengendalian Adaptif

Pengendalian banjir dan pemulihan neraca air merupakan proses berkelanjutan. Perubahan iklim, pertumbuhan penduduk, pembangunan infrastruktur, dan perubahan penggunaan lahan dapat mengubah tingkat risiko.

Hasil pemantauan digunakan untuk menyesuaikan kebijakan, memperbarui arahan tata ruang, meningkatkan standar pengendalian limpasan, memperkuat perlindungan kawasan resapan, dan memperbarui prioritas rehabilitasi.

Dengan siklus kajian, rekomendasi, implementasi, pemantauan, evaluasi, dan penyesuaian, KGL menjadi bagian dari sistem pengambilan keputusan ruang yang terus diperbarui.

V. HUBUNGAN KONDISI WILAYAH, RISIKO, DAN ARAHAN KGL

Tabel L16.4. Matriks umum kondisi wilayah, risiko, dan arahan KGL.

Kondisi wilayah	Risiko utama	Arahan KGL
Hulu dengan tutupan lahan baik	Risiko rendah, fungsi resapan tinggi	Lindungi sebagai kawasan konservasi air dan kawasan lindung hidrologis-geologis.
Hulu dengan alih fungsi lahan tinggi	Limpasan meningkat, erosi, gerakan tanah	Pulihkan vegetasi, batasi pembangunan, terapkan konservasi tanah-air, dan kendalikan kegiatan berisiko.
Wilayah tengah cepat berkembang	Limpasan meningkat dan drainase terbebani	Wajibkan retensi, resapan, pembatasan intensitas bangunan, dan pengendalian limpasan di tingkat tapak.
Dataran banjir	Genangan berulang dan kerugian aset	Batasi pembangunan intensif, lindungi ruang air, dan arahkan fungsi yang kompatibel dengan risiko banjir.
Wilayah pesisir	Banjir, rob, amblesan	Kendalikan air tanah, pulihkan tampungan, atur intensitas ruang, dan perkuat adaptasi pesisir.
Kawasan resapan utama	Defisit imbuhan bila terbangun	Tetapkan sebagai kawasan lindung hidrogeologis dan batasi pemanfaatan yang menurunkan infiltrasi.
Lereng curam	Gerakan tanah, erosi, sedimentasi	Batasi pemanfaatan, terapkan konservasi lereng, dan lakukan pemantauan kestabilan.
Kawasan tanah lunak	Amblesan dan kerusakan infrastruktur	Kendalikan beban bangunan, pengambilan air tanah, dan kebutuhan rekayasa fondasi.

Kondisi wilayah	Risiko utama	Arahan KGL
Kawasan karst	Kerentanan air tanah dan aliran bawah permukaan	Lindungi sistem air karst, batasi pencemaran, dan gunakan penilaian hidrogeologi rinci.
Kawasan vulkanik muda	Infiltrasi tinggi tetapi dapat rentan longsor pada lereng tertentu	Lindungi resapan, kendalikan lereng, dan sesuaikan intervensi dengan sifat tanah vulkanik.

5.1. Matriks Intervensi Teknis Berbasis Kondisi Setempat

Tabel L16.5 Matriks intervensi teknis berbasis kondisi setempat.

Jenis intervensi	Lokasi prioritas	Prasyarat teknis	Keluaran yang diharapkan
Perlindungan kawasan resapan	Hulu, kawasan imbuhan, mata air, lereng stabil	Tutupan lahan, permeabilitas, muka air tanah, fungsi lindung	Kawasan resapan terlindungi dan limpasan berkurang
Retensi dan detensi air	Wilayah tengah, dataran rendah, kawasan perkotaan	Ketersediaan lahan, koneksi drainase, keamanan lereng, sedimen	Debit puncak berkurang dan waktu aliran melambat
Konservasi tanah dan air	Lahan berlereng, lahan pertanian, kawasan erosi	Kemiringan, tanah, curah hujan, tutupan vegetasi	Erosi dan sedimentasi menurun
Sistem resapan buatan	Kawasan terbangun dengan syarat hidrogeologi memadai	Permeabilitas, kedalaman muka air tanah, kualitas air, risiko pencemaran	Infiltrasi meningkat tanpa menimbulkan risiko baru
Pengendalian kawasan terbangun	Perkotaan, koridor pertumbuhan, kawasan industri dan permukiman	KDB, ruang terbuka, drainase, kapasitas tampungan lokal	Limpasan kawasan baru terkendali
Pengendalian air tanah dan amblesan	Dataran rendah, pesisir, perkotaan padat	Muka air tanah, penurunan tanah, beban bangunan, sumber air alternatif	Risiko amblesan dan banjir hilir menurun

5.2. Integrasi Ke Tata Ruang Dan Pengendalian Pemanfaatan Ruang

Hasil petunjuk teknis ini harus diterjemahkan ke dalam instrumen tata ruang agar rekomendasi KGL tidak berhenti sebagai laporan teknis. Integrasi paling sedikit dilakukan melalui penetapan kawasan, arahan zonasi, ketentuan khusus, prasyarat perizinan, program rehabilitasi, serta indikator pemantauan.

- Penetapan kawasan lindung geologi dan hidrogeologi, termasuk kawasan imbuhan air tanah, perlindungan mata air, sempadan sungai, dan ruang air.
- Penetapan kawasan rawan banjir, rawan gerakan tanah, rawan erosi, rawan amblesan, serta kawasan yang memerlukan syarat teknis khusus.
- Arahan pengendalian kawasan resapan dan pembatasan pemanfaatan ruang pada daerah yang memiliki fungsi hidrologis penting.
- Kewajiban pengendalian limpasan pada kawasan terbangun, termasuk retensi lokal, drainase berwawasan lingkungan, ruang terbuka, dan pengurangan permukaan kedap air.
- Prasyarat KGL untuk kegiatan yang berpotensi mengubah aliran permukaan, resapan, muka air tanah, stabilitas lereng, atau risiko banjir.
- Penetapan indikator pemantauan pada RDTR, peraturan zonasi, dokumen lingkungan, dan perizinan berusaha.

Rumusan operasional untuk tata ruang

Setiap arahan KGL sebaiknya diterjemahkan ke dalam kalimat pengaturan yang dapat dilaksanakan dan diawasi. Contohnya: kawasan resapan utama wajib dipertahankan fungsi infiltrasinya; pengembangan baru wajib mengendalikan limpasan pada tingkat tapak; dataran banjir aktif tidak direkomendasikan untuk pengembangan intensif; wilayah dengan amblesan signifikan memerlukan pengendalian air tanah dan pemantauan penurunan muka tanah.

VI. INDIKATOR PEMANTAUAN, EVALUASI, DAN PELAPORAN

Tabel L16.6 Indikator pemantauan dan evaluasi petunjuk teknis.

Kelompok indikator	Parameter yang dipantau	Sumber/metode
Tutupan lahan	Perubahan vegetasi, ruang terbuka, kawasan terbangun, dan permukaan kedap air	Citra satelit, survei lapangan, data perizinan
Hidrologi permukaan	Debit puncak, debit dasar, tinggi muka air sungai, frekuensi banjir, durasi genangan	Pos pantau, sensor, laporan kejadian, survei pascabanjir
Hidrogeologi	Muka air tanah, mata air, debit sumur, kualitas air, kawasan imbuhan	Sumur pantau, pengukuran debit, uji kualitas air
Tampungan air	Kapasitas situ, waduk, kolam retensi, rawa, dan ruang air lainnya	Batimetri, inspeksi teknis, inventarisasi aset
Bahaya geologi	Erosi, sedimentasi, gerakan tanah, amblesan, tanah lunak, ketidakstabilan lereng	Pemetaan lapangan, sensor geoteknik, InSAR bila tersedia
Kepatuhan ruang	Kesesuaian pemanfaatan ruang terhadap RTRW, RDTR, perizinan, dan ketentuan zonasi	Audit tata ruang, pengawasan perizinan, inspeksi lapangan
Efektivitas intervensi	Kinerja retensi, resapan, konservasi lereng, dan pengendalian limpasan	Evaluasi desain, pengukuran lapangan, laporan pengelola

VII. CATATAN IMPLEMENTASI NASIONAL

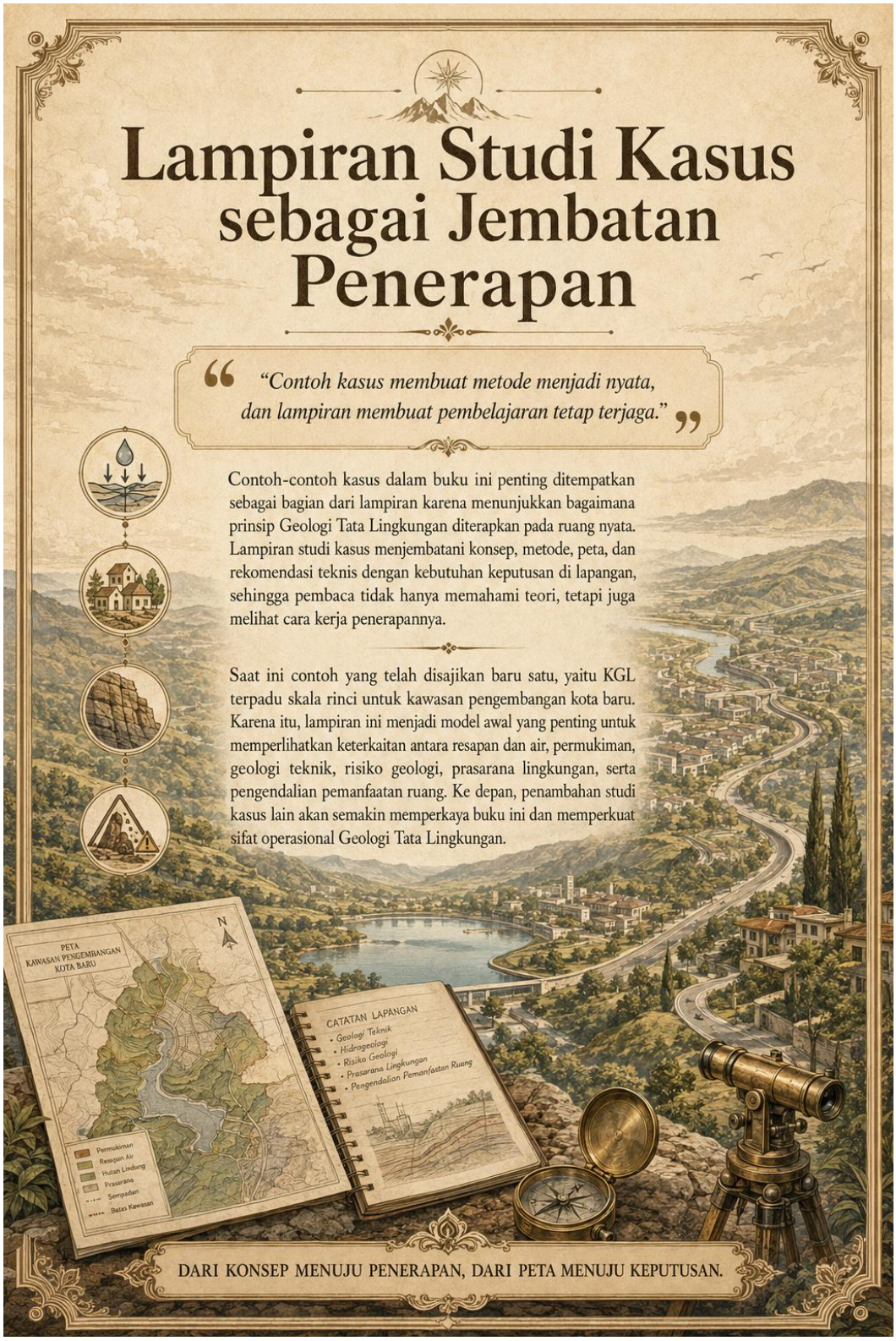
- Skala kajian harus disesuaikan dengan kebutuhan. Untuk RTRW dapat digunakan skala regional, sedangkan untuk RDTR dan perizinan diperlukan skala lebih rinci.
- Batas kajian sebaiknya mengikuti sistem air dan geologi lingkungan, bukan hanya batas administrasi.
- Data lapangan tetap diperlukan untuk memverifikasi hasil analisis spasial.
- Wilayah dengan kondisi khusus, seperti karst, pesisir, gambut, vulkanik, tanah lunak, dan kawasan rawan gerakan tanah, memerlukan parameter tambahan.
- Rekomendasi KGL harus diterjemahkan ke dalam ketentuan yang dapat dilaksanakan, diawasi, dan dievaluasi.
- Setiap intervensi resapan dan imbuhan air tanah harus melalui penilaian kelayakan geologi dan kualitas air.
- Pengendalian banjir perlu dipadukan dengan pengendalian pemanfaatan ruang, bukan hanya pembangunan infrastruktur.
- Evaluasi berkala perlu dilakukan untuk menyesuaikan rekomendasi dengan perubahan iklim, pertumbuhan kawasan, dan perubahan penggunaan lahan.

VIII. PENUTUP

Petunjuk Teknis KGL Hulu-Tengah-Hilir untuk Pengendalian Banjir, Pemulihan Neraca Air, dan Pengendalian Pemanfaatan Ruang menempatkan banjir sebagai persoalan sistemik yang terkait erat dengan kondisi geologi lingkungan, hidrogeologi, tata air, tutupan lahan, dan kebijakan ruang.

Melalui pendekatan ini, KGL tidak hanya menghasilkan peta dan deskripsi kondisi wilayah, tetapi juga memberikan dasar ilmiah untuk menentukan kawasan yang harus dilindungi, kawasan yang dapat dimanfaatkan secara terbatas, kawasan yang memerlukan syarat teknis, dan kawasan yang perlu dikendalikan secara ketat.

Dengan demikian, petunjuk teknis ini dapat menjadi acuan nasional untuk memperkuat perencanaan tata ruang, pengendalian banjir, pemulihan neraca air, perlindungan kawasan resapan, serta pembangunan wilayah yang lebih aman dan berkelanjutan.



Gambar L17.1. Keterkaitan studi kasus kota baru dengan berbagai petunjuk teknis GTL.

LAMPIRAN 17 (STUDI KASUS)

Penerapan KGL Terpadu Skala Rinci untuk Kawasan Pengembangan Kota Baru

Kedudukan lampiran

Lampiran 17 ini disusun untuk memperlihatkan bagaimana beberapa petunjuk teknis KGL digunakan secara bersama pada satu kawasan pengembangan kota baru. Lampiran ini tidak menggantikan petunjuk teknis sektoral yang sudah ada, tetapi memperlihatkan cara menggabungkan beberapa petunjuk teknis dalam satu kawasan yang memiliki fungsi ruang beragam, aset terbangun, rencana pengembangan bertahap, dan kebutuhan validasi tapak.

Kedudukan lampiran dalam buku GTL

Tabel L17.1. Kedudukan lampiran studi kasus dalam buku GTL.

Aspek integrasi	Uraian
Bab utama terkait	Bab 3, Bab 4, Bab 5, Bab 6, Bab 7, Bab 11, Bab 12, Bab 15, dan Bab 16.
Lampiran terkait	Pedoman Umum KGL, KGL Daerah Resapan Air, KGL Permukiman Perkotaan, KGL Permukiman Nonperkotaan, KGL Kawasan Industri, KGL Kawasan Peruntukan Pertambangan, KGL Kawasan Gunung Api Aktif, KGL TPST/TPS3R, serta lampiran kawasan bernilai geologi apabila relevan.
Fungsi operasional	Memberi contoh penerapan lintas-lampiran untuk kawasan kota baru yang memerlukan pembacaan daya dukung, daya tampung, fungsi resapan, intensitas ruang, bahaya geologi, prasarana lingkungan, aset, dan rencana tapak secara terpadu.
Cara penggunaan	Gunakan setelah membaca petunjuk teknis sektoral. Lampiran ini membantu penyusun kajian menggabungkan data tematik, peta sintesis, arahan KDB/BCR, validasi lapangan, dan rekomendasi teknis untuk pengembangan kawasan.
Status dalam buku	Studi kasus terstruktur. Dapat ditempatkan sebagai lampiran akhir atau lampiran studi kasus, tanpa mengubah kedudukan lampiran teknis utama.

Daftar periksa awal pembaca

Tabel L17.2. Daftar periksa awal sebelum menggunakan lampiran studi kasus.

Pertanyaan kendali	Status/catatan
Apakah batas kawasan, rencana pengembangan, dan tingkat keputusan sudah jelas?	
Apakah data geologi, bentuk lahan, air tanah, resapan, curah hujan, penggunaan lahan, geologi teknik, dan bahaya geologi sudah tersedia pada skala yang sesuai?	
Apakah KDB/BCR, drainase, ruang terbuka, fungsi imbuhan, dan kebutuhan pengendalian air sudah dibaca sebagai satu sistem?	
Apakah rencana tapak telah diuji terhadap faktor pembatas, faktor penyisih, dan prioritas validasi lapangan?	
Apakah rekomendasi dapat diterjemahkan ke site plan, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, manajemen aset, dan pemantauan?	

Naskah Petunjuk Teknis

I. PENDAHULUAN

A. Kedudukan studi kasus

Kawasan pengembangan kota baru merupakan objek kajian yang kompleks karena tidak hanya berisi fungsi permukiman. Di dalamnya terdapat jaringan jalan, kawasan komersial, prasarana air, sistem drainase, ruang terbuka, fasilitas sosial, fasilitas umum, pengelolaan sampah, aset strategis, serta rencana pengembangan bertahap yang harus dibaca bersama kondisi lingkungan geologi. Oleh karena itu, KGL untuk kawasan kota baru perlu disusun sebagai kajian terpadu, bukan sebagai kajian sektoral yang berdiri sendiri.

Lampiran studi kasus ini disusun untuk memperlihatkan bagaimana beberapa petunjuk teknis KGL digunakan secara bersama pada satu kawasan pengembangan. Contoh pemutakhiran informasi geologi lingkungan Kota Baru Parahyangan menunjukkan bahwa kajian skala rinci perlu memadukan geologi permukaan, geologi teknik, hidrogeologi, fungsi resapan, neraca air, erosi tanah, mikrozonasi Vs30, deformasi permukaan, struktur geologi, penggunaan lahan, KDB/BCR, keamanan aset, serta validasi rencana tapak.

Dengan kedudukan tersebut, lampiran ini berfungsi sebagai jembatan antara pedoman umum KGL, petunjuk teknis sektoral, dan kebutuhan keputusan lapangan. Hasilnya diharapkan tidak hanya berupa peta kesesuaian permukiman, tetapi juga arahan intensitas ruang, pengendalian tata air, perlindungan fungsi resapan, mitigasi risiko, prioritas investigasi tapak, dan pemantauan jangka menengah.

B. Maksud dan tujuan

Lampiran ini dimaksudkan untuk memberikan contoh tata cara penerapan KGL terpadu skala rinci pada kawasan pengembangan kota baru, dengan menempatkan kasus Kota Baru Parahyangan sebagai bahan pembelajaran teknis. Tujuannya adalah:

- menjelaskan cara menggabungkan beberapa petunjuk teknis KGL dalam satu kawasan pengembangan;
- menyusun kerangka data minimum untuk kawasan kota baru yang memiliki fungsi ruang beragam;
- menerjemahkan hasil peta tematik menjadi arahan KDB/BCR, kesesuaian lahan, prioritas validasi, dan rekomendasi teknis;
- menghubungkan KGL dengan site plan, RDTR, KLHS, dokumen lingkungan, manajemen aset, dan pengendalian pemanfaatan ruang;
- memberi contoh bagaimana hasil pemutakhiran data dapat digunakan sebagai dasar pemantauan dan pengambilan keputusan bertahap.

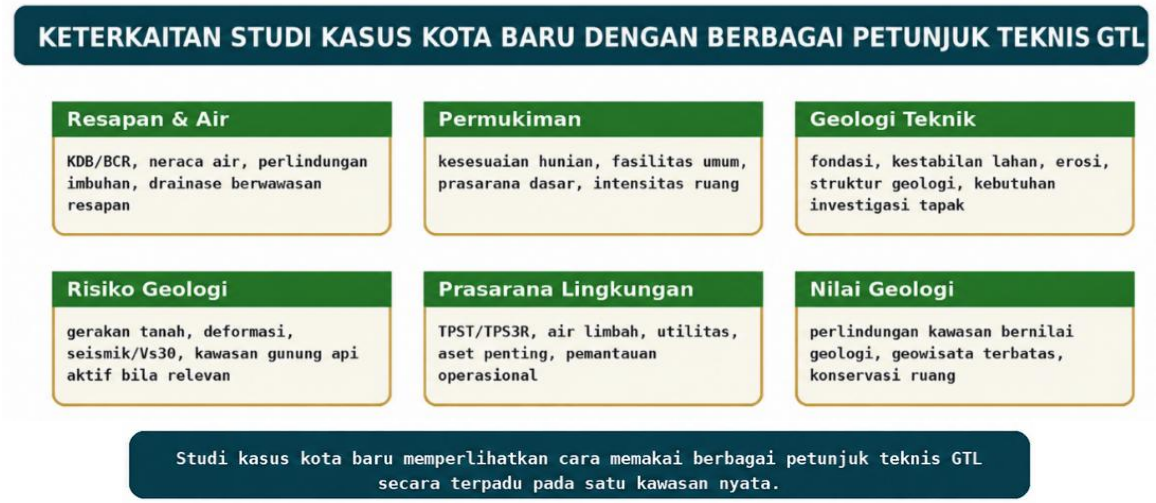
C. Ruang lingkup

Ruang lingkup lampiran ini meliputi penapisan awal kawasan, inventarisasi data, pemetaan tematik, analisis terpadu, sintesis kesesuaian, arahan KDB/BCR, rekomendasi site plan, validasi lapangan, manajemen aset, serta pemantauan. Kajian tidak dimaksudkan menggantikan desain geoteknik rinci, desain drainase, perhitungan struktur bangunan, atau dokumen lingkungan formal, tetapi memberi dasar geologi lingkungan untuk mengarahkan proses-proses tersebut.

D. Prinsip dasar

- Kawasan kota baru harus dibaca sebagai sistem ruang yang menggabungkan fungsi hunian, prasarana, air, drainase, ruang terbuka, aset, dan kegiatan ekonomi.
- KGL skala rinci harus mempertimbangkan hubungan antara daya dukung, daya tampung, fungsi resapan, faktor pembatas, dan konsekuensi pembangunan.
- KDB/BCR tidak boleh hanya dipahami sebagai angka intensitas bangunan, tetapi juga sebagai instrumen pengendalian tata air, resapan, limpasan, dan risiko lingkungan geologi.
- Peta sintesis harus dapat ditelusuri ke data tematik, skala, metode, dan hasil validasi lapangan.

- Rekomendasi harus operasional, dapat dimasukkan ke site plan, dapat diawasi, dan dapat diperbarui apabila data baru tersedia.



Gambar L17.2. Keterkaitan studi kasus kota baru dengan berbagai petunjuk teknis GTL.

II. KARAKTER KAWASAN PENGEMBANGAN KOTA BARU

Kawasan pengembangan kota baru memiliki karakter yang berbeda dari kawasan permukiman biasa. Pada umumnya, kota baru dibangun melalui tahapan jangka panjang, memiliki rencana induk kawasan, memuat infrastruktur utama, dan menampung perubahan penggunaan lahan yang cukup besar. Pada tahap awal, kawasan dapat masih didominasi lahan terbuka, pertanian, atau perdesaan. Pada tahap lanjut, kawasan berubah menjadi ruang terbangun dengan kepadatan yang meningkat, jaringan drainase baru, utilitas bawah permukaan, serta aset bernilai tinggi.

Perubahan tersebut membuat KGL kota baru harus memperhitungkan kondisi awal, kondisi berjalan, dan kondisi rencana. Kawasan yang tampak sesuai pada saat masih terbuka dapat berubah karakter setelah permukaan kedap air meningkat. Daerah dengan fungsi resapan dapat kehilangan kemampuan imbuhan apabila KDB/BCR tidak dikendalikan. Area yang memiliki lereng, tanah pelapukan, atau struktur geologi tertentu dapat memerlukan penyesuaian desain fondasi, drainase, dan utilitas.

Karena itu, KGL kota baru perlu menerapkan pendekatan temporal. Analisis tidak hanya menilai keadaan saat kajian dilakukan, tetapi juga memperkirakan perubahan akibat pembangunan bertahap. Data deformasi permukaan, pemantauan air tanah, perubahan penggunaan lahan, dan evaluasi aset menjadi penting untuk menilai apakah kawasan masih berada dalam batas aman dan sesuai dengan arahan geologi lingkungan.

III. DATA MINIMUM DAN METADATA

Data minimum untuk KGL terpadu skala rinci harus mencakup data dasar wilayah, data geologi lingkungan, data hidrologi-hidrogeologi, data geologi teknik, data bahaya geologi, data rencana pemanfaatan ruang, serta data aset dan rencana tapak. Setiap data harus disertai metadata berupa sumber, tahun, skala, metode perolehan, ketelitian, serta batas penggunaannya.

Tabel L17.3. Data minimum untuk KGL terpadu skala rinci kawasan kota baru.

Kelompok data	Contoh data	Fungsi dalam KGL terpadu	Keluaran yang diharapkan
Data dasar wilayah	batas kawasan, topografi, DEM, jaringan sungai, jalan, administrasi, rencana kawasan	menentukan satuan analisis, batas kajian, dan konteks rencana	peta dasar kajian dan satuan kerja spasial
Geologi dan bentuk lahan	litologi, struktur geologi, satuan geomorfologi, lereng, tanah pelapukan	membaca daya dukung, kestabilan lahan, proses permukaan, dan pembatas teknis	peta geologi lingkungan dan peta perhatian teknis
Air dan resapan	curah hujan, DAS/sub-DAS, hidrogeologi, muka air tanah, mata air, neraca air, kelas resapan	menilai fungsi imbuhan, pengendalian limpasan, serta arahan KDB/BCR	peta resapan, peta neraca air, arahan KDB/BCR
Geologi teknik dan seismik	satuan geologi teknik, kestabilan lahan, Vs30, kondisi fondasi, kebutuhan investigasi	menilai kelayakan tapak, kebutuhan desain, dan prioritas validasi	peta geologi teknik, zona Vs30, daftar lokasi validasi
Bahaya dan perubahan permukaan	gerakan tanah, erosi, banjir lokal, deformasi permukaan, perubahan lereng, riwayat kejadian	menilai risiko, tingkat perhatian, dan kebutuhan mitigasi	peta bahaya, peta erosi, peta deformasi, prioritas pemantauan
Rencana dan aset	site plan, penggunaan lahan, jaringan utilitas, aset terbangun, fasilitas publik, rencana tahap pengembangan	menghubungkan hasil KGL dengan keputusan desain dan pengelolaan aset	peta overlay rencana, matriks risiko aset, rekomendasi site plan

IV. KERANGKA KGL TERPADU SKALA RINCI

Kerangka KGL terpadu skala rinci disusun melalui tahapan penapisan awal, inventarisasi data, pemetaan tematik, analisis terpadu, sintesis arahan, validasi lapangan, rekomendasi teknis, dan pemantauan. Tahapan tersebut harus berjalan iteratif. Apabila hasil sintesis menunjukkan adanya pembatas kuat atau ketidakpastian tinggi, kajian harus kembali ke tahap data dan validasi.

Pada kawasan kota baru, tahapan kajian harus menghubungkan hasil analisis dengan keputusan operasional. Keluaran utama bukan hanya peta, tetapi juga rekomendasi yang dapat dipakai oleh pengelola kawasan, perencana tapak, konsultan teknik, pemerintah daerah, dan penyusun dokumen lingkungan. Oleh karena itu, setiap peta harus disertai narasi teknis, batas penggunaan, dan arahan tindak lanjut.

Gambar L17.3. Penyederhanaan Bagan alir penerapan KGL terpadu pada skala rinci untuk kawasan pengembangan kota baru.

V. PARAMETER DAN INDIKATOR KAJIAN

Parameter KGL kota baru harus dipilih berdasarkan kebutuhan keputusan. Parameter yang relevan untuk satu kawasan belum tentu sama dengan kawasan lain. Namun, untuk kawasan kota baru, parameter minimum yang perlu diperiksa meliputi daya dukung tanah dan batuan, lereng, bentuk lahan, air tanah, daerah resapan, neraca air, erosi, bahaya geologi, kondisi geologi teknik, Vs30, deformasi permukaan, penggunaan lahan, rencana tapak, serta aset strategis.

Tabel L17.4. Parameter dan indikator utama KGL kota baru.

Parameter	Indikator utama	Makna rekomendasi
Daya dukung fisik	litologi, geologi teknik, tanah pelapukan, lereng	membedakan kawasan yang relatif mendukung, membutuhkan syarat teknis, atau memerlukan investigasi rinci
Fungsi resapan dan tata air	DAS/sub-DAS, curah hujan, neraca air, air tanah, mata air, penggunaan lahan	menetapkan arahan KDB/BCR, ruang terbuka, drainase, dan perlindungan fungsi imbuhan
Bahaya dan proses permukaan	gerakan tanah, erosi, banjir lokal, deformasi permukaan, perubahan tutupan lahan	menentukan prioritas mitigasi, pengendalian pembangunan, dan pemantauan
Respons seismik dan geoteknik	Vs30, kondisi fondasi, satuan geologi teknik, struktur geologi	menetapkan kebutuhan penyelidikan rinci, desain fondasi, dan perhatian terhadap aset penting
Rencana dan aset	site plan, jaringan jalan, utilitas, bangunan, fasilitas umum, tahap pengembangan	menghubungkan hasil KGL dengan desain kawasan, manajemen aset, dan pengendalian risiko
Lingkungan dan nilai ruang	kawasan lindung, ruang terbuka, koridor sungai, nilai geologi, potensi geowisata terbatas	menjaga keseimbangan antara pengembangan, perlindungan, dan keberlanjutan

VI. PEMBACAAN LINTAS-LAMPIRAN

Studi kasus kota baru harus dibaca sebagai penerapan lintas-lampiran. Lampiran permukiman perkotaan memberi dasar kesesuaian hunian dan prasarana kota, tetapi belum cukup untuk membaca seluruh kebutuhan kawasan. Dalam praktik, penyusun kajian perlu menggabungkan petunjuk teknis daerah resapan, TPST/TPS3R, kawasan industri, kawasan gunung api aktif bila relevan, kawasan pertambangan bila ada riwayat pemanfaatan bahan galian, serta kawasan bernilai geologi apabila terdapat objek yang harus dilindungi.

Tabel L17.5. Pembacaan lintas-lampiran untuk studi kasus kawasan kota baru.

Rujukan lampiran	Relevansi untuk kawasan kota baru
Pedoman Umum KGL	kerangka metode, skala, satuan analisis, skoring, validasi, dan rekomendasi
Daerah Resapan Air	fungsi imbuhan, neraca air, KDB/BCR, ruang terbuka, drainase, dan pengendalian limpasan
Permukiman Perkotaan	kesesuaian hunian, fasilitas umum, intensitas ruang, prasarana dasar, dan syarat teknis
Permukiman Nonperkotaan	kawasan transisi, lahan campuran, pengembangan bertahap, dan hubungan dengan lahan produktif
Kawasan Industri	zona komersial, pergudangan, industri ringan, air limbah, akses, dan potensi dampak
Kawasan Peruntukan Pertambangan	riwayat galian, material timbunan, kestabilan bekas pemanfaatan, serta pemulihan lahan
Kawasan Gunung Api Aktif	bila kota baru berada pada wilayah vulkanik aktif: KRB, lahar, lereng, mata air, dan jalur evakuasi
TPST/TPS3R	tapak pengelolaan sampah, risiko pencemaran air tanah, pengendalian lindi, akses, dan pemantauan
Kawasan bernilai geologi	perlindungan nilai geologi, geowisata terbatas, konservasi, dan pengaturan akses

VII. CONTOH PENERAPAN: KOTA BARU PARAHYANGAN

A. Kedudukan contoh penerapan

Pemutakhiran informasi geologi lingkungan Kota Baru Parahyangan dapat dipakai sebagai pembelajaran karena kajiannya tidak hanya menilai kesesuaian lahan permukiman, tetapi juga memadukan banyak data teknis: morfostruktur, lereng, geologi, geologi teknik, hidrogeologi, drainase, kegempaan, Vs30, deformasi, erosi, serta rekomendasi pengendalian ruang. Penajaman dari Laporan Akhir GTL KBP 6 Januari 2025 menunjukkan bahwa pembacaan skala rinci dapat diturunkan sampai ke blok dan subblok pengembangan, sehingga rekomendasi tidak berhenti pada kelas kawasan, tetapi masuk ke arahan pemanfaatan, syarat teknis, dan prioritas validasi pada blok pengembangan tertentu.

Contoh tersebut menunjukkan bahwa KGL skala rinci dapat digunakan untuk mendukung tiga tingkat keputusan. Pertama, keputusan arahan ruang pada skala kawasan. Kedua, keputusan pengelolaan pada skala blok dan subblok, misalnya Bela Parahyangan Investindo, Duta Raya Investindo, Putera Jaya Intiland, Intimitra Jaya Investa, dan Bukit Cipta Mandiri. Ketiga, keputusan teknis pada skala tapak, seperti kebutuhan uji SPT/CPT, pilihan pondasi, pengendalian lereng, drainase, perlindungan air tanah, serta pemantauan aset dan prasarana.

B. Pelajaran utama dari pemutakhiran data

- Kajian kota baru perlu memadukan data historis dan data terbaru agar perubahan kondisi ruang dapat dibaca secara lebih baik.
- KDB/BCR perlu dikaitkan dengan kondisi resapan, neraca air, kemiringan lahan, penggunaan lahan, dan drainase.

- Data Vs30 dan geologi teknik membantu membaca kebutuhan perhatian terhadap respons tanah dan desain infrastruktur.
- Data deformasi permukaan multi-tahun membantu menentukan area prioritas validasi dan pemantauan, terutama pada sektor yang memiliki aset penting atau rencana pengembangan baru.
- Validasi site plan harus dilakukan dengan membaca hasil sintesis geologi lingkungan, bukan hanya berdasarkan status peruntukan ruang.

C. Model penerjemahan hasil KGL ke keputusan kawasan

Tabel L17.6. Penerjemahan kelas hasil sintesis ke keputusan pengembangan kota baru.

Kelas hasil sintesis	Makna keputusan	Contoh tindak lanjut
Kelas mendukung	pengembangan dapat diarahkan dengan syarat umum dan pemantauan dasar	penerapan KDB/BCR sesuai rencana, drainase memadai, perlindungan ruang terbuka tetap dijaga
Mendukung bersyarat	pengembangan dapat dilakukan dengan syarat teknis dan pengendalian intensitas	kajian geoteknik tambahan, penguatan drainase, pembatasan KDB/BCR, perlindungan resapan
Terbatas	fungsi ruang perlu dikendalikan dan hanya kegiatan tertentu yang sesuai	ruang terbuka, fungsi resapan, koridor air, fasilitas berintensitas rendah, pemantauan berkala
Tidak direkomendasikan	kegiatan tertentu sebaiknya dialihkan karena pembatas geologi kuat	alternatif lokasi, fungsi lindung, zona aman, atau kegiatan yang tidak menambah risiko
Kajian rinci	data belum cukup atau konsekuensi kegiatan tinggi	investigasi lapangan, geoteknik, hidrogeologi, pemantauan deformasi, dan evaluasi desain

D. Penajaman dari Laporan Akhir GTL KBP 6 Januari 2025

Laporan Akhir GTL KBP 6 Januari 2025 memberi rincian yang penting untuk memperkuat lampiran studi kasus ini. Laporan tersebut tidak hanya menyajikan kondisi geologi lingkungan pada skala kawasan, tetapi juga menurunkannya ke blok pengembangan dan subblok yang memiliki karakter geologi teknik, hidrogeologi, lereng, drainase, dan risiko yang berbeda. Dengan demikian, kasus KBP memperlihatkan bahwa KGL terpadu skala rinci harus mampu bergerak dari peta sintesis kawasan menuju arahan pengendalian ruang pada blok pengembangan yang nyata.

Penajaman tersebut penting karena kawasan kota baru biasanya dikembangkan bertahap. Pada tahap awal, keputusan masih berupa rencana induk, pola ruang, jaringan prasarana, dan intensitas umum. Pada tahap berikutnya, keputusan menjadi lebih rinci, mencakup lokasi fasilitas, jalan, drainase, ruang terbuka, prasarana air, pengelolaan limbah, serta bangunan pada blok tertentu. Karena itu, KGL harus mampu memberi rekomendasi yang bersifat berjenjang: arahan kawasan, arahan blok, arahan subblok, dan arahan validasi tapak.

Dalam konteks KBP, pembacaan tahun 2025 menunjukkan bahwa setiap blok memiliki karakter teknis yang berbeda. Perbedaan tersebut berkaitan dengan satuan batuan, tingkat pelapukan, kemiringan lahan, keterdapatan tanah lunak, muka air tanah, kemungkinan gerakan tanah, pola aliran permukaan, serta kebutuhan uji geoteknik. Rincian seperti ini memperkaya lampiran studi kasus karena menunjukkan bagaimana KGL terpadu dapat digunakan untuk menyesuaikan arahan pemanfaatan dan pengendalian ruang pada masing-masing blok pengembangan.

Tabel L17.7. Contoh Pembacaan blok pengembangan Kota Baru Parahyangan

Blok / subblok pengembangan	Karakter geologi lingkungan utama	Implikasi teknis dan arahan pengendalian
KBP Existing	Dataran bergelombang dengan aluvium lunak tebal, material lepas, dan muka air tanah dangkal.	Perlu perhatian terhadap daya dukung tanah, penurunan, dan kestabilan bangunan. Sebelum pembangunan fisik gedung dan non-gedung dianjurkan uji SPT dan CPT. Pondasi dalam berupa tiang pancang menjadi pilihan teknis utama pada bagian yang didominasi tanah lunak.
Bela Parahyangan Investindo - Subblok A	Breksi dan talus, lereng tidak seragam, jejak gerakan tanah lama, dan potensi gerakan tanah pada bagian tertentu.	Pemanfaatan ruang harus disertai pengendalian lereng, drainase permukaan, dan pembatasan pemotongan lereng. Pondasi dalam berupa bore pile menjadi arahan utama untuk bangunan penting.
Bela Parahyangan Investindo - Subblok B	Koluvium dan aluvium lunak, material lepas, muka air tanah dangkal, dan kondisi tanah yang memerlukan verifikasi geoteknik.	Diperlukan uji NSPT dan CPT sebelum pembangunan. Pondasi dalam berupa tiang pancang perlu dipertimbangkan. Intensitas bangunan perlu dikendalikan bersama sistem drainase dan pengelolaan air tanah.
Duta Raya Investindo - Subblok A	Breksi lepas pada lereng dengan potensi gerakan tanah.	Arahan utama adalah pengendalian lereng, stabilisasi lahan, drainase yang baik, dan penggunaan bore pile untuk bangunan yang memerlukan keamanan tinggi.
Duta Raya Investindo - Subblok B	Aluvium lunak dengan muka air tanah dangkal dan potensi keterbatasan daya dukung.	Perlu uji NSPT dan CPT, serta pertimbangan pondasi dalam berupa tiang pancang. Pengelolaan drainase dan perlindungan air tanah menjadi bagian dari rekomendasi teknis.
Duta Raya Investindo - Subblok C	Breksi tegar/padu pada punggungan, dengan erosi yang perlu dikendalikan.	Pada bagian yang stabil dapat dipertimbangkan pondasi dangkal seperti lajur/memanjang, raft, setempat, laba-laba, dan tapak, dengan uji CPT bila diperlukan. Pengendalian erosi tetap menjadi syarat penting.
Putera Jaya Intiland - Subblok A	Breksi lepas pada lereng yang memerlukan perhatian terhadap kestabilan.	Pondasi dalam berupa bore pile dianjurkan. Pemanfaatan harus disertai pengendalian lereng, drainase, dan pembatasan kegiatan pada area yang memiliki pembatas tinggi.
Putera Jaya Intiland - Subblok C	Breksi tegar/padu dengan kondisi relatif lebih mendukung untuk fondasi dangkal pada bagian tertentu.	Dapat dipertimbangkan pondasi dangkal seperti lajur/memanjang, raft, setempat, laba-laba, dan tapak, setelah dikonfirmasi melalui investigasi teknis sesuai kebutuhan.
Intimitra Jaya Investa - Subblok C	Breksi dan batupasir padu pada lereng punggungan yang miring ke utara, dengan potensi erosi dan gerakan tanah.	Pengembangan memerlukan pengendalian lereng dan drainase. Bore pile dianjurkan pada bangunan penting atau lokasi yang memiliki pembatas geoteknik.
Intimitra Jaya Investa - Subblok B	Aluvium lunak, material lepas, muka air tanah dangkal, dan kondisi tanah yang memerlukan uji lebih rinci.	Diperlukan uji NSPT dan CPT. Pondasi dalam berupa tiang pancang perlu dipertimbangkan, disertai pengendalian tata air dan pemantauan perubahan kondisi lahan.
Bukit Cipta Mandiri - Subblok A	Batupasir pada punggungan memanjang utara-selatan, berlereng terjal, dan memiliki potensi gerakan tanah.	Pemanfaatan ruang perlu dibatasi pada bagian lereng rawan. Bore pile dianjurkan untuk bangunan penting. Pengendalian lereng, drainase, vegetasi penutup, dan validasi tapak menjadi prioritas.
Bukit Cipta Mandiri - Subblok C	Batugamping tegar/padu pada punggungan perbukitan memanjang barat-timur yang miring ke utara.	Pada bagian yang stabil dapat dipertimbangkan pondasi dangkal seperti lajur/memanjang, raft, setempat, laba-laba, dan tapak. Perlindungan bentuk lahan dan pengendalian limpasan tetap diperlukan.

E. Contoh pembacaan blok: Bukit Cipta Mandiri

Blok Bukit Cipta Mandiri dapat dipakai sebagai contoh bagaimana KGL terpadu skala rinci membaca satu blok pengembangan secara lebih operasional. Pada umumnya blok ini berada pada lereng perbukitan yang miring ke arah utara dan relatif terjal. Secara geologi, blok ini berkaitan dengan satuan batu lanau dan batu lempung, batu pasir dan serpih, breksi gunung api, serta endapan kipas aluvial pada alur dan lembah Sungai Cikumpai di bagian utara.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa fungsi resapan dan imbuhan air tanah tidak dapat diasumsikan sama di seluruh blok. Sebagian satuan batuan kurang berfungsi sebagai daerah resapan, produktivitas akuifer umumnya kecil, dan air tanah dangkal hanya dapat diperoleh secara terbatas pada zona pelapukan. Dengan demikian, arahan KDB/BCR, ruang terbuka, drainase, dan pengelolaan air hujan perlu disusun dengan memperhatikan keterbatasan hidrogeologi tersebut.

Dari sisi kestabilan lahan, batuan yang telah melapuk sedang hingga tinggi dan terkekarkan cukup kuat dapat ditutupi tanah pelapukan atau bahan rombakan berupa lanau pasiran dengan ketebalan bervariasi. Kondisi ini dapat meningkatkan potensi erosi dan gerakan tanah, terutama pada lereng yang berbatasan dengan lembah dan alur sungai, lebih-lebih bila dipicu oleh hujan tinggi, perubahan drainase, pemotongan lereng, pembebanan, atau guncangan gempa bumi.

Pembacaan Bukit Cipta Mandiri memperlihatkan bahwa rekomendasi KGL untuk kota baru harus lebih rinci daripada sekadar menyatakan kawasan sesuai atau tidak sesuai. Rekomendasi perlu memuat bagian yang dapat dikembangkan, bagian yang harus dibatasi, bagian yang memerlukan investigasi geoteknik, jalur drainase yang harus dipertahankan, serta lokasi yang perlu dipantau secara berkala. Dengan cara ini, KGL menjadi instrumen langsung untuk membaca site plan dan mengarahkan pembangunan pada tingkat blok.

Tabel L17.8. Contoh arahan pemanfaatan dan pengendalian ruang skala blok.

Komponen pembacaan	Makna teknis pada Bukit salah satu blok pengembangan	Arahan pemanfaatan dan pengendalian
Morfologi dan lereng	Lereng perbukitan relatif terjal dan miring ke arah utara, dengan bagian tertentu berbatasan dengan lembah dan alur sungai.	Pengembangan intensif perlu diarahkan ke bagian yang lebih stabil. Lereng terjal dan sisi lembah perlu dibatasi, dilindungi, atau hanya digunakan untuk fungsi yang tidak menambah beban dan risiko.
Geologi dan bahan penyusun	Terdapat satuan batu lanau-batu lempung, batu pasir-serpih, breksi gunung api, dan endapan kipas aluvial pada bagian tertentu.	Setiap satuan perlu dibaca sebagai satuan analisis. Rekomendasi pondasi, pemotongan lahan, dan perkuatan harus mengikuti karakter bahan penyusun dan tingkat pelapukannya.
Air tanah dan resapan	Produktivitas akuifer umumnya kecil; air tanah dangkal dapat muncul terbatas pada zona pelapukan.	KDB/BCR perlu dikendalikan agar tidak seluruh permukaan berubah menjadi kedap air. Drainase perlu dirancang untuk mengurangi limpasan, menjaga infiltrasi yang memungkinkan, dan mencegah konsentrasi aliran pada lereng.
Erosi dan gerakan tanah	Tanah pelapukan dan bahan rombakan lanau pasiran dapat mudah tererosi dan berpotensi mengalami gerakan tanah pada bagian yang sensitif.	Perlu pengendalian bukaan lahan, konservasi vegetasi, penataan saluran, perlindungan lereng, dan kajian stabilitas pada area yang akan dibangun.
Geologi teknik dan fondasi	Subblok A berasosiasi dengan batupasir pada punggungan terjal; Subblok C berasosiasi dengan batugamping tegar/padu.	Subblok A memerlukan perhatian terhadap pondasi dalam dan stabilitas lereng. Subblok C dapat mempertimbangkan pondasi dangkal pada bagian stabil, tetapi tetap memerlukan verifikasi teknis.

Validasi site plan	Rencana jalan, kavling, fasilitas umum, dan prasarana dapat memotong satuan lahan dengan pembatas berbeda.	Site plan perlu diuji terhadap peta geologi teknik, lereng, drainase, resapan, dan potensi gerakan tanah. Bagian dengan pembatas tinggi perlu menjadi prioritas validasi lapangan.

F. Penguatan arahan drainase, resapan, dan pengendalian intensitas ruang

Laporan 2025 juga menegaskan pentingnya membaca sistem drainase dalam kawasan kota baru. Wilayah KBP dapat dibaca melalui empat wilayah tangkapan air, yaitu Tangkapan Air Citarum, Tangkapan Air Selatan Bela-Duta-Putra, Tangkapan Air Tengah Mitra-Mandiri, dan Tangkapan Air Utara Bukit Cipta Mandiri. Pembacaan ini penting karena pembangunan kota baru akan mengubah tutupan lahan, meningkatkan limpasan, dan mengubah arah pengaliran pada subkawasan tertentu.

Dalam lampiran studi kasus ini, informasi tangkapan air harus diterjemahkan ke dalam arahan KDB/BCR, sistem drainase, ruang terbuka, dan kebutuhan pemantauan. KDB/BCR yang lebih tinggi hanya layak dipertimbangkan pada bagian yang memiliki daya dukung memadai, risiko rendah, dan sistem drainase yang telah dirancang dengan baik. Pada bagian yang memiliki fungsi resapan, lereng sensitif, tanah lunak, atau aliran terkonsentrasi, KDB/BCR perlu dibatasi dan dikompensasi dengan ruang terbuka, pengendalian limpasan, serta perlindungan alur air.

Hasil penilaian drainase bawah permukaan dalam laporan 2025 juga menunjukkan bahwa kerentanan pencemaran air tanah perlu dibaca secara sistematis. Walaupun pada beberapa bagian kawasan dinilai masih dapat diterima untuk permukiman, prinsip kehati-hatian tetap diperlukan karena perubahan penggunaan lahan, peningkatan kepadatan bangunan, dan perubahan sistem pembuangan domestik dapat mengubah kondisi awal. Oleh sebab itu, rekomendasi KGL perlu selalu dihubungkan dengan desain drainase, pengelolaan air limbah, pemantauan kualitas air, dan pembaruan data.

VIII. ARAHAN KDB/BCR DAN PENGENDALIAN TATA AIR

Pada kawasan kota baru, KDB/BCR memiliki posisi strategis karena menjadi instrumen pengendalian intensitas ruang sekaligus instrumen pengendalian tata air. KDB/BCR yang terlalu tinggi pada area dengan fungsi resapan penting dapat meningkatkan limpasan, menurunkan imbuhan air tanah, dan memperbesar kebutuhan prasarana drainase. Sebaliknya, KDB/BCR yang dikendalikan dengan baik dapat menjaga keseimbangan antara ruang terbangun, ruang terbuka, dan sistem air kawasan.

Arahan KDB/BCR dalam KGL tidak boleh dibuat hanya berdasarkan kebutuhan desain kawasan. Arahan tersebut perlu membaca curah hujan, kelas resapan, kemiringan lahan, jenis tanah, hidrogeologi, penggunaan lahan, drainase, serta kebutuhan ruang terbuka. Pada kawasan yang telah berkembang, arahan KDB/BCR juga harus dikaitkan dengan aset terbangun, kapasitas saluran, kondisi limpasan, dan risiko genangan lokal.

Tabel L17.9. Arahan umum KDB/BCR berbasis fungsi resapan dan pembatas geologi.

Kondisi kawasan	Arahan umum KDB/BCR	Tujuan pengendalian
Fungsi resapan tinggi	KDB/BCR rendah sampai sedang, ruang terbuka diperkuat, infiltrasi alami dijaga	perlindungan imbuhan dan pengendalian limpasan
Fungsi resapan sedang	KDB/BCR sedang dengan syarat drainase, kolam retensi, dan ruang hijau efektif	keseimbangan antara pengembangan dan tata air
Fungsi resapan rendah	KDB/BCR dapat lebih fleksibel dengan syarat pengelolaan limpasan dan kualitas air	pengendalian banjir lokal dan kualitas lingkungan

Area dengan pembatas geologi	KDB/BCR dibatasi dan memerlukan validasi lapangan	pencegahan peningkatan risiko teknis
Area aset penting	KDB/BCR mengikuti hasil evaluasi tapak, fondasi, drainase, dan pemantauan	perlindungan nilai aset dan keselamatan pengguna

IX. VALIDASI SITE PLAN DAN MANAJEMEN ASET

Validasi site plan merupakan tahap penting karena rencana tapak sering memuat keputusan yang lebih rinci dibanding rencana tata ruang. Jalan, utilitas, drainase, bangunan utama, fasilitas umum, ruang terbuka, dan lokasi aset harus diuji terhadap hasil sintesis KGL. Pada tahap ini, hasil peta tidak boleh dipakai secara mekanis. Setiap area prioritas perlu diperiksa kembali melalui observasi lapangan, pengukuran teknis, dan kajian rinci sesuai konsekuensi kegiatan.

Manajemen aset dalam kawasan kota baru perlu memperhatikan hubungan antara lokasi aset dan pembatas geologi. Aset yang berada pada area dengan pembatas lereng, perubahan permukaan, kerentanan air, atau kebutuhan drainase khusus harus ditempatkan dalam daftar pemantauan. Pemeringkatan keamanan aset membantu pengelola kawasan menyusun prioritas tindakan, mulai dari pemeriksaan rutin, perbaikan drainase, penyelidikan rinci, penguatan desain, hingga pembatasan pengembangan.

Tabel L17.10. Prioritas validasi site plan dan aset kawasan.

Prioritas validasi	Kriteria umum	Tindak lanjut
Sangat tinggi	rencana bangunan utama, utilitas penting, area dengan deformasi atau lereng sensitif	investigasi rinci sebelum keputusan tapak
Tinggi	area resapan penting, perubahan penggunaan lahan besar, area dengan erosi atau drainase bermasalah	validasi lapangan dan penyesuaian desain
Sedang	area pengembangan bertahap dengan pembatas moderat	syarat teknis dan pemantauan berkala
Rendah	area yang relatif mendukung dan telah memiliki data cukup	pemantauan dasar dan dokumentasi perubahan

X. KELUARAN KAJIAN

KGL terpadu skala rinci untuk kawasan kota baru harus menghasilkan keluaran yang dapat langsung digunakan dalam pengambilan keputusan. Keluaran tidak cukup berupa laporan naratif, tetapi perlu dilengkapi peta tematik, peta sintesis, matriks rekomendasi, daftar area prioritas, dan arahan pemantauan.

- peta dasar kawasan dan satuan analisis spasial;
- peta geologi lingkungan dan peta geologi teknik;
- peta DAS/sub-DAS, daerah resapan, neraca air, dan arahan KDB/BCR;
- peta erosi, kestabilan lahan, bahaya geologi, dan perhatian teknis;
- peta Vs30 dan/atau informasi respons seismik sesuai ketersediaan data;
- peta deformasi permukaan dan prioritas validasi;
- peta kesesuaian lahan permukiman dan fungsi ruang pendukung;
- matriks rekomendasi site plan, pengendalian intensitas, pengelolaan air, mitigasi, dan pemantauan;
- daftar prioritas validasi lapangan dan investigasi rinci.

XI. FORMAT LAPORAN STUDI KASUS

Tabel L17.11. Format laporan studi kasus KGL terpadu skala rinci.

Bagian laporan	Isi minimum
Ringkasan eksekutif	tujuan kajian, temuan utama, kelas kesesuaian, pembatas utama, dan rekomendasi prioritas
Pendahuluan	latar belakang kawasan, kebutuhan keputusan, ruang lingkup, dan batas kajian
Data dan metode	sumber data, metadata, skala, metode analisis, satuan analisis, dan keterbatasan
Analisis tematik	geologi, bentuk lahan, air, resapan, erosi, geologi teknik, Vs30, deformasi, penggunaan lahan, dan rencana tapak
Sintesis KGL	kelas kesesuaian, faktor pembatas, faktor penyisih, arahan KDB/BCR, dan prioritas validasi
Rekomendasi teknis	site plan, pengendalian ruang, mitigasi, pengelolaan air, manajemen aset, dan pemantauan
Lampiran teknis	peta, tabel data, daftar validasi, foto lapangan, catatan metode, dan metadata

XII. PEMANTAUAN DAN PEMUTAKHIRAN

KGL kota baru harus diperlakukan sebagai informasi yang dapat diperbarui. Kawasan kota baru berkembang secara bertahap, sehingga perubahan penggunaan lahan, peningkatan permukaan kedap air, perubahan drainase, perubahan muka air tanah, erosi, deformasi, dan kondisi aset harus dipantau. Hasil pemantauan digunakan untuk memperbarui peta, mengevaluasi rekomendasi, dan menyesuaikan rencana pengembangan.

Pemantauan minimum mencakup perubahan tutupan lahan, fungsi resapan, debit dan kualitas air, kondisi drainase, erosi tanah, stabilitas lereng, deformasi permukaan, kondisi aset penting, dan efektivitas tindakan mitigasi. Frekuensi pemantauan ditentukan berdasarkan tingkat risiko, laju pembangunan, dan nilai aset yang dilindungi.

XIII. KESIMPULAN LAMPIRAN

Studi kasus KGL terpadu skala rinci untuk kawasan pengembangan kota baru menunjukkan bahwa satu kawasan nyata dapat menjadi ruang penerapan berbagai petunjuk teknis GTL secara bersama. Kota baru tidak cukup dibaca sebagai permukiman perkotaan, karena di dalamnya terdapat fungsi resapan, sistem air, prasarana lingkungan, aset strategis, risiko geologi, kawasan terbuka, dan rencana pengembangan yang berubah menurut waktu.

Pengalaman Kota Baru Parahyangan memperlihatkan pentingnya pemutakhiran data geologi lingkungan untuk mendukung keputusan tapak. Integrasi geologi, hidrogeologi, geologi teknik, drainase, KDB/BCR, Vs30, deformasi, erosi, dan pembacaan blok pengembangan membuat rekomendasi menjadi lebih operasional. Penajaman dari Laporan Akhir GTL KBP 6 Januari 2025 menunjukkan bahwa arahan ruang perlu diturunkan sampai ke blok dan subblok, misalnya pada Bela Parahyangan Investindo, Duta Raya Investindo, Putera Jaya Intiland, Intimitra Jaya Investa, dan Bukit Cipta Mandiri. Dengan demikian, KGL terpadu tidak hanya menghasilkan peta kesesuaian, tetapi juga arahan pondasi, drainase, pengendalian lereng, perlindungan air tanah, pembatasan intensitas, serta prioritas validasi site plan.

Lampiran ini dapat digunakan sebagai model penyusunan studi kasus lain pada kawasan kota baru di berbagai lingkungan geologi. Parameter dan bobot dapat disesuaikan dengan konteks setempat, tetapi prinsip dasarnya tetap sama: ruang harus

dibaca secara terpadu sebelum dirancang, dibangun, dan dikelola.

Lampiran dalam buku ini bukan sekadar bagian tambahan, melainkan ruang kerja yang memperlihatkan bagaimana Geologi Tata Lingkungan diterapkan secara nyata. Dengan susunan Lampiran 1 sampai 17, buku ini memperlihatkan tiga Tingkat penerapan KGL: perangkat metodologis umum, petunjuk teknis tematik untuk peruntukan dan kawasan tertentu, serta penerapan terpadu untuk membaca system hulu-tengah-hilir dan kawasan pengembangan kota baru secara rinci. Di dalam tabel, bagan, peta, matriks, dan contoh rekomendasi, pembaca dapat melihat bahwa gagasan GTL harus berakhir pada sesuatu yang dapat diperiksa, ditelusuri, dan digunakan. Ilmu geologi menjadi kuat ketika ia mampu turun dari konsep menuju data, dari data menuju analisis, dari analisis menuju peta, dan dari peta menuju keputusan yang menjaga ruang hidup. Lampiran mengingatkan bahwa bumi tidak cukup dipahami dengan kata-kata; ia perlu dibaca melalui bukti, ukuran, lokasi, proses, dan keteraturan. Di sinilah GTL bekerja: menjahit pengetahuan kebumian menjadi dasar tindakan yang lebih hati-hati, lebih adil, dan lebih bertanggung jawab.

Gambar TP.1. JEJAK KARYA DALAM PENGABDIAN “Kumpulan buku yang lahir dari hampir 38 tahun pengabdian di Badan Geologi, KESDM

TENTANG PENULIS

Ir. Oki Oktariadi, M.Si. adalah geolog lingkungan yang lama mengabdikan diri di Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Lahir di Bandung pada 19 Oktober 1961, ia menempuh pendidikan Sarjana Geologi di Universitas Padjadjaran dengan bidang Konservasi Air Tanah, kemudian melanjutkan pendidikan pascasarjana Geologi di Universitas Padjadjaran dengan bidang Ilmu Kewilayahan Sumber Daya Geologi.Sejak tahun 1987, Oki Oktariadi menekuni pekerjaan sebagai Fungsional Penyelidik Bumi di bidang geologi lingkungan dan geologi tata lingkungan.

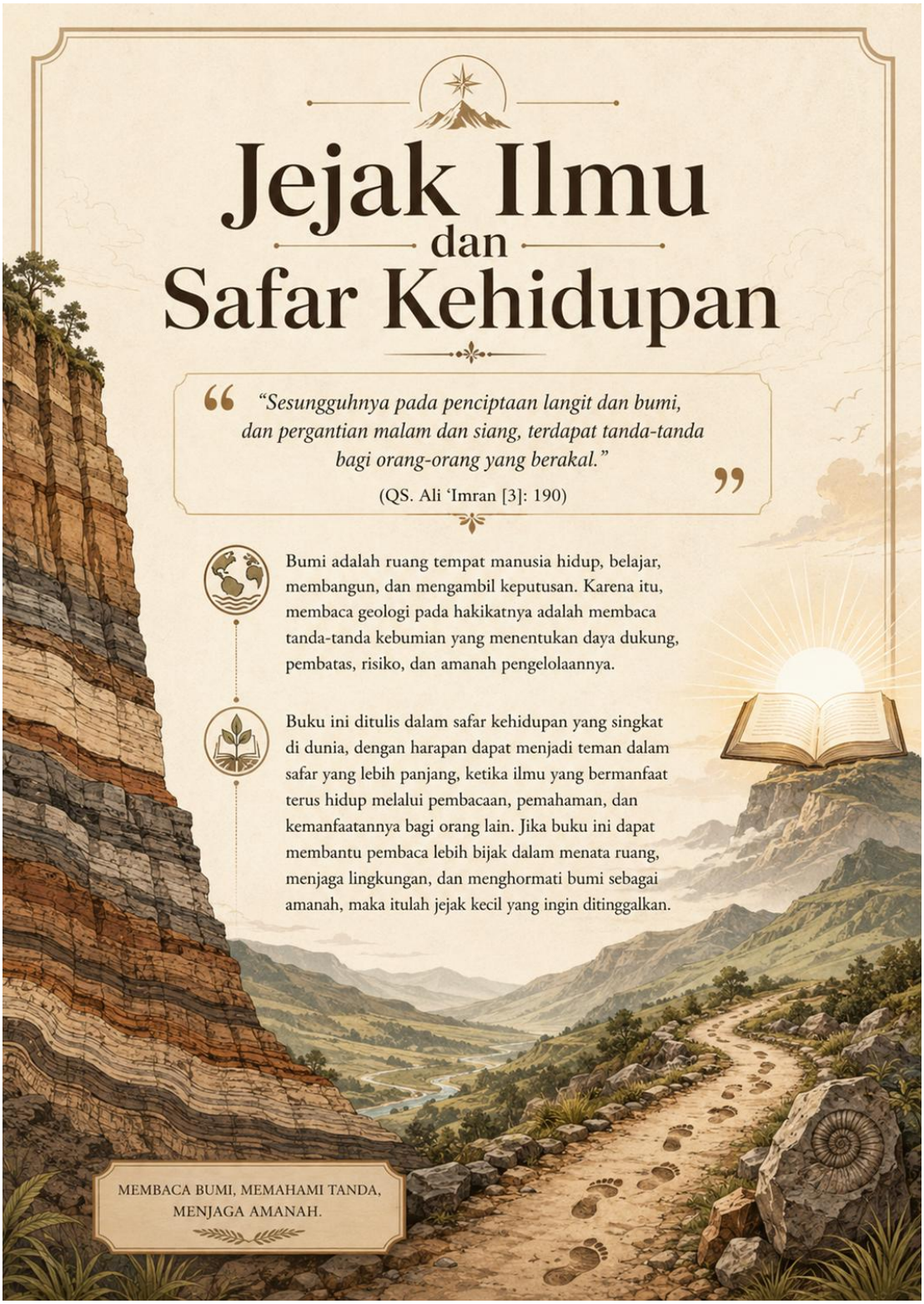
Dalam perjalanan profesionalnya, ia banyak terlibat dalam kajian tata ruang, pengelolaan lingkungan, air tanah, kawasan rawan bencana geologi, kawasan bernilai geologi, geowisata, dan geopark. Baginya, geologi bukan hanya ilmu tentang batuan dan proses bumi, melainkan bahasa alam yang perlu dibaca sebelum manusia membangun, menata ruang, dan mengambil keputusan lingkungan.

Selain bekerja di lapangan dan menyusun kajian teknis, ia juga aktif sebagai pengajar berbagai pendidikan dan pelatihan geologi lingkungan, narasumber dalam lokakarya geologi lingkungan, konservasi geologi, geowisata, dan geopark, serta pernah memimpin penyusunan rancangan standar kompetensi kepemanduan geowisata. Ia juga berperan dalam pengelolaan media ilmiah dan populer kebumian, antara lain sebagai Ketua Dewan Redaksi Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi serta Buletin Geologi Tata Lingkungan, dan pernah menjadi anggota Dewan Redaksi Majalah Geologi Populer Geomagz.

Karya tulisnya tersebar dalam bentuk makalah ilmiah, tulisan populer, laporan penyelidikan, dan buku. Tema yang sering ia angkat meliputi geologi lingkungan, bahaya tsunami, amblesan tanah, kawasan resapan air, tapak tempat pengolahan sampah, warisan geologi, gunung api, dan pengembangan geowisata. Sejumlah buku yang pernah ditulis atau disusunnya antara lain berkaitan dengan Geologi Lingkungan Pulau Jawa, Geologi Lingkungan Jabodetabek-

Punjur, Warisan Geologi Nusantara, Geowisata, Geologi Lingkungan Cekungan Bandung, serta berbagai buku geowisata daerah di Indonesia.

Melalui buku Statuta Geologi Tata Lingkungan, Oki Oktariadi merangkum pengalaman panjangnya dalam membaca hubungan antara tanah, batuan, air tanah, bentuk lahan, bahaya geologi, nilai geologi, dan keputusan ruang. Buku ini menjadi bagian dari ikhtiarnya untuk mewariskan cara pandang bahwa pembangunan yang baik harus dimulai dengan memahami bumi: mengenali kemampuannya, menghormati batasnya, dan mengelola risikonya secara bertanggung jawab.



Gambar TP.2. Jejak Ilmu dan Safar Kehidupan