

Pengantar
Geologi
lingkungan

Edisi 3 (2018)

SRI MULYANINGSIH



PENGANTAR GEOLOGI
LINGKUNGAN

Edisi 3

SRI MULYANINGSIH

AKPRIND PRESS

Undang-undang Nomor 7 tahun 1987

Tentang Hak Cipta

Pasal 44

- (1) Barang siapa dengan sengaja mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan /atau denda paling banyak Rp.100.000.000,00 (seratus juta rupiah)
- (2) Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan / atau denda paling banyak Rp.50.000.000,00 (lima puluh juta rupiah)

PENGANTAR GEOLOGI LINGKUNGAN

Hak cipta 2018 pada penullis, dilarang keras mengutip, menjiplak, mem fotocopy baik sebagian atau keseluruhan isi buku ini tanpa mendapat izin tertulis dari pengarang dan penerbit

Penulis : Sri Mulyaningsih

Page Make Up : Sri Mulyaningsih

Desain Cover : -

Diterbitkan Oleh : AKPRIND PRESS

ISBN : 978-602-7619-68-5

HAK CIPTA DILINDUNGI OLEH UNDANG-UNDANG

KATA PENGANTAR

Geologi Lingkungan merupakan cabang ilmu geologi yang mempelajari tentang segala hal yang berhubungan dengan interaksi antara manusia dan alam lingkungannya. Interaksi tersebut meliputi pemanfaatan dan pengembangan sumber daya alam, akibat (dampak) yang ditimbulkan oleh adanya kegiatan pemanfaatan dan pengembangan sumber daya alam tersebut, bencana alam dan kemampuan alam dalam menyerap atau mengolah kembali buangan / sampah yang dihasilkan oleh aktivitas manusia.

Pada Bab pertama dibahas mengenai filosofi geologi lingkungan. Latar belakang berkembangnya konsep geologi lingkungan sebagai respon balik keprihatinan para ahli atas kondisi lingkungan yang semakin kritis. Hal itu makin diperparah dengan makin maraknya penebangan hutan, sehingga lapisan tanah menjadi kritis dan memicu terjadinya longsor atau gerakan massa di mana-mana, gempa bumi yang hampir terjadi setiap hari, letusan gunung api yang telah memakan ribuan korban jiwa dan keinginan manusia dalam memajemen lingkungan oleh kejadian-kejadian yang tidak mengenakkan tersebut.

Pada Bab dua dibahas mengenai analisis geomorfologi yang dapat diaplikasikan dalam pengelolaan geologi lingkungan. Geologi lingkungan tidak akan lepas dari aspek geomorfologi. Dengan geomorfologi, pengembangan dan perencanaan wilayah, penelaahan kebencanaan dan mitigasi bencana, penyusunan peta geologi teknik dalam rangka pengadaan sarana dan prasarana umum, sistem investigasi geologi lingkungan dan segala hal yang berhubungan dengan pemanfaatan dan pengembangan sumber daya alam; dapat diidentifikasi yang selanjutnya dikembangkan sesuai dengan kebutuhannya.

Bab tiga hingga Bab lima membahas mengenai material penyusun bumi, yaitu mineral, batuan, tanah dan air; dan proses-proses geologi yang bekerja di dalamnya. Proses-proses geologi tersebut adalah proses endogenik yaitu tektonika dan proses eksogenik, yaitu pelapukan dan erosi. Proses-proses geologi tersebut selanjutnya dijabarkan menurut potensi bencana geologinya, yaitu gerakan massa, gempa bumi, letusan gunung api dan bencana terestrial lainnya. Dalam buku ini, pembaca diajak untuk memahami mekanisme dan sifat-sifat bencana geologi, serta mengenal potensi geologi yang berkembang dalam wilayah tersebut. Sehingga pembaca dapat memperkirakan potensi bencana geologi apa dan potensi sumber daya alam apa yang ada di wilayahnya, dan dengan mandiri dapat mengantisipasi jika potensi bencana tersebut menjadi kenyataan, serta dapat mengelola sumber daya alam di daerahnya sesuai dengan karakteristik sumber daya alam tersebut, sehingga tidak akan menimbulkan kerusakan akibat pemanfaatannya. Dengan pengetahuan yang cukup, kerentanan suatu wilayah dapat diminimalkan dengan sikap kehati-hatian masyarakat. Dalam bab ini melukiskan bahwa sikap serakah manusia dapat menimbulkan kerugian yang berkepanjangan.

Indonesia adalah wilayah dengan tektonika aktif, yang merupakan pertemuan tiga lempeng utama di dunia, yaitu lempeng India-Australia dengan lempeng Eurasia; serta lempeng Pasifik dengan lempeng Eurasia. Telah diketahui bersama bahwa konsekuensi dari posisi geologi Indonesia tersebut adalah kerentanan dan kerawanan wilayahnya terhadap potensi bencana alam. Pembaca diajak untuk memandang suatu bencana alam bukan sekedar proses alam yang berpengaruh negatif. Konsekuensi posisi Indonesia tersebut juga sebagai penghantar dan pengontrol terhadap melimpahnya sumber daya alam, seperti minyak bumi, panas bumi, emas, perak, tembaga, batubara, bahan galian golongan C dan lain-lain. Pengetahuan dan pemahaman yang cukup tentang pengelolaan sumber daya alam yang berkesinambungan, sebagai daya dukung dalam pengembangan geologi lingkungan, dengan tetap memperhatikan tingkat kerentanan wilayah ini, akan menjadi tolok ukur dalam keberhasilan pembangunan Indonesia seutuhnya.

Berbagai aktivitas manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya pada masa kini maupun masa depan, harus menggunakan metode-metode yang aman dalam mencari, menemukan, mengambil dan menggunakan sumber daya alam yang tersedia. Kenyataan bahwa kini banyak dijumpai nutrisi yang buruk, permukiman yang tidak layak, pencemaran air sehingga menjadi tidak layak minum, udara yang kotor dengan lapisan ozon yang makin menipis, banyaknya pengangguran di mana-mana, serta kriminalitas yang terus meningkat, adalah masalah kita semua. Dengan peran serta semua pihak, masyarakat, para *stockholders*, dan pemerintah, maka semua itu dapat

diminimalkan. Pengembangan daya dukung lingkungan yang berkesinambungan (*Sustainable Development*), akan memberikan solusi bagaimana agar kehidupan kita menjadi lebih baik, bukan sekedar sebagai perubahan lingkungan semata.

Kiranya, mudah-mudahan buku ini dapat bermanfaat, baik bagi mahasiswa Program Studi Teknik Geologi, Teknik Planologi dan Teknik Sipil di seluruh Indonesia maupun masyarakat awam, para stockholders dan pembuat keputusan dalam mempelajari konsep geologi lingkungan.

Yogyakarta, Juni 2018

Penyusun

Dr. Sri Mulyaningsih

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN BALIK JUDUL	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
BAB 1. KONSEP DASAR GEOLOGI LINGKUNGAN	1
1.1 Pengertian Geologi Lingkungan	1
1.2 Cakupan Geologi Lingkungan	4
1.3 Krisis Geologi Lingkungan	5
BAB 2. ANALISIS GEOLOGI LINGKUNGAN	13
2.1 Analisis Geomorfologi	13
2.2 Sebaran Litologi dan Horizon Tanah	26
2.3 Distribusi Struktur Geologi dan Analisis Deformasi	29
2.4 Lingkup Pekerjaan Geologi Lingkungan	34
BAB 3. MATERIAL PENYUSUN KERAK BUMI	37
3.1 Struktur Bumi	37
3.2 Kealamian Mineral dan Batuan	42
3.3 Jenis dan Sifat Batuan	45
3.4 Mineral dan Batuan dalam Geologi Lingkungan	63
BAB 4. PELAPUKAN DAN HASIL-HASILNYA	69
4.1 Pelapukan	69
4.2 Profil Tanah	85
4.3 Tanah dan Peranannya dalam Geologi Lingkungan	88
BAB 5. AIR DAN SISTEM HIDROLOGI	97
5.1 Bentuk Air di Alam	97
5.2 Konsep Umum Hidrogeologi dan Geohidrologi	99
5.3 Air Tanah dan Sistem Akifer	100

5.4 Permasalahan Air dalam Geologi Lingkungan	105
BAB 6. BENCANA GEOLOGI DAN PERMASALAHAN GEOLOGI LINGKUNGAN	111
6.1 Bencana Geologi	111
6.2 Penanggulangan Bencana	200
6.3 Isu Implementasi Kebijakan Penanggulangan Bencana Nasional	209
BAB 7. SAMPAH	215
7.1 Permasalahan Sampah	215
7.2 Dampak yang Ditimbulkan oleh Sampah	216
7.3 Pengolahan Sampah	218
7.4. Pengelolaan Sampah (Solid Waste Management)	220
BAB 8. KESINAMBUNGAN DAYA DUKUNG LINGKUNGAN (SUSTAINABLE DEVELOPMENT)	229
8.1 Pengertian Kesenambungan Daya Dukung (Sustainable Development)	230
8.2 Sustainable Development” dalam Geologi Lingkungan	232
8.3. Parameter Keberhasilan Pengembangan Daya Dukung Lingkungan	234
DAFTAR PUSTAKA	239
DAFTAR ISTILAH	243

KONSEP DASAR GEOLOGI LINGKUNGAN

Di pertengahan hingga akhir abad ke 20 geologi lingkungan menjadi bagian ilmu kebumiharian yang membumi, tidak terkecuali di Indonesia. Pasca masa reformasi industri, semua hal yang terkait dengan kegiatan recovery dijalankan di berbagai sektor. Masyarakat semakin memahami, bahwa Bumi telah semakin rapuh, dan dibutuhkan langkah strategis untuk melindunginya. Di akhir abad ke 20, muncullah pemahaman “sustainable development” yang sangat berhubungan dengan kepentingan manusia dalam melindungi aset-asetnya baik yang berhubungan dengan kelangsungan litosfer, hidrosfer, biosfer dan atmosfer. Pemahaman “sustainable development” hanyalah bagian terkecil dari keadaan lingkungan yang dimiliki manusia. Untuk menjaga “Bumi” agar selalu “sustain” maka diperlukan kemampuan dalam melakukan analisis “geologi lingkungan”. Buku ini berisi tentang berbagai hal yang berhubungan dengan “geologi lingkungan”, yaitu segala kegiatan dan dampak yang ditimbulkan berkaitan dengan adanya interaksi manusia dengan lingkungan geologinya.

I.1. Pengertian Geologi Lingkungan

Geologi lingkungan adalah cabang ilmu geologi yang mempelajari tentang segala hal yang berhubungan dengan kegiatan-kegiatan akibat adanya interaksi antara manusia dan lingkungan geologi (Howari, 2003). Geologi Lingkungan mencakup (Howard, 2013; dan Mulyaningsih, 2010):

- (1) Sifat dan komponen fisik bumi, yaitu batuan, tanah, air (fluida) dan mineral
- (2) Bentang alam (geomorfologi) dan proses-proses geologi yang mempengaruhi pembentukannya dengan evolusinya, yaitu sedimentasi, tektonisme, aktivitas gunungapi, erosi dan pelapukan.
- (3) Interaksi manusia yang ditimbulkan oleh adanya proses-proses geologi (2) tersebut, meliputi interaksi positif (ekstraksi sumber daya geologi dan pemanfaatan lahan), dan interaksi negatif (bencana geologi)

Menurut Campbell (2002), disiplin ilmu geologi lingkungan sering disebut juga sebagai geologi teknik (*engineering geology*). Cabang ilmu tersebut mencakup studi, investigasi dan tinjauan, serta analisis tentang:

- a) Bencana geologi (*environmental hazards*), sebagai contoh adalah pensesaran di wilayah permukiman yang sering berasosiasi dengan gempa bumi, banjir pantai / tsunami, semburan air (lumpur), letusan gunung api, gerakan massa, longsoran, amblesan, dan lain-lain.

- b) Kontaminasi tanah oleh limbah air industri dan rumah tangga.
- c) Kontaminasi airtanah dengan remediasi.
- d) Segala hal yang menyangkut pekerjaan geologi lingkungan lain di permukaan yang membutuhkan pengambilan contoh dan interpretasi geologi, serta evaluasi hidrogeologi dan analisis hidrokimia.

Dalam pencapaian maksud pembelajaran geologi lingkungan, dibutuhkan pengujian-pengujian dan evaluasi kondisi lingkungan geologi, meliputi:

- a) Suatu penjabaran dan interpretasi yang jelas tentang susunan litologi dan stratigrafi bawah permukaan yang bersifat korelatif.
- b) Suatu evaluasi kondisi hidrogeologi secara lokal seperti *dewatering* pada bagian kegiatan penambangan bawah permukaan dan / pemotongan lereng.
- c) Suatu pembahasan menyeluruh, seperti uji pengembangan potensi suplai air minum serta dampak kontaminan terikut dalam sumber daya airtanah.
- d) Suatu pembahasan menyeluruh / analisis pendahuluan terhadap potensi kontaminan pada kesehatan manusia dan lingkungan.
- e) Analisis biaya dan keuntungan bersih yang diperoleh dari *remedial approach*.

Secara umum, menurut Keller (2000), geologi lingkungan merupakan salah satu sistem pembelajaran dalam mencari hubungan antara budaya dan lingkungan geologi. Sistem pembelajaran tersebut meliputi tiga hal penting yaitu:

- (1) Bencana alam seperti banjir, longsor, gunungapi dan gempa bumi;
- (2) Sumber daya geologi seperti logam, batuan, minyak bumi dan air; dan
- (3) Permasalahan-permasalahan lingkungan, seperti penanganan sampah dan kontaminasi airtanah.

Jadi, dapat dijelaskan bahwa interaksi antara manusia terhadap alam dalam geologi lingkungan, meliputi pemanfaatan sumber daya alam (*resources*), dampak dari pemanfaatan sumber daya alam dan penanggulangan dampak yang ditimbulkan akibat pemanfaatan sumber daya alam tersebut, serta manajemen dan mitigasi bahaya (*potential hazards*) geologi (lingkungan geologi).

Dalam pemanfaatan sumber daya geologi, biasanya terjadi eksploitasi/pengambilan, yang baik secara langsung maupun tidak langsung, berdampak pada perubahan lingkungan dan polusi. Jadi, tujuan dari studi geologi lingkungan tersebut adalah:

- (1) Mengurangi atau meminimalkan dampak yang ditimbulkan akibat eksploitasi.
- (2) Mengatur pengembangan dan perencanaan wilayah, dan kepentingan teknik yang meliputi konstruksi bangunan, sarana transportasi dan fasilitas umum.

Penanggulangan dan pengaturan bencana sangat berguna mengingat kebanyakan daerah urban (permukiman) terletak pada wilayah-wilayah rawan bencana seperti bahaya gunungapi, tsunami, gempa bumi dan banjir. Di sisi lain, wilayah-wilayah tersebut pun juga sangat kaya akan sumber daya geologi, sebagai implikasi dari tatanan tektoniknya. Sebagai contoh adalah, Indonesia sangat kaya akan sumber daya alam, seperti bentang alam yang landai, batuan (volkanik), mineral, minyak bumi, energi panas bumi, airtanah dan tanah yang subur. Hal itu berkaitan dengan posisinya yang terletak pada zona tektonisme aktif, yaitu pada zona busur volkanisme dan subduksi aktif. Konsekuensinya, kebanyakan wilayah Indonesia juga rawan terhadap bencana alam, yaitu gempa bumi, tsunami, letusan gunungapi dan longsor. Posisinya yang terletak pada garis katulistiwa, memungkinkan wilayah Indonesia memiliki curah hujan yang tinggi. Curah hujan yang tinggi dengan penataan lingkungan yang tidak baik, telah menyebabkan banyak wilayah Indonesia juga rawan terhadap bahaya banjir dan badai, sebagai implikasi dari kondisi iklim.

Sekitar 218 buah gunungapi aktif tersebar di Indonesia, 94 buah di antaranya masih menunjukkan aktivitasnya. Di wilayah dataran hingga lereng gunungapi inilah masyarakat lebih banyak bertempat tinggal, karena keindahan alamnya, udaranya sejuk, tanahnya subur, bahan bangunan melimpah dan geomorfologi yang relatif datar. Tatanan tektonik wilayah Indonesia membentuk gunung api-gunung api tersebut bertipe komposit / strato, yang diwarnai oleh pertumbuhan kerucut gunung api (konstruksi) dan penghancuran kerucut gunung api (destruksi). Kedua tipe letusan tersebut memiliki sifat tertentu; erupsi yang bersifat konstruksi menghasilkan dampak yang lebih kecil dibandingkan dengan erupsi yang bersifat destruksi. Contoh erupsi-erupsi yang bersifat konstruksi antara lain dapat dijumpai pada Gunung Merapi, Gunung Semeru, Gunung Kelud dan lain-lain; sedangkan contoh erupsi yang bersifat destruksi antara lain adalah letusan Gunung Krakatau (1883), letusan Gunung Tambora (1815) dan pembentukan kaldera Toba. Pengetahuan tentang karakteristik masing-masing gunung api di Indonesia tersebut sangat penting dalam menyusun manajemen bencananya. Hal itu akan sangat membantu masyarakat untuk memahami karakteristik lingkungan yang ditinggalinya.

Sejarah kegempaan di Indonesia mencatat ratusan gempa bumi per tahun dari magnitud rendah (kurang dari 3 SR) hingga tinggi (lebih dari 3 SR) terjadi di wilayah Indonesia, dari Nabire (di wilayah Indonesia timur) hingga Aceh (di wilayah Indonesia barat). Banyak sekali korban jiwa, harta benda dan traumatik telah ditimbulkan akibat adanya bencana gempa bumi tersebut. Gempa bumi memang sulit diramalkan kapan kejadiannya dan berapa intensitasnya. Namun, wilayah dengan sejarah terjadinya gempa bumi, patut diwaspadai. Di dunia, persentase gempa-gempa berintensitas tinggi 20%, intensitas sedang 40-60% dan intensitas rendah 20-40% (*USGS report*). Jarangnya gempa bumi-gempa bumi berintensitas tinggi menandakan bahwa gempa tersebut sulit terjadi. Pada prinsipnya, gempa bumi dengan intensitas

tinggi tentunya memerlukan waktu / periodisasi yang lebih lama dibandingkan dengan gempa bumi yang berintensitas rendah.

Di lain sisi, wilayah sarat gempa tidak mungkin langsung dikosongkan tanpa penghuni, karena hal itu terkait dengan hak kepemilikan, sosial, ekonomi, budaya dan adat istiadat. Sebagai antisipasinya, sebaiknya disusun manajemen bencana untuk potensi gempa bumi tersebut. Manajemen bencana dapat diawali dengan adanya pengetahuan yang cukup tentang sejarah kegempaan di wilayahnya, sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk hidup berdampingan dan bersahabat dengan lingkungannya. Untuk itu, masyarakat harus tahu kapan harus tinggal dan kapan harus waspada, membangun rumah tahan gempa, bersikap arif dalam menyikapinya, tanggap terhadap tanda-tanda gempa bumi dan tanggap pula jika diikuti oleh tsunami.

I.2. Cakupan Geologi Lingkungan

Geologi lingkungan sendiri merupakan ilmu terapan dari ilmu-ilmu dasar geologi. Inti utama dari cabang ilmu ini adalah pemanfaatan dan pengaturan *resources* (sumber daya geologi) dan kendala dalam pemanfaatannya. Cakupan geologi lingkungan meliputi hidrogeologi, topografi, geologi teknik, geologi ekonomi dan segala hal yang berhubungan dengan proses-proses alam, termasuk di dalamnya penyelesaian permasalahan konstruksi bangunan dan fasilitas transportasi, instalasi fasilitas umum, penanganan sampah, pengembangan dan pengaturan sumber daya air, evaluasi dan pemetaan sumber daya batuan dan mineral, serta segala permasalahan yang berhubungan dengan perencanaan dan pengembangan fisik jangka panjang (Anonim, 1972).

Geologi lingkungan disebut juga manajemen sistem lingkungan, yang kini lebih populer dengan sebutan “sustainable development”. Konsep tersebut mencakup segala sesuatu yang berkaitan dengan interaksi antara manusia dengan alam, dan ditujukan untuk menjaga kemenerusan alam dalam mendukung pengembangan sosial dan ekonomi. Maksud studi untuk menjaga agar sumber daya alam yang dapat terbarukan tidak habis atau berkurang, serta dampak pengambilan dan penggunaan sumber daya tak terbarukan dapat diminimalkan.

Jadi, “sustainable development” menjaga agar interaksi tersebut mampu bertahan dalam jangka waktu yang lama tanpa menyebabkan kerusakan lingkungan. Kunci keberhasilan *sustainable development* terletak pada tingkat efektivitas kinerja manajemen lingkungan tersebut. Efektif berarti terjadi keseimbangan antara pengambilan atau pemanfaatan sumber daya alam dengan dampak yang ditimbulkan akibat pengambilan / pemanfaatan tersebut.

Buku ini membahas tentang sifat dan komponen fisik bumi, serta proses-proses geologi dan lingkungan yang mempengaruhi perkembangan dan interaksinya dengan

manusia, dalam hubungannya dengan aktivitas manusia. Pembaca dapat menemukan arti penting geologi lingkungan dalam kehidupan sehari-hari, seperti pemanfaatan lahan untuk permukiman, pemilihan tapak untuk konstruksi bangunan sarana / prasarana umum, bagaimana dalam mengenal geologi lingkungan yang ditinggalkannya, serta metode terbaik agar dapat bertahan dan hidup berdampingan di lingkungan rawan bencana geologi. Pada akhirnya masyarakat dapat memahami bagaimana seharusnya bersikap dan mengatur lingkungan hidupnya, agar dapat bertahan lebih lama tanpa menimbulkan kerusakan. Di samping itu, pembaca diajak untuk mempelajari dan mengenal sejarah geologi di lingkungannya pada masa lalu, sehingga dapat meruntun proses-proses geologis dan perubahan lingkungan besar yang pernah terjadi. Pengetahuan tersebut dapat membantu masyarakat dalam mengatur potensi bencana, pemanfaatan lahan, sumber daya batuan dan air, serta dapat berperan aktif dalam melindungi lingkungan dari polutan dan kerusakan. Dengan melakukan studi ini, diharapkan juga dapat meminimalkan perubahan geomorfologi akibat pengambilan yang berlebihan.

Ilmu dasar geologi yang mendukung dalam studi ini adalah geomorfologi dan proses-proses geologi yang mempengaruhi perubahan geomorfologi tersebut. Analisis geomorfologi diperlukan untuk analisis tata guna lahan, pengembangan dan perencanaan wilayah, interpretasi bahaya gunungapi, banjir dan tsunami. Studi-studi tersebut meliputi sejarah tektonisme dan volkanisme, pelapukan dan erosi, serta kestabilan lereng. Kondisi geologi mencakup studi-studi mengenai material penyusun bumi, sedimentologi dan stratigrafi, struktur geologi dan sejarah perkembangannya, geoarkeologi dan geoantropologi. Pengenalan lingkungan geologi dan tektonik lempeng akan dibahas detail pada Bab II.

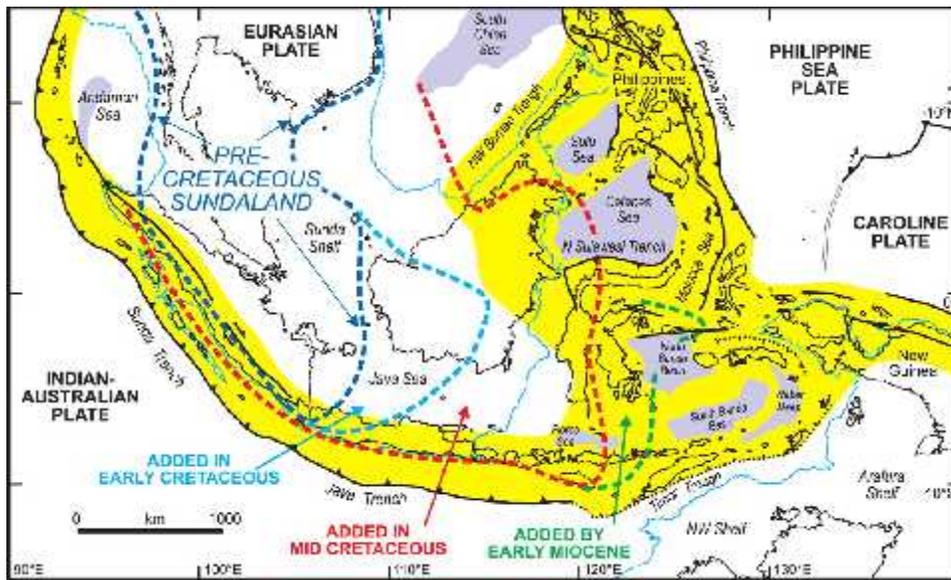
I.3. Krisis Geologi Lingkungan

A. Bencana Geologi

Bencana geologi sendiri adalah bencana yang ditimbulkan oleh proses-proses geologi, sebagai akibat dari upaya bumi dalam memposisikan komponen-komponennya menuju kondisi setimbang. Untuk dapat mempertahankan kelangsungannya, alam (matahari dan sistem tatasuryanya) selalu menjaga agar tetap setimbang. Hal itu dibuktikan dengan jarak dan kecepatan bumi berevolusi terhadap matahari, bulan terhadap bumi, dan lain-lain, yang selalu konstan, serta proses-proses alam di atmosfer, stratosfer dan biosfer yang selalu mengikuti perkembangannya. Sedikit saja anomali yang terjadi di alam, maka bumi akan memberikan reaksi balik, yang di dalamnya sering berdampak pada kerusakan. Proses-proses itulah yang selanjutnya menjadi permasalahan geologi lingkungan.

Indonesia merupakan negara kepulauan. Kebanyakan wilayahnya terletak pada jalur tektonisme aktif penunjaman lempeng India di bawah lempeng Eurasia (Gambar I.1). Proses tektonik tersebut berlangsung sejak Pra-Kapur hingga saat ini. Sebagai

konsekuensinya, wilayah-wilayah tersebut sangat berpotensi terhadap letusan gunungapi (Gambar I.3) dan bahaya gempa bumi (Gambar I.4). Gempa bumi dan tsunami di Aceh pada bulan September 2004 telah memakan jutaan korban jiwa baik di Aceh-Sumatera Utara, Thailand, India dan Srilanka, gempa bumi 27 Mei 2006 di Yogyakarta-Jawa Tengah memakan ribuan korban jiwa dan ratusan ribu rumah roboh, begitu juga dengan gempa bumi di Pangandaran yang diikuti tsunami dan gempa-gempa yang lainnya. Semua itu tentunya juga telah mengakibatkan perubahan lingkungan yang berdampak pada kerugian yang sangat besar, baik berupa harta benda, fasilitas umum, cacat mental dan fisik, serta korban jiwa.

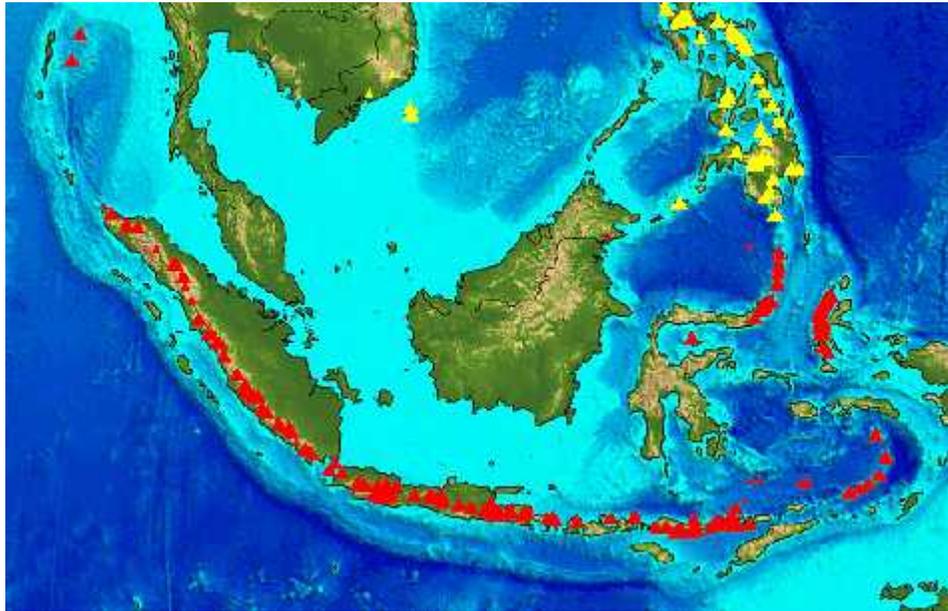


Gambar I.1. Wilayah Indonesia dilalui oleh jalur tiga tumbukan lempeng, yaitu lempeng India/Australia dari selatan, Pasifik dari timur dan Eurasia dari utara (Hamilton, 1979)

Banyak sekali permasalahan lingkungan yang ditimbulkan oleh proses-proses geologi dan aktivitas manusia (artifisial). Keduanya tersebut pada akhirnya berdampak bencana geologi bagi kelangsungan hidup manusia itu sendiri. Bencana geologi seperti gempa bumi, tsunami dan letusan gunungapi memang tidak dapat ditanggulangi, namun kejadiannya dapat dipelajari sehingga dampaknya dapat diminimalkan. Korban dan kerugian materiil, spiritual dan traumatik sering mengikutinya, untuk itulah diperlukan manajemen bencana yang memadai.

Pada dasarnya, proses-proses geologi tersebut adalah suatu langkah dari alam dalam menjaga kesetimbangannya. Proses-proses geologi tersebut biasanya berlangsung secara periodik, dengan intensitas tertentu. Dalam hal ini manusia, sebagai pemegang kebijakan tentang kelestarian alam harus mampu mengatur diri dalam menghadapi bencana tersebut. Pada buku ini dibahas secara khusus tentang manajemen bencana yang bertujuan untuk mensosialisasikan sistem peringatan dini atau “early warning

system” tentang potensi bencana yang dimiliki oleh tiap-tiap daerah di Indonesia, sesuai dengan tatanan geologi tektoniknya.



Gambar I.2. Konsekuensi dari tiga proses tumbukan lempeng di Indonesia yang membentuk gugusan gunungapi (Simkin & Siebert, 1994 modifikasi Anonim,)

Sistem peringatan dini tersebut umumnya didasarkan pada sejarah kebencanaan yang pernah terjadi. Sebagai contoh adalah bencana guguran awan panas Merapi pada 22 Nopember 1994 yang selanjutnya melahirkan manajemen bencana Merapi, gempabumi di Kobe 17 Januari 1995 yang melahirkan sistem “pembelajaran hidup bersama gempa”, dan lain-lain. Masyarakat perlu mengetahui kapan dan dalam kondisi yang bagaimana tsunami dapat terjadi, akankah gempabumi susulan lebih tinggi intensitasnya dari gempa utama, apa yang disebut dengan *liquefaction* dan mengapa terjadi, kapan suatu gunungapi dapat meletus dan dalam radius berapa masyarakat harus mewaspadainya. Buku ini disusun agar masyarakat awam dapat memahami fenomena-fenomena geologi tersebut dan dapat hidup tenang di lingkungan rawan bencana, serta mampu mengelola lingkungannya dengan bijak, sesuai dengan sumber daya alam yang tersedia di dalamnya. “Krisis lingkungan” yang ditimbulkan tersebut dapat saja berlanjut menjadi “krisis ekonomi, politik dan sosial-budaya”.



Gambar I.3. Konsekuensi dari tiga proses tumbukan lempeng di Indonesia yang membentuk jalur *ring of fire* sehingga Indonesia sarat terhadap bahaya gempabumi (sumber: BNPB)

Dalam tindakan penanganan dan pertolongan selama bencana alam berlangsung, sedikitnya terdapat 14 komponen sosial yang berpengaruh, yaitu: 1) Obat-obatan; 2) Kesehatan umum; 3) Sanitasi dan ketersediaan air bersih; 4) Baju dan penghangat; 5) Makanan; 6) Ketersediaan energi; 7) SAR (penyelamatan); 8) Pekerjaan umum dan teknik (konstruksi); 9) Lingkungan; 10) Logistik dan transportasi; 11) Keamanan; 12) Komunikasi; 13) Ekonomi; dan 14) Pendidikan. Masing-masing komponen fungsional tersebut tersusun atas beberapa unsur, yang dalam pendistribusiannya sering menimbulkan permasalahan. Korban gempabumi 27 Mei 2006 di Yogyakarta-Jawa Tengah mengeluh dan memprotes tidak meratanya pendistribusian bantuan dan biaya hidup (Anonim, 2005). Begitu pula dengan korban-korban bencana lain seperti luapan lumpur panas di Sidoarjo-Jawa Timur, banjir bandang di Sulawesi Selatan, Sulawesi Tengah dan Kalimantan dan lain-lain. Manajemen Bencana akan dibahas lebih detail pada BAB X.

B. Pertumbuhan Penduduk yang Cepat

Peningkatan populasi penduduk adalah suatu masalah terbesar di Indonesia, bahkan di dunia. Kini, jumlah penduduk di Indonesia telah mencapai 210 juta jiwa dengan pertumbuhan rata-rata 1,7%. Dengan tingkat pertumbuhan sebesar itu, jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2025 diperkirakan mencapai 370an juta jiwa. Populasi terbesar terkonsentrasi di 6,9% luas Indonesia yaitu Jawa, Madura dan Bali

sebesar 63,6% (Anonim, 2005). Sisanya tersebar di Sumatra, Nusa Tenggara, Kalimantan, Sulawesi, kepulauan Ambon dan Halmahera, serta populasi terkecil berada di Papua.

Kini populasi penduduk Indonesia makin membesar, sementara luas lahan yang layak untuk tempat tinggal tetap. Permasalahan muncul manakala Jawa, Madura, Bali dan Sumatra yang berfungsi sebagai sentra padi dan gula, lahan pertaniannya makin sempit. Pembangunan di segala bidang, baik perumahan, industri, niaga dan fasilitas-fasilitas umum, seperti sekolah, rumah sakit, arena olah raga, bermain, rekreasi dan pusat-pusat peradaban yang lain, sangat cepat dan menjamur di berbagai kota. Dengan kecepatan pertumbuhan penduduk 1,7%, kini banyak terbentuk kota-kota baru dengan peradaban yang baru pula.

Upaya menekan jumlah penduduk melalui program Keluarga Berencana telah digalakkan sejak 1970an, namun karena Jawa sendiri merupakan pusat kebudayaan dan pendidikan, dengan tingkat urbanisasi yang tinggi menjadikan wilayah ini tingkat kepadatan penduduknya juga makin membesar. Sebenarnya program transmigrasi yang bertujuan dalam pemerataan penduduk telah digalakkan sejak tahun 1970an, yaitu pada masa pemerintahan Presiden Suharto. Sebanyak 730.000 keluarga, terutama dari wilayah rawan bencana, ditempatkan di daerah-daerah berpenduduk rendah, seperti Kalimantan, Sulawesi, Sumatra dan Papua. Luas wilayah di Indonesia sendiri adalah 7,9 juta km², yang telah mencakup zona ekonomi eksklusif.

C. Krisis Sosial – Ekonomi

Masalah sosial dan ekonomi sangat umum dijumpai di negara-negara berkembang dan terbelakang seperti Indonesia. Besarnya tingkat populasi penduduk menyebabkan tingkat pengangguran tinggi. Ditambah dengan rendahnya tingkat pendidikan dan minimnya dana pendidikan, serta tunjangan kesehatan, menjadikan proses pendewasaan akan keyakinan dan rasa kepemilikan lingkungan terhambat. Hal itu tercermin pada tingkat perlakuan masyarakat terhadap lingkungannya yang tidak bijaksana. Dalam setiap ketidak-puasan terhadap segala tindakan yang dilakukan oleh pihak-pihak pemerintah, dewan perwakilan, aparat keamanan, industri dan lain-lain, sering menimbulkan kemarahan yang berujung pada pengrusakan fasilitas instalasi umum dan alam. Perlakuan yang tidak bijaksana juga sering mengganggu kemenerusan (kelangngan) hayati dan bumi yang dipicu oleh rendahnya *sense of belonging Earth*. Kesemua tindakan tidak bijaksana tersebut dilatarbelakangi oleh kesenjangan sosial dan ekonomi yang terlampau jauh. Permasalahan sosial-ekonomi semakin menjadi manakala masyarakat tidak lagi mempercayai kinerja pemerintah. Hal itu pernah terjadi di Philipina pada 1980-1990an, Meksiko pada 1990an, Kolumbia pada 1990an, India pada 1980an, Thailand pada 2000an dan lain-lain. Ketidak-percayaan tersebut dilampiasikan secara membabi-butu, sehingga menyebabkan banyak kerusakan dan penjarahan di berbagai sektor.

Kini, bukan lagi krisis ekonomi dan sosial yang terjadi, namun krisis politik dan pendidikan pun makin menjadi. Mahalnya pendidikan di Indonesia yang diawali oleh berbagai krisis ekonomi hingga sosial-budaya, telah berujung pada hilangnya kesempatan anak-anak usia sekolah dalam mendapatkan pendidikan yang layak. Hal itu makin memperpuruk predikat Indonesia sebagai negara yang tingkat pengangguran penduduknya tinggi. Program wajib belajar sembilan tahun yang seharusnya diikuti dengan biaya pendidikan yang murah belum dirasakan sepenuhnya oleh anak-anak maupun orangtua siswa. Bahkan Biaya Operasional Sekolah (BOS), sebagai kompensasi dari naiknya harga bahan bakar motor (BBM), yang diberikan oleh pemerintah untuk memperingan biaya pendidikan di jenjang sekolah dasar (kelas I-VI) dan menengah pertama (kelas VII-IX), belum dirasakan secara maksimal. Kini, masih banyak sekali anak-anak usia sekolah di kota-kota besar Indonesia, seperti Jakarta (bahkan wilayah Jabotabek), Bandung, Semarang, Surabaya dan lain-lain, yang harus rela tidak sekolah. Beberapa anak yang seharusnya pergi ke bangku sekolah justru harus bekerja membantu orangtuanya, sebagai pekerja industri rumah tangga, pengupas kerang, pengamen, pengemis, pedagang asongan dan lain-lain.

Krisis ekonomi dan sosial juga berdampak pada sektor kesehatan, pertanian, industri kecil dan menengah, serta transportasi. Menurunnya daya beli masyarakat dalam sektor pertanian (pupuk, bibit dan tenaga kerja) serta murahnya harga dasar hasil pertanian, menjadikan banyak petani beralih profesi menjadi pemulung, pengamen dan bahkan pengemis. Mahalnya harga bahan bakar juga berdampak pada menurunnya hasil tangkapan nelayan, hingga merekapun beralih profesi sebagai pemulung. Menurunnya daya beli masyarakat juga telah berimbas pada tersendatnya sektor niaga. Beberapa pengusaha kecil-menengah harus gulung tikar karena tidak mampu lagi membiayai biaya operasional, pemasaran dan karyawan. Kondisi tersebut berdampak pada makin meningkatnya laju urbanisasi, terganggunya psikologi dan menurunnya tingkat kesehatan.

Kini krisis kesehatan oleh mahalnya biaya perawatan dan obat-obatan telah terselesaikan dengan asuransi BPJS, maka peristiwa terlantarnya pasien karena faktor biaya mestinya tidak akan dijumpai lagi di Indonesia.

Krisis budaya terjadi karena eksplorasi dan eksploitasi budaya asing seperti Amerika, negara-negara Eropa, Jepang dan Korea marak dilakukan tanpa adanya filter. Import budaya yang tidak diimbangi dengan studi kelayakan dan etika; seperti fashion yang membuka aurat, gaya bicara dan cara bergaul yang mengesampingkan sopan-santun, dan sikap konsumtif sering melahirkan kejahatan baru. Hal-hal baik, seperti sikap saling menghormati/ menghargai, jujur, rasional, dan bermoral kini perlu lebih banyak diajarkan. Eksplorasi dan eksploitasi budaya Indonesia melalui sikap ketuhanan yang maha esa, jiwa kebangsaan, nasionalisme, gotong-royong dan keadilan sosial akan lebih terasa melalui sikap *tepo-seliro* dan saling menghormati. Eksploitasi budaya tak-terbatas, seperti pornografi, minuman dan obat-obatan memabukkan, dan budaya LGBT berpadu dengan tingkat pendidikan yang kagok

melahirkan banyak kekacauan, seperti tingginya tingkat kejahatan dan pemerkosaan. Kejahatan lain yang tidak didasarkan atas moralitas yang baik, tanggung jawab dan rasa saling memiliki, seperti pencurian fasilitas dan prasarana umum, pengrusakan dan pencurian pelat rel kereta api, pencurian kabel instalasi listrik, pengrusakan dan pencurian sensor bencana (gempabumi, lahar dan erupsi gunung api), dan penebangan hutan perlu diminimalkan.

ANALISIS GEOLOGI LINGKUNGAN

Data geologi sangat penting bagi seluruh pekerjaan geologi lingkungan, misalnya dalam pengembangan wilayah, perencanaan wilayah, manajemen bencana geologi, konstruksi dan pembangunan dan instalasi fasilitas umum. Data geologi tersebut meliputi geomorfologi, stratigrafi, struktur geologi dan evolusi perkembangan geologi yang telah dan tengah berlangsung di dalamnya. Dari studi geomorfologi dalam suatu kawasan tertentu, dapat diinterpretasi kondisi geologinya, meliputi struktur geologi yang berkembang di dalamnya dan tektonik yang telah mempengaruhinya dan litologinya; serta proses-proses geologi yang berlangsung di dalamnya. Analisis geologi lingkungan ini memiliki tujuan untuk menginterpretasi potensi sumber daya alam, potensi bencana alam dan pemberdayaan lahan untuk mendukung interaksi antara manusia dengan alam, seperti memenuhi kepentingan manusia dalam pengembangan wilayah dan perencanaan wilayah.

Kondisi geologi dalam suatu wilayah dapat diketahui melalui pemetaan geologi, yang dilakukan di permukaan dan di bawah permukaan bumi. Data dasar yang digunakan adalah peta geologi rinci untuk dikembangkan menjadi peta geologi lingkungan atau peta geologi teknik. Pekerjaan ini selalu diawali dengan pengenalan geomorfologi, meliputi analisis peta topografi dan peta rupa bumi, pengamatan peta geologi regional dan interpretasi citra foto, landsat, SRTM atau penginderaan jauh dengan metode yang lain. Data geomorfologi tersebut sangat penting karena dari data geomorfologi dapat diduga susunan litologinya dan struktur geologi yang berkembang di dalamnya. Daerah bertopografi dengan beda tinggi besar dapat diinterpretasi tersusun atas litologi yang resisten dan atau tersesarkan. Daerah dengan morfologi yang landai dapat diinterpretasi sebagai suatu lahan dengan komposisi litologi yang kurang resisten, atau di dalamnya berkembang suatu gaya tektonik yang menyebabkan daerah tersebut berrelief lemah. Wilayah dengan pola pengaliran trellis hingga subtrellis dapat diinterpretasi tersesarkan dan/atau terlipat. Wilayah dengan pola pengaliran dendritik-subdendritik (seperti pohon) dapat diinterpretasi proses geologi yang mempengaruhinya adalah pelapukan / denudasi. Wilayah dengan geomorfologi dataran yang luas, proses geologinya didominasi oleh sedimentasi material hasil erosi di atasnya (endapan aluvial). Dalam bab ini akan dibahas secara detail langkah-langkah dalam melakukan analisis geologi lingkungan, yang biasanya dilakukan dalam rangka evaluasi/studi kelayakan wilayah, seperti dalam aplikasi pengembangan wilayah dan area penambangan.

2.1 Analisis Geomorfologi

Geomorfologi adalah ilmu yang mempelajari tentang bentuk permukaan bumi, perubahan-perubahan yang terjadi di permukaan bumi dan proses-proses yang

mempengaruhi pembentukan dan perubahannya tersebut. Dalam ilmu geologi, data **geomorfologi** sangat penting sebagai bagian dari tahapan penelitian, karena dengan geomorfologi, peneliti menjadi paham terhadap kelayakan daerah telitiannya; dapat diakses “dengan potensi untuk dieksploitasi” atau “berpotensi untuk dikembangkan”; atau “berpotensi terdapat kendala geologi” yang membutuhkan “konservasi geologi” atau “evakuasi”. Proses-proses geomorfologi tersebut meliputi proses-proses fisik~, kimiawi~ dan mekanik~ geologi yang berlangsung sejak waktu geologi hingga saat ini, meliputi kegiatan eksogenik (terrestrial) dan endogenik (internal dalam bumi). Thornburry (1969) menjelaskan proses-proses geologi pembentuk geomorfologi dapat diidentifikasi dari **(1) struktur geologi** (= merupakan faktor pengontrol yang dominan dalam evolusi bentuk lahan), **(2) morfometri** (=perkembangan relief permukaan bumi yang tergantung pada proses-proses geomorfologi yang berlangsung), **(3) proses-proses geomorfik** yang terekam pada bentang alam yang menunjukkan karakteristik proses geologi yang berlangsung, **(4) keragaman agen erosional (denudasi)** yang tercermin pada produk dan urutan bentuk lahannya, dan **(5) evolusi geomorfologi** yang kompleks (dipengaruhi oleh perkembangan tektonik dalam suatu wilayah).

Data geomorfologi digambarkan di atas peta topografi. Data geomorfologi tersebut selanjutnya disajikan dalam bentuk peta geomorfologi, yang terdiri atas satuan-satuan geomorfologi. Peta geomorfologi harus menggambarkan letak laut, sungai, gunung dan sebagainya (kondisi topografi, geografi, dan bathimetri (kedalaman laut)), ditampilkan dengan memperhatikan data geologi (jenis dan sebaran litologi, struktur geologi dan potensi sumber daya alam / bencana alam), yang mengontrol proses pembentukan dan evolusinya, serta pemanfaatan lahan pada masing-masing satuan geomorfologi tersebut.

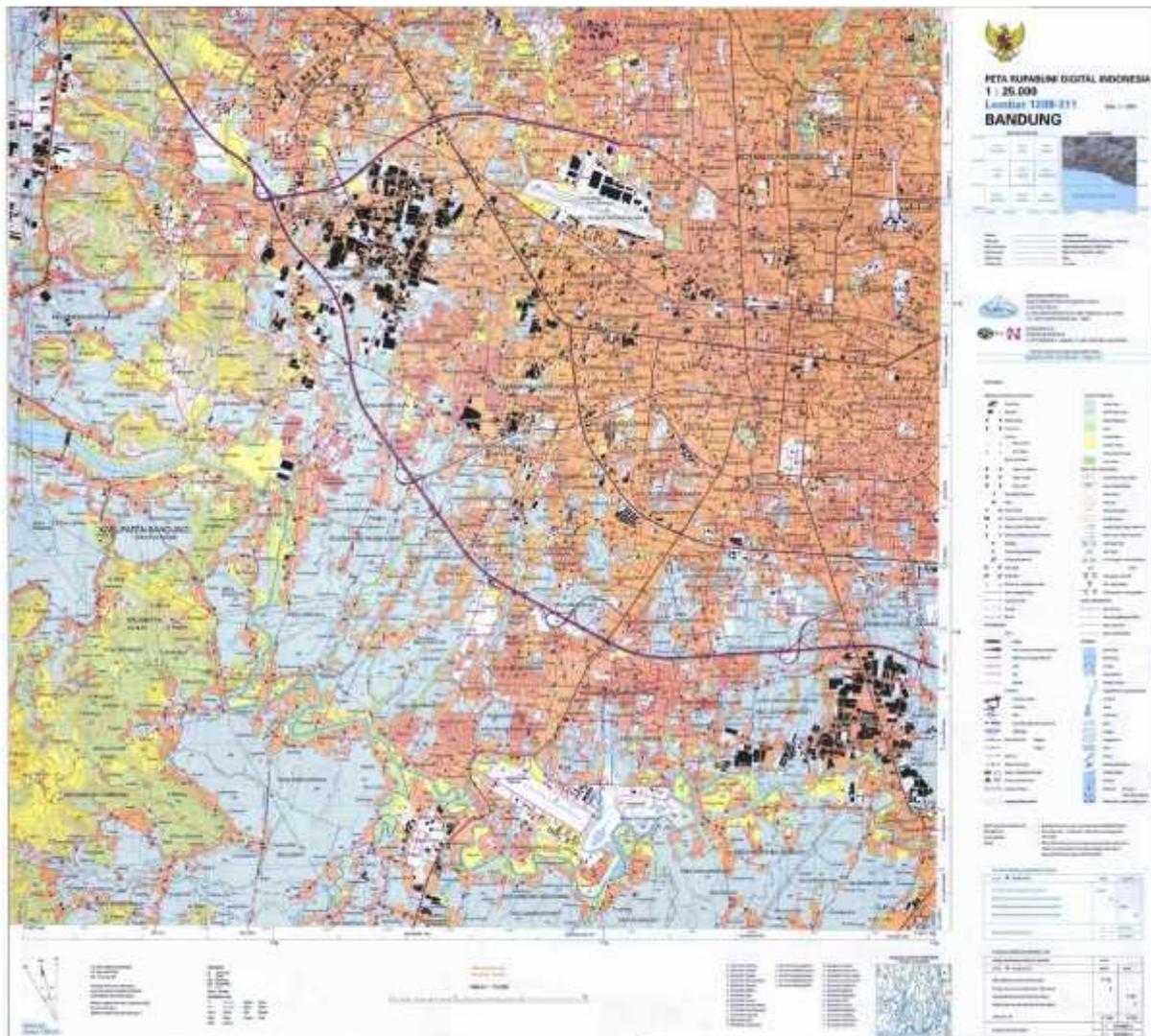
A. Peta Topografi

Topografi adalah gambaran umum di permukaan bumi, yang menunjukkan rona muka bumi. Di dalamnya terdapat garis-garis kontur yang masing-masing garis kontur menghubungkan titik-titik ketinggian yang sama. Ilmu yang mempelajari kajian atau penguraian terperinci tentang keadaan muka bumi pada suatu daerah; atau keadaan muka bumi pada suatu daerah disebut ilmu topografi. Data topografi disajikan dalam bentuk peta, disebut sebagai peta topografi. Peta topografi menjelaskan ketinggian (yang digambarkan dalam bentuk garis kontur), sungai, gunung, lembah, laut, danau dan dataran (rendah dan tinggi). Peta topografi seharusnya memiliki skala yang besar, yang menggambarkan atau menunjukkan bentuk serta ukuran yang tepat dari gunung, bukit, lembah, danau, sungai, rawa, teluk, laut dan bagian lain dari daratan dan air. Skala peta topografi bervariasi tergantung dari peruntukannya, ada yang memiliki skala 1:50.000, 1:25.000, 1:10.000, 1:5000, dan 1:1000. Untuk mendukung pekerjaan-pekerjaan teknik (rekayasa geologi/geologi lingkungan/pertambangan), diperlukan peta berskala besar, biasanya 1:1000 hingga 1:5000. Skala besar peta topografi tersebut bertujuan agar segala sesuatu yang digambarkan di dalam peta menjadi representatif. Peta berskala besar juga memungkinkan untuk dapat menjelaskan

tingkat urgensi suatu peristiwa geologi yang tengah berlangsung dan tingkat kerawanannya, sehingga ketika akan dilakukan tindakan menjadi lebih akurat.

Penyusunan peta topografi dilakukan dengan menggunakan data pengukuran dan pengamatan morfologi secara langsung di lapangan. Kini, penyusunannya lebih banyak dilakukan dengan menggambarkan kembali data topografi dari data hasil interpretasi citra penginderaan jauh (inderaja) dan data topografi yang telah ada sebelumnya. Kini, peta hasil kompilasi tersebut dikenal sebagai peta rupa bumi Indonesia (disingkat RBI). Peta topografi dan RBI yang kini dimiliki oleh Indonesia memberikan data mengenai gambaran di permukaan bumi secara detail. Di dalam peta topografi dan RBI ini mencakup posisi geografis, relief (beda tinggi yang dinyatakan dengan kontur), data ketinggian, posisi administrasi (nama-nama kampung, desa, kecamatan, kabupaten dan propinsi), bentuk-bentuk bentang alam seperti sungai, danau, gunungapi, mataair dan lain-lain, serta bentuk-bentuk hasil budaya manusia, seperti jalan raya, jembatan, jalan kereta api, gedung bangunan, sekolah, rumah sakit, lahan pertanian, lahan perkebunan, lahan permukiman, industri dan lain-lain; yang menggambarkan secara fisik suatu bentuk lahan (Gambar 2.1). Di Indonesia, kita mengenal peta-peta topografi dengan berbagai skala dengan berbagai tujuan, seperti:

- a) Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) bersekala 1:25.000 tahun 1997, dengan interval kontur 25 m, dan disusun oleh Kartografi Badan Koordinasi dan Survei Pertanahan Nasional (Bakosurtanal, Bogor), dengan standarisasi simbol dan kode warna tertentu. Peta ini digunakan sebagai peta dasar dalam pekerjaan-pekerjaan survei di permukaan, misalnya dalam pemetaan geologi dan pendataan demografi tak detail.
- b) Peta topografi bersekala 1:25.000, diproduksi pada tahun 1942, 1951 dan 1963 digambar oleh Kartografi Djawatan Geologi Bandung. Peta ini memiliki interval kontur 12,5 m. Perbedaannya dengan peta RBI adalah penggambaran kontur, sungai dan jalan adalah didasarkan pada data lapangan yang sebenarnya, melalui pemetaan geodetik. Pada peta ini kondisi morfologi digambarkan sesuai dengan kondisi di lapangan. Peta topografi juga belum menampilkan budidaya seperti sekolah, masjid, gereja, perkantoran dan lahan pertanian / perkebunan dan lain-lain secara detail.
- c) Peta topografi bersekala 1: 50.000 bertahun 1951, dengan interval kontur 25 m dan dikeluarkan oleh US Army. Peta ini lebih mirip dengan peta RBI skala 1:25.000, hanya saja skalanya lebih kecil, sehingga data rincinya pun belum tergambar. Peta ini utamanya ditujukan dalam rangka pengawasan dan pertahanan teritorial.
- d) Peta topografi bersekala 1: 25.000 tahun 1978, interval kontur 12,5 m dan digambar oleh Kartografi Direktorat Geologi Bandung. Peta ini sama dengan peta topografi poin b.
- e) Peta topografi bersekala 1: 250.000 tahun 1954 dengan interval kontur 100 m (Gambar 2.2); kompilasi dari peta-peta topografi bersekala 1:50.000 (poin b)



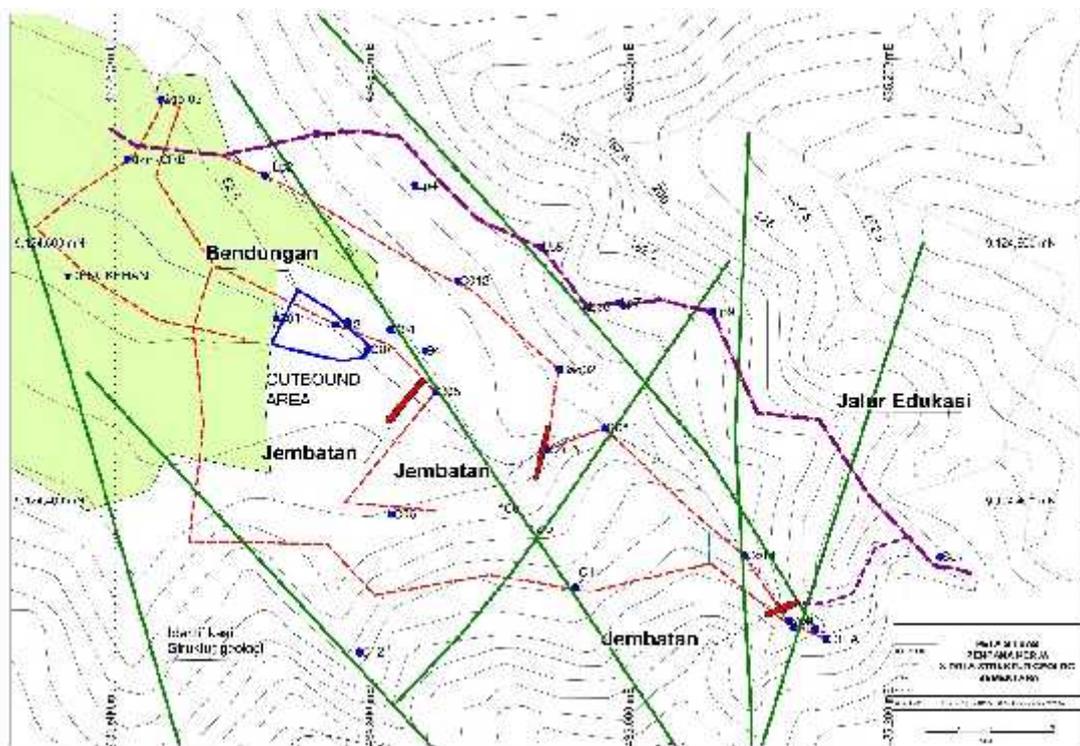
Gambar 2.1 Salah satu contoh peta rupa bumi skala 1:25.000 dengan beberapa simbol di dalamnya (Bakosurtanal, 1997; diperkecil tidak memperhatikan skala)

Dalam penggambaran peta topografi, terdapat kaidah-kaidah pewarnaan atau simbol-simbol tertentu. Bentuk-bentuk air di permukaan digambarkan dengan warna biru, kontur warna coklat, jalan raya warna hitam tegas, rel kereta api warna hitam tebal putus-putus, jalan setapak titik-titik warna hitam, dan lain-lain. Titik-titik ketinggian dihubungkan dalam bentuk garis kontur, dengan interval kontur ditentukan mengikuti rumus $\frac{1}{2000} \times \text{skala peta}$. Sebagai contoh

adalah; jika skala peta adalah 1:5000, maka interval kontur adalah $\frac{1}{2000} \times 5000 = 2,5$; dan jika skala peta adalah 1:25.000, maka interval kontur

adalah 12,5. Arah utara peta ditentukan sejajar dengan garis tepi vertikal dan arah timur ditunjukkan oleh garis tepi lateral. Penulisan nama kabupaten, kecamatan, desa, dan dusun tegak lurus terhadap arah utara peta, atau berarah barat-timur, kecuali nama sungai dan nama jalan, mengikuti arah hilirnya.

Di Indonesia, ada tiga jenis peta topografi yang dikenal secara luas, yaitu peta cetakan pemerintah Belanda yang bersekala 1:25.000, peta yang dicetak oleh US-Army bersekala 1:50.000 untuk wiayah Jawa dan 1:100.000 untuk wilayah di luar Jawa, serta peta bersekala 1:500-1:1000 yang menggambarkan secara detail dusun/desa. Peta topografi yang digunakan dalam pekerjaan geologi, biasanya bersekala 1:25.000. Sedangkan untuk mendukung pekerjaan geologi teknik (konstruksi bendungan, jalan raya, jembatan dan dermaga/bandara) diperlukan peta bersekala 1:5000 dan untuk disain detail terperinci 1:500-1:1000 sesuai dengan kebutuhannya. Untuk mendukung pekerjaan geologi lingkungan, utamanya dalam rangka konservasi lahan memerlukan peta topografi bersekala 1:1000. Gambar 2.2 adalah peta topografi detail dengan sekala 1:5000 yang biasanya dipakai untuk penyusunan peta geologi teknik, rencana tata ruang wilayah (RTRW) dan perencanaan dan pengembangan wilayah. Peta dasar yang sering digunakan untuk menyusun peta-peta dalam pekerjaan geologi lingkungan adalah peta rupa bumi Indonesia (RBI). Peta RBI disusun dengan didasarkan atas data dasar hasil interpretasi dari pengamatan penginderaan jauh, yaitu foto udara (terrestrial), landsat (satelit), radar dan lain-lain. Di dalam peta rupa bumi, sarana dan prasarana umum digambarkan dengan baik, dengan simbol-simbol tertentu; seperti sekolahan yang disimbolkan dengan buku terbuka, masjid dengan kubah dan bulan sabit, gereja dengan tanda salib, kuburan dengan tanda nisan dan lain-lain. Kelebihan peta rupa bumi dibandingkan dengan peta topografi adalah di dalam peta telah tercakup seluruh data budaya, sedangkan kelebihan peta topografi (lama) adalah orientasi kontur yang digambarkan secara jelas dan tegas.



Gambar 2.2. Salah satu contoh peta topografi detail sekala 1:5.000 yang peruntukannya penyusunan peta geologi teknik/tata lingkungan (rencana tata ruang wilayah: perencanaan dan pengembangan wilayah)

B. Penginderaan Jauh

Mekanisme penginderaan jauh biasanya menggunakan foto udara, LANDSAT, SLAR, HIRES, RADAR dan lain-lain. Penginderaan jauh biasanya dilakukan pada tahap penelitian pendahuluan, sebagai bagian dari studi pustaka (literatur), sebagai data sekunder. Penginderaan jauh dimaksudkan untuk melakukan pengamatan-pengamatan makro yang tidak dapat diamati secara dekat di lapangan, seperti dimensi sesar, lipatan, gerakan massa dan kondisi umum geomorfologi di lapangan. Data hasil pengamatan inderaja tersebut selanjutnya akan dilakukan pembuktian di lapangan untuk menemukan bukti-bukti lapangannya. Analisis inderaja dianggap perlu dan penting agar pekerjaan tahap selanjutnya lebih terarah dan terencana. Dengan demikian, akan lebih menghemat waktu, biaya dan tenaga. Tidak terkecuali dalam pekerjaan-pekerjaan pemetaan geologi lingkungan / geologi teknik; analisis inderaja dapat membantu peneliti untuk mengenali zona-zona dengan kondisi soil yang tebal atau zona dengan batuan dasar. Hal itu dapat membantu peneliti dalam mengoninterpretasi kawasan rawan bergerak, akibat deformasi atau faktor kelerengan. Untuk itu, peneliti dapat dengan mudah menentukan langkah konservasi, pengembangan, perencanaan wilayah dan yang lebih utama adalah lebih terarah dalam menentukan langkah pekerjaan selanjutnya, misalnya dalam perencanaan pengelolaan (*management plan*) zona wisata, bendungan, instalasi jalan,.

Di samping itu, banyaknya macam (jenis) citra untuk penginderaan jauh tersebut, serta kemudahan dalam pemerolehannya, kini metode ini dipandang sebagai salah satu tahapan penelitian yang paling utama, untuk penelitian-penelitian geologi lapangan bagi mahasiswa yang sedang tugas akhir, thesis dan disertasi, di samping studi literatur.

Jenis-Jenis Citra untuk Penginderaan Jauh

Ada banyak macam citra yang dapat digunakan untuk menginterpretasi kondisi geomorfologi, litologi dan struktur geologi suatu wilayah. Masing-masing jenis citra tersebut memiliki kelebihan masing-masing sesuai dengan rona yang dihasilkannya. Contoh citra-citra tersebut adalah:

- HIRES-High Resolution Imaging Spectrometer
- HRPT-High Resolution Picture Transmission
- IR-InfraRed
- IRS-Indian Remote Sensing Satellite
- JPL-Jet Propulsion Laboratory (NASA)
- LEAP-Landsat Emergency Access and Products
- LIDAR-Light Detection and Ranging
- MSS-MultiSpectral Scanner
- NDVI-Normalized Difference Vegetation Index
- NIR-Near InfraRed
- CIR-Color Infrared
- RS-Remote Sensing
- SAR-Synthetic Aperture Radar
- SIR-Shuttle Imaging Radar

- SLAR-Side Looking Airborne Radar
- SMMR-Scanning Multichannel Microwave Radiometer
- SPOT-Systeme Pour L'Observation de la Terre
- SWIR-Shortwave InfraRed
- TIR-Thermal InfraRed
- UHF-Ultra High Frequency
- VLF-Very Low Frequency
- VSAT-Very Small Aperture Terminal

Foto udara adalah salah satu media yang dapat digunakan untuk interpretasi geomorfologi, litologi dan struktur geologi dengan metode penginderaan jauh. Selama ini, ada dua jenis foto udara yang digunakan secara umum, yaitu foto udara pankromatik (*grayscale*) dan infra merah. Untuk mendapatkan hasil pengamatan tiga dimensi, foto udara baik pankromatik maupun infra merah diamati di bawah stereoskop dengan penampalan dari foto lembar kanan dan foto lembar kiri. Dalam perkembangannya, foto udara dapat dijumpai dalam sekala 1:10.000-1:50.000 (Gambar 2.3). Di dalam foto udara tercantum nama daerah, perusahaan pembuat foto udara, tanggal-bulan-tahun pembuatan, sekala foto, arah terbang dan nomor seri tampalan. Dengan demikian, foto udara ini dapat digunakan sebagai dasar untuk mengetahui perubahan suatu wilayah dari waktu ke waktu. Badan Koordinasi Survey Pertanahan Nasional (BAKOSURTANAL) dan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) adalah suatu Badan dan Lembaga Pemerintah yang memproduksi foto udara di Indonesia. Badan / lembaga lain di luar negeri yang memproduksi citra tersebut antara lain adalah NASA, USGS, US ARMY dan lain-lain.



Gambar 2.3 Jenis citra foto udara grayscale satu sisi sekala 1:10.000 (tampalan tidak disertakan); diproduksi oleh BAKOSURTANAL (1982).

Jenis citra yang lain adalah infra merah (infrared). Citra ini dapat diamati langsung dengan menggunakan stereoskop tanpa memerlukan tampalan. Umumnya citra infra merah memiliki skala yang lebih kecil, yaitu 1:100.000 hingga 1:1.000.000, sehingga pengamatannya kurang teliti. Pada dasarnya, sinar infra merah menyerap warna, sebagai contoh adalah air berwarna lebih gelap, sedangkan batuan yang bersifat menyerap sinar memantulkannya menjadi berwarna merah (Gambar 2.4). Infra merah lebih cocok untuk dilakukan sebagai data pendukung dalam pemetaan geologi struktur, karena bidang lemah, yang telah mengalami infiltrasi oleh air permukaan atau terisi oleh air permukaan menjadi tubuh sungai akan lebih jelas nampak dalam citra infra merah, dibandingkan citra satelit.



Gambar 2.4 Foto / citra infra-merah daerah Brebes skala 1:100.000; air memberikan rona gelap berwarna kehitaman, sedangkan area yang lebih terbuka berona merah diproduksikan oleh USGS, 2007).

Jenis citra selanjutnya adalah citra HIRES (Gambar 2.5). Citra ini menggunakan sinar ultraviolet, sehingga warnanya menjadi hijau. Pada prinsipnya, kesemua citra satelit tersebut dapat merekam data lapangan secara luas, karena skalanya kecil, biasanya 1:250.000 atau lebih besar lagi. Data yang dapat direkam antara lain berupa luasan bencana seperti longsor, cakupan sumber daya alam, dan budidaya. Bencana seperti letusan gunung api, tsunami, amblesan dan lain-lain juga terrekam dengan baik di dalamnya.

Aktivitas gunung api, pertumbuhan penduduk dengan pertumbuhan wilayah permukiman, pengembangan wilayah, perkembangan iklim secara umum dari

suatu wilayah dan lain-lain juga dapat diamati dengan citra-citra tersebut. Data citra dapat diolah sesuai dengan kebutuhannya, untuk kepentingan pengembangan wilayah, kehutanan (seperti untuk mengetahui titik-titik kebakaran hutan dan penggundulan hutan), geologi, serta kepentingan maritim.



Gambar 2.5 Citra satelit skala 1:250.000 Banjarmasin (diproduksi LAPAN pada tahun 2007).

Interpretasi Inderaja

Sebelum melangkah lebih jauh, marilah kita pelajari dahulu sekelumit tentang warna atau dalam indera disebut “rona”. Citra / foto udara disajikan dalam bentuk pewarnaan (rona). Dari rona tersebut akan dapat diketahui relief (beda tinggi), variabel penyusun muka bumi (tubuh air, vegetasi, budaya dan hasil budidaya, dan infrastruktur); yang ke semua itu dapat diinterpretasi memiliki potensi sumber daya alam dan bencana alam; berupa geomorfologi, batuan penyusun dan struktur geologi.

Rona dalam citra / foto rupa bumi dihasilkan dari cahaya, cahaya merupakan bagian dari spektrum elektromagnetik yang tampak oleh mata. Kebanyakan orang mampu mengamati cahaya dengan panjang gelombang 0,4-0,7 μm (Paine, 1981). Di alam, cahaya yang kita miliki kebanyakan adalah cahaya terang sampai putih.

Cahaya putih sebenarnya tersusun atas tiga warna utama, yaitu biru, hijau dan merah. Sedangkan cahaya gelap (warna hitam) adalah campuran dari warna biru, kuning dan magenta. Kedua warna tersebut (putih/terang dan hitam/gelap) merupakan warna dasar yang dapat dilihat oleh mata, sekalipun orang yang buta warna. Warna-warna violet, orange, coklat, krem dan lain-lain merupakan campuran dari warna-warna dasar tersebut dengan berbagai macam perbandingan. Hubungan antara sinar (putih) dan tanpa sinar (gelap/hitam) adalah saat warna-warna dasar tersebut dipadukan hingga menghasilkan warna putih, lalu ditampalkan dengan kedua warna dasar (biru dan merah) maka akan menghasilkan warna gelap (hitam). Jadi, dengan hilangnya warna putih, berarti tidak ada sinar yang ditangkap dalam media tersebut. Itulah sebabnya, obyek dengan warna-warna tertentu tersebut dapat diinterpretasi kondisi geomorfologinya, sehingga sering dipakai untuk melakukan interpretasi kondisi geologinya.

Warna putih (sinar terang) adalah gabungan dari warna merah, biru dan hijau; artinya permukaan bumi yang diberikan pantulan sinar merah, biru dan hijau dengan proporsi yang sama (hingga membentuk sinar putih), jika memantulkan sinar merah saja, maka akan nampak merah; jika memantulkan warna hijau maka nampak hijau; dan jika memantulkan warna biru maka nampak biru. Begitu pula dengan obyek yang menyerap warna merah dan hijau, maka yang nampak hanya warna biru. Sebagai contoh: permukaan bumi dengan vegetasi lebat tidak akan menyerap warna hijau, citranya nampak warna hijau; laut yang tidak menyerap warna biru, citranya berwarna biru, dan batugamping memantulkan sinar putih. Morfologi yang tidak mampu memantulkan sinar apa pun maka energinya akan diserap semua sehingga menjadi gelap (hitam).

Untuk memudahkan dalam interpretasi foto, secara umum ada dua jenis film yang digunakan untuk menghasilkan citra foto, yaitu film hitam/putih dan film warna. Menurut Paine (1981), film hitam/putih biasanya menggunakan jenis pankromatik dan infra merah. Film pankromatik menggunakan panjang gelombang yang dapat diterima oleh mata manusia (0,4-0,7 μm) sehingga lebih alami. Film infra merah menggunakan pencahayaan dengan panjang gelombang 0,4-0,9 μm . Kini, kebanyakan film infra merah menggunakan pencahayaan gabungan dari pankromatik dan infra merah, dengan panjang gelombang yang lebih kecil atau di bawah 0,7 μm . Foto infra merah yang dihasilkan betul-betul berwarna merah dengan menggunakan filter hitam, sehingga menyerap semua spektrum yang dipantulkan. Lebih jauh lagi Paine (1981) juga menyebutkan bahwa film berwarna juga dapat berupa film berwarna normal maupun infra merah. Film infra merah selalu menghasilkan warna yang tidak sesuai dengan warna aslinya, sehingga disebut sebagai foto warna palsu. Misalnya suatu vegetasi yang seharusnya berwarna hijau segar dalam foto infra merah berubah menjadi warna merah, sedangkan air dan benda-benda anorganik lainnya justru berwarna hijau (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Warna-warna yang umum dapat diamati pada film berwarna normal dan film infra merah (Paine, 1981).

Obyek	Filem berwarna normal	Filem infra merah
Kebanyakan daun kayu keras	Hijau	Magenta
Kebanyakan daun konifer	Hijau	Magenta-magenta biru muda
Konifer muda	Hijau	Magenta – merah jambu
Konifer tua	Hijau muda	Magenta biru muda
Daun semak	Kuning	Merah muda
Daun sakit	Kuning	Kemerahan campur biru (mauve)
Daun kayu keras (musim gugur)	Kuning	Putih
Daun larch (musim gugur)	Merah	Kemerahan sampai biru-putih
Daun kayu keras (musim gugur)	Kuning jerami-coklat- merah	Kuning cerah / terang
Daun mati, kering	Abu-abu gelap-coklat	Kuning –hijau kekuningan
Cabang tak-berdaun	Keputih-putihan	Hijau, hijau-biru, biru
Cabang tak-berdaun + bekas daun	Abu-abu gelap tua	Silver – hijau silver
Cabang basah dengan bekas daun	Hijau biru	Hijau, hijau-biru, hijau
Bayangan	Hijau muda	Hitam (tanpa detil)
Air bersih		Biru muda
Air keruh		Biru tua sampai hitam

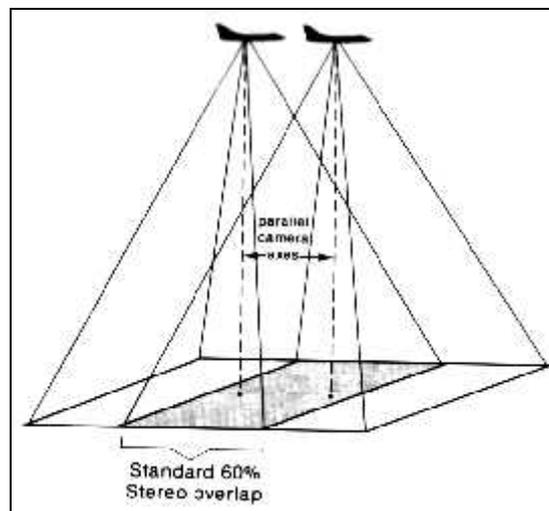
Kedua film baik hitam/putih maupun warna memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri-sendiri. Kelebihan film hitam/putih adalah:

- 1) Dapat menembus kabut dengan lebih baik
- 2) Daerah-daerah berair dengan kelembaban tinggi disajikan dengan baik
- 3) Dapat membedakan dengan baik antara kayu keras dan konifer / semak
- 4) Warna-warna anorganik dapat dideteksi dengan sangat baik

Kelebihan-kelebihan yang dimiliki oleh foto hitam/putih tersebut justru menjadi kekurangan bagi foto warna. Foto infra merah tidak dapat mendeteksi adanya bayangan, contoh: gunung yang tinggi atau relief yang kasar dan vegetasi yang lebat dengan bayangan besar tidak dapat dideteksi dengan foto infra merah.

Foto Udara

Foto udara biasanya berwarna *grayscale*, rona dalam foto udara ditunjukkan oleh bayangan dalam obyek. Morfologi dengan relief yang kasar (pegunungan dan lembah) memiliki bayangan yang lebih gelap. Stereoskop digunakan dalam pengamatan foto udara, yang berfungsi untuk mengetahui tingkat kekasaran relief. Sedangkan untuk mengetahui kualitatif dan kuantitatif reliefnya digunakan planimeter, yang fungsinya untuk mengetahui beda tinggi medan. Ada dua jenis stereoskop dalam pengamatan foto udara, yaitu stereoskop *portable* dan stereoskop saku (*hand pocket*). Stereoskop *portable* hanya dapat digunakan di laboratorium karena ukurannya yang besar, dan memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi. Stereoskop saku dapat dibawa ke lapangan karena ukurannya yang kecil dan fleksibel. Sepasang foto udara, yang bertampalan diperlukan dalam rangka mendapatkan data tiga dimensinya di bawah stereoskop. Pengamatan di bawah stereoskop dapat memperoleh 60% data tiga dimensi bagian paralel (Gambar 2.6).



Gambar 2.6 Pengamatan dengan stereoskop pada foto udara (Paine, 1981).

Hal-hal yang harus diamati dalam foto udara adalah:

- 1) Bentuk lahan; yaitu kondisi geomorfologi secara umum meliputi tinggian (perbukitan-pegunungan), dataran, lembah, dengan kawasan hutan, permukiman, persawahan dan lain-lain. Data ini digunakan sebagai dasar dalam melakukan pengembangan lahan, misalnya kelayakannya sebagai area tambang, lokasi poros bendungan atau jalur jalan raya.
- 2) Bayangan; digunakan untuk memerikan profil daerah (morfologi), meliputi ukuran-ukuran relative, seperti jembatan, sungai, jalan, menara, gedung atau vegetasi). Kadang-kadang bayangan juga dapat mengaburkan detil yang penting dalam pengamatan. Bayangan sangat dibutuhkan untuk penentuan akses jalan, misalnya dalam penyusunan master plan suatu kerangka kegiatan geologi lingkungan / geologi teknik.
- 3) Rona, adalah tingkat kecerahan dan kegelapan suatu foto, diamati untuk membantu membedakan obyek. Rona diperikan sebagai seragam (*uniform*), berbintik (*mottled*), bergaris (*banded*) dan berkerak (*scabbed*). Tingkat

kekontrasan rona ditentukan sebagai tajam, jelas, berangsur dan tidak jelas. Faktor penentu tingkatan rona adalah kelembaban, kandungan air, dan kerapatan vegetasi saat pemotretan.

- 4) Tekstur, yaitu satu-kesatuan perubahan rona dengan susunan yang khas; ditentukan sebagai halus / *smooth* (berarti licin: landai), sedang (bergelombang) dan kasar (terjal).
- 5) Pola; dibentuk oleh hasil aktivitas manusia (pengembangan lingkungan) dan alamiah. Pola yang dibentuk oleh aktivitas manusia adalah jalan, gedung-gedung, persawahan, perkampungan dan lain-lain. Pola yang terbentuk secara alamiah adalah sungai, tebing, bukit, gunung dan teras-teras pantai. Pola yang dibentuk oleh manusia biasanya sangat teratur dan beragam, sedangkan pola yang terbentuk secara alamiah biasanya tak-menentu.

Peta geologi sangat penting dalam menentukan keberhasilan pekerjaan geologi lingkungan. Peta geologi disusun dengan menggunakan peta dasar berupa peta topografi. Data geologi yang diinput ke dalam peta topografi terdiri atas sebaran litologi, struktur geologi dan kegiatan manusia (penambangan, TPA dan lain-lain). Data geologi tersebut didapatkan dari hasil pemetaan geologi permukaan, hasil interpretasi penginderaan jauh (inderaja), dan hasil interpretasi geologi bawah permukaan. Peta geologi harus dapat memberikan informasi menyeluruh mengenai geomorfologi (gambaran topografi) dan geologi (sebaran litologi, struktur geologi dan potensi sumber daya geologi). Pada tahun 1980, Divisi Geologi Teknik (*Geological Society of America*) dan *International Association of Engineering Geology* (IAEG) mengajukan standarisasi simbol-simbol peta geologi Teknik, gabungan antara pengembangan teknik pemetaan geomorfologi dan simbol-simbol yang merefleksikan secara umum keaslian unit-unit peta geologi teknik (Hatheway, 1981). *The Engineering Group of the Geological Society of London* lebih jauh lagi menyadari pentingnya data geomorfologi dalam peta geologi teknik. Yaitu dengan menekankan pemenuhan kebutuhan akan peta geomorfologi untuk pekerjaan-pekerjaan geologi teknik.

Peta geologi di Indonesia diproduksi oleh Pusat Survei Geologi (PSG) Bandung. PSG pada awalnya bernama Djawatan Geologi, yang selanjutnya berubah menjadi Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (PPPGe). Peta geologi yang dihasilkannya memiliki skala 1:100.000 untuk Pulau Jawa - Bali dan skala 1:250.000 untuk luar pulau Jawa. Peta-peta tersebut disusun pada tahun 1970an dan diperbaharui lagi pada tahun 1990an. Kini, PSG telah memiliki ratusan peta geologi di seluruh Indonesia. Susunan peta geologi di Indonesia disimbolkan dalam bentuk warna yang merefleksikan komposisi litologi yang mendominasi suatu formasi batuan. Formasi batuan adalah sekumpulan batuan yang memiliki ciri / sifat yang sama; contoh, Formasi Andesit Tua berciri utama tersusun atas batuan gunungapi fraksi kasar; Formasi Sentolo tersusun atas batugamping klastika; dan Formasi Jonggrangan tersusun atas batugamping non-klastika (Rahardjo dkk, 1977). Gambar 2.7 adalah contoh peta geologi lembar Yogyakarta dengan skala 1:100.000 yang diproduksi pada tahun 1977. Simbol-simbol warna yang dikembangkan dalam peta geologi versi Indonesia adalah merah untuk batuan beku, coklat / orange untuk breksi dan konglomerat (batuan klastika fraksi kasar),

kuning untuk batupasir, hijau untuk batuan klastika fraksi halus (serpih, lanau dan batulempung), biru untuk batugamping, pink untuk tuf dan ungu untuk batuan metamorf. Di samping simbol-simbol warna, juga diberlakukan simbol-simbol grafis (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Standarisasi simbol-simbol grafis batuan dan struktur geologi yang ada dalam peta geologi

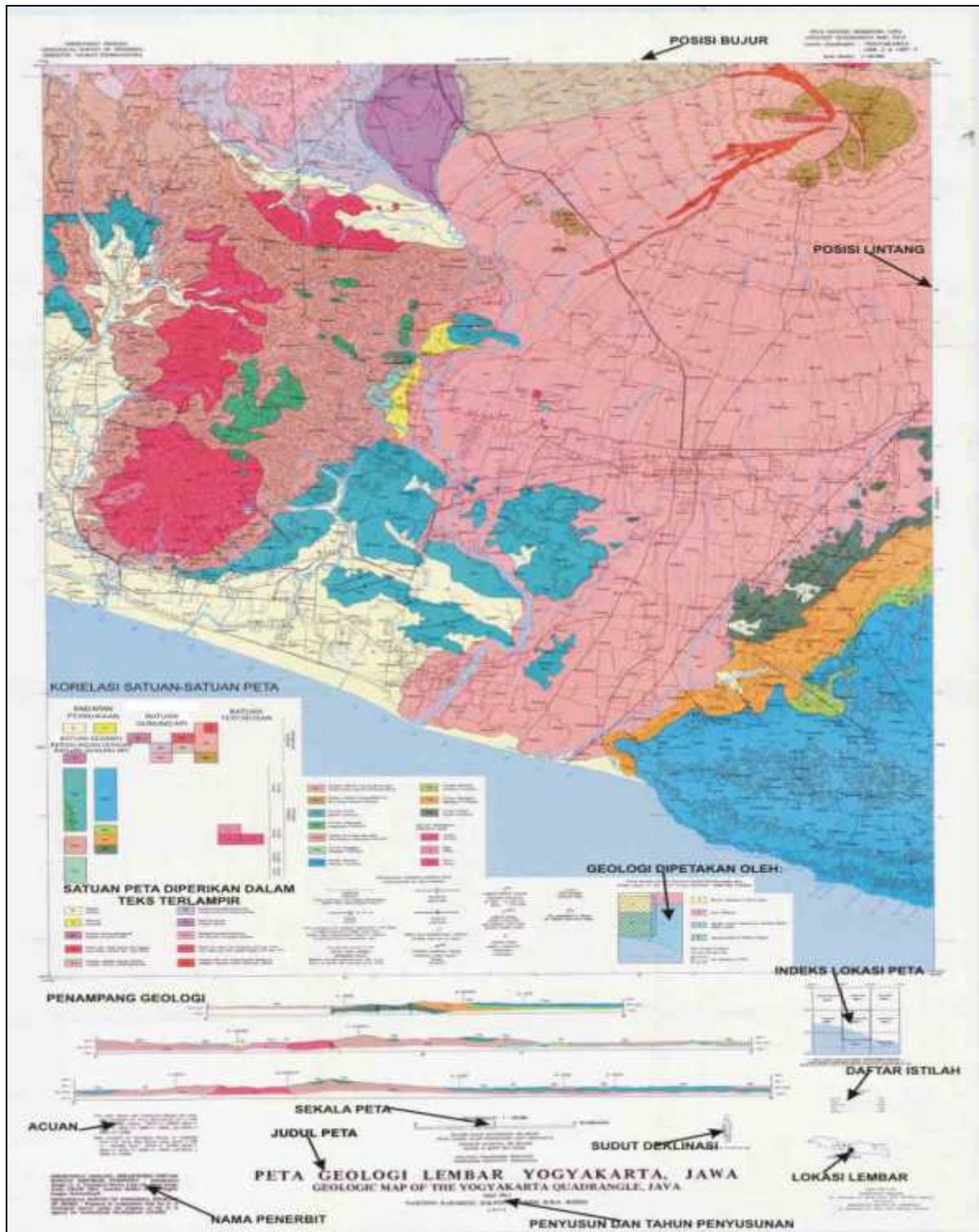
Simbol	Nama batuan	Simbol	Nama struktur
	Batugamping klastika		Batas / kontak batuan
	Breksi		Kontur
	Konglomerat		Sesar; U: bagian yang naik, D: bagian yang turun
	Batupasir		Sesar geser / mendatar
	Lanau / napal		Struktur / batas yang diperkirakan
	Tuf		Antiklin
	Batuan metamorf		Sinklin
			Jurus dan kemiringan lapisan batuan
			Lokasi bahan galian

Peta geologi tematik yang disusun oleh mahasiswa pada program studi Teknik Geologi memiliki skala 1:25.000. Peta geologi ini lebih detail dari pada peta geologi skala 1:100.000 yang diproduksi oleh Badan Geologi. Peta geologi ini telah mampu menggambarkan potensi positif dan negatif dari suatu daerah yang dipetakan, namun belum menggambarkan sebaran dan ketebalan tanah. Tanah hasil lapukan yang masih *insitu* digambarkan sebagai koluvium, sedangkan tanah *transported* digambarkan sebagai aluvium dan fluvium, yang tebalnya tidak akan mencapai hingga 100-250m. Peta geologi tematik yang lain adalah skala 1:12.500 atau 1:10.000. Kedua peta tersebut yang membedakannya hanyalah skalanya, tentang data geologi yang terinformasikan di dalamnya terdiri atas satuan-satuan litologi secara informal, potensi positif dan negatif yang terkandung di dalamnya, struktur geologi dan dilengkapi dengan penampang geologi dan lampiran lepas kolom stratigrafi untuk masing-masing satuan batuan. Penampang geologi berfungsi untuk menjelaskan hubungan masing-masing satuan batuan dan gambaran vertikal deformasi yang mungkin dijumpai di dalamnya.

2.2 Sebaran Litologi dan Horizon Tanah

Dalam pekerjaan geologi teknik / geologi lingkungan, sebaran litologi dan urutan stratigrafi batuan serta horizon tanah adalah data yang sangat penting. Lapisan tanah dapat merupakan zona lemah yang berfungsi sebagai bidang gelincir saat terjadinya longsoran. Lapisan tanah juga digunakan sebagai lahan perkebunan dan pertanian, serta sangat berpengaruh dalam menentukan posisi (kedalaman) pondasi bangunan. Ironisnya, meskipun peta geologi memiliki skala

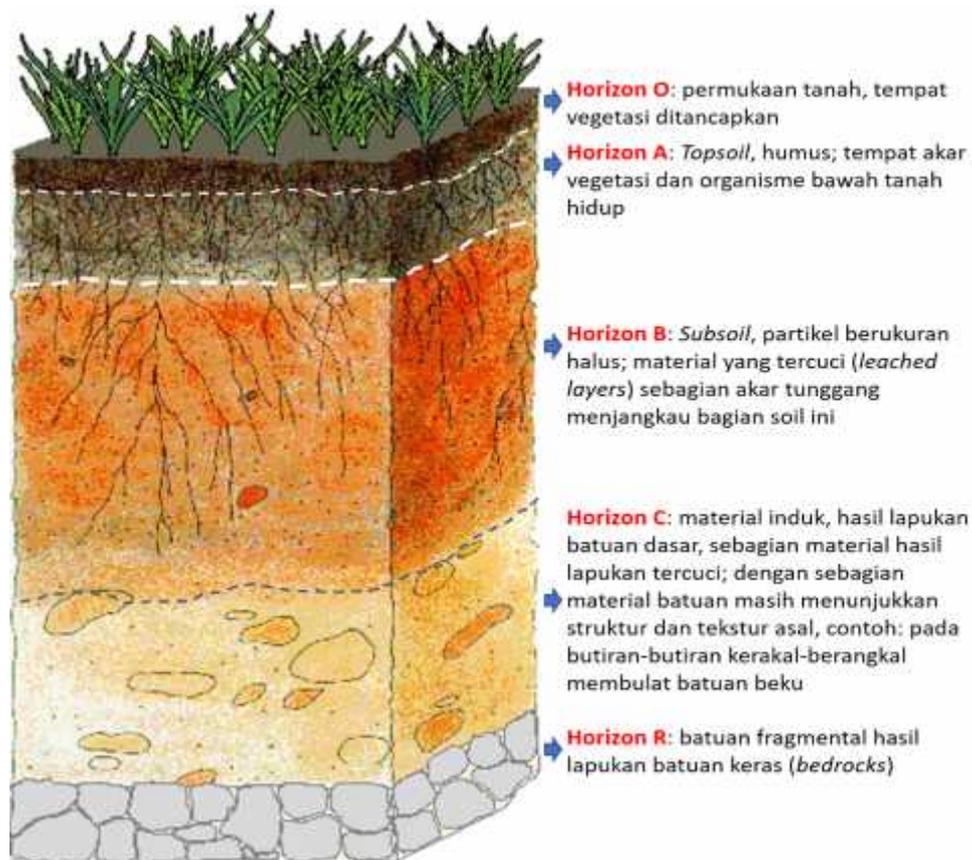
1:10.000, 1:25.000 hingga 1:100.000, lapisan soil ataupun aluvium yang melimpah di permukaan dengan tebal beberapa meter tersebut tidak direkam dengan baik, dan tidak digambarkan melalui kolom stratigrafi masing-masing satuan batuan sekalipun.



Gambar 2.7 Peta geologi lembar Yogyakarta skala 1:100.000 (Rahardjo dkk, 1977)

Untuk itulah, diperlukan peta-peta geologi teknik seperti peta sebaran tanah (peta tanah), peta kerentanan tanah / batuan dan peta bahaya. Lepas dari adanya

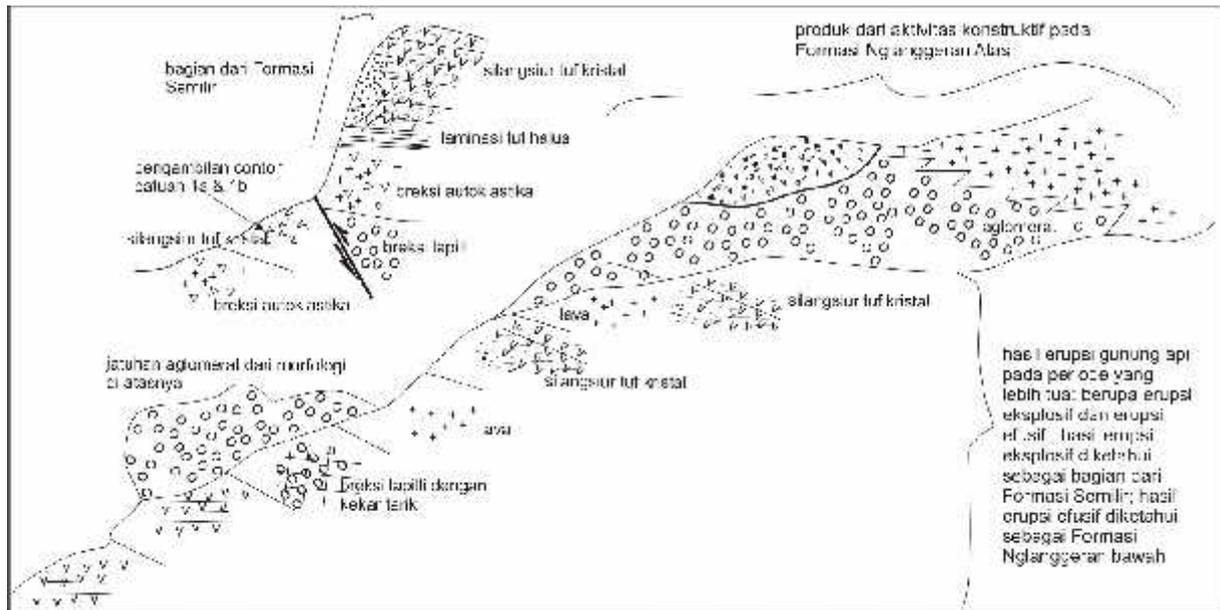
beberapa kelemahan dalam peta geologi, keberadaan peta geologi tetap masih dibutuhkan untuk mendukung pekerjaan geologi lingkungan, yaitu dengan menginterpretasi secara menyeluruh data geologi tersebut, yaitu sebaran litologinya dan struktur geologi yang dijumpai di suatu wilayah. Telah disebutkan bahwa tanah (soil) memegang peranan penting dalam pekerjaan-pekerjaan geologi teknik dan lingkungan. Apa pun litologi asalnya; apakah batuan beku, batuan sedimen, batuan metamorf atau batuan vulkanik, secara normal tetap saja akan memiliki profil tanah yang terdiri atas tanah lapukan, tanah *leached*, batuan lapuk dan batuan dasar (lapuk ringan-tak lapuk). Horizon tanah secara lengkap tanpa deformasi dapat digambarkan sebagaimana dalam Gambar 2.8 di bawah. Namun, tidak selamanya batuan yang berada pada tepian lempeng aktif dan dengan iklim tropis, seperti Jawa, Sumatra dan Sulawesi, akan dijumpai kelengkapan horizon tersebut. Deformasi baik yang dipicu oleh energi tektonik maupun non-tektonik, yaitu lipatan, sesar (patahan) dan kekar, serta akibat dinamika terestrial dan antropogenik, sering berujung pada gerakan massa.



Gambar 2.8 Profil vertikal tanah menurut Oberlander & Muller (1987)

Gerakan massa tersebut telah membentuk endapan campuran di permukaan bumi, dan menyisakan tebing terjal yang selanjutnya terisi oleh airtanah. Pelapukan tidak lagi berlangsung secara vertikal, namun secara miring atau lateral. Endapan longsorannya sendiri membentuk kipas aluvial (*triangular facet*) memanjang di sepanjang tebing terjal, yang tidak lagi mencerminkan batuan asalnya, tetapi sebagai endapan debris yang sangat tebal di area tekuk lereng. Data ini tidak akan terrekam dalam peta geologi. Dalam peta geologi bisa saja menginformasikan distribusi satuan-satuan litologi yang detail dengan pemerian

litologi ditulis dalam kondisi sangat lapuk, lapuk sedang hingga lapuk ringan dan segar. Sebaran dari litologi lapuk (sesuai dengan tingkatannya) pun hingga yang masih segar tidak diperikan dan tidak dilakukan pengeplotan. Pembaca akan melihat secara keseluruhan, sebaran satuan-satuan batuan tersebut secara masif saja (Gambar 2.7). Dalam peta juga tidak menginformasikan keberadaan endapan campuran talus (Gambar 2.9); endapan campuran sering diartikan sebagai endapan aluvial secara umum. Karena endapan talus tak-terpetakan, maka biasanya tidak disatukan dalam kelompok satuan batuan, digambarkan adanya longoran atau gerakan massa, yang disimbolkan dengan bentukan kurva bersisir.



Gambar 2.9. Gerakan massa jatuhnya batuan dan longoran yang menghasilkan endapan talus pada kaki lereng di daerah Imogiri (Kab. Bantul-DIY)

Di alam, distribusi litologi dan soil (tanah) ditentukan oleh proses geologi yang mengontrol pembentukan geomorfologinya; yaitu asal

2.3 Distribusi Struktur Geologi dan Analisis Deformasi

Dalam pekerjaan geologi teknik / lingkungan, di mana pun dan dalam tujuan pekerjaan apa pun; untuk pencarian airtanah, mitigasi bencana geologi, konstruksi dan rekayasa pertambangan, keberadaan struktur geologi merupakan prioritas dalam penanganannya. Sesar dan kekar dilakukan pengukuran komprehensif dalam kapasitas dan volume data secara statistik, yang selanjutnya dilakukan analisis secara deskriptif kuantitatif. Data hasil pengukuran dan analisis struktur geologi tersebut dilakukan kajian untuk menghitung potensi dan risiko bahaya yang ditimbulkan, jika secara statistik-probabilistik, kondisi struktur geologi tersebut memiliki potensi dan risiko bahaya, maka diperlukan antisipasi dalam bentuk rekayasa geologi (keteknikan). Rekayasa keteknikan tersebut misalnya penanganan suntikan semen (*grouting*) pada lahan yang terdeformasi yang saat ini belum bergerak, pemasangan bronjong untuk lahan.

Baiklah, dalam struktur geologi, dikenal tiga komponen penting yang berpengaruh terhadap deformasi batuan, yaitu geometri, kinematika dan dinamika. Geometri

adalah deskripsi fisik batuan yang terkena deformasi. Geometri tersebut dapat menggambarkan distribusi litologi, struktur geologi, cebakan mineral dan hidrokarbon, distribusi dan orientasi deformasi dan lain-lain. Kinematika mendiskusikan tentang pergerakan batuan, meliputi tingkat pergerakan batuan (massa), jumlah / distribusi patahan, dan distorsi batuan (pada lipatan). Analisis kinematik melibatkan empat tipe perubahan dasar, yaitu translasi (perubahan posisi), rotasi (perubahan orientasi), distorsi (perubahan ukuran) dan distorsi (perubahan bentuk). Dilasi dan distorsi sering dikelompokkan secara bersama-sama menjadi *strain* (regangan). Analisis dinamik melibatkan pengukuran atau perkiraan gaya atau tekanan yang mempengaruhi batuan. Tujuan analisis dinamik adalah untuk mengetahui jenis gaya yang bekerja selama waktu geologi yang membentuknya, evolusi gaya dan sumber gayanya. Dalam hal ini, deformasi batuan diukur dengan menggunakan konsep kinematis, kemudian membuat asumsi reologi (hubungan antara tegangan dan gaya (*stres*)) dan menjelaskan dinamika tektonik yang bekerja di dalamnya.

Ada perbedaan definisi secara analitis antara regangan (*strain*) dan tegangan (*stress*), yaitu istilah regangan mencerminkan interpretasi deskriptif tentang apa gerakan pembentuk struktur, sedangkan tegangan mencerminkan interpretasi genetik penyebab terbentuknya regangan (Marrett & Peacock, 1999). Analisis kinematik kurang spekulatif dan lebih terkait langsung dengan pengamatan, sedangkan analisis dinamis dilakukan secara komputasional di laboratorium (studio).

A. Analisis Kinematika Batuan

Data kinematika batuan dalam analisis struktur geologi di lapangan menjumpai 4 tipe pergerakan pembentuk deformasi, yaitu translasi (perubahan posisi), rotasi (perubahan arah), dilasi (perubahan ukuran) dan distorsi (perubahan bentuk) (Gambar 2.10). Deformasi batuan yang membentuk translasi adalah sesar (patahan), dapat berupa patahan naik, patahan turun, patahan mendatar dan patahan oblik. Ke empat patahan tersebut dapat dianalisis secara detail dari keberadaan offset batuan, bidang sesar dan bidang kekar, bidang gelincir dan bidang robohan. Translasi juga sering diikuti dengan distorsi, membentuk lipatan dengan beberapa kedudukan batuan yang saling berseberangan sebagai indikasi adanya lipatan-lipatan terseret.

Analisis struktur geologi menggunakan pendekatan kinematika melalui analisis geometri struktur geologi, sedangkan titik-titik pergeserannya dianalisis dengan menggunakan persamaan transformasi struktur geologi secara tiga dimensi. Di lapangan, sering menemukan kendala pengukuran yaitu kedalaman struktur geologi yang tidak dapat diamati di lapangan. Secara teoritis, struktur geologi yang terbentuk oleh gaya tektonik, maka distribusi struktur geologi berasal dari dalam bumi, namun struktur geologi yang dibentuk oleh gaya eksogen, maka distribusinya hanya di permukaan. Untuk mengetahui apakah gaya pembentuk deformasi tersebut berasal dari gaya endogen atau eksogen, maka diperlukan pengamatan dan pengukuran secara tiga dimensi, yaitu:

$$X' = a_{10} + a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}Z$$

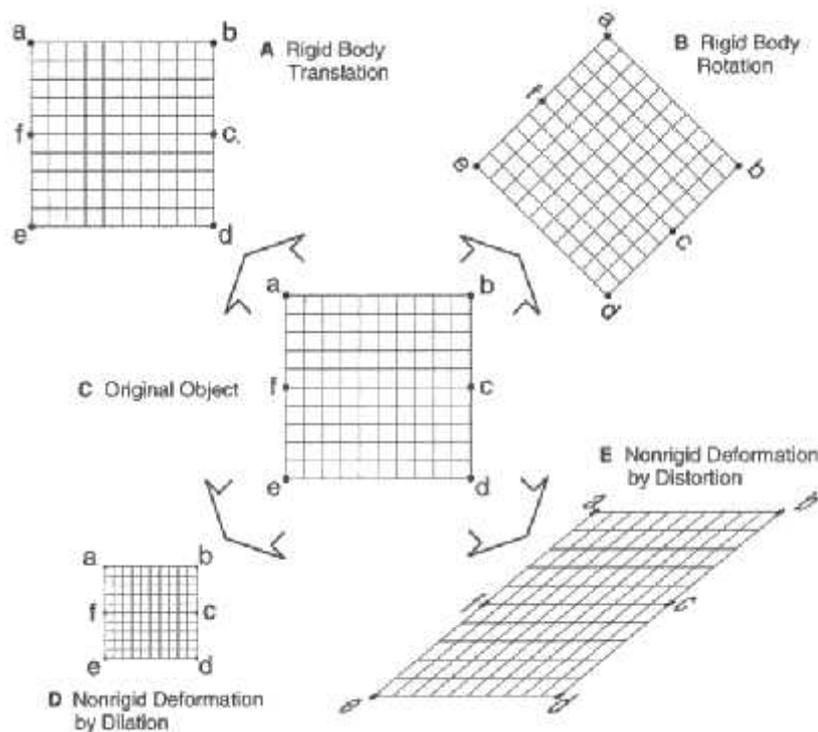
$$Y' = a_{20} + a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}Z$$

$$Z' = a_{30} + a_{31}X + a_{32}Y + a_{33}Z$$

Namun, sayangnya, jika pengukuran tiga dimensi belum didapatkan, karena keterbatasan metode pengamatan, maka dapat didekati dengan:

$$X' = a_{10} + a_{11}X + a_{12}Y$$

$$Y' = a_{20} + a_{21}X + a_{22}Y$$



Gambar 2.10. Tipe-tipe pergerakan gaya pembentuk deformasi batuan (Anonim,)

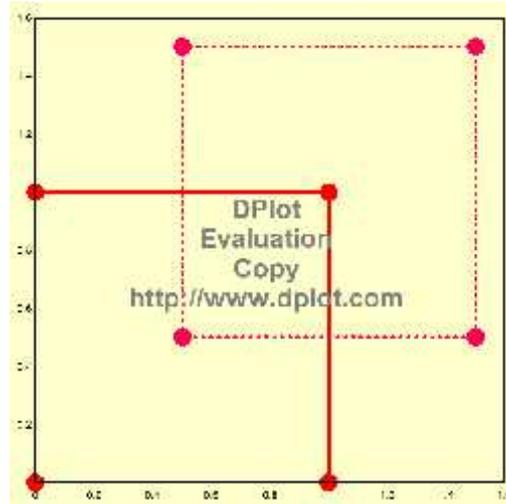
Angka a_{10} , a_{11} , a_{12} dan seterusnya adalah data hasil pengamatan dan pengukuran yang dilakukan secara statistik, dapat menggunakan program *Dataplot^(R)*, *SPSS^(R)*, atau program-program statistik yang lain. Data pengamatan tersebut meliputi dimensi struktur, yaitu kedudukan struktur, lebar bukaan (jika membuka) dan panjang struktur yang dapat terrekam, bersifat bergerak atau tidak bergerak (dapat diidentifikasi dari kondisi vegetasi yang tumbuh di atasnya, batang pohon yang melengkung berarti bergerak). Standarisasi data pengukuran adalah 100. Data hasil pengukuran selanjutnya dirangking menurut peruntukannya. Data yang telah dirangking selanjutnya dientrykan ke program komputer yang dimaksud, untuk diketahui arah umumnya. Ada dua puncak gaya yang akan didapatkan jika arah gaya pembentuknya adalah kompresi, acak jika gayanya berasal dari eksogenik, dan saling tegak lurus jika merupakan gaya ekstensi.

Rigid Translation:

$$X' = 0.5 + 1.0X + 0Y$$

$$Y' = 0.5 + 0X + 1.0Y$$

Point	X'	Y'	X	Y
a ₁₀	0,5	0,5	0	0
a ₁₁	1,5	0,5	1	0
a ₁₂	1,5	1,5	1	1
a ₁₃	0,5	1,5	0	1
a ₁₄	0,5	0,5	0	0



Gambar 2.11. Penentuan pergeseran batuan / massa (*displacements*) dari hasil pengukuran di lapangan dan hasil pengolahannya menggunakan program statistik *Dataplot*^(R).

Ada dua jenis regangan (*strain*) yang terjadi dalam tubuh batuan / massa yang terdeformasi, yaitu:

1. Perubahan secara linear (*Normal Strain*):

- a. Regangan keteknikan (*engineering*): $\epsilon = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$
- b. Regangan tarik (*stretch*): $\Sigma = \lambda / \lambda_0 = \epsilon + 1$
- c. *Quadratic elongation*: $\lambda = (\lambda / \lambda_0)^2 = \Sigma^2 = (\epsilon + 1)^2$

Perubahan-perubahan bentuk dasar tersebut disebut sebagai *Lagrangian Strain*, dengan mengacu pada nilai λ_0 , the undeformed state as opposed to the deformed length (*Eulerian strain*).

2. Regangan geser (*Shear Strain*)

Di lapangan, regangan dapat dibagi menjadi 2 berdasarkan deformasi yang dibentuknya, yaitu regangan geser dan regangan menyudut. Regangan geser membentuk morfologi rekahan yang menutup dan telah bergeser secara lateral. Deformasi dari regangan ini membentuk sesar. Dalam melakukan analisis struktur untuk regangan geser, pengamatan dan pengukuran yang dilakukan meliputi dimensi rekahan (deformasi), kekasaran permukaan rekahan, dan jarak masing-masing rekahan yang satu dengan yang lain. Regangan menyudut (ψ) adalah regangan / defleksi yang dibentuk oleh dua gaya pembentuk deformasi yang memiliki kedudukan menyudut. Jika arah defleksinya searah jarum jam maka positif (+) dan jika berlawanan arah dengan jarum jam maka negatif (-). Regangan ini membentuk deformasi saling berpotongan, membentuk sudut lancip, yang disebut kekar gerus. Data yang diamati pada deformasi yang dibentuk oleh regangan menyudut ini adalah kedudukan dan dimensi (panjang dan lebar) deformasinya, sifat deformasi yang dibentuk (menghasilkan rekahan membuka atau menutup) dan kekasaran permukaan bidang deformasi (berpotensi

membentuk bidang gelincir, bidang robohan, atau bidang lemah rayapan/nendatan).

regangan geser (γ) ditentukan sebagai tangen dari sudut perpotongan + dan/atau - tersebut: $g = \tan(\psi)$

B. Analisis Dinamis Batuan

Pada prinsipnya, setiap deformasi pada batuan dan konstruksi selalu dipengaruhi oleh faktor dinamis, yaitu pembebanan. Gaya pembebanan tersebut dapat berasal dari dalam bumi (endogen / tektonika) dan dari luar bumi (oleh beban bangunan, jatuhnya meteorit dan / iklim). Analisis dinamis dimaksudkan untuk mengetahui:

- a. Frekuensi pembebanan secara normal (secara alami, tanpa campur tangan manusia, dan tanpa percepatan oleh kejadian abnormal seperti erupsi gunung api, gempa bumi dan kejadian alam yang bersifat katastrof lainnya).
- b. Perpindahan dinamis pembebanan yang bekerja di dalamnya, seperti eksodus masa dalam jumlah yang besar, penambangan, dan gerakan massa.
- c. Runtunan kejadian geologis dari waktu ke waktu (waktu / lamanya pembebanan berlangsung / sejarah pembebanan)

Dari hasil analisis dinamis dapat digunakan untuk melakukan analisis modal menggunakan pendekatan statistik-probabilistik. Tahapan analisis ini dimaksudkan untuk menentukan nilai probabilitas dinamika suatu massa, seperti untuk memprediksi kekuatan dan ketahanan konstruksi dan ketahanan batuan (terhadap suatu bangunan dan / atau gerakan massa). Dalam analisis dinamis, massa (batuan / konstruksi) mengikuti hukum kekekalan massa, yaitu: gaya dibagi dengan percepatan, $m = f / a$, atau sama dengan beratnya dibagi gravitasi. *Stiffness* massa adalah dimensi dari resistensi massa dalam hubungan nilai elastisitas (ketahanan) batuan terhadap probabilitas deformasi yang dibentuknya. Aplikasi dari analisis dinamika batuan ini digunakan untuk menentukan nilai peredaman yang harus diberikan terkait dengan probabilitas gangguan yang akan terjadi. Peredaman adalah hubungan antara resistensi batuan / massa terhadap peredam getaran (gerakan penyebab deformasi). Ketahanan secara dinamis pada massa batuan / konstruksi hanya dapat membentuk sedikit efek peredaman sistem. Hal itu yang menyebabkan sangat sedikitnya efek pada frekuensi alami sistem. Untuk menambah redaman alami batuan tersebut, diperlukan pembatasan amplitudo osilasi pada resonansinya, yang hanya dapat dilakukan melalui rekayasa keteknikan. Dalam hal ini, analisis dinamika batuan ditujukan untuk menentukan metode dan dimensi rekayasa keteknikan dalam penanggulangan gerakan massa / deformasi yang mungkin ditimbulkan.

Dalam analisis geologi struktur, analisis dinamika melibatkan energi, gaya, tegangan, dan regangan. Sangat penting untuk membedakan konsep dinamis dan kinematik.

Contoh Analisis Stabilitas Lereng

Ada beberapa metode dalam analisis stabilitas lereng, yaitu Bishop, Janbu dan Fellenius. Hal pertama yang harus dilakukan dalam melakukan analisis kestabilan

lereng adalah memahami faktor-faktor penyebab terganggunya kestabilan lereng, yaitu: lereng terlalu curam, sifat fisik tanah, material (soil / batuan) kurang terkompaksi, pengaruh curah hujan dan / porositas batuan, titik jenuh material oleh airtanah dan posisi muka airtanah, gempa bumi, likuifaksi dan aktivitas manusia.

Langkah selanjutnya adalah menentukan parameter dan variabel analisis, yaitu parameter total (γ , c , ϕ) dan parameter efektif (γ' , c' , ϕ'). Metode analisis menggunakan kriteria Mohr-Coulomb; yaitu kesetimbangan gaya dan kesetimbangan gaya dan momen gaya. Di lapangan, kesetimbangan gaya yang biasanya dilakukan adalah:

- *Ordinary Method Of Slices (Oms)*
- *Simplified Bishop*
- *Simplified Janbu*
- *Corps Of Engineer*
- *Lowe And Karafiath*
- *Generalized Janbu*

Sedangkan analisis kesetimbangan gaya dan momen gaya, menggunakan pendekatan:

- *Bishop's rigorous*
- *Spencer*
- *Sarma*
- *Morgenstern-price*

Metode-metode tersebut diajarkan secara detail pada mata kuliah Geologi Teknik.

2.4 Lingkup Pekerjaan Geologi Lingkungan

Bencana geologi yang dijumpai di alam adalah gerakan massa, gempa bumi, banjir dan tsunami, dan letusan gunung api. Sejarah kebencanaan diperlukan dalam rangka mengidentifikasi potensi bahaya yang dapat ditimbulkan dalam suatu daerah.

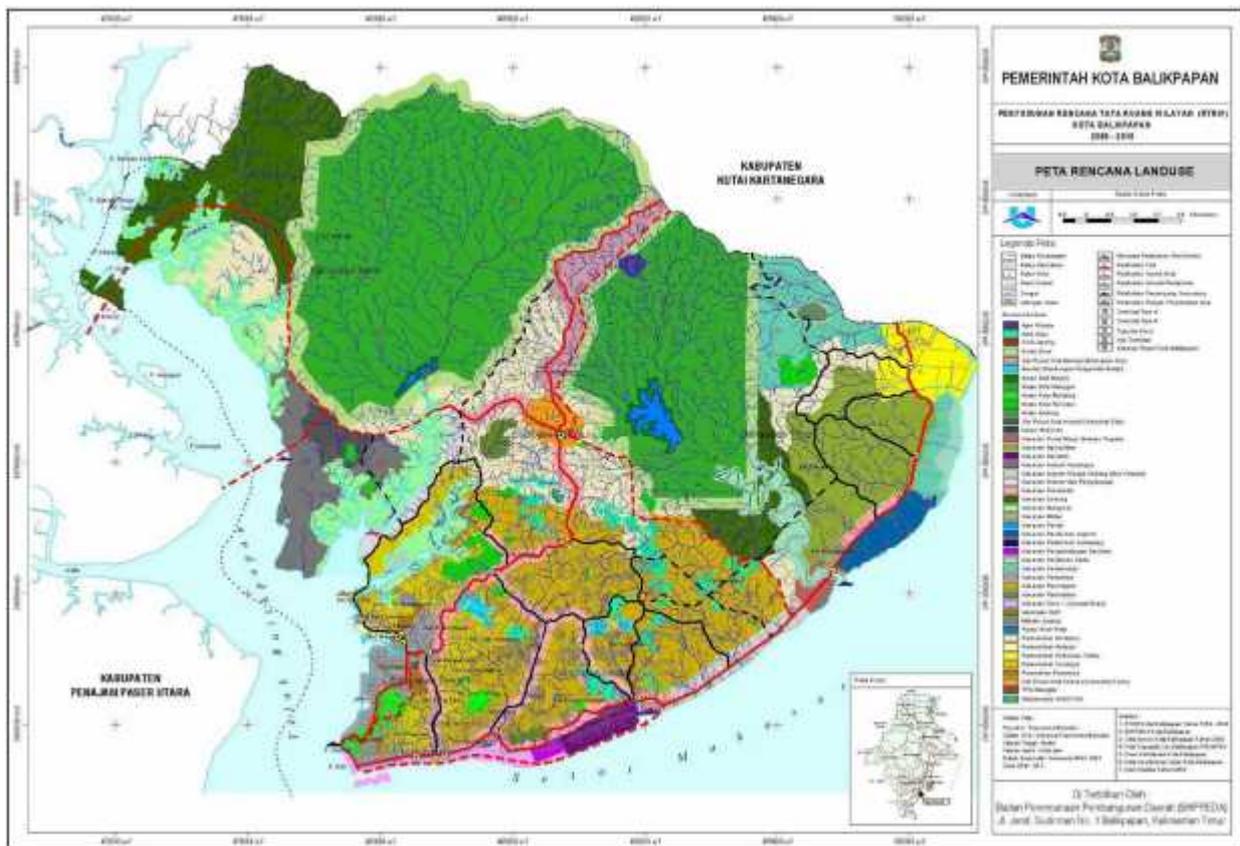
A. Pengembangan Wilayah

Data geomorfologi sangat penting dalam aplikasi perencanaan dan pengembangan wilayah. Untuk dapat menyusun peta tata ruang wilayah diperlukan data rupa bumi, sebaran litologi dan struktur geologi. Zona I: Daerah dengan gradien lereng lebih dari 20° dengan topografi bergelombang sedang sampai kuat dikembangkan sebagai daerah perlindungan (hutan lindung, rawan bencana dan perlindungan airtanah), sehingga tidak dibenarkan untuk dikembangkan sebagai lahan permukiman. Zona II: Daerah dengan gradien lereng antara 8-20° dimanfaatkan sebagai lahan pertanian, perkebunan dan perhutanan, serta perlindungan imbuan airtanah; tidak dibenarkan untuk pengembangan perekonomian (niaga, industri dan perkantoran). Wilayah ini dapat dikembangkan sebagai areal pariwisata yang tidak harus merusak ekosistem. Zona III: Daerah dengan gradien lereng 0-8° dikembangkan sebagai lahan pusat perekonomian, industri, perkantoran dan segala kegiatan sosial, ekonomi dan budaya; dikembangkan mengikuti koridor-koridor dengan wilayah di sekitarnya. Zona IV: Daerah dengan

sejarah kebencanaan (gempa bumi, tsunami, banjir gelombang, angin puting beliung, longsor dan lain-lain), rekaman data struktur geologi; pengembangan wilayah ini harus mengikuti petunjuk standarisasi pembangunan yang benar sesuai dengan potensi bencana yang ada.

B. Perencanaan Wilayah

Di samping peta tata ruang, seorang ahli geologi lingkungan harus mampu menyusun peta rawan bencana. Peta rawan bencana memberikan informasi tentang potensi bahaya, jalur-jalur evakuasi, lokasi-lokasi barak pengungsian dan denah wilayah. Contoh: peta rawan bencana letusan gunung api; mencakup daerah (zona) berpotensi terlanda awan panas dan aliran lava (zona rawan bencana I), zona-zona berpotensi dilalui hembusan awan panas (zona rawan bencana II), zona-zona yang dilalui aliran lahar (zona rawan bencana III), lokasi barak pengungsian, dan jalur-jalur evakuasi.



Gambar 2.12 Peta perencanaan wilayah (RTRW, contoh di Kota Balikpapan, sumber: Pemerintah Daerah Kota Balikpapan)

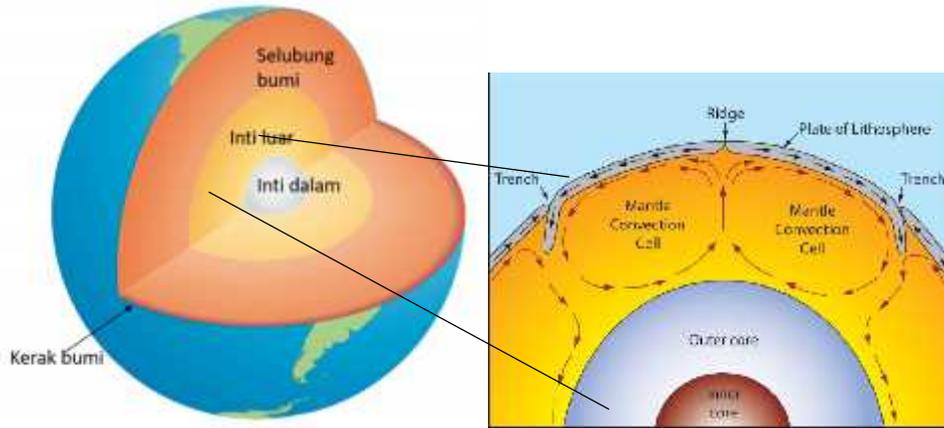
MATERIAL PENYUSUN KERAK BUMI

Bumi adalah tempat kita berpijak, beraktivitas dan kembali untuk dikuburkan. Bumi adalah satu-satunya planet dalam tatasurya Bimasakti yang memiliki atmosfer dan menyediakan sumber-sumber kehidupan, sehingga makhluk hidup dapat berkembang di dalamnya. Bumi tersusun atas berbagai material; dengan sifat dan komponen tertentu. Susunan bumi tersebutlah yang memungkinkan makhluk hidup dapat bertahan, dari segala cuaca, menyediakan kesuburan sehingga mendatangkan makanan, sekaligus lahan, serta segala kebutuhan yang diperlukan manusia. Permukaan bumi, yang disebut sebagai kerak bumi adalah bagian terkecil bumi, yang memiliki peran terbesar bagi kehidupan manusia. Litologinya tersusun atas batuan sedimen, batuan beku dan batuan metamorf dengan tatanan tektonik yang sangat rumit. Tatanan tektonik tersebut selanjutnya mempengaruhi perkembangan geomorfologinya, serta menghasilkan material penyusunnya.

3.1 Struktur Bumi

Tiga abad yang lalu, ilmuwan Inggris bernama Isaac Newton menghitung densitas rata-rata bumi, dengan didasarkan pada jarak antar masing-masing planet dan besaran nilai gaya gravitasi bumi. Menurut Newton tersebut, densitas rata-rata bumi besarnya dua kalinya densitas batuan yang menyusun permukaan bumi. Dari kondisi ini, Newton menyimpulkan bahwa inti bumi pasti memiliki sifat yang lebih padat daripada komponen-komponen bumi yang lain (selubung bumi dan kerak bumi). Sedangkan menurut Wadati (1935), dengan didasarkan pada kedalaman pusat-pusat gempa bumi yang diukur dari distribusi gelombang P (*compressional*) dan gelombang S (*shear*). Bentuk lengkung arah edar disebabkan oleh perbedaan komposisi batuan pada kedalaman yang berbeda. Gelombang S tidak merambat menembus inti bumi tetapi mungkin telah berubah menjadi gelombang *compressional* (K) saat menyentuh inti bumi (PKP, SKS). Gelombang yang kemungkinan terdeteksi di permukaan (PP, PPP, SS).

Struktur Bumi tersusun atas tiga lapis secara bertingkat, yaitu kerak bumi yang menyusun bagian terluar bumi dan sangat tipis (~1 %), mantel (selubung bumi ~ 84 %) menyusun bagian tengah bumi dan inti bumi yang menyusun bagian paling dalam bumi (~15 %); tebal mantel dan inti bumi hampir sama dan masing-masing tersusun atas dua bagian (Gambar III.2).



Gambar 3.1. Susunan kerak bumi dan sifat-sifat materialnya (Robertson, 1996)

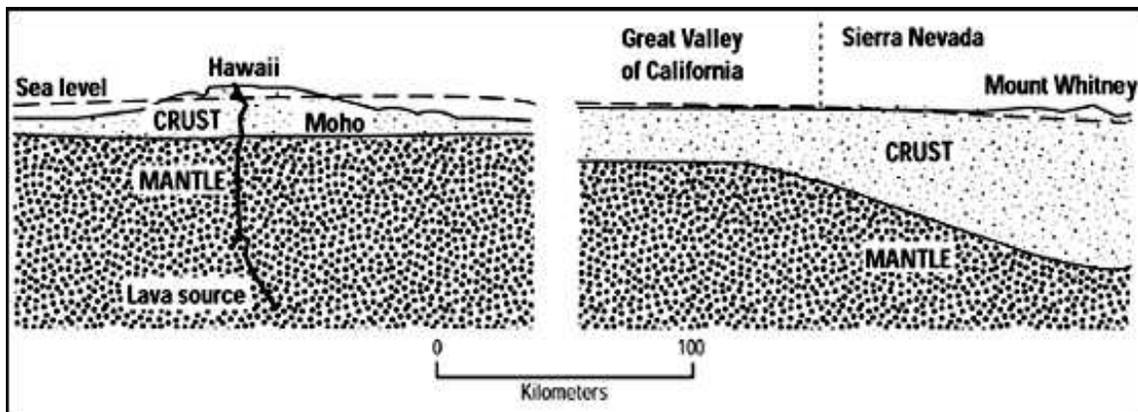
- a. Kerak Bumi. Di manapun kita berdiri dan beraktivitas, seperti membangun rumah/konstruksi, menuntut ilmu, berjual-beli, bertransaksi, berrekreasi dan lain-lain, selalu berpijak di atas lapisan kerak bumi. Kerak bumi adalah bagian terluar dari bumi. Dibandingkan dengan lapisan-lapisan penyusun bumi yang lain, kerak bumi merupakan bagian yang paling tipis dan paling rapuh. Sejalan dengan usia dan perkembangannya, kerak bumi terdiri atas banyak lempeng. Dan di dalam kerak bumi inilah, semua aktivitas geologi berlangsung, membentuk tinggian, rendahan, laut, darat dan pegunungan.

Kondisi geologi pada lapisan kerak bumi paling banyak dipelajari orang dari pada kedua bagian bumi di bawahnya, sehingga informasi struktur dan komposisinya paling banyak diketahui. Kerak bumi tersusun atas batuan yang pola sebaran vertikalnya secara berlapis-lapis, sedangkan sebaran lateralnya bervariasi; ada yang menerus dan ada yang secara lokal. Hal itu dipengaruhi oleh faktor-faktor geologi yang berkembang selama pembentukannya. Sebagai contoh adalah kegiatan gunung api menghasilkan batuan gunung api yang selanjutnya membangun kerucut gunung api, material hasil pengerjaan kembalinya (epiklastika) diendapkan sebagai batuan sedimenter, dan hasil pelapukannya menghasilkan lapisan tanah di permukaan. Di samping itu, magma yang terbentuk akibat proses pelelehan sebagian batuan pada zona Benua dalam proses tektonik lempeng, akan membangun pasak-pasak gunung membentuk batuan intrusi. Proses pengerjaan kembali batuan asal gunung api dan batuan beku intrusi selanjutnya tertransportasi hingga ke suatu cekungan membentuk batuan sedimenter. Proses sedimentasi dan erosi, konsolidasi dan kompaksi, serta rekristalisasi membentuk perlapisan batuan dalam ketebalan yang bervariasi. Proses-proses geologi tersebut pun dikontrol oleh proses tektonisme yang bersifat lebih global, yang diketahui sebagai tektonik lempeng.

Kini, permukaan bumi tersusun atas 12 lempeng besar dan ratusan lempeng mikro. Masing-masing lempeng tersusun atas kombinasi lempeng kontinen dan

samudera, yang di dalamnya terdapat punggungan-punggungan, dengan konsentrasi pusat gempa bumi (episenter) dan gugusan gunung api. Lempeng-lempeng dan mantel atas bergerak saling bertumbukan dan berregangan di atas media panas dan cair, hingga menjangkau zona selubung luar, dengan kecepatan beberapa centimeter per tahun. Akibatnya, terjadi penipisan dan penebalan pada segmen-segmen kerak bumi. Kerak benua lebih tebal dari kerak samudra tetapi densitas kerak samudra lebih besar dari kerak benua (Gambar 3.2). Hal itu mengikuti kaidah-kaidah hukum pengapungan benua (“Continental Drift”) yang diajukan oleh seorang meteorologist asal Jerman, Alfred Lothar Wegener pada 1912.

Secara vertikal, batas antara kerak dan selubung bumi disebut dengan bidang ketidakterusan *Mohorovicic* (Moho). Lapisan ini dideteksi dengan didasarkan atas sebaran, kedalaman dan kecepatan gelombang gempa bumi. Nama *Mohorovicic* diambil dari nama orang yang menemukannya, yaitu seorang ilmuwan Kroasia yang bernama Andrija Mohorovicic. Pada masa kejayaan Uni Soviet, pemboran sedalam 12 km di bawah Peninsula dilakukan untuk memastikan keberadaan bidang Moho ini, namun belum berhasil. Pembahasan lebih detail tentang konsep tektonik lempeng dan hubungannya dengan perkembangan geologi serta pengaruhnya terhadap geologi lingkungan berada pada BAB VII.



Gambar 3.2. Kerak samudera di kepulauan Hawaii setebal ~5 km. Tebal kerak benua di bawah punggungan California timur hingga Great Valley di Sierra Nevada berkisar dari ~ 25-60 km (www.usgs.gov/science/)

- b. Mantel (Selubung Inti Bumi).** Mantel (selubung inti bumi) tersusun atas mantel luar dan mantel dalam. Mantel luar dan proses pergerakan tektonik lempeng yang dipengaruhi dipelajari dari analisis data gelombang seismik yang dihasilkan oleh gempa bumi. Studi-studi tersebut meliputi perpindahan / aliran panas, distribusi medan magnetik dalam lapisan-lapisan struktur dalam bumi, data hasil analisis graviti, dan hasil percobaan-percobaan di laboratorium terhadap batuan

dan mineral yang disimulasikan sebagai penyusun mantel bumi. Antara 100-200 km di bawah permukaan bumi, suhu batuan mendekati titik leleh. Batuan yang meleleh selanjutnya terakumulasi dalam suatu wadah (reservoir) magma yang selanjutnya disebut sebagai dapur magma. Lelehan magma yang terdapat dalam perut bumi dapat berasal dari dua sumber, yaitu lelehan batuan akibat proses tektonik lempeng, yang menghasilkan lelehan batuan sebagian (*partial melting*) dan lelehan batuan yang berasal dari mantel (selubung) bumi itu sendiri. Komposisi kimia kedua magma tersebut berbeda; magma hasil pelelehan sebagian lebih kental dan bersifat lebih asam dibandingkan dengan magma asal astenosfer.

Lelehan batuan yang berasal dari mantel bumi, bersama-sama dengan material lelehan sebagian, yang selanjutnya tersimpan / terakumulasi dalam dapur magma, dierupsikan keluar melalui suatu celah (rekahan) yang terbentuk secara tektonik. Jika celah tersebut mampu mencapai permukaan bumi, maka aliran magma pun akan menjangkau di permukaan. Akumulasi material hasil erupsi batuan lelehan di dalam celah tektonik tersebut, akan membentuk dapur magma dangkal bagian dari tubuh gunung api. Jika aliran magma telah menutup seluruh celah, sedangkan jika magma yang berada pada ujung celah telah membeku, maka akan membentuk suatu sumbat, melahirkan aktivitas gunung api, yaitu pembentukan kubah lava. Jika aliran magma terus berlangsung, sementara sumbat lama tak terterobos oleh aliran magma, maka akan membentuk tekanan erupsi yang besar, akibatnya erupsi eksplosif tak terelakkan. Pada fasa ini erupsi gunung api kadang-kadang disertai dengan penghancuran tubuh gunung api menghasilkan rempah fragmental gunung api, dan menambah material klastika yang diendapkan secara berlapis.

Secara geofisika, zona dengan magma cair dalam lapisan selubung bumi memiliki kecepatan gelombang gempabumi yang sedikit lebih rendah dari lapisan di atasnya (Anonim, 1996). Lapisan tersebut diduga sebagai lapisan pemicu terjadinya proses tektonik lempeng. Di bawah lapisan berkecepatan gelombang rendah adalah zona transisi. Zona ini membatasi mantel luar dan mantel dalam, yang terdiri dari dua bidang ketidak-menerusan yang dibentuk oleh lapisan bergradasi dari material kurang padat ke material yang lebih padat. Komposisi kimia dan bentuk-bentuk kristal mineral-mineral penyusun lapisan mantel telah diidentifikasi dari percobaan di laboratorium pada suhu dan tekanan tinggi (Anonim, 1996). Mantel bawah yang terletak di bawah zona transisi tersusun atas komponen mineral yang relatif lebih sederhana, berupa mineral silikat besi dan magnesium. Mineral-mineral tersebut mengkristal secara bertahap sejalan dengan kedalamannya. Antara mantel dan inti, ditandai oleh menurunnya kecepatan gelombang gempa (~ 30 %) dan meningkatnya kerapatan massa (~ 30 %).

c. Inti Bumi. Inti bumi awalnya dianggap sebagai bagian dari struktur dalam bumi yang harus diidentifikasi lebih dulu. Hal itu berkaitan dengan adanya keyakinan bahwa proses terjadinya gempa bumi berawal dari bagian terdalam bumi tersebut. Walaupun dalam perkembangannya, pusat gempa bumi justru berada pada bagian dasar dari kerak bumi yang mengalami patahan akibat proses tektonik.

Inti bumi pertama kali dikenali pada 1606 oleh R.D. Oldham. Oldham berhasil mengidentifikasi inti bumi dari data rekaman kedalaman pusat gempa bumi (episenter). Data tersebut selanjutnya oleh Newton digunakan sebagai data untuk menghitung densitas Bumi. Lebih jauh lagi, Wadati (1935) kemudian menggunakan argumentasi tersebut untuk mempelajari mekanisme gempa bumi. Di dasarnya atas jenis pantulan gelombang shear dan kompresi, lebih jauh lagi Wadati menduga bahwa bagian luar inti merupakan cairan, karena kondisi lapisan tidak memantulkan gelombang *shear* (S) dan intensitas pantulan gelombang *compresional* (P) yang melewatinya menurun; sedangkan bagian dalam inti padat karena dapat ditembus oleh gelombang P dan S.

Didasarkan atas sifat-sifatnya tersebut, inti bumi tersusun atas material padat yang dapat memantulkan gelombang. Jadi ada medan magnet di dalamnya. Besarnya medan magnet tersebut, menandakan bahwa komposisinya didominasi oleh komponen logam. Hasil percobaan di laboratorium, komponen logam tersebut diduga berupa oksida Fe, logam nikel dan sulfur. Di bagian luar inti, yaitu pada lapisan inti luar, terjadi pengurangan pantulan gelombang P. Lapisan ini diduga memiliki tingkat kepadatan yang lebih rendah, dengan komponen yang lebih bersifat plastis, karena masih ada komponen material silikat Fe. Pada lapisan ini materialnya tersusun atas oksida Fe, logam nikel, sulfur dan silikat Fe. Data gelombang gempa berasal dari rotasi dan inersia tubuh Bumi, teori dinamo-lapangan magnetik, dan percobaan laboratorium pada pelelehan dan pencampuran logam besi. Prinsipnya, inti bumi diduga tersusun atas besi, 10 % campuran logam dari oksigen / sulfur / nikel, atau mungkin beberapa campuran dari ketiga elemen tersebut (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Sifat-sifat dan komponen bumi (Anderson, 2000).

Struktur lapisan bumi	Data sifat bagian dalam bumi			Jenis batuan yang ditemukan
	Ketebalan (km)	Densitas (gr/cm ³)		
		Atas	Bawah	
Kerak bumi	30	2,2	-	Batuan silisik
		-	2,9	Andesit dan basalt
Selubung atas	720	3,4	-	Peridotit, eklogit, olivin, spinel, garnet,
		-	4,4	piroksen
Selubung bawah	2.171	4,4	-	Perovskit, oksida
		-	5,6	MgO dan SiO ₂

Inti luar	2.259	9,9	-	
		-	12,2	Fe+O ₂ , sulfur, logam Ni
Inti dalam	1.221	12,8	-	
		-	13,1	Fe+O ₂ , sulfur, logam Ni
Total ketebalan	6.371			

3.2 Kealamian Mineral dan Batuan

Mineral adalah bagian terpenting sebagai penyusun batuan, dan batuan adalah penyusun utama kerak bumi. Tanpa batuan, tentu tidak ada bumi, dan tanpa bumi, tidak ada lagi tempat untuk berpijak bagi seluruh makhluk hidup.

A.. Mineral

Soil (tanah) yang diolah untuk bercocok tanam tersusun atas berbagai komponen mineral. Lempung yang digunakan untuk membuat keramik juga tersusun atas berbagai komponen mineral. Dari dataran dan dasar laut hingga puncak pegunungan tersusun atas berbagai macam batuan, dan batuan tersusun atas berbagai jenis mineral. Mineral sangat umum dijumpai di sekitar kita, apa pun bentuk dan fungsinya. Saat mencuci baju, tangan dan perabotan, kita menggunakan mineral, saat memasak, menyeterika, bersikat gigi, menulis, menerangi ruangan atau pun saat tidur kita tidak pernah jauh dari mineral. Mineral menyusun rumah kita: dari piring, gelas, kaca jendela, sepeda, body dan mesin mobil, televisi dan lain-lain; serta menyusun halaman dan bumi kita. Tanpa mineral kita tidak memiliki bumi, dan tanpa bumi tidak ada tempat bagi kita untuk berpijak.

Mineral adalah benda padat, cair atau gas yang terbentuk secara alamiah di dalam bumi dan di luar bumi (meteorit) dengan keterdapatan dan limpahan tertentu. Mineral adalah material dasar penyusun bumi, sebagai inti dari Ilmu-Ilmu Bumi (*Earth Sciences*). Karena merupakan inti dari ilmu-ilmu bumi, maka sangat penting bagi pengembangan ilmu pengetahuan dasar maupun terapan. Suatu wilayah menjadi sangat strategis karena didukung oleh kondisi geologi yang membentuk morfologi dengan stadia wilayah dan pola drainasi tertentu.

Komponen mineral yang menyusun batuan dapat ditemukan secara homogen maupun heterogen. Dalam masing-masing jenis batuan dan jenis batu, pembentukan, keterdapatan, dan sifat fisik dan kimia mineral penyusunnya hampir sama. Sebagai contoh adalah mineral-mineral dalam batuan beku andesit memiliki tingkat keasaman sedang (intermediet), yang terbentuk dari proses pembekuan pada kisaran suhu 850-1000°C dan pada lapisan luar kerak bumi, sebagai batuan ekstrusif.

Batuan metamorf sekis tersusun atas mineral-mineral muskovit (dan sejenisnya) yang terbentuk akibat proses metamorfosa termal (pemanasan, pembebanan dan penimbunan). Batuan sedimen batupasir kuarsa tersusun atas mineral-mineral kuarsa yang terbentuk akibat proses erosi, transportasi dan pengendapan kembali di dalam cekungan sedimentasi di atas permukaan bumi.

B. Terdapatnya Mineral dan Batuan

Proses pembentukan mineral di alam beragam, yaitu ada yang terbentuk secara kimiawi, oleh proses presipitasi, secara fisik, secara mekanik dan atau gabungan dua / tiga di antaranya. Mineral yang terbentuk dari proses kimiawi adalah seperti mineral induk, yang terbentuk oleh proses kristalisasi senyawa-senyawa kimia yang memiliki ikatan ion yang sama. Secara fisik, mineral dapat terbentuk dari proses pemanasan dan atau peleburan. Mineral-mineral yang terbentuk dari proses presipitasi antara lain kalsit, barit, bentonit dan gipsum. Mineral-mineral yang terbentuk secara mekanik antara lain adalah mineral-mineral penyusun batuan metamorf, batulempung dan serpih.

Mineral dapat ditemukan dalam batuan beku, asal gunung api, sedimen dan metamorf. Mineral induk terbentuk dari proses kristalisasi larutan magma di dalam bumi. Contoh mineral yang dijumpai dalam batuan beku dan batuan asal gunung api adalah olivin, piroksen, amfibol, biotit, plagioklas, ortoklas, sanidin, mikroklin dan kuarsa. Contoh mineral yang dijumpai dalam batuan sedimen adalah kuarsa, feldspar, mineral lempung dan mineral mika. Contoh mineral yang dijumpai dalam batuan metamorf adalah muskovit, biotit, amfibolit, pigeonit dan lain-lain. Berdasarkan atas zona kristalisasinya, mineral dari kristalisasi magma, dapat dikelompokkan dalam tiga grup yaitu (1) penyusun batuan plutonik (abisal), (2) penyusun batuan intrusi dangkal, dan (3) penyusun batuan beku permukaan (lava). Masing-masing zona kristalisasi tersebut melahirkan fraksinasi mineral yang sama komposisi kimianya namun beragam tekstur dan strukturnya. Mineral penyusun batuan beku intrusif memiliki tekstur kasar, equigranular, euhedral, holokristalin dan berstruktur masif, karena proses kristalisasinya sempurna. Mineral dalam batuan beku intrusi dangkal dan ekstrusif (asal gunung api) memiliki tekstur halus karena banyak mengandung gelas, inequigranular, subhedral-anhedral, hipokristalin-holohyalin dan sering berstruktur permukaan vesikuler dan skoria, serta beberapa masif, sebagai akibat kristalisasi yang tidak sempurna oleh perubahan suhu yang sangat cepat.

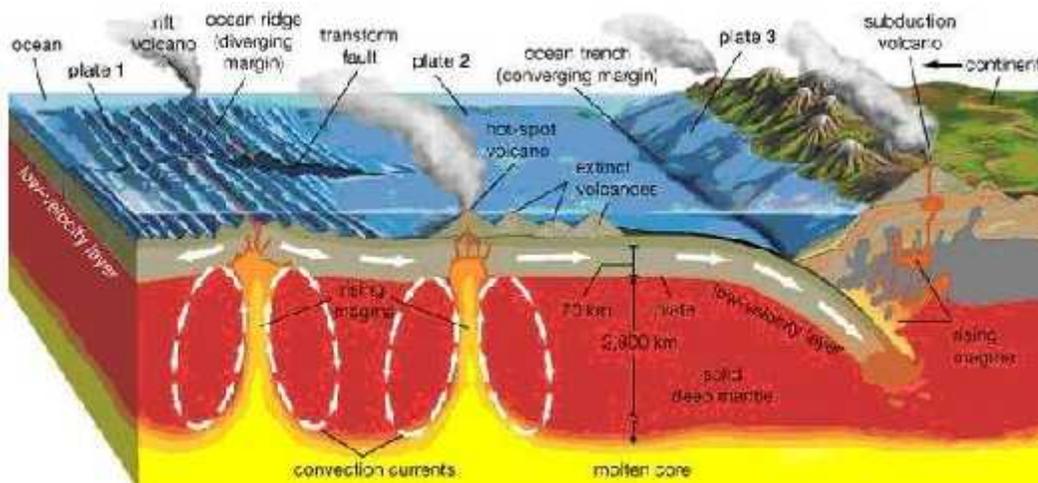
Jenis-jenis mineral dapat berbeda tergantung dari kedalaman dan lamanya magma terdiferensiasi dan terasimilasi. Untuk itu, fraksinasi mineral dapat membentuk tiga jenis batuan yaitu (Gambar 3.3):

1. Pada zona hotspot, pemekaran (divergen) dan penunjaman (pelelehan) melahirkan mineral-mineral berafinitas basaltis dari kelompok mineral-mineral mafik yaitu kelompok olivin dan beberapa kelompok piroksen klino. Zona hotspot yang terletak

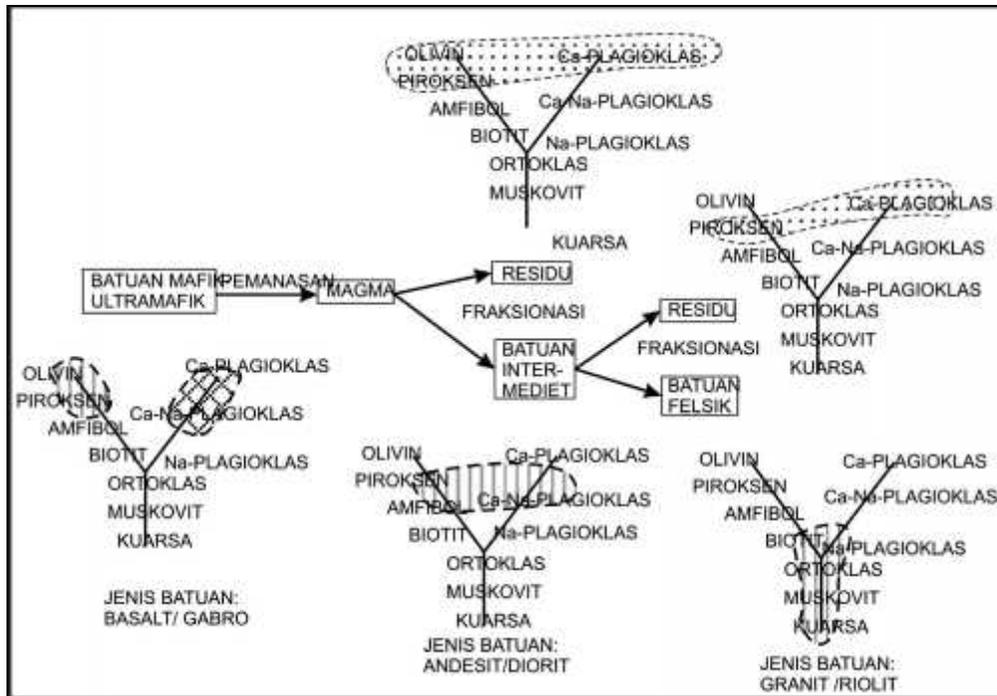
di belakang busur magmatik, dari proses *rifting* (pemekaran belakang busur kepulauan) mineral-mineralnya berasosiasi dengan mineral-mineral potasik (K tinggi hingga sangat tinggi), contoh: biotit dan feldspatoid.

2. Intrusi-intrusi gang seperti pada busur volkanisme atau busur kepulauan umumnya menghasilkan mineral-mineral berafinitas andesitis-basaltis dari kelompok mineral-mineral intermediet, yaitu kelompok piroksen, amfibol (horenblenda) dan plagioklas Ca-Na.
3. Zona kristalisasi pada wilayah lempeng kontinen melahirkan mineral-mineral berafinitas riolitit kelompok mineral-mineral felsik, yaitu biotit, ortoklas (sanidin dan mikroklin) dan kuarsa.

Dalam proses pembekuan batuan beku yang melahirkan jenis-jenis mineral penyusunnya, terjadi proses fraksionasi larutan magma hingga pada fasa akhir pengkristalan (Gambar 3.4). Secara teoritis, magma primer pada fasa awal (paling kiri), tersusun atas komponen mineral basaltik yang mengkristal lebih dahulu membentuk batuan beku basa (basalt / gabro). Selanjutnya pada tahap berikutnya terjadi fraksionasi magma menghasilkan larutan residu (sisa) membentuk magma intermediet, yang dalam runtunan reaksi Bowen berada pada kisaran pembentukan mineral piroksen dan amfibol, membentuk batuan beku andesit / diorit. Pada fasa ini pun masih menghasilkan larutan residu yang lebih kaya akan silikat. Larutan residu tersebut selanjutnya akan mengkristal menghasilkan mineral-mineral felsik, yaitu ortoklas, muskovit dan kuarsa.



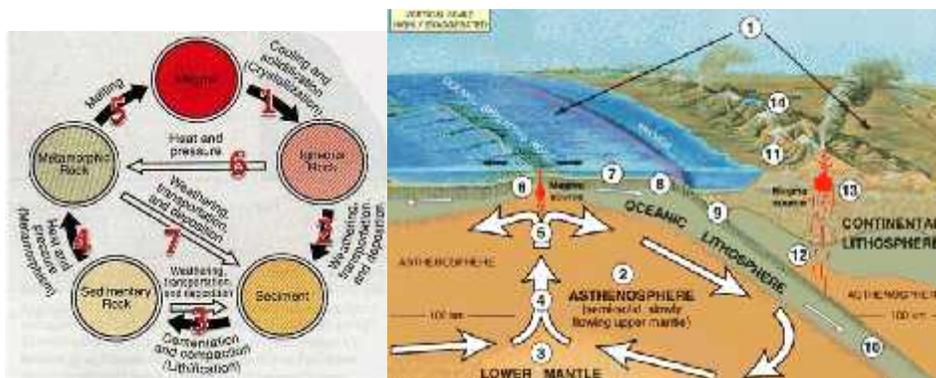
Gambar 3.3. Proses pembentukan mineral dan batuan menurut tatanan tektoniknya (Fichtel, 2000)



Gambar 3.4. Evolusi magma dari larutan induknya, dari kiri ke kanan dengan runtunan mengikuti konsep deret Reaksi Bowen

3.3. Jenis dan Sifat Batuan

Batuan adalah satu kesatuan benda padat yang menyusun kerak bumi. Batuan terdiri atas satu jenis atau lebih mineral. Didasarkan atas genesa pembentukannya, batuan terbagi menjadi tiga jenis yaitu batuan beku, batuan sedimen dan batuan metamorf (Gambar III.7). Batuan beku dihasilkan dari proses pembekuan atau pengkristalan larutan magma. Proses pembekuan magma dapat berlangsung di dalam bumi, membentuk intrusi batholit, intrusi gang, intrusi korok maupun intrusi sill; serta dapat berlangsung di permukaan bumi, yaitu pada proses aliran lava.



Gambar 3.5. Siklus pembentukan batuan metamorf, batuan beku dan vulkanik, serta sedimen hubungannya dengan proses tektonik lempeng, no (1) proses tumbukan, (2) pelelehan batuan, (3-4) Bergeraknya magma ke

permukaan membentuk dapur magma, (5) pembentukan kantung tempat terakumulasinya magma di bawah puncak gunung api, (6) erupsi gunung api menghasilkan suplai batuan vulkanik dan sedimen, (7) pelapukan, erosi dan sedimentasi, dan (8) pembentukan batuan metamorf oleh proses tektonik pada proses tumbukan. Proses berikutnya yang terjadi di laut hingga darat adalah pengangkatan yang memunculkan batuan sedimen dan metamorf sehingga tersingkap di daratan, sementara itu proses penunjaman terus berlangsung pada segmen lempeng berikutnya.

Batuan sedimen merupakan hasil pengerjaan kembali material / batuan yang telah ada sebelumnya, baik dari batuan beku dan asal gunung api, metamorf dan batuan sedimen sendiri. Sedangkan batuan metamorf merupakan batuan hasil dari proses metamorfisme, akibat penambahan tekanan dan / suhu yang sangat tinggi sehingga merubah tekstur, struktur dan komposisi batuan asal. Sekitar 80 % penyusun kerak bumi adalah batuan asal gunung api dan batuan beku (intrusi dan lava), sekitar 17% batuan malihan, dan sisanya adalah batuan sedimen. Dari sejumlah kecil (~3 %) batuan sedimen tersebut, kebanyakan bernilai ekonomi tinggi; sebagai batuan induk dan reservoir minyak bumi, cebakan mineral, batubara, akifer airtanah dan sebagai bahan tambang.

Di alam terjadi siklus pembentukan batuan; yaitu batuan beku, sedimen dan / metamorf mengalami pelelehan sebagian akibat proses penunjaman lempeng, sehingga menghasilkan larutan magma. Magma tersebut selanjutnya terakumulasi membentuk dapur magma. Rekahan yang menghubungkan antara dapur magma dan permukaan bumi, akan dilalui oleh magma tersebut hingga membangun tubuh gunung api. Jika rekahan tersebut tidak menjangkau permukaan, maka magma akan terakumulasi dalam suatu kantung magma, membeku dan membentuk tubuh intrusi pluton.

A. Batuan Beku dan Batuan Asal Gunung Api

Batuan beku adalah batuan yang terbentuk dari hasil pembekuan magma. Didasarkan atas posisi pembekuannya, batuan beku dikelompokkan menjadi dua yaitu intrusi dan ekstrusi (lava). Pembekuan batuan beku intrusi terjadi di dalam bumi sebagai pluton; dan batuan beku ekstrusi membeku di permukaan sebagai lava bagian dari kegiatan gunung api.

Jenis dan sifat batuan beku ditentukan dari tipe magmanya. Tipe magma tergantung dari komposisi kimia magma. Komposisi kimia magma dikontrol dari limpahan unsur-unsur dalam bumi, yaitu Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, H, dan O yang mencapai hingga 99,9%. Semua unsur yang berhubungan dengan oksigen (O) disebut oksida, contoh: SiO₂. Sifat dan jenis batuan beku dapat ditentukan dengan didasarkan pada kandungan SiO₂ di dalamnya (Tabel 3.2).

Tabel 3.2. Tipe batuan beku dan sifat-sifatnya (Nelson, 2003)

Tipe Magma	Batuan Vulkanik	Batuan Plutonik	Komposisi Kimia	Suhu	Kekentalan	Kandungan Gas
Basaltik	Basalt	Gabbro	SiO ₂ 45-55 %: Fe, Mg, Ca tinggi, K dan Na rendah	1000 - 1200 °C	Rendah	Rendah
Andesitik	Andesit	Diorit	SiO ₂ 55-65 %, Fe, Mg, Ca, Na, K sedang	800 - 1000 °C	Intermediat	Intermediat
Rhyolitik	Rhyolit	Granit	SiO ₂ 65-75 %, Fe, Mg, Ca rendah, K dan Na tinggi	650 - 800 °C	Tinggi	Tinggi

Sifat dan jenis batuan beku didasarkan pada kandungan SiO₂:

- Basaltik atau gabroik: SiO₂ 45-55%, Fe, Mg dan Ca tinggi, K dan Na rendah
- Andesitik atau dioritik: SiO₂ 55-65 %, Fe, Mg, Ca, Na dan K sedang
- Riolitik atau granitik: SiO₂ 65-75 %, Fe, Mg dan Ca rendah, K dan Na tinggi

Pada kedalaman tertentu, hampir semua jenis magma mengandung gas. Kandungan gas dalam magma menyebabkan tekanannya tinggi, sehingga bersifat eksplosif.

- Kandungan gas dalam magma umumnya berupa H₂O (uap) dan CO₂
- Komposisi yang lebih kecil adalah Sulfur, Cl dan F
- Magma rhyolitic atau granitic umumnya mengandung gas yang lebih tinggi dari pada magma jenis basaltik atau gabroik.

Suhu magma:

- Basaltik atau gabroik - 1000-1200°C
- Andesitik atau dioritik - 800-1000°C
- Riolitik atau granitik - 650-800°C.

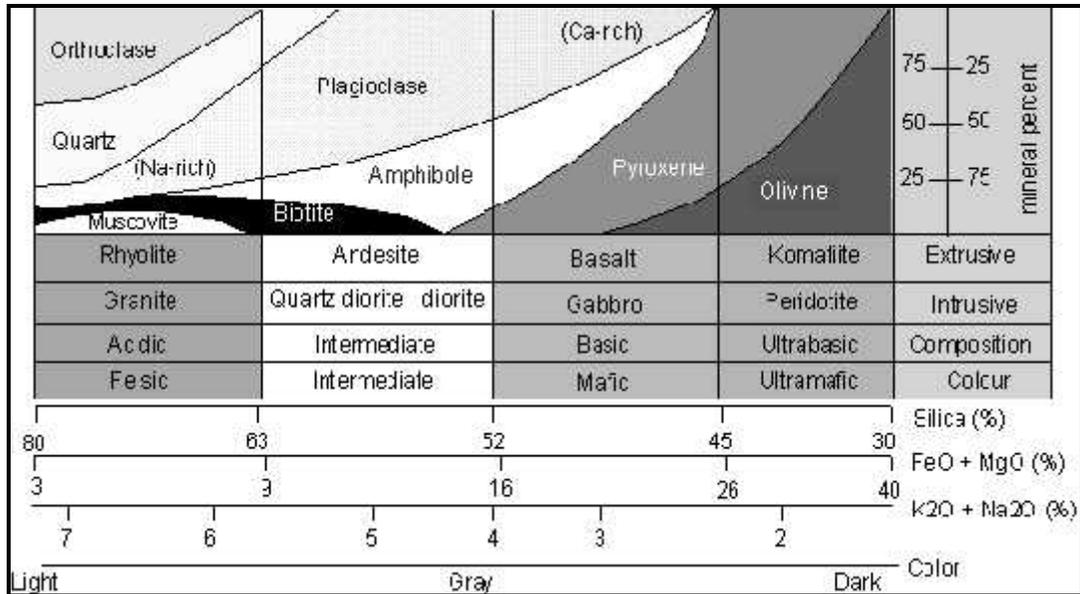
Kekentalan magma berperan pada resistensi alirannya (lawannya fluiditas); tergantung pada komposisi, suhu dan kandungan gas.

- Kandungan SiO₂ makin tinggi maka makin kental
- Magma dengan suhu lebih rendah, kekentalannya juga lebih tinggi

a. Klasifikasi Batuan Beku

Batuan beku diklasifikasikan berdasarkan pada sifat fisik (struktur dan tekstur), sifat kimiawi (kandungan unsur/senyawa kimia: komposisi SiO₂, Al₂O₃, FeO₂, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, dan P₂O₅) dan komposisi mineralnya (mineral mafik dan felsik). Didasarkan atas sifat fisiknya, yaitu warna, struktur dan teksturnya, maka

dikelompokkan menjadi dua yaitu batuan plutonik (intrusi: batholit (dalam), dangkal (dike, sill, lakolit dan lapolit)) dan lava (ekstrusi). Didasarkan atas komposisi SiO₂, maka batuan beku dapat dikelompokkan menjadi tiga yaitu batuan beku asam, intermediet dan basa (Gambar 3.6).

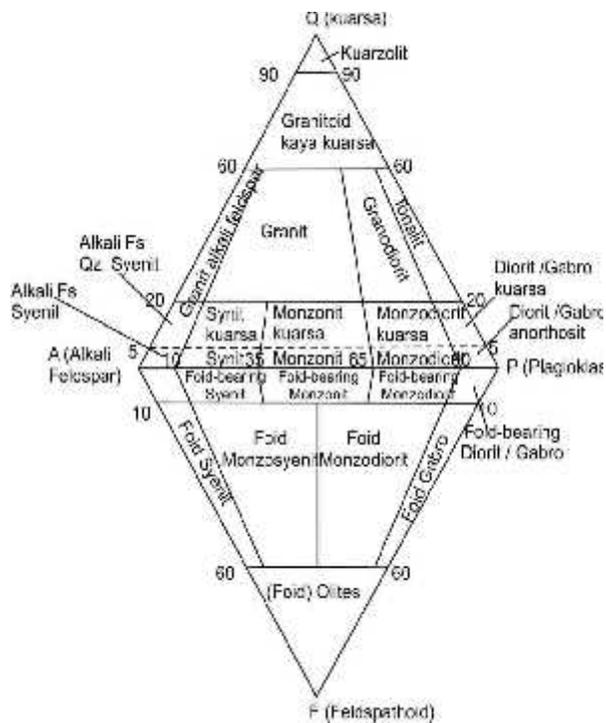
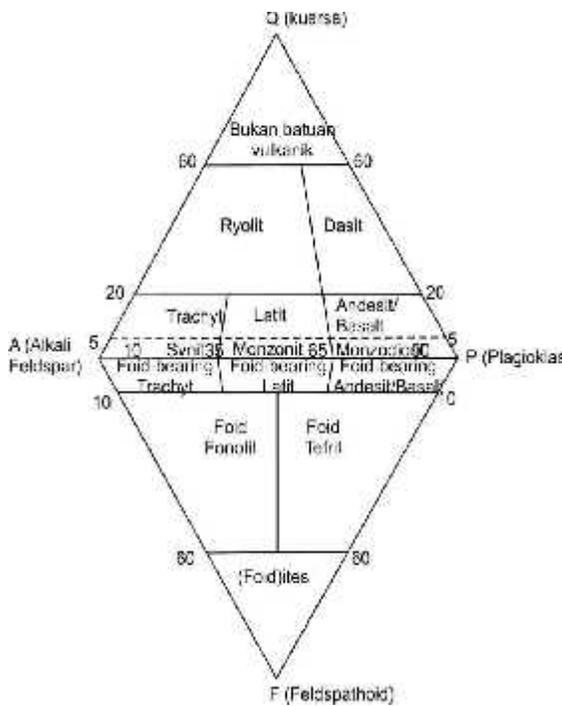


Gambar 3.6. Klasifikasi batuan beku didasarkan atas warna, komposisi kimia dan komposisi mineralnya (Steckeisen, 1976).

Batuan beku yang dapat dideskripsi dengan mata telanjang disebut faneritik, dan yang tidak dapat deskripsi dengan mata telanjang disebut afanitik. Contoh batuan beku faneritik adalah granit, gabro, dasit dan diorit, contoh batuan beku afanitik adalah riolit, andesit, trakit dan basalt. Didasarkan atas prosentasi kandungan mineral mafik dan felsiknya, batuan beku dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok yaitu batuan beku basa dan ultra basa (Gambar 3.7), batuan beku intermediet dan batuan beku asam (Gambar 3.8). Batuan beku basa mengandung mineral mafik (piroksen, olivin dan plagioklas Ca) lebih dari 60%. Batuan beku ultra basa mengandung mineral mafik lebih dari 90%. Contoh batuan beku basa adalah gabro, troktolit dan basalt. Contoh batuan beku ultra basa adalah peridotit, piroksenit, dunit, lherzolit dan websterit. Batuan beku basa yang membeku di permukaan adalah basalt.



Gambar 3.7. Klasifikasi batuan beku basa dan ultrabasa (Strecheisen, 1976).



- a. Batuan beku luar
- b. Plutonik dari kandungan kuarsa (Q), plagioklas (P) dan alkali feldspar (A) (Strecheisen, 1976).

Gambar 3.8. Klasifikasi batuan beku didasarkan atas kandungan kuarsa (Q), alkali feldspar (A), plagioklas (P), dan feldspatoid (F-FB) (Strecheisen, 1979)

Batuan beku intermediet mengandung mineral mafik antara 30-60%, plagioklas Ca-Na dan sedikit kuarsa. Batuan beku intermediet yang dihasilkan dari pembekuan di dalam adalah diorit dan diabas (Gambar 3.8.a), batuan intermediet yang membeku di

permukaan atau intrusi dangkal adalah andesit, trakit, latit dan monzonit (Gambar 3.8.b). Batuan beku asam mengandung mineral felsik lebih dari 60%. Contoh batuan beku asam yang membeku di dalam adalah granit dan syenit (Gambar 3.6), contoh batuan beku asam yang membeku di permukaan adalah riolit, dasit dan fonolit (Gambar 3.7).

b. Pemerian Batuan Beku

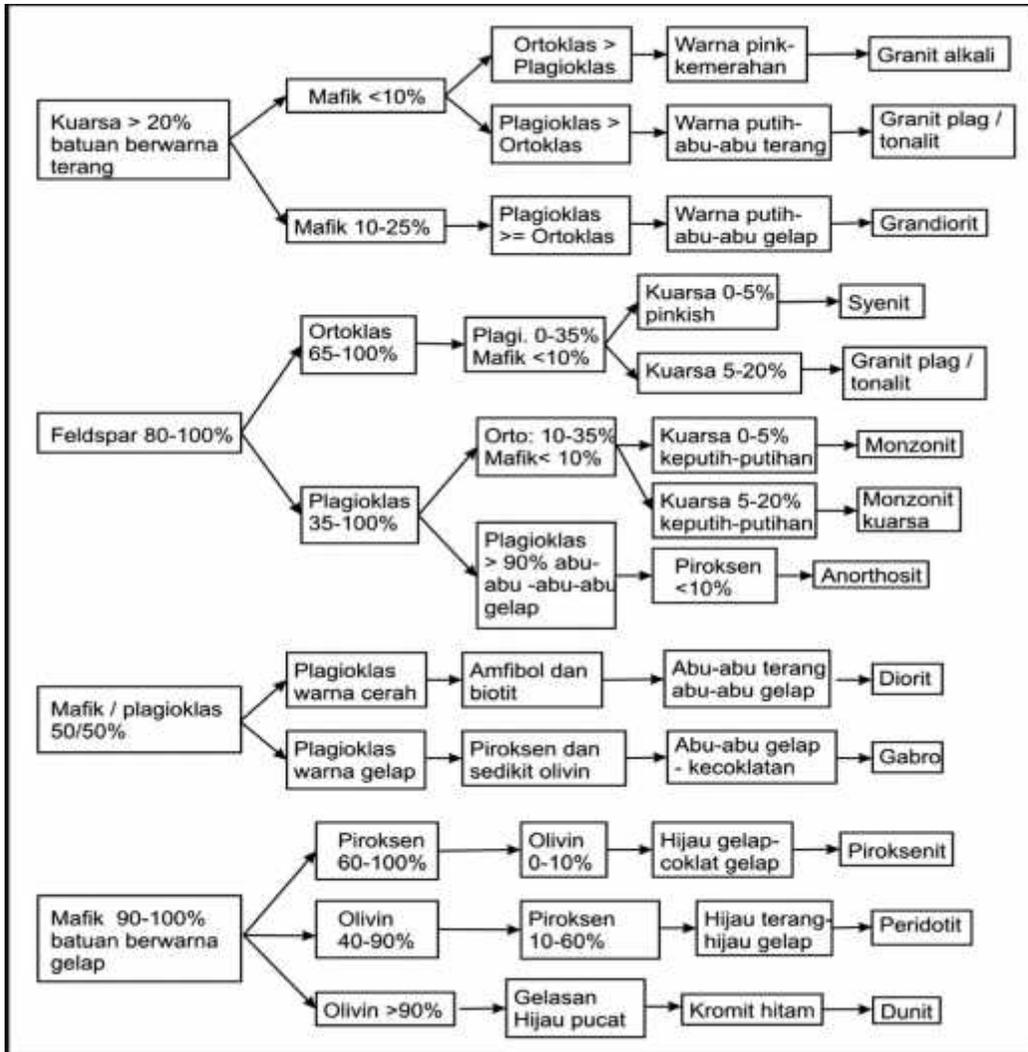
Untuk dapat mengenali tipe-tipe batuan beku di lapangan, yang harus diamati adalah warna, struktur, tekstur dan komposisinya. Warna batuan beku mengindikasikan komposisi mineralnya, struktur batuan mengindikasikan tatanan tektonik dan mekanisme pembekuannya, serta tekstur mengindikasikan derajat kristalisasinya (Tabel 3.3). Kadangkala, kondisi litologi dari pengamatan di lapangan tidak sesuai dengan hasil pengamatan di laboratorium (petrografi). Faktor semu batuan di lapangan mengaburkan sifat yang sebenarnya; sebagai contoh breksi autoklastik yang sebenarnya adalah hasil breksiasi lava dan tekstur porfiritik kasarnya di permukaan yang menyerupai sebagai batuan intrusi.

Tabel 3.3. Identifikasi batuan beku permukaan dengan didasarkan atas warna dan tekstur batuan (Anonim, 2000)

<i>Jenis batuan Tekstur</i>	<i>Intrusi dalam (plutonik)</i>	<i>Intrusi dangkal dan Ekstrusi</i>	<i>Batuan Vulkanik</i>
Fabrik	Equigranular	Inequigranular	Inequigranular
Bentuk kristal	Euhedral-anhedral	Subhedral-anhedral	Subhedral-anhedral
Ukuran kristal	Kasar (> 4 mm)	Halus-sedang	Halus-kasar
Tekstur khusus	-	Porfiritik-poikilitik, Ofitik-subofitik, Pilotaksitik	Porfiritik: intermediet-basa Vitroverik-Porfiritik: Asam-intermediet
Derajat Kristalisasi	Holokristalin	Hipokristalin Holokristalin	Hipokristalin Holokristalin
Tekstur khusus	-	Perthit-perlitik	Zoning pada plagioklas, tumbuh bersama antara mineral mafik dan plagioklas dan intersertal

Pengamatan yang dilakukan atas dasar kegelapan (warna) tersebut dapat pula digunakan untuk menghitung persentase mineral mafik yang terkandung di dalamnya (Gambar 3.9). Warna batuan mencirikan besarnya perbandingan kandungan mineral mafik dan felsik di dalamnya. Yang termasuk mineral mafik adalah olivin, piroksen, amfibol-horenblenda dan biotit, sedangkan yang termasuk mineral felsik adalah plagioklas, orthoklas, sanidin dan mikroklin. Batuan dengan kandungan mineral mafik besar (~ 90-100 %) maka memiliki warna yang sangat gelap. Begitu pula sebaliknya, batuan yang kandungan mineral feldsparnya besar (80-90 %) maka

warnanya akan sangat terang. Batuan beku andesit memiliki warna sedang yaitu abu-abu terang hingga agak gelap, karena perbandingan kandungan mineral mafik terhadap felsiknya adalah 50%:50%. Gambar III.12 memberikan petunjuk dalam pemerian batuan beku di lapangan berdasarkan atas kandungan mineralnya.



Gambar 3.9. Komposisi batuan beku faneritik yang didasarkan atas komposisi mineral mafik dan felsiknya terhadap warna batuan (Anonim, 2000).

B. Batuan Sedimen

Sungai, laut, angin dan hujan, semua itu mampu mengangkut partikel hasil erosi batuan. Material detrital (hancuran) ini mengandung fragmen batuan dan mineral. Saat energi dalam arus aliran tersebut tidak cukup kuat untuk mengangkut partikel-partikel tersebut, maka partikel-partikel tersebut tertinggal dengan proses sedimentasi. Tipe sidimentasi ini disebut sebagai sedimentasi klastik. Tipe kedua adalah saat proses pengendapannya berlangsung ketika ion-ion organisme (mahluk hidup) terurai di dalam air hingga menyisakan bagian yang lebih keras seperti tulang

dan cangkang; disebut sedimentasi biogenik. Dan tipe ketiga adalah proses pengendapan yang terjadi saat material terlarut dalam air, dan secara kimiawi terendapkan dari air; disebut sedimentasi kimiawi. Jadi, ada tiga tipe batuan sedimenter yaitu batuan sedimen klastik, batuan sedimen biogenik dan batuan sedimen kimiawi.

a. Batuan Sedimen Klastik

1) Klasifikasi batuan sedimen klastik

Klasifikasi batuan sedimen klastik didasarkan pada sifat, struktur sedimen dan tekstur klastikanya. Salah satu komponen tekstur klastika batuan sedimen tersebut adalah ukuran dan bentuk butir partikel. Tekstur klastika tersebut ditentukan dengan didasarkan pada klasifikasi Wentworth (Tabel 3.4).

Tabel 3.4. Klasifikasi batuan sedimen klastik yang didasarkan pada ukuran butir (sekala Wentworth)

Nama partikel	Kisaran ukuran butir	Sedimen	Batuan
Boulder	>256 mm	Gravel	Konglomerat atau breksi
Cobble	64 - 256 mm	Gravel	(tergantung pada kebuldarannya)
Pebble	2 - 64 mm	Gravel	
Pasir	1/16 - 2mm	Pasir	Batupasir
Lanau	1/256 - 1/16 mm	Lanau	Batulanau
Lempung	<1/256 mm	Lempung	Batulempung, batulumpur, dan serpih

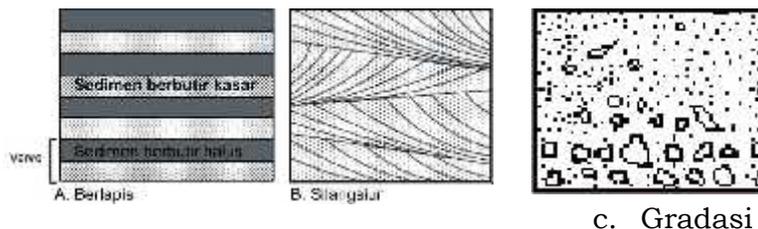
Pembentukan batuan sedimen klastik mencakup tiga proses, yaitu:

1. Transportasi; sedimen dapat tertransportasi secara merayap menuruni lereng, terbawa angin, atau terangkut oleh air permukaan (alur, sungai atau laut). Jarak sedimen saat tertansportasi dan energi dari media transportasinya, adalah kunci model transportasinya.
2. Pengendapan; sedimen diendapkan saat energi dari media transportasinya telah berkurang dan tidak mampu lagi mengangkut sedimen tersebut. Sedimen tersebut menjadi terhenti dan terendapkan. Sedimen ini merefleksikan energi dari media transportasinya.
3. Diagenesis; proses pembatuan sedimen. Diawali dengan kompaksi; terjadi saat beban material yang menimbunnya meningkat; kompaksi mendorong butiran-butiran sedimen mengumpul, rongga antar pori menyusut dan menyisihkan air yang terkandung di dalamnya. Sebagian air dapat saja mengangkut mineral-

mineral kedalam rongga pori, sebagai proses sementasi. Fasa berikutnya rekristalisasi sehingga batuan menjadi lebih keras. Lalu kemungkinan alterasi; dalam lingkungan interaksi oksigen (oksidasi), sisa-sisa organisme akan berubah menjadi CO₂ dan air. Biji besi (iron) akan berubah dari Fe²⁺ ke Fe³⁺, dan akan merubah warna sedimen menjadi sangat merah. Pada lingkungan tanpa oksigen (reduksi), material organik dapat tertransform menjadi karbon padat; dalam bentuk batubara atau hidrokarbon.

2) Struktur Batuan Sedimen

- (a) Berlapis – perlapisan / perselingan sejajar yang memiliki perbedaan sifat, sering disebabkan oleh perubahan iklim dalam pengendapannya (*varve*). Contoh: endapan danau yang berukuran lebih kasar diendapkan pada musim hujan sedangkan pada musim kemarau berukuran halus.
- (b) Silangsiur – sekumpulan perlapisan batuan yang relatif miring (*inclined*) terhadap kumpulan yang lain (Gambar 3.10). Arah kemiringan perlapisan tersebut adalah arah pergerakan media pengendapan. Batas-batas kumpulan perlapisan silangsiur umumnya berupa bidang erosi. Struktur sedimen ini umum dijumpai dalam sedimen pantai, gosong pasir dan sungai.
- (c) Struktur sedimen gradasi – saat kecepatan arus berkurang, material yang pertama diendapkan yang lebih berat, diikuti oleh sedimen yang lebih halus. Hal itu menghasilkan perlapisan yang menunjukkan pengurangan ukuran butir dari bawah ke atas dalam suatu lapisan (Gambar 3.10)

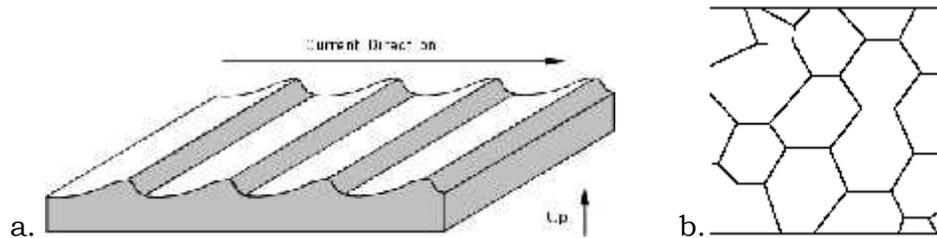


Gambar 3.10. Struktur sedimen berlapis (selang-seling: a) secara parallel dan silangsiur (b) dan gradasi (c)

Sedimen tak-terstrukturisasi – sedimen ini menunjukkan percampuran yang bukan dibentuk oleh proses sedimentasi, sehingga tidak menunjukkan struktur sedimentasi. Sedimen jenis ini dihasilkan dari proses pengendapan seperti jatuhnya batuan hingga membentuk struktur sedimen semu, aliran debris yang tidak menunjukkan struktur sedimentasi karena diendapkan terlalu cepat, aliran lumpur dan pencairan es (Gambar 3.11):

- (a) *Ripple Marks* - mencirikan endapan air dangkal, dibentuk oleh gelombang atau angin.
- (b) *Mudcracks* – dihasilkan dari pengeringan material halus di permukaan
- (c) *Raindrop Marks*- lubang (kawah) kecil yang terbentuk dari titik-titik / tetes hujan.

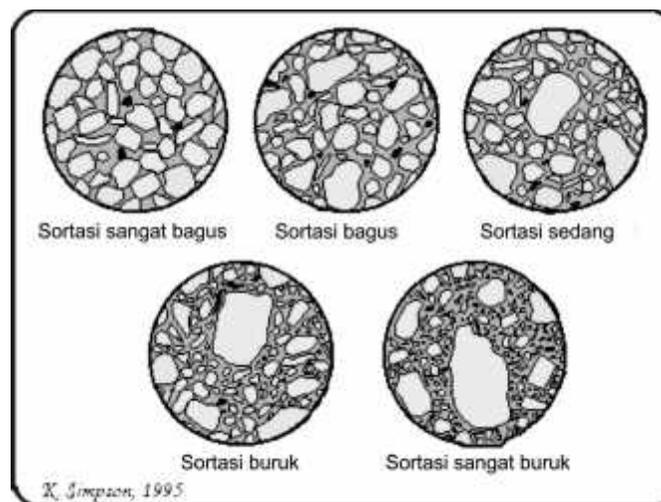
(d) *Fossils* – sisa-sisa organisme → dapat menjadi indikator lingkungan pengendapan; perbedaan spesies dapat berarti lingkungan pengendapannya spesifik. Karena kehidupan selalu berubah, maka fosil dapat menunjukkan umur relatif batuan, dan sebagai indikator iklim purba.



Gambar 3.11. Struktur sedimen *Ripple Marks* (a) dan *Mudcracks* (b)

3) Tekstur Batuan Sedimen Klastik

(a) Sortasi (pemilahan) – yaitu derajat keseragaman ukuran butir. Partikel-partikel terpilah karena densitasnya, yang dipengaruhi oleh energi dari media transportasinya. Arus berenergi tinggi dapat mengangkut fragmen-fragmen yang lebih besar. Sejalan dengan pengurangan energi aliran selama transportasinya, partikel yang lebih berat terendapkan, sedangkan yang lebih ringan tertransport lebih jauh. Jika sejumlah partikel memiliki densitas yang sama, maka partikel yang lebih berat akan berukuran lebih besar, jadi sortasinya mengacu pada ukuran butirnya. Sortasi dapat diklasifikasikan dalam dua kelompok yaitu sortasi baik dan sortasi buruk (Gambar 3.12).



Gambar 3.12. Sortasi buruk (kiri) dan sortasi baik (kanan) pada batuan sedimenter klastik (Simpson, 1995)

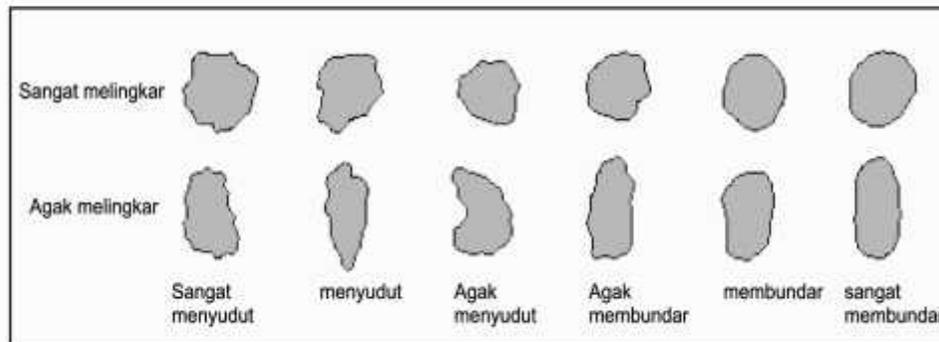
Dalam geologi lingkungan, sortasi dapat menjadi petunjuk besarnya energi aliran yang melewati suatu wilayah, saat transportasinya berlangsung berdampak bencana atau tidak.

Sebagai contoh adalah: endapan-endapan pantai dan endapan media angin umumnya bersortasi baik karena energi transportasinya umumnya konstan.

- (b) Endapan-endapan sungai (alur) umumnya bersortasi buruk karena energi alirannya (kecepatannya) bervariasi tergantung dari posisinya terhadap sungainya. Bentuk butir – selama proses transportasinya, butiran-butiran mengalami pengurangan ukuran butir karena proses abrasi. Abrasi yang acak menghasilkan bentuk membulat pada ujung-ujung bentukan meruncingnya (Gambar 3.13). Dengan demikian, pembulatan butiran fragmen menunjukkan seberapa lama sedimen tersebut tertransportasi.

b. Batuan sedimen kimiawi

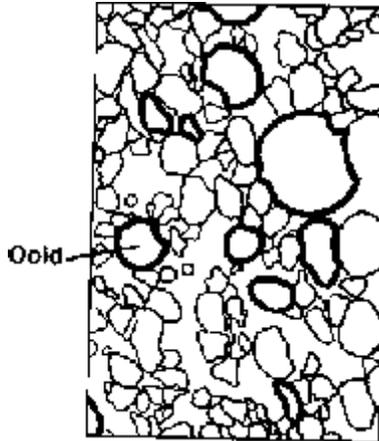
- a) *Cherts* (rijang) – hasil presipitasi kimiawi SiO_2
- b) *Evaporites* – terbentuk dari evaporasi air laut atau air danau, yang menghasilkan halit (garam) dan gypsum: presipitasi kimiawi dari meningkatnya konsentrasi padatan akibat pengurangan air akibat penguapan.



Gambar 3.13. Bentuk-bentuk ukuran butir pada batuan sedimen yang dipengaruhi oleh proses transportasinya; makin jauh dari sumber maka tingkat kebundarannya makin tinggi, begitu pula sebaliknya

c. Batuan sedimen biogenik, terdiri atas:

- (1) Batugamping - kalsit (CaCO_3): dipresipitasi dari organisme yang terbentuk dari cangkang atau sisa-sisa tulang yang lain. Akumulasi dari sisa-sisa organisme tersebut membentuk tubuh batugamping (Gambar 3.14).
- (2) Diatomite - *Siliceous ooze* terdiri dari sisa-sisa radiolaria atau diatomae sehingga terbentuk batuan diatomit yang berwarna lebih terang dan lunak.



Gambar 3.14. Batuan sedimen non klastik yang tersusun atas ooid (sisa organik yang lebih besar) di dalam mikrit (halus)

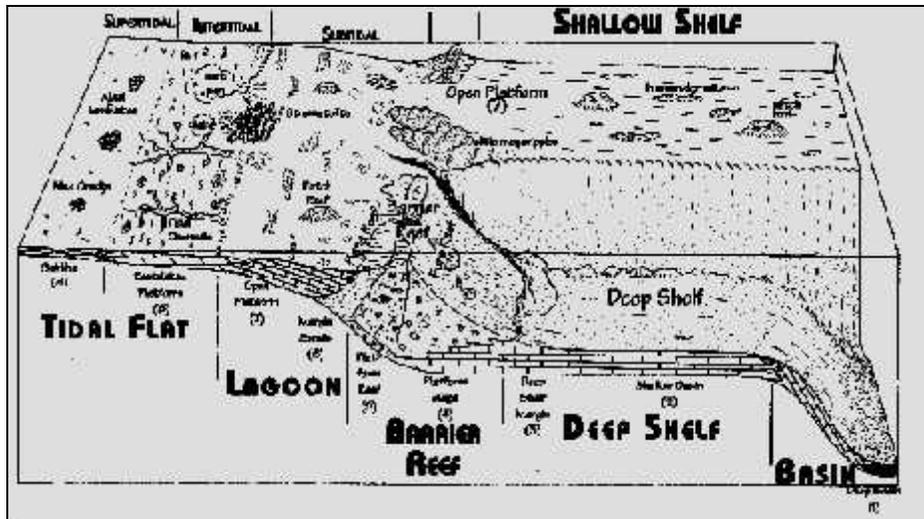
- (3) *Coal* (batubara): yaitu akumulasi sisa-sisa tumbuhan yang mati dalam jumlah yang besar dalam lingkungan unaerob (tanpa oksigen).
- (4) *Oil Shale* (serpih minyak): merupakan batuan sedimen klastik kaya organik yang selanjutnya berubah menjadi minyak bumi selama diagenesanya.

Warna hitam dan merah pada batuan sedimen dipengaruhi oleh:

- (1) Oksida besi (*Iron oxides*) dan sulfid yang dijumpai dalam kelompok batuan organik terpendam, dapat menyebabkan sedimen berwarna gelap, sehingga warna gelap tersebut dapat digunakan sebagai petunjuk bahwa lingkungan pengendapannya mengalami proses reduksi, yaitu pengurangan gas oksigen. Kondisi tersebut umumnya dijumpai pada lingkungan sedimen yang tertutup, contoh rawa-rawa, paya, lagoon dan danau.
- (2) Warna merah dibentuk oleh kandungan oksida besi (Fe_2O_3) yang terbentuk pada lingkungan pengendapan dengan kondisi oksidasi, yaitu penambahan kandungan oksigen bebas di dalam mineral, sebagai contoh adalah pada lingkungan / sedimen sungai.

4) Fasies Sedimenter

Lingkungan atau fasies sedimenter adalah darat (*non-marine*) hingga laut (*marine*). Lingkungan sedimentasi darat antara lain berupa sungai / sistem sungai, danau dan daratan. Media sedimentasi adalah gaya gravitasi bumi, air, glacial (es) dan eolian (angin). Lingkungan sedimentasi laut dibagi dalam 5 fasies yaitu daerah pasang surut, daerah lagoonal, terumbu, laut dangkal, laut dalam dan cekungan laut dalam (Gambar 3.15).



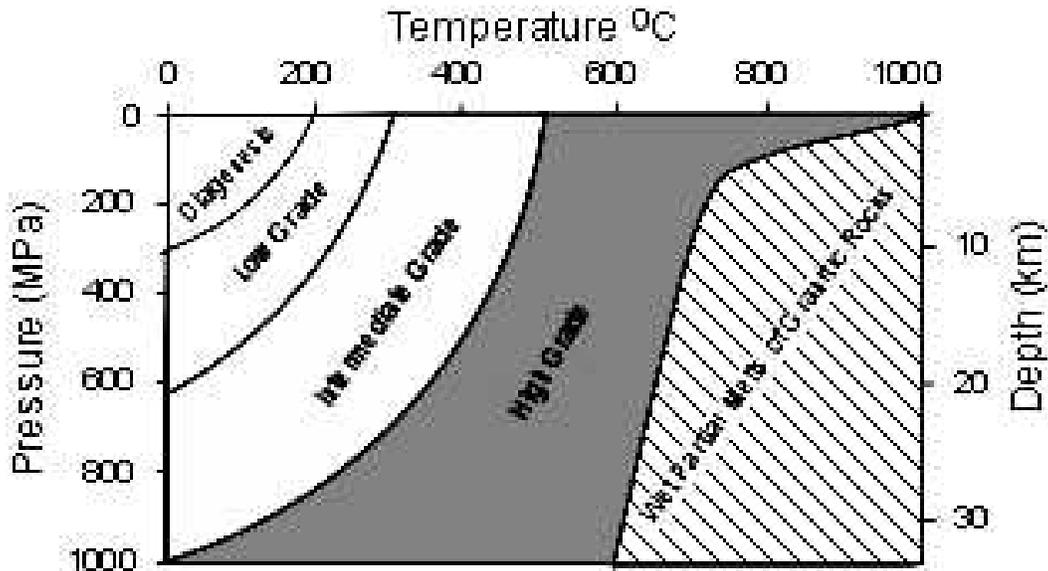
Gambar 3.15. Lingkungan pengendapan batuan karbonat; (1) Sedimen paparan benua: estuarine, delta, pantai, *carbonate shelf*, endapan evaporasi; (2) Lereng benua (*continental slope and rise sediments*): turbidit, kipas laut dalam, *drifts* ; (3) Sedimen laut dalam: *deep -sea oozes* ; dan (4) *Land-derived sediments*

C. Batuan Metamorf

Kata "*Metamorfisme*" berasal dari bahasa Yunani yaitu: Meta = berubah, Morph = bentuk, jadi metamorfisme berarti berubah bentuk. Dalam geologi, hal itu mengacu pada perubahan susunan / kumpulan dan tekstur mineral, yang dihasilkan dari perbedaan tekanan dan suhu pada suatu tubuh batuan. Walaupun diagenesis juga merupakan perubahan bentuk dalam batuan sedimen, namun proses ubahan tersebut berlangsung pada suhu di bawah 200°C dan tekanan di bawah 300 MPa (MPa: Mega Pascals) atau sekitar 3000 atm. Jadi, metamorfisme berlangsung pada suhu 200°C dan tekanan 300 Mpa atau lebih tinggi. Batuan dapat terkena suhu dan tekanan tinggi jika berada pada kedalaman yang sangat tinggi, seperti kedalaman pusat subduksi dan kolisi oleh tektonik lempeng. Pertanyaannya adalah: mungkinkah batas atas metamorfisme tersebut terjadi pada tekanan dan suhu yang sama dengan proses pelelehan batuan (*wet partial melting*). Saat pelelehan terjadi, justru proses ubahan yang terjadi adalah pembentukan batuan beku ketimbang metamorfik.

a. Derajat Metamorfisme

Derajat Metamorfisme adalah suatu istilah umum untuk memerikan secara relatif kondisi suhu dan tekanan saat batuan termetamorfkan (Gambar 3.16).



Gambar 3.16. Derajat metamorfisme (Nelson, 2003)

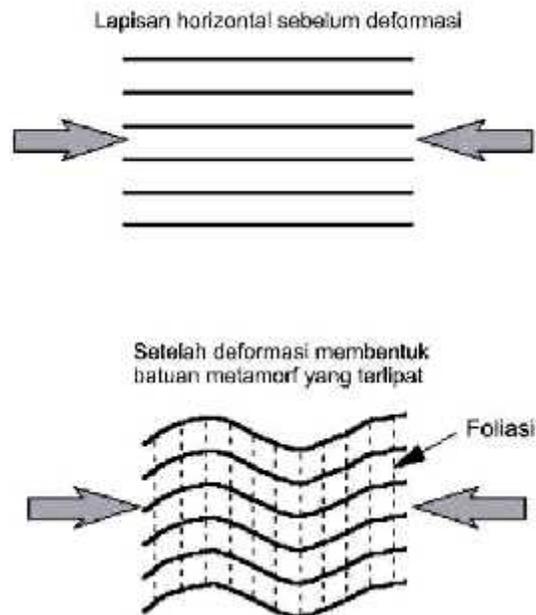
- a. Derajat metamorfisme rendah terjadi pada suhu 200-320°C dan tekanan yang relatif rendah. Batuannya dicirikan oleh melimpahnya mineral *hydrous* (kaya H₂O) dalam struktur kristalnya. Contoh mineralnya adalah:
 - (a) Mineral lempung
 - (b) Serpentine
 - (c) Chlorite
- b. Derajat metamorfisme tinggi berlangsung pada suhu di atas 320°C dengan tekanan yang relatif tinggi. Pada derajat ini mineral *hydrous* berubah menjadi kurang *hydrous* akibat kehilangan H₂O, contoh mineral adalah:
 - Ñ Muskofit – umum dijumpai pada metamorfisme tingkat tinggi
 - Ñ Biotite – mineral *hydrous*; stabil pada metamorfisme tingkat tinggi.
 - Ñ Pyroxene - mineral *anhydrous*.
 - Ñ Garnet - mineral *anhydrous*
- c. *Retrograde Metamorphism* (Metamorfisme Mundur); saat tekanan dan suhu lingkungan menurun secara tiba-tiba selama proses metamorfisme berlangsung, proses metamorfisme mengalami pembalikan ke posisi awal, saat sebelum terjadi metamorfisme; sehingga disebut *retrograde metamorphism*. Jika peristiwa itu terjadi, batuan metamorf yang terbentuk tidak akan tersingkap di permukaan, namun jika batuan tersebut dapat tersingkap di permukaan, maka *retrograde metamorphism* tidak terjadi. Hal itu disebabkan oleh:
 - Reaksi kimia berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan penurunan suhunya

- Selama proses metamorfisme berlangsung, fluida-fluida seperti H₂O dan CO₂ berpindahkan, dan fluida-fluida tersebut membentuk mineral-mineral hydrous yang stabil di permukaan bumi.
- Reaksi kimia berlangsung lebih cepat dengan adanya fluida, namun jika fluida tersebut menguap selama berlangsungnya proses ubahan, maka tidak akan mampu mempercepat proses reaksi kimia selama pemunduran ubahannya.

b. Factor-Faktor yang Mengontrol Proses Metamorfisme

Metamorfisme terjadi karena adanya mineral-mineral yang stabil pada kondisi perubahan tekanan dan suhu tertentu. Jika mineral-mineral tersebut tidak dapat stabil maka akan meleleh membentuk larutan magma. Saat suhu dan tekanan meningkat, terjadi reaksi kimia sehingga terjadi perubahan susunan mineral-mineral dalam batuan yang dikenai perubahan tekanan dan suhu tersebut. Pada kondisi susunan mineral stabil pada kondisi tekanan dan suhu yang baru tersebut, batuan metamorf terbentuk.

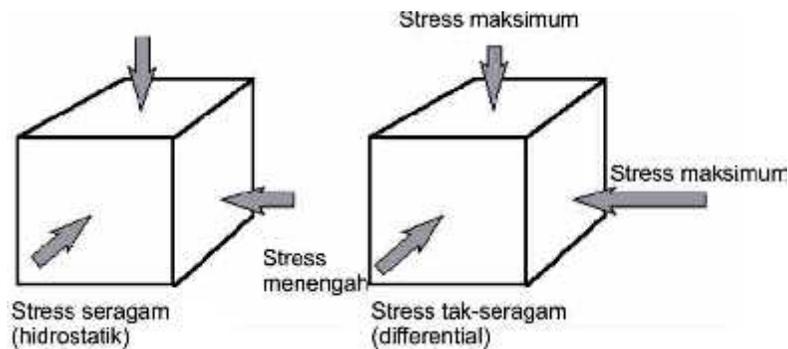
Pada prinsipnya, adanya perubahan tekanan dan suhu menyebabkan mineral-mineral dalam batuan mengalami deformasi, sehingga terjadi penghancuran (pada batuan yang kaku) dan pelipatan (pada batuan yang plastis). Perubahan tekanan yang berlebihan menyebabkan mineral-mineral akan terfoliasi, yaitu membentuk suatu penjajaran dan pemipihan, dan tidak merubah komposisi kimia (Gambar 3.17).



Gambar 3.17. Proses metamorfisme yang menghasilkan struktur foliasi pada batuan metamorf (Nelson, 2003)

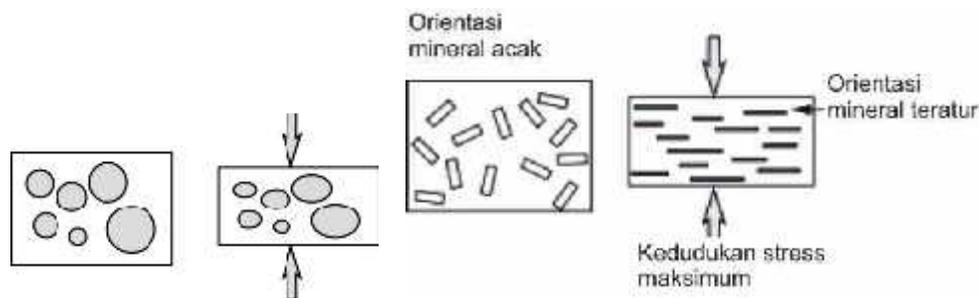
Hal-hal yang mempengaruhi proses metamorfisme adalah:

- (1) Suhu; Gradien Geothermal adalah perubahan suhu terhadap kedalamannya: kedalaman makin besar maka suhunya makin meningkat. Jadi, suhu yang lebih tinggi terletak pada batuan yang terkubur. Suhu dapat meningkat akibat intrusi batuan beku.
- (2) Tekanan bertambah sejalan dengan kedalaman penimbunannya, jadi tekanan dan suhu pasti meningkat mengikuti kedalamannya. Tekanan adalah gaya yang bekerja pada arah tertentu; berupa tegangan (tegangan *hydrostatic* atau tegangan *uniform*). Jika tegangan tersebut tidak sama dari semua arah maka disebut tegangan *differential* (Gambar 3.18).



Gambar 3.18. Tegangan seragam dan tegangan differensial proses metamorfisme (Nelson, 2003)

Jika tegangan differensial terjadi selama metamorfisme, maka dapat mempengaruhi tekstur batuan. Bentuk butir yang membulat menjadi memipih pada kedudukan tegangan maksimum dan porositas yang semua dijumpai menjadi semakin kecil, batuan menjadi semakin impermeabil (Gambar 3.19). Mineral yang mengkristal atau tumbuh pada kondisi tegangan differensial, dapat membentuk arah penyirapan mineral pada kedudukan tertentu, contoh: pembentukan dan susunan mineral-mineral pipih seperti biotit, muscovite, chlorite, talc, dan serpentine. Lembaran-lembaran silikat tumbuh dengan orientasi lembaran yang tegak lurus terhadap arah kedudukan tegangan maksimum. Orientasi lembaran silikat menyebabkan batuan menjadi lebih mudah hancur secara parallel, yang disebut sebagai foliasi.

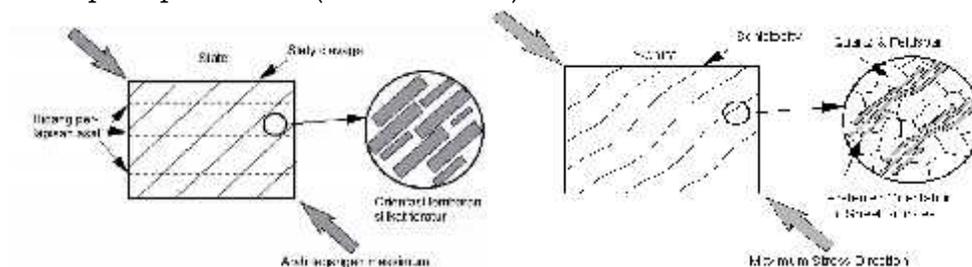


Gambar 3.19. Bentuk butir yang memipih akibat adanya tegangan differensial pada proses metamorfisme (Nelson, 2003)

- (3) Fasa fluida – adanya rongga-rongga antar butiran batuan berpotensi mengandung fluida, biasanya H₂O, namun juga mengandung mineral-mineral terlarut.
- (4) Waktu – reaksi kimia yang terjadi selama metamorfisme, rekristalisasi hingga tumbuhnya mineral baru, berlangsung dalam waktu yang sangat lambat. Percobaan di laboratorium menunjukkan bahwa waktu yang lebih lama untuk metamorfisme menghasilkan mineral yang lebih besar. Waktu metamorfisme adalah jutaan tahun.

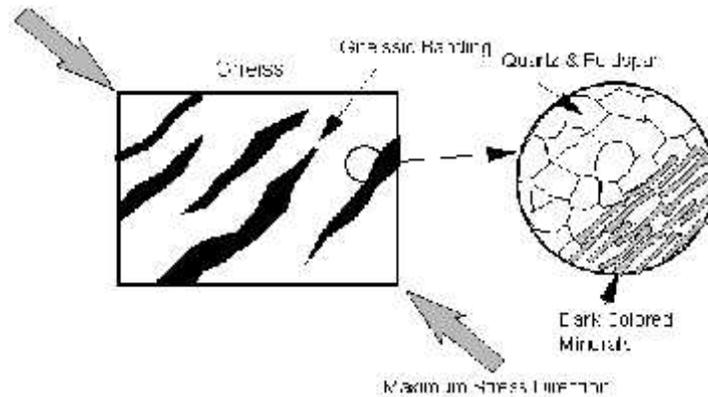
d. Jenis batuan metamorf berdasarkan derajat metamorfismenya

- (1) Serpilh – terbentuk pada derajat metamorfik rendah, ditandai dengan pembentukan mineral klorit dan lempung. Orientasi lembaran silikat menyebabkan batuan mudah hancur di sepanjang bidang parallel yang disebut belahan menyerpilh (*slatey cleavage*), *slatey cleavage* berkembang pada sudut perlapisan asal (Gambar 3.20).



Gambar 3.20. Foliasi menyerpilh, tingkat metamorfisme rendah tak terfoliasi (kiri) dan sedang terfoliasi sekistose (kanan) (Nelson, 2003)

- (2) Sekis – makin tinggi derajat metamorfisme makin besar mineral yang terbentuk. Pada tahap ini terbentuk foliasi planar dari orientasi lembaran silikat (biasanya biotit dan muskovit). Butiran-butiran kuarsa dan feldspar tidak menunjukkan penjajaran; ketidak-teraturan foliasi planar ini disebut *schistosity* (Gambar 3.20 kanan).
- (3) *Gneiss* – tingkat metamorfisme lebih tinggi, lembaran silikat tak-stabil, mineral-mineral horenblande dan piroksen mulai tumbuh. Mineral-mineral tersebut membentuk kumpulan butiran-butiran mineral dengan penjajaran yang tegak lurus terhadap arah gaya maksimum dari tegangan diferensial, sehingga membentuk struktur foliasi gneisik (Gambar 3.21).
- (4) *Granulite* – adalah metamorfisme tingkat tertinggi; semua mineral hydrous dan lembaran silikat menjadi tidak stabil sehingga muncul penjajaran beberapa mineral. Batuan yang terbentuk menghasilkan tekstur granulitik yang kenampakannya sama dengan tekstur faneritik pada batuan beku.



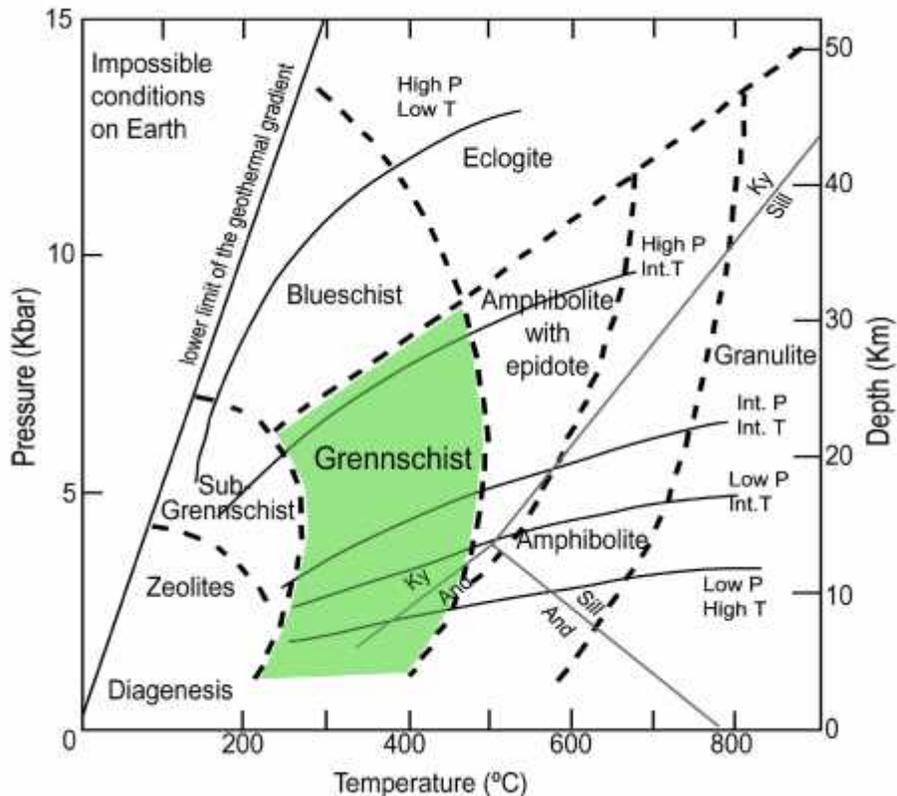
Gambar 3.21. Mineral-mineral bertekstur *gneissic banding*, orientasi mineral tegak lurus dengan arah gaya maksimum (Nelson, 2003)

- (5) Metamorfisme pada batuan beku basal dan gabbro
 - a) *Greenschist* - olivin, piroksen, dan plagioklas dalam basal berubah menjadi amfibol dan klorit (hijau).
 - b) *Amphibolite* - pada metamorfisme tingkat menengah, hanya mineral gelap (amfibol dan plagioklas saja yang bertahan), batuanya disebut amfibolit.
 - c) *Granulite* - pada tingkat metamorfisme tinggi, amfibol digantikan oleh piroksen dan garnet, tekstur foliasi berubah menjadi tekstur granulitik.
- (6) Metamorfisme pada batugamping dan batupasir
 - (a) *Marmor* - tidak menunjukkan foliasi
 - (b) *Quartzite* - metamorfisme batupasir yang asalnya mengandung kuarsa, rekristalisasi dan pertumbuhan kuarsa menghasilkan batuan non-foliasi yang disebut kuarsit.

e. Tipe Metamorfisme (Gambar 3.24)

- (a) *Cataclastic Metamorphism* - terjadi dari deformasi mekanika, seperti pada dua tubuh batuan yang bergeser satu sama lain. Panas terbentuk dari gesekan tersebut, batuan metamorf yang dihasilkan sebatas pada zona gesekan tersebut.
- (b) *Burial Metamorphism* - terjadi pada kedalaman ratusan meter di bawah permukaan bumi dengan suhu $\sim 300^{\circ}\text{C}$ tanpa differential stress. Terbentuk mineral baru namun batuanya tidak menunjukkan kenampakan berubah, contoh Zeolites.
- (c) *Contact Metamorphism* - biasanya terjadi karena adanya intrusi batuan beku disebut sebagai *metamorphic aureole*. Pada bagian luar tubuh batuan tak-terubah dan makin mendekati tubuh intrusi maka makin terubah. Contoh batuanya adalah *hornfels*: berukuran halus dan tanpa foliasi.
- (d) *Regional Metamorphism* - berlangsung secara regional yang dicirikan oleh deformasi tingkat tinggi di bawah kondisi stress differensial (Nelson, 2003; Gambar III.28). Batuan metamorf yang terbentuk terfoliasi kuat, seperti serpih,

sekis dan gneis. Gaya yang bekerja umumnya dihasilkan dari gaya tektonik berupa kompresi, sebagaimana proses tumbukan dua lempeng secara regional. Jadi, secara regional proses metamorfisme ini berlangsung pada inti gugusan pegunungan atau yang telah tererosi.



Gambar 3.22. Fasies metamorfisme dengan ciri tekanan dan suhu pembentuknya (Nelson, 2003)

f. Fasies Metamorfisme

Secara umum, dalam proses metamorfisme tidak mengubah komposisi kimia suatu batuan. Perubahan itu hanya terjadi pada bentuknya saja, oleh penambahan tekanan dan suhu. Jadi, dengan kondisi mineral yang terkandung di dalamnya, pembebanan dan pemanasan saat pembentukannya, atau yang lebih populer dengan fasies metamorfik (sama konsepnya dengan lingkungan pengendapan pada proses sedimentasi), dapat direkonstruksi.

Suatu runtunan fasies metamorfisme dikenali dari lingkungannya, yang bergantung pada gradien geotermal:

- a) pada zona dengan gradien geothermal tinggi (A) dapat terjadi pada zona intrusi,
- b) pada zona (B) batuan berkembang dari fasies zeolit menjadi sekis hijau, amfibolit dan eklogit (Nelson, 2003; Gambar 3.23).

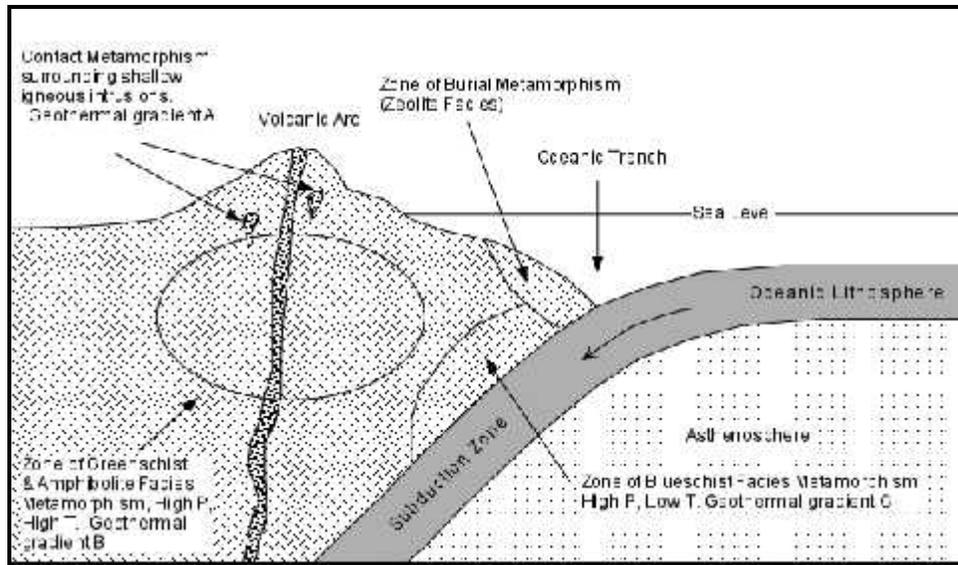
- c) pada gradien geotermal rendah (C), batuan berkembang dari zeolit ke sekis biru dan ke fasies eklogit.

g. Hubungan Metamorfisme dan Proses Tektonik Lempeng

Penambahan tekanan dan suhu secara regional umumnya berhubungan dengan proses tektonisme yang berlangsung secara global. Dalam mekanisme tektonik tersebut terjadi proses tumbukan, yang ditandai dengan:

- (1) Menyusupnya Lempeng samudera di bawah lempeng benua (*subduction*), sehingga menghasilkan proses penambahan tekanan dan suhu yang sangat tinggi, serta akumulasi batuan leleh akibat proses pelelehan batuan sebagian (*partial melting*).
- (2) Menumbuknya lempeng benua pada lempeng benua yang lain (*collision*), sehingga membentuk tekanan dan suhu yang tinggi pada kedalaman tertentu. Di bawah tumbukan tersebut, pun masih dapat dijumpai sisa-sisa lempeng samudra yang oleh suhu dan tekanan yang tinggi tersebut terubah dan menjadi batuan metamorf, seperti eklogit dan serpentinit. Proses pengangkatan oleh proses tumbukan tersebut, pada periode yang lebih lanjut selanjutnya mengangkat batuan metamorf tersebut, sehingga menjadi batuan akresi, dan muncul di permukaan bersama-sama dengan batugamping (asal laut) dan rijang (asal laut dalam).

Di samping proses tumbukan, juga berlangsung proses pelelehan batuan. Batuan penyusun bagian lempeng yang menyusup menembus bagian bawah lapisan kerak bumi. Saat penyusupan berlangsung, terjadi gesekan yang sangat besar yang selanjutnya menimbulkan panas pada kedalaman tertentu dan gradien geothermal yang tinggi. Panas (geothermal) tersebut menyebabkan batuan tersebut meleleh pada zona *Benioff*. Akibat pelelehan tersebut, terjadi pasokan magma sehingga material plastis tersebut mengerosi dinding-dinding batuan kerak bumi (bagian lempeng yang tertumbuk). Saat tumbukan berlangsung, terjadi penghancuran batuan akibat tumbukan, membentuk zona-zona sesar, terutama sesar yang terbentuk dari gaya tarik. Magma hasil pelelehan batuan bergerak ke permukaan melalui zona-zona sesar (rekahan), sejalan dengan waktu, akumulasi magma tersebut membentuk suatu tubuh gunung api, yang lebih dikenal dengan busur magmatik. Bentang alam yang dibentuk oleh proses tumbukan tersebut dari depan ke belakang adalah (Gambar 3.23) zona tumbukan (*subduction zone*), cekungan muka busur (*fore arc basin*), busur magmatik dan cekungan belakang busur (*back arc basin*).



Gambar 3.23. Proses tektonik lempeng dengan fasies metamorfisme yang terbentuk (Nelson, 2003).

Batuan metamorf yang terbentuk oleh proses tektonik lempeng tersebut adalah:

- (1) Metamorfisme kontak; berada pada zona magmatisme, yaitu pada daerah seputar terjadinya akumulasi magma dalam dapur magma, akibat intrusi batuan beku dangkal (gang, korok atau sill). Metamorfisme kontak dicirikan oleh tekanan dan suhu tinggi dengan gradien geothermal A; umumnya berada pada busur vulkanisme.
- (2) Zona / fasies sekis hijau dan amfibolit; berada pada zona magmatik, yaitu pada akumulasi magma di sekitar dapur magma atau reservoir magma. Dicirikan oleh tekanan dan suhu lebih tinggi dari metamorfisme kontak, dengan gradien geothermal B.
- (3) Zona metamorfisme terpendam / fasies Zeolit; berada pada zona subduksi kedalaman 0-1 km, dengan tekanan dan suhu rendah.
- (4) Zona / fasies sekis biru (*blueschist facies*); berada pada zona subduksi bagian dalam zona hancuran di depan busur pada kedalaman lebih dari 1km, tekanan dan suhu tinggi dengan gradien geothermal C.

3.4 Mineral dan Batuan dalam Geologi Lingkungan

A. Sebagai Sumber Daya Alam

Secara umum, mineral merupakan penyusun batu yang dalam limbahnya dapat dijumpai secara heterogen maupun homogen. Limbah heterogen berarti dalam berbagai jenis batuan dan mineral, seperti pada batuan beku dan vulkanik, batuan sedimen dan batuan metamorf. Limbah homogen, seperti kuarsa, korundum, intan

(grafit), gipsum, bentonit, kalsit dan lain-lain. Mineral-mineral dalam limbah homogen sangat jarang dijumpai di alam, sehingga bernilai ekonomi tinggi, contoh intan dan kuarsa dengan pengotoran. Mineral-mineral yang dijumpai dengan unsur jarang (*rare elements*), seperti mineral-mineral sulfida, limbahnya diburu banyak orang karena nilai ekonominya yang sangat tinggi. Sebagai contoh adalah Au, Ti, U, Li, Pb, Th dan lain-lain.

Dalam periode yang pendek kebanyakan mineral merupakan sumber daya alam yang tak-terbarukan (*unrenewable*), dan dalam siklus yang lebih lama (puluhan juta tahun) menjadi bersifat terbarukan. Pada kenyataannya, manusia memiliki masa hidup (*life time*) yang sangat pendek, sehingga berimplikasi pada keadaan yang menjadikan semua jenis mineral sebagai sumber daya tak-terbarukan.

Ada tiga golongan mineral sebagai bahan tambang di alam yaitu: 1) Mineral sebagai bahan bakar (minyak, gas dan batubara); 2) Mineral industri dan mineral logam (emas, timah, perak, tembaga dan lain-lain); dan 3) Mineral sebagai bahan bangunan / konstruksi (geomaterial). Mineral yang dibahas dalam bab ini adalah mineral sebagai bahan tambang, baik yang ditujukan untuk kepentingan pemenuhan bahan bakar, industri maupun sebagai bahan bangunan (geomaterial). Didasarkan pada limbahnya di alam, mineral sebagai bahan tambang digolongkan menjadi tiga kelompok besar, yaitu:

- 1) Golongan A yaitu bahan tambang yang bernilai ekonomi tinggi dengan limbah di alam yang jarang; seperti mineral-mineral logam: emas, timah, tembaga dan nikel. Bahan tambang ini dengan ada yang dikelola oleh pemerintah dan ada yang dikelola oleh rakyat, terutama untuk limbah yang nilai ekonominya kecil.
- 2) Golongan B yaitu bahan tambang yang bersifat strategis; seperti minyak bumi, gas alam dan panas bumi. Bahan tambang golongan B ini pengelolannya diatur sepenuhnya oleh pemerintah.
- 3) Golongan C yaitu bahan tambang yang dapat ditambang oleh rakyat, yang pengelolaannya diatur oleh pemerintah daerah setempat, contoh: pasir, batu, batubara, mangan dan mineral lempung seperti kaolinit, monmorilonit, ilit dan lain-lain.

Mineral dapat bernilai ekonomi baik pada masa kini maupun di masa depan. Secara umum, nilai ekonomi suatu mineral (batuan) akan mengalami peningkatan sejalan dengan makin menipisnya limbah di alam. Peningkatan nilai ekonomi tersebut mengikuti hukum logaritmik.

B. Sebagai Pemicu Bencana Alam

Dalam ilmu geologi, semua material yang menyusun kerak bumi disebut batuan. Di dalamnya dapat saja terdiri atas tanah, batu, mineral, air dan gas. Masing-masing komponen bumi tersebut memiliki sifat yang berbeda-beda. Pada kondisi setimbang,

semua komponen kerak bumi tersebut sangat bermanfaat bagi kehidupan manusia. Namun, pada kondisi tertentu, yaitu saat batuan tidak lagi pada kondisi kesetimbangan, maka dapat memicu terjadinya bencana alam.

Tanah adalah bagian dari kerak bumi hasil dari pelapukan batuan. Sifat tanah yang plastis dengan tingkat porositas yang tinggi, pada morfologi yang miring, dan basah (jenuh air) dapat memicu terjadinya longsor, rayapan atau aliran massa. Gas adalah bagian dari material penyusun kerak bumi yang selalu bergerak. Gas bumi berada pada rongga pori antar butiran dalam batuan dengan posisi di atas lapisan yang mengandung fluida. Pada kondisi setimbang, gas dapat dieksploitasi sebagai bahan tambang untuk bahan bakar (gas cair / LNG). Namun, pada keadaan yang berlebih, gas dapat memicu terjadinya likuifaksi, sebagaimana yang terjadi di Sidoarjo sejak Mei 2006 yang lalu. Gas yang berlebihan juga dapat mengancam kesehatan manusia, contoh gas metan, gas butan, gas sulfat dan sulfid serta gas monoksida.

Tanah dan segala sifat-sifatnya akan dibahas pada BAB 4 dan air dibahas pada BAB 5. Bencana alam yang ditimbulkan oleh proses geologi yaitu gerakan massa dan letusan gunung api, manajemen bencana yang berhubungan dengan pengelolaan, mitigasi dan penanggulangan akan dibahas pada BAB 6, sedangkan pemanfaatan sumber daya alam yang berwawasan berkesinambungan akan dibahas pada BAB 8.

PELAPUKAN DAN HASIL-HASILNYA

Proses pelapukan dalam arti sempit dapat dikonotasikan dengan proses peluruhan atau pembusukan batuan. Dengan demikian, proses alam ini sangat penting bagi kelangsungan bumi. Tanpa adanya pelapukan, bumi akan terasa sesak dan penuh, serta tidak akan mampu mengolah dan menyimpan apa yang ada dan dihasilkan oleh proses-proses alam di permukaan bumi. Dengan adanya pelapukan, maka soil dapat terbentuk; dan dengan adanya soil, maka kehidupan organisme dapat berlangsung di atas dan di dalamnya. Dengan adanya kehidupan, maka kesejahteraan manusia dapat dijamin kelangsungannya.

4.1 Pelapukan

Pelapukan adalah mekanisme penghancuran batuan baik secara fisik, mekanik, kimia dan biologis. Hal itu terjadi karena batuan dan mineral tidak selalu dalam kesetimbangan baik di dekat maupun di atas permukaan bumi. Pelapukan adalah salah satu proses geomorfik yang sangat penting, karena dapat menghasilkan sedimen, menghasilkan produk (mineral sekunder, lempung dan lain-lain), dan menghasilkan soil. Di lain sisi, pelapukan dapat menghasilkan material sedimentasi untuk selanjutnya diendapkan melalui proses fluvial, pantai atau angin, setelah tererosi membentuk (mengevolusi) bentang alam dan menyebabkan gerakan massa (longsoran).

A. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pelapukan

Proses pelapukan dapat berlangsung secara alamiah maupun adanya percepatan campur-tangan manusia (artifisial). Faktor-faktor yang mempengaruhi proses pelapukan tersebut adalah batuan induk, iklim (suhu dan kelembaban), vegetasi, topografi dan waktu. Pada kondisi saat ini, terdapat faktor tambahan yang juga sangat berperan penting dalam percepatannya, yaitu aktivitas manusia. Satu per satu faktor-faktor pelapukan tersebut adalah:

1. Material induk

Proses pelapukan dapat menghancurkan batuan induk. Dalam proses sedimentasi, material hasil penghancuran oleh proses pelapukan tersebut selanjutnya tererosi, tertransportasi, terpilah, terendapkan lalu terdiagenesis. Sisa hasil pelapukan kadang-kadang masih dapat diamati di lokasi tempat pelapukan tersebut berlangsung, yaitu tanah yang masih bersifat *insitu*. Di alam, ada tanah yang bersifat *insitu* dan ada pula yang bersifat longsoran, yang disebut talus. Untuk memerikan tanah yang dihasilkan dari proses pelapukan, dapat dilakukan dengan didasarkan pada jenis batuan induk yang terlapukkan tersebut. Tanah

hasil pelapukan batuan gunung api tentunya berbeda dengan tanah hasil pelapukan batugamping. Warna tanah hasil pelapukan batuan gunung api adalah abu-abu kecoklatan hingga kemerahan, sedangkan tanah hasil pelapukan batugamping adalah abu-abu terang agak kecoklatan. Tanah hasil pelapukan batuan beku andesit piroksen berwarna merah bata hingga coklat, tanah hasil pelapukan tuf dan pumis dasitik berwarna abu-abu kehitaman agak kekuningan. Vegetasi yang tumbuh pada tanah hasil pelapukan batuan beku atau batuan gunung api lebih lebat dibandingkan vegetasi yang tumbuh dalam tanah hasil pelapukan batugamping atau batupasir.

Material induk menentukan sifat-sifat fisik tanah, meliputi struktur, tekstur, porositas, kandungan mineral dan permeabilitasnya. Bentang alam yang terbentuk juga dapat digunakan sebagai petunjuk dari tipe material induknya; bentang alam bergelombang kuat dengan fragmen bongkah di dalamnya, biasanya tersusun atas material yang lebih resisten dibandingkan dengan bentang alam yang landai. Pada kondisi normal, batuan yang kurang resisten tingkat pelapukannya lebih tinggi dibandingkan batuan yang lebih resisten; artinya, makin resisten batuan induk tersebut, makin tipis soil yang terbentuk.

Batuan yang dapat dikategorikan paling resisten antara lain adalah batuan beku dengan struktur masif, aglomerat dan lava, marmer dan batugamping non-klastik. Batuan dengan tingkat resistensi lebih rendah antara lain batuan vulkanik-klastika, batugamping klastika, batupasir yang bersifat lumpuran dan beksi vulkanik epiklastika. Batuan yang paling tidak resisten adalah batulanau, batulempung, batupasir fluviatil, serpih, sekis dan filit. Jadi, batuan dengan porositas tinggi dan permeabilitas yang rendah, memiliki tingkat pelapukan yang lebih tinggi, dibandingkan dengan batuan yang permeabilitasnya tinggi.

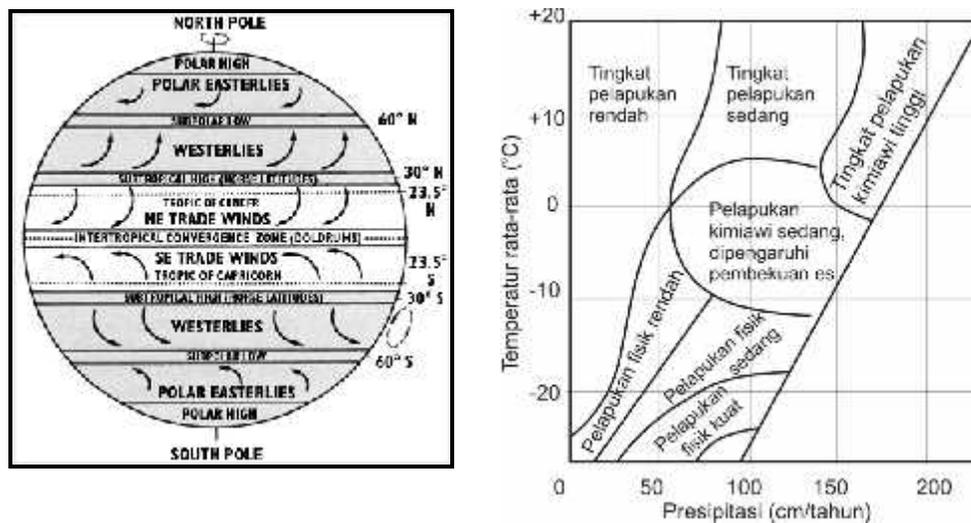
2. Iklim

Sifat-sifat iklim yang berpengaruh besar terhadap proses pelapukan (pembentukan tanah) adalah suhu, presipitasi dan arah dan kecepatan angin. Dampak pelapukan yang kemudian membentuk soil, dapat saja meningkat pada suhu dan tingkat kelembaban yang lebih tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan proses rekasi kimia seperti hidrolisis dan oksidasi. Agar proses pelapukan lebih efektif, maka kelembaban harus tinggi. Jadi, bukan berarti suhu yang tinggi dapat meningkatkan pelapukan. Frekuensi dan jumlah curah hujan yang tinggi dengan kecepatan angin yang rendah, akan meningkatkan kelembaban udara, sehingga dapat menguraikan / menghancurkan tubuh batuan dan meningkatkan proses pelapukan.

1) Presipitasi – tingkat presipitasi ditentukan dari distribusi dan limpahan kelembabannya. Didunia (Gambar 4.1): bagian selatan lebih sering kering dengan periode presipitasi April sampai pertengahan Agustus, kelembaban 190-200 mm, sedangkan di beberapa lokasi di bagian barat daya memiliki kelembaban sekitar 220 mm. Jadi, di lokasi itu besarnya evaporasi-presipitasi

menyebabkan kelembaban berkurang. Besarnya angin juga menyebabkan meningkatnya evaporasi. Hal itu meningkatkan gerakan air (kapillaritas) dan melarutkan garam ke dalam tanah, hingga tanahnya lebih asin. Penguapan air di permukaan menyebabkan garam dan mineral menjadi tertinggal.

- 2) **Suhu** - perubahan suhu yang besar dapat mempercepat proses pelapukan. Suhu yang relatif tinggi dengan angin yang relatif besar membentuk proses evaporasi yang tinggi pula, sehingga tingkat presipitasi juga tinggi. Jika volume angin rendah, maka presipitasi pun rendah. Rendahnya proses presipitasi pada suhu tertentu dapat mempengaruhi tingkat pelapukan kimiawi (Gambar IV.2). Makin tinggi tingkat presipitasi tahunan dan makin tinggi suhu rata-rata, maka makin kuat tingkat pelapukan kimiawinya.



Gambar 4.1. Sirkulasi udara pada lapisan atmosfer bumi yang mempengaruhi intensitas presipitasi dan suhu rata-rata (kiri) dan pengaruh intensitas presipitasi dan suhu rata-rata (kanan) terhadap tingkat pelapukan kimiawi (Keller, 2000).

- 3) **Kelembaban** - perbedaan suhu yang besar dengan sedikit angin menyebabkan kelembaban daerah menjadi tinggi. Tingkat kelembaban mempengaruhi curah hujan. Curah hujan menyuplai komponen air asam ke dalam batuan sehingga memungkinkan untuk terjadinya reaksi kimiawi antara unsur-unsur yang terkandung dalam mineral dengan CO_2 , NO_3 dan H_2SO_4 yang berasal dari air hujan.

Proses pelapukan yang berlangsung di Indonesia pada saat ini didominasi oleh iklim tropis, dengan dua musim yaitu musim hujan (dengan curah hujan ~2000-4000 mm/th) pada bulan Oktober – April dan musim kemarau pada bulan April - Oktober. Perubahan suhu yang sangat mencolok dari musim hujan ke musim kemarau dan penambahan air hujan ke dalam tanah yang sangat tinggi, menyebabkan tingkat kelembaban tinggi, sehingga tingkat pelapukannya pun

tinggi. Di Indonesia, terutama untuk wilayah Sumatra dan Jawa setidaknya memiliki ketebalan tanah sekitar 50-2,5 m, di Kalimantan bahkan dapat mencapai lebih dari 5-10 m.

3. Vegetasi

Vegetasi sangat penting pada percepatan pelapukan. Ada lima aspek utama vegetasi yang mempengaruhi proses pelapukan, yaitu:

- a) Dapat melindungi soil dari erosi air dan angin; akar tumbuhan mengikat soil (material lepas hasil pelapukan) dari pengaruh titik jenuh air ke dalam batuan induknya.
- b) Akar rumput dan akar pepohonan dapat meningkatkan proses penghancuran material induk; akar-akar tersebut menerobos melalui celah bebatuan, lalu mendesak dan memecah tubuh batuan tersebut sehingga memungkinkan air hujan masuk melalui akar-akar tersebut dan selanjutnya mengisi celah yang dibentuk oleh akar-akar.
- c) Tumbuhan menyediakan material organik yang dapat meningkatkan struktur dan kemampuan tanah untuk menjaga kelembabannya; akar tumbuhan disamping dapat menguraikan bebatuan, juga dapat menyimpan infiltrasi air hujan. Hal itu memungkinkan tanah tetap agar basah dan tetap mengikat oksigen dari udara.
- d) Tumbuhan dengan siklus nutrisinya dapat meningkatkan proses pencucian profil tanah; akar-akar tumbuhan selalu membutuhkan nutrisinya melalui kandungan organik yang ada di sekitarnya. Pengambilan unsur-unsur hara (C, H, O, N, S, P dan K) oleh akar tumbuhan dari dalam tanah tersebut merupakan bagian dari siklus pengolahan nutrisi tumbuhan.
- e) Akar-akar tumbuhan menyediakan habitat kaya nutrisi untuk mikroorganisme tanah (disebut dengan efek rhizosphere). Hubungan simbiotik antara bakteri dan jamur membantu tumbuhan mencapai nutrisinya seperti nitrogen and phosphor.

Vegetasi dan iklim sering berpengaruh bersama sehingga sulit dipisahkan besarnya pengaruhnya. Pada kenyataannya, kombinasi dari kedua faktor tersebut menghasilkan **zona tanah**. Macam-macam vegetasi dari rumput-rumputan dalam lahan pertanian, hingga hutan dengan tanaman yang lebih padat memberikan variasi tanah yang bermacam-macam.

Di bawah pengaruh pepohonan, air hujan pada tiap musim hujan mencuci bagian-bagian tanah yang berukuran halus dan nutrisi dalam tanah, yang selanjutnya disimpan dalam lapisan pengayaan. Kondisi tersebut selanjutnya membentuk tanah menjadi berwarna coklat hingga hitam dan subur pada horizon A.

4. Topografi

Permukaan bumi memiliki topografi yang bervariasi, dari pegunungan, perbukitan, hingga dataran; dari lingkungan rawa-rawa, delta, pasang-surut hingga laut dalam. Secara tektonik pun dapat diperikan bahwa morfologi bumi tersebut ada benua, paparan benua, palung laut hingga zona pemekaran.

Sebagai contoh adalah jika kita berjalan dari Jakarta ke arah barat, maka kita akan melalui perbukitan bergelombang hingga ke pantai, lalu ke arah utara akan melalui morfologi dataran hingga pantai, ke timur dan tenggara, serta ke selatan akan melalui morfologi bergelombang hingga pegunungan, yang selanjutnya berakhir ke pantai. Begitu pula jika kita bergerak ke timur dari Yogyakarta, maka yang ada adalah dataran, ke utara Gunung Merapi (gradual dari slope 2-40°), dan ke barat dan barat daya berupa pegunungan. Sepanjang perjalanan, tentunya akan melihat punggung, lembah dan dataran, baik dalam skala sempit (lokal) hingga beberapa kilometer. Perbedaan relief tersebut akan memicu berkembangnya perbedaan pola drainasi. Perbedaan pola drainasi dengan dikontrol pula oleh komposisi litologi akan menghasilkan perbedaan tingkat infiltrasi. Perbedaan tingkat infiltrasi dan tingkat kejenuhan airtanah berpengaruh pada perbedaan tingkat pelapukan, sehingga menghasilkan perbedaan ketebalan tanah yang dihasilkan. Perbedaan litologi, topografi dan tingkat kejenuhan batuan terhadap airtanah, menyebabkan tingkat kelembaban batuan juga berbeda, sehingga sifat-sifat fisik tanahnya pun berbeda.

Jika kita melihat topografi dari pesawat atau dari penafsiran foto udara / citra, akan timbul pertanyaan yang menyangkut pada:

- a) Mengapa pada bagian atas suatu bukit warnanya lebih cerah?
- b) Berapa tingkat kelembaban, suhu dan kecepatan angin, bagaimana perbedaannya dengan bagian yang lebih rendah?
- c) Berapa tebal top soil di atas bukit, dan berapa di bagian lembah?
- d) Di mana kita dapat menjumpai tingkat kelembaban yang besar, sehingga vegetasinya lebih lebat; bagian atas atau bagian bawah?
- e) Dimana daerah (tinggian atau rendahan) dengan banyak airtanah?

Dari hasil penelitian, penulis berhasil menarik kesimpulan bahwa:

- a) Kelerengan, stabilitas rendah pada lereng yang miring mempercepat proses pelapukan dan mengaktifkan proses erosi dinding. Itulah sebabnya pada lereng-lereng memiliki ketebalan soil yang lebih tipis dari pada daerah yang landai; hasil erosi dinding tersebut selanjutnya diendapkan pada kaki lereng, sehingga soilnya lebih tebal.
- b) Penyingkapan (*exposure*), bagian morfologi yang kurang mendapat sinar matahari menjadi lebih lembab, sehingga intensitas pelapukan lebih tinggi dengan faktor pelapukan utama asal biologis
- c) Relief, adanya gradien lereng yang tinggi memicu tubuh batuan menjadi kurang stabil, sehingga mudah tererosi / bergerak dan longsor, membentuk

endapan debris. Hal itu sering dijumpai pada zona-zona sesar, maupun lereng gunung api. Material gunung api yang belum mengalami pematangan, oleh adanya air hujan menjadi mudah tererosi dan akhirnya longsor.

5. Waktu

Semakin lama suatu tubuh batuan tersingkap di permukaan, maka makin tinggi tingkat pelapukan yang terjadi padanya, sehingga soil yang terbentuk pun lebih tebal. Sebagai contoh adalah tanah hasil pelapukan batuan gunung api di Pegunungan Kulon Progo, yang dibandingkan dengan tanah hasil pelapukan batuan gunung api di Merapi. Keduanya merupakan produk aktivitas gunung api, dengan batuan induk (secara umum) berkomposisi andesit (baik piroksen maupun horeblendita). Proses pelapukan yang berlangsung pada saat ini didominasi oleh iklim tropis, dengan dua musim yaitu musim hujan (curah hujan ~2000-4000 ml/th). Soil di permukaan Kulon Progo terbentuk setidaknya sejak Kuartar (~2 jtl), sedangkan soil di permukaan Gunung Merapi terbentuk paling lama 40.000 tyl, sehingga fragmen kerikil hingga bongkah melimpah di dalamnya.

6. Aktivitas manusia

Aktivitas manusia, baik positif maupun negatif, sangat berpengaruh pada tingkat pelapukan. Sebagai contoh adalah penggunaan lahan untuk pertanian dan perkebunan. Aktivitas lain manusia yang menyebabkan proses percepatan denudasi adalah penambangan batuan dan mineral, penggunaan lahan untuk pembangunan sarana dan prasarana umum maupun pribadi, dan lain-lain. Kegiatan-kegiatan yang mempengaruhi perubahan bentuk lahan tersebut berlangsung baik pada morfologi rendah hingga pada morfologi yang sangat tinggi.

Contoh konkrit kegiatan manusia akhir-akhir ini adalah perubahan bentuk lahan untuk kepentingan tourism. Eksplorasi pada lahan tak-terjamah tersebut berlangsung pada area yang sangat luas dengan konsep yang ditawarkan pun juga sangat luas, dari wisata alam, wisata kuliner, wisata edukasi, wisata bahari dan lain-lain. Perubahan bentuk lahan yang disertai dengan konsep konservasi lahan tentu akan sangat membantu lahan dalam mengakomodasi pengembangan tersebut. Namun, konsep wisata yang tidak memperhatikan konservasi lahan, tentu akan sangat merugikan bagi perkembangan wilayah, terutama pada laju erosi yang dapat terjadi.

Dalam aktivitas tersebut, pengelupasan soil selalu dilakukan, untuk mendapatkan batuan dasar dalam meletakkan pondasi bangunan, maupun untuk mendapatkan sumber daya alam yang diperlukan. Dengan sepenuhnya menyadari, aktivitas manusia abnormal justru yang paling besar menghasilkan proses pelapukan dan denudasi. Pengaruh aktivitas manusia terhadap pembentukan dan konservasi tanah ini, mencapai 70% dari aktivitas alam secara gradual. Dengan pengaturan yang baik, manusia dapat mengatur atau mempertahankan soil.

B. Dampak Pelapukan

Suatu tubuh batuan cenderung stabil selama perubahan yang dialaminya berlangsung pada lingkungan baru yang stabil. Secara normal, proses pelapukan selalu berdampak pada adanya disintegrasi (penghancuran) dan dekomposisi (penguraian). Hal itu ditunjukkan pada pembentukan horizon-horizon tanah, yang akan dibahas detail pada sub Bab IV.2. Kedua dampak tersebut selalu dijumpai dalam setiap proses pelapukan, hanya saja yang membedakan antara lokasi yang satu terhadap yang lain adalah lajunya.

a. Disintegrasi

Yaitu proses penghancuran material / batuan baik spontan atau akibat suatu imbasan yang dibarengi dengan proses fragmentasi. Proses disintegrasi dapat terjadi oleh:

- 1) Proses-proses fisik yang dapat menghancurkan struktur batuan/mineral, seperti tektonik (sesar dan kekar), pembebanan, penghancuran oleh aktivitas manusia (quari dan penambangan), dan pengolahan tanah sebagai lahan pertanian
- 2) Gerakan massa (seperti longsor / runtuhnya suatu tubuh batuan) dan penyusutan diameter fragmen (butir) oleh pelepasan sebagian (abrasi, erosi dan korosi).

Proses-proses yang dapat terjadi dalam disintegrasi adalah ekspansi panas (*thermal expansion*), pelepasan tekanan (*pressure unloading*), hidrasi dan pengembangan (*hydration and swelling*), pelapukan penggaraman (*salt weathering*), pertumbuhan rongga pori: salju, garam dan organik dan abrasi.

- 1) Ekspansi panas;** Batuan dan mineral mengembang dalam rangka merespon panas: semua mineral memiliki tingkat kemampuan mengembang yang berbeda-beda. Perbedaan kemampuan tersebut menyebabkan bagian luar batuan menjadi terurai. Ekspansi panas juga dapat menyebabkan kebakaran hutan pada daerah *semiarid*. Proses ini juga menyebabkan bagian luar mengalami pengelupasan mengulit bawang (*spheroidal weathering*); bagian luar mengembang sejajar dengan bidang rekahan. Proses ini juga menyebabkan terjadinya kontraksi tegak lurus terhadap rekahan (Gambar 4.2).

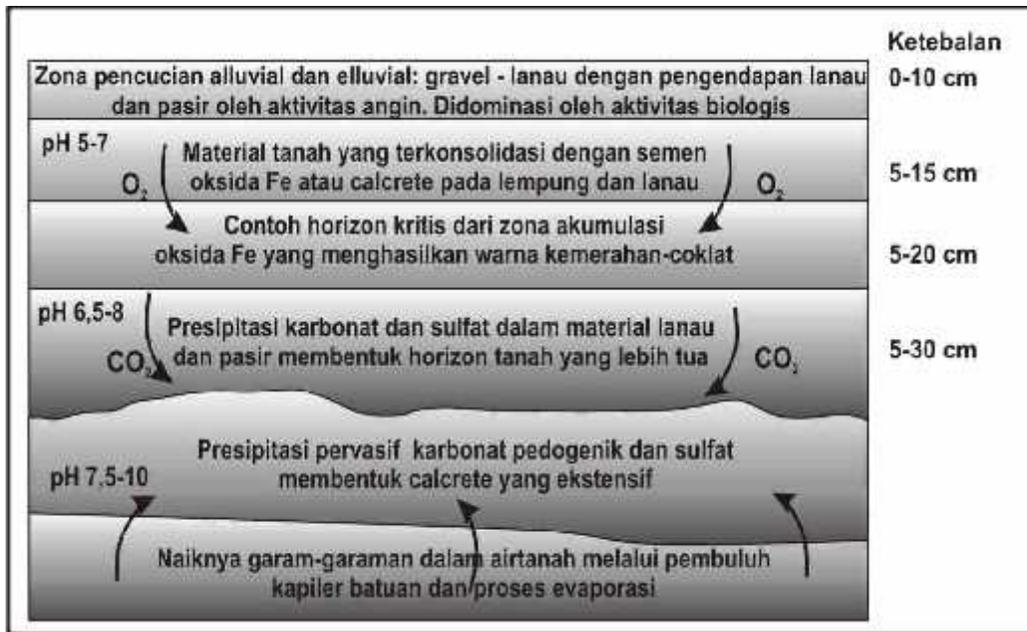


Gambar 4.2. *Thermal expansion* yang menyebabkan retakan-retakan yang arahnya relatif tegak lurus terhadap arah kontraksinya akibat proses pelapukan, geometri retakan tersebut hampir menyerupai kekar-kekar tarik pada tubuh batuan (kiri) dan foliasi (kanan).

Proses ekspansi panas yang lain dapat terjadi di daerah gurun atau hutan savana oleh perubahan suhu antara siang dan malam yang sangat tinggi. Hal itu menyebabkan batuan menjadi sangat kering, lalu mengkerut. Angin yang sangat kencang memicu bebatuan yang mengkerut terurai sehingga menjadi pasir lepas yang selanjutnya ditiup angin. Proses ekspansi panas ini dicirikan oleh:

- a) Suhu udara rata-rata dapat mencapai 50°C pada daerah gurun pasir
- b) Suhu permukaan dapat mencapai 80°C pada siang hari dan secara tiba-tiba turun menjadi -5°C pada malam hari.
- c) Kondisi tersebut juga diimbangi oleh kecepatan angin yang mencapai 110 km/jam sehingga penguapan menjadi sangat tinggi dan tingkat kelembaban menjadi sangat rendah, akibatnya bebatuan mengalami retak-retak dan langsung lepas lalu ditiup angin.

Contoh profil tanah yang dihasilkan oleh proses ekspansi panas tersebut adalah pada proses pembentukan tanah di daerah beriklim kering di daerah gurun (Gambar 4.3). Contoh wilayah dengan ekspansi panas yang tinggi di Indonesia adalah Flores dan Kupang di Nusa Tenggara Timur, contoh di dunia adalah Jazirah Arab, Tibet dan Australia Utara.



Gambar 4.3. Profil tanah secara umum yang dihasilkan oleh proses penguapan di daerah beriklim kering (gurun)

2) Unloading; yaitu proses pengembangan bagian terbesar dari permukaan tubuh batuan ketika daya ikat antar partikel dalam tubuh batuan terlepas akibat proses erosi (Gambar 4.4). Proses tersebut menyebabkan terjadinya pembebanan yang sangat besar di bawah permukaan pada kedalaman yang tinggi. Pelimpahan tekanan menyebabkan struktur batuan menjadi kendur dan terlepas yang selanjutnya mengembang.



Gambar 4.4. Proses disintegrasi *unloading* akibat pengembangan bagian luar suatu tubuh batuan (kiri) dan *unloading* yang diikuti pelepasan bagian luar tubuh batuan oleh perubahan panas yang sangat cepat (kanan)

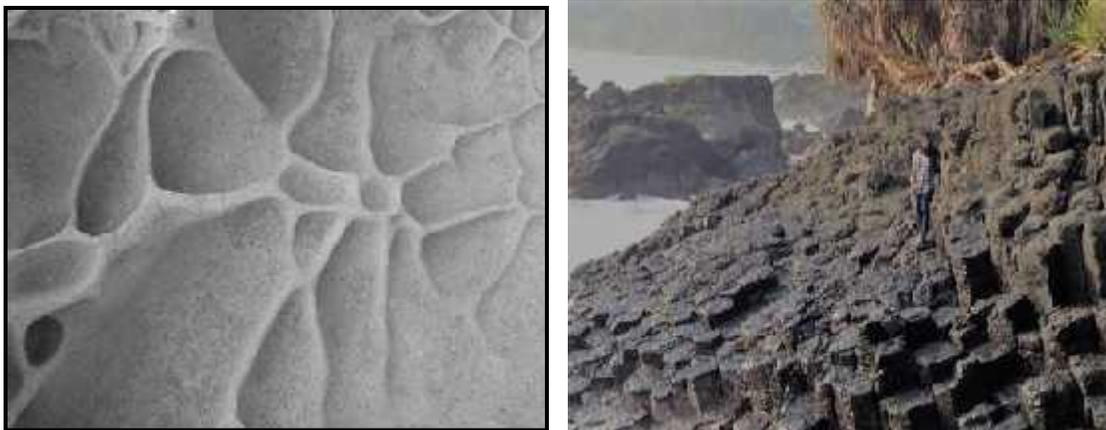
4. Pelapukan Garaman

Terjadi karena masuknya larutan garam dalam pori-pori batuan. Pelapukan garaman dapat menghasilkan bentang alam *tafoni*; lubang atau depressi yang terbentuk pada bagian kaki atau undak-undak batuan (Gambar 4.5). Sumber penggaraman: semprotan air laut, air laut, presipitasi hasil penguapan air laut, gas vulkanik, hasil pelapukan batuan, debu aeolian dan airtanah.



Gambar 4.5. Pelapukan garaman (abrasi airlaut) menghasilkan morfometri batuan *tafoni*, banyak dijumpai di daerah pantai, ct. Tanah Lot (Bali)

Erosi gelombang juga dapat menyebabkan proses pelapukan garaman, sehingga membentuk rongga-rongga seperti batu karang (Gambar 4.6). Proses pelapukan ini banyak dijumpai di sepanjang Pantai Baron, Kukup dan Krakal yang terjadi pada batugamping; di Wedi Ombo pada batuan beku dan breksi vulkanik (Tepus, Gunung Kidul); serta di Semanu pada tuf pumis. Dimensi rongga yang dibentuk oleh abrasi gelombang tersebut bervariasi, dan dapat mencapai lebih dari beberapa puluh centimeter hingga 1 meter.



Gambar 4.6. Proses pelapukan garaman oleh erosi gelombang air laut

5. Es / Salju

Air bertambah 9% dari volume awalnya sebagai akibat dari proses pembekuan, hal itu berlaku sebagai tegangan mekanika. Pada awalnya air membeku di atas

permukaan batuan, lalu menutup permukaan air di bawahnya. Kristal-kristal es akan segera membentuk butiran-butiran yang paling besar, hingga mengisi rekahan yang akan terangkat jika batuannya jenuh air, suhu menurun secara tiba-tiba hingga di bawah 0°C, suhu berfluktuatif dari membeku ke siklus es, yaitu mencair hingga membeku, dan es / salju yang masuk ke dalam rongga batuan akan melepaskan material yang terrekahkan tersebut dari tubuh batuan induknya.

6. Pelapukan Biotik

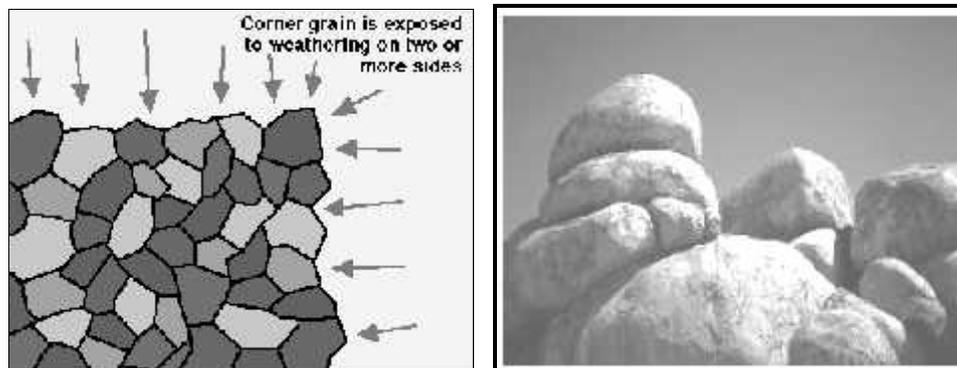
Pertumbuhan akar tanaman dapat membuka dan menguatkan tegangan dalam rekahan-rekahan batuan. Jejak-jejak binatang seperti cacing tanah, anai-anai (rayap) dan semut, tikus tanah, dan lain-lain, adukan sedimen dan tambahan gas (udara), serta aliran air membentuk bioturbasi.

7. Abrasi

Abrasi adalah proses pengelupasan bagian luar mineral / batuan sebagai dampak dari dikenai gaya / tegangan dari luar, dapat oleh angin, air dan gelombang. Dampak yang dihasilkan berupa emisi debu (abu) yang berlangsung di permukaan batuan; akibat proses pelapukan: pada permukaan batuan terdapat suatu kerak (lapisan tipis) lempung hasil pelapukan. Abrasi biasanya berlangsung pada daerah beriklim kering-semi-kering

8. Spheroidal Weathering

Proses disintegrasi ini hanya berlangsung pada batuan dengan struktur masif, tekstur dan komposisi batuan yang homogen, contohnya adalah batupasir masif dan batuan beku. Pada awalnya, permukaan batuan (fragmen batuan) umumnya berbentuk runcing (*cornering*), baik yang dibentuk secara primer maupun sekunder. Proses pelapukan menjadikan ujung-ujung keruncingannya tersebut mengalami pembulatan, yang dari waktu ke waktu makin membentuk morfometri yang menyerupai kulit bawang (Gambar 4.7).



Gambar 4.7. Proses pelapukan mengulit bawang (kanan) hingga membentuk permukaan butiran yang berbentuk membulat (kiri)

Partikel-partikel mineral pada bagian ujung runcing yang tersingkap mengalami pelapukan pada dua atau tiga sisinya; umumnya hanya pada partikel-partikel yang tersingkap yang terlapukkan

b. Dekomposisi (penguraian)

Dekomposisi adalah proses pelapukan yang dipengaruhi oleh adanya reaksi kimia yang merubah struktur batuan / mineral. Media pelapukan kimiawi yang paling efektif adalah air hujan, sebagaimana yang paling banyak berkembang di daerah beriklim tropis. Perubahan suhu pada siang hari dan malam hari menyebabkan batuan menjadi retak-retak. Retakan-retakan batuan tersebut selanjutnya terisi oleh air hujan yang sedikit bersifat asam, karena air hujan mengandung senyawa gas HCO_3 , CO_2 , SO_3 , NO_3 dan NH_3 . Pada kondisi ini terjadi proses penggantian kation dan anion batuan oleh senyawa gas yang terkandung dalam air hujan tersebut. Akibatnya, batuan menjadi terurai, dan pelapukan berlangsung. Sebagai contoh adalah reaksi air hujan pada batugamping, yaitu: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \Rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ (padatan) + 2CO_2 (gas)

Proses tersebut menyebabkan batuan menjadi terurai dan mengembang, menghasilkan batuan *rotten* (saprolit; Gambar 4.8)



Gambar 4.8. Proses pelapukan kimiawi pada batugamping membentuk stalaktit (atas) dan tanah saprolit (bawah)

(a) Oksidasi dan Reduksi

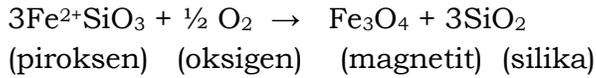
Oksidasi adalah hilangnya unsur elektron dalam suatu senyawa yang selanjutnya digantikan oleh ion oksigen. Proses oksidasi merupakan salah satu mekanisme pelapukan yang berlangsung di permukaan (di udara bebas). Lingkungan oksidasi tersebut dicirikan oleh:

- O_2 melimpah
- Berlangsung di atas muka airtanah
- *Rust production*

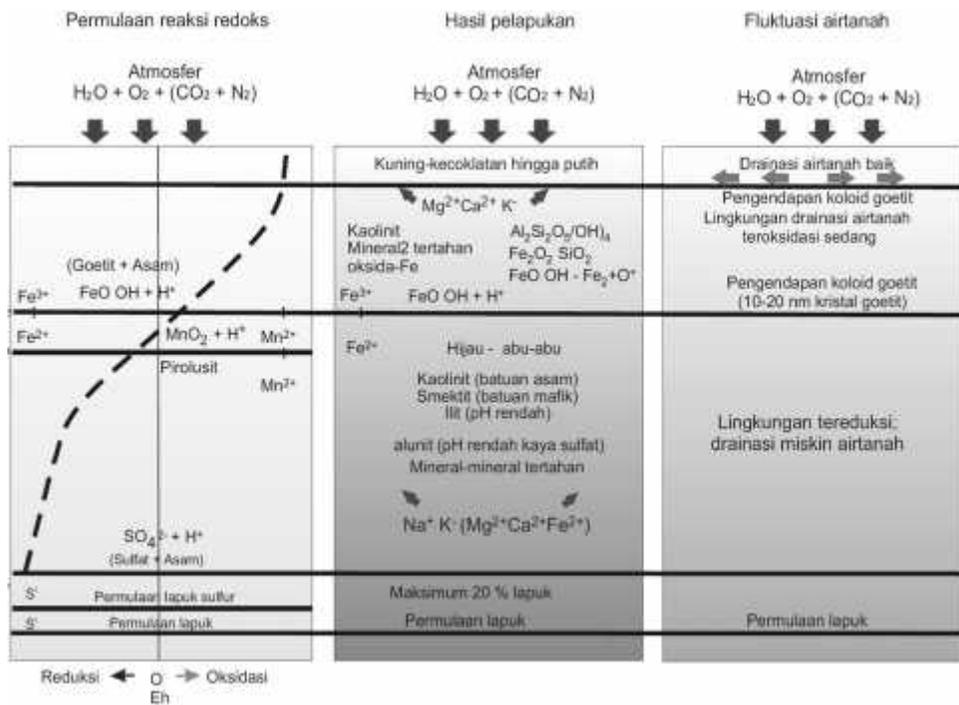
Reduksi adalah kebalikan dari oksidasi, yaitu proses penghilangan elektron oksigen dalam suatu senyawa yang selanjutnya digantikan oleh unsur lain. Proses reduksi ini dicirikan oleh:

- Berlangsung di bawah permukaan airtanah (tidak ada udara bebas)
- Adanya material organik

Oksidasi terjadi jika oksigen bereaksi dengan mineral kaya Fe. Fe memiliki dua valensi, yaitu Fe²⁺ dan Fe³⁺, dan yang umum dijumpai adalah Fe²⁺.



Proses pelapukan batuan kaya sulfida, sering membentuk lapisan logam berwarna kuning keemasan (karat besi) dalam tanah. Pembentukan karat besi ini terjadi secara bertingkat di awal reaksi redoks ketika fasa pelapukan Fe-Mg berlangsung. Proses tersebut terjadi pada kedalaman yang bervariasi, tergantung pada kondisi iklim dan kedalaman muka airtanah (Lawrence, 1999 vide Rutherford, 2003). Hasil pelapukannya berupa oksida amorf Fe yang terkonsentrasi sebagai semen *ferricrete* di bagian luar matriks dan Mn pada garis batas anomali drainasi yang terakumulasi di dekat permukaan (Gambar 4.9). Besarnya oksida yang diendapkan tergantung dari sistem hidrologi secara lokal, Eh dan pH profil lapuk, serta kondisi iklim yang berkembang.



Gambar 4.9. Reaksi redoks pada proses pelapukan di bawah permukaan tanah oleh airtanah (Lawrence, 1999 vide Rutherford, 2003)

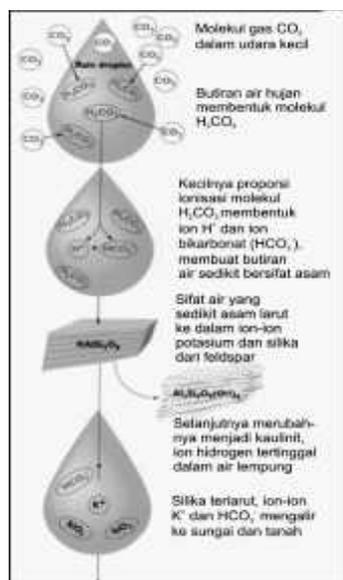
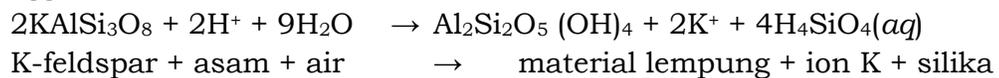
Pada perkembangannya, terdapat tiga tingkatan yang secara vertikal dijumpai gradual dalam zona tipis di atas batuan lapuk. Masing-masing tingkatan tersebut dicirikan oleh warna, tekstur, pH dan komposisinya. Tingkatan paling atas dicirikan oleh warna soil kuning-kecoklatan hingga putih terang, karena di dalamnya berlangsung proses drainasi air permukaan. Pada lapisan kedua adalah

lapisan warna kecoklatan hingga kemerahan yang bersifat sangat asam, karena mengandung mineral-mineral oksida-Fe yang tertahan. Di dalamnya terjadi proses pengendapan koloid goethit di bawah kontrol drainasi airtanah. Lapisan ketiga berwarna hijau hingga abu-abu, bersifat asam dengan pH sangat rendah, karena sangat kaya akan senyawa asam sulfat. Lapisan ini terletak pada lingkungan tereduksi dengan drainasi miskin airtanah. Di bawah lapisan ini proses pelapukan terjadi paling intensif; lapisan ini adalah permulaan dari pelapukan.

(b) Hidrolisis

Hidrolisi adalah proses reaksi antara unsur-unsur mineral dan ion hidrogen dalam ion air. Kation-kation logam terpisah dari strukturnya dan digantikan oleh H⁺; selama kebanyakan kation bersifat terlarut, maka pelarutan dan hidrolisis akan selalu saling berhubungan. Proses hidrolisis akan terus berlangsung selama jumlah H⁺ bebas terpenuhi, H⁺ mudah mengganti kation-kation yang ada dan terlarut, tidak membentuk kejenuhan. Proses hidrolisis tergantung pada kemenerusan suplai air tawar dan tingkat produktivitas asam organik di lingkungan itu. Ada 6 mekanisme hidrolisis, yaitu:

(1) Hidrolisis Feldspar; sering dijumpai pada mineral feldspar (Gambar 4.10). mekanisme pelapukan ini mirip dengan proses metamorfisme tingkat rendah, pada pembentukan mineral ilit dan kaulinit (kelompok mika). Mekanisme penggantian unsur-unsur kimia dalam tubuh batuan adalah:



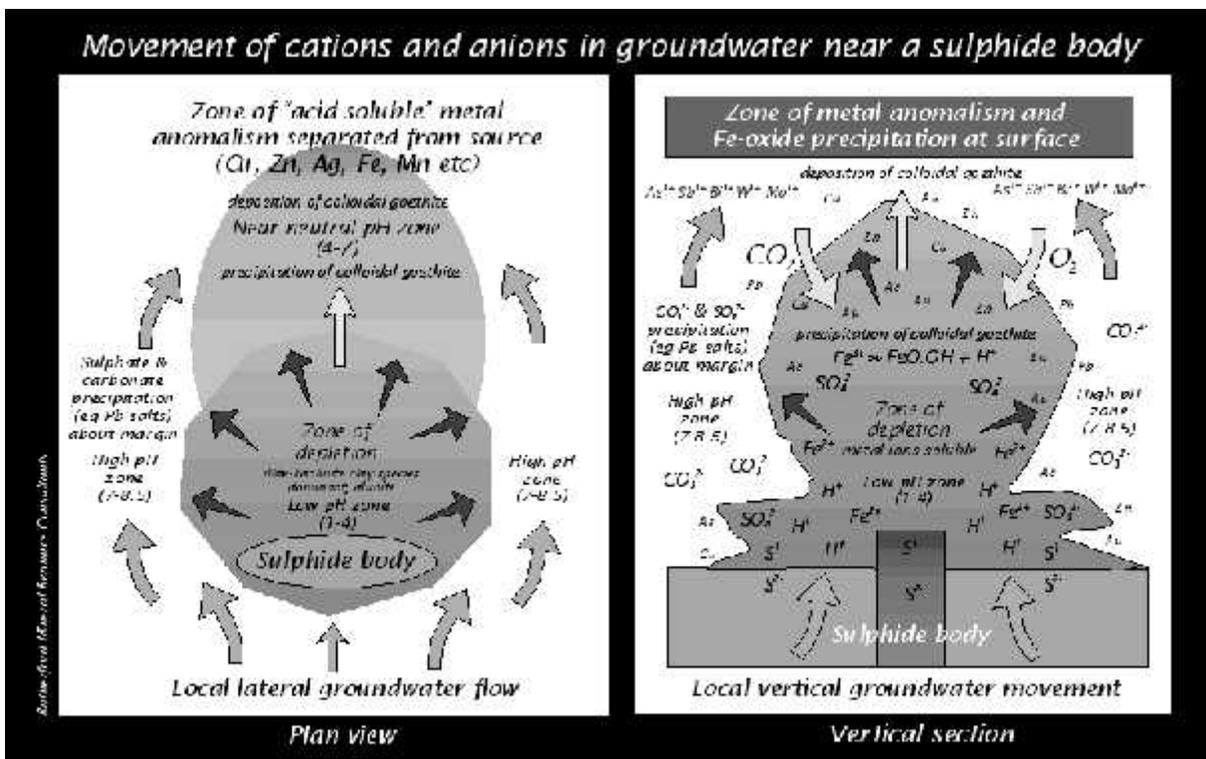
Gambar 4.10. Pengaruh hidrolisis pada proses pelapukan: pelepasan ion H⁺ menghasilkan ion-ion kalium.

(2) Penggantian Ion

Penggantian ion adalah substitusi ion-ion ke dalam suatu larutan yang diikat oleh butiran-butiran mineral itu sendiri (Gambar 4.11). Ion-ion diikat di permukaan butiran melalui muatan negatif (sifat menolak) partikel, dengan mekanisme:

- Adsorpsi, yaitu daya ikat ion-ion dalam menetralkan muatannya
- Substitusi isomorfik, yaitu penggantian ion oleh ion dengan ukuran yang sama di bagian permukaan butirannya, sebagai contoh adalah ion Al^{+3} yang menggantikan ion Si^{+4} pada proses pelapukan mineral silikat menjadi mineral lempung. Catatan: tidak semua ion dapat mengikat ion lain dengan daya serap yang sama.

$Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > Na^{+}$... dan seterusnya



Gambar 4.11. Proses pergerakan kation dan anion dalam airtanah (Lawrence, 1999 vide Rutherford, 2003).

(3) Pelarutan

Pelarutan adalah proses penghilangan mineral-mineral oleh air dengan cara melarutkan. Pelarut yang paling efisien adalah H_2O , karena:

- Dapat larut dalam batuan yang sangat keras sekalipun
- Mampu memindahkan mineral-mineral terlarut
- Dengan menambah unsur H^+ , menjaga material tetap terlarut.

Pencucian adalah berpindahnya air dan mineral terlarut melalui zona lapukan: yaitu dengan menggantinya dengan ion H⁺ yang baru.

(4) Karbonasi

Karbonasi adalah proses bercampurnya senyawa gas CO₂ + H₂O pada lapisan atmosfer, hingga terbentuk asam. Pada kondisi jenuh di udara, asam tersebut terpresipitasi hingga membentuk hujan asam.



Contoh karbonasi yang paling sempurna adalah dalam mekanisme hujan. Hujan adalah proses pengasaman secara alamiah yang membentuk asam karbonat. Karena air hujan tersebut bersifat asam maka jika mengisi rekahan / rongga dalam batuan, maka akan mampu melarutkan mineral-mineral yang terkandung di dalamnya.



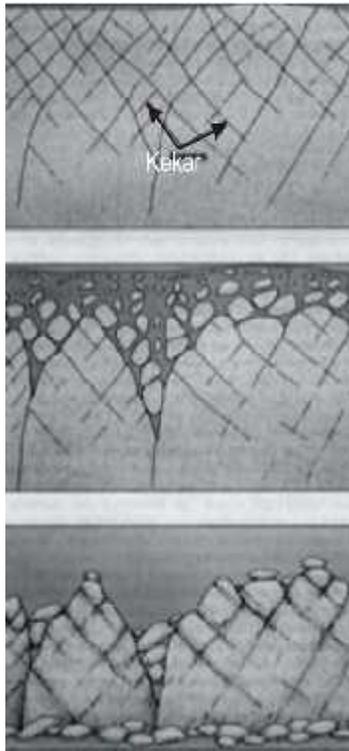
Asam karbonat yang masuk ke dalam rongga antar partikel dalam batugamping (kalsit), melarutkan batugamping; air hujan yang telah jatuh di atas tanah / batuan membentuk air larian, yang kemudian akan mencuci mineral-mineral tersebut

(5) Karst

Proses pelarutan oleh air permukaan (terutama air hujan) menyebabkan kalsium karbonat (CaCO₃) yang terkandung dalam batuan, yang berlangsung dari waktu ke waktu, dapat membentuk bentang alam yang spesifik (karsifikasi); contoh: Karst Pegunungan Selatan, Karst Gombong. Bentang alam karst ini di permukaan menghasilkan morfologi perbukitan kerucut berdiameter kecil (*conical hills*), secara lokal di dalamnya terdapat dolina, sinkhole, ovala dan polje. Sedangkan di bawah permukaan meninggalkan sisa-sisa endapan karbonat yang terakumulasi pada langit-langit sungai bawah tanah yang disebut stalaktit dan pada dasar lembah sungai bawah tanah yang disebut stalakmit.

(6) Arches

Yaitu kekar-kekar parallel yang terbentuk oleh tektonisme, pelapukan dan erosi es / salju (Gambar 4.12). Mencairnya es dapat menyebabkan batuan yang tersingkap di permukaan, masing-masing sisinya mengalami pengelupasan secara gradual membentuk *exfoliation arch*. Jika pembebanan es berlanjut, *exfoliation arch* tersebut tumbuh menjadi *natural arch*. Pelapukan menerus dapat membentuk lubang di dalam lengkungan (arch) tersebut yang selanjutnya tumbuh besar sehingga menjadi tidak stabil dan mudah runtuh.



a. Profil tanah yang dibentuk oleh erosi es / salju



b. Kenampakan dalam contoh batuan yang tererosi oleh media es / salju (Anonim)

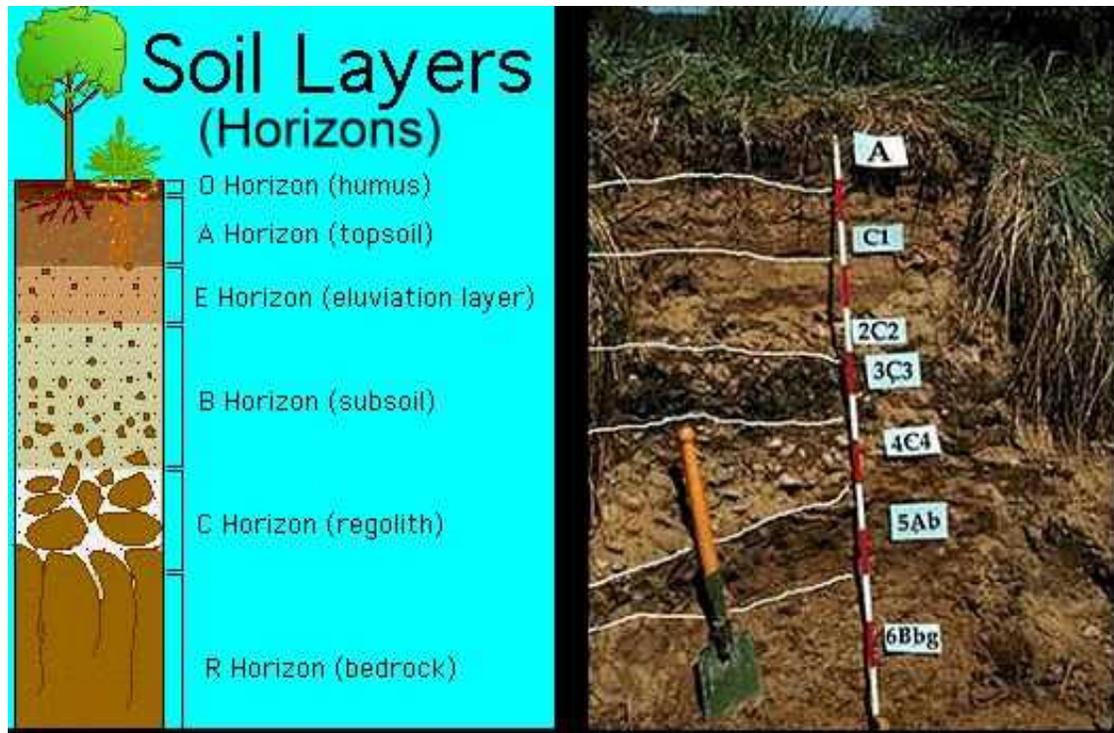


c. Kenampakan batuan sisa-sisa hasil erosi es/salju (foto: Anonim)

Gambar 4.12. Proses pelapukan dan pengelupasan oleh pada tubuh batuan sehingga membentuk morfologi busur (melengkung), yang jika erosi es menerus dapat membentuk lubang di dalam busur yang lama-lama dapat runtuh (sumber foto: Anonim,

4.2 Profil Tanah (*Soil*)

Proses pelapukan berpengaruh pada pembentukan tanah. Proses ini diawali dengan penghancuran tubuh batuan menjadi calon tanah yang disebut regolith. Jika proses pelapukan tersebut berlanjut, dan berkembang pada pembentukan horison tanah, maka yang berkembang selanjutnya adalah profil tanah (***soil profile***). Profil tanah adalah penampang secara vertikal dari horizon tanah. Profil tanah ini dikelompokkan menjadi horizon-horizon tanah berdasarkan atas ciri fisik dan komponen yang terkandung di dalamnya (Gambar IV.15). Horizon tanah adalah garis horizontal semu yang menghubungkan titik-titik dengan warna dan komponen fisik yang sama dalam lapisan tanah di permukaan. Horizon-horizon tersebut adalah horizon O (organik), A (topsoil), B (subsoil), C (batuan induk) dan R (*bedrock*).



Gambar 4.13. Tipe penampang vertikal tanah (profil tanah: Oberlander & Muller, 1987)

a. Horizon O

Horizon O terletak di permukaan tanah, penyusun utamanya adalah material organik, yang berasal dari sisa-sisa vegetasi yang masih segar, seperti dedaunan, cacing tanah, dan rumput-rumputan kering. Makin ke bawah secara vertikal, sisa-sisa organik tersebut dijumpai telah hancur menjadi humus oleh proses penguraian. Material organik yang telah terurai tersebut, atau humus, memperkaya soil dengan nutrien (seperti nitrogen, kalium, pospor, dan lain-lain), mendukung struktur tanah (penghubung antar partikel) dan menjaga agar soil tetap lembab.

b. Horizon A (zona *elluviation*)

Horizon A terletak di bawah horizon O. Horizon ini ditandai dengan adanya mineral soil, material organik yang terkandung di dalamnya bercampur dengan material lapuk yang tak-organik. Horizon ini dicirikan oleh warnanya yang gelap oleh kandungan organik di dalamnya, terjadi proses *elluviation*, yaitu pencucian material organik dan anorganik yang disebabkan oleh pergerakan air tanah.

c. Horizon E

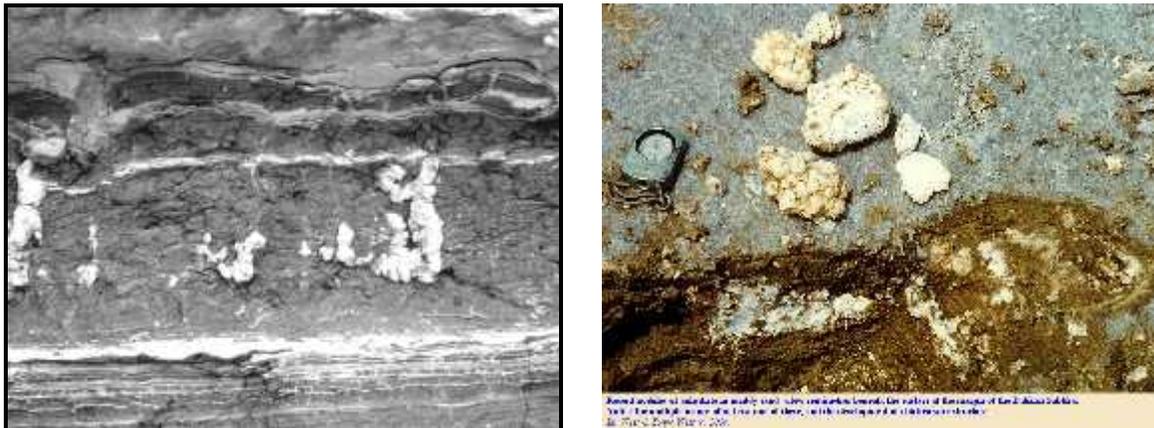
Horizon ini dicirikan oleh warnanya yang terang dengan didominasi oleh proses *elluviation*. Proses-proses yang berlangsung adalah pencucian, atau pergerakan partikel lempung, material organik, dan / atau oksida besi dan alluminium. Pada

lingkungan hutan *coniferous* (paku-pakuan), horizon ini umumnya berabu dengan konsentrasi kuarsa tinggi, sehingga warnanya keabu-abuan.

d. Horizon B

Horizon B terletak di bawah horizon E, disebut juga zona *illuviation*, yaitu zona akumulasi material hasil pencucian, dan dicirikan oleh lapisannya padat. Pada beberapa jenis soil, horizon B sering mengalami pengayaan CaCO_3 dalam bentuk nodul-nodul atau perlapisan (Gambar IV.16). Nodul atau lapisan CaCO_3 tersebut terbentuk dari presipitasi material karbonat oleh proses pergerakan air tanah atau berasal dari gaya kapilaritas rongga antar butir tanah. Gambar IV.17 menggambarkan pengaruh iklim terhadap proses *eluviation* dan *illuviation* dalam tanah.

Proses *eluviation* sangat umum dijumpai pada iklim basah, ketika proses presipitasi berlangsung tanpa hambatan dan keberadaan air tanah dalam kondisi kesetimbangan. Lapisan illuvial ditemukan pada bagian bawah dari profil tanah. Namun pada daerah dengan iklim kering dan semi-kering, zona-zona illuvial ini ditemukan lebih dekat dengan permukaan, pada wilayah dengan proses presipitasi sangat rendah. Daya kapilaritas membawa kation-kation seperti kalsium dan natrium terlarut dalam air tanah, dan ikut terendapkan saat presipitasi dari air.



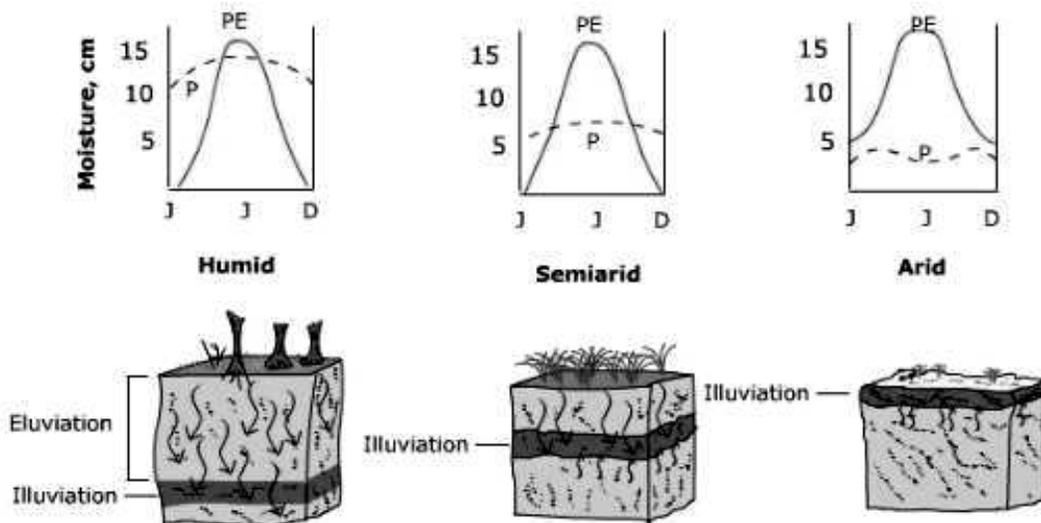
Gambar 4.14. Nodul-nodul caliche (kanan) dan lapisan kalsium karbonat (kiri) pada horizon B lapisan tanah lapukan batuan yang mengandung Ca tinggi seperti pada batuan beku basalt, gabro dan batugamping (Oberlander & Muller, 1987)

e. Horizon C

Horizon C berada di bawah horizon B, tersusun atas material induk soil, yang dapat terbentuk secara *in situ* (belum tertransport) maupun yang telah tertransport dari lokasi awalnya. Di bawah horizon C merupakan batuan dasar yang juga telah mengalami retak-retak (terdeformasi) baik oleh proses eksogen maupun endogen, atau oleh kedua-duanya.

e. Horizon R

Horizon R adalah horizon tanah yang sebenarnya telah tidak dijumpai soil lapukan. Pada lapisan ini sifat dasar litologi dapat diamati dengan baik, hanya saja telah mengalami deformasi, baik secara teratur (tektonik) maupun tidak teratur (eksogenik). Tebal horizon R bervariasi tergantung dari tingkat resistensi batuan. Batuan beku intrusi dapat mencapai ketebalan horizon R hingga 4-5 m atau lebih; sedangkan horizon R pada batupasir hanya mencapai kurang dari 2 m.



Gambar 4.15. Eluviation dan illuviation pada wilayah dengan iklim basah, semi-kering dan kering (Marsh, 1987)

Tidak semua profil tanah memiliki seluruh runtunan horizon dengan ciri-ciri yang sama; tergantung dari ketebalan, komposisi dan tekstur batuan. Soil "immature" hanya memiliki horizon O-A-C; soil "mature" memiliki semua horizon. Struktur dan komposisi kimia tanah tergantung pada faktor-faktor yang mempengaruhi proses pelapukannya, seperti material induk, iklim, vegetasi, topografi, waktu dan campur tangan manusia

4.3 Tanah dan Peranannya dalam Geologi Lingkungan

Suatu wilayah yang terletak di lingkungan bermorfologi perbukitan-pegunungan (tinggian), tentu sangat berbeda tingkat pelapukan dan kondisi tanahnya dibandingkan dengan wilayah bermorfologi rendah (dataran hingga lembah). Wilayah-wilayah tersebut selalu diikuti dengan perkembangan sejarah budaya, potensi budaya, kondisi sosial dan ekonomi dengan kearifan lokal yang berbeda, ada yang sebagai desa religi, ada yang sebagai kota administrasi, ada yang sebagai kota niaga dan industri, ada yang sebagai kota atau kawasan akademisi dan lain-lain. Hal itu tentu sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi, geografi dan sejarah kebencanaan yang tentunya

sangat berpengaruh pada perkembangan demografi dan geologi lingkungannya, yang meliputi daya dukung wilayah (sebagai potensi positif) dan kendala lingkungan (sebagai potensi negatif).

Keindahan bentang alam yang khas sebagai bagian dari kondisi geologi regional dengan faktor pengontrol pembentuk geomorfologi, adalah daya tarik tersendiri bagi suatu wilayah. Sebagai contoh adalah daerah yang dicirikan oleh topografi perbukitan berlereng miring dengan beda tinggi (relief) sedang hingga sangat curam dengan pola pengaliran subtrellis-subdendritik. Kondisi geomorfologi tersebut secara teoritis hanya dapat terbentuk oleh proses tektonisme aktif dan denudasi akibat kegiatan ekstraterestrial. Studi geologi sebagaimana yang telah dilaksanakan sebelumnya, menjumpai bahwa daerah tersebut adalah tubuh gunung api purba bawah laut. Tubuh gunung api purba ini telah mengalami pengangkatan secara berulang-ulang sejak pembentukannya hingga saat ini. Akibatnya, kondisinya telah terdeformasi lanjut dengan potensi gerakan massa yang rawan-sangat rawan. Tidak ayal, bahwa hal itu telah mengancam keberadaan potensi positif yang dimiliki oleh wilayah itu, atau bahkan kawasan-kawasan di sekitarnya. Untuk itu diperlukan penanganan yang cepat untuk mengurangi laju pergerakan sekaligus pemberdayaan potensi daerah tersebut. Sebagai bagian dari kondisi geologi gunung api purba bawah laut, daerah tersebut tentunya tersusun atas batuan-batuan gunung api yaitu intrusi, lava, breksi dan aglomerat yang berkomposisi andesit basaltis atau basalt andesitis, dan seterusnya. Secara umum batuan gunung api tersebut telah mengalami deformasi kuat, yaitu sesar (patahan) turun yang telah berevolusi menjadi sesar naik, kekar berpasangan dan tak berpasangan yang sebagian di antaranya juga telah berevolusi menjadi sesar naik, sesar oblik dan sesar turun. Jadi, adakah keberadaan kondisi geologi daerah tersebut dapat dinyatakan sebagai varian geologi yang layak untuk dilakukan perlindungan, sekaligus sebagai kawasan edukasi geologi gunung api purba yang berorientasi pada mineralisasi sumber daya geologi, dan seterusnya. Itulah peranan pelapukan dan proses geologi pembentuk morfologi dalam suatu daerah tersebut.

Hal yang diperlukan dalam suatu pengembangan geologi lingkungan terkait dengan kondisi geologi permukaannya (soil dan tingkat pelapukannya) adalah; masyarakat umum mengenal kawasan kita tersebut sebagai apa, sehingga layak mendapatkan predikat sebagai kawasan dengan warisan budaya, wisata, kawasan industri, niaga, pelajar (akademik) dan lain-lain. Secara regional dan dari hasil konfirmasi data geologi lapangan baik di permukaan maupun bawah permukaan, daerah ini berpotensi positif, tetapi juga terdapat potensi negatif, dengan data a, b, c, d, dan lain-lain. Pengamatan lapangan dan data geofisika menjumpai sesar-sesar berpotensi aktif. Hal itu terkait dengan pre-, syn dan post tektonisme pembentuk geomorfologinya yang masih berlangsung hingga kini. Taruhlah, terdapat data yang menjelaskan bahwa seluruh sesar tidak memungkinkan untuk dihentikan, tetapi dapat dimonitor dan diminimalkan pergerakannya. Jadi layaklah jika kawasan ini memang patut dilakukan perlindungan, apakah terhadap cagar budayanya, potensi

bencana geologi di dalamnya, sebagai kawasan dengan kondisi geologi yang spesifik, dan lain-lain. Jadi, konservasi dilakukan pada lahan berpotensi gerakan massa, lahan dengan pengendapan hasil gerakan massa dan cagar budaya yang berpotensi terancam gerakan massa.

Didasarkan pada data hasil kajian data sekunder, gravity dan data geologi lapangan, dan saat dilakukan pembobotan potensi daerah, nilai tertinggi adalah (1) kawasan berpotensi terlanda gerakan massa tanpa potensi gerakan, (2) kawasan dengan potensi gerakan massa berupa longsor, dan (3) kawasan dengan jatuhnya batuan, robohan batuan dan longsor adalah yang bernilai paling rendah.

Rencana pengelolaan daerah rawan bencana dilakukan melalui konservasi berbasis wisata. Konsep pengelolaan kawasan wisata adalah dari warga, untuk warga dan oleh warga. Artinya: diperlukan edukasi dan pendampingan secara menyeluruh terhadap kepentingan warga, baik yang berhubungan dengan pengelolaan konservasi geologi maupun pengelolaan daerah wisata yang dihasilkan. Bentuk konservasi meliputi pembuatan taman eduwisata, taman ekowisata, dan geoheritage.

A. Perencanaan Konservasi

Secara geomorfologi, komposisi litologi dan struktur geologi, suatu contoh daerah dicirikan oleh geomorfologi yang dibentuk oleh proses vulkanisme dan tektonisme, namun proses tektonisme lebih mendominasinya. Kontrol geomorfologi tersebut telah menyebabkan kawasan ini memiliki topografi dengan relief tinggi, beda tinggi sangat besar, dengan lereng curam hingga sangat curam. Tektonik yang berlangsung di kawasan ini dikategorikan aktif, artinya mengalami pergerakan secara kontinyu dan tidak dapat dilakukan penghentian permanen. Untuk itu, sebagai langkah perencanaan geokonservasi adalah melalui pelandaian (terasiring), pemasangan talud / tanggul penahan gerakan, dan *grouting* (penyuntikan beton).

a. Terasiring

Langkah konservasi yang paling sederhana dan paling murah adalah pembuatan terasiring (pelandaian; Gambar 4.16). Pelandaian ini dilakukan dengan melakukan penimbunan pada lahan yang rendah dan pengupasan pada lereng yang tinggi. Dalam melakukan terasiring, peta topografi yang biasa digunakan memiliki interval kontur 1 meter. Teknis terasiring dimulai dari tepi area yang paling dikenali, misalnya pada dinding / tubuh sungai, yaitu 5 meter paling bawah dilakukan pelandaian dengan penimbunan tanah hasil lapukan sehingga mendapatkan lahan yang rata selebar 5 meter, tanah yang digunakan untuk penimbunan diambil dari bagian di atasnya. Selanjutnya 5 meter di atasnya adalah lahan dibiarkan tetap miring sesuai dengan kondisi pada awalnya, namun slope secara keseluruhan telah berubah, sehingga $<20^\circ$, Bagian ini mungkin memiliki permukaan yang tidak tersusun oleh tanah lapukan, tetapi maerial horizon R.

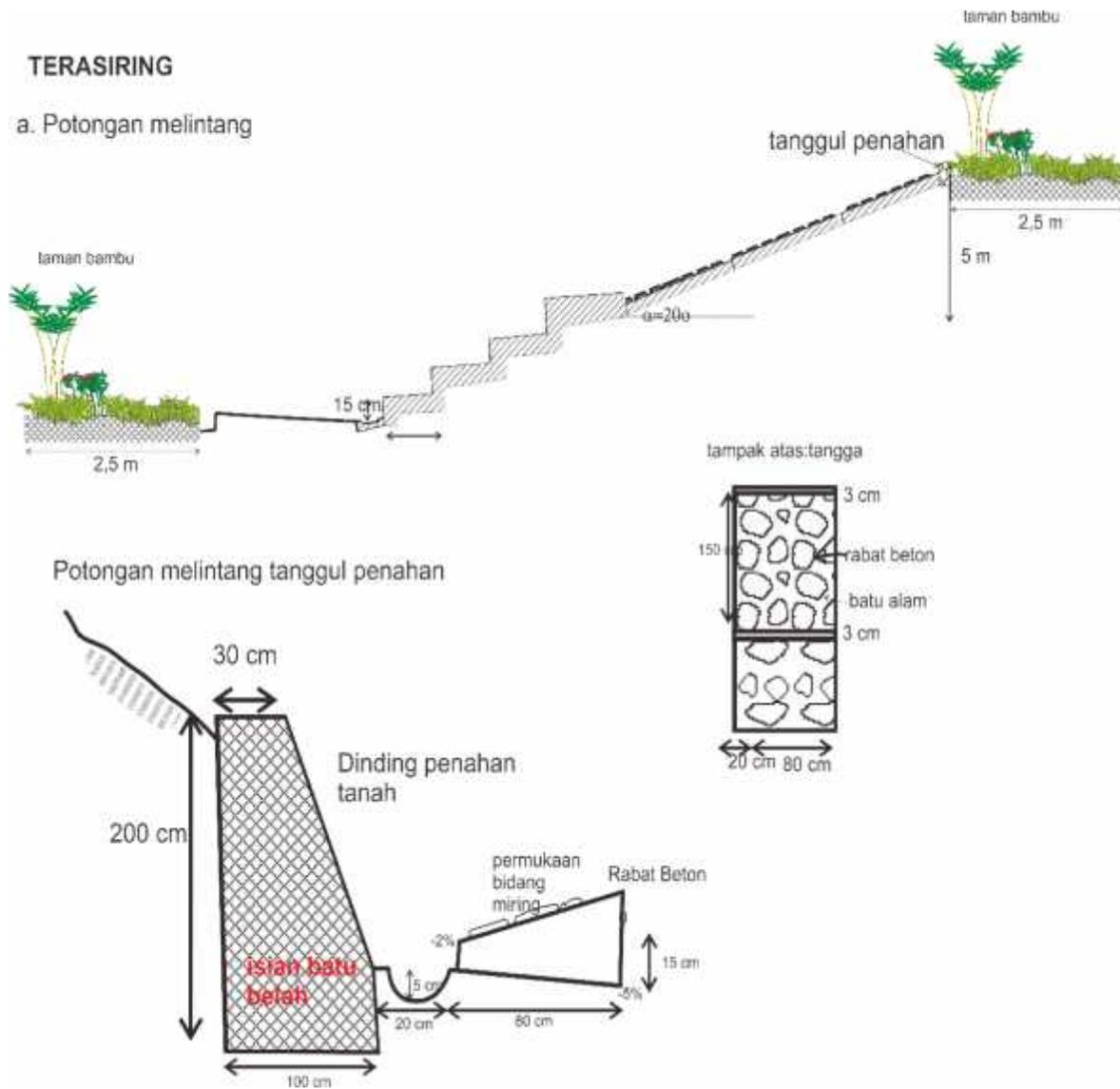
Setiap lahan tentunya juga memiliki vegetasi yang berragam, ada yang sebagai hutan jati, kebun karet, kebun kopi, hutan bambu, persawahan dan lain-lain. Sebagai contoh, jika pada lahan tersebut adalah kebun jati, maka pohon jati tetap dibiarkan hidup. Paling atas teras adalah pelandaian dengan penimbunan pada lahan yang rendah dan pengerukan lapisan tanah pada lahan yang tinggi, agar memiliki permukaan yang rata selebar 2,5 meter untuk dilakukan pengelolaan lereng, 2,5 meter berikutnya untuk kepentingan budidaya, yang dapat dimanfaatkan sebagai jalan penghubung antar desa (disebut sebagai koridor budaya). Atau jika memungkinkan dibuat taman bambu. Di atas lahan rata adalah lahan miring, dengan slope $\sim 35^\circ$; lebar lahan miring biasanya sekitar 1,5-2 m yang didalamnya bermorfologi berundak rapat; undak paling atas dapat dimanfaatkan sebagai jalan kampung selebar 3m. Di atas tangga adalah lahan miring, yang dibiarkan tetap miring dengan slope $\sim 20-30^\circ$; area ini jika masih berupa kebun jati maka tetap dibiarkan, namun pada area dengan zona sesar dan alur sungai, maka dibuatkan gorong-gorong untuk jalur air. Aliran air tersebut disalurkan untuk disirkulasikan dan diinfiltrasikan ke dalam tanah.

Manfaat pembuatan taman bambu pada kawasan terasiring adalah:

1. Penahan pergerakan; lahan dengan lapisan tanah tebal dan bermorfologi miring sedang (slope $35-40^\circ$) dilandaikan hingga memiliki kelerengan $20-30^\circ$. Pada lereng yang telah dilandaikan (didatarkan) tersebut ditanam pohon bambu. Akar bambu yang beserabut mengikat fragmen-fragmen batuan / tanah di permukaan pada lereng yang telah landai tersebut sehingga jika pun bergerak dapat ditahan secara perlahan oleh akar bambu,
2. Karena bambu ditanam dalam lahan yang telah dilandaikan; air larian (dari lokasi yang lebih tinggi) akan terakumulasi pada area landai ini, air larian akan ditangkap oleh daun, batang dan akar bambu, yang selanjutnya akan disimpan dalam batang pohon bambu yang masih muda. Pada musim kemarau, air dalam batang pohon bambu tersebut akan dikeluarkan oleh bambu untuk disimpan dalam tanah, sebagai airtanah.
3. Batang bambu kuning memiliki kecenderungan berbatang lurus dan tegak, dengan kondisi yang sangat rapi. Jika kawasan tersebut bergerak, maka batang bambu akan melengkung dan miring dengan penyebaran yang tidak beraturan, maka dapat diinterpretasi bahwa miringnya, melengkungnya dan ketidakberaturan pokok-pokok bambu tersebut dapat digunakan sebagai monitoring
4. Batang bambu yang telah tidak mampu lagi menahan air pada batangnya (sudah tua), dapat dipanen untuk dipotong dan dibuat kerajinan.

TERASIRING

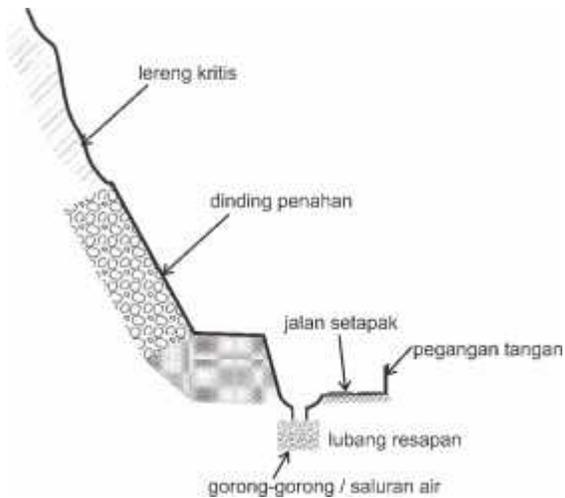
a. Potongan melintang



Gambar 4.16 Perencanaan terasiring sebagai bagian dari konservasi geologi

b. Talud/Tanggul Penahan Gerakan

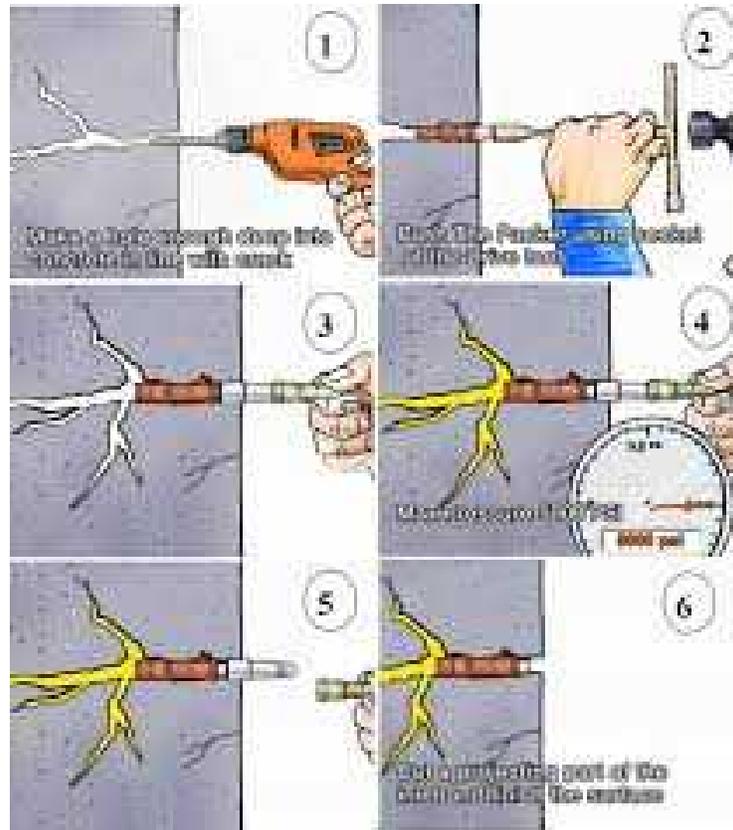
Perencanaan geokonservasi pembuatan tanggul penahan gerakan dilakukan pada lereng dengan alur-alur aktif, dengan lapisan tanah tipis, oleh proses denudasi. Kawasan ini memiliki kelerengan yang cukup tinggi, yaitu dengan slope $>40^\circ$. Fungsi talud / tanggul adalah untuk mengurangi laju erosi vertikal, sehingga diperlukan saluran air (gorong-gorong) yang berfungsi untuk sirkulasi air permukaan. Di sekitar talud ditanam pepohonan bambu kuning, yang fungsinya untuk mengurangi laju gerakan dan torehan.



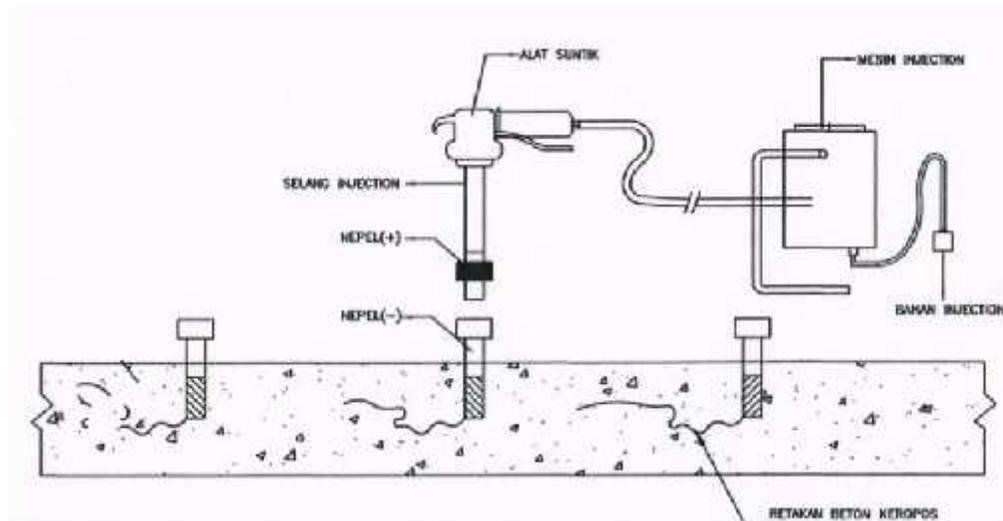
Gambar 4.17 Talud penahan gerakan pada lereng curam

c. Grouting (suntikan Beton)

Grouting dilakukan pada lereng-lereng yang dilalui sesar aktif, utamanya yang memiliki kelerengan $>60^\circ$, yang tidak dapat dilakukan pelandaian terasiring maupun tidak dimungkinkan dilakukan pengurangan laju gerakan. Grouting disertai juga dengan pemasangan talud / tanggul atau bronjong. Hal itu diperlukan kajian lebih lanjut melalui analisis geologi bawah permukaan (metode geolistrik dan mikroseismik). Dalam tahap ini belum ditentukan titik-titik lokasi perakuan grouting. Grouting adalah sebuah pekerjaan untuk mengisi celah atau rongga dalam sebuah struktur. Material yang digunakan untuk pekerjaan ini harus tidak memiliki sifat susut dan bahkan cenderung memiliki karakteristik expand / mengembang dalam skala kecil biasanya antara 0,5 % s/d 1,5 %. Jenis material grouting untuk kegiatan ini adalah *Cementious Grout* atau material grouting berbahan dasar semen jenis “extra ordinary”, atau beton mutu tinggi atau beton cepat setting. Untuk suntikan semen yang berada di bawah muka airtanah, maka dipakai beton untuk bawah air. Pemilihan bahan sangatlah penting dalam pelaksanaan pekerjaan grouting ini, dan pemilihan bahan tersebut diperhitungkan berdasar pada fungsi dan kondisi bidang kerja serta lokasi. Untuk itulah diperlukan kajian lebih lanjut. Pengerjaan suntikan semen ada dua mekanisme, yaitu miring (Gambar 4.18) dan vertikal (Gambar 4.19). Suntikan lateral ditujukan untuk lereng sangat curam yang gerakannya secara vertikal, seperti pada sesar mendatar dan kekar tarik.



Gambar 4.18 Suntikan semen (grouting) pada bidang miring, biasanya untuk penyuntikan dengan bidang terdeformasi miring, seperti pada sesar turun dan sesar naik, serta pada bidang-bidang kekar besar yang sebagian tubuh kekar tersebut membuka dan relatif bergerak.



Gambar 4.19 Suntikan semen pada bidang datar, utamanya dilakukan pada bidang deformasi vertikal, contoh pada sear mendatar dan kekar vertikal (dengan gaya ekstensif)

B. Perencanaan Geowisata

Pemanfaatan lahan hasil pelapukan tanah permukaan adalah dalam pengembangan geowisata, yang saat ini sedang mendapatkan perhatian khusus tidak hanya dari masyarakat namun juga dari pemerintah dan dunia. Telah disebutkan di atas bahwa perencanaan konservasi geologi dalam rangka perlindungan aset-aset daerah dapat dilakukan dengan dikemas sebagai kawasan pariwisata. Ada dua tujuan wisata di sini, yaitu wisata edukasi dan wisata keluarga. Dalam aplikasi geokonservasi berbasis wisata, pembobotannya ditentukan dengan didasarkan pada nilai keilmuan yang disajikan di dalamnya, serta potensi bencana yang mengancamnya.

Contoh konkrit adalah daerah Giriloyo; seluruh kawasan ini memiliki kelayakan sebagai lapangan edukasi bagi pembelajaran geologi, meliputi geologi struktur, stratigrafi batuan gunung api, petrologi batuan gunung api, vulkanologi dan tektonika. Kawasan edukasi tersebut meliputi Dusun Giriloyo secara keseluruhan hingga Bukit Makbul dan Dusun Cengkehan secara keseluruhan hingga Mangunan. Di masa yang akan datang, kawasan edukasi geologi ini akan dikembangkan hingga Dusun Pucung-Dengkeng (Wukirsari) melalui Bukit Makbul ke arah utara-timurlaut, dan hingga Mangunan-Selopamiro ke arah selatan-tenggara. Didasarkan pada pembobotannya, jalur lintasan wisata tersebut memiliki 4 macam jalan setapak yang dikembangkan, yaitu jalan datar (dengan slope $\sim 2-5^\circ$), jalan setapak dengan kemiringan rendah (slope $5-10^\circ$), jalan berundak renggang (slope $\sim 20-30^\circ$) dan jalan berundak rapat dan berkelerengan tinggi (slope $>30^\circ$). Beberapa jalur juga dihubungkan dengan jembatan penghubung untuk mempersingkat waktu tempuh.

Singkapan-singkapan batuan yang dilalui oleh jalur-jalur lintasan ini akan dilindungi dengan menggunakan siraman resin tak berwarna, untuk menghindari dari tumbuhnya lumur dan rerumputan, serta untuk mengurangi laju pelapukan. Pada area singkapan batuan bernilai edukasi tinggi dilengkapi dengan bangunan gazebo. Geowisata ini direncanakan menggunakan sistem klastering, sehingga penyajiannya akan dilengkapi dengan tahapan-tahapan sejarah geologi pembentuk gunung api, dimulai dengan pembentukan cekungan geologi pada lingkungan laut dalam pada geologi gunung api sebelumnya, pembengunan kerucut gunung api, pertumbuhan kerucut gunung api hingga pengangkatan pegunungan yang menyebabkan kawasan ini berada dalam lingkungan daratan.

AIR DAN SISTEM HIDROLOGI

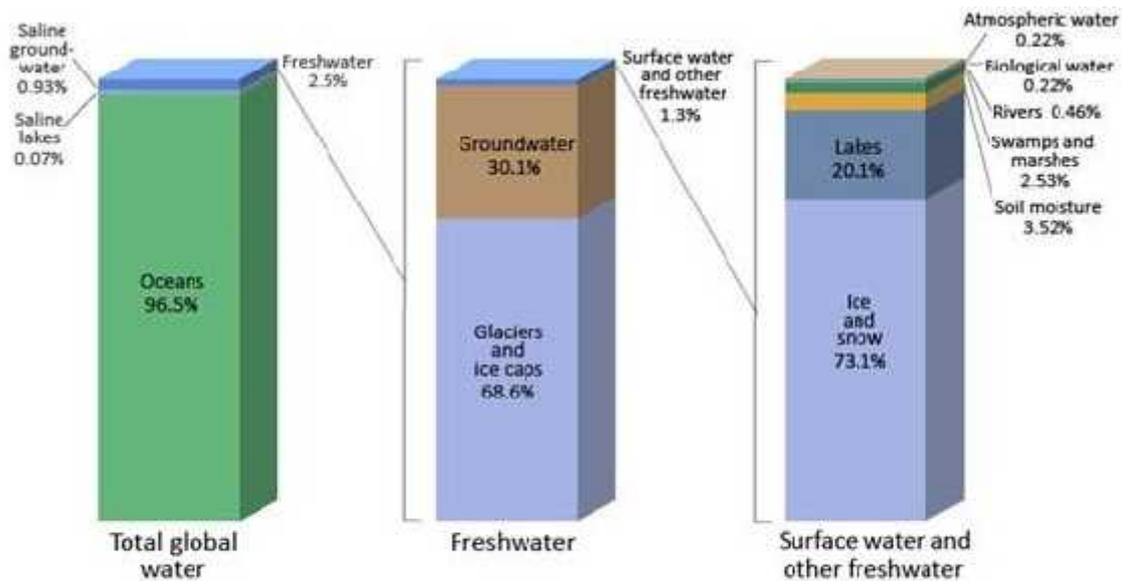
Air sangat melimpah dijumpai di bumi. Hampir 70% permukaannya tertutup oleh air, terdiri dari air laut, air danau, air sungai, mataair dan uap air. Air juga menyusun hampir 60% kerak bumi, dalam bentuk uap air dan airtanah sebagai air meteorik, air konat dan air juvenil. Air-air tersebut mengisi rongga-rongga antar butir dan rekahan-rekahan dalam batuan penyusun kerak bumi.

Air merupakan salah satu komponen kehidupan yang sangat penting, baik untuk memenuhi kebutuhan pangan (memasak, minum dan makan), sandang (mencuci), perumahan, pertanian (irigasi), religius, adat-istiadat, pekerjaan umum (pengadaan sarana dan prasarana), industri dan sebagainya. Di laut, sungai-sungai besar dan danau; air juga menjadi sarana transportasi yang baik. Dalam volume yang besar dan arus yang memadai, air juga dapat dimanfaatkan sebagai energi penggerak turbin untuk pembangkit tenaga listrik.

Air yang dibahas dalam Bab 5 ini adalah air yang berfungsi sebagai sumber daya alam yang dapat mendukung proses interaksi antara manusia dan alam. Melalui pengelolaan yang benar dan tepat sasaran, limbah air dapat dimaksimalkan pemanfaatannya.

5.1 Bentuk Air di Alam

Dari sekian jumlah air yang terdapat di alam, $\pm 0,3\%$ di antaranya dikonsumsi atau dimanfaatkan sebagai air bersih (Tabel 5.1). Sisanya dimanfaatkan manusia untuk menjaga kesetimbangan alam, media olah raga, transportasi, dan lain-lain. Di alam, air-air tersebut dapat dijumpai dalam bentuk air tawar (*fresh water*), air laut (*sea water*), es/salju, uap air, air formasi dan lain-lain. Ke semua jenis air tersebut menempati lingkungannya masing-masing sesuai dengan fungsinya (Gambar 5.1). Air laut berfungsi selain untuk menjaga kesetimbangan alam, juga untuk transportasi, perladangan (ketersediaan sumber daya laut: ikan, rumput laut, garam dan lain-lain) dan olahraga. Es / salju selain juga berfungsi untuk menjaga kesetimbangan iklim di alam, salju juga merupakan media alam yang dapat melindungi tanaman gandum dari serpihan embun es yang dapat membekukannya. Air permukaan, seperti air danau dan air sungai adalah 2 jenis sumber air bersih di sekitar kita yang selama ini paling banyak dimanfaatkan. Air tawar dalam bentuk airtanah, secara keterdapatannya di alam, selalu berada di atas tubuh airlaut, dengan bidang batas (interface) yang selalu ditentukan sebagaimana digambarkan dalam Gambar 5.2 di bawah. Sering kita mendengar adanya istilah intrusi airlaut, peristiwa itu dipicu oleh pemompaan airtanah secara besar-besaran di wilayah perkotaan padat, yang kebutuhan air bersihnya melampaui jumlah airtawar yang tersedia di bawah lapisan akifernya.

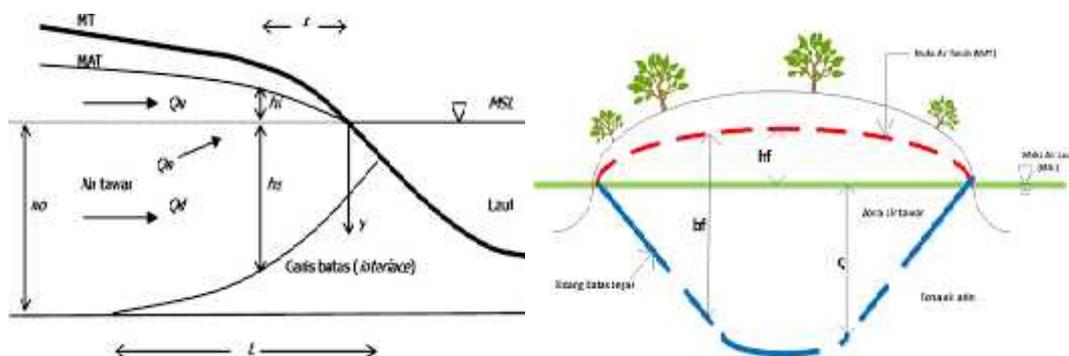


Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*.

Gambar 5.1 Keterdapatn air di alam; dalam bentuk air laut (terbanyak) dan air tawar, yang selanjutnya dapat dikelompokkan ke dalam berbagai macam yang lain

Tabel 5.1 Sumber air dan volumenya (sumber: Anonim (USGS), 1984)

Sumber air di permukaan	Volume air (juta km ³)	Total (%)
Air laut	1.230	97,2
Salju dan es	28,6	2,15
Airtanah	8,3	0,61
Air danau	0,123	0,009
Airlaut (inland)	0,104	0,008
Dalam uap tanah	0,067	0,005
Atmosfer	0,0127	0,001
Air sungai	0,0012	0,0001
Total:	1.360	100



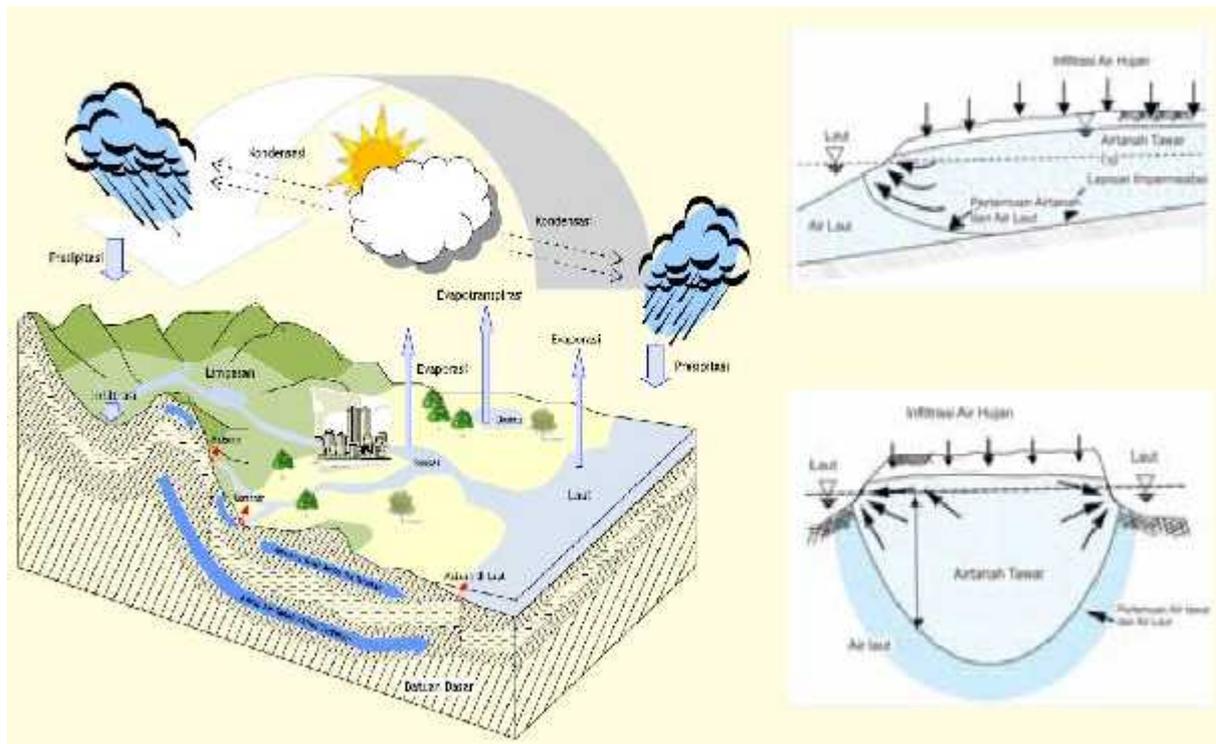
Gambar 5.2 Interface (batas) antara airlaut dan airtawar (Utomo, 2011)

5.2 Konsep Umum Hidrogeologi dan Geohidrologi

Keterdapatannya air selalu mengikuti konsep geohidrologi dan hidrogeologinya. Konsep hidrogeologi adalah konsep material geologi yang dapat menyimpan airtanah di dalam batuan. Konsep geohidrologi adalah konsep sirkulasi air tanah dan air permukaan yang melalui media penyimpanan airtanah tersebut. Pada prinsipnya, air yang kita selalu jumpai di alam, baik sebagai air sungai, danau, air hujan dan lain-lain, telah mengalami siklus meteorik. Siklus meteorik berawal dari penguapan (precipitasi) dari seluruh jenis air di permukaan (air laut, danau, sungai, air pori dalam permukaan tanah, air hasil respirasi tumbuhan, hewan dan manusia, dan lain-lain); yang selanjutnya mengalami kondensasi di lapisan atmosfer (di udara), lalu jatuh di permukaan bumi membentuk hujan.

Sebagian air hujan menjadi air larian; ada yang masuk ke danau, sungai, kolam dan sebagian yang lain menuju ke laut; serta sebagian yang lain masuk ke bumi (berinfiltrasi) dan tersimpan di dalam akifer. Air yang telah bermuara di laut tersebut bersama-sama dengan air laut di dalam samudera, yang bermuara di danau, kolam-kolam, sungai dan bahkan mengisi rongga / pori-pori permukaan tanah, serta yang sebagian yang lain lagi digunakan oleh makhluk hidup untuk pertumbuhannya, selanjutnya terpanaskan oleh sinar matahari hingga teruapkan, terjadilah evaporasi. Uap air hasil evaporasi tersebut selanjutnya terbawa oleh angin, hingga di lapisan udara yang sangat dingin, sehingga terkondensasi membentuk titik-titik embun di udara. Titik-titik embun tersebut ada yang terbawa angin dan ada yang lalu dijatuhkan di permukaan bumi, menjadi hujan air, hujan es, dan salju. Lalu terjadilah siklus berikutnya lagi. Itulah yang disebut dengan siklus hidrologi. Siklus hidrologi berlangsung secara kontinu, periodik (mengikuti iklim yang berlaku) dan dalam dimensi tertentu tergantung dari kealamian daerahnya. Siklus hidrologi digambarkan dalam Gambar 5.3.

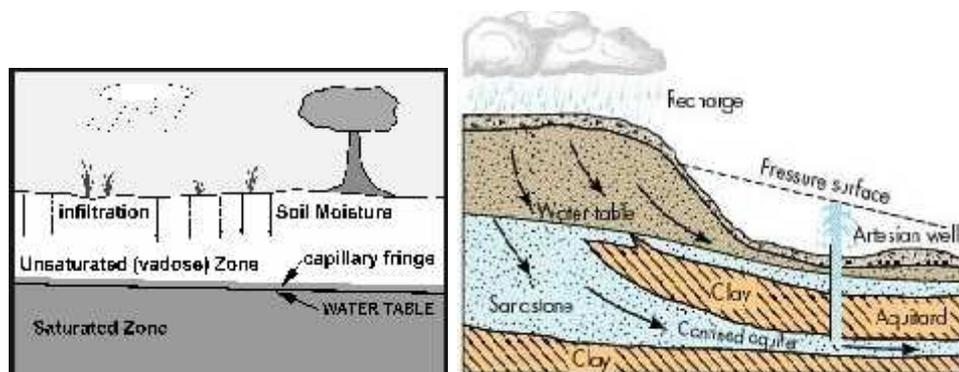
Di alam, secara umum siklus hidrologi memiliki manfaat bagi geologi lingkungan, yaitu sebagai sarana alam dalam menjaga kualitas air tetap baik, memastikan ketersediaan air tanah, menjamin distribusi air dapat selalu sesuai dengan kapasitas batuan dalam menyimpannya, dan menjamin keberlangsungan siklus alam (siklus batuan, siklus atmosferik, siklus hidrosferik, siklus biosferik, dan siklus litosferik) berjalan dengan setimbang. Siklus hidrologi yang tidak dapat berjalan dengan baik tentu memiliki konsekuensinya, yaitu (1) jika permukaan bumi (tanah) tidak lagi mampu memasukkan dan menyimpannya dengan baik, maka air akan cenderung menjadi air larian (karena tidak memiliki wadahnya), (2) jika wadah-wadah di permukaan bumi (danau, kolam, embung dan sungai) tidak lagi tersedia atau tersedia namun tidak sanggup menampung sesuai dengan jumlah air yang seharusnya ditampungnya, maka kembali air akan mencari celah yang mampu dilewati, dan (3) jika celah tersebut pun tidak lagi tersedia untuk dilewati, maka air akan membuat celah sendiri, sehingga dia dapat berlalu, bermuara dan berakumulasi.



Gambar 5.3 Siklus hidrologi dalam konsep geohidrologi (Anonim, 2011)

5.3 Air Tanah dan Sistem Akifer

Di alam, berdasarkan kedalam akifernya, airtanah dapat dibagi ke dalam 2 kelompok, yaitu air tanah dangkal (tersimpan dalam akifer bebas) dan air tanah dalam (tersimpan dalam akifer tertekan) (Gambar 5.4). Tubuh air tanah dangkal berhubungan dengan udara luar dan air permukaan, sehingga kedalamannya selalu berfluktuasi. Airtanah ini umumnya tersimpan dalam tanah (soil) atau dalam rongga batuan / celah-celah batuan yang terdeformasi. Secara vertikal air tanah dangkal dapat digambarkan dalam dua zona yaitu zona aerasi dan zona saturasi. Zona aerasi merupakan daerah air tanah yang mengandung sebagian air dan sebagian udara, sedangkan zona saturasi adalah bagian tanah atau batuan yang terisi penuh oleh air dibawah pengaruh tekanan hidrostatik.



Gambar 5.4 Muka airtanah (*water table* dengan *capillary fringe*) yang membatasi zona jenuh air (*saturated zone*) dan zona tak jenuh air (*unsaturated zone / vadose*) pada sistem airtanah (Keller, 2000).

Airtanah dalam terdapat dalam suatu formasi batuan yang berfungsi sebagai akifer dan tidak berhubungan langsung dengan permukaan bumi; memiliki posisi yang ideal, berada di antara, di bawah dan di atas batuan impermeable (kedap air). air berinfiltrasi melalui dua sistem, yaitu sistem tak-jenuh pada zona vadous dan sistem jenuh air. Hal itu dipengaruhi oleh kondisi geologi, hidrogeologi, dan gaya tektonik, serta struktur bumi yang membentuk cekungan air tanah tersebut. Air tersimpan dan mengalir pada lapisan batuan akifer.

Akifer terbentuk dan tersedia di alam mengikuti konsep geologi yang berlaku di dalamnya, meliputi petrologi, stratigrafi, struktur geologi, tatanan tektonik dan sejarah geologinya. Akifer sangat mudah terkontaminasi (terpolusi) oleh limbah rumah tangga, limbah industri, infiltrasi radioaktif, air asam akibat aktivitas gunung api dan lain-lain. Untuk dapat mengatur dan melindungi sumber airtanah, diperlukan pemahaman tentang proses-proses geohidrologi dan hidrogeologi yang berlangsung di dalamnya.

Sama halnya dengan airtanah dangkal, sumber dari airtanah dalam juga berasal dari proses infiltrasi dari siklus hidrologi, yang melalui zona *vadose* hingga menjangkau zona jenuh air. Di zona jenuh air, airtanah mengalir ke segala arah mengikuti perlapisan batuan akifer, geomorfologi dan sistem akifernya sendiri (tertekan atau tak-tertekan).

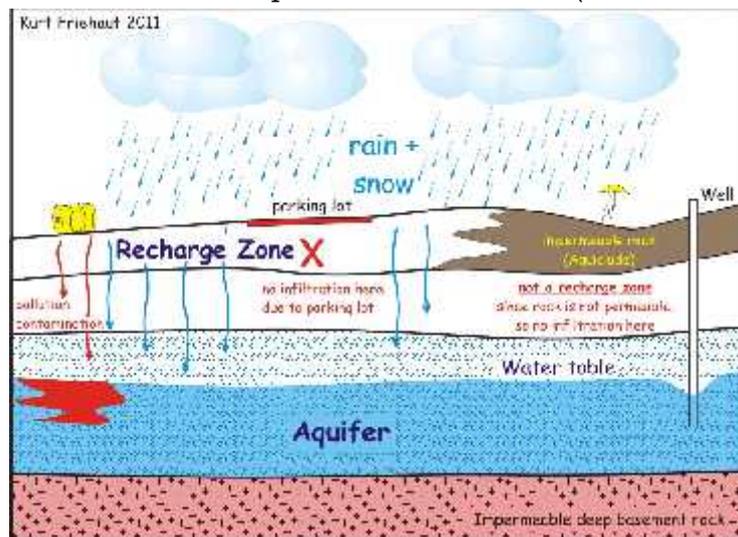
Dalam pengembangan geologi lingkungan, monitoring geologi bawah permukaan pada zona vadose digunakan untuk mengetahui posisi paling tepat lokasi pembuangan air limbah. Komponen utama yang digunakan dalam monitoring adalah nilai infiltrasi rata-rata dan volume airtanah (~ditentukan dari besarnya infiltrasi air hujan dan air permukaan lain ke dalam tanah). Infiltrasi rata-rata adalah fungsi dari tipe tanah, tipe batuan, air antiseden dan waktu. Volume air antiseden dipengaruhi oleh besarnya air yang masuk ke dalam rongga antar pori terhadap besarnya curah hujan. Zona vadose adalah semua material penyusun bumi yang berada di permukaan hingga pada zona jenuh air. Tebal zona vadose pada setiap wilayah bervariasi tergantung dari geomorfologinya; zona vadose pada wilayah perbukitan / pegunungan lebih tebal dibandingkan pada lembah atau dataran rendah. Bagian atas yang membatasi zona jenuh air disebut muka airtanah (*water table*). Muka airtanah adalah kedalaman (level) di mana terjadi peningkatan hidrostatis dalam tekanan airtanah. Jadi dapat artikan bahwa tekanan air meningkat hingga menyentuh permukaan air danau / air sungai pada permukaan lembah sungai di permukaan. Kedalaman muka airtanah pada masing-masing daerah pun bervariasi, sebagaimana tebal zona vadose. Tebal material yang menumpang langsung di atas muka airtanah disebut lapisan kapiler (*capillary fringe*).

Air mengalir dan mengisi akifer melalui muka airtanah dengan dikontrol oleh gaya kapiler tersebut. Makin tinggi kapilaritas material yang menumpang di atas muka airtanah, makin besar air permukaan yang berinfiltrasi hingga zona jenuh air tersebut. Sebaliknya, permukaan tanah yang kedap air, sebagaimana yang banyak dijumpai pada daerah urban oleh padatnya permukiman dan tertutupnya

permukaan tanah oleh semen dan aspal, tidak memungkinkan air meteorik (air hujan) menjangkau ke dalam zona vadose, sebaik apa pun batuan penyusun zona vadose tersebut. Komponen yang lain adalah zona saturasi (jenuh air) yang disebut juga sebagai zona freatik. Zona ini berada tepat di bawah muka airtanah. Zona freatik memiliki tekanan air yang sangat besar. Pada kondisi tertentu, zona freatik dapat membentuk pancaran air di permukaan, jika permukaan tanah yang berada di bawah garis freatik dilakukan penyuntikan atau penorehan hingga airtanah muncul ke permukaan.

Ada tiga jenis akifer, yaitu:

1. **Akifer tertekan**, memiliki penutup dan dialasi oleh batuan kedap air, yang disebut sebagai **aquitard** atau **aquiclude**. Lapisan tersebut berfungsi sebagai penahan agar air tidak mengalir, contoh aquitard adalah batuan beku, batuan metamorf, batulempung dan lanau, Terkadang lensa batuan tak-permeabel ditemukan di antara batuan yang lebih permeabel. Perkolasi air yang melalui zona tak-jenuh akan dapat dipotong oleh lapisan ini dan akan mengakumulasi bagian atasnya. Akifer tersebut disebut akifer menggantung (*perched aquifer*).
2. **Akifer tak-tertekan**, tidak memiliki lapisan kedap air secara vertikal, sehingga air dapat bermigrasi ke atas maupun ke bawah.
3. **Akifer artesis**, jika akifer tertekan berada di bawah tekanan hidrolika; saat dilakukan suntikan atau muncul dalam bentuk mata air, akan memancar. Tekanan air dalam akifer dibentuk oleh puncak hidrolika (h) yang sifat tertekannya berada di bawah kondisi tekanan permukaan. Artesis alami dapat terjadi jika akifer tertekan oleh lapisan kedap air yang jenuh air (aquiclude), di bawah permukaan tekanan pada morfologi yang miring. Sumur artesis dapat mengalir secara menerus, jika tekanan sumur terpenetrasi oleh lapisan lempung dan berada di bawah permukaan tekanan (Gambar 5.5).



Gambar 5.5 Sistem akifer (Friehouf, 2011)

Imbuhan dan Luahan

Luahan airtanah adalah semua proses yang berhubungan dengan pengambilan atau pemindahan air dari suatu sistem airtanah, sebagai contoh adalah mataair

alam dan sumur artifisial. Kita ketahui bersama bahwa airtanah memiliki persentase terbesar dalam kehidupan manusia, baik yang berhubungan langsung dengan pemanfaatannya maupun dalam imbuhan untuk aliran sungai. Sekitar 30% air sungai disuplai oleh airtanah melalui luahan dalam bentuk mataair. Hal itu dapat kita lihat pada tipe sungai efluen (Gambar 5.6), tipe sungai ini tetap mengalir pada musim kemarau, yang disebut sebagai aliran dasar. Pada musim kemarau, airtanah menurun drastis hingga aliran dasar, akibatnya pasokannya ke dalam sungai pun menyusut.

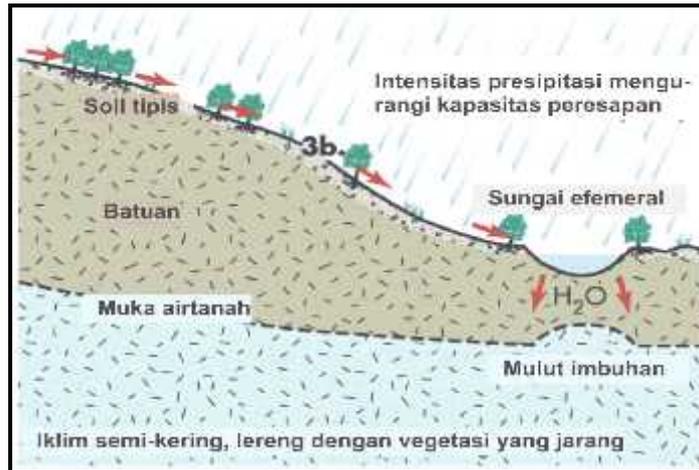


Gambar 5.6 Imbuhan dan luahan pada daerah beriklim basah (Keller, 2000). Lahan bergradien lereng tinggi yang tertutup vegetasi memungkinkan untuk terjadi resapan air ke dalam tanah, yang selanjutnya muncul mengisi sungai perennial (efluen).

Dalam sistem hidrogeologi, air selalu mengalami proses daur ulang yang disebut siklus hidrogeologi. Dalam siklus tersebut, air akan selalu melalui sistem akifer yang disebut sebagai proses imbuhan, yaitu penambahan air ke dalam zona akifer. Yang termasuk dalam proses imbuhan airtanah adalah presipitasi, aliran air sungai (permukaan), airan sungai bawah permukaan, rembesan (reservoir, danau dan *aquiducts*) dan oleh artifisial (penyuntikan sumur bor).

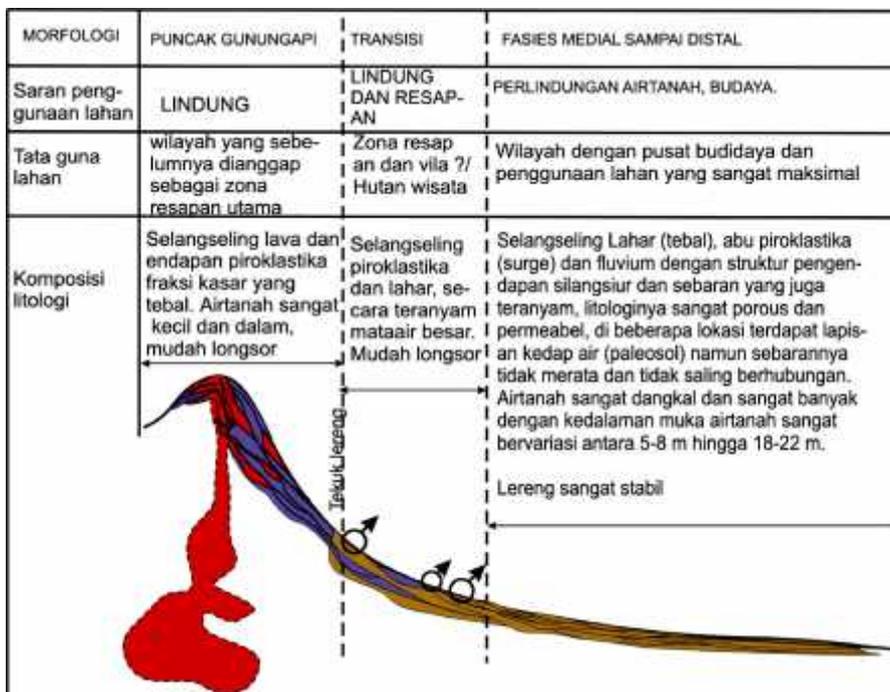
Beda halnya dengan tipe sungai influen. Wilayah ini sedikit sekali mengalami imbuhan di daerah hulu sehingga muka airtanahnya dalam. Sungai ini hanya mengalir pada musim hujan. Pasokan air ke dalam sungai berasal dari air hujan saja. Tipe sungai influen dicirikan oleh: lembah sungai lebih tinggi dari muka-airtanah sehingga air sungai meresap ke dalam tanah (Gambar 5.7).

Luahan air permukaan yang lain adalah mataair. Mataair keluar melalui zona tersaturasi yang terletak di bawah muka airtanah (*water table*). Jadi, mataair hanya akan keluar, pada daerah yang memiliki ketinggian permukaan tanah lebih rendah dari muka airtanah. Mataair biasanya muncul pada kaki-kaki gunung atau bukit dan lembah-lembah membentuk aliran sungai.



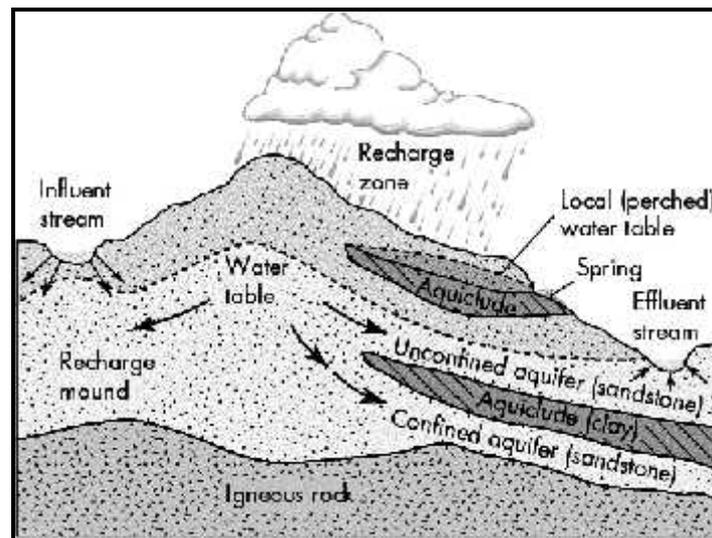
Gambar 5.7 Imbuhan dan luahan pada wilayah beriklim semi-kering (Keller, 2000). Lahan bergradien lereng tinggi dengan vegetasi jarang sehingga soilnya tipis dan berkembang sungai influen (efemeral).

Penjajaran mataair biasanya diinterpretasi sebagai zona patahan. Jalur patahan (sesar) tersebut memotong perlapisan batuan yang jenuh air, seperti batupasir. Selanjutnya mataair-mataair tersebut terakumulasi dalam lembah pada zona lemah tersebut, dan berkembang menjadi aliran sungai berpola trellis. Mataair juga sering muncul pada daerah-daerah ujung kipas aluvial, seperti pada fasies medial gunungapi, pada zona-zona tersebut berkembang proses pengendapan alur-alur teranyam, tersusun atas perlapisan lahar yang berporositas tinggi (Mulyaningsih, 2006; Gambar 5.8).



Gambar 5.8 Mataair sangat umum dijumpai pada lereng bawah-kaki gunungapi dan mengindikasikan adanya perubahan litologi dari dominan endapan piroklastika ke lahar (Mulyaningsih, 2006).

Imbuhan air berada pada zona yang lebih tinggi yaitu puncak gunung api. Karena wilayah di bawahnya, yaitu sekitar lereng atas hingga proksimal tersusun atas batuan-batuan piroklastika, yang banyak mengandung abu gunung api dan bersifat lebih impermeabel, maka airtanah muncul pada daerah-daerah tekuk lereng yang berbatasan dengannya. Karena daerah tekuk lereng tersusun atas endapan lahar, dengan tingkat porositas dan permeabilitas tinggi, maka airtanah terakumulasi di dalamnya. Makin ke bawah airtanah makin banyak. Secara umum, sistem airtanah tersebut dapat dijelaskan dalam Gambar 5.9.

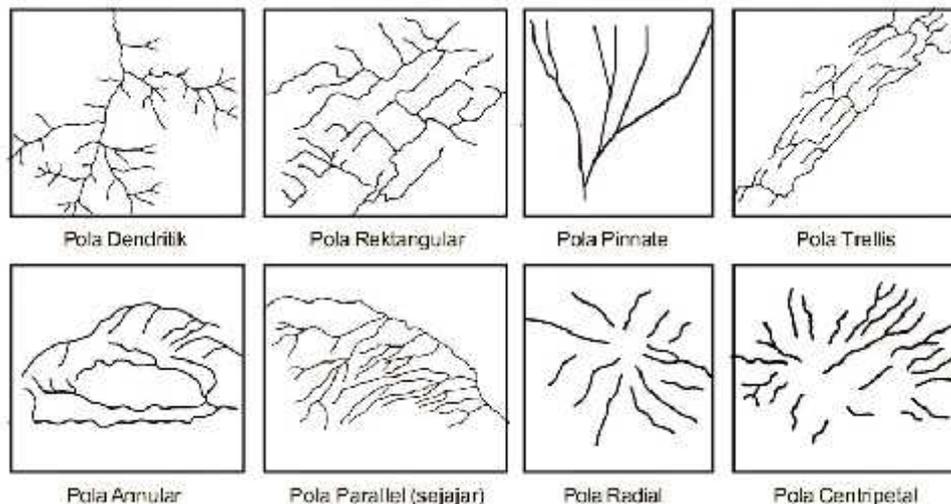


Gambar 5.9 Rangkuman sistem airtanah (Keller, 2000).

5.4 Permasalahan Air dalam Geologi Lingkungan

Telah dijelaskan dengan panjang lebar bahwa air dapat dijumpai sebagai air permukaan dan air bawah permukaan (airtanah). Di daerah-daerah beriklim tropis, yang tingkat pelapukannya tinggi dengan soil yang tebal, memiliki akumulasi air permukaan yang besar. Pada titik jenuh di permukaan, air tersebut akan berinfiltrasi ke dalam tanah membentuk airtanah, yang terjebak oleh suatu lapisan garis semu yang disebut garis *water table*.

Air larian memegang peranan penting dalam proses siklus hidrologi, tidak hanya mengisi danau, sungai dan airtanah, tetapi juga membentuk (mempengaruhi) proses geomorfologi (mampu mengerosi dan mengendapkan material sedimen). Faktor-faktor yang mempengaruhi proses larian air permukaan adalah kondisi geologi setempat, geomorfologi, iklim (presipitasi dan titik jenuh), tipe tanah / batuan, vegetasi dan waktu. Kondisi geologi tersebut adalah komposisi batuan, tipe dan sifat-sifat tanah, dan tingkat pelapukan. Material permukaan yang tingkat kelulusan airnya baik (sarang) potensi air lariannya lebih rendah, sehingga kerapatan pola alirannya juga lebih rendah. Batuan dengan tingkat kelulusan air rendah (tidak sarang) memiliki potensi larian lebih tinggi, sehingga membentuk pola pengaliran yang tingkat kerapatan lebih tinggi. Kerapatan pola pengaliran diukur dari panjang alur per unit area. Alur-alur dengan tingkat kerapatan lebih tinggi mengalirkan air di permukaan lebih banyak dari pada yang meresap ke dalam tanah (Gambar 5.10).



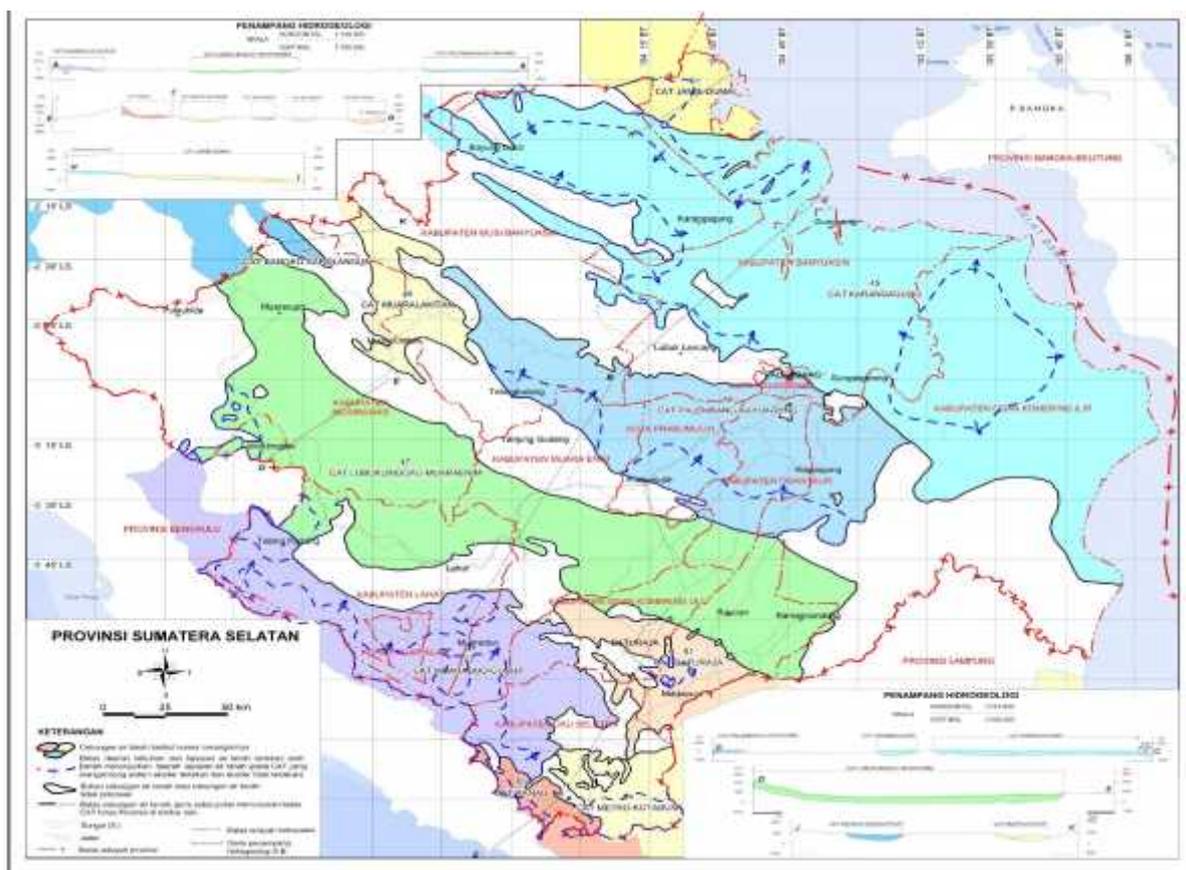
Gambar 5.10 Kerapatan pola pengaliran yang dikontrol oleh dua litologi yang berbeda, lempung lanauan dan material sarang (pola aliran sungai mengacu pada Howard, 1987).

Jika terjadi hujan yang berkepanjangan, atau gunung es yang mencair, maka air akan melimpah di mana-mana. Jika limpahan air tersebut berada di puncak gunung atau perbukitan, maka aliran air akan mencari daerah yang lebih rendah, jika belum ada, maka tubuh air akan membentuk alur-alur sungai dengan mengerosi bagian yang paling lemah. Masing-masing alur sungai dalam sistem geomorfologi yang sama selanjutnya berkumpul dalam satu muara di lereng yang lebih rendah dengan tubuh sub-anak sungai yang lebih besar. Selanjutnya, salah satu atau beberapa tubuh sub-anak sungai tersebut bersatu lagi dengan sub-anak sungai yang lain membentuk induk sungai. Salah satu induk sungai atau lebih bermuara di laut atau pada cekungan yang lebih rendah. Alur-alur sungai tersebut adalah bagian dari sistem pengaliran yang disebut sebagai dasar aliran sungai (DAS), yang prosesnya dikontrol oleh sistem cekungan pengaliran (*watershed*).

Banyak istilah yang digunakan dalam sistem pengaliran. European Union (1997) mengartikan *river basin* sebagai suatu wilayah (lahan) dengan air larian yang melalui alur, sungai, dan mungkin danau yang bermuara di laut, melalui mulut tunggal sungai, estuari atau delta. *Sub basin* berarti wilayah dengan aliran air (air larian) yang bermedia alur sungai dan danau yang berakhir pada suatu titik cekungan air. Webster (1976) mendefinisikan DAS sebagai wilayah dengan kelompok air yang dipisahkan oleh beberapa kelompok kondisi (yang dikelompokkan berdasarkan topografinya) dan mengalir dengan arah tertentu ke suatu alur (sungai) atau tubuh air. Jadi DAS adalah daerah yang dibatasi oleh pemisah topografis (punggung bukit), yang menampung, menyimpan dan mengalirkan air hujan yang jatuh di atasnya, ke sungai utama yang bermuara ke danau atau lautan, sebagai kumpulan dari banyak sub DAS yang lebih kecil, dengan bentuk dan ukuran yang berbeda (Anonim, 2007). Hewlett & Nutter (1969), berpendapat bahwa "*watershed*" sinonim dengan "*drainage basin*" dan "*catchment*" karena "*a drainage basin is a watershed that collects and discharges its surface streamflow through one outlet or mouth*", sedangkan "*a cathment is a small drainage*

basin, but no specific area limits area set". Dengan demikian sebuah system sungai dengan anak-anak sungainya, dapat dianggap sebagai sebuah kesatuan yaitu sistem DAS. Dalam suatu DAS memiliki kondisi lingkungan yang tertentu, dengan kondisi geologi juga tertentu, serta dikontrol oleh proses tektonisme dan proses geomorfologi yang tertentu pula. Itulah sebabnya, tidak semua daerah memiliki kondisi DAS yang sama.

Cekungan pengaliran dapat terdiri dari anak-anak sungai, dari dua atau lebih orde sungai. Setiap wilayah memiliki keluasan dan kedalaman cekungan pengaliran yang bervariasi. Cekungan-cekungan ini dapat saja diairi oleh satu atau lebih aliran sungai, yang terdiri atas banyak sistem sungai yang saling berhubungan. Cekungan pengaliran Muara Duo di Sumatera Selatan terdiri atas banyak cekungan, yang masing-masing cekungan tersebut ada yang saling berhubungan dan ada juga yang tidak saling berhubungan (Gambar 5.11), cekungan pengaliran yang sangat ekstensif, mencakup 670.807 km². Cekungan tersebut dialiri oleh suatu sistem sungai yang berasal dari wilayah Kecamatan Banyuasin Kayuagung dan Kayangagung yang melalui cekungan air Ramancondong, selanjutnya bermuara di Muara Duo di Kabupaten Lahat dan Oku Selatan.



Gambar 5.11 Cekungan pengaliran Muara Duo, Sumatera Selatan (sumber: DESDM Sumatera Selatan).

Diperlukan pengelolaan yang baik dan bijaksana terkait dengan cekungan pengaliran. Pengelolaan kawasan yang buruk dalam suatu wilayah (tata ruang dan tata guna lahan) dapat berdampak pada kegagalan cekungan pengaliran,

kegagalan cekungan pengaliran tersebut, biasanya ditandai dengan kejadian-kejadian bencana seperti banjir dan kekeringan, yang jika pengelolaan lingkungan tersebut telah disesuaikan dengan potensi daerah yang seharusnya, maka tidak akan terjadi. Di kemudian hari, masing-masing cekungan drainasi yang besar tersebut akan memiliki sistem pengaliran tersendiri.

Lautan, danau, sungai, dan tubuh perairan lainnya secara alami sebenarnya memiliki kemampuan untuk membersihkan segala macam kotoran / pencemaran sehingga tidak harus membahayakan makhluk hidup. Ketika setetes tinta hitam tidak sengaja masuk ke sungai, tinta itu akan dengan cepat hilang karena volume air sungai jauh lebih besar dari volume tinta. Namun, jika tinta itu selalu menetes ke sungai dengan kecepatan tetesan yang tetap dan kontinyu, maka lama kelamaan air sungai menjadi berubah warna, dari kekuningan, lalu abu-abu hingga hitam. Jika volume tinta terus bertambah segalon setiap hari, air akan semakin berubah warna dengan cepat. Jika tidak hanya tinta yang masuk ke sungai, ada luahan reaktan kimia di dalamnya yang tidak sengaja tercampur dalam air, lalu berreaksi dengan tinta dan air sungai, tentu akan lebih cepat berpengaruh pada kualitas air di dalamnya. Masalah ini tentunya sangat disadari dengan baik oleh pengelola, dan masyarakat pada umumnya. Namun terkadang keinginan untuk melakukan hal baik dan daya untuk menjalankannya sering tidak sejalan.

Hampir setiap aktivitas manusia dapat mempengaruhi kualitas lingkungan air. Permasalahan lingkungan yang diakibatkan oleh polutan yang masuk ke perairan, sebagian besar tidak bersumber dari area itu (Gambar 5.12a-b); 80 persen di antaranya berasal dari daratan. Hal yang sangat sederhana, saat petani membuah sawah, bahan kimia (baik pestisida, insektisida atau fungisidanya) yang mereka gunakan secara bertahap dicuci oleh hujan yang selanjutnya masuk ke air tanah atau air sungai di dekatnya. Perlakuan yang tepat dan penggunaan dalam jumlah secukupnya, tentu akan jauh lebih berdaya guna. Di alam, limbah tersebut akan dapat berdaya guna menjadi pupuk, dan dapat mengembalikan nutrisi penting, seperti nitrogen dan fosfor, yang dibutuhkan tanaman dan hewan yang hidup di lingkungan itu untuk pertumbuhan. Dikatakan limbah karena seringkali dilepaskan dalam jumlah yang lebih besar daripada yang dibutuhkan. Sebenarnya hal itu tidaklah menimbulkan masalah yang besar, karena sisa pupuk bisa jadi menambah nutrisi ke dalam tanah, yang mengalir ke sungai dan laut dan menambah efek pemupukan dari kotorannya. Namun di lain sisi, kombinasi antara limbah dan pupuk tersebut justru meningkatkan pertumbuhan alga dan plankton di lautan, danau, atau sungai; dikenal sebagai ganggang. Ganggang hijau dan ganggang biru sangat baik bagi lingkungan, namun ganggang merah berbahaya karena bisa merubah air menjadi merah. Air merah dapat menghilangkan oksigen dalam air dan membunuh segala bentuk kehidupan di dalamnya, membentuk zona mati. Teluk Meksiko memiliki salah satu zona mati paling spektakuler di dunia.

Mengacu hasil pendataan dari KEMENRISTEKDIKTI tahun 2016, secara nasional ketersediaan air permukaan di Indonesia hanya mencukupi 20% dari kebutuhan penduduk. Jawa dan Bali yang diketahui memiliki populasi penduduk tertinggi

telah mengalami defisit air sejak tahun 1995. Di Jawa defisit air telah mencapai sekitar 130 ribu juta meter kubik per tahunnya, terutama pada musim kemarau, itulah sebabnya di beberapa daerah di Jawa dan Bali sering terjadi krisis air. Banyak masyarakat yang kesulitan mendapatkan akses air sehingga harus berjalan berkilo-kilo untuk mendapatkan air (Gambar 5.12c-d). Air yang didapat pun tak jarang memiliki kualitas di bawah standar. Penyediaan air minum di Indonesia masih menjadi sesuatu yang kompleks. Pada musim kemarau, debit aliran dasar sungai cenderung sangat rendah sehingga mengakibatkan permasalahan baru seperti intrusi air laut, krisis air, dan konflik dengan pengguna lahan seperti dalam penyediaan irigasi untuk pertanian.

Kini, sekitar 70% PDAM Indonesia mengalami penurunan kualitas air. Mengambil air dari sungai, mengolah, dan mendistribusikannya kepada masyarakat. Untuk mendapatkan air bersih, perlu penanganan lanjutan, sehingga biaya operasionalnya menjadi lebih tinggi. Diperlukan inovasi teknologi untuk mengatasi masalah ini, misalnya dengan *Natural Treatment Plant* (NTP), yaitu menyadap air langsung dari akuifernya dan mendistribusikannya ke konsumen (hilir). Metode ini dilakukan dengan mengeksploitasi airtanah secara langsung melalui pemboran dalam yang terdapat dalam lapisan akuifer di daerah imbuhan (pegunungan), lalu dialirkan menggunakan pipa-pipa yang dipasang dalam terowongan yang menghubungkan lokasi eksploitasi dengan reservoirnya (waduk). Setiap langkah kebijakan memang selalu memiliki kelebihan dan kekurangannya, NTP sangat baik untuk wilayah dengan sumber daya air melimpah, seperti di daerah gunung api aktif, atau pada pegunungan karbonat yang mengalir sungai-sungai di bawahnya. Dengan teknologi yang memadai, yang mampu mengakumulasinya, dan didukung dengan kebijakan pemerintah dalam hal pengelolaan air bersih secara terpusat di daerah (Kabupaten), hal itu tentunya bukan masalah yang sangat besar. Dengan demikian, daerah-daerah yang selama ini dikenal sebagai kawasan yang selalu memiliki permasalahan krisis air, seperti di Indonesia timur tentu dapat diatasi. Pada penerapannya, setiap kabupaten yang memiliki Daerah Tangkapan Air (DTA) harus mampu mengawasi secara serius DTA-nya. Sebagai contoh adalah, jika kawasan kabupaten tersebut memiliki DTA seluas 6000 ha yang sebagian besar merupakan milik pemerintah dan sebagian yang lain milik penduduk yang umumnya adalah petani dan peternak, dijaga dari pencemaran lingkungan. Petani dilarang menggunakan pupuk kimia di DTA dan sebagai gantinya pemerintah memberikan kompensasi subsidi xjuta rupiah per hektar dan petani diperbolehkan mengambil pupuk kompos yang diproduksi secara lokal. Keuntungannya, pengolahan air minum tersebut tidak membutuhkan lagi bahan kimia, tidak membutuhkan pompa distribusi karena letak reservoir berada di pegunungan, kualitas air yang dihasilkan sekelas *natural mineral water*, kualitas dan kontinuitas terjamin, dan DTA dapat dikonservasi.

Indonesia memiliki banyak gunung api aktif dan non aktif yang sangat berpotensi untuk mengembangkan NTP. Topografi pegunungan dan perbukitan yang tersebar di Indonesia berpotensi menjadi menara air. Jawa dan Nusa Tenggara yang memiliki banyak gunung api dan pegunungan dengan curah hujan yang tinggi, sehingga air yang begitu jernih keluar dari mata air dengan melimpah. Jangan sampai air tersebut kemudian mengalir ke sungai, tercemari oleh limbah

(pertanian, domestik, industri dan sampah) hingga berubah warna dan berbau, lalu diambil untuk air baku, diolah, didistribusikan, dan dikonsumsi masyarakat. Hal lain untuk mengatasi ketersediaan air adalah dengan dibendung (Gambar 5.12d), Bendungan mampu menjadi salah satu solusi pemeliharaan air baku, sarana pengendali banjir, penyediaan pembangkit listrik tenaga air (mini hidro) dan sebagai destinasi wisata air dan konservasi alam,



a



b



c



d



e



f

Gambar 5.12 Permasalahan air di Indonesia dan upaya penanggulangannya

BENCANA GEOLOGI DAN PERMASALAHAN GEOLOGI LINGKUNGAN

Sejak abad ke 20, pasca masa reformasi industri, setiap kegiatan recovery yang dijalankan di berbagai sektor, membutuhkan langkah strategis konservasinya melalui “sustainable development”. Kegiatan itu ditujukan untuk melindungi aset-aset manusia termasuk segala hal yang berhubungan dengan kelangsungan litosfer, hidrosfer, biosfer dan atmosfer. Dalam geologi lingkungan, yang di dalamnya selalu terkait dengan kegiatan interaksi manusia dan lingkungannya, baik positif maupun negatif, selalu memerlukan studi, investigasi, tinjauan, dan analisisnya, dalam rangka pengujian dan evaluasi.

Bencana alam seperti banjir, longsor, erupsi gunung api dan gempa bumi; ketersediaan sumber daya geologi seperti logam, batuan, minyak bumi dan air; dan permasalahan-permasalahan lingkungan, seperti pencemaran air, lahan dan udara, penanganan sampah dan intrusi air laut; secara langsung maupun tidak langsung, berdampak pada perubahan lingkungan dan polusi. Untuk itu diperlukan langkah-langkah dalam mengurangi/meminimalkan dampak yang ditimbulkan dan mengatur pengembangan dan perencanaan wilayah, dan kepentingan teknik yang meliputi konstruksi bangunan, sarana transportasi dan fasilitas umum. Penanggulangan dan pengaturan penanganan bencana sangat berguna mengingat kebanyakan daerah urban (permukiman) terletak pada wilayah-wilayah rawan bencana alam seperti bahaya gunung api, tsunami, gempa bumi dan banjir. Di sisi lain, wilayah-wilayah tersebut pun juga sangat kaya akan sumber daya geologi, sebagai implikasi dari tatanan tektoniknya.

6.1 Bencana Geologi

Bencana geologi sendiri adalah bencana yang ditimbulkan oleh proses-proses geologi, sebagai akibat dari upaya bumi dalam memposisikan komponen-komponennya menuju kondisi setimbang. Ada dua jenis bencana alam berdasarkan medianya, yaitu dipengaruhi oleh proses (1) ekstraterestrial (asal atmosferik, seperti iklim), dan (2) terestrial (deposisi, denudasi dan tektonik).

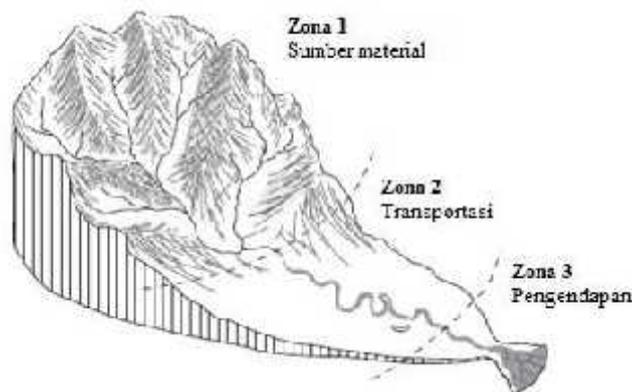
Indonesia terletak pada jalur tektonik aktif, dibentuk oleh penunjaman lempeng India di bawah lempeng Eurasia di bagian barat dan penunjaman lempeng Pasifik (dan turunannya) di bawah lempeng Eurasia di bagian timur. Kini, geologi Indonesia dicirikan oleh adanya gugusan gunung api aktif di sepanjang Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara, Sulawesi Utara hingga Halmahera, serta cekungan belakang busur vulkanik tersebut. Dengan kondisi geologi yang rumit, serta geografi dan

demografi yang heterogen, menjadikan Indonesia menjadi kawasan yang dilirik banyak negara di dunia, baik untuk dipelajari maupun untuk dikuasai, sebagai bagian dari pertahanan. Permasalahan geologi, sosial, politik, ekonomi dan budaya menjadi hal krusial yang kini tengah dihadapi Indonesia.

Dalam tindakan penanganan dan pertolongan, baik bencana alam maupun bencana artifisial, diperlukan perencanaan pengelolaan dan langkah antisipasi yang jelas dan terarah. Tindakan tanggap – darurat bencana yang selama ini telah dilaksanakan telah banyak membantu masyarakat terlanda. Sedikitnya ada 14 komponen sosial yang berpengaruh, yaitu: 1) Obat-obatan; 2) Kesehatan umum; 3) Sanitasi dan ketersediaan air bersih; 4) Baju dan penghangat; 5) Makanan; 6) Ketersediaan energi; 7) SARS (penyelamatan); 8) Pekerjaan umum dan teknik (konstruksi); 9) Lingkungan; 10) Logistik dan transportasi; 11) Keamanan; 12) Komunikasi; 13) Ekonomi; dan 14) Pendidikan.

A. Banjir dan Sedimentasi Fluvial

Suatu alur atau sungai terbentuk dari air yang mengalir, setidaknya selama semusim dalam setahun, selama musim hujan berlangsung. Aliran air tersebut tidak selalu tetap pada tiap tahunnya; alur-alurnya berubah sewaktu-waktu, tergantung pada perubahan arah aliran. Variabel-variabel penting dari aliran sungai dan alur-alur sungai adalah gradien sungai, luasan (discharge), kecepatan, dan lebar dan kedalaman alur (penampang melintang) (Gambar 6.1). Gambar 6.1 dapat dijelaskan bahwa tubuh sungai (dalam satu pola DAS) terdiri atas zona 1 yang didominasi oleh proses erosi dan gerak massa; material yang ada ditransport di bawahnya (zona transportasi); zona 2 (zona transportasi) tidak ada proses yang saling mendominasi, baik proses erosi, gerakan massa, dan sedimentasi; zona 3 adalah zona pengendapan (material yang tertransport terendapkan pada zona ini).



Gambar 6.1 Gradien sungai (Sumber: Schumm, 1977, dalam Charlton, 2007)

Gradien sungai adalah perubahan elevasi alur sungai atau *vertical drop* dari suatu lembah sungai, dalam suatu wilayah pada jarak tertentu secara horizontal. Satuan gradien sungai adalah feet/mile, meter/kilometer derajat atau %. Secara umum, alur sungai yang mengalir menuruni lereng memiliki gradien sungai yang lebih tajam dengan lembah yang lebih dalam dan aliran yang lebih cepat dibandingkan pada sungai bergradien kecil. Sebagai contoh Sungai Kuning, yang tergambar dari

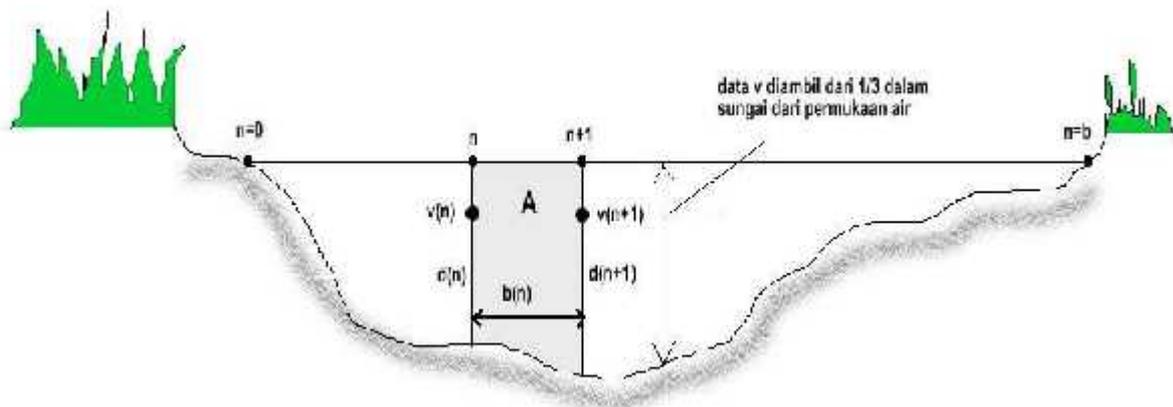
Sambisari hingga Yogyakarta, memiliki panjang aliran sekitar 10 km. Perbedaan elevasi kedua wilayah tersebut adalah 200 m. Jadi, gradien sungai antara kedua daerah adalah $200:10= 20$ m/km. Beda lagi dengan Sungai Oyo, yang mengalir dari Imogiri hingga Kretek (Bantul), memiliki panjang sungai 20km, beda tinggi 400m, maka gradien sungainya adalah 50m/km. Dari gradien sungai kedua sungai tersebut, dapat diinterpretasi bahwa aliran sungai pada contoh segmen Sungai Oyo tersebut lebih cepat dengan lembah yang lebih dalam dibandingkan dengan aliran Sungai Kuning pada segmen tersebut. Dengan kondisi geomorfologi segmen Sungai Oyo yang demikian, maka potensi banjir yang ada memiliki probabilitas yang lebih tinggi untuk berkembang diikuti dengan gerakan massa, oleh erosi dinding sungainya; daerah bahaya akibat banjir bandang tersebut berada pada area Kretek dan sekitarnya.

Luahan (debit) adalah volume air yang melalui suatu titik tertentu dalam waktu tertentu, satuan debit adalah m³/dt. Penentuan besarnya debit aliran didasarkan pada penampang melintang aliran / lembah sungai (perkalian lebar dan kedalaman lembah) dan kecepatan aliran. Lebar aliran diukur secara horizontal dari dinding sungai yang satu ke dinding yang bersebrangan; kedalaman sungai diukur secara vertikal dari permukaan air ke dasar lembah terdalam (Gambar V.15). Pengukuran kedalaman lembah sungai ini dilakukan pada beberapa titik secara berulang-ulang, yang selanjutnya dirata-rata.

Debit aliran adalah: **$Q = VWD$**

Q = debit aliran, V = kecepatan aliran, W = lebar sungai, D = kedalaman

Perubahan nilai pada salah satu parameter persamaan dapat merubah besarnya luahan aliran, yang dapat menandakan adanya perubahan bentuk alur lembah dalam suatu aliran. Salah satu parameternya adalah luas penampang aman dalam suatu tubuh sungai. Luas penampang aman (A)t dihitung dengan menggunakan metode *mean section* (Gambar 6.2), untuk kasus penampang sungainya.



Gambar 6.2 Metode menghitung luas penampang aman (A_t) dalam suatu tubuh sungai yang berpotensi banjir

$$a(n) = \frac{d(n)+d(n+1)}{2} \times b(n),$$

Luas penampang sungai adalah:

$a(n)$ = Luas penampang A

$d(n)$ = Kedalaman sungai titik n

$d(n+1)$ = Kedalaman sungai titik n+1

$b(n)$ = Lebar seksi

n = Jumlah titik uji, dengan defenisi :

a. untuk sungai tanpa menguji di titik-titik tepi sungai, yaitu pada $n=0$, dan $n=b$

b. untuk saluran dengan penampang sama, $n=0$ sama dengan $n=b$

$$\tilde{v}(n) = \frac{v(n)+v(n+1)}{2},$$

Kecepatan aliran sungai rata-rata:

$\tilde{v}(n)$ = Kecepatan aliran air rata-rata per seksi penampang

$v(n)$ = Kecepatan aliran air di titik n, dengan $v(0)=0$ dan $v((n+1)=b)=0$

$v(n+1)$ = Kecepatan aliran air di titik n+1

Pengambilan data kecepatan air sungai diambil dari kedalaman titik 1/3 kedalaman sungai diukur dari permukaan sungai. Pengambilan ini sebagai pendekatan sederhana, karena kecepatan air pada permukaan sampai dasar sungai sebenarnya tidaklah sama. Pengambilan di 1/3 kedalaman menjadi pilihan sederhana saja.

$$q(n) = a(n) \times \tilde{v}(n)$$

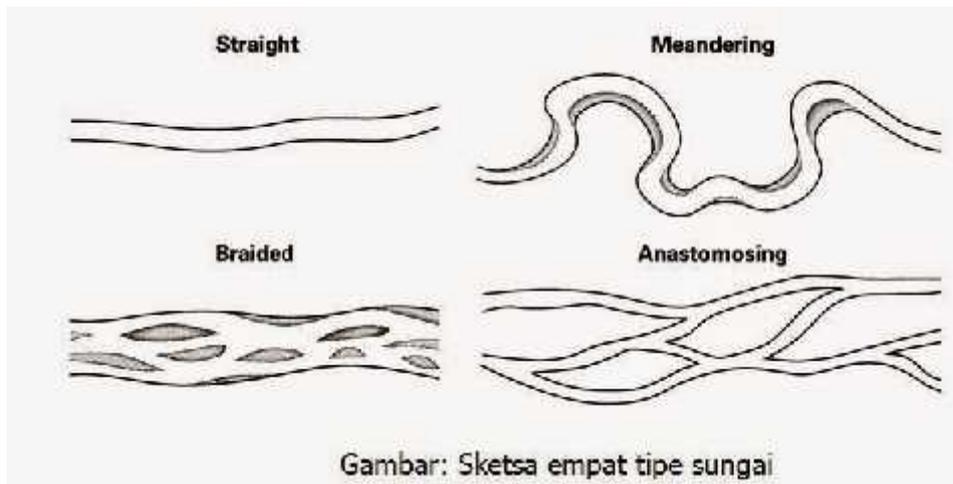
Sehingga perhitungan debit sungai dapat dituliskan:

$q(n)$ = Jumlah Debit per seksi. Perhitungan debit total adalah:

$$Q = \sum_{i=0}^n q_i \text{ atau } Q = q_0 + q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$$

Kebanyakan alur sungai dapat dibagi dalam tiga kategori, yaitu sungai lurus, sungai bermeander dan sungai teranyam. Alur sungai yang lurus dapat saja memiliki morfologi yang curam maupun bergradien landai, sebagaimana sungai teranyam. Alur bermeander berkembang pada dataran (morfologi landai) atau pada lembah-lembah yang hampir datar. Topografi alur sungai dalam suatu lembah dengan lereng yang landai atau datar disebut sebagai dataran banjir.

Alur sungai lurus terbentuk pada gradien lereng curam, alur pada batuan yang resistensinya tinggi seperti breksi, batupasir dan batuan beku, serta pada rekahan linear seperti kekar dan sesar (Gambar 6.3). Gradien sungai tajam mampu mengalirkan air secara lurus menuruni lereng. Batuan resisten dapat membentuk dinding-dinding sungai dengan mengerosi secara lateral alur sungai. Erosi pada rekahan linear seperti kekar lebih mudah dilalui alur sungai. Erosi alur secara linear umumnya menerus hingga lapisan yang menutupnya.



Gambar 6.3 Alur sungai lurus, bermeander (berkelok), teranyam dan anastomosing

Alur-alur sungai bermeander memiliki bentuk yang melengkung (*sinuous*; Gambar 6.3). Secara individu, masing-masing bentuk melengkung tersebut disebut meander (kelok). Dari waktu ke waktu, alur sungai meander bergerak maju dan mundur memotong lembah, mengerosi dan mengendapkan sedimen sesuai arah perpindahannya. Erosi alur dan pengendapannya berlangsung secara lateral. Erosi umumnya berlangsung pada sisi dinding yang berkelok, yang disebut sebagai *cutbank*, sedangkan pengendapannya berlangsung pada bagian dalam dari kelokan, disebut sebagai *point bar* (gosong pasir).

Sungai bermeander dicirikan oleh:

- a. Alur besar tunggal (*single major channel*)
- b. Material penyusun bersifat kohesi – jika tak-kohesi tidak dapat membentuk alur
- c. Material sedimen halus – lebih halus dari material dalam sungai teranyam
- d. Gradien sungai lebih rendah dari sungai teranyam.
- e. Biasanya berasosiasi dengan sistem delta
- f. Berada pada bagian hilir sungai dari sistem sungai teranyam
- g. Migrasi alur – berkembang ke luar dari lembah meander sungai (erosi lateral) secara menerus, sedangkan bagian dalam alur terjadi pengendapan.

Alur sungai teranyam (*braided*; Gambar 6.3) terbentuk saat sedimentasi lebih besar dari kemampuan sungai dalam mengangkut sedimen. Dalam rangka menjaga keseimbangannya (didasarkan pada nilai luahan; $Q=VWD$ dan gradien sungainya), maka sungai harus membuat beberapa perubahan. Mengendapkan kelebihan material adalah cara termudah untuk mengurangi beban sedimen sungai. Endapan tersebut selanjutnya membentuk suatu tubuh gravel, mengisi gosong alur dan membangun pulau-pulau pasir yang dipisahkan oleh aliran air hingga membentuk sejumlah alur-alur kecil (Gambar V.18).

Sungai teranyam dicirikan oleh:

- a. Sinuositas (perbandingan panjang alur / lebar lembah sungai) rendah

- b. Beberapa alur sungainya (pola sebarannya) dipisahkan oleh beberapa pulau kecil yang dibentuk oleh sedimen pasir (gosong pasir)
- c. Sedimennya melimpah (khususnya yang berukuran kasar);
- d. bersifat sporadis: luahannya sangat tinggi – sebagai contoh pada tipe sungai *ephemeral* yang variasinya ekstrim tinggi
- e. Jarang / tanpa vegetasi – karena mudah tererosi, komponen material limpahnya tak-kohesif dan air larianya sangat tinggi
- f. Migrasi alur ~ lokasi (hasil migrasi) alur selalu berubah secara konstan, dinding alur sangat mudah tererosi.

Sungai teranyam mudah berkembang pada:

- Dataran / kipas aluvium bagian distal
- Dataran erosi pada geomorfologi yang dipengaruhi oleh proses glasiasi
- Bagian proximal dari sistem sungai bergradien tinggi
- Dataran gunungapi (fasies medial-distal)

Sungai *ephemeral* adalah sungai yang hanya mengalir pada musim hujan, biasanya memiliki sistem sungai teranyam. Sungai *perennial* adalah sungai yang mengalir sepanjang tahun, pada daerah beriklim basah (tropis).

a. Dinamisasi Sungai dan Alur

Suatu aliran dalam lembah sungai dibentuk oleh proses erosi alur, erosi dinding sungai dan erosi dasar lembah, yang disertai dengan proses sedimentasi. Air sungai terkadang melampaui volume cekungannya (banjir). Air limpahan (banjir) tersebut juga membawa material endapan (lumpur) yang selanjutnya diendapkan di dasar lembah, yang disebut sebagai aluvium. Untuk membedakannya dengan fluvium adalah endapan fluvium adalah material yang diendapkan oleh proses fluvial, seperti endapan alur dan gosong pasir. Dasar lembah yang tertutup oleh material aluvium disebut dataran aluvial.

Material aluvium memiliki sifat textural yang spesifik dan mengandung ion-ion nutrisi yang diendapkan bersamanya membentuk lahan yang subur, sering disebut sebagai dataran limpah banjir. Untuk alasan ini, dataran limpah banjir sejak jaman sejarah sering dibudidayakan sebagai lahan pertanian, permukiman dan pendidikan. Sebagai contoh adalah perkembangan Kerajaan Majapahit di muara Sungai Brantas, Kerajaan Mataram Modern di dataran banjir Sungai Opak, Mesir Kuno di dekat Sungai Nil, Babilonia di Sungai Tigris dan Eufrat, dan lain-lain. Dalam hal ini, proses sedimentasi berlangsung secara:

- a) **Transportasi sedimen**, ada tiga tipe yaitu: (1) *bedload* – contoh pada sedimen pasir dan gravel dalam sungai; (2) traksi (*rolling, sliding* dan rayapan), butiran-butiran material berhubungan menerus sesuai dengan perlapisannya; dan (3) saltasi (bergerak naik dan turun secara berulang-ulang: kontak secara tidak menerus dengan perlapisannya. Contoh: transportasi pasir oleh angin.

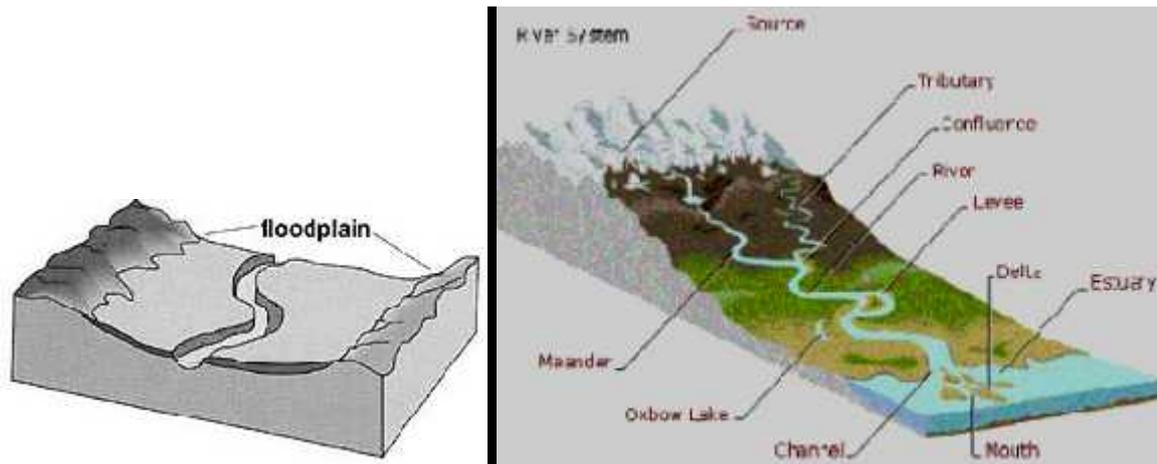
- b) **Suspensi**, biasanya pada material yang berukuran halus (lempung dan lanau).
- c) **Proses turbulensi** lebih cepat dari kecepatan pengendapannya. Material-ion tak-terlarut dalam suatu larutan
- d) **Erosi (Scour)**; secara logika material halus lebih mudah tertransport dibandingkan yang lebih kasar, tapi kenyataannya tidak selalu demikian:
 1. Tak-kohesifnya material halus (ct. lempung) disebabkan oleh permukaan areanya yang lebih luas dan gaya elektrostatis besar.
 2. Butiran yang halus lebih umum dijumpai pada sub-lapisan laminar, tidak berada pada komponen menerus pada aliran turbulen: lebih mudah tertransport sebagai suspensi tetapi sulit terseret.

Kebanyakan erosi dan transportasi terjadi oleh proses sungai selama banjir berlangsung. Kenyataannya, partikel yang berukuran lebih besar dapat dipindahkan dengan kecepatan yang lebih besar. Sungai menyeruak bagian dasar lembah (lapisan) selama banjir berlangsung. Seruakan setebal 11 m pernah terjadi akibat banjir di Sungai Colorado dekat Yuma A.Z hanya dengan ketinggian banjir yang mencapai 4 m (sumber: USGS, 1990). Di lain sisi banjir juga sering menghasilkan sedimen yang lebih tebal pada daerah yang lebih rendah, seperti yang terjadi di Jakarta (1-2 m).

b. Dinamisasi Banjir dan Luahan Sungai dan Alur

Banjir adalah suatu proses alam namun pemicunya dapat secara alamiah maupun artifisial, sebagai salah satu metode alam dalam menjaga kesetimbangan pengaliran. Hal itu dapat dipicu oleh berlebuhnya presipitasi uap air di udara sehingga curah hujannya tinggi, pencairan es yang sangat cepat, meningkatnya air larian di permukaan tanah, lereng yang terjal, badai, tsunami, kerusakan/ bocornya bendungan dan pertumbuhan penduduk (*urban development*). Banjir terjadi ketika ada luahan air sungai yang sangat besar, sehingga lembah sungai tidak mampu lagi menampung luahannya dan dialirkan melalui dataran banjir (*floodplain*). Pada kondisi normal debit air sungai adalah $Q = V.W.D - A^3 \sim 0$ (Gambar 6.4). Jika debit air melampaui nilai tersebut, maka terjadilah banjir.

Banjir sering diikuti dengan proses erosi pada dasar lembah dan sedimentasi pada sisi yang lain. Erosi terjadi ketika energi aliran melampaui kekasaran dasar lembah; sedangkan sedimentasi terjadi ketika energi aliran lebih kecil dari energi gerusan. Secara umum, erosi terjadi pada lembah sungai yang miring, sehingga alirannya deras; sedangkan sedimentasi terjadi pada lembah dengan kemiringan lereng kecil, sehingga tidak cukup menghasilkan energi aliran. Karena bersifat mengerosi oleh sebab debit air yang melampaui volume sungai, maka banjir dapat berpotensi bencana saat melewati populasi penduduk dan fasilitas-fasilitas umum yang menyangkut kepentingan manusia. Banjir sering terjadi di kota-kota besar dengan urbanisasi yang tinggi, seperti Jakarta dan Surabaya.



Gambar 6.4 Luahan air sungai secara normal (kiri, Keller, 2000). Suplai air pada tubuh sungai pada alur tributary jika tidak dapat ditampung maka yang terjadi adalah luahan air membentuk banjir

c. Perkembangan Dataran Banjir

Dataran banjir adalah suatu morfologi dataran di sepanjang aliran sungai, yang ketika aliran sungai pada kondisi normal tidak dialiri air sungai; namun pada saat aliran sungai melampaui kondisi normal terjadi limpasan air sungai. Dataran limpas banjir ini terbentuk oleh teras-teras sungai yang terjadi pada masa lampau. Jika banjir berlangsung, dataran ini terjadi proses sedimentasi dari material hasil erosi pada sisi sungai yang lain. Alur sungai mengalir dengan mengerosi salah satu dinding sungai dan mengendapkan material halus pada dinding sungai yang lain secara suspensi.

Karena adanya akumulasi sedimen pada periode-periode tertentu itulah, maka lapisan tanah yang subur menjadi lebih tebal, membentuk dataran banjir dengan morfologi halus dan luas. Di lain sisi, mataair yang berada di sekitar sungai memperbanyak luahan airtanah sehingga sumber airnya melimpah. Kondisi tersebut menyebabkan masyarakat lebih mengembangkan wilayah ini sebagai lahan pertanian. Di kota-kota besar, dataran banjir justru dimanfaatkan untuk lahan permukiman dan budaya, dengan membangun berbagai macam konstruksi bangunan. Pada perkembangan selanjutnya, wilayah ini sangat baik sebagai koridor transportasi (budidaya, setidaknya pernah terjadi pada masa sejarah di Indonesia). Akibatnya, ketika banjir berlangsung bencana alam tidak dapat dielakkan lagi, korbannya lebih banyak karena kawasan dataran banjir justru memiliki kepadatan penduduk yang tinggi.

d. Besaran dan Frekuensi Banjir

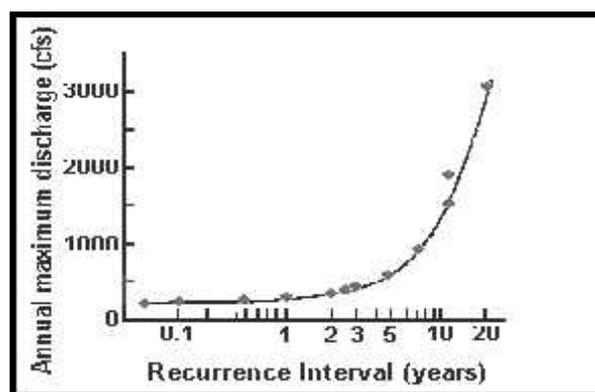
Banjir kecil dalam suatu wilayah yang berlangsung tiap tahun memiliki frekuensi yang tinggi, sedangkan banjir besar yang bersifat katastrofis dan jarang terjadi memiliki frekuensi yang rendah. Banjir besar adalah kombinasi

dari pengaruh iklim dan kondisi hidraulik yang secara realitif sangat jarang, sehingga umumnya memiliki besaran banjir yang tinggi.

a) Menghitung probabilitas banjir

Banjir biasanya bersifat periodik, yang terjadi sekali dalam x tahun. Banjir di Jakarta ada tiga macam; yaitu banjir musiman (yang terjadi pada tiap-tiap musim hujan), banjir lima tahunan dan banjir besar yang terjadi sekali dalam 20 tahun. Banjir Bengawan Solo terjadi sekali dalam 10 tahunan, begitu juga dengan penyebab banjir El-Nino, yang terjadi sekali dalam 10-15 tahun sekali. Namun, tidak semua wilayah memiliki periode banjir yang tetap. Wilayah dengan kepadatan penduduk yang padat, serta memiliki kebiasaan yang buruk terhadap lingkungannya, tentunya memiliki potensi bahaya banjir yang jauh lebih besar, tanpa harus memperhatikan sifat periodisasi banjir di daerahnya. Sebaliknya, wilayah dengan karakteristik masyarakat yang baik dalam mengelola lingkungannya, tentunya dapat meminimalkan potensi banjir yang dimiliki oleh daerahnya.

Baiklah, untuk menghitung banjir yang memiliki periodisasi lebih teratur, maka probabilitas banjir dapat dihitung dengan didasarkan pada periodisasi banjir yang pernah ada sebelumnya (interval banjir terbesar). Variabel yang digunakan adalah stadia sungai, elevasi permukaan air, sebagaimana air yang menjangkau punggung lembah sungai dan atau meluap melampaui wilayah dataran banjir dan teras sungai. Interval banjir digunakan untuk memprediksi kemungkinan akan berlangsungnya banjir dalam suatu wilayah. Data dasar yang digunakan adalah data statistik banjir yang telah berlangsung sebelumnya (Gambar 6.5).



Gambar 6.5 Diagram luahan maksimum tahunan terhadap interval hujan maksimum untuk memprediksi periode banjir

Interval banjir dihitung dengan persamaan $I = (N+1):M$; N adalah jumlah tahun, M adalah besaran (magnitute) dan I adalah interval banjir. Sebagai contoh adalah banjir besar Jakarta memiliki periodisasi sekali dalam 5 tahun, jadi probabilitasnya adalah 1:5 yaitu 20%. Faktor perilaku masyarakat yang buruk dapat menjadikan 20% probabilitas banjir tersebut

dapat terjadi; sebaliknya, perilaku yang baik dapat menekan untuk tidak terjadi banjir.

- b) **Karakteristik banjir;** Masing-masing banjir memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Banjir yang terjadi di hulu umumnya dipicu oleh curah hujan yang sangat tinggi dalam waktu yang sangat singkat, dan dampaknya dijumpai secara lokal. Sebaliknya, banjir yang berlangsung di daerah hilir biasanya lebih cenderung berhubungan dengan cuaca; mencakup pada wilayah yang sangat luas, dengan beberapa cabang anak sungai yang selanjutnya bersatu membentuk luapan banjir. Banjir ini lebih merusak dengan kerugian properti yang lebih tinggi, karena berlangsung pada wilayah dengan permukiman penduduk dengan kepadatan paling tinggi dan lebih luas.

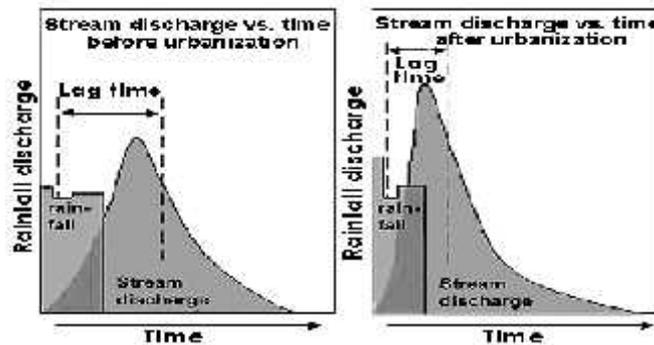
Faktor-faktor yang mempengaruhi intensitas banjir:

1. Faktor-faktor berpengaruh secara normal, meliputi:
 - c) jumlah dan rata-rata limpahan air
 - d) infiltrasi rata-rata: dipengaruhi oleh tipe dan sifat litologinya (porositas dan permeabilitas)
 - e) topografi, morfologi dengan gradien lereng yang lebih curam lebih mudah berkembang air larian
 - f) vegetasi, air larian kurang berkembang pada wilayah dengan vegetasi yang lebat. Vegetasi meningkatkan permeabilitas soil, dan akar tumbuhan menyerap air.
2. Katastropis; runtuhnya bendungan

Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya kerusakan akibat banjir:

- Tata guna lahan pada areal dataran banjir
- Magnitud (kedalaman dan kecepatan air, serta frekuensinya)
- Ketinggian rata-rata dan durasinya
- Musim (masa tanam, masa panen atau masa menyangi)
- Volume sedimen terikut
- Faktor Urbanisasi: telah diyakini bahwa banjir sering dikaitkan dengan faktor besarnya tingkat urbanisasi di perkotaan besar. Kebanyakan kota-kota dan perkampungan justru berada pada daerah sekitar sungai, terutama dataran banjir. Hal itu dengan alasan kesuburan dan sumber daya air yang melimpah. Di sisi lain, dengan kepadatan penduduk yang tinggi, tinggi juga penumpukan sampah, terutama di titik-titik sepanjang aliran sungai. Akibatnya, terjadi genangan air sungai, dan ketika debit air tinggi, banjir tidak dapat dielakkan. Banyaknya pembangunan jalan raya maupun jalan kota, trotoar dan gedung-gedung, menjadikan permukaan tanah (sebagai daerah resapan) menjadi tertutup oleh semen dan aspal. Hal itu mengurangi infiltrasi air hujan ke dalam tanah. Air yang mengalir di atasnya menjadi air larian seluruhnya, mengisi lembah / dataran yang lebih rendah dan terjadi pendangkalan lembah sungai dengan hebat. Gambar 6.6

memperlihatkan perubahan yang sangat mencolok pengaruh urbanisasi terhadap luahan sungai oleh air hujan di beberapa wilayah.



Gambar 6.6 Meningkatnya luahan sungai sebelum urbanisasi (kiri) dan setelah urbanisasi (kanan) di beberapa belahan dunia (Watkins, 2003).

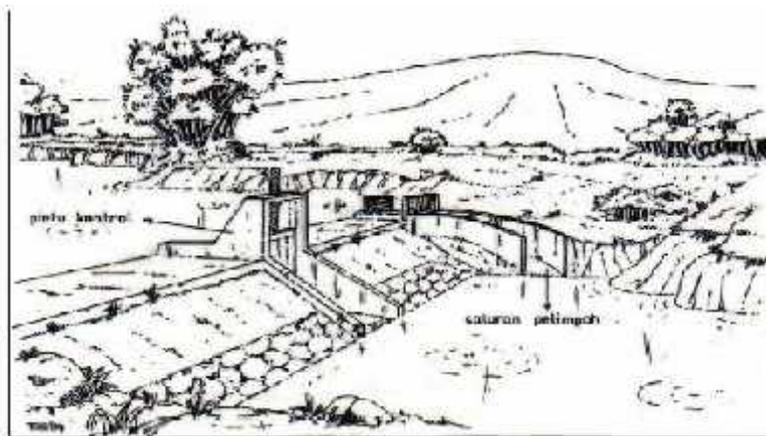
Saat musim hujan, volume luahan air ke dalam sungai sangat besar. Di lain sisi, penyemenan dasar lembah anak sungai dan paritan meningkat, sehingga kontribusi sedimentasi pada lembah sungai utama pun meningkat. Akibatnya, lembah makin dangkal dan gradien sungai makin kecil. Saat terjadi limpahan air, lembah sungai tidak mampu lagi menahan luahannya, dan banjir pun tidak dapat dielakkan lagi. Beberapa pengadaan prasarana dan kegiatan yang dapat memicu banjir adalah pengaspalan / beton; penebangan vegetasi; pembangunan (gedung, jalan raya dan konstruksi lain) yang melampaui batas; pengisian material dan / pemanfaatan lahan pada dataran limpah banjir; dan drainasi air pada dataran rendah menambah air larian.

e. Strategi untuk meminimalkan bahaya banjir

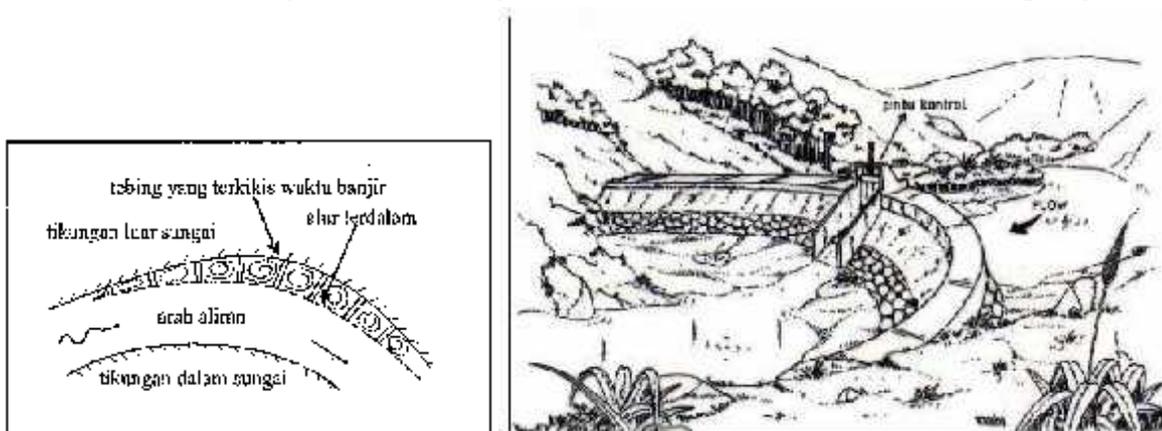
Pengadaan sarana pengontrol banjir bukanlah strategi yang baik untuk menanggulangi banjir, karena alat itu hanya dapat memantau tinggi luahan, tidak mengurangi volume sedimen dalam lembah. Namun, alat tersebut dapat membantu memprediksi kapan terjadinya banjir, sehingga dapat mengurangi kerugian yang ditimbulkannya. Strategi yang lain adalah:

1. Membatasi / menzonasi area pembangunan dan konstruksi prasarana umum (contoh: terutama pada daerah-daerah pengaliran: limpah banjir dan teras sungai)
2. Membuat kantung-kantung penahan untuk mengurangi air larian
3. Membuat alur sungai buatan untuk meningkatkan kecepatan aliran (luahan), sehingga alirannya lebih lancar. Metode ini dapat meningkatkan erosi lembah dan memperbesar volume lembah sungai, dan memicu banjir di area yang lebih hilir jika hal serupa tidak dilakukan pada wilayah itu.
4. Pembuatan tanggul alam; bertujuan untuk menahan air agar tetap berada pada alur sungai selama luahannya tinggi (pada musim hujan); maka secara normal dapat memperlambat / menahan air pada dataran limpah banjir di daerah hilir

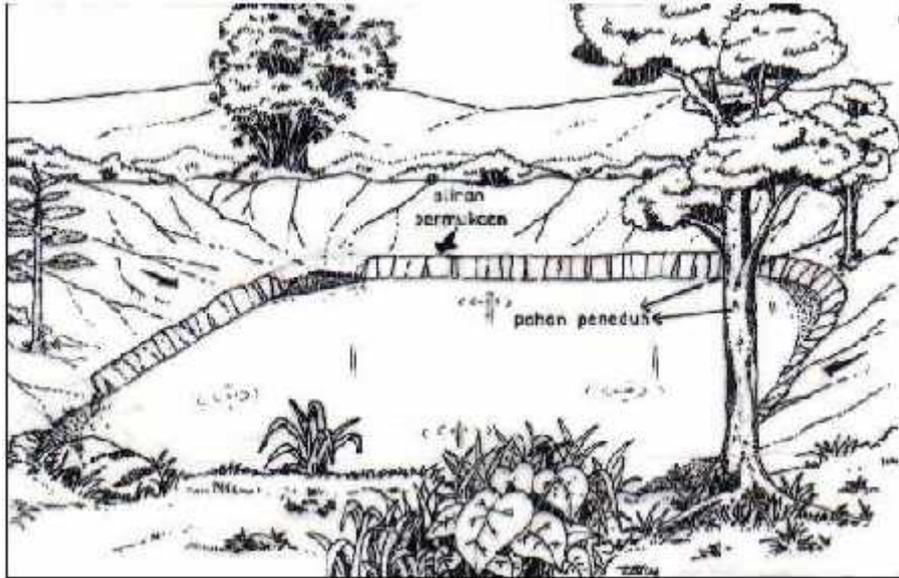
5. Membangun dam-dam penahan banjir; untuk menahan beban sedimen, volume air berkurang dan material tertahan dalam dam.
6. Pengontrol banjir; urbanisasi dapat mempercepat banjir, yang seharusnya berlangsung secara periodik. Dengan mitigasi, diharapkan dapat menekan dampak yang ditimbulkannya. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengontrol banjir adalah dengan membangun koridor (pintu) alam dam pengontrol (Gambar 6.7), dan *greenways* di sepanjang dinding sungai (Gambar 6.8-9). *Greenways* ini dapat digunakan sebagai sarana rekreasi pada saat musim kering (kemarau), tetapi juga dapat berfungsi sebagai cekungan penahan pada saat banjir. Cara lain adalah dengan membangun tanggul alam di sepanjang sungai, untuk mengembalikan keberadaan zona *riparian*. Kegiatan-kegiatan yang dapat mengontrol banjir sangat dibutuhkan pada daerah urbanisasi, seperti dengan pengukuran dan pengamatan secara cermat dan akurat proses pengaluran, tanggul sungai, dam, perkembangan alur dan dinding-dinding dataran banjir. Penyusunan peta bahaya banjir sangat diperlukan untuk menekan pertumbuhan daerah urban.



Gambar 6.7 Pembangunan dam pengontrol banjir dengan saluran pelimpah yang berfungsi untuk mengalihkan luahan ke saluran-saluran pengalir



Gambar 6.8 Koridor pintu alam (*greenways*) yang terbuat dari pepohonan perdu dan / bambu di sepanjang tebing yang sering terkikis banjir pada alur terdalam



Gambar 6.9 Greenways berupa pohon peneduh (bisa dari pohon bambu / perindang) yang ditanam pada tekuk-tekuk meander dan / pertemuan anak-anak sungai yang berfungsi sebagai penahan banjir pada musim hujan.

f. Pengelolaan Spasial Lingkungan Hidup Terpadu – Kawasan Aliran Sungai

Permasalahan lingkungan dalam beberapa sektor semakin meningkat dan semakin kompleks, baik yang menyangkut aspek di sektor pembangunan, wilayah pembangunan, dan berbagai stakeholder terkait. Berbagai program pengelolaan lingkungan hidup baik di tingkat pusat maupun daerah telah dirancang untuk mengatasi berbagai permasalahan tersebut. Beberapa latar belakang pengelolaan lingkungan hidup saat ini adalah:

1. Konsep pembangunan terpadu dan konsep pengelolaan kawasan sungai masih belum dapat diimplementasikan secara menyeluruh
2. Kualitas dan kuantitas air di berbagai sungai di Indonesia semakin menurun, kadar pencemaran air semakin meningkat, dan debit air sungai semakin menurun dengan tajam, termasuk menurunnya kualitas udara, dan tanah.
3. Pertumbuhan populasi penduduk, kawasan permukiman, dan industri menyebabkan semakin menumpuknya limbah domestik dan industri, yang pada akhirnya baik langsung ataupun tidak langsung telah menyebabkan semakin merosotnya kualitas air/ dan perairan sungai.
4. Perkembangan kegiatan eksploitasi bahan galian golongan C, eksploitasi pertambangan lainnya, pertanian, pariwisata dan rekreasi, perikanan, peternakan, kehutanan, dan pemanfaatan sumberdaya air yang tidak terintegrasi dan tidak berwawasan lingkungan telah memberikan kontribusi sangat besar terhadap: kuantitas dan kualitas sumberdaya air, kerusakan bentang alam, pelumpuran, masuknya bahan kimia ke perairan, banjir dan erosi.

5. Persepsi dan partisipasi masyarakat yang masih rendah terhadap pelestarian lingkungan: konservasi tanah dan air, produksi air bersih dan pengelolaan sampah rumah tangga.
6. Terbatasnya petunjuk-petunjuk teknik sederhana tentang pengelolaan lingkungan yang dengan mudah dimengerti masyarakat dan pengusaha lokal.
7. Kemampuan SDM dan institusi yang masih terbatas terhadap pengelolaan lingkungan
8. Penegakkan hukum yang rendah
9. Sosialisasi dan sistem informasi yang sangat terbatas tentang potensi, konsep, maupun produk-produk hukum pengelolaan lingkungan hidup.

Pengelolaan DAS (watershed management), ialah sebuah istilah yang sering digunakan di kalangan kehutanan dan pengawetan tanah. Society of American Forest (1950), mendefinisikan sebagai berikut: *“Watershed management is the management of the natural resources of a drainage basin, primarily for the production and protection of water supplies and water based resources, including the control of erosion and supplies and floods, and the protection of esthetic values, associated with water”*.

Sutterland (1972), menyatakan bahwa *“watershed management is the management of all the natural resources of a drainage basin, to protect, maintain or improve its water yield”*. Selanjutnya disebut *“wildland watershed management, when it is applied non-urban, non-cultivated that are chiefly covered by forest, range, and alpine vegetation”*. Di sini perlu disinggung definisi dari Pengaruh Hutan (*forest influences*) karena sangat erat hubungannya dengan pengelolaan DAS yaitu *“Forest Influences may be defined as all effects resulting from the presence of forest or brush upon climate, soil water, run off, streamflow, floods, erosion and soil productivity”* (Kittredge, 1948).

Peraturan Pemerintah No. 33 Tahun 1970 tentang Perencanaan Hutan, menyebutkan bahwa Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu daerah tertentu yang bentuk dan sifat alamnya sedemikian rupa, sehingga merupakan suatu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya yang melalui daerah tersebut, dalam fungsinya untuk menampung air yang berasal dari curah hujan dan sumber-sumber air lainnya, yang penyimpanannya serta pengalirannya dihimpun dan ditata berdasarkan hukum-hukum alam sekelilingnya demi keseimbangan daerah tersebut. Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 1982 tentang Tata Pengaturan Air, menyebutkan bahwa Daerah Pengaliran Sungai adalah suatu kesatuan wilayah tata air yang terbentuk secara alamiah, dimana air meresap dan/atau mengalir melalui sungai dan anak-anak sungai yang bersangkutan; sedangkan Wilayah Sungai adalah kesatuan wilayah tata pengairan sebagaimana dimaksud pada Pasal 1 angka 7 Undang-Undang Nomor 11 Tahun 1974 sebagai hasil pengembangan satu atau lebih daerah pengaliran sungai. Dari uraian diatas secara umum dapat

dipahami bahwa pengelolaan kawasan sungai merupakan pengelolaan lingkungan hidup dan sumberdaya alam, yang dapat pulih (renewable); seperti air, tanah dan vegetasi. Pengelolaan kawasan sungai bertujuan untuk memperbaiki, memelihara dan melindungi keadaan kawasan sungai. Maksud pengelolaan tersebut adalah agar dapat menghasilkan hasil air (water yield) yang dapat dimanfaatkan untuk kepentingan pertanian, kehutanan, perkebunan, peternakan, perikanan, dan masyarakat yaitu air minum, industri, irigasi, tenaga listrik, rekreasi dan sebagainya.

Dalam perkembangannya, terdapat berbagai permasalahan yang menyebabkan kerusakan sumberdaya air dan menyangkut berbagai tatanan kehidupan dan pembangunan yang sangat kompleks. Untuk itu diperlukan pendekatan yang menyeluruh baik yang berhubungan dengan permasalahan lingkungan fisik sungai itu sendiri, sosial, budaya dan ekonomi, secara terpadu dan menyeluruh. Pendekatan ini menjadi strategis dalam mewujudkan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development*) dengan memperhatikan faktor ekonomi, ekologi dan kehidupan sosial sebagai pilar utamanya.

Dalam perkembangannya, pemerintah telah berupaya melakukan penanggulangan-penanggulangan masalah banjir dan turunannya, melalui penandatanganan berbagai piagam Lingkungan Hidup, seperti dengan Jerman yang bekerjasama dengan BPBD-BPBD di tiap-tiap daerah di Indonesia.

B. Gerakan Massa

Gerakan massa adalah salah satu fenomena alam yang hampir selalu dialami oleh tiap-tiap daerah di dunia. Fenomena alam ini banyak ragamnya, dan banyak pula pemicunya, baik secara geologis, atmosferik maupun aktivitas fisik lain; serta baik secara alamiah maupun artifisial oleh kegiatan manusia. Hampir seluruh gerakan massa ini berdampak bencana bagi masyarakat yang tinggal di sekitarnya, terutama yang bermukim pada daera-daerah bermorfologi tekuk lereng; yaitu zona di mana terjadi perubahan gradien lereng dari lereng landai ke lereng curam.

Indonesia adalah salah satu negara di Asia yang sangat sering terjadi bencana gerakan massa, yang terjadi hampir pada tiap-tiap tahun, yaitu saat musim hujan tiba. Hal itu berkaitan dengan posisinya yang terletak pada seputar garis katulistiwa, sehingga beriklim tropis dengan curah hujan dan tingkat pelapukan yang tinggi; dan pada jalur tektonik aktif, sehingga morfologinya tidak stabil.. Tektonik aktif menjadikan wilayah ini strukturnya kompleks sehingga reliefnya kasar. Keduanya memicu terjadinya gerakan massa, seperti longsoran, jatuhnya batuan, guguran lereng / avalans dan kejadian gerakan massa yang lain. Ditambah pula dengan perilaku masyarakat yang tidak bersahabat dengan alam, seperti pada kegiatan penggundulan hutan secara besar-besaran pada zona imbuhan airtanah, pertanian tanpa diimbangi dengan sistem pelerengan yang

benar dan lain-lain, hingga makin memicu meningkatnya longsoran dan gerakan massa yang lain.

Di daerah gunung api, material onggokan awan panas di atas puncak yang belum mengalami konsolidasi, sangat mudah terganggu stabilitasnya. Kubah lava di atas puncak gunung api, dengan adanya perubahan suhu dari panas ke dingin, ditambah dan air hujan yang selanjutnya mengisi ke dalam rongga-rongga bekas keluarnya gas, dapat menyebabkan onggokan menjadi rapuh. Perubahan suhu secara tiba-tiba dari dingin ke panas dan dari basah ke kering berakibat kelembaban lebih tinggi dan laju pelapukan lebih tinggi. Suhu udara yang meningkat secara tiba-tiba juga dapat memicu meningkatnya curah hujan. Curah hujan yang tinggi dan cepat di sekitar puncak gunungapi, dapat berakibat longsornya tumpukan material gunungapi di daerah puncak, hingga terjadi banjir lumpur (lahar), dan dapat berdampak bencana. Kubah yang telah penuh, sedangkan material tersebut belum terkompaksi maksimal, porositasnya masih tinggi sehingga pada saat musim hujan mudah terisi air. Jika bebannya terus bertambah, sedangkan materialnya telah jenuh air, maka stabilitas lerengnya mudah terganggu sehingga mudah longsor. Hasil longsoran tersebut ditambah dengan air hujan membentuk debris lahar dengan konsentrasi 20-60% dan kecepatan 2-5 m/dt.

Gempabumi dengan ~5-8 pada skala Richter yang terjadi di Alor (NTT, 2003), Yogyakarta- Jateng, 2005 dan 2006), Gunung Sitoli (Nias, 2005-2006), Garut (Jabar, 2006), Yogyakarta (2006) dan lain-lain telah memicu terjadinya gerakan massa berupa jatuhan, likuifaksi dan longsoran. Hujan lebat menyebabkan longsoran di Muara Sipongi (Mandailing Natal, Sumatra Utara), G. Bawakaraeng (Sulawesi Selatan), dan lain-lain. Hujan disertai dengan badai taufan juga telah menyebabkan gerakan massa dan banjir bandang di Bohorok (Aceh Pidi, 2002). Likuifaksi (semburan lumpur) di Pangkalan Bun (Sumatra, 1990an), Aceh (1990an), Porong (Sidoarjo, 2006-2008), Kalimantan (2006), Pati (2006-2006) dan lain-lain.

Masing-masing kejadian tersebut mewakili beberapa tipe kegagalan lereng, yang dikenal sebagai *mass wasting*, yang pernah terjadi di Indonesia. Kegagalan lereng adalah suatu debris / gerakan massa batuan dan tanah yang terjadi karena adanya gaya gravitasional. Ada tiga tipe gerakan massa yang kita kenal yaitu jatuhan, longsoran dan aliran. Salah satu tipe gerakan massa yang lain adalah amblesan, seperti yang pernah terjadi di Semarang, Jakarta, Surabaya dan Medan.

a. Lereng

Akibat adanya gaya gravitasi bumi, terjadi daya tarik bumi terhadap material, sehingga terjadi kecenderungan material untuk menuruni lereng. Namun, dalam merespon gaya gravitasi tersebut, berat keseluruhan material menahan daya tarik dengan tetap bergantung pada daya kohesi yang dimilikinya. Jika daya kohesi tersebut terlampaui oleh berat massa material, maka akan segera terjadi runtuhannya. Massa akan menuruni lereng secara vertikal atau jatuh

melalui tebing-tebing yang curam. Berkurangnya gaya kohesi dalam tanah atau batuan dapat disebabkan oleh daya dukung material yang rendah, misalnya akibat pelapukan sehingga membentuk material lepas, yaitu tanah; tanah dengan sifatnya yang plastis dan mampu menyimpan air membentuk bidang gelincir, airtanah mengisi bidang gelincir dan air permukaan seperti hujan mengerosi material di atas bidang gelincir tersebut sehingga material yang jenuh air bergerak menuruni lereng. Pergerakan tersebut dapat terjadi dengan sangat lambat dalam satuan hingga ratusan tahun, atau dengan sangat cepat dan bersifat merusak yang terjadi dalam hitungan detik hingga menit. Terjadinya gerakan massa tergantung pada topografi (gradien lereng), stabilitas lereng, tebal tanah (massa) terusik, kedalaman muka airtanah, tingkat kerapatan vegetasi pada lereng, jenis dan tingkat kegiatan manusia di wilayah tersebut dan tingkat curah hujan.

Di dunia terdapat banyak sekali morfologi dengan ciri-ciri atau profil lereng yang bervariasi. Ada lereng yang memiliki jurang sangat curam dengan disusun atas material debris, dan ada pula yang tipe lerengnya cembung halus dengan kaki cekung yang tersusun atas tanah tebal dengan vegetasi yang lebat (Gambar 6.10). Profil lereng tersebut dipengaruhi oleh kondisi iklim daerah setempat, topografi, tingkat pelapukan dan tipe batuan penyusunnya. Batuan resisten dan batuan yang terletak pada wilayah dengan kondisi iklim semi-kering memiliki kesamaan profil lereng, hal itu dipengaruhi oleh intensitas pelapukan kimia dan mekanika yang berlangsung di kedua wilayah tersebut yang relatif lebih lambat. Laju erosi tergantung pada jumlah material yang terlapukkan (terlepas) atau yang tersingkap di permukaan sehingga dapat terangkut, topografi dan media erosinya.

Untuk dapat memerikan kestabilan lereng, diperlukan pengetahuan yang cukup, pada kondisi yang bagaimana lereng dapat berpotensi bergerak. Lereng dengan kemiringan landai dan cembung memiliki karakteristik yang berbeda dengan lereng yang memiliki topografi cekung dan curam.



Sumber: Keller (2000)

Gambar 6.10 Profil lereng curam yang terbentuk pada wilayah beriklim semi-kering atau batuan resisten (kanan) dan tipe lereng halus yang terbentuk pada wilayah dengan iklim basah (tropis; kiri). Sumber: Keller (2000).

Di lain sisi, pada batuan tak-resisten dan atau wilayah dengan iklim semi-basah memiliki profil lereng yang sama. Kondisi iklim basah dengan tipe batuan yang lunak menghasilkan material yang mudah tererosi; puncak lereng cembung dan dasar lereng cekung. Tipe lereng ini memiliki soil penutup yang sangat tebal dengan vegetasi yang sangat lebat. Lereng dengan topografi cembung yang tersusun atas material tak-resisten, dasar lereng tersusun atas material debris, gradien lereng 30-35°; yang paling stabil terletak pada sudut maksimumnya (Gambar 6.11). Lereng ini banyak berkembang pada daerah beriklim tropis sampai savana.

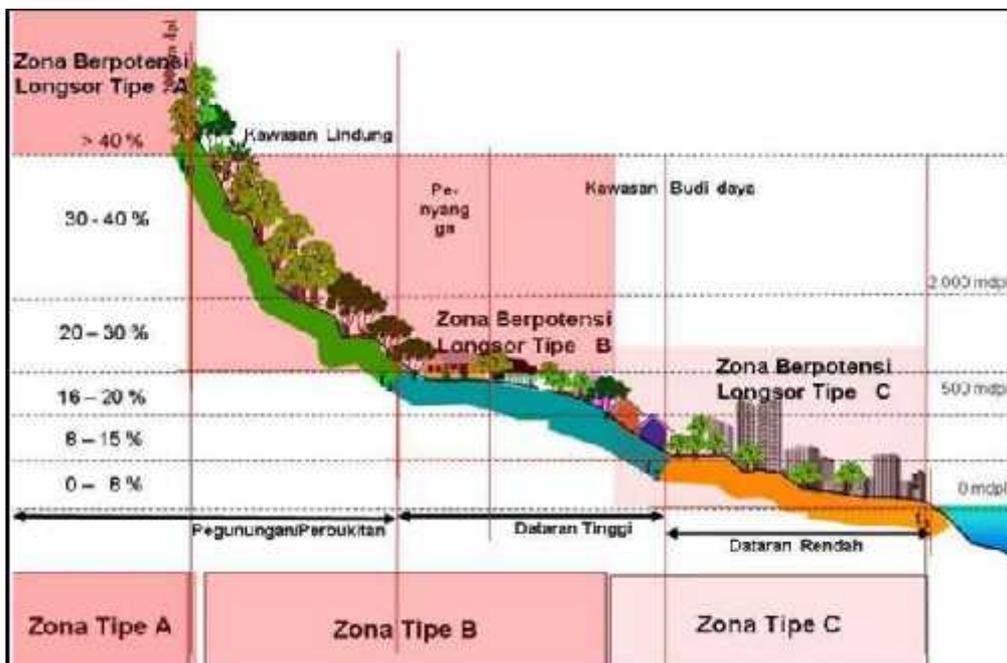
Menurut Karnawati (2006), berdasarkan hidrogeomorfologinya, zona berpotensi longsor dapat dibedakan menjadi 3, yaitu Zona Tipe A, Zona Tipe B, dan Zona Tipe C. (Gambar 6.11).

a) Zona Tipe A; yaitu zona ini merupakan daerah lereng gunung, lereng pegunungan, lereng bukit, lereng perbukitan, tebing sungai atau lembah sungai dengan kemiringan lereng di atas 40%, dengan ketinggian di atas 2000 meter di atas permukaan laut. Zona ini dicirikan dengan kondisi Lereng pegunungan relatif cembung; tersusun atas tanah penutup setebal lebih dari 2 (dua) meter, bersifat gembur dan mudah lolos air (misalnya tanah-tanah residual), menumpang di atas batuan dasarnya yang lebih padat dan kedap (misalnya andesit, breksi andesit, tuf, napal dan batu lempung). Pada zona ini, lereng tebing sungai tersusun atas tanah residual, tanah kolovial atau batuan sedimen hasil endapan sungai dengan ketebalan lebih dari 2 (dua) meter. Pada lereng sering muncul rembesan air atau mata air terutama pada bidang kontak antara batuan kedap dengan lapisan tanah yang lebih permeable. Vegetasi alami yang dapat dijumpai antara lain tumbuhan berakar serabut (perdu, semak, dan rerumputan), pepohonan bertajuk berat, dan berdaun jarum (pinus). Jenis gerakan yang terjadi pada zona ini adalah luncuran batuan dan luncuran tanah, dengan bidang gelincir lurus, melengkung dan tak-beraturan. Biasa dijumpai aliran tanah, aliran batuan dan aliran bahan rombakan batuan, bahkan kombinasi antara dua atau beberapa jenis gerakan tanah dengan gerakan relatif cepat (lebih dari 2 meter per hari hingga mencapai 25 meter per menit).

b) Zona Tipe B; berada pada daerah kaki-kaki pegunungan / perbukitan dan tebing sungai dengan kemiringan lereng berkisar antara 21% - 40%, dengan ketinggian 500-2000 meter di atas permukaan laut. Zona ini antara lain dicirikan oleh Lereng pegunungan tersusun dari tanah penutup setebal kurang dari 2 (dua) meter, bersifat gembur dan mudah lolos air, Lereng tebing sungai tersusun oleh tanah residual, tanah kolovial atau batuan sedimen hasil endapan sungai dengan ketebalan kurang dari 2 (dua) meter. Pada zona ini curah hujan mencapai 70 mm per jam atau 100 mm per hari dengan curah hujan tahunan lebih dari 2500 mm dan Sering muncul rembesan air atau mata air pada lereng terutama pada bidang kontak antara batuan kedap air dengan lapisan tanah yang lebih

permeable. Gerakan tanah yang terjadi pada daerah ini umumnya berupa rayapan tanah yang mengakibatkan retakan dan amblesan tanah.

- c) **Zona Tipe C;** berada pada daerah dataran tinggi, dataran rendah, dataran, tebing sungai, atau lembah sungai dengan kemiringan lereng berkisar antara 0% - 20%, dengan ketinggian 0-500 meter di atas permukaan laut. Zonasi ini antara lain dicirikan oleh daerah kelokan sungai (meandering) dengan kemiringan tebing sungai lebih dari 40%, Kondisi tanah (batuan) penyusun lereng umumnya tersusun dari tanah lempung yang mudah mengembang apabila jenuh air (jenis montmorillonite), dan curah hujan mencapai 70 mm per jam atau 100 mm per hari dengan curah hujan tahunan lebih dari 2500 mm. Daerah ini Sering muncul rembesan air atau mata air pada lereng, terutama pada bidang kontak antara batuan kedap air dengan lapisan tanah yang lebih permeable. Gerakan tanah yang sering terjadi umumnya berupa rayapan tanah yang mengakibatkan retakan dan amblesan tanah dengan kecepatan gerakan lambat hingga menengah dengan kecepatan kurang dari 2 (dua) meter per hari.



Gambar 6.11 Profil lereng curam dengan topografi cembung yang terbentuk pada wilayah beriklim tropis, tersusun atas batuan resisten dengan material sisa erosi pada kaki lereng; daerah yang paling aman adalah pada kaki lereng Zona C (Karnawati, 2006).

b. Stabilitas Lereng dan Faktor Keamanan

Tingkat kestabilan lereng memegang peranan penting dalam gerakan massa. Gerakan massa hanya akan terjadi manakala lereng dikatakan tidak stabil. Nilai kestabilan lereng dinyatakan dengan faktor keamanan SF (*safety factor*); jika SF lebih kecil dari 1 maka berpotensi terjadi gerakan massa, dan jika SF lebih

besar dari 1 maka lereng dinyatakan stabil. Saat SF mencapai nilai ~ 1 (lim 1) maka lereng dinyatakan dalam keadaan kritis.

Nilai stabilitas lereng ditentukan dengan didasarkan atas besarnya gaya yang bekerja di antara dua tipe gaya, yaitu gaya penggerak (*driving forces*) dan gaya penahan (*resisting forces*). Gaya penggerak adalah gaya yang dapat menyebabkan material (massa) bergerak, sedangkan gaya penahan adalah gaya yang merespon gaya penggerak tersebut. Jadi, saat gaya penggerak melampaui besarnya gaya penahan, maka lereng menjadi tidak stabil sehingga terjadi gerakan massa.

(1) Gaya Penggerak (*Driving Forces*)

Gaya penggerak sangat mudah dikenali dan diperikan. Prinsipnya sangat sederhana; saat kita berjalan / berlari menuruni lereng, kita seakan-akan tidak membutuhkan tenaga untuk bergerak maju, namun justru mengeluarkan daya agar kita tetap stabil saat bergerak, yaitu menahannya atau mengeremnya. Gaya yang digunakan untuk mengerem itulah yang disebut dengan gaya penahan, sedangkan gaya peggerak seakan-akan bukan datang dari beban kita. Jadi, gaya penggerak dipicu oleh gaya gravitasi dengan kecepatan berjalan, sedangkan gaya penahan adalah yang menahan / mengerem laju perjalanan tersebut.

Gaya penggerak utama dalam perpindahan massa adalah gravitasi, sedangkan gaya penahan utama dihasilkan dari kuat gesar materialnya. Dalam hal ini, gaya gravitasi tidak beraksi sendiri, ada faktor-faktor lain yang berkontribusi, yaitu sudut lereng, iklim, material dan air. Sebagai contoh kasus adalah gerakan massa lebih banyak terjadi pada lereng yang lebih curam dibandingkan pada lereng yang lebih landai. Hal itu terjadi karena lereng yang lebih landai lebih stabil dibandingkan dengan lereng yang curam. Gaya penggerak yang dibentuk oleh lereng yang lebih curam lebih besar dibandingkan dengan gaya penggerak lereng yang lebih landai. Hal itu sesuai dengan Hukum Newton II yang dapat dirumuskan: $\mathbf{F} = mgh$; F adalah gaya penggerak (N/m^2), m adalah berat massa (kg), g adalah percepatan gaya gravitasi bumi ($9,28 m/s^2$) dan h adalah beda tinggi (jarak vertikal). Makin besar h (tinggi) makin besar gaya penggerak (F) yang dihasilkan.

Air memegang peranan penting dalam membentuk kegagalan lereng. Pada proses pembentukan / pembangunan alur sungai dan akibat pergerakan gelombang yang mengikis dasar lereng, daya pengangkut tersebut makin meningkatkan intensitas gaya penggerak. Air juga dapat meningkatkan gaya penggerak dengan penambahan bebannya, yaitu menambah volume massa secara keseluruhan sehingga berpotensi bergerak. Interaksi antara air dan permukaan batuan dapat menyebabkan pelapukan kimiawi menghasilkan tanah.

Tanah merupakan bagian paling penting yang mempengaruhi kegagalan lereng, mengurangi intensitas gaya dukung lereng dan dapat meningkatkan besaran gaya penggerak. Bertambahnya air juga memberikan kontribusi terhadap peningkatan gaya penggerak menghasilkan kegagalan lereng. Penambahan beban pada suatu lereng terjadi saat material penyusun lereng berkurang akibat meningkatnya tekanan air pori dalam batuan (tekanan yang berkembang dalam rongga antar pori akibat meningkatnya volume air).

(2) Gaya Penahan (*Resisting Forces*)

Gaya penahan adalah lawan dari gaya penggerak, yaitu resistensi lereng dalam menahan gerakan. Besarnya gaya penahan ditentukan dari besarnya tegangan geser material dalam lereng. Tegangan geser adalah fungsi dari besarnya gaya kohesi terhadap gaya friksi dalaman. Gaya kohesi dibentuk oleh kemampuan partikel dalam menahan / merespon masing-masing gaya secara bersama-sama, besarnya tergantung dari daya ikat material induk terhadap bidang gelincir dan material berpotensi bergerak. Gaya friksi dalaman dibentuk oleh adanya gesekan antar butiran dalam material.

Air berkontribusi dalam meningkatkan besaran gaya penahan, selama air mengisi pori-pori utama antar butiran. Lapisan tipis air berfungsi sebagai pengikat (semen), sehingga partikel-partikel menjadi bersifat kohesif (saling mengikat). Namun, jika volume air yang mengisi pori-pori antar butiran berlebihan hingga jenuh, maka material jenuh air tersebut akan mengembang, selanjutnya akan berfungsi sebagai bidang gelincir longsoran. Jika demikian, gaya penahan akan berubah menjadi gaya penggerak.

Perbandingan gaya penahan dan gaya penggerak disebut sebagai faktor keamanan (SF). Faktor keamanan ditentukan dengan rumus:

$$\mathbf{SF = \frac{Gaya\ Penahan}{Gaya\ Penggerak}}$$

Gaya Penggerak

jika $SF > 1$ maka AMAN

jika $SF < 1$ maka TIDAK AMAN

Nilai FAKTOR KEAMANAN ~10 biasanya digunakan sebagai parameter dalam mendisain struktur dan menentukan tipe material bangunannya. Nilai 10 berada pada daerah dengan kemiringan lereng kurang dari 10°, tipe batuan resisten yang tersusun atas batupasir terkonsolidasi, batuan beku dengan tingkat pelapukan rendah sampai sedang atau breksi.

Faktor-faktor yang mengontrol stabilitas lereng (gaya penahan / gaya penggerak) adalah jenis dan volume material longsoran (kohesif/tak-kohesif), tegangan / kekuatan batuan, muka airtanah, sudut lereng (A), iklim, kerapatan vegetasi dan waktu. Hubungan antara sudut lereng (A), berat material (W), beban / gaya penggerak runtuh (~gravitasi dan beban

runtuhan: D) dan komponen beban total (gaya penahan: N) adalah (Gambar 6.12-13):

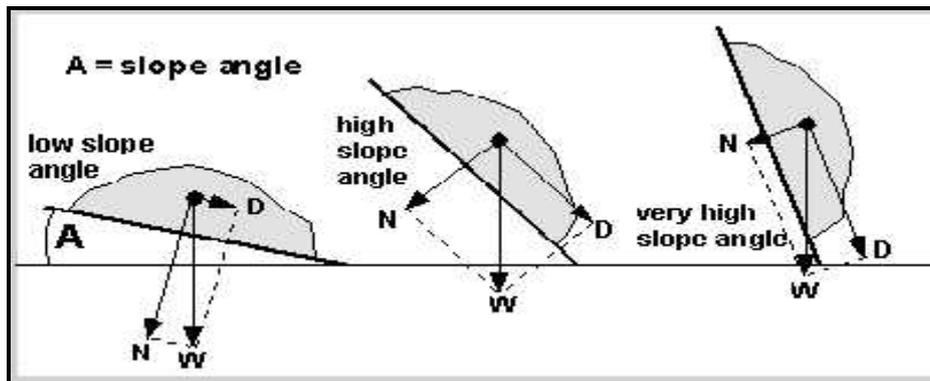
$$W \cos A = N; \text{ atau } W \sin A = D$$

Berat total massa (W) yang terletak pada permukaan bidang luncuran. A (sudut lereng) dapat dikelompokkan dalam dua komponen yaitu N dan D. Hubungannya dengan W, N dan D tetap pada sudut lereng (A) tetap.

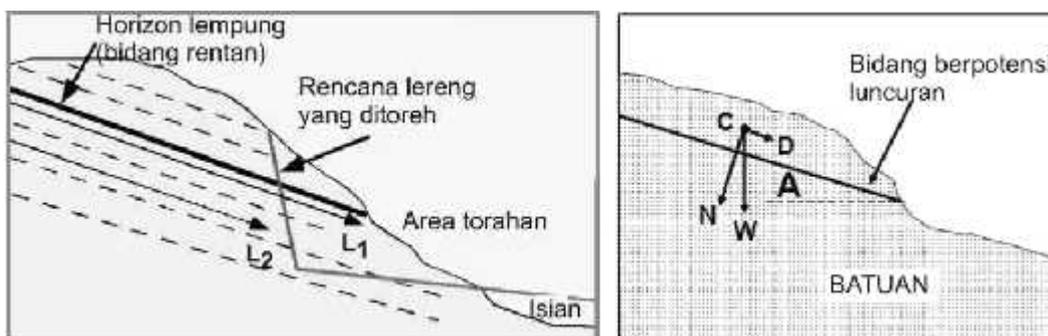
$D = W \sin A =$ gaya penggerak longsor (dibentuk oleh gaya gravitasi).

$N = W \cos A =$ komponen normal dari W

- Membangun besaran kuat geser massa pada bidang gelincir
- Membangun gaya penahan.



Gambar 6.12 Hubungan antar faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng: sudut lereng (A), berat massa (W), komponen vektoral beban yang menahan luncuran (N) dan komponen vektoral beban yang mengendalikan kedudukan luncuran (D). Sumber: Keller (2000).



Gambar 6.13 Daerah dengan lereng yang berpotensi terganggu pada lapisan / horizon lempung yang dipotong (kiri) dan hubungan sudut lereng (A), berat massa (W), beban penahan (N) dan beban pengendali luncuran (D; kanan). Sumber: Keller (2000).

Faktor keamanan, termasuk lapisan lempung, dapat dihitung dengan didasarkan pada metode ketebalan unit material penyusun bidang gelincir, persamaannya adalah:

$$SF = SLT/W \sin A$$

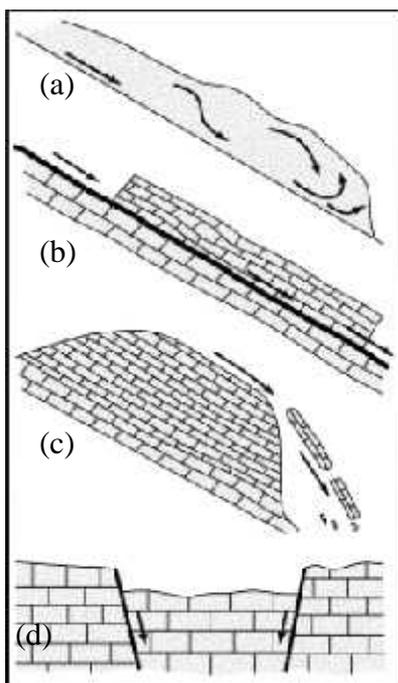
S = kuat geser lapisan lempung; contoh $9 \times 10^4 \text{ N/m}^3$

L = panjang bidang gelincir; contoh 50 m
 T = ketebalan unit batuan (diasumsikan 1); contoh 1 m
 W = luas area (ct: 500 m^2) x ketebalan (1 m) x berat unit ($1,6 \times 10^4 \text{ N/m}^3$):
 $8 \times 10^6 \text{ N}$
 $A = 30^\circ$, $\sin A = 0,5$

Maka $SF = 1,125$ (kondisi stabil)

c. Tipe Gerakan Massa

Gerakan massa memiliki tipe yang bermacam-macam tergantung pada gradien lereng, material penyusun yaitu resistensi massa yang meluncur; geomorfologi dan tipe bidang gelinciran; iklim: suhu (perbedaan temperatur antara siang dan malam, serta temperatur pada musim hujan dan musim kemarau), curah hujan dan kelembaban; dan media penggelincir: air, gaya beratnya sendiri atau reaktivasi sesar. Suatu lereng dengan gradien lereng tinggi dan tersusun atas batuan resisten, cenderung berpotensi terjadi jatuhnya batuan. Lereng curam yang tertutup oleh soil yang tebal pada wilayah yang beriklim tropis cenderung berpotensi untuk terjadi longsoran (*debris avalanche*). Daerah dengan gradien lereng yang kecil (landai) dan tersusun atas batuan lunak (seperti lempung dan lanau) pada saat musim hujan mengembang (jenuh air) dan pada saat musim kemarau terjadi penyusutan, batuan ini berpotensi terjadi rayapan atau aliran massa. Pada pengambilan airtanah yang berlebihan di daerah dengan litologi yang tersusun atas batulempung dan lanau, serta pada daerah dengan litologi batugamping dengan tingkat pelarutan yang tinggi dapat berpotensi terjadi amblesan. Gambar 6.14 dan Tabel 6.1 menjelaskan tipe-tipe gerakan massa yang umum terjadi.



Gambar 6.14 Dari atas ke bawah (a) mekanisme aliran material tak-terkonsolidasi membentuk aliran pekat (debris); (b) longsoran: pergerakan blok secara koheren; (c) jatuhnya (*falling*): gerak jatuh bebas material pada lereng yang sangat curam dan menggantung; dan (d) amblesan: turunnya massa hingga lebih rendah dari permukaan di sekitarnya (Keller, 2000).

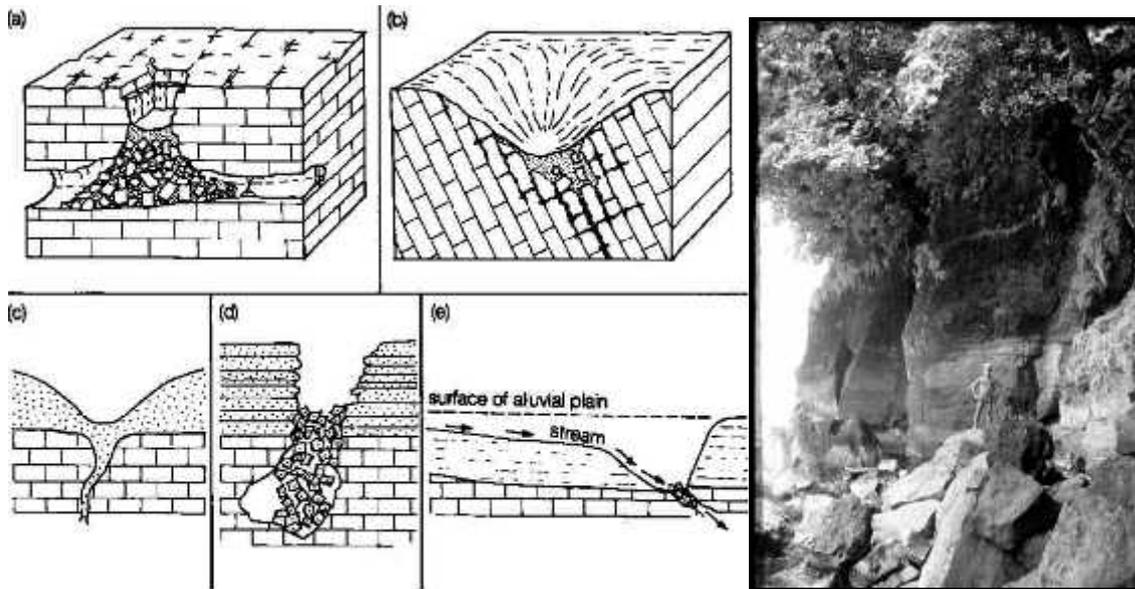
Tabel 6.1. Macam-macam tipe gerakan massa (Keller, 2000)

TIPE GERAKAN		JENIS MATERIAL YANG BERGERAK	
		Batuan	Tanah
1. JATUHAN		<ul style="list-style-type: none"> • Jatuhan batuan 	<ul style="list-style-type: none"> • Jatuhan tanah
2. LONGSORAN	rotasional translasional	<ul style="list-style-type: none"> • Rock slump • Block slump • longSORAN batuan 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rock slump</i> • debris blok • longSORAN
3. ALIRAN	Lambat Cepat	<ul style="list-style-type: none"> • rayapan batuan 	<ul style="list-style-type: none"> • rayapan tanah • material jenuh dan tak-terkonsolidasi • aliran massa • aliran lumpur (lebih dari 30% air) • aliran debris • <i>debris avalanche Slump</i>
4. KOMPLEKS	Kombinasi dari dua atau lebih tipe gerakan		

1. Jatuhan Batuan

Jatuhan batuan adalah proses gerakan batuan yang berlangsung sangat cepat tanpa peringatan dini. Jatuhan batuan biasanya terjadi pada wilayah dengan morfologi yang tertutup oleh es. Pembebanan oleh massa es sebagai proses peresapan air ke dalam rekahan batuan, berperan membekukannya. Proses pembekuan lalu menyebar dan menghancurkan bagian-bagian rongga-rongga antar partikel dalam batuan. Beban es menyebabkan serpihan-serpihan fragmen batuan yang selanjutnya membentuk bentang alam kipas pada dasar / kaki lereng. Fragmen batuan tersebut disebut talus, sedangkan lerengnya merefleksikan sebagai lereng talus. Keberadaan lereng talus adalah pertanda bagi kita bahwa daerah di sekitarnya rawan terhadap bencana jatuhan batuan. Jatuhan batuan juga dapat terjadi pada puncak gunung api dengan lidah lava. Saat hujan berlangsung, air hujan mengisi rongga-rongga bekas keluarnya gas lalu meresap ke dalam lava panas yang belum terkonsolidasi sempurna. Air hujan yang mengisi rongga-rongga dan bersatu dalam material plastis tersebut lalu membekukannya secara sangat cepat, akibatnya terjadi penghancuran di permukaan lava membentuk breksiasi. Material lava terbreksikan yang lepas kemudian jatuh menuruni lereng membentuk talus gunung api. Pada iklim tropis jatuhan batuan sering terjadi karena faktor endogenik, yaitu wilayah dengan sesar naik aktif (Gambar 6.15). Jatuhan batuan tersebut terutama berlangsung pada wilayah dengan batuan resisten yang terdeformasi. Jatuhan batuan di wilayah tropis juga dapat terjadi karena faktor artifisial, yaitu pemotongan tebing untuk pelebaran jalan pada daerah dengan gradien lereng tinggi, daerah tepi pantai dengan tingkat abrasi gelombang tinggi dan pada daerah-daerah dengan

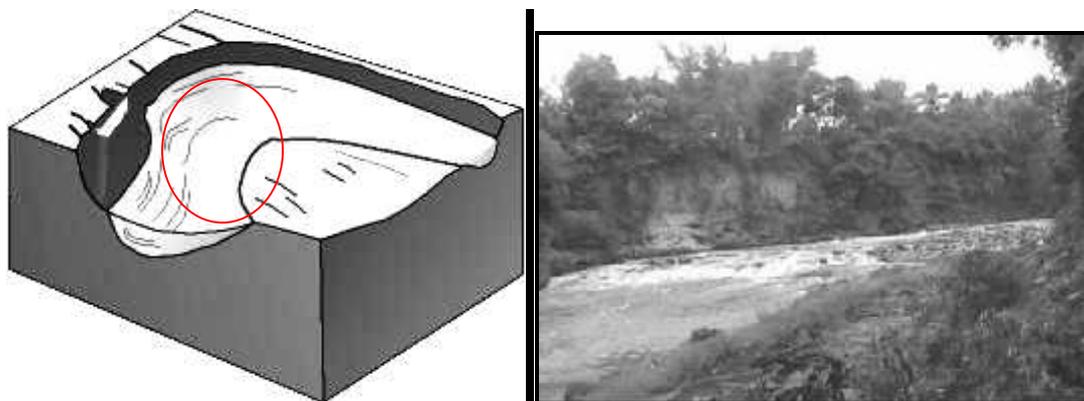
aktivitas penambangan. Jatuhan batuan dapat saja beresiko tinggi ketika berada pada jalur-jalur transportasi.



Gambar 6.15 Jatuhan batuan di tebing karst (a) runtuh,(b) pelarutan membentuk jatuhan,(c) amblasan,(d) runtuh batuan penutup, (e) aluvial (Jennings, 1985), dan jatuhan akibat abrasi pantai di Pulau Sertung.

Pemotongan Tebing

Pemotongan tebing terjadi akibat erosi alur, contoh: jatuhan tanah (*soilfall*), yaitu alur sungai memotong bagian tebing sungai membentuk alur sungai baru (Gambar 6.16 atas). Proses ini berlangsung secara terus-menerus, terutama pada tebing-tebing sungai bermeander, saat musim hujan. Salah satu sisi tebing sungai mengalami erosi sehingga terpotong, dan sisi sebrangnya terjadi proses sedimentasi membentuk gosong pasir (Gambar 6.16). Pada kondisi ini kecepatan sedimentasi gosong pasir berbanding terbalik dengan proses erosi akibat pemotongan tebing sisi yang lain.



Gambar 6.16 Jatuhan tanah pada tebing sungai: ilustrasi jatuhan massa tanah terhadap posisi sungai (kiri) dan jatuhan massa di Sungai Elo, lereng barat Gunung Merapi pada musim hujan 2006 (kanan).

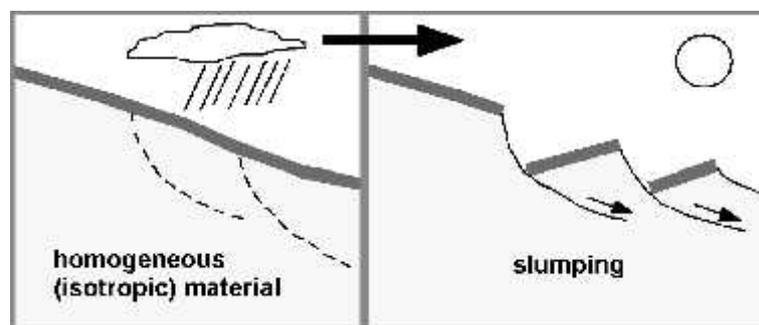
Contoh pemotongan tebing yang lain adalah pada pemotongan dinding tebing oleh gelombang air laut. Dinding yang terjal dengan litologi yang tak-resisten terhadap air, seperti batugamping, akan sangat mudah mengalami abrasi gelombang. Proses ini dapat dijumlahkan di sepanjang pantai selatan Jawa bagian timur antara Parangtritis hingga Pacitan-Trenggalek dan di bagian barat antara Gombang sampai Pangandaran. Hasil akhir dari proses jatuhnya massa ini adalah berkurangnya daya dukung batuan.

Pemotongan tebing juga dapat dipicu oleh adanya *slumping*. Litologi yang tersusun atas material lunak dan lepas, seperti tanah berlempung dengan tingkat plastisitas tinggi rawan terhadap proses rayapan atau aliran massa secara lambat. Secara perlahan namun pasti, proses ini mengikis zona-zona lemah yang bergerak. Proses *slumping* biasanya terjadi pada tebing-tebing dengan vegetasi yang agak lebat pada lapisan tanah impermeabel yang tebal dan lereng yang agak landai (kurang dari 20°). Gerakan massa ini jika bekerja pada lereng yang lebih curam akan berkembang menjadi longsoran, dengan mekanisme yang sangat cepat.

2. Longsoran

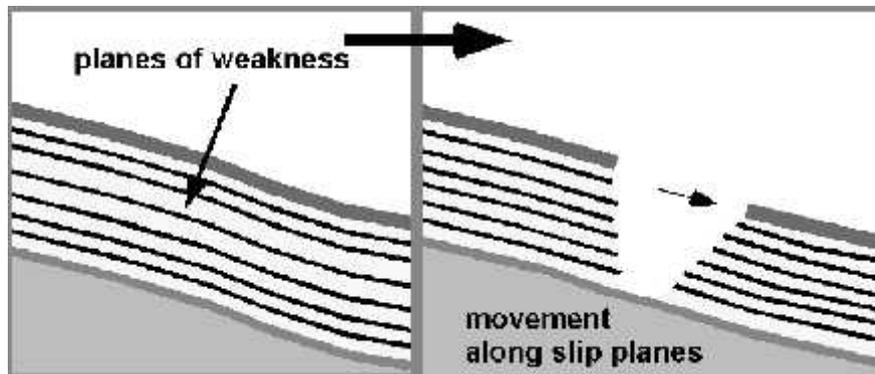
Longsoran (*landslide*) adalah suatu pergerakan massa tanah / batuan dengan cara meluncur menuruni lereng. Longsoran dapat berlangsung secara rotasional atau translasional. Perilaku longsoran bermacam-macam bergantung pada tipe materialnya, gradien lereng dan tingkat kejenuhan air. Longsoran biasa terjadi pada musim hujan, dengan dipicu oleh masuknya air ke dalam rongga pori antar butiran dalam massa tanah atau batuan. Berdasarkan atas tipe materialnya, ada tiga tipe longsoran yaitu pada material homogen (isotropik), material heterogen (anisotropik) dan pada material campuran homogen dan heterogen.

(1) Material homogen (isotropik): massa terdiri atas batuan / tanah yang memiliki kesamaan sifat pada semua kedudukannya (Gambar 6.17). Pada tipe ini longsoran yang sering terjadi bertipe *slumping* (*gelembur*), dengan bidang gelincir melengkung seperti panci. Media penggerak biasanya air hujan.



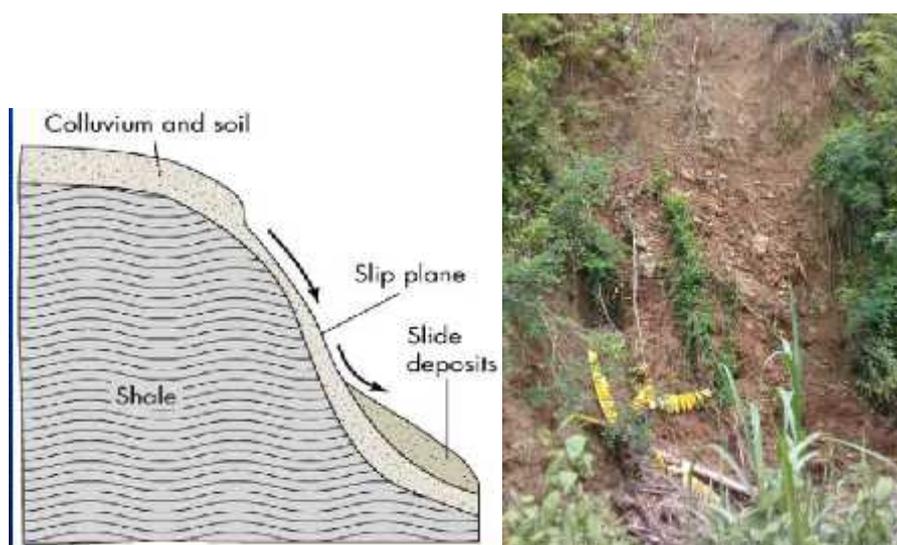
Gambar 6.17 Material homogen yang mengontrol luncuran rotasional (Keller, 2000).

- (2) Material heterogen (anisotropik): terjadi pada material yang memiliki bidang lemah, seperti sesar atau bidang rekah akibat daya tarik oleh pelapukan pada batuan sedimen dengan struktur perlapisan (Gambar 6.18). Bidang lemah memisahkan dua sisi tubuh batuan, material yang berada di bawah bergerak menuruni lereng.



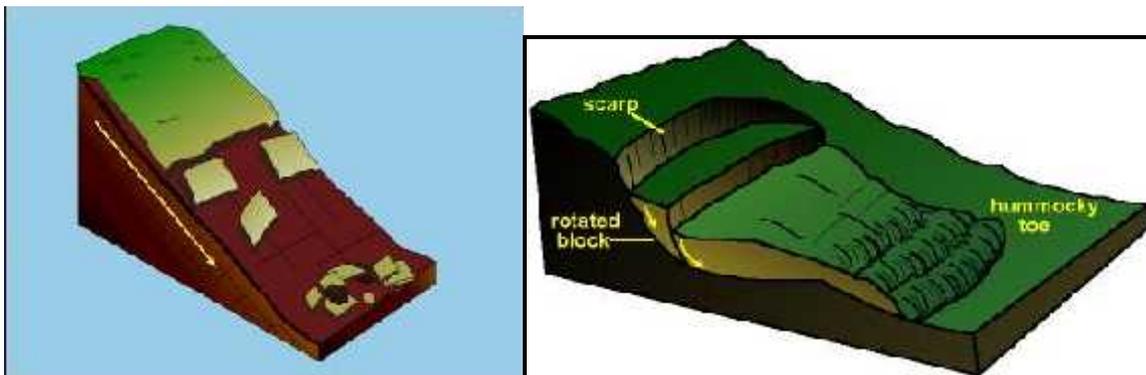
Gambar 6.18 Material heterogen dengan bidang lemah yang mengontrol luncuran translasional (Keller, 2000).

- (3) Campuran material homogen dan heterogen dengan material runtuh dan kolumium (Gambar 6.19). Longsoran jenis ini biasanya terjadi pada daerah dengan gradien lereng yang tinggi dan curam, dengan bidang gelincir yang sangat licin. Morfologinya tersusun atas lapisan tanah tipis yang bercampur dengan endapan kolumium, menumpang pada batuan lunak yang bersifat plastis / impermeabel. Karena sifatnya yang lepas-lepas dan menumpang di atas bidang yang licin, seperti serpih atau batulempung, maka campuran material tersebut mudah longsor. Material hasil longsoran diendapkan pada kaki lereng membentuk kipas alluvium atau kipas kolumium.



Gambar 6.19 Longsoran batuan dan kolumium, dengan pergerakan tanah.

Berdasarkan mekanisme pergerakannya, ada dua tipe luncuran dalam mekanisme longsoran, yaitu secara translasional dan rotasional (Gambar 6.20). Pergerakan translasional terjadi karena longsoran bergerak menuruni lereng, lalu bersinggungan dengan permukaan luncuran, contoh: pergeseran perlapisan batupasir, batulempung atau lava dengan kekar lembar dan kekar *platty*. Pada batuan yang massif, seperti batuan beku intrusi, permukaan luncuran translasional biasanya berupa bidang sesar, pada batuan sedimen biasanya berupa bidang perlapisan, dan pada lava biasanya berupa bidang kekar. Pergerakan rotasional biasanya terjadi pada lereng yang tersusun atas lapisan tanah yang tebal dengan tingkat kejenuhan air yang tinggi. Proses pergerakan ini sering terjadi selama musim hujan. Pergerakan rotasional dicirikan oleh permukaan bidang pergerakan melengkung, longsoran disebut *slump*. *Slumping* terbentuk karena erosi dasar lereng; contoh: gelombang badai pantai yang mengerosi dasar tebing pantai sehingga menghilangkan material pendukung. Blok *slump* berotasi ke bawah membentuk tebing curam (*scarp*) pada bagian atas lereng. Makin ke bawah membentuk morfologi berundak, dengan masing-masing undak memiliki lereng yang hampir vertikal. Undak-undak makin ke bawah makin pendek dengan jangkauan yang makin jauh, membentuk morfologi kaki *hummocky*.



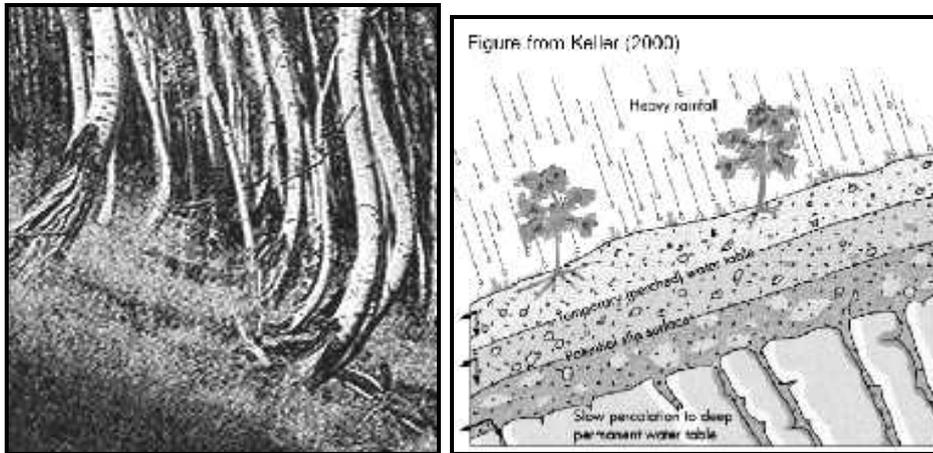
Gambar 6.20 Pergerakan translasional dan rotasional biasanya terjadi pada batuan dengan struktur berlapis (Keller, 2000).

c. Rayapan

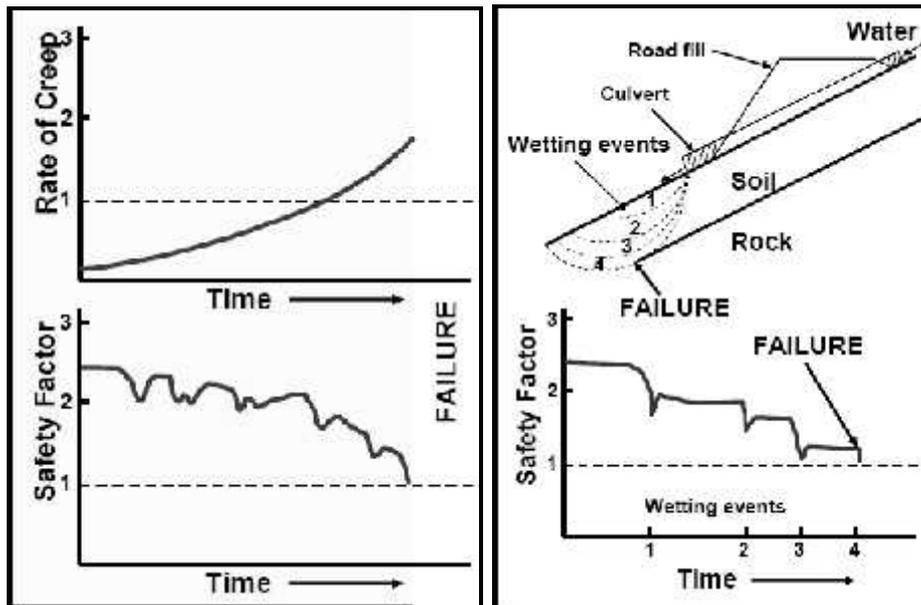
Rayapan sangat umum dijumpai di sekitar kita, contoh dengan ditandai oleh bentuk melengkung batang pohon pada lereng (Gambar 6.21).

Rayapan biasanya diicu oleh pergerakan tanah yang membawa bagian tubuh tumbuhan. Saat gerakan / aliran tanah terjadi, apapun yang ada di dalamnya ikut bergerak, sehingga batang-batang tumbuhan menjadi condong ke bawah. Karena tumbuhan selalu tumbuh secara vertikal, agar dapat berinteraksi dengan sinar matahari, maka yang tadinya tumbuhan ini ikut miring, dalam pertumbuhan selanjutnya bagian bawah batang akan melengkung untuk mencari arah sinar matahari. Aliran massa ini kadang-kadang berlangsung sangat lambat sehingga prosesnya tidak dapat dikenali dengan baik. Rayapan

terjadi sangat lambat, dengan kecepatan beberapa centimeter per tahun, untuk memicu terjadinya kegagalan lereng dibutuhkan waktu kadang-kadang 3-4 tahun (Gambar 6.22).



Gambar 6.21 Rayapan yang ditunjukkan oleh bentuk batang pohon yang melengkung ke atas (kiri), rayapan akibat pengaruh airtanah (kanan; sumber: Keller, 2000).



Gambar 6.22 Menurunnya nilai faktor keamanan terhadap waktu terhadap peningkatan kecepatan rayapan rata-rata (kiri). Menurunnya faktor keamanan terhadap waktu berbanding terhadap meningkatnya titik jenuh tanah hingga membentuk bidang gelincir (kanan).

d. Aliran Massa (*Earthflow*)

Gerakan material pada batuan yang tak-terkonsolidasi disebut aliran massa. Aliran massa dapat berupa larutan pekat yang menuruni lereng dengan sangat lambat hingga sangat cepat. Aliran massa pada umumnya memiliki mekanisme yang sama, antara periode yang satu dengan periode berikutnya, contoh: lahar

dan koluvium. Secara umum yang membedakannya hanyalah ukuran masing-masing partikel, besarnya volume yang mengalir dan limpahan air yang mengalirkannya. Aliran massa (*earthflows*) dapat berkembang pada lereng yang sedang hingga miring dengan gerakannya lambat hingga cepat, material yang bergerak biasanya bersifat jenuh air dan kadang-kadang diawali dengan gelinciran tanah dangkal, yaitu longsoran dangkal dalam tanah lapisan penutup yang memiliki posisi paralel terhadap lerengnya. Aliran massa dapat berupa:

1. Aliran lumpur, dapat berlangsung pada lereng yang miring sedang hingga tinggi, bergerak secara cepat, material yang bergerak mengandung air lebih dari 30% dengan ukuran butir halus (lebih kecil dari pasir). Gerakan ini sering diawali dengan gelinciran tanah dangkal (longsoran dangkal dari tanah lapisan penutup yang posisinya sejajar lereng), yang umumnya mengalir menuruni lereng atau mengikuti alur-alur pengaliran.
2. Aliran debris; yaitu aliran massa yang bergerak dengan kecepatan yang sangat rendah hingga sangat cepat, tersusun atas material berukuran butir kasar (pasir atau lebih besar >50%, umumnya berukuran bongkah). Aliran debris sering diawali dengan *slump* atau longsoran yang merubah massa hingga terfragmentasi dan bercampur dengan air dan udara, yang mengikuti lembah / sistem pengaliran sungai yang ada.
3. Debris avalans; yaitu aliran massa yang berlangsung pada lereng yang sangat curam, sehingga pergerakannya berlangsung kombinasi dari jatuhnya, aliran dan longsoran. Materialnya tersusun atas campuran batuan, tanah dan material organik (tumbuhan, rumput-rumputan dan sisa organisme lain) dan sering membentuk kipas aluvial (kepala, torehan dan kipas dedris-pada bagian dasarnya).

Contoh-contoh gerakan massa di dunia (Gambar 6.23-37; USGS *Virtual Report*, 2006)



Gambar 6.23. Longsoran di Thistle, Utah (1983; USGS *Virtual Report*, 2006)



Gambar 6.24. Longsoran di Mameyes, Puerto Rico (1985; USGS *Virtual Report*, 2006)



Gambar 6.25. Aliran massa (earthflow), di Lake City, Colorado (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.26. Gempabumi yang membentuk debris avalans di Huascarán, Peru (1970 USGS *Virtual Report*, 2006)



Gambar 6.27. Aliran massa di Cincinnati, Ohio (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.28. Sinkhole di Winter Park, Florida (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.29. Aliran debris di North Fork Toutle River, Washington (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.30. Lahar Mt. St. Helens, Washington (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.31. Aliran debris, Glenwood Springs(USGS *Virtual Report*, 2006)



Gambar 6.32. Aliran debris di I70, Glenwood (USGS *Virtual Report*, 2006)



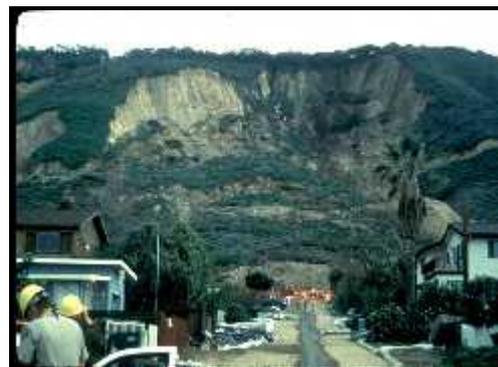
Gambar 6.33. Sesar yang memutus jalan dekat Taman Nasional Zion, Utah (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.34. Jatuhan massa di Zion National Park, Utah (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.35. Kegagalan lereng di Chehalis, Utah (USGS *Virtual Report*, 2006)



Gambar 6.36. Longsoran rotasional di La Conchita (USGS *Virtual Report*, 2006)



Gambar 6.37. Longsoran di Madison Canyon dekat Taman Yellowstone (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.38. Aliran debris di dekat I-70, Glenwood (USGS *Virtual Report*, 2006)



Gambar 6.39. McClure Pass, Aspen, Colorado (USGS *Virtual Report* 2006).



Gambar 6.40. La Conchita, California (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.41. La Conchita, California (USGS *Virtual Report*, 2006).



Gambar 6.42. Longsoran, Stella, Washington (USGS *Virtual Report*, 2006).

e. Amblesan (*Subsidence*)

Amblesan adalah suatu depresi yang terjadi di permukaan tanah. Mekanisme amblesan dapat berlangsung dengan sangat lambat hingga sangat cepat. Amblesan dapat disebabkan oleh proses alam seperti pelapukan batugamping hingga membentuk sinkhole, dan dapat pula disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pengambilan airtanah yang berlebihan pada lapisan yang jenuh air. Beberapa tipe batuan karbonat yang menutup permukaan, seperti dolomit dan batugamping, memiliki sifat terlarut dan berkemampuan terjadinya pelapukan kimia. Proses pelapukan kimia ini menghasilkan rongga-rongga, dari yang berdiameter beberapa milimeter hingga beberapa puluh meter (membentuk gua). Sinkhole terbentuk manakala batuan dinding dari rongga (gua) tersebut tidak mampu lagi menahan tudung (atap) gua. Permukaannya kemudian runtuh, membentuk sinkhole (Gambar 6.15.b). Amblesan juga dapat disebabkan oleh proses likuifaksi lumpur ke permukaan dalam jumlah yang sangat besar, seperti yang terjadi di Sidoarjo sejak 2006 lalu. Amblesan tersebut hingga kini (2018), telah mencapai kedalaman 50 m, serta membentuk bukit pada sisi yang lain dalam lebih dari 300 m. Amblesan yang lain diakibatkan oleh proses tektonik, yang di permukaan terekam sebagai gempabumi. Kegiatan alam tersebut dirasakan oleh masyarakat Padang Pariaman, akibat gempabumi yang berlangsung pada tanggal 1 Oktober 2009. Gempabumi tersebut menyebabkan longsoran hebat di satu sisi, serta depresi hebat di sisi lain, sebagaimana yang terlihat di sepanjang jalan-jalan di daerah tersebut.

f. Identifikasi dan Pengenalan Gerakan Massa

Kombinasi antara proses alam (seperti gempabumi, badai, dan lain-lain) dan pemanfaatan lahan dengan perubahan kondisi bentang alam, hingga memicu kegagalan lereng dipetakan. Untuk dapat menyusun peta rawan bencana gerakan massa, diperlukan identifikasi gerakan massa, baik melalui data pengamatan dan pengukuran di lapangan maupun dari interpretasi data dasar. Di lapangan, gerakan massa dapat dikenali melalui zona-zona kelurusan dengan kenampakan pepohonan dengan batang melengkung, sebagaimana yang telah dibahas secara detail di depan. Di samping itu, untuk gerakan massa yang tidak memakan korban jiwa dan tidak dapat dijangkau melalui darat, dapat diidentifikasi dari:

1. Studi foto udara dan citra landsat / SRT / radar untuk mengetahui posisi gerakan massa sebelumnya dan potensi kegagalan lereng
2. Data sejarah gerakan massa yang pernah terjadi sebelumnya dan data sekunder lainnya, seperti peta geologi dan data hasil penelitian lainnya.

Infestigasi di lapangan terhadap lereng yang berpotensi tidak stabil, dapat diidentifikasi dari kondisi lereng yang curam, bidang perlapisan yang miring ke dasar lembah, topografi hummocky (tidak teratur, permukaannya terlihat bergelombang) tertutup oleh pepohonan yang lebih muda, rembesan mataair,

dan pada wilayah-wilayah yang sebelumnya pernah terjadi longsor. Informasi-informasi tersebut selanjutnya akan digunakan sebagai data dasar untuk menentukan peta lokasi rawan bencana.

Untuk dapat melakukan mitigasi longsor / gerakan massa, diperlukan pengenalan yang cukup tentang tanda-tanda gerakan massa dan sejarahnya. Suatu bangunan dikatakan berpotensi terlanda gerakan massa, jika:

- (1) Berada di atas kawasan dengan longsor masa lalu
- (2) Berada di atas atau pada dasar lereng
- (3) Di dalam atau berada pada dasar lembah alur pengaliran
- (4) Berada pada dasar atau bagian atas batuan isian lereng yang lama
- (5) Berada pada dasar atau atas lereng yang terpotong
- (6) Berkembang punggung bukit dengan sistem resapan (*septic tank*).

Sedangkan bangunan yang dikatakan aman dari gerakan massa adalah, jika:

- (1) Dibangun pada batuan dasar yang stabil, tak-terkekalkan dan belum pernah berpindah dari kedudukannya semula
- (2) Berada pada daerah dengan relief yang relatif landai dan terhindar dari kemungkinan perubahan sudut lereng
- (3) Berada pada bagian atas atau sepanjang hidung tanggul, yang membelakangi bagian atas lereng.

Gerakan massa berkembang dengan intensif pada daerah-daerah yang mengalami deformasi. Zona deformasi tersebut antara lain berada pada tebing yang dilalui jalur sesar, yang biasanya merupakan tebing sungai dan tebing jalan. Bentuk-bentuk geomorfologi yang potensial dapat menandai adanya gerakan massa tersebut adalah:

- (1) Adanya penjajaran mataair, rembesan, atau tanah jenuh air pada wilayah-wilayah yang sebelumnya tidak pernah punya sejarah berkondisi basah. Wilayah-wilayah tersebut mengindikasikan telah adanya deformasi baru. Pada perkembangan selanjutnya, zona basah tersebut menjadi subur dan ditumbuhi tetumbuhan perdu hingga rerumputan.
- (2) Adanya rekahan-rekahan baru atau galian-galian baru pada tebing / dinding jalan atau pembukaan lahan untuk pembangunan jalan. Jika tebing-tebing tersebut tidak dilindungi dengan tanggul yang memadai, maka akan sangat berpotensi untuk terjadinya gerakan massa. Tanggul dapat berupa beton, bronjong batu dan organik (pepohonan).
- (3) Tanah pondasi yang bergerak dari posisi awalnya. Hal itu mengindikasikan bahwa lahan dimana pondasi bangunan tersebut berdiri merupakan lahan dengan rayapan aktif.
- (4) Struktur *ancillary* seperti dek dan tiang rumah yang relatif terangkat / bergerak dari bangunan rumah utamanya. Hal itu juga mengindikasikan bahwa daerah tempat bangunan berdiri tersebut bergerak naik.
- (5) Pengangkatan atau rekahan pada lantai, pondasi dan dinding rumah. Hal itu mengindikasikan bahwa batuan dasar tempat bangunan berdiri terjadi gerakan aktif secara perlahan / gradual, yang mekanismenya biasanya tidak dirasakan secara langsung oleh penguninya.

- (6) Hancurnya pipa air dan prasarana bawah permukaan yang lain
- (7) Miringnya tiang telepon, pohon, dinding dan / beton menara
- (8) Pipa-pipa penyangga bergeser / meleset dari posisinya.
- (9) Patahnya atau melengkungnya aspal jalan.
- (10) Perubahan yang sangat cepat pada muka air pada tebing, kemungkinan juga diikuti dengan kecepatan arusnya (*turbidity (soil content)*).
- (11) Muka air permukaan tiba-tiba surut meskipun dalam musim hujan.
- (12) Jendela dan pintu bergeser membentuk rongga sehingga sulit ditutup

Hal-hal yang harus dilakukan jika menemukan gejala-gejala gerakan massa (longsoran):

- (1) Hubungi petugas pemadam kebakaran setempat, polisi atau departemen pekerjaan umum terkait.
- (2) Sebar-luaskan pada para tetangga dan himbau mereka untuk waspada
- (3) Mengevakuasi warga potensial terkena bencana

Hal-hal yang dapat dilakukan untuk mengetahui informasi gerakan massa:

- (1) Hubungi ahli geologi terkait / yang kompeten di bidangnya
- (2) Hubungi departemen pekerjaan umum
- (3) Jika kondisi dan lokasinya diketahui dengan sangat detail, hubungi perusahaan konsultan yang spesial terhadap gerakan massa, seperti yang ahli di bidang rekayasa teknik, rekayasa struktural atau teknik sipil.

Ada tiga tahapan yang dapat dilakukan untuk dapat mengurangi bahaya longsoran, yaitu:

- (1) Mengidentifikasi daerah-daerah berpotensi longsor
- (2) Mencegah terjadinya longsoran
- (3) Mengukur faktor koreksi saat longsoran telah terjadi

Mengontrol pola pengaliran dan mengurangi sudut lereng dapat mengurangi potensi longsoran. Beton penahan yang dibangun pada dinding-dinding tebing dapat membantu menahan beban akibat infiltrasi air permukaan dan melindungi lahan dari longsoran. Lereng yang curam dapat dilandaikan, dan dapat pula dengan membangun terasiring. Dalam pencegahan longsoran ini digunakan metode rekayasa, seperti dengan memperkuat dinding tebing semen, memasang bronjong kawat, dan memasang “shotcrete” untuk menanggulangi masuknya air permukaan. Metode lain adalah dengan memasang kabel kawat dan bronjong kawat untuk mengurangi bahaya jatuhnya batuan. Untuk mengurangi tekanan air pada lereng dilakukan pengalihan aliran air dengan membuat sistem drainasi baru.

C. Gempabumi

Di beberapa tahun terakhir, gempabumi seakan-akan selalu mengguncang dunia. Berbagai media massa maupun elektronik selalu mengabarkan adanya bencana gempabumi, dengan skala dan intensitas bencana yang bervariasi. Jumlah korban

bencana pun bervariasi, dari puluhan, ratusan hingga ribuan jiwa; serta bencana ikutan yang menyertainya, dari longsor, jatuhnya batuan dan tsunami.

Suatu wilayah dengan sejarah kegempaan harus diwaspadai, karena berpotensi terjadi perulangan gempa serupa. Pendataan kejadian geologi sangat diperlukan berkaitan dengan keyakinan bahwa gempabumi hanya akan terjadi dalam wilayah dengan sejarah kegempaan. Suatu material dengan tektonisme aktif hingga terdeformasi lebih mudah terdeformasi kembali jika dikenai gaya, daripada wilayah tanpa deformasi.

Indonesia, Jepang, Korea, India, Karibia dan Amerika Utara merupakan wilayah dengan potensi bahaya gempabumi yang besar. Hampir setiap tahun gempa selalu terjadi di wilayah-wilayah tersebut, dengan intensitas kecil maupun besar, dan gempa tektonik maupun vulkanik. Sebagai contoh adalah sedikitnya 1600 kali gempa dengan 2,5-6,4 pada Skala Richter telah terjadi pada tanggal 9-31 Juli 2007 (Open File Report USGS, 2007). Gempabumi di Kalifornia pada 17 Januari 1994 menelan sedikitnya 60 orang dan menyebabkan kerugian sekitar US \$ 30 miliar, gempa tersebut dipicu oleh reaktivasi sesar naik Santa Monica (Kious & Tilling, 2001). Gempabumi di Kobe (Jepang) pada 17 Januari 1995 sedikitnya menelan 6000 orang dan menimbulkan kebakaran, bangunan roboh, tanah longsor, jalan terputus dan lain-lain (Louie, 1996). Kobe terletak di zona penunjaman Lempeng Pasifik, Eurasia dan Filipina di Mediterania dengan tipe sesar *strike-slip* (USGS, 1995). Data statistik menunjukkan bahwa dalam setahun, sedikitnya 25.000 gempabumi berlangsung di seluruh muka bumi (Kious & Tilling, 2001).

Bukan hanya di Indonesia, Jepang, Korea, India, Karibia dan Amerika Utara, bahkan di seluruh dunia, gempabumi merupakan bencana geologi yang paling ditakuti. Gempabumi terjadi secara tiba-tiba, tanpa tanda-tanda yang jelas dan sulit diramalkan, sehingga sering menelan korban jiwa dan harta benda dalam volume yang besar. Berbeda dengan bencana-bencana geologi yang lain, seperti letusan gunung api, longsor dan banjir, yang diawali dengan tanda-tanda geologis yang jelas dan lebih mudah diprediksi.

Intensitas bencana gempabumi ditentukan dari letak dan magnitudonya; meliputi kondisi geologi permukaan (geomorfologi, litologi dan struktur geologi yang ada) dan populasi penduduk yang tinggal di dalamnya. Gempabumi dapat terjadi di mana saja, namun lebih dari 90% di antaranya melanda bagian kerak bumi dengan tektonik lempeng aktif (Keller, 2000). Wilayah tersebut berada pada zona tumbukan (kollisi), tunjaman (subduksi) dan gugusan gunung api. Meskipun wilayah-wilayah tersebut merupakan bagian dari suatu runtunan tektonik lempeng yang sama, namun tipe gaya yang mempengaruhinya berbeda. Akibatnya sifat dan intensitas gempa yang ditimbulkannya pun berbeda. Masing-masing tipe gaya menghasilkan struktur dan kondisi geologi yang berbeda. Daerah tumbukan dan tunjaman dipengaruhi oleh gaya kompresi (tekan), membentuk sesar-sesar naik dengan pemendekan lempeng. Daerah pemekaran berkembang gaya ekstensi (tarik), membentuk sesar-sesar turun dan oblik, serta menghasilkan peremajaan (pemekaran) lempeng dengan aktivitas vulkanismenya. Daerah *transform*

berkembang gaya geser, membentuk sesar-sesar *transform* dan *strike-slip*, serta dengan lempeng-lempeng muda.

Gempabumi adalah getaran yang terjadi di permukaan *bumi*, yang disebabkan oleh pergerakan *kerak bumi*. Bumi walaupun padat selalu bergerak, gempabumi terjadi apabila kerak bumi tidak mampu lagi menahan tekanan pergerakan tersebut. Dalam suatu wilayah yang satu dengan yang lain memiliki karakteristik gempabumi yang berbeda. Gempabumi biasanya memiliki frekuensi tertentu, tergantung dari tatanan tektonik dari wilayah yang bersangkutan. Intensitas dan frekuensi gempabumi secara teoritis dapat ditentukan, dengan didasarkan atas data statistik gempabumi yang pernah ada dalam wilayah tersebut.

a. Gempabumi tektonik

Gempabumi tektonik disebabkan oleh perlepasan *tenaga* yang terjadi karena pergeseran lempengan *pelat tektonik* seperti layaknya gelang karet ditarik dan dilepaskan dengan tiba-tiba. Tenaga yang dihasilkan oleh tekanan antara batuan dikenal sebagai kecacatan tektonik. Teori dari *plate tectonics* (lempeng tektonik) menjelaskan bahwa bumi terdiri dari beberapa lapisan batuan, sebagian besar area dari lapisan kerak itu akan hanyut dan mengapung dalam lapisan seperti *salju*. Lapisan tersebut bergerak perlahan hingga terpecah-pecah dan bertabrakan satu sama lainnya. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya gempa tektonik. Peta penyebaran gempabumi tektonik mengikuti pola-pola pertemuan lempeng-lempeng tektonik yang menyusun *kerak bumi*. Dalam ilmu kebumihan (*geologi*), kerangka teoritis tektonik lempeng merupakan *postulat* untuk menjelaskan fenomena gempa bumi tektonik yang melanda hampir seluruh kawasan, yang berdekatan dengan batas pertemuan lempeng tektonik. Contoh gempa tektonik ialah seperti yang terjadi di *Yogyakarta, Indonesia* pada *Sabtu, 27 Mei 2006* dini hari, pukul 05.54 WIB.

b. Gempabumi vulkanik

Gempabumi vulkanik dipicu oleh aktivitas *gunung api*, bentuk keretakannya memanjang sama dengan gempabumi tektonik. Ketika *magma* bergerak ke permukaan, magma memecahkan bebatuan yang mengakibatkan getaran berkepanjangan. Gempa vulkanik dapat berlangsung dalam beberapa jam hingga beberapa hari.

c. Penyebab Gempabumi

Kebanyakan gempabumi disebabkan dari pelepasan energi yang dihasilkan oleh tekanan pergerakan lempeng. Lama-kelamaan tekanan tersebut terakumulasi hingga mencapai titik kritis. Segera begitu batuan penyusun lempeng tidak mampu lagi menahan tekanan tersebut maka terjadilah patahan. Gerakan akibat patahan tersebut yang kita rasakan dalam bentuk gempabumi. Gempa bumi biasanya terjadi di perbatasan lempeng. Gempa bumi yang paling parah biasanya terjadi di perbatasan lempeng secara kompresi dan translasi. Gempabumi fokus-dalam kemungkinan besar terjadi karena materi lapisan

litosfer yang terjepit ke dalam mengalami transisi fasa pada kedalaman lebih dari 600 km.

Gempabumi juga dapat terjadi di daerah gunung api akibat pergerakan *magma* yang disebut gempa vulkanik, longsoran/runtuhan material ongkokan gunung api pada puncaknya yang disebut gempa tremor dan akibat deformasi lokal akibat pertumbuhan rekahan oleh pergerakan magma ke permukaan yang disebut sebagai gempa multifasa. Gempabumi yang terjadi akibat meningkatnya aktivitas gunung api memiliki magnitudo yang kecil, yaitu antara 1-3 SR, jarang dirasakan oleh masyarakat yang tinggal di sekitarnya dan biasanya hanya menimbulkan kerusakan kecil pada alat-alat sensor yang sensitif terhadap getaran, yang dipasang di sekitar puncak gunung api. Gempabumi seperti itu dapat menjadi gejala akan terjadinya letusan gunung api. Gempabumi juga dapat terjadi karena terakumulasinya massa air yang sangat besar pada reservoir bendungan, namun hal itu sangat jarang. Gempabumi seperti itu baru terjadi sekali selama sejarah, yaitu pada Dam Karibia di *Zambia, Afrika*. Gempabumi yang lain juga dapat terjadi karena proses injeksi atau ekstraksi cairan dari/ke dalam bumi, hal itu pun juga sangat jarang. Catatan sejarah baru dijumpai pada pembangkit listrik tenaga panasbumi di Rocky Mountain Arsenal. Terakhir, gempa juga dapat terjadi karena peledakan bahan peledak, biasanya dilakukan oleh para ilmuwan / pemerintah untuk memonitor tes rahasia *senjata nuklir*. Gempabumi artifisial tersebut dinamakan seismisitas terinduksi.

d. Sejarah Gempabumi Besar Abad ke-20-21

Setiap hari hampir puluhan kejadian gempabumi telah terjadi di dunia, dengan berbagai intensitas dan sifatnya. Sejarah gempabumi hebat yang pernah terjadi dapat dilihat pada Tabel VII.16.2.

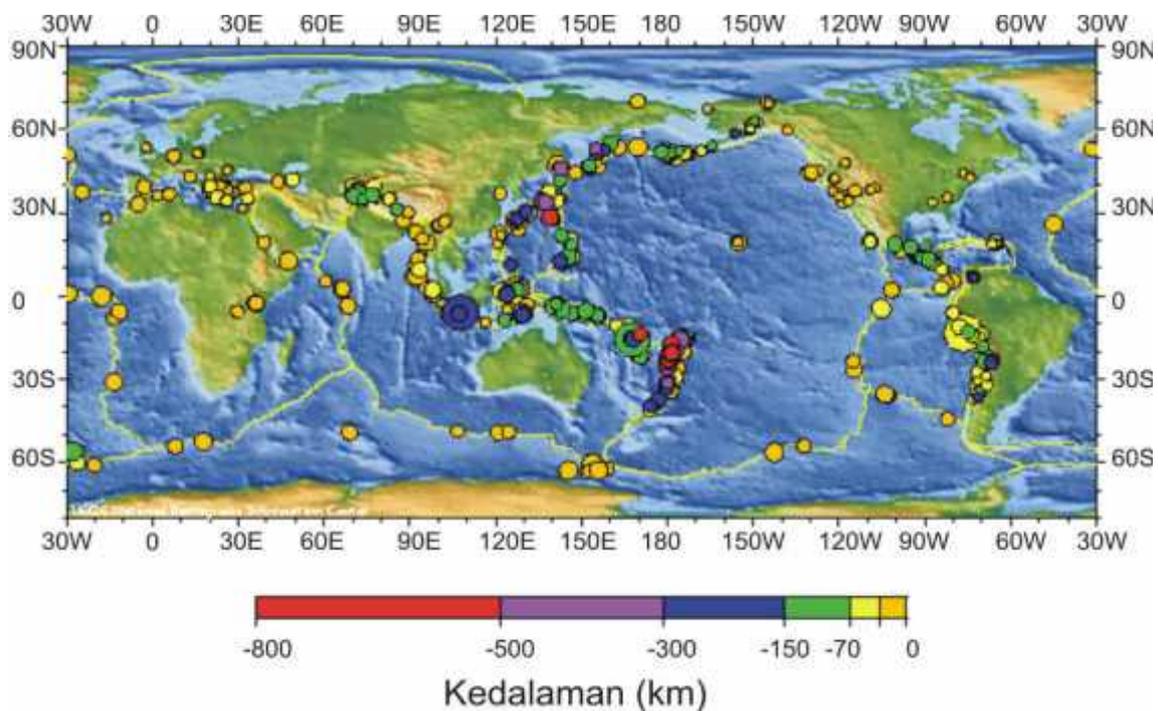
Tabel 6.2 Gempa-gempa berskala besar pada abad ke 20-21 di seluruh dunia
(sumber: <http://www.wikipedia.com>)

No.	Tanggal	Jam	Letak	Magnitudo (Skala Richter)	Keda- laman (km)	Korban (orang)
1.	23 -8- 2007	04:49:21	Buryatiya, Rusia	5,0	24,8	
2.	22 -8- 2007	22:24:37	Daerah Fiji, Jepang	5,0	10	
3.	21 -8- 2007	22:42:49	Central Mid Atlantic Ridge	6,5	10	
4.	21 -8- 2007	13:46:18	Kepulauan Filippina	6,4	8	
5.	21 -8- 2007	06:30:45	Papua, Indonesia	5,7	10	

6.	20 -8- 2007 12:37:07	Central Mid Atlantic Ridge	5,7	10	
7.	20 -8- 2007 02:56:48	Tanzania	5,2	10	
8.	19 -8- 2007 01:32:38	Central Peru	5,8	7,8	
9.	18 -8- 2007 02:52:36	Central Peru	6	39,2	
10.	17 -8- 2007 03:04:03	Laut Banda	6,4	10	
11.	16 -8- 2007 18:26:14	Selat Sunda	5,0	17,9	
12.	16 -8- 2007 08:39:27	Kepulauan Solomon	6,7	1,8	
13.	<u>6 -3 2007</u>	Nias, <u>Sumatera Barat</u>			79
14.	<u>27 -5 2006</u> 05:55	DIY dan Jawa Tengah	5,9	20	6.000
15.	8-11-2005	<u>Kashmir, Pakistan</u>	7,6		1.500
16.	<u>26-12-2004</u>	<u>Aceh-Sumatera Utara</u>	9,3		Tsunami
17.	<u>26 -12-2003</u>	Bam, baratdaya <u>Iran</u>	6,5		41.000
18.	21-05-2002	utara <u>Afghanistan</u>	5,8		>1.000
19.	26-01-2001	<u>India</u>	7,9		2.500 - 13.000
20.	21-09-1999	<u>Taiwan</u>	7,6		2.400
21.	17-08-1999	barat <u>Turki</u>	7,4		17.000
22.	25-01-1999	Barat Kolombia	6		1.171
23.	30-05-1998	Utara Afganistan & Tajikistan	6,9		5.000
24.	17-01-1995	Kobe, Jepang	7,2		6.000
25.	9-06-1995	Sebelah timurlaut La Paz, Bolivia	8,3		
26.	30-09-1993	Latur, India	6,0		1.000
27.	21-06-1990	Baratlaut	7,3		50.000

28.	7-12-1988	Iran Baratlaut Armenia	6,9	25.000
29.	19-09-1985	Meksiko Tengah	8,1	9.500
30.	16-09-1978	Timurlaut Iran	7,7	25.000
31.	28-07-1976	Tangshan, <i>China</i>	7,8	240.000
32.	4-02-1976	Guatemala	7,5	22.778
33.	29-02-1960	barat daya pantai <i>Atlantik,</i> <i>Maghribi</i>	5,7	12.000, memusnah-kan kota Agadir
34.	26-12-1939	Erzincan, <i>Turki</i>	7,9	33.000
35.	24-01-1939	Chillan, <i>Chile</i>	8,3	28.000
36.	31-05-1935	Quetta, <i>India</i>	7,5	50.000
37.	1-09-1923	<i>Yokohama,</i> <i>Jepang</i>	8,3	140.000

Gambar 6.43 adalah peta sebaran gempabumi di seluruh dunia yang terjadi pada tanggal 8-31 Juli 2007.

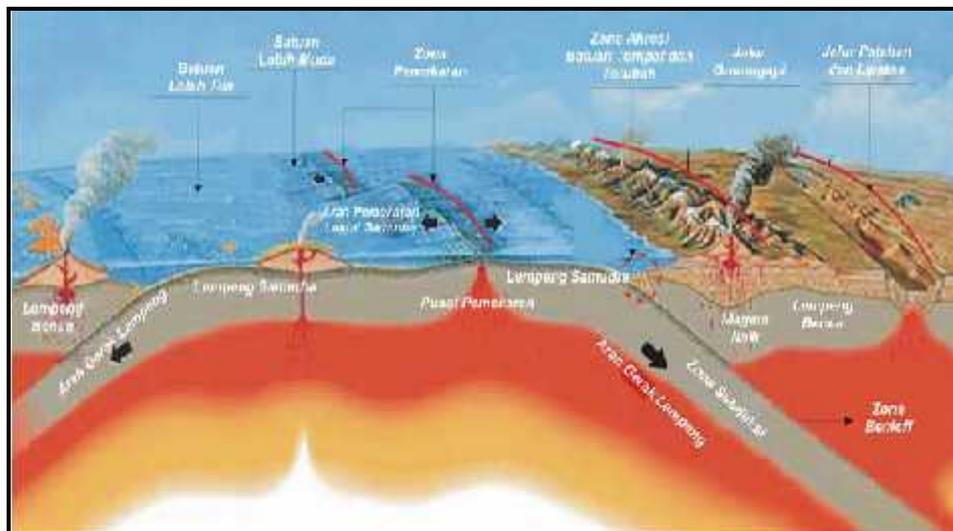


Gambar 6.43. Sebaran gempabumi di seluruh dunia pada tanggal 8-31 Juli 2007 (sumber: USGS, Open file report 2007)

Dalam peta terlihat bahwa gempa bumi-gempa bumi dangkal dijumpai di sepanjang jalur tertentu di dunia, yang diduga melalui jalur tektonik aktif.

e. Tektonik Lempeng Pemicu Gempabumi

Para ilmuwan percaya bahwa pelepasan energi pada proses tektonik lempeng lah yang paling banyak memicu terjadinya gempa bumi. Energi pemicu tersebut bertumpu pada ujung lengan-lengan lempeng yang saling bergerak. Beberapa lengan lempeng membentuk lembah yang sangat dalam dan sempit yang disebut dengan palung (*trench*). Beberapa yang lain membentuk punggung yang sangat tinggi dan curam yang disebut dengan *tinggian*. Pertemuan dua atau lebih lempeng yang berbeda, berada pada ujung lempeng tersebut, sehingga diketahui sebagai zona pelepasan energi dari dalam bumi, pemicu terjadinya gempa bumi. Ada empat tipe tepian lempeng kerak bumi, yaitu tepian divergen (zona pemekaran), konvergen (zona subduksi/penunjaman), *transform* (zona akresi) dan tepian lempeng yang sulit dikenali (Gambar 6.44).



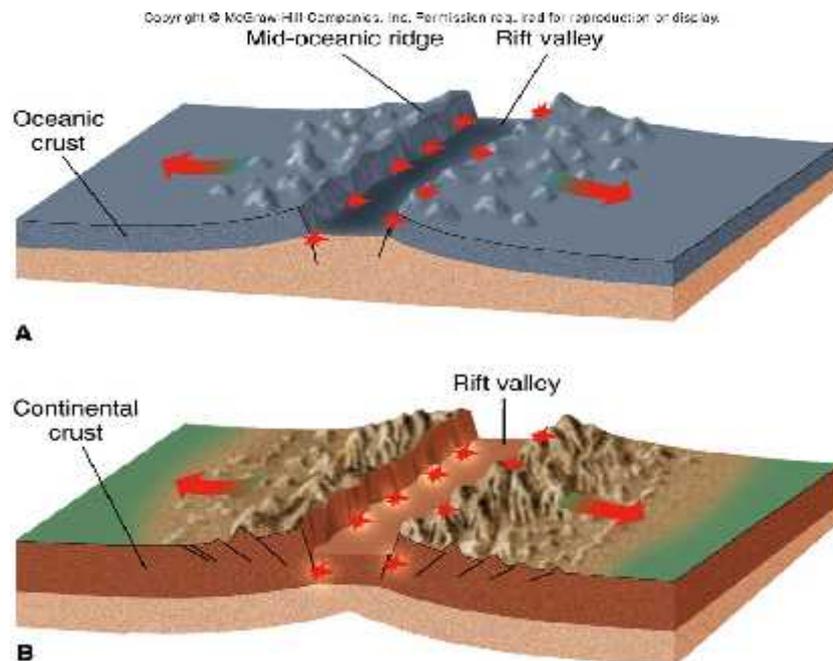
Gambar 6.44. Empat jenis tepian lempeng dalam teori tektonik lempeng beserta arah pergerakannya, sehingga menghasilkan berbagai kondisi geologi dan memicu terjadinya gempa bumi dan letusan gunung api (sumber: modifikasi Kious & Tilling, 2001)

1) Tepian divergen

Tepian divergen berada di sepanjang pusat pemekaran. Lempeng-lempeng bergerak saling menjauh akibat gaya tarik, membentuk rekahan yang diikuti munculnya magma ke permukaan melalui rekahan tersebut, membentuk lempeng baru. Salah satu contoh tepian divergen adalah pembentukan gugusan gunung api bawah laut di *Mid-Atlantic Ridge* (MAR), memanjang dari Samudra Arctic hingga sebelah selatan Afrika (Gambar VII.6). Punggungan MAR adalah salah satu segmen sistem *mid-oceanic ridge* terbesar (global) yang mengelilingi bumi (Kearey & Vine, 1996), dengan kecepatan pemekaran 2,5 cm/th atau 25 km per juta tahun (Uyeda, 1978).

Selama 100-200 juta tahun lalu, celah sempit *Tethys* telah berkembang menjadi celah Laut Atlantik (antara benua Eropa, Afrika dan Amerika) yang sangat luas hingga ratusan kilometer (Gambar 6.45).

Daerah vulkanik di Islandia adalah salah satu bagian dari *Mid-Atlantic Ridge*. Menurut Uyeda (1978), gugusan gunung api di Islandia adalah hasil pemekaran lantai samudra antara Lempeng Amerika Utara dan Lempeng Eurasia. Lempeng Amerika Utara bergerak relatif ke barat, sedangkan lempeng Eurasia bergerak relatif ke timur (Gambar VII.6). Sejak dahulu, daerah tersebut telah digunakan para ilmuwan sebagai laboratorium alam untuk mempelajari proses pemekaran lantai samudra yang menghasilkan gugusan gunung api bawah laut. Gunung api Krafla terletak di timurlaut Islandia. Di daerah tersebut, selalu terjadi bukaan rekahan yang pada tiap-tiap beberapa bulan membentuk morfologi baru. Dari tahun 1975 hingga 1984, telah berlangsung beberapa periode pemekaran (*rifting*) di sepanjang zona rekahan Krafla. Beberapa periode bahkan disertai dengan aktivitas gunung api. Erupsi gunung api ini ditandai dengan pengangkatan permukaan tanah dalam 1-2 m sebelum tiba-tiba tenggelam oleh luapan lava basal. Antara 1975-1984 saja telah terjadi pengangkatan dalam 7 m.



Gambar 6.45. Pusat-pusat gempa bumi pada *Mid-Oceanic Ridge* (A) dan pada *continental rift valley* (B) berada pada zona pemekaran (Uyeda, 1978).

Hamblin (1975) menyebutkan bahwa di Afrika Timur, proses pemekaran telah memisahkan Arab Saudi dari benua Afrika, membentuk Laut Merah. Wilayah perbatasan antara Lempeng Arab dan Lempeng Afrika di mana Laut Merah bertemu dengan Gulf of Aden disebut sebagai *triple junction*. Pusat pemekaran yang baru diduga berkembang di bawah Lempeng Afrika di sepanjang Zona Pengangkatan Afrika Timur. Saat lempeng kontinen mekar melampaui ambang

batas, rekahan *tension* mulai terbentuk di permukaan bumi. Magma muncul dan menyembur melalui rekahan yang melebar, kadang-kadang erupsinya membentuk gunung api. Munculnya magma, pada saat erupsi maupun istirahat, meningkatkan tekanan berlebih pada kerak bumi sehingga memperlebar rekahan, khususnya pada zona pemekaran (*rift zone*).

2) Tepian konvergen

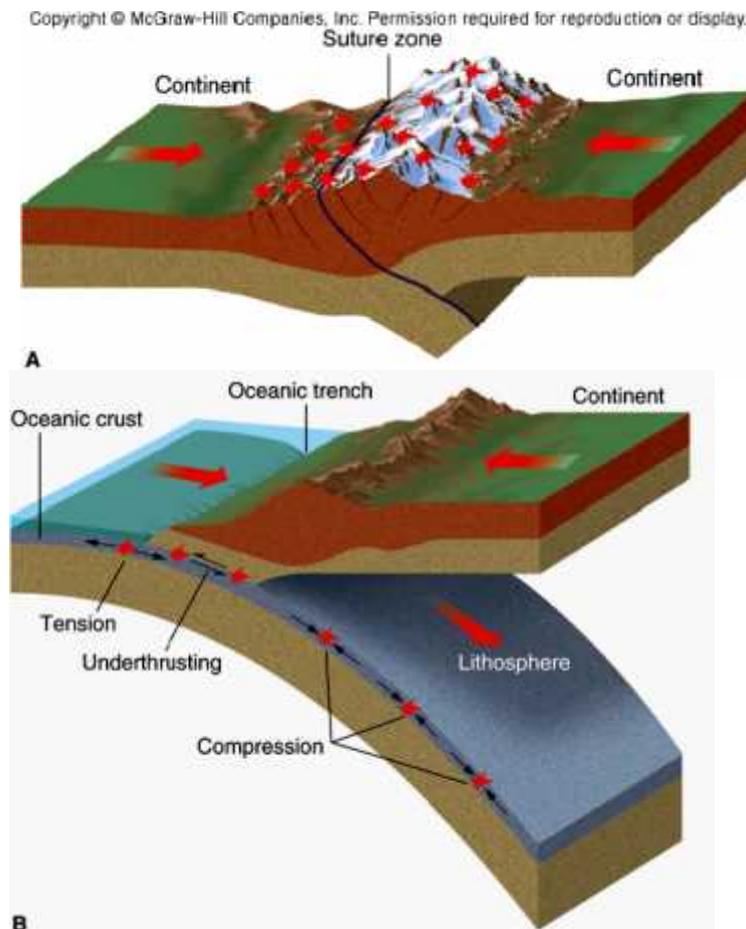
Ukuran (volume) bumi belum pernah berubah secara signifikan selama 600 juta tahun, bahkan selama pembentukannya sejak 4,6 miliar tahun yang lalu. Ukuran bumi yang selalu tetap menandakan bahwa kerak bumi harus mengalami penghancuran pada periode tertentu, sebagaimana pada konsep Harry Hess. Penghancuran ini dapat dilihat pada proses subduksi di sepanjang tepian konvergen, dengan ditandai oleh pergerakan lempeng-lempeng yang saling menumbuk dan menunjamkan salah satunya di bawah lempeng yang lain. Zona dimana lempeng tenggelam disebut zona penunjaman. Konvergen dapat dijumpai pada proses tumbukan antara:

1. Lempeng samudra dan lempeng benua; biasanya membentuk palung (*trench*): lembah sempit melengkung yang dalam (8-10 km), panjang (ribuan kilometer) dan memotong dasar laut. Pada kondisi ini lempeng samudera menunjam di bawah lempeng benua (Gambar 6.46). Kecepatan pergerakan penunjaman dipengaruhi oleh tebal/tipisnya lempeng, kedalaman penunjaman dan sudut penunjaman yang dihasilkan. Lempeng samudra yang lebih tipis dapat menunjam dengan sudut penunjaman kecil, menghasilkan kedalaman pusat gempa yang relatif kecil. Tipisnya lempeng yang ditunjam juga dapat menghasilkan sudut penunjaman yang kecil, sehingga pusat gempa juga dangkal. Sebagai contoh adalah lempeng mikro Jawa yang ditunjam oleh lempeng India – Australia.

Penunjaman lempeng India-Australia di bawah lempeng Eurasia di selatan Jawa dan sebelah barat Sumatera adalah salah satu proses konvergen di Indonesia. Proses penunjaman tersebut berlangsung dalam 6 cm/tahun, menghasilkan *trench* yang sangat dalam di Samudra India, di selatan Jawa. Contoh lain adalah proses penunjaman lempeng Nazca di bawah lempeng Amerika Selatan yang menghasilkan *trench* Peru-Chili, dan tinggian Andes (Kious & Tilling, 2001).

Karena tipisnya, lempeng samudra dapat menunjam secara mulus hingga bagian terbawah lempeng benua. Walaupun demikian, bagian atas lempeng dan ujung lempeng yang menunjam tersebut, tentunya akan terdeformasi, bahkan hingga hancur membentuk serpihan-serpihan yang lebih kecil. Serpihan-serpihan tersebut selanjutnya tertahan pada posisi asalnya, sampai akhirnya patah setelah tingkat elastisitasnya terlampaui, dan menyebabkan gempabumi. Kebanyakan gempabumi yang ditimbulkan oleh proses tumbukan tersebut disertai dengan pengangkatan dari lempeng

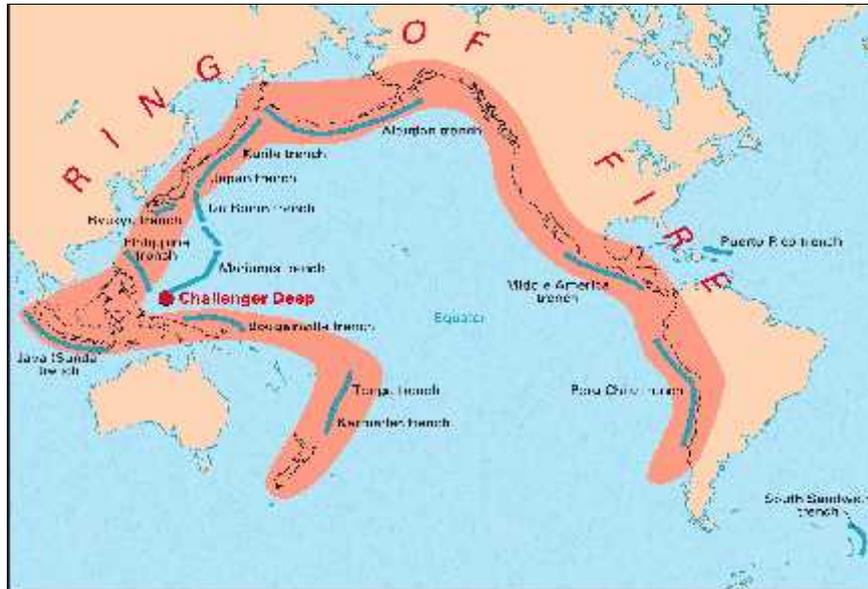
benua dalam beberapa centimeter hingga beberapa meter membentuk zona akresi (Uyeda, 1978; dan Kious & Tilling, 2001).



Gambar 6.46. Pusat-pusat gempa bumi pada tepian lempeng konvergen: A. Kolisi, B. Subduksi (sumber: Kious & Tilling, 2001)

Data sejarah mencatat kebanyakan gempa bumi dengan magnitudo yang besar berada pada zona-zona tepian konvergen tersebut. Salah satu gempa bumi terakhir adalah gempa bumi di Padang (Sumatera Barat), 7,6 SR pada 1 Oktober 2009 dengan pusat gempa di bawah Pulau Nias. Gempa bumi tersebut dipicu oleh patahan lempeng benua Eurasia yang ditumbuk oleh lempeng samudra Hindia-Australia. Patahannya sendiri berada pada 10 km di bawah Nias. Sebelumnya, pada tanggal 3 September 2009, gempa bumi dengan 7,3 SR terjadi di Tasikmalaya, yang episenternya juga di darat pada kedalaman 20 km. Gempa bumi tersebut juga dipicu oleh penunjaman lempeng Hindia-Australia di bawah lempeng Eurasia. Jauh sebelumnya, di Banda Aceh terjadi gempa bumi dengan 9,3 SR pada 26 Desember 2004, epicenter berada di sebelah barat laut Aceh, dan menimbulkan tsunami yang sangat dahsyat yang dirasakan hingga Thailand, Srilanka dan India. Sama halnya dengan gempa Padang, gempa bumi tersebut selain dipengaruhi oleh penunjaman lempeng Hindia-

Australia, juga dipengaruhi oleh lempeng samudera India terhadap lempeng Eurasia dan lempeng benua India. Sedangkan gempa bumi pada 27 Mei 2006 di Yogyakarta-Jawa Tengah, walaupun magnitudonya hanya 5,9 SR, namun karena episenternya sangat dangkal (± 10 km), menimbulkan korban jiwa yang sangat besar. Proses konvergensi antara lempeng samudra dan benua juga menghasilkan gugusan gunung api aktif yang dikenal dengan sebutan *ring of fire* (Gambar 6.47).



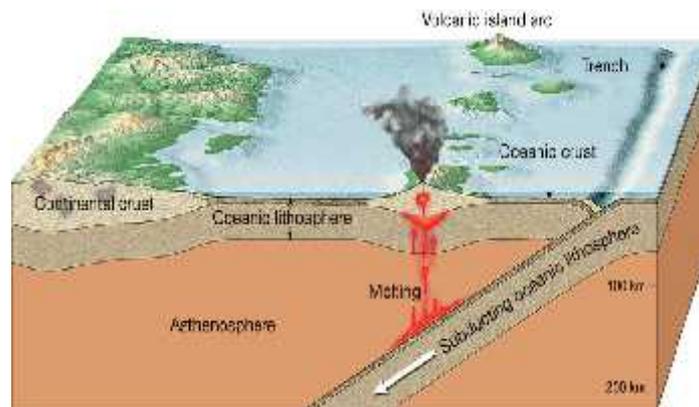
Gambar 6.47. Penunjaman lempeng samudra di bawah lempeng benua membentuk gugusan api (*Ring of Fire*), yaitu zona gempa dan letusan gunung api (Watson, 1999).

Gugusan gunung api akibat proses konvergensi juga ditemukan di Alaska, yaitu dari Kiska (di sebelah selatan Bering Sea) yang memanjang ke timur hingga Spurr. Gugusan ini dibentuk oleh penunjaman lempeng Pasifik di bawah lempeng Amerika Utara dan lempeng Eurasia. Contoh gugusan gunung api lain dijumpai di Jepang; memanjang dari Okinawa-Unzen, Fuji-Azuma - Usu-Akan.

Busur gunung api di Jepang dibentuk oleh proses penunjaman lempeng Pasifik di bawah lempeng Eurasia. Masih banyak contoh gugusan gunung api yang lain di dunia, seperti di Filipina, Tonga-Karmadec, Amerika Tengah hingga Peru-Chili. Bentang alam akibat penunjaman adalah pengangkatan, contoh pada pembentukan puncak Andes, oleh konvergensi lempeng Nazca dan Amerika Selatan di daerah penambangan Pachapaqui, Peru.

2. Lempeng samudra dan samudra; juga membentuk palung (Gambar 6.48). Contoh dari proses penunjaman ini adalah di Kepulauan Mariana membentuk Palung Mariana. Palung tersebut dibentuk oleh penunjaman lempeng Pasifik di bawah lempeng Filipina, menghasilkan Challenger Deep

di sebelah selatan Palung Mariana sedalam hampir 11 km dan membentuk suatu pegunungan setinggi 8.854 m, yang kini muncul di permukaan laut.



Gambar 6.48. Proses penunjaman lempeng samudra di bawah lempeng samudra pada tektonik lempeng (sumber: Kious & Tilling, 2001).

Proses penunjaman lempeng samudra di bawah lempeng samudra juga menghasilkan kegiatan gunung api. Lebih dari jutaan tahun, erupsi lava dan material debris gunung api telah menyusun dasar samudra, bahkan ratusan hingga ribuan gunung api bawah laut ini muncul ke permukaan membentuk gugusan gunung api kepulauan. Gugusan gunung api ini disebut sebagai busur kepulauan. Sebagaimana namanya, busur gunung api kepulauan juga sejajar dengan zona penunjaman (palung). Didasarkan atas tipe dan macam batuan yang dihasilkannya, gugusan gunung api busur kepulauan ini dicirikan oleh tipe gunung api komposit (strato), dengan tipe magma andesitis hingga basaltis dan bersusunan Kalk-Alkali. Contoh adalah gugusan gunung api di sepanjang pulau Jawa hingga Banda (Indonesia), Sakurajima-Unzen (Jepang), Pinatubo (Filipina) dan masih banyak lagi.

Jenis tepian lempeng busur kepulauan ini juga berimplikasi pada rentannya wilayah ini terhadap gempa bumi. Palung-palung (*trench*) yang dihasilkannya adalah kunci untuk memahami bagaimana suatu busur kepulauan dapat terbentuk, dan seringnya gempa bumi bermagnitudo kuat pada busur kepulauan ini. Magma yang membentuk busur kepulauan dihasilkan dari proses lelehan parsial batuan dari sebagian lempeng yang menyusup dan / atau menyusun litosfer samudra. Penunjaman lempeng tersebut juga menghasilkan sumber gaya akibat interaksi dua lempeng tersebut, sehingga memicu terjadinya gempa bumi bermagnitudo sedang sampai kuat.

Lempeng benua dan benua; salah satu contoh bentang alam yang dibentuk oleh proses konvergensi lempeng benua dan benua adalah pembentukan pegunungan Himalaya. Ketika dua lempeng kontinen bertemu, tidak satu pun lempeng yang menunjani ke lempeng yang lainnya (Gambar 6.46.A). Hal itu karena keduanya merupakan lempeng yang berdensitas sama, tidak seperti pada penunjaman lempeng samudra dan benua. Sama halnya

dengan tumbukan dua material getas, seperti es / batu, maka keduanya akan tetap bertahan, membentuk tinggian. Salah satu contoh adalah kolisi antara Lempeng India dan Eurasia yang telah berlangsung sejak 50 jtl. Pengangkatan tersebut dipicu oleh Bergeraknya lempeng benua India dari arah selatan yang menumbuk lempeng benua Eurasia dari arah utara. Kolisi kedua lempeng tersebut mendesak lempeng samudra yang lebih tua, lalu memadatkannya, mengangkatnya dan menghancurkannya sambil mengangkat Himalaya, membentuk plateu Tibet.

Pasca kolisinya pada 10 jtl, secara lambat laun dan menerus, puncak Himalaya terangkat yang hingga kini telah mencapai ketinggian 8.854 m dpl dan Plato Tibet 4.600 m dpl (Gambar VII.15). Lempeng samudra yang ikut terangkat, kini tertimbun oleh sedimen hasil erosi / longsor dari kedua lempeng yang saling menumbuk.

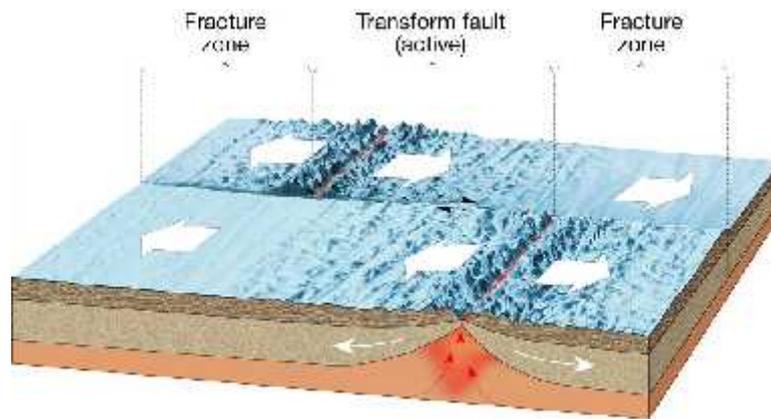
3) Tepian *transform*

Tepian *transform fault*; terletak di antara gelinciran horizontal antara dua lempeng yang bergerak saling menjauh. Konsep ini diajukan oleh seorang ahli geofika asal Kanada bernama J. Tuzo Wilson, yang berargumentasi bahwa proses pembentukan sesar-sesar *transform* yang berdimensi besar, yang terdapat pada zona rekahan, biasanya berhubungan dengan dua pusat pemekaran pada tepian lempeng divergen, namun beberapa juga dapat terjadi pada palung samudra, yaitu pada tepian lempeng konvergen, namun hal itu tidak umum terjadi (Thomas USGS, 2001).

Pada zona ini biasanya berkembang punggungan pemekaran aktif, yang menghasilkan tepian lempeng dengan pola zig-zag, menghasilkan gempabumi-gempabumi dangkal. Salah satu contohnya adalah sesar transform di San Andreas (California) yang berhubungan dengan Pengangkatan lempeng Pasifik bagian timur. Sesar transform tersebut dibentuk oleh dua tepian divergen yang bergerak saling menjauh, yaitu tepian San Andreas (*South Gorda*) yang bergerak ke selatan, dan tepian Juan de Fuca yang bergerak ke utara (Gambar 6.49). Sesar San Andreas memiliki panjang 1.300 km dan lebar puluhan kilometer, menempati 2/3 panjang California. Di sepanjang sesar tersebut, Lempeng Pasifik bergerak secara horizontal menjauhi Lempeng Amerika Utara sejak 10 jtl, dengan kecepatan rata-rata 5 cm/th. Geomorfologi di bagian barat dari sesar tersebut, yang merupakan bagian dari Lempeng Pasifik, bergerak relatif ke barat laut; sedangkan bagian timur dari sesar, yang merupakan bagian dari lempeng Amerika Utara, bergerak ke selatan. Di Indonesia, tepian transform tidak dijumpai.

Zona rekahan samudra sendiri adalah suatu lembah dasar laut yang secara horizontal *offset* dengan punggungan *spreading* (pemekaran); beberapa zona ini

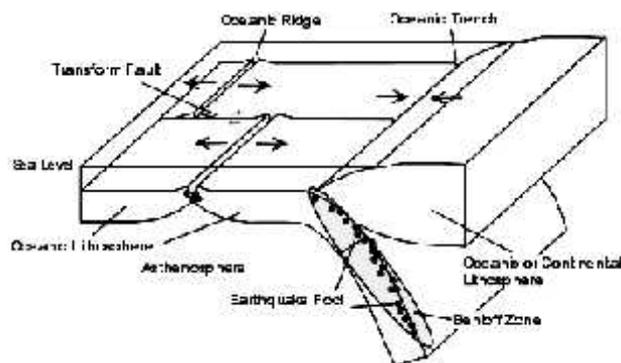
panjangnya dapat mencapai ribuan kilometer dan kedalaman 8 km. sebagai contoh adalah zona pemekaran di Clarion, Molokai dan Pioneer (Pasifik Timurlaut: California dan Meksiko). Kini, zona pemekaran tersebut telah tidak aktif lagi, tetapi pola paleomagnetiknya menunjukkan adanya proses pergerakan aktivitas sesar transform pada masa lampau.



Gambar 6.49. Pusat-pusat gempa (garis merah) pada zona rekahan transform (Sumber: Kious & Tilling, 2001)

4) Zona tepian lempeng yang Lain

Kebanyakan tepian lempeng ini, di permukaan bumi sangat sulit untuk dipelajari karena umumnya telah terdeformasi kuat. Contoh: pergerakan Lempeng Eurasia dan Australia di sebelah selatan Jawa hingga sebelah barat Sumatra, yang permukaannya berada di bawah permukaan laut. Lain halnya dengan pergerakan lempeng di Mediterania – Alpina, yaitu antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Afrika, yang tepian keduanya dapat jelas terlihat di permukaan. Pergerakan kedua lempeng tersebut menghasilkan fragmen-fragmen lempeng yang lebih kecil disebut *microplates*. Zona tepian lempeng selalu berhubungan dengan setidaknya dua atau lebih pergerakan lempeng besar atau mikro, sehingga menghasilkan struktur geologi dan pola gempabumi yang rumit (Gambar 6.50).



Gambar 6.50. Zona-zona tepian lempeng dengan pola struktur geologi dan pusat gempabumi yang ditimbulkan (sumber: Kertapati, 2006).

f. Kecepatan Rata-Rata Pergerakan Lempeng

Para ahli menentukan kecepatan rata-rata pergerakan lempeng dengan didasarkan pada data *magnetic field* dasar laut. Kecepatan pergerakan lempeng ini bervariasi, Lempeng Arctic adalah yang paling lambat yaitu 2,5 cm/th, Lempeng Pasifik Selatan adalah yang paling cepat yaitu lebih dari 15 cm/th, dan Lempeng India-Australia 6 cm/th.

Pergerakan lempeng masa lampau dapat ditentukan dari studi pemetaan geologi. Namun, kecepatan pergerakannya sulit dideterminasi. Secara teoritis, dengan mengetahui umur akresi batuan yang menunjam, jarak perpindahannya dan umur batuan hasil magmatismenya, maka dapat diketahui berapa kecepatannya. Dewasa ini, metode yang sering digunakan untuk mengetahui jarak dan arah perpindahan dari suatu tubuh batuan adalah paleomagnetik. Ngkoimani dkk. (2004), Bijaksana dkk. (2004) dan Bronto dkk. (2004) telah melakukan studi paleomagnetik untuk mengetahui arah pergeseran Jawa sejak pembentukannya, serta berhasil mengetahui Jawa telah bergerak sejauh 11° ke utara dari sejak 56 jtl (umur diketahui dari hasil analisis K/Ar pada batuan beku basal di beberapa lokasi di Jawa dari Banyuwangi hingga Pongkor.

Suatu batuan dengan ciri yang sama ditemukan dalam lokasi yang berbeda dan keduanya dipisahkan oleh sesar transform. Jika umur suatu formasi batuan (absolut maupun relatif dan dengan struktur geologi yang mendukungnya) telah diketahui, dengan mengukur jarak keduanya, maka kecepatan pergerakan keduanya dapat diperkirakan.

Kini, pergerakan lempeng diamati secara langsung dari pengukuran geodetik menggunakan laser-elektronik. Karena pergerakan lempeng dalam wilayah yang sangat luas, maka metode yang paling efisien adalah dengan satelit, yaitu *very long baseline interferometry* (VLBI), *satellite laser ranging* (SLR), dan *Global Positioning System* (GPS). Metode GPS adalah yang paling banyak dilakukan. Kini, 21 satelit Navstar milik Dept. Pertahanan Amerika Serikat telah dipasang di atas bumi dengan orbit 20.000 km.

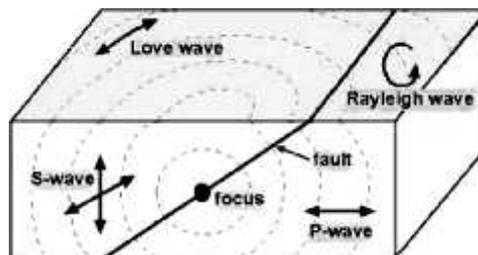
Karakteristik Gempabumi

Deformasi batuan selalu disertai dengan pelepasan energi dalam volume yang besar. Pelepasan energi tersebut dapat berlangsung secara tiba-tiba maupun secara perlahan. Pelepasan energi yang berlangsung secara tiba-tiba dan besar-besaran ini yang selanjutnya dirasakan sebagai gempabumi. Energi gempa berasal dari gelombang seismik, yang menyebar dari pusatnya. Titik sumber gempa disebut hiposenter dan lokasi hiposenter disebut episenter. Gelombang seismik sendiri dapat disebut sebagai suatu vibrasi (getaran) yang dihasilkan oleh adanya gempabumi.

a. Gelombang Seismik

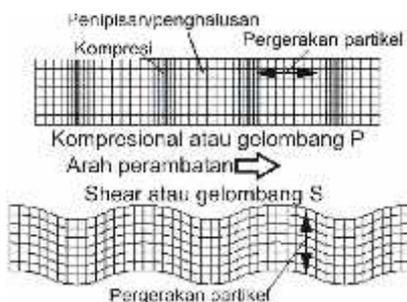
Di alam, didasarkan pada waktu dan posisinya, ada dua jenis gelombang yang dihasilkan pada waktu yang hampir bersamaan saat gempa bumi berlangsung. Kedua gelombang tersebut masing-masing memiliki kecepatan dan arah rambat yang berbeda (Watkins, 2001; Gambar 6.51), yaitu:

- a. Gelombang bawah permukaan (*body waves*) adalah gelombang seismik yang merambat melalui bidang gelincir di bawah permukaan. Gelombang bawah permukaan terdiri atas gelombang primer (*P-waves*) dan gelombang sekunder (*S-waves*). Gelombang P dapat merambat pada material padat dan cair dan dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan gelombang S. Gelombang S hanya merambat melalui material padat, gelombang ini tidak mampu merambat pada lapisan astenosfer di bawah lapisan kerak bumi. Energi rambatan gelombang inilah yang menyebabkan terjadinya gerakan yang selanjutnya direspon oleh gelombang permukaan, sehingga memicu terjadinya gempa bumi.
- b. Gelombang permukaan (*surface waves*) merambat melalui bidang sesar di permukaan bumi, terdiri atas gelombang Love dan gelombang Rayleigh. Energi gelombang Rayleigh menyebabkan kompleksitas pergerakan, dapat secara meluncur atau dapat pula secara bergulung (*rolling*). Gelombang Love membentuk rekahan-rekahan di permukaan tanah dan merusak bangunan.



Gambar 6.51. Kedudukan gelombang bawah permukaan (P dan S) dan permukaan (Love dan Rayleigh) yang dapat memicu gempa bumi (Watkins, 2001).

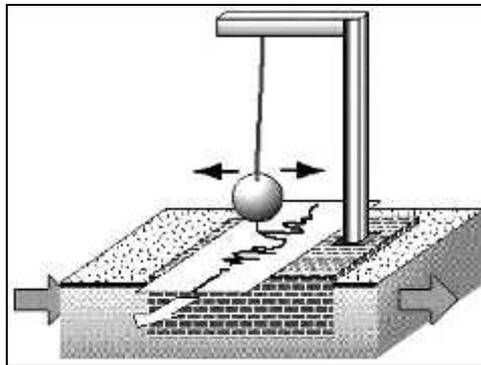
Gelombang P bergerak secara transversal dan gelombang S bergerak secara longitudinal. Mekanisme rambatan gelombang P dan S dapat dilihat pada Gambar 6.52.



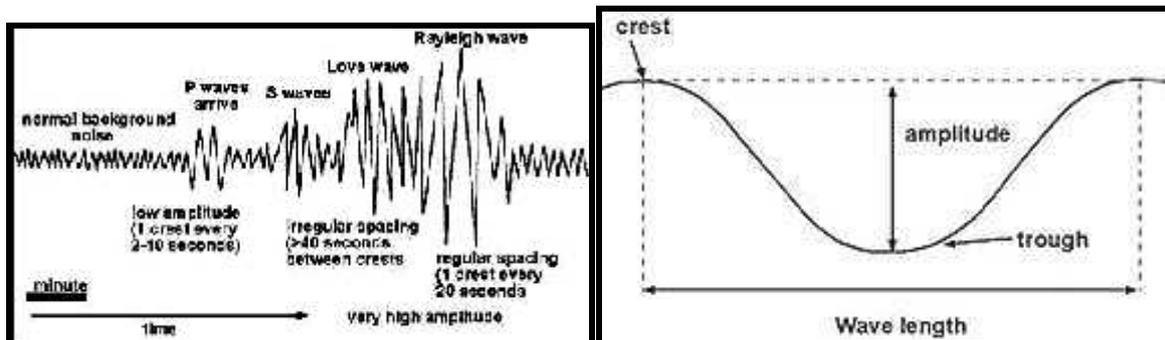
Gambar 6.52. Mekanisme rambatan gelombang P dan gelombang S hingga memicu terjadinya gempa bumi (Watkins, 2001).

b. Pendeteksi Magnitudo dan Lokasi Gempabumi

Ribuan stasiun pengamatan gempa telah dipasang di seluruh dunia. Masing-masing stasiun dilengkapi dengan alat perekam/pencatat gempa yang disebut seismograf (Gambar 6.53), untuk mendeteksi waktu tiba (*arrival times*) dan hasil rekaman gelombang seismik saat gempa berlangsung. Seismograf sangat sensitif terhadap getaran, sehingga seberapa pun getaran yang dihasilkan oleh suatu pergerakan dalam bumi dapat direkam dalam seismograf. Pada prinsipnya, seismograf adalah sebuah pendulum, yang tersusun atas satu bandul yang dilengkapi dengan alat pencatat pada bagian bawahnya dan dipasang dengan tali penggantung dengan panjang tertentu. Pendulum tersebut dibandulkan dengan pena pencatat yang bertumpu pada lembaran kertas putih. Ketika terjadi guncangan di permukaan bumi, bandul akan bergerak sesuai dengan ritme / gelombang gerakannya, dan langsung menggambarkan gerakannya di atas kertas putih tersebut (Gambar 6.54).



Gambar 6.53. Alat pencatat gempabumi (seismograf)



Gambar 6.54. Rekaman gelombang seismik gempa (atas) dan amplitudo (bawah) (<http://vcourseware5.calstatela.edu/eec/>).

Seismograf terdiri atas seismometer (detektor) dan mesin pencatat (*recording*). Seismometer bekerja dengan sistem elektronik yang bertugas menerima sinyal jika terjadi gerakan gelombang. Grafik gelombang seismik yang tercatat pada recorder disebut seismogram. Panjang gelombang seismik (amplitudo) yang tercatat adalah jarak vertikal antara puncak gelombang dan nilai terrendahnya, jadi gelombang terbesar adalah puncak gempa dan jarak terjauh adalah amplitudo gempa terbesar. Kunci untuk mengetahui posisi episenternya adalah

perbedaan dari waktu datangnya (*arrival times*), yang disebut dengan *lag time* dari gelombang P dan gelombang S.

c. Magnitudo dan Intensitas Gempabumi

Skala gempabumi dapat diukur melalui dua metode, yaitu dalam magnitudo dan dalam intensitas. Dalam satuan magnitudo, gempabumi diukur dengan satuan Skala Richter (SR). Magnitudo gempabumi dihitung secara logaritmik dengan didasarkan atas nilai amplitudo gelombang seismik. Gelombang seismik dengan nilai amplitudo yang lebih besar berarti nilai magnitudonya lebih tinggi. Intensitas gempabumi dinyatakan dengan Skala Mercalli (MMI). Intensitas ini diukur dengan didasarkan pada tingkat kerusakan yang ditimbulkan; besarnya antara 1 (satu) hingga 12 (duabelas).

Secara umum parameter gempabumi terdiri dari:

- 1) Waktu kejadian gempabumi (jam, menit, detik)
- 2) Lokasi pusat gempabumi di permukaan bumi/episenter (koordinat lintang dan bujur)
- 3) Kedalaman sumber gempabumi (km)
- 4) Kekuatan/magnitudo gempabumi (Skala Richter)
- 5) Intensitas gempabumi (MMI)

Magnitudo gempabumi menunjukkan besarnya energi yang dilepaskan pada pusat gempabumi/hiposenter. Ukuran dan luas daerah kerusakan akibat gempa bumi secara kasar berhubungan dengan besarnya energi yang dilepaskan. Skala magnitudo gempabumi biasanya dinyatakan dalam skala Richter. Skala intensitas menunjukkan kerusakan akibat getaran pada lokasi kerusakan. Intensitas merupakan fungsi dari: magnitudo, jarak dan kedalaman dan kondisi tanah/batuan. Skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI) yang digunakan untuk menunjukkan intensitas guncangan gempa bumi adalah (Anonim, 2007):

1. Sangat jarang /hampir tidak ada orang yang dapat merasakan. Tercatat pada alat seismograf.
2. Terasa oleh sedikit sekali orang terutama yang ada di gedung tinggi, sebagian besar orang tidak dapat merasakan
3. Terasa oleh sedikit orang, khususnya yang berada di gedung tinggi. Mobil parkir sedikit bergetar, getaran seperti akibat truk yang lewat
4. Pada siang hari akan terasa oleh banyak orang dalam ruangan, diluar ruangan hanya sedikit yang bisa merasakan. Pada malam hari sebagian orang bisa terbangun. Piring, jendela, pintu, dinding mengeluarkan bunyi retakan, lampu gantung bergoyang.
5. Dirasakan hampir oleh semua orang, pada malam hari sebagian besar orang tidur akan terbangun, barang-barang diatas meja terjatuh, plesteran tembok retak, barang-barang yang tidak stabil akan roboh, pandulum jam dinding akan berhenti.

6. Dirasakan oleh semua orang, banyak orang ketakutan/panik, berhamburan keluar ruangan, banyak perabotan yang berat bergeser, plesteran dinding retak dan terkelupas, cerobong asap pabrik rusak
7. Setiap orang berhamburan keluar ruangan, kerusakan terjadi pada bangunan yang desain konstruksinya jelek, kerusakan sedikit sampai sedang terjadi pada bangunan dengan desain konstruksi biasa. Bangunan dengan konstruksi yang baik tidak mengalami kerusakan yang berarti.
8. Kerusakan luas pada bangunan dengan desain yang jelek, kerusakan berarti pada bangunan dengan desain biasa dan sedikit kerusakan pada bangunan dengan desain yang baik. Dinding panel akan pecah dan lepas dari framenya, cerobong asap pabrik runtuh, perabotan yang berat akan terguling, pengendara mobil terganggu.
9. Kerusakan berarti pada bangunan dengan desain konstruksi yang baik, pipa pipa bawah tanah putus, timbul retakan pada tanah.
10. Sejumlah bangunan kayu dengan desain yang baik rusak, sebagian besar bangunan tembok rusak termasuk fondasinya. Retakan pada tanah akan semakin banyak, tanah longsor pada tebing tebing sungai dan bukit, air sungai akan melimpas di atas tanggul.
11. Sangat sedikit bangunan tembok yang masih berdiri, jembatan putus, rekahan pada tanah sangat banyak/luas, jaringan pipa bawah tanah hancur dan tidak berfungsi, rel kereta api bengkok dan bergeser.
12. Kerusakan total, gerakan gempa terlihat bergelombang diatas tanah, benda benda berterbangan keudara.

Tabel 6.3. Analogi intensitas gempabumi dalam skala Richter (Anonim, 2007)

<i>Skala Richter</i>	<i>Setara dengan bahan peledak</i>	<i>Contoh (estimasi)</i>
≤1,5	3kg	Pecahan batu di meja preparat (laboratorium)
1,0	15 kg	Ledakan dalam lingkungan konstruksi bangunan
1,5	160 kg	Bom konvensional PD II
2,0	1 ton	Ledakan di pertambangan (quary)
2,5	4,6 ton	Bom rakitan PD II
3,0	29 ton	Ledakan MOAB (Bali, 2003)
3,5	73 ton	Kecelakaan Chelvabinsk 1957
4,0	1 kilo ton	Bom atom kecil
4,5	5 kilo ton	Tornado rata-rata (total energi)
5,0	32 kilo ton	Bom atom Hiroshima / Nagasaki
5,5	80 kilo ton	Gempabumi Little Skull, USA 1992
6,0	1 mega ton	Gempabumi Bantul, DIY 2006
6,5	5 mega ton	Gempabumi Nortridge, 1994
7,0	32 mega ton	Gempabumi Awaji-Hansin, Kobe, Jepang, 1995
7,5	160 mega ton	Gempabumi Landers USA, 1992

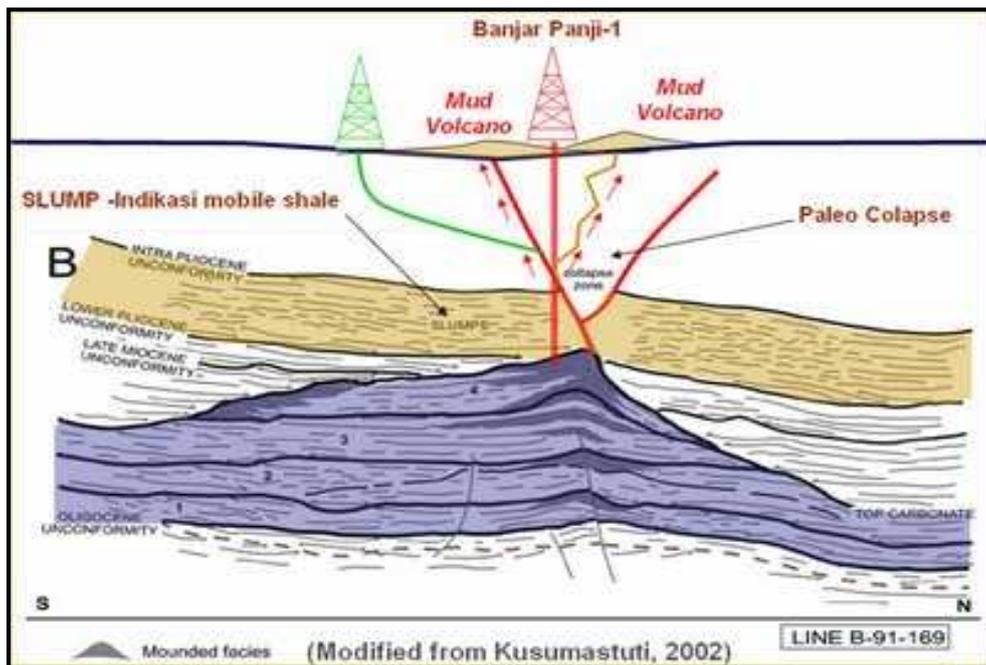
8,0	1 giga ton	Gempabumi Nias, Sumatra Utara 2005
8,5	5 giga ton	Gempabumi Anchorage, USA, 1964
9,0	32 giga ton	
9,2		Gempabumi NAD, 2004

d. Dampak yang Ditimbulkan oleh Gempabumi

Dampak gempa ada dua, yaitu primer dan sekunder. Dampak primer berakibat pada morfologi tetap yang dihasilkan langsung saat gempa, contoh: gawir sesar, zona rekahan dan bentukan *offset* pada dinding batuan / konstruksi bangunan. Sesar di sepanjang Kali Ngalang dan Opak adalah contoh dari dampak primer yang ditimbulkan oleh pergerakan tektonik pada masa lalu yang menerus hingga saat ini. Dampak sekunder dihasilkan ketika pergerakan tanah menyebabkan jenis kerusakan, seperti longsor, tsunami, likuifaksi, amblesan, letusan gunung api dan kebakaran. Besarnya kerusakan yang diakibatkan oleh gempabumi bervariasi, tergantung dari magnitudonya. Gempabumi dengan magnitudo yang tinggi berpotensi lebih besar.

- 1) **Longsor;** suatu geomorfologi dengan kontrol struktur memiliki kerentanan tinggi terhadap redeformasi. Contoh: gempabumi pada 5,9 SR yang terjadi pada tanggal 27 Mei 2007 di DIY dan Jateng, menyebabkan longsor dan jatuhnya batuan di sepanjang lereng Pegunungan Selatan, yaitu di sepanjang tebing perbukitan di sekitar Sungai Opak, Oyo dan Ngalang. Gempabumi tersebut juga telah melemahkan puncak Gunung Merapi, dengan membentuk rekahan pada kubah lava tahun 1911-1913 di Igir (Geger) Buaya. Akibatnya, kubah lava tersebut longsor pada tanggal 12 Juni 2007 yang berlanjut hingga 15 Juni 2007.
- 2) **Tsunami;** gempabumi pada tanggal 26 desember 2004 di Aceh telah menyebabkan tsunami yang sangat dahsyat di Samudera India dan menelan puluhan ribu korban jiwa dan harta benda di Aceh dan Sumatra Utara hingga Srilanka dan India. Tsunami adalah gelombang laut yang dipicu oleh pergerakan dasar samudra, seperti *vertical displacement* akibat sesar naik atau sesar turun pada dasar samudra. Tsunami juga dapat terjadi oleh gempabumi, letusan gunung api dan longsor di bawah laut. Gelombang tsunami dapat memiliki panjang gelombang 100 km. Tinggi tsunami di laut terbuka sangat rendah (1,5 kaki / 0,5 m), namun jika telah mencapai daratan dapat sangat tinggi, yaitu hingga 40 m.
- 3) **Likuifaksi;** suatu lapisan material sedimen tak-terkonsolidasi yang sangat tebal, seperti pasir, lumpur dan material timbunan (artifisial), dapat meningkatkan guncangan dasar (*ground shaking*) saat gempabumi berlangsung. Gaya merambat bersama-sama dengan guncangan tersebut, menjangkau bangunan-bangunan yang berdiri di atasnya, dan meruntuhkannya. Batuan tak-terkonsolidasi lebih mudah terdeformasi oleh guncangan gempa dibandingkan batuan dasar. Bangunan di atas batuan

dasar yang keras lebih kuat dibandingkan bangunan yang didirikan pada batuan tak-terkonsolidasi. Material tak-terkonsolidasi yang berada di bawah permukaan, mudah jenuh air karena porositasnya yang tinggi, dan lebih cair. Saat gempa berlangsung material cair memicu terjadinya rekahan, sehingga material tidak mampu lagi menahan beban di atasnya. Material cair bergerak melalui rekahan, yang fenomenanya disebut sebagai likuifaksi. Jika tekanan likuifaksi tinggi maka disertai semburan, seperti yang terjadi pada semburan lumpur panas di Sidoarjo (Gambar 6.55).



Gambar 6.55. Rentenan gempa bumi di (Sumatra – Jawa) telah memicu terjadinya semburan lumpur panas di Sidoarjo (Kusumastuti, 2002 vide Putranto, 2006).

- 4) **Amblesan (*subsidence*)**; gempa bumi yang terjadi pada deformasi batuan yang telah ada juga dapat menghasilkan amblesan, jika melalui dataran dengan gradien lereng kecil atau pada batugamping dengan rongga-rongga hasil pelarutan. Amblesan juga dapat dipicu oleh gempa bumi yang diikuti oleh likuifaksi dalam volume yang besar, sebagaimana yang terjadi di Sidoarjo akibat likuifaksi / semburan lumpur panas sejak Mei 2006 lalu.
- 5) **Kebakaran**; gempa bumi dapat memicu kebakaran. *Ground shaking* dengan skala guncangan menengah dapat menyebabkan pipa-pipa gas terputus, konsleting arus listrik hingga menjungkir-balikkan kompor gas dan peralatan dapur lainnya. Gempa bumi yang terjadi di San Fransisco pada tahun 1906 telah menghancurkan pipa-pipa air, sehingga kebakaran hebat yang terjadi akibat gempa tersebut tidak dapat ditanggulangi (Gambar VII.266.56).

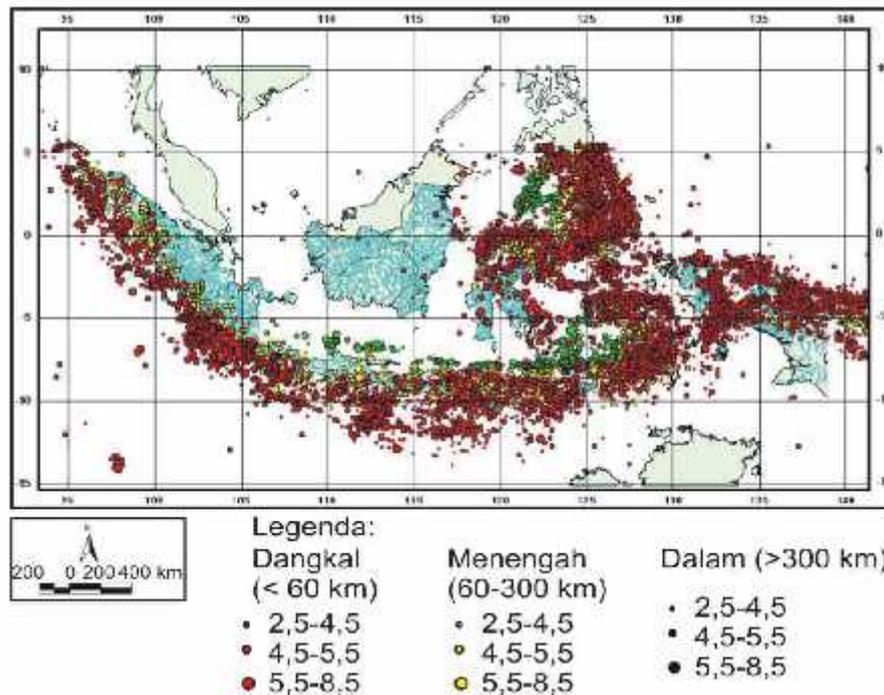


Gambar 6.56. Gempa bumi pada tahun 1906 mengakibatkan kebakaran di San Fransisco (sumber: USGS, 2001)

Permasalahan Geologi Lingkungan yang Ditimbulkan oleh Gempa bumi di Indonesia

Indonesia adalah wilayah dengan tatanan tektonik aktif, yang dibentuk oleh penunjaman lempeng India di bawah lempeng Eurasia di bagian barat sejak Kapur, serta penunjaman lempeng Pasifik di bawah lempeng Eurasia di bagian timur. Konsekuensinya adalah memiliki potensi gempa bumi dan tsunami, erupsi gunung api dan gerakan massa. Ditambah lagi dengan posisi Indonesia yang berada pada garis katulistiwa, menyebabkan curah hujan tinggi dengan hutan hujan tropis di sebagian besar wilayahnya, Gempa-gempa tektonik dangkal yang berintensitas besar sering melanda wilayah ini, yang sekaligus diikuti dengan berbagai macam gerakan massa. Sejak tahun 2003, sedikitnya telah berlangsung tujuh kali gempa bumi hebat yang memakan banyak korban jiwa, yaitu di Alor pada 2003, di Aceh pada 2004 diikuti tsunami, di Gunung Sitoli-Nias (28 Maret 2005), di Yogyakarta (27 Mei 2006), Nabire dan Pangandaran, di Indramayu (2007) dan lain-lain. Badan Meteorologi dan Geofisika telah menyusun peta seismisitas di

Indonesia periode 1973-2003. Gempa-gempa dangkal banyak dijumpai pada jalur penunjaman, gempa-gempa menengah di busur magmatik dan gempa-gempa dalam di cekungan belakang busur (Gambar 6.57).



Gambar 6.57. Peta seismisitas tigapuluh tahunan di Indonesia periode tahun 1973-2003 (sumber: Badan Meteorologi dan Geofisika dan Badan Koordinasi Survei dan Pemetaan Nasional, 2004)

D. Erupsi Gunung Api

Lebih dari 80% permukaan bumi, baik di dasar laut hingga daratan tersusun atas jutaan gunung api; baik yang aktif maupun inaktif. Gunung api-gunung api tersebut secara tektonik, terbentuk pada zona busur magmatik, busur pemekaran, hotspot dan pulau gunung api.. Gunung api-gunung api tersebut tersebar di sepanjang jalur cincin aktif dunia. Sepanjang aktivitasnya, gunung api membangun tubuhnya dan dalam periode tertentu menghancurkannya, keduanya berdampak negatif dan positif bagi ekosistem di sekitarnya. Dampak positifnya adalah membangun morfologi yang indah, dengan sumber daya alam melimpah, subur oleh kandungan unsur-unsur / gasnya. Dampak negatifnya adalah oleh ancaman bahayanya, seperti emisi gas yang dihasilkan oleh aktivitasnya, awan panas, hujan abu dan batu, lahar dan longsor gunung api.

a. Sejarah Kebencanaan yang Dipicu oleh Aktivitas Gunung Api

Telah disebutkan di depan bahwa aktivitas gunung api dapat mendatangkan dampak positif maupun negatif. Hal yang paling dirasakan masyarakat dan mendatangkan traumatik yang berkepanjangan adalah dampak negatif, yaitu bencana alam. Dalam sejarah, erupsi gunung api dengan skala yang besar dan berdampak bencana dengan intensitas tinggi, tidak berlangsung pada setiap

gunung api, serta tidak tiap-tiap periode erupsi. Tipe erupsi tersebut membutuhkan waktu yang lama, dapat sekali dalam ratusan hingga ribuan tahun. Sejarah mencatat letusan-letusan gunung api dengan indeks letusan 4-8 memiliki periode kebencanaan yang sangat panjang (Tabel 6.4). Gunung api yang dalam waktu lebih dari 100 tahun tidak menunjukkan aktivitasnya justru harus diwaspadai, karena mungkin saja sedang membangun energi erupsinya.

Sedikitnya 13 erupsi berintensitas sangat besar dengan korban jiwa hingga ribuan, terjadi dalam 2000 tahun terakhir (Tabel 6.4), dibentuk oleh semburan / aliran awan panas (Pinatubo oleh letusan G. Pinatubo), hembusan awan panas akibat guguran kubah lava (Merapi, 22 November 1994), lahar (debris avalans) (di Kali Bladag, Gunung Kelud pada 1991 dan Gunung Galunggung 1989); hujan abu dan batu (G. St. Helens pada 1980), lava (Hawai oleh G. Kilauea dan Mauna Kea), dan hembusan gas (G. Papandayan dan G. Dieng), dan lain-lain.

Tabel 6.4 Letusan-letusan besar gunung api di dunia yang banyak memakan korban jiwa (sumber: Oppenheimer, 2003), dan Smithsonian Global Volcanism Program; ILG: indeks letusan gunung api)

Gunung api	Tahun	Kolom letusan (km)	ILG	N. hemisphere	Korban
Vesuvius	79	?	7	?	?
Taupo	181	51	7	?	~
Baekdu	969	25	6-7	?	?
Kuwae	1452	?	6	-0.5	?
Huaynaputina	1600	46	6	-0.8	~1400
Tambora	1815	43	7	-0.5	> 71,000
Krakatau	1883	25	6	-0.3	36,600
Santamaría	1902	34	6	Tanpa anomali	7,000-13,000
Katmai	1912	32	6	-0.4	2
Mt. St. Helens	1980	19	5	Tanpa anomali	57
El Chichón	1982	32	4-5	?	> 2,000
Nevado del Ruiz	1985	27	3	Tanpa anomali	23,000
Pinatubo	1991	34	6	-0.5	1202

Peristiwa legendaris tentang bencana erupsi gunung api adalah letusan Gunung Vesuvius di Italia pada 24 dan 25 Agustus 79 M menghancurkan dan mengubur kota Pompeii, Stabei dan Herculaneum. Sekitar 20.000 jiwa dan ribuan tempat tinggal terkubur oleh material rempah gunung api tersebut (Gambar 6.58 kiri). Contoh bencana alam gunung api yang lain adalah guguran awan panas di desa Kaliadem, lereng selatan Gunung Merapi pada 15 Juni 2006 yang mengubur banker Kaliadem dan menewaskan 2 orang relawan, serta mengubur daerah wisata Kaliadem. Bencana letusan Gunung Merapi pada Oktober 2010 (Gambar 6.58 kanan).



Gambar 6.58. Sisa reruntuhan dampak bencana letusan Gunung Vesuvius pada 24 dan 25 Agustus 79 M (kiri) dan erupsi Merapi pada 2010 (kanan; sumber: www.volcano.und.nodak.edu).

Abu dan debu hasil erupsi gunung api dapat merusak pertanian. Kasus ini biasa terjadi saat aktivitas Gunung Merapi meningkat, seperti pada periode aktif 1994, 1997, 2002 dan 2006 (Gambar 6.59 kiri). Erupsi Gunung Kilauea (Hawaii) pada 1969-1974 menyebabkan gagal panen di Kona dan Puna (Gambar 6.59 kanan).



Gambar 6.59. Tanaman tembakau yang rusak oleh jatuhnya abu 2006 di Dusun Stabelan (lereng barat; kiri) dan tanaman tales yang layu karena debu di Deles (lereng tenggara; kanan).

Akibat lahar G. Galunggung pada 1982, seluruh lahan pertanian dari Desa Sindanggalih dan Bendungan ke arah timur hingga Desa Bantar dan Kecamatan Indihiang di Tasikmalaya rusak total, terendam lumpur lahar. Letusan pada tanggal 5 Mei 1982 (VEI=4) disertai suara dentuman, pijaran api, dan kilatan halilintar. Erupsinya sendiri berlangsung selama 9 bulan yang berakhir pada 8 Januari 1983. Selama periode letusan ini, sekitar 18 orang meninggal, sebagian besar karena sebab tidak langsung (kecelakaan lalu lintas, usia tua, kedinginan dan kekurangan pangan). Letusan pada periode ini juga telah menyebabkan berubahnya peta wilayah pada radius sekitar 20 km dari kawah Galunggung, yaitu mencakup Kecamatan Indihiang Kecamatan Sukaratu dan Kecamatan Leuwisari. Perubahan peta wilayah tersebut lebih banyak disebabkan oleh terputusnya jaringan jalan dan aliran sungai serta areal perkampungan akibat

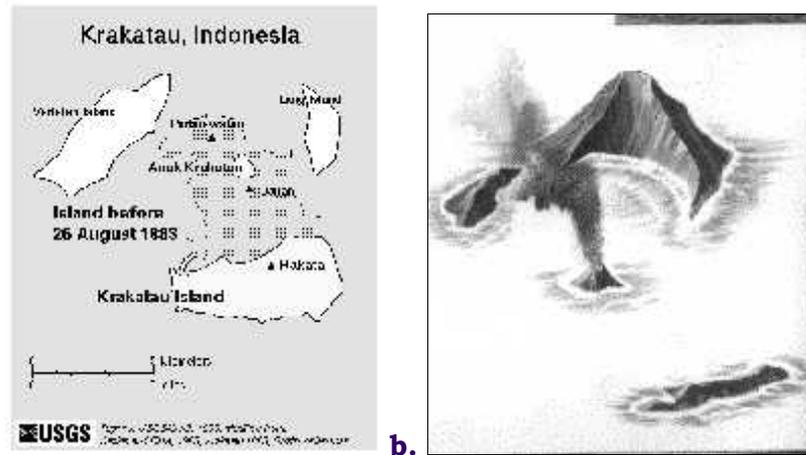
sedimentasi laharnya. Begitu pula lahar Gunung Kelud pada 1 Mei 1919 yang lumpur panasnya menelan sedikitnya 5000 korban jiwa dan mengubur lahan pertanian di sepanjang Sungai Lahar dan Sungai Bladag, salah satunya melanda dari Ds. Jengglong sampai Ds. Parerejo di sisi barat Gunung Kelud.

Letusan gunung api juga dapat mengacaukan navigasi pesawat, abu dan debu gunung api menghalangi jarak pandang pilot. Dampak lain yang ditimbulkan adalah kebakaran, contoh: di Kalapana (Hawaii) oleh lava Gunung Kupainaha pada 1991 (berita dari USGS). Erupsi gunung api juga dapat membentuk rekahan di permukaan; akibat tenaga inflasi sebelum erupsi; rekahan di Kapoho (Hawaii) oleh erupsi Gunung Kilauea 1960 (Gambar 6.60; berita USGS).



Gambar 6.60. Lava basalt di Gunung Kilauea (Hawaii) pada April 1983 memotong jalan Royal Garden (foto: JD. Griggs, USGS).

Letusan gunung api juga dapat memicu terjadinya tsunami, contoh: letusan Gunung Krakatau pada 26 Agustus 1883, yang menimbulkan tsunami setinggi 36 m dan memakan 36.000 korban jiwa di sepanjang selat Sunda. Letusan tersebut menghancurkan puncak Gunung Krakatau dan melahirkan Gunung Anak Krakatau, menyisakan Pulau Rakata di sebelah selatan, Pulau Verlaten dan Pulau Lang di sebelah utara (Simkin & Fiske, 1983; Gambar 6.61). disebutkan dalam berbagai tulisan bahwa ledakan Gunung Krakatau ini sebenarnya masih kalah dibandingkan dengan letusan Gunung Toba dan Gunung Tambora di Indonesia, Gunung Tanpo di Selandia Baru dan Gunung Katmai di Alaska (dalam Simkin & Siebert, 1994). Namun pada saat erupsi gunung api-gunung api tersebut berlangsung, populasi masyarakat yang tinggal di sekitarnya masih jarang. Sementara ketika Gunung Krakatau meletus, populasi manusia sudah cukup padat, sains dan teknologi telah berkembang, telegraf telah ditemukan, dan kabel bawah laut telah dipasang. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa saat itu teknologi informasi sedang tumbuh dan berkembang pesat. Dilaporkan bahwa letusan Gunung Krakatau pada masa itu merupakan bencana yang sangat besar pertama di dunia setelah penemuan telegraf bawah laut. Sayangnya, kemajuan teknologi tersebut belum diimbangi dengan kemajuan di bidang geologi; para ahli geologi belum mampu menjelaskan letusan tersebut.



Gambar 6.61. a. Krakatau sebelum dan setelah letusan 1883. b. Geomorfologi Anak Krakatau, Lang dan Verlaten (Simkin & Fiske, 1983).

Menurut Simkin dan Fiske (1983), tsunami yang ditimbulkan oleh letusan G. Krakatau tersebut terrekam hingga Samudra India, Samudra Pasifik, pantai barat Amerika, Amerika Selatan dan Terusan Inggris. Awan gelap dirasakan hingga New York yang berjarak 4828 km dari Gunung Krakatau. Letusan tersebut dicirikan oleh nilai Indeks Letusan Gunung api (ILG) 6 dan tenaga yang dilepaskannya mencapai 200 mega ton TNT (Pararas-Carayannis, 1974). Sebagai perbandingan, bom Hiroshima dan Nagasaki (Jepang) pada 16 Agustus 1945 adalah 20 ribu ton. Meskipun letusan Krakatau pada 1883 dikategorikan besar, namun letusan Gunung Santorin (Thera) di Samudra Aegean pada abad ke 5 SM dengan ILG 6 intensitasnya 1,5x lebih kuat dari Krakatau 1883.

Bencana gunung api yang lain adalah lahar. Lahar dari Gunung Nevado del Ruiz (Columbia) pada 13 November 1985 mencapai Desa Armero di sepanjang Sungai Lagunilas dan Guali sejauh 70 km, menelan 22.000-27.000 korban jiwa, serta mengendapkan sedimen setebal 4-10 m (Parnell dan Burke, 1990; Gambar 6.62). Lahar letusan Gunung Kelut pada tahun 1990 menewaskan ~33 orang, serta 500 rumah dan 55 sekolah rusak berat di sepanjang Kali Bladag. Contoh lain adalah lahar di Gunung Pinatubo (1991), El Palmar (1989), St. Hellens (1982), Villarrica (1984), Galunggung (1994) dan lain-lain.



Gambar 6.62. Lahar Gunung Nevado del Ruiz di Armero (Columbia) pada 13 November 1985, memakan 22.000-27.000 korban (foto: USGS).

Pemantauan Aktivitas Gunung Api Berpotensi Bahaya pada 10 tahun Terakhir

Sebanyak 139 gunung api aktif yang tersebar di Indonesia, saat ini tengah dilakukan pemantauan, 18 di antaranya dinaikkan statusnya dari siaga menjadi waspada, beberapa yang lain awas. Salah satunya adalah Gunung Agung di Bali, yang saat ini sedang menandakan aktivitas seismik yang lebih tinggi dari normal, deformasi tanah dan emisi gas. Beberapa erupsi freatik hingga freatomagmatik bersekala sedang pun terjadi pada setiap pekan sejak 2017. Begitu pula dengan sedikitnya 14 hingga 27 gunung api lain di Indonesia yang tengah beraktivitas selama 2 tahun terakhir, seperti Gunung Sinabung, Merapi, Merapi, Krakatau, Slamet, Kelud, Semeru, Dokono, Karangetang, Gamalama dan lain-lain.

Di dunia, aktivitas vulkanik pun tengah meningkat di beberapa sebagian besar Cincin Api Pasifik, di tepian hingga pedalaman lempeng benua seperti Ol Doinyo Lengai di Tanzania, pulau-pulau gunung api di Hawaii, gunung api busur kepulauan di Tonga-Kermadec di Pasifik barat daya, dan lain-lain. Erupsi-erupsi gunung api tersebut sebagian berupa aliran (efusi) lava, dan sebagian yang lain dalam bentuk letusan (ledakan) berdimensi kecil hingga menengah yang jika dibandingkan dengan erupsi-erupsi yang bersifat katastropis pada waktu sejarah (Tabel 6.4) belumlah sebanding. Sebagai contoh adalah erupsi Gunung Tambora pada tahun 1815, erupsi super dahsyat Gunung api Toba di Sumatra sekitar 74.000 tahun lampau, yang memuntahkan kurang lebih 70 kali lebih banyak magma daripada Tambora, yang menyebabkan bumi memasuki zaman es lagi. Erupsi Gunung api Toba diyakini sebagai erupsi terbesar dalam 25 juta tahun terakhir. Kendati demikian, erupsi-erupsi berukuran kecil hingga menengah yang sering terjadi itulah yang menyodorkan ancaman vulkanik konstan. Di seluruh dunia saat ini, sekitar 800 juta orang hidup dalam radius 100km, 29km, dan 10km dari gunung api aktif.

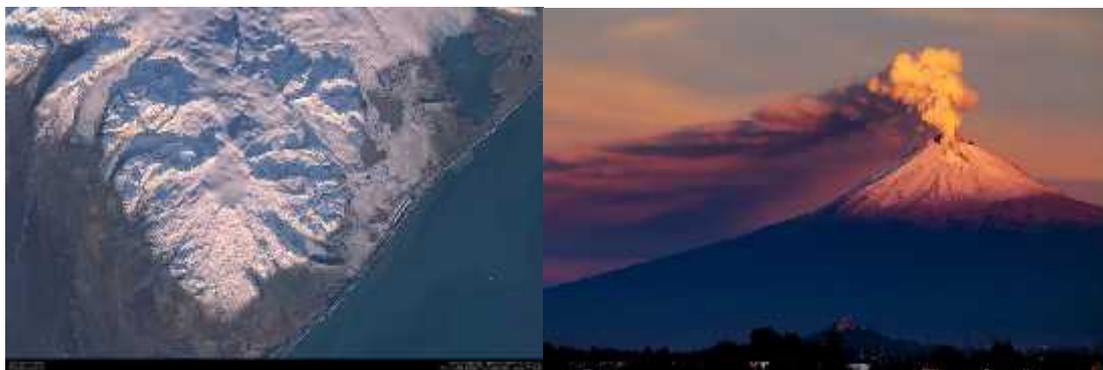
Dikatakan sebagai ancaman, jika terdapat variabel tingkat bahaya dan jumlah risiko berpotensi bahaya. Indonesia, Filipina, Jepang, Meksiko, dan Ethiopia memiliki lebih dari 90% ancaman bahaya gunung api terbesar; Montserrat adalah kepulauan gunung api yang memiliki ancaman bahaya terbesar, berkaitan dengan populasi penduduknya yang padat pada pulau-pulau gunung api tersebut. Gunung api yang perlu dilakukan pengawasan pada 2018 ini adalah Gunung Agung, Kirishima (Jepang), Merapi (Indonesia), Öraefajökull (Islandia), Popocatepetl (Meksiko), Villarrica (Chile) dan Kilauea (Amerika Serikat).

Gunung api Kirishima dikenal paling aktif di Jepang, terdiri atas sekelompok kerucut vulkanik dengan erupsi-erupsi yang tercatat secara sporadis sejak tahun 742. Erupsi terakhir dengan intensitas terbesar di puncak Shinmoedake diketahui berlangsung pada tahun 2011 setelah lebih dari 50 tahun tidak beraktivitas. Shinmoedake meletus untuk pertama kalinya dalam enam

tahun pada Oktober, gumpalan asap membumbung sampai 200 meter di atas kaldera. Saat ini, tingkat siaganya tetap tinggi.

Gunung api Merapi (di Indonesia) juga dikenal paling aktif dan berbahaya di Indonesia karena frekuensi erupsi dan populasi penduduknya yang padat pada lereng-lerengnya. Erupsi terdahsyat terakhir berlangsung pada tahun 2010, dengan hampir 400 korban jiwa. Aktivitas Gunung api Merapi sendiri secara umum dicirikan oleh pembangunan dan guguran kubah lava yang berlangsung sekali dalam 1-2 tahun; sesekali dalam periode yang panjang (~50 tahunan) terjadi erupsi eksplosif. Dari tahun 2010, sedikitnya telah berlangsung 3 periode erupsi, yaitu pada tahun 2012-2013, 2014-2015 dan 2018. Kini, aktivitas Merapi tengah dilakukan pengawasan, terkait dengan erupsi freatiknya yang berlangsung pada Mei hingga Juni 2018 yang lalu.

Gunung api Öraefajökull di Islandia lebih banyak diselimuti es; erupsi eksplosif terbesar berlangsung pada 1362 dan 1727, disusul banjir bandang mematikan akibat lelehan danau subglasial. Aktivitas gunung api Öraefajökull saat ini meningkat dengan ditandai getaran-getaran seismik kecil yang terrekam sejak Agustus 2017. Sejak Nopember 2017 terdapat depresi pada permukaan kaldera utama, es yang menutupinya meleleh oleh peningkatan suhu di kawahnya (Gambar 6.63). Gunung api Popocatepetl (di Meksiko) dikenal juga sebagai “Gunung Berasap”, terletak 70km di sebelah tenggara Kota Meksiko dan merupakan gunung api paling aktif di negara itu. Gunung api ini sedang mengalami erupsi sejak tahun 2005—dengan kubah lava yang membesar, ledakan, gumpalan-gumpalan abu membumbung sampai beberapa kilometer dan hujan abu menimpa kawasan di sekitarnya.



Gambar 6.63. Gunung api Öraefajökull di Islandia; blur di tengah adalah glasier (kiri) dan Gunung api Popocatepetl (di Meksiko) (kanan)

Gunung api Villarrica di Chili juga tertutup es; di puncaknya terdapat danau lava aktif. Peningkatan aktivitasnya dicirikan oleh peningkatan seismik dan semburan lava setinggi 150 meter sejak pertengahan November 2017. Ketika Villarrica meletus pada tahun 2015 gunung api itu memuntahkan abu dan lava sejauh 1.000 meter ke udara. Gunung api Kilauea di Pulau Besar di Hawaii memuntahkan lava basalt nyaris terus-menerus selama 35 tahun dan belum ada tanda-tanda akan berakhir dalam waktu dekat. Aliran lava muncul di kawah Pu u O o di Zona Retakan Timur, yang langsung masuk ke lautan.



Gambar 6.64. Gunung api Villarica di Italia (kiri) dan Gunung api Pu'u 'O'o (di Hawaii) (kanan)

Untuk dapat bertahan di lingkungan gunung api, diperlukan manajemen bencana, yaitu perencanaan yang matang dan pemahaman akan aktivitasnya. Bencana letusan gunung api adalah salah satu bencana geologi yang dapat dipelajari mekanisme dan periodisasinya, sehingga korban jiwa yang ditimbulkannya dapat diminimalkan.

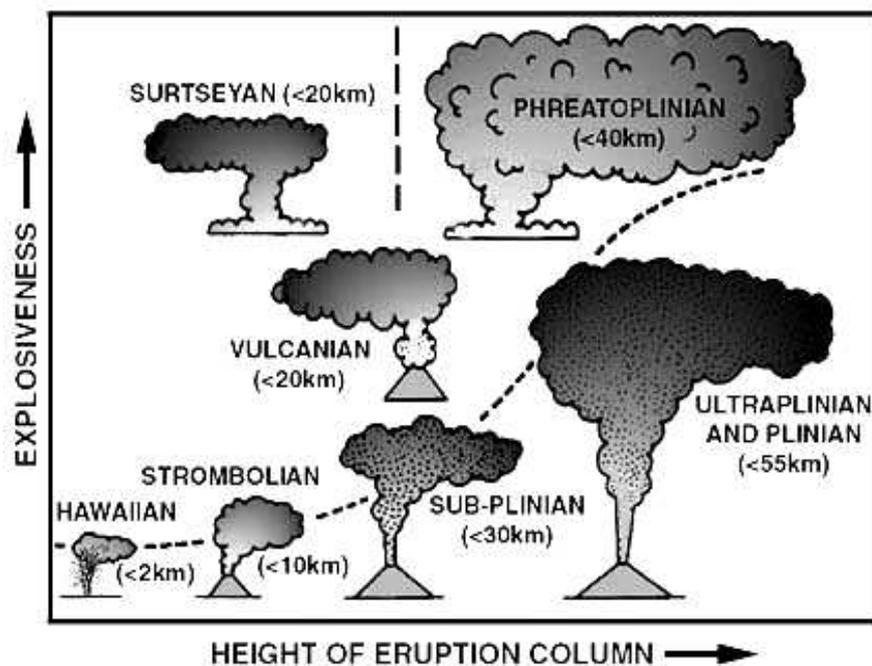
Didasarkan atas **mekanisme erupsinya**, ada tiga tipe erupsi gunung api yang biasa dijumpai, yaitu:

- a. Tipe erupsi freatik, yaitu jika tekanan erupsi dibentuk oleh tekanan gas yang terkandung di dalam pipa kepundan dan / bagian atas dapur magma. Dalam tubuh gunung api tersusun atas batuan sarang yang banyak mengandung air. Lapisan sarang tersebut berdekatan dengan sumber magma panas, sehingga terjadi pendidihan airtanah membentuk uap (gas). Uap air terakumulasi dan menekan sumbat gunung api ke atas. Ketika sumbat gunung api tidak mampu menahan tekanan tersebut, terjadilah letusan freatik. Tipe erupsi freatik menghasilkan material gunung api berupa abu dan debu gunung api, serta gas bertekanan tinggi. Contoh: letusan Gunung Papandayan (Garut) pada tahun 2003-2004. Pada tipe letusan ini, magma tidak sampai ikut terlontarkan.
- b. Tipe erupsi magmatik, terjadi jika tipe magmanya basaltik, encer dan rekahan (kawah gunung api) tidak tersumbat. Magma mengalir ke permukaan dengan tekanan rendah. Erupsi magmatik biasa terjadi pada gunung api tipe perisai pada gugusan punggung tengah samudra dan tipe strato. Material yang di erupsikan adalah lava seperti pembentukan kubah lava pada gunung api tipe strato di Gunung Merapi, aliran lava pahoehoe, banjir (sungai) lava dan lava Aa seperti Gunung Kilauea di Hawaii.
- c. Tipe erupsi freatomagmatik, dicirikan oleh tekanan erupsi sangat besar dan viskositas magma tinggi; dalam hal ini gunung api memuntahkan material terfragmentasi sangat tinggi dan material runtuhannya batuan dinding. Campuran material fragmental membentuk awan padat berdensitas tinggi. Fragmen-fragmen yang lebih besar berupa blok dan bom gunung api jatuh kembali ke dalam kawah dan sekitarnya, sedangkan material jatuhnya yang lain bergerak sangat cepat menuruni lereng sebagai aliran debris di bawah

pengaruh gaya gravitasi bumi. Beberapa material yang berukuran lebih kecil membentuk kolom letusan dan terbawa angin, lalu terendapkan di suatu tempat sebagai material jatuhnya piroklastika. Partikel abu yang paling halus dilontarkan ke atmosfer (pada lapisan stratosfer) dan untuk beberapa saat terbawa angin hingga beberapa puluh kilometer, untuk selanjutnya diendapkan di suatu tempat.

Aktivitas dan Material Aktivitas Gunung api Berdampak Bahaya

Didasarkan atas **tinggi kolom letusan, jangkauan material letusan dan volume material letusan yang dihasilkannya**, ada 7 tipe letusan gunung yang berpotensi berdampak bahaya yaitu tipe Hawaii atau semburan lava (*Lava fountain*), Stromboli, Surtsey, Vulkan, Phreatoplina, Plini (Vesuvian) dan Ultraplina (Gambar 6.65).



Gambar 6.65. Tipe-tipe erupsi gunung api didasarkan atas tingkat eksplosivitas dan tinggi kolom letusan (Cas et al., 1988).

- Lava fountain*, yaitu lava yang dilepaskan secara besar-besaran, seperti meluahnya gelembung gas ke udara. Dalam hal ini, tingkat eksplosivitas letusannya ditentukan dari kandungan volatil dalam magma. Magma yang kental memiliki tekanan dalam 100 atm beberapa meter di bawah permukaan. Kecepatan erupsi magma ditentukan dari seberapa besar kandungan gas dalam magma. Pada erupsi Plinian, kecepatan erupsi dapat mencapai 400-600 m/dt, Tinggi *lava fountain* ditentukan dari jumlah kandungan gas dalam magma yang di erupsikan; dapat mencapai 200-800 m dengan kandungan air mencapai 0,3% sampai 0,6%.
- Tipe Hawaii, ditemukan dalam lubang atau celah / rekahan kawah linear. Contoh: Gunung Mauna Loa di Hawaii pada 1950 dan Gunung Kilauea

tahun 1959. Tipe erupsi celah dicirikan oleh material erupsi berupa lava melalui zona pengangkatan dan aliran (banjir) lava yang mengalir menuruni lereng. Pada erupsi pusat, aliran / luahan lava hingga setinggi beberapa ratus meter atau lebih. Pada bentukan kawah purba, aliran lava dapat berbentuk danau lava, kerucut atau aliran terradiasi.

- c. Tipe Stromboli: model erupsi Gunung Irazú (Costa Rica) tahun 1965, dicirikan oleh luahan lava pijar dari puncak gunung api, membentuk gugusan yang melengkung sebagaimana langit. Pada lereng kerucut, lava mengental dan bergabung dengan aliran (sungai) lava menuruni lereng.
- d. Tipe Surtsey: erupsi eksplosif hidrovulkanik lava basaltik Gunung Surtsey pada 1963. Tipe erupsi ini hampir sama dengan tipe Stromboli, namun sedikit lebih eksplosif. Sebagaimana air mendidih, uap terakumulasi hingga membentuk tekanan yang sangat tinggi, lalu makin tumbuh secara eksplosif, hingga memfragmentasi uap magma menghasilkan abu halus.
- e. Tipe Vulkan: didasarkan pada erupsi Gunung Parícutin pada 1947. Material berdensitas terdiri dari campuran abu dan material lain dieksplosikan dari kawah gunung api, menyembur lebih tinggi dari puncak kolom erupsi.
- f. Tipe "Peléan" atau "Nuée Ardente" (guguran awan panas), contoh di Gunung Mayon (Philipina) pada 1968. Erupsinya dicirikan oleh kandungan gas, debu, abu dan fragmen lava yang dilontarkan secara vertikal dari kawahnya. Beberapa fragmen diendapkan kembali di seputar kawah, berbentuk tongue, sebagai guguran menuruni lereng dengan kecepatan lebih dari 100 mile/jam. Tipe erupsi ini dikategorikan besar dan banyak memakan korban jiwa, ct: letusan Gunung St. Pierre pada 1902.
- g. Tipe Plini atau Vesuvian (tipe kaldera) adalah tipe erupsi eksplosif yang ditandai dengan pembentukan kolom letusan setinggi 45 km atau lebih, melontarkan material dinding dan isi kawah gunung api. Tipe erupsi ini terjadi pada fasa penghancuran kerucut gunung api komposit. Contoh: letusan Gunung Vesuvius di Italia pada 79 M, pembentukan kaldera Toba, Tambora (1815 M) dan Krakatau (1883 M). Erupsinya dicirikan oleh tinggi gas laten, membentuk awan menyerupai kelopak bunga di atas gunung api, berkomposisi dasitik sampai riolitik, berkecepatan beberapa ratus meter per detik, dan menghasilkan tefra sangat tebal yang tersebar sangat luas, tersusun atas pumis dan abu gunung api.

Intensitas letusan gunung api diukur dengan parameter Indeks Letusan Gunung api (ILG). Nilai ILG ditentukan dari kualitas dan kuantitas letusan dan material letusannya, dan sifat-sifat erupsinya. Variabel-variabel yang diukur adalah tingkat eksplosivitas erupsi, tinggi kolom letusan, volume material yang dilontarkan, klasifikasi tipe erupsinya dan periode letusan sebelumnya (Newhall and Self, 1982; Tabel 6.5). Nilai ILG terukur terbesar hingga skala 8, dan terkecil 0; nilai 0 bersifat non-eksplosif (*lava fountain*) dan nilai 8 berupa letusan eksplosif yang bersifat mega-kolosal.

Tabel 6.5 Indeks letusan gunung api (ILG), tipe dan periode erupsi dan contoh letusan gunung apinya (Newhall and Self, 1982)

ILG	Pemerian	Tinggi kolom (m)	Volume (km ³)	Klasf.tipe erupsi	Periode	Contoh
0	non-explosif	<100	10 ⁻⁶ an	Hawaiian	Harian	Kilauea
1	Lemah	100-1000	10 ⁻⁵ an	Hawaiian/ Strombolian	Harian	Stromboli
2	Explosif	1-5x10 ³	10 ⁻³ an	Strombolian/ Vulkanian	Mingguan	Galeras, 1992
3	Merusak	3-15x10 ³	10 ⁻² an	Vulkanian	Tahunan	Ruiz, 1985
4	Kataklismik	10-25x10 ³	10 ⁻¹ an	Vulkanian/ Plinian	10an tahun	Galunggung, 1982
5	Paroxismal	>25x10 ³	Satuan	Plinian	100an tahun	St. Helens, 1981
6	Kolossal	>25x10 ³	Puluhan	Plinian/Ultra- Plinian	100an tahun	Krakatau, 1883
7	Super-kolossal	>25x10 ³	Ratusan	Ultra-Plinian	Ribuan tahun	Tambora, 1815
8	Mega-kolossal	>25x10 ³	Rubuan	Ultra-Plinian	Puluhan ribu tahun	Yellow-stone, 2 jtl

Didasarkan pada hasil pengamatannya di dunia, Simkin & Siebert (1994) menjumpai letusan ber-ILG 4-5 hanya terjadi dalam 20 kali dan ILG 2-3 terjadi dalam 20 kalinya ILG 4-5 (Tabel 6.6). Letusan-letusan gunung api dengan nilai ILG \approx 4-5 sangat jarang terjadi (Newhall & Self, 1982). Menurut Sparks, et al. (1978), jarangnyanya letusan gunung api dengan VEI lebih besar atau sama dengan empat menandakan faktor-faktor yang mengontrol letusan tersebut sangat sulit terjadi. Letusan-letusan besar tersebut dibentuk oleh magma jenuh air atau hampir jenuh air; air berubah menjadi uap sehingga meningkatkan tekanan magma. Makin tinggi gradien tekanan magma pada reservoir magma, makin tinggi vesikulasi dan fragmentasinya, akibatnya magma bergerak ke permukaan dengan sangat cepat, menerobos sumbat lava hingga runtuh dan terjadi letusan yang melontarkan magma terfragmentasi, batuan dinding dapur magma dan gas dalam volume yang besar. Letusan itu disebut letusan freatomagmatik, yang di permukaan sering bertipe Vulkanian hingga Plinian.

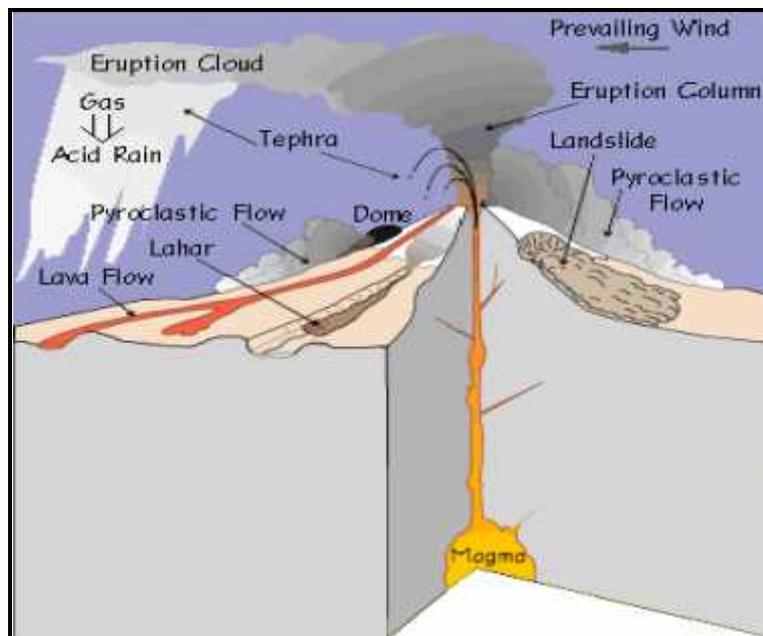
Tabel 6.6 Nilai ILG dan total letusan gunung api yang pernah terjadi di dunia (Simkin & Siebert, 1994)

Indeks Letusan Gunung api (ILG)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Jumlah letusan	487	623	3176	733	119	19	5	2	0

Untuk dapat merekonstruksi kejadian bencana alam letusan gunung api, diperlukan pengetahuan yang cukup dalam mengetahui sejarah bencana

tersebut pada masa lalu. Sebaran bencana dapat diprediksi dengan mengetahui sebaran material gunung api, intensitas bencana diketahui dari sifat fisik endapannya. Untuk itu diperlukan teknik pemerian secara genesis terhadap material erupsinya.

Material erupsi gunung api terdiri atas endapan piroklastika yang disebut arus piroklastika berdensitas dan jatuhnya, lava dan gas (Gambar 6.66). Jenis dan komposisinya ditentukan dari tipe erupsi dan tipe gunung apinya. Tipe gunung api sendiri ditentukan oleh tatanan tektonik yang membentuknya. Salah satu contohnya adalah material yang terbentuk oleh erupsi gunung api tipe komposit cenderung bersifat fragmental kasar hingga lava secara berselingan, dengan afinitas andesitik-dasitik. Hal itu berkaitan dengan tatanan tektonik yang membentuk magmanya adalah oleh proses pelelehan batuan sebagian akibat proses penunjaman pada gugusan gunung api cincin api (*ring of fire*).



Gambar 6.66. Skema lingkup material erupsi gunung api, terdiri atas kolom letusan, piroklastika aliran, lava, gas dan lahar (Anonim, 2000).

Lava adalah batuan beku (basalt, andesit, dasit/riolit) yang membeku di permukaan. Aliran lava basalt (tipe Hawaii) dapat mengalir dengan cepat (lebih cepat dari orang berlari) dalam radius yang sangat jauh sebagaimana air sungai, dengan suhu tinggi hingga 1000°C, dari kompleks gunung api perisai Gunung Mauna Kea, Kohala, Mauna Loa dan Hualalai. Pada lereng yang lebih curam, lava mengalir dengan laju yang lebih cepat dan lebih berbahaya. Pada ujung aliran, lajunya lebih lambat dibandingkan dengan orang berjalan. Selama erupsi Mauna Loa pada 1950, laju ujung lava rata-rata mencapai 6 meter per jam selama lebih dari 2 jam. Laju aliran lava ditentukan oleh kemiringan lereng, gaya gravitasi bumi dan volume lava yang di erupsikan. Aliran dengan volume yang besar menghasilkan laju aliran yang lebih tinggi. Jarak yang ditempuh oleh tubuh aliran tergantung dari laju dan durasi erupsi, makin lama makin

besar dan jangkauannya makin jauh. Laju aliran lava juga ditentukan dari afinitas dan komposisi lava.

Lava andesitik mengalir menuruni lereng, dengan kecepatan yang jauh lebih rendah dari lava basaltik, karena lebih kental. Lava jenis ini dijumpai pada gunung api tipe strato (komposit) sebagai produk pertumbuhan komposit gunung api; keterdapatannya di lapangan biasanya berselingan dengan breksi piroklastika dan tuf. Jika gunung api tersebut berada di bawah permukaan laut, maka dapat membentuk struktur bantal (basaltik) dan dapat juga terbreksikan membentuk breksi autoklastika (andesitik). Breksi autoklastika dicirikan oleh komposisi fragmen dan matriksnya memiliki tekstur yang sama dengan batuan beku. Tebal aliran lava di daerah puncak gunung api dapat mencapai lebih dari puluhan hingga ratusan meter, terdiri dari beberapa periode aliran, jika telah menuruni lereng tinggal beberapa meter atau bahkan puluhan centimeter. Lava andesitik yang tebal dapat membentuk struktur meniang, sedangkan yang tipis dapat membentuk struktur berlembar. Kenampakan struktur lembar pada lava di lapangan hampir menyerupai struktur perlapisan pada batuan sedimen.

Endapan piroklastika dapat terbentuk pada saat erupsi atau hasil dari guguran kubah lava. Material ini bersifat klastika, sehingga oleh para ahli geologi sedimenter sering dikelompokkan sebagai batuan sedimen. Bedanya dengan batuan sedimen adalah, batuan ini berasosiasi dengan material asal gunung api secara keseluruhan; dengan fragmen blok dan bom, serta sering berasosiasi dengan lava. Menurut MacDonald (1972) dan Fisher & Schminke (1984), mekanisme aliran piroklastika dapat berlangsung dalam empat mekanisme:

- a. Runtuhan eksplosif vertikal atau sering disebut pembentukan kolom erupsi plinian, material erupsi jatuh kembali ke permukaan tanah, tertransportasi dan terendapkan.
- b. Ledakan lateral, seperti yang terjadi di Gunung. St. Helens pada 1980.
- c. Luapan berlebih ("boiling-over"), yaitu akibat kandungan gas yang sangat tinggi dalam magma yang dierupsikan melalui pipa kepundan.
- d. Runtuhan gravitasional pada kubah lava yang sangat panas.

Didasarkan atas komposisi materialnya, endapan piroklastika terdiri dari tefra (pumis dan abu gunung api, skoria, *Pele's tears* dan *Pele's hair*, bom dan blok gunung api, *accretionary lapilli*, breksi vulkanik dan fragmen litik), endapan jatuhnya piroklastika, endapan aliran piroklastika, tuf terelaskan dan endapan serukan piroklastika (Gambar 6.68). Aliran piroklastika merupakan debris terdispersi dengan komponen utama gas dan material padat berkonsentrasi partikel tinggi. Mekanisme transportasi dan pengendapannya dikontrol oleh gaya gravitasi bumi, suhu dan kecepatan fluidisasinya. Material piroklastika dapat berasal dari guguran kubah lava, kolom letusan, dan guguran ongkongan material dalam kubah (Fisher, 1979). Material yang berasal dari tubuh kolom letusan terbentuk dari proses fragmentasi magma dan batuan dinding saat letusan. Dalam mendiskripsi genetis endapan gunung api, terutama yang berasal dari letusan langsung (endapan piroklastika), parameter-parameter

Di permukaan, material letusan pada zona batas atas, tersusun atas lontaran material berdensitas rendah (abu-lapili) membentuk kolom letusan. Pada tubuh aliran utama, yang terletak pada bagian paling bawah, terdiri atas campuran padatan-gas dengan konsentrasi partikel tinggi, abu-litik-bom yang berdiameter abu hingga bongkah. Dinamika pengendapan aliran piroklastika ini dikontrol oleh gaya gravitasi bumi dan tekanan aliran. Zona batas bawah berupa serukan piroklastika yang diendapkan secara turbulen, terdiri atas campuran gas dan abu gunung api konsentrasi partikel sangat rendah, efek dari tekanan turbulensi yang sangat cepat dan panas. Dalam endapan piroklastika, baik jatuhnya, aliran maupun serukan; material yang menyusunnya dapat berasal dari batuan dinding, magmanya sendiri, batuan kubah lava dan material yang ikut terbawa saat transportasinya. Secara megaskopis, fragmen batuan tersebut dicirikan oleh:

1. Fragmen endapan piroklastika yang berasal dari fragmentasi magma saat letusan dicirikan oleh bentuk butir menyudut hingga membulat. Fragmen bom biasanya membulat, permukaannya berstruktur kerak roti dan warnanya abu-abu sampai kemerahan. Fragmen blok berbentuk menyudut, masif dan lebih kristalin dibanding bom. Pada fasies proksimal, dijumpai beberapa fragmen yang berwarna kemerahan akibat teroksidasi saat dilontarkan. Pengamatan mikroskopis pada inti piroklastika yang berdiameter lebih besar dari satu-setengah meter berstruktur porfiritik, sedangkan pada fragmen yang lebih kecil ($\sim \varnothing < 30 \text{ cm}$) berstruktur skoria.
2. Fragmen piroklastika yang berasal dari penghancuran kubah lava, dicirikan oleh bentuk butir menyudut hingga membulat tanggung, kadang-kadang telah lapuk / teroksidasi dan pada permukaan fragmen jarang menunjukkan struktur kerak roti. Secara megaskopis, fragmen ini dicirikan oleh pada bagian luar sangat berongga dan makin ke dalam makin masif, dari pengamatan mikroskopis berstruktur porfiritik.
3. Material yang ikut terbawa saat transportasinya, dicirikan oleh bentuk butir agak membulat dan permukaannya terabrasi sangat lanjut.
4. Material dari hancuran batuan dinding dapur magma; warna tidak segar, bentuk fragmen blok / menyudut dan teralterasi lanjut.

Dalam satu sekuen piroklastika, ke empat jenis fragmen tersebut kadang-kadang dijumpai secara bersamaan, secara acak, menyatu dan sulit dibedakan satu sama lain. Di daerah penelitian, endapan piroklastika dengan ke empat fragmen tersebut hanya dijumpai di fasies proksimal. Untuk membedakan endapan piroklastika dan lahar, dilakukan pengukuran arah magnetik fragmen batuan untuk fraksi kasar dan anisotropi untuk fraksi halus. Aliran piroklastika cenderung dialirkan secara monomodal sehingga tidak terbentuk arah penjajaran fragmen, sedangkan lahar dialirkan secara unimodal sehingga lebih dijumpai penjajaran fragmen.



Gambar 6.69. Endapan aliran piroklastika Gunung Galunggung, produk letusan tahun 1983; dengan fragmen bom, abu dan debu dengan sortasi yang jelek dan belum terbatukan (foto: Bronto, 2007).

Di udara, 1-5% komponen gas di atmosfer dihasilkan oleh aktivitas gunung api, meliputi CO₂, SO₂, dan unsur-unsur jejak yaitu N, H, CO, S, Ar, Cl dan F, sedangkan penguapan air menempati 70-90%. Gas-gas tersebut selanjutnya membentuk senyawa yang bersifat toksik, seperti HCl, HF, H₂SO₄ dan H₂S, menghasilkan aktivitas gunung api fumarolik (Tabel 6.7).

Tabel 6.7 Gas vulkanik dan emisinya di udara (sumber: USGS)

<i>Gas Utama</i>	<i>Gas jejak</i>	<i>Gas toksik</i>
H₂O (70-90%)	N, H, S,	HCl, HF
CO₂	F, Ar,	H ₂ SO ₄
SO₂	CO, CL	H ₂ S

Macam-macam aerosol belerang sering hadir dan kadang-kadang sulfur juga terakumulasi sebagai kristalin dalam fumarol, yang disebut sulfatara (warna kuning dasar; Gambar 6.70). Di beberapa gunung api, akumulasi kristal sulfur ini dapat bernilai ekonomi. H₂S sering disebut sebagai gas buangan (*sewer gas*) karena baunya seperti telur busuk. Gas tersebut dapat mengiritasi mata, hidung dan tenggorokan. SO₂ terasa sangat dingin di kulit, yang baunya seperti bau gas yang tercium sesaat setelah menyalakan korek api. Jika keduanya hadir bersama-sama, maka dapat bereaksi dengan cepat membentuk sulfatara dan uap air.

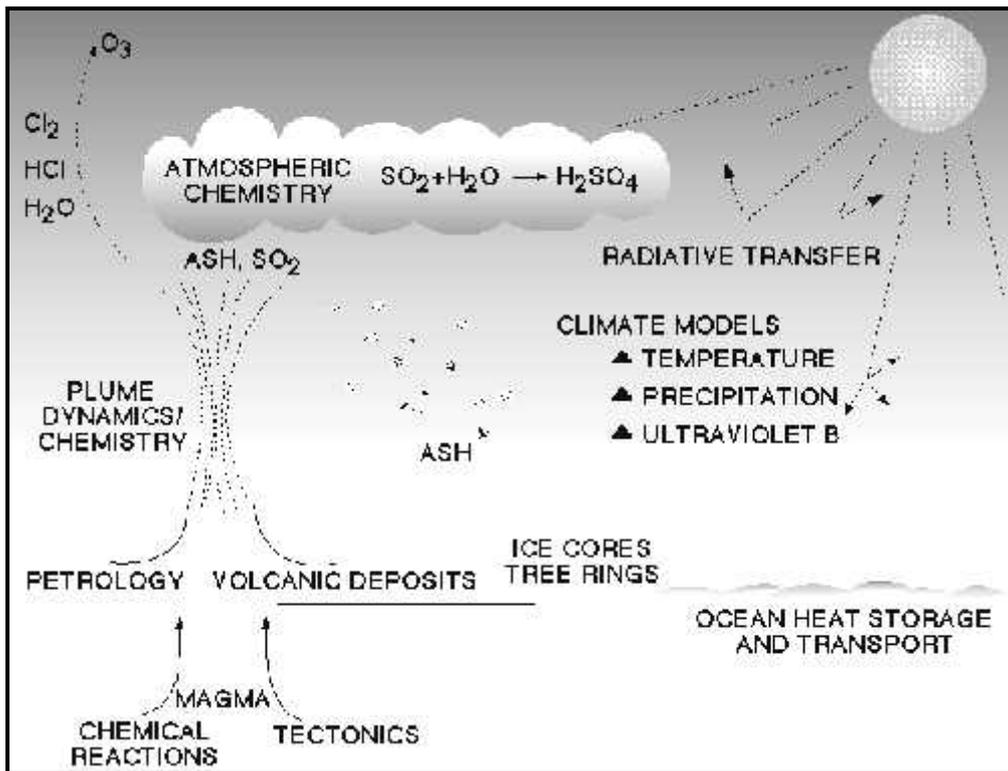
Gas gunung api sangat berbahaya bagi masyarakat yang tinggal di sekitarnya atau bagi siapa saja yang menghirupnya. Suhu gas tinggi dan berracun, emisi gas dalam jumlah yang besar dapat bersifat membunuh. Sebagai contoh adalah gas atau uap yang diemisikan oleh kolom lava pada gunung api aktif atau dalam keadaan istirahat dapat sangat berbahaya bagi siapa saja yang berjalan di atasnya karena dapat berracun. Pada kasus-kasus (jarang terjadi) ribuan orang dapat mati oleh erupsi gas gunung api tersebut, seperti yang pernah terjadi di Lake Nyos, Pegunungan Mammoth (California) dan erupsi Pu'u O'o di Gunung Kilauea (Hawaii). Dari data pengamatan di HVO (Hawaii Volcano Observatory)

diperoleh data bahwa emisi gas CO₂ di Pegunungan Mammoth telah mengakibatkan pepohonan di empat wilayah hutan mati, salah satu yang terluas mencakup 11,3 hektar. Pada awal letusan Gunung Kilauea pada 1983, hasil pengukuran emisi gas di dekat kawah adalah 150 ton SO₂ per hari. Namun, pada saat erupsi mencapai puncaknya, SO₂ yang dilepaskan mencapai 30.000 ton per hari, dengan periode sekali dalam 3-4 minggu selama 24 jam atau kurang per periode, di sepanjang tahun 1983-1986. Reaksi kimia akibat emisi gas tersebut menghasilkan dua gas beracun, yaitu *vog* dan *laze* yang berbahaya bagi masyarakat dan wisatawan di Big Island (Hawaii), dan menyebabkan hujan asam (Gambar 6.71).

- Vog adalah sulfur dioksida yang dilepaskan di puncak gunung api. Sulfur yang terkandung pada tubuh pipa lava bereaksi dengan oksigen, partikel debu, sinar matahari dan air, membentuk campuran aerosol sulfat, asam sulfur, dan jenis oksida sulfat yang lain. Vog tersebut selanjutnya terbawa angin dan dapat menyebabkan hujan asam.
- Laze adalah campuran dari asam hidroklorik dan uap air laut; ketika lava menyentuh air laut, terjadi reaksi kimia antara lava panas dan air laut, menghasilkan asap putih. Asap laze juga dapat membentuk hujan asam dengan pH 1,5-2,5, bersifat sangat korosif pada kulit dan pakaian, serta dapat menyebabkan iritasi pada tenggorokan, mata, telinga dan hidung.



Gambar 6.70. Sulfatara yang terakumulasi di kawah Gunung Merapi (foto: PVMGB, www.vsi.esdm.gov).



Gambar 6.71. Emisi gas di udara yang dihasilkan oleh letusan gunung api (www.usgs.mvo.gov).

Lahar; Martini (1997) mendefinisikan lahar sebagai aliran lumpur pekat yang terbentuk dari campuran air, partikel dan lumpur. Komponen air dapat berasal dari air hujan, danau kawah dan mencairnya es, sedangkan partikelnya berasal dari longsoran ongkongan piroklastika yang telah ada sebelumnya maupun material yang dihasilkan langsung dari letusan. Komposisi partikel lahar bervariasi dari abu hingga bom dan litik granul hingga boulder ($\varnothing > 1$ m). Densitas dan viskositas lahar tinggi dengan konsentrasi partikel 20-60% atau 60-90% total berat. Lahar diendapkan secara cepat dalam arus turbulen di sepanjang lereng gunung api atau lembah-lembah sungai, sama cepatnya dengan aliran sungai. Pada konsentrasi partikel yang telah berkurang (rendah), debris lahar berubah menjadi aliran lumpur pekat hingga suspensi dalam arus transisi-laminer membentuk banjir bandang. Didasarkan pada suhunya saat pengendapan, lahar dapat berupa lahar panas (jika dari letusan langsung) dan lahar dingin (ongkongan yang telah lama). Sedangkan sumber airnya dapat berasal dari air hujan, es atau danau. Lahar Merapi lebih banyak dijumpai sebagai lahar dingin-hangat dengan sumber air dari air hujan. Lahar di Gunung Kelud dihasilkan dari air pengisi danau kawah, yang saat letusan gunung api berlangsung ikut terlontarkan dan mengalir membawa material membentuk lahar panas (lahar letusan). Lahar Gunung Nevado del Ruiz di Columbia terbentuk karena mencairnya es di puncak gunung api akibat material erupsi. Air es kemudian melongsorkan tumpukan material gunung api di atas puncak dan membawanya hingga kaki gunung api.

Karena penamaan kuantitatif lahar sulit dilakukan di lapangan; sebagai lahar distal, medial dan / proksimal, maka selanjutnya lahar ditentukan sebagai lahar kohesif (*cohesive*) dan lahar tak-kohesif (*non-cohesive*).

Lahar kohesif dicirikan oleh struktur masif-gradasi-laminasi silang, ukuran butir abu pasir hingga boulder yang tertanam dalam lumpur pekat, terpilah buruk-sedang, bentuk fragmen menyudut hingga membulat tanggung, konsentrasi fragmen besar berada di setengah hingga sepertiga bagian bawah aliran dan di permukaan sering menunjukkan penjajaran fragmen sebagai lahar tak-kohesif. Lahar kohesif ini dihasilkan dari penggabungan beberapa material dalam satu kesatuan endapan, sehingga konsentrasi lumpurnya dapat mencapai 30-50% total berat sebagai matriks. Material lumpur tersebut dapat berasal dari alterasi hidrotermal akibat pemanasan magma pada tubuh gunung api, fragmentasi material magma dan dinding, serta batuan dinding lembah yang tererosi saat aliran. Konsentrasi partikel dalam lahar kohesif sekitar 12-20% atau 40% total berat; di fasies proksimal diameter fragmen dapat mencapai lebih besar dari empat meter, struktur masif dan gradasi dan beberapa fragmen masih berstruktur kekar prisma, sedangkan di daerah distal didominasi oleh partikel berukuran pasir-granul, struktur silangsiur (mangkuk), sortasi sedang dan kadang-kadang berstruktur gradasi normal. Lahar tersebut dapat menjadi lebih encer oleh penambahan komponen air sungai dan berkurangnya material sedimentasi hingga membentuk lahar tak-kohesif. Lahar tak-kohesif dicirikan oleh sortasi sedang hingga baik, lepas-lepas, bentuk butir pasir hingga bongkah, tertanam dalam sedikit abu, umumnya dijumpai penjajaran fragmen yang menunjukkan arah pengendapan dan diendapkan di atas lahar kohesif.



Gambar 6.72. Lahar letusan Gunung Kelud pada tahun 1991 yang memakan ribuan korban jiwa (dalam lingkaran).

Bencana yang dapat ditimbulkan oleh lahar, telah tercatat dengan baik dan diketahui sangat besar. Sebagai contoh adalah lahar yang diakibatkan oleh longsoran endapan awan panas Gunung Merapi pada tahun 1883 yang menenggelamkan 2.000 rumah di sepanjang bantaran Sungai Boyong, dan pada tahun 1969 yang meratakan permukiman di Sorasan dan Koroulon (seputar Sungai Gendol-Opak). Contoh yang lain adalah lahar letusan Gunung

Kelud yang terjadi secara tiba-tiba pada tahun 1991 yang memakan ribuan korban jiwa (Gambar 6.72). Lahar dengan konsentrasi partikel rendah di Nevado Del Ruiz pada 13 November 1985 meratakan hulu Sungai Lagunillas, dalam radius 70 km dari sumbernya, mengubur kampung-kampung di Armero dan membunuh sedikitnya 23.000 jiwa hanya dalam beberapa menit (*kom. tertulis dengan Marso pada 23 September 2003*).

Upaya mitigasi bencana alam lahar telah banyak dilakukan seperti pembangunan check dam dan kantong-kantong pengendali lahar di Merapi dan Kelud. Di Gunung Redoubt (Alaska) pemasangan pendeteksi lahar dengan komputer disimpan di dalam drum minyak sehingga tidak rusak oleh sedimen (Gambar 6.73), jika sewaktu-waktu lahar turun.



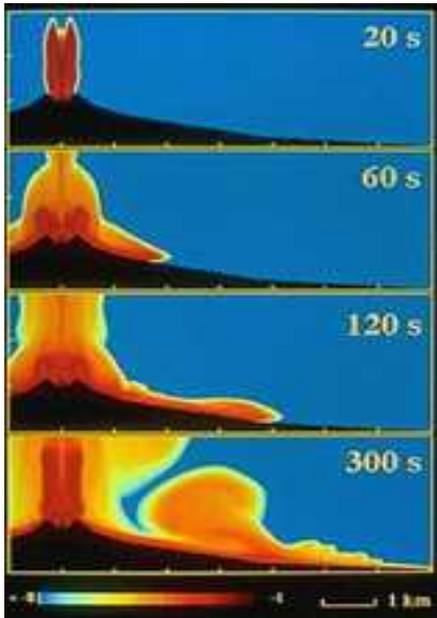
Gambar 6.73. Sistem pendeteksi lahar yang disimpan di dalam drum minyak dalam kantong lahar di Gunung Redoubt (Alaska, Brantley, 1990).

Pengaruh Tekanan Material Gunung Api terhadap Konstruksi Bangunan

Beberapa bencana geologi Gunung Merapi selama 100 tahun terakhir, baik guguran awan panas maupun lahar, telah diketahui melanda lereng gunungapi bagian barat laut, barat, baratdaya, selatan hingga tenggara. Sebagai contoh; lahar pada 13 Januari hingga 5 Februari 1969 yang menyebabkan 180 rumah di Desa Sayidan, Prawirodirjan, Jetis dan Bintoro rusak total, terendam lumpur setebal 1,5 m dan 3000 orang meninggal. Guguran kubah lava pada 22 November 1994; yang di permukaan hanya menyisakan puluhan centimeter endapan piroklastika, melanda Dusun Turgo 7,5 km di bagian selatan gunungapi (Gambar 6.74). Sebanyak 41 orang meninggal, 43 orang cacat hingga saat ini dan beberapa rumah roboh.

Kecepatan arus, turbulensi, volume dan konsentrasi partikel dan gas dan tekanan arus densiti piroklastika mempengaruhi intensitas bencana. Arus densiti piroklastika dibentuk oleh olakan/semburan material piroklastika tak-terpisahkan. Material yang dihasilkan dari arus tersebut berupa endapan aliran

dan serukan piroklastika. Simulasi perubahan suhu lingkungan oleh arus densiti piroklastika dari Dobran et al. (1994) ditunjukkan pada Gambar 6.74.



Gambar 6.74. Hasil simulasi kecepatan arus piroklastika di Gunung Vesuvius, Italia (Dobran et al, 1994; warna menunjukkan perubahan suhu dan konsentrasi piroklastika; merah tinggi dan biru rendah).

Rekonstruksi bencana yang disebabkan oleh arus densiti piroklastika biasanya meliputi suhu dan tekanan arus, serta respon bangunan dalam menahan tekanan tersebut. Perubahan suhu lingkungan akibat arus piroklastika adalah fungsi dari perubahan suhu (∂T) terhadap waktu tempuh (∂t), daya hantar panas (k) dan konstanta kapasitas panas di udara (C_p). Suatu budidaya atau permukiman penduduk biasanya terkonsentrasi pada wilayah seputar gunung api dengan gradien lereng rata-rata $2-16^\circ$ atau tidak lebih dari 20° . Wilayah tersebut berada pada zona semburan atau aliran piroklastika berdensitas pada fasies gunung api proksimal. Jika rekonstruksi dilakukan pada daerah dengan gradien lereng $2-20^\circ$, maka mekanisme aliran dianggap sebagai aliran debris yang selanjutnya berubah menjadi aliran turbulen, dengan mengabaikan tekanan yang dibentuk / diturunkan oleh tekanan kolom letusan. Formula yang digunakan untuk menentukan tekanan (P ; kg/m^2) arus densiti piroklastika tersebut adalah (Valentine, 2005): $P = \frac{1}{2} \rho v^2$

ρ adalah densitas material piroklastika (kg/m^3) dan v kecepatan aliran (m/dt).

Dalam perjalanannya, aliran tersebut dipengaruhi oleh viskositas kinematika. Dengan menganggap arus densiti piroklastika adalah aliran semi-fluidisasi, maka tegangan-regangan alirannya dapat mengikuti hukum fluida Newton, yaitu $\tau = \mu \frac{dv}{dy}$; τ tegangan geser aliran dan $\frac{dv}{dy}$ perubahan kecepatan per

satuan waktu, dan μ adalah viskositas kinematika. Viskositas kinematika (μ ; m^2/dt) adalah fungsi dari densitas partikel (kg/m^3) dan diameter partikel (m)

berbanding dengan viskositas gas ($\eta : 10^{-1}$ Pa.s atau $1,0197 \times 10^{-3}$ kg.m⁻¹.dt⁻¹;
modifikasi dari MacDonald, 1972):
$$\dot{\gamma} = \frac{(\rho_p - \rho_g)d_p \cdot g}{\eta}$$

Laju pengendapan material piroklastika dipengaruhi oleh konsentrasi massa (partikel), kolom letusan, suhu (T), arah angin, gravitasi bumi, gradien lereng (S), geometri kubah lava dan topografi dasar aliran. Kecepatan pengendapan (V^* : kg/m²), yaitu jumlah partikel yang terendapkan per luas area; fungsi dari densitas partikel (d_p ; m) dan tebal aliran (z ; m) terhadap viskositas kinematika (ν : m²/dt; dimodifikasi dari Cas and Wright, 1988):
$$V^* = \frac{g(\rho_p - \rho_g)z^2}{18\nu}$$

$\rho_g : 1,8$ kg/m³, α : gradien lereng, dan konstanta 18 adalah faktor koreksi untuk proses pengendapan pada wilayah dengan gradien lereng 1-10°. Sedangkan kecepatan aliran adalah fungsi dari densitas dan diameter partikel (d_p ; m) terhadap viskositas dinamika gas (η ; kg/m.dt atau Pa.dt; modifikasi dari MacDonald, 1972):
$$v = \frac{g \sin \alpha (\rho_p - \rho_g) z d_p}{n\eta}$$

n adalah faktor koreksi yang nilainya 3 (tanpa unit) untuk daerah dengan gradien lereng $< 0,1$ dan 4 untuk gradien lereng $> 0,1$.

Menurut Voight et al. (2000), kecepatan arus densiti piroklastika yang dibentuk oleh guguran kubah lava pada tahun 1969 yang menjangkau ~13 km dari puncak gunungapi, adalah 100-110 km/jam dan bersuhu 300-400°C. Suhu tersebut diketahui dari spektrometri infra merah pada kayu yang terbakar. Kulit manusia dapat mengelupas pada suhu 80°C (Voight et al., 2000) dan beton dapat runtuh oleh tekanan sebesar 1-5 kPa atau 102-510 kg/m² (Nunziante et al., 2003). Bangunan dapat runtuh jika daya respon yang dimilikinya tidak dapat menahan tekanan dinamika dari yang menerjangnya. Candi-candi di daerah penelitian diketahui terkubur oleh bahan klastika Gunungapi Merapi. Endapan tersebut secara umum dicirikan oleh sifat fisik berupa densitas, rapat massa dan porositasnya. Parameter yang dicari untuk menentukan intensitas bencana yang ditimbulkan arus piroklastika berdensitas (*pyroclastic density currents* selanjutnya disingkat PDC), adalah kecepatan fluidisasi, suhu aliran dan tekanan dinamikanya. Sedangkan lahar ditentukan dari kecepatan aliran dan tekanan dinamikanya.

Dinamika Transport dan Pengendapan Piroklastika

Secara teoritis, transport dan pengendapan material piroklastika dapat dikategorikan sebagai aliran fluidisasi yang dibentuk oleh campuran gas dan material lepas berukuran halus yang membentuk seperti larutan. Arus ini bergerak turbulen dalam suspensi abu-bongkah dengan media gas dan komponen massa, serta bermomentum dan berenergi besar yang berasal dari tubuh letusan. Rekonstruksi arus piroklastika dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan studi palaeohidraulika. Saat letusan akan

berlangsung, terjadi tekanan yang mendesak dinding dapur magma oleh tekanan dinamis campuran magma, uap dan gas. Hal itu memicu dinding dapur magma untuk meresponnya, hubungan tegangan elastis terhadap regangan dari batuan dindingnya adalah: $\tau = \eta \frac{dv}{dt} + C'v$

v : regangan, η : viskositas dan C' : konstanta elastisitas: perubahan elastisitas (E) per luas area (a): $C' = \frac{a_0^2}{4\pi r} \frac{d^2 E}{da^2}$.

Saat dinding dapur magma tidak mampu menahan tekanan massa yang dikandungnya (campuran magma+gas), dinding tersebut akan pecah dan menyemburkan semua material yang dikandungnya. Peristiwa tersebut dikenal dengan letusan freatomagmatik, yaitu campuran magma dan uap. Besarnya material luahan akibat letusan freatomagmatik berfluktuasi tergantung dari besarnya energi yang dimiliki massa saat naik ke permukaan. Menurut Freundt (2000), fluktuasi massa saat letusan di beberapa gunungapi komposit di dunia, berkisar 107-1012kg/dt dengan konsentrasi uap (H₂O) dalam magma 1-3%. Besarnya kecepatan dan tekanan PDC akibat letusan, dikontrol oleh besarnya kolom letusan. Kolom ini terbentuk dari diferensiasi energi kinetis menjadi energi dinamis oleh penghamburan gas dalam magma. Tinggi kolom letusan adalah fungsi jarak tempuh magma ke permukaan (y), kecepatan alir gas (v_{gas}), konsentrasi gas (s : CO₂, H₂O, dan SO₃⁻³) dan efisiensi energi magma panas saat menyentuh atmosfer (Wilson et al., 1978). Menurut Wilson (1980), kolom letusan terjadi dalam tiga tahap, yaitu:

- Gas naik ke permukaan sehingga tekanan dapur magma berkurang sangat cepat.
- Pembentukan kolom letusan oleh arus konveksi dan suhu material oleh energi apungan ($H_B = \text{densitas tubuh kolom} \approx \text{densitas atmosfer}$).
- Kolom letusan bergerak secara radikal membentuk awan panas setinggi H_B sampai H_T (meter) mengikuti arah angin lalu jatuh mengikuti gaya gravitasi bumi.

Sedangkan tinggi kolom letusan maksimum (H_T) dikontrol oleh momentum gas dan energi kinetis saat letusan pada konsentrasi gas $\leq 10\%$; $H_T = 8,2^{1/4} \epsilon^{1/4}$; ϵ : energi letusan (Nm); $\epsilon = \beta \cdot v \cdot f \cdot r^2 \cdot s \cdot (T_m - T_a) \cdot F$; s : densitas massa (campuran partikel dan gas), v : kecepatan aliran, s : panas spesifik, dan T_m : suhu letusan produk dingin ($\sim 270^\circ\text{K}$), r : jarak kawah letusan dan F faktor efisiensi. Hubungan densitas massa (s) dan densitas gas magmatik (ρ_g), densitas piroklastika (ρ_m), berat fraksi gas (X_g) dan piroklastika (X_m) adalah: $\frac{1}{s} = \frac{X_m}{\rho_m} + \frac{X_g}{\rho_g}$.

Tujuan akhir dari studi kolom letusan ini adalah untuk mengetahui total energi letusannya. Pada $T_m = 1200^\circ\text{K}$, ρ_g : 1.18 kg/m³, dan panas spesifik (s): 1,1 x 10⁻³ J/kg K, tinggi kolom letusan maksimum per luas area (Sparks, 1986): $H_T = 5,733(1+n)^{-3/8} [\tau w (T_m - T_a)]^{1/4}$. Pada turbulensi maksimum, yaitu saat mencapai titik kritis, kolom letusannya menjadi $H_T = 1,37Q^{1/4}$. Q adalah total energi saat

letusan (joule). Dalam hal ini, Q hanya dapat diukur jika kolom letusan diketahui, dan kolom letusan dapat diketahui dari interpretasi tipe letusannya, sedangkan tipe letusan dapat diketahui dari studi tefrostratigrafi, yaitu kandungan pumis dan komposisi endapan jatuhnya. Menurut Andreastuti et al. (2000) letusan bertipe volkanian hingga sub plinian telah berlangsung selama waktu sejarah. Jika tekanan (P) adalah fungsi dari gaya per satuan luas ($P = F/A$), maka kecepatan alirannya dapat diartikan sebagai fungsi jarak (dx) terhadap fungsi waktu (dt). Jadi, $v = dx/dt = \int a dt$, a : luas area. Secara umum, kecepatan aliran PDC ditentukan dengan didasarkan pada Hukum Newton II: $gh = v^2$; h : tinggi tanjakan (dari puncak ke wilayah pengendapan), v : kecepatan aliran dan g : konstanta gravitasi bumi.

Hubungan antara Kecepatan Pengendapan dan Kecepatan Aliran

Hubungan kecepatan aliran minimum (U_{mf} ; m/dt) dengan kecepatan aliran dan kecepatan pengendapan (partikel) dapat ditentukan dengan memodifikasi persamaan Ergun yaitu:

$$\left[\frac{1,75}{Q_s \lambda_{mf}} \left(\frac{d_p U_{mf} \dots g}{y} \right) \right] + \left[\frac{150(1 - \lambda_{mf})}{Q_s^2 \lambda_{mf}^3} \frac{d_p U_{mf} \dots g}{y} \right] = \frac{d_p^3 \dots g (\dots - \dots g)}{y^2}$$

d_p : diameter partikel rata-rata (cm), Q_s : tingkat kebundaran partikel ($A_{spere}/A_{partikel}$), λ_{mf} : jumlah rongga/volume, y : viskositas gas (poise= 10^{-1}) dan g percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/dt}^2$).

Hasil pengamatan di beberapa letusan gunungapi; kecepatan aliran piroklastika dapat mencapai 60-160 m/dt tergantung dari viskositas alirannya (Yokoyama, 1974; Sparks, 1976; Miller & Smith, 1977). Menurut Wilson et al. (1980), material piroklastika bersortasi bagus ($\sigma\phi < 1$), yang diendapkan secara turbulen, menunjukkan tekanan udara saat pengendapannya tinggi ($v > U_{mf}$). Pada kondisi tegangan-regangan non-linear, nilai *Yield strength* (S_o) meningkat sejalan dengan makin tebalnya aliran: $S_o = \dots g d$; \sim : tangen sudut gesek dalam, \dots : densitas material dan d tebal aliran. Pada perlapisan terfluidisasi sebagian ($0 < v < \frac{1}{2} U_{mf}$), tekanan gas menurunkan *yield strength* hingga nol, dan S_o berubah menjadi S_u (*universal yield strength*), yaitu:

$$S_u = (1 - v/U_{mf}) \dots g d$$

Laju pendinginan mengontrol laju pengendapannya, dan suhu aliran (T_1) mengontrol perubahan suhu lingkungannya (ΔT); $\Delta T > 0.7 \times T_2$ (T_2 : suhu awal lingkungan; T_2 di daerah Yogyakarta $\cong 28-32^\circ \text{C}$). Konduksi panas adalah fungsi dari transfer panas (q) dari T_1 (suhu yang lebih tinggi) ke T_2 (suhu yang lebih rendah), jika konduktivitas panas di udara (k) adalah $\hat{O} \dots C_p K$ (dalam $\text{W/m}^\circ\text{K}$); \dots : densitas material; C_p : konstanta kapasitas panas ($1.1 \times 10^{-3} \text{ J/kg}^\circ\text{K}$), d : jarak difusi ($z \text{ m}$) dan K : difusifitas panas (m^2/dt), maka perubahan suhu per unit area (Φ_Q) adalah:

$$w_Q \approx \frac{C_p \Delta T d}{d^2 / K} \quad \text{atau} \quad w_Q \approx \dots, C_p K \frac{\Delta T}{d}$$

$(\Delta T/d) : \Phi_Q = -k \nabla T$ (hukum Fourier) dan nilai konduktivitas panas udara 0,024 W/m °K. Hubungan difusivitas panas dengan perubahan panas pada jarak r dan waktu t adalah: $\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = K \nabla^2 T(r,t); T(0,t) = f(0) = T_b; T(z,0) = f(z) = T_i$

Suhu pada jarak tempuh (z) dan waktu tempuh (t) dinyatakan dengan : T

$$(z,t) = T_b + (T_i - T_b) \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{Kt}} \right). \text{ Perubahan suhu yang dihasilkan adalah:}$$

$$u = 2\sqrt{Kt}$$

Suhu magma (T_0) basalt: 1000-1200°C (Myers & Brantley, 1995), andesit: 815-930°C (Banks & Hoblitt, 1981) dan riolit: 570-730°C (Tilling et al., 1990). Di permukaan, aliran piroklastika pada lereng gunungapi dapat mencapai suhu 815°C dan kecepatan 100-150 mil/jam (Myers & Brantley, 1995). Suhu piroklastika berkomporsi andesit-basaltis pada jarak 10-15 km dari puncak gunungapi adalah ~300-730 °C, dan di dekat kawah 750-850 °C (Banks & Hoblitt, 1981). Suhu guguran awan panas Gunungapi Merapi pada 22 Nopember 1994, yang menjangkau 7,5 km, mencapai 300-400°C dan kecepatannya 110 km/jam (Anonim, 1994.b), dengan T_0 magma Merapi adalah 950-1200°C (andesit). Laju penurunan suhu material piroklastika letusan eksplosiva di Cascade Range antara 1975-1987 berkisar ~ 6,5° C/ km (Cas & Wright, 1987).

Selanjutnya hubungan kecepatan pengendapan (W) dan kecepatan gesek aliran (V^*) adalah: $W/V^* \approx 1,25$. Pengaruh suhu terhadap perubahan lingkungan adalah hubungan linear perubahan entropi (∂s) per unit waktu (∂t):

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla s + \frac{Q}{T}$$

Q adalah transfer panas, dan T adalah suhu.

Tabel 6.8 Konstanta-konstanta yang digunakan dalam perhitungan analisis intensitas bencana yang ditimbulkan oleh aliran piroklastika berdensitas

<i>konstanta</i>	<i>besar</i>	<i>konstanta</i>	<i>besar</i>	<i>konstanta</i>	<i>besar</i>
densitas gas (ρ_g)	1,18 kg/m ³	densitas air (ρ)	1x10 ⁴ N/m ³	Spesifik panas (s)	1,1x10 ³ J/kg K
Viskositas gas (η)	1,0197x10 ⁻³ kg/m.dt.	Viskositas kinematika (ν)	1,306e-6 m ² /dt	Gravitasi bumi (g)	9,8 m/dt ²
Kapasitas panas (Cp)	1,1x10 ⁻³	Koeffisien Shield	0,01-0,24		

Energi (H) dan Kecepatan (v) Lahar

Tekanan dan kecepatan lahar direkonstruksi dengan didasarkan pada data tebal, struktur dan tekstur sedimen, serta komposisi dan konsentrasi fragmen dan matriknya (Gambar VIII.33). Intensitas bencana lahar adalah fungsi linear antara energi aliran dan tegangan-regangan terlanda. Intensitas bencana diketahui dari jangkauan dan tebal lahar (m), kecepatan aliran (v), angka Reynold (Re) dan kerusakan yang ditimbulkan. Kecepatan dan energi aliran dipengaruhi oleh topografi dan geometri dasar lembah, lebar dan tebal aliran, konsentrasi dan komposisi endapan (partikel : air), serta diameter maksimum dan rata-rata partikel dalam endapan. Di Nevado del Ruiz, lahar konsentrasi partikel sangat rendah, pada 13 Nopember 1985 telah diketahui mengubur perkampungan Armero, 70 km dari sumbernya, dan membunuh sedikitnya 23.000 orang hanya dalam beberapa menit (*kom. tertulis dengan Marso pada 23 September 2003*). Dari hulu (proksimal) ke hilir (distal) mekanisme lahar dicirikan oleh aliran debris dan aliran lumpur yang dikontrol oleh gaya gravitasi bumi, topografi, konsentrasi partikel:air dan volume massanya. Lahar dapat terjadi dalam arus turbulen, traksi dan laminar, dengan kecepatan aliran dapat mencapai 85 km/jam dan rata-ratanya 27 km/jam (Macdonald, 1972).

Suatu aliran massa (hidrodinamika) dapat disebut aliran turbulen, jika memiliki angka Reynold ($Re = UL/\nu > 30$; ν : viskositas kinematika adalah gaya per luas area $\frac{F}{A} = \gamma \frac{\tau_0}{d}$ dan L : panjang aliran. Pada aliran turbulen, kecepatan aliran berfluktuasi sebesar: $u = \bar{u} + u'$; u : kecepatan sesaat, \bar{u} : kecepatan rata-rata dan u' : kecepatan fluktuasi. Daya apung partikel pada aliran turbulen tergantung pada daya gesek (τ) dan kecepatan gesek (u^*) aliran, yang besarnya adalah:

$$\tau = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \Delta \rho g d_s^2 = \frac{u^{*2}}{\Delta \rho g d_s^2}$$

$u^* = (1/2cf)^{1/2}$; cf : koefisien gerus, ρ dan ρ_s adalah densitas air dan partikel, $Ugd = \rho_s/\rho - 1$, d_s^* : diameter partikel rata-rata. Hubungan angka Reynold (Re), angka Reynold partikel (Re_p) dan daya gesek (τ) adalah: $Re = Re_p \left(\frac{\sqrt{\Delta \rho g d_s^3}}{\nu} \right)$. Didasarkan

pada simulasi aliran debris di studio, nilai kecepatan aliran (V) tergantung pada besarnya gradien lereng, ukuran butir, volume lembah dan resistensi aliran. Resistensi aliran dikontrol oleh koefisien gesek aliran atau kekasaran dasar lembah (R). Dari sifat fisik endapan yang dihasilkan saat aliran massa berlangsung, Williams et al. (1984) mencoba menentukan nilai R dengan menggunakan koefisien Manning's (n) = **0,039** $\approx 50^{0,167}$; maka nilai Darcy-Weisbach (f) adalah: $1/\sqrt{f} = C_3 \log (ar/K_s)$. ϕ_{50} : distribusi butiran persentil ke 50, **$C_3 = 2,3 / (k/\phi_8)$** ; k = koefisien von Kormen, K_s = ukuran butir rata-rata (m) dan a = morfologi melintang lembah ($a = 11,1 (R/d_{max})^{0,33}$); dan y_{max} = kedalaman aliran maksimum (m). Didasarkan pada persamaan (2.3), Henderson's (1966)

menentukan nilai f untuk jari-jari aliran ($r: \frac{1}{2} a$) dan kedalaman aliran maksimum yang tidak diketahui, dengan: $f = 0,113 (y/\delta)^{0,33}$. Untuk lembah dengan nilai R besar, perbandingan $\delta/d > 0,3$, (f) pada $K_s: 4,5 \delta$, menjadi $1/\delta f = (1-0,1 K_s/R) 2 \log_{10} (12 R/ K_s)$. Menurut Hey (1979), nilai f pada kekasaran lembah sebesar $(8/f)^{1/2} = 5,62 \log \{ (aR) / (3,5 \delta_{84}) \}$ berkategori tinggi; ϕ_{84} : distribusi butiran persentil ke 84.

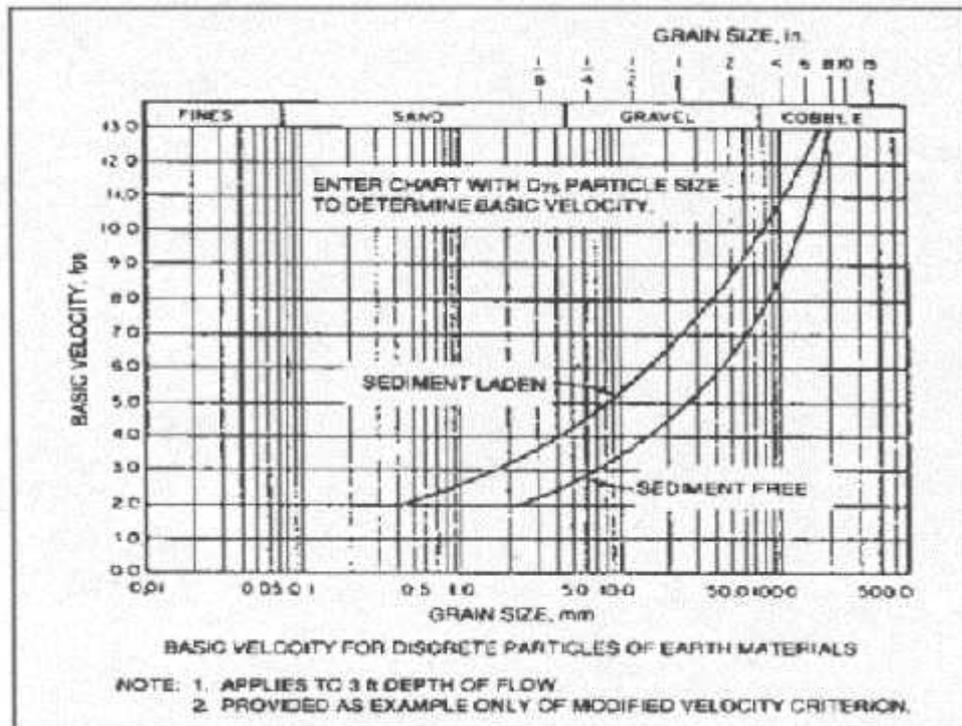
Tegangan-regangan aliran sangat ditentukan oleh Koefisien Shield's (w) aliran. Koefisien Shield's (w) adalah fungsi linear antara tegangan-regangan kritis dan diameter partikel. Besar nilai w antara 0,01-0,25 tergantung pada sortasi, imbrikasi, kemas, ukuran dan bentuk butir (Williams et al., 1984). Gaya traktif kritis (τ_c ; Nm^{-3}) disebut juga energi kritis aliran, yaitu fungsi koefisien Shields (w) dan diameter butir (δ , m), yaitu: $\tau_c = w (\dots_s \dots) \delta$; \dots_s = berat jenis endapan dan \dots = berat jenis air ($10.000 N m^{-3}$). Sedimen $\delta_{rata-rata}$ (5-15 cm) dan \dots_s 2,6-2,7 $kg cm^{-3}$, w bernilai: 0,04-0,06 (Williams, 1983 op cit. Maizels, 1987). Nilai Shields (τ_s) dan Reynold (Re) berlaku pada sedimentasi tak-berdimensi: $\tau_s = 0,22 \beta + 0,06 \times 10^{-7,7\beta}$, dengan β berat massa sebagai hubungan antara viskositas kinematika ($\nu: 1,306 \times 10^{-6} m^2/dt$), total berat jenis partikel (γ_s) dan total berat massa (γ), yang dapat ditulis sebagai:

$$s = \left(\frac{1}{\nu} \sqrt{\left(\frac{x_s - x}{x} \right) g d^3} \right)^{-0,6} \quad \text{Gressler (1971 op cit. Anonim, 1994.a)}$$

menentukan τ_s pada sedimen campuran $\sim 0,047$, Nield (1968) menentukan τ_s pada δ_{50} 0,03, dan Andrews (1983) mengajukan formula: $\tau_s = 0,0834 \left(\frac{w_i}{w_{50}} \right)^{-0,872}$

i : nilai Shields butiran ke- i , dan d_{50} = median butiran. Dalam hal ini, Andrews (1983) menentukan nilai Shields terendah sebesar 0,02 dan tegangan regangan kritis (τ_s) sangat kecil, sehingga partikel mudah bergerak. Parameter sedimentasi selanjutnya adalah tebal kritis aliran (y_c) yang dijumpai selama proses pengendapan. Makin besar $\delta_{rata-rata}$, makin tinggi kecepatannya dan makin tebal alirannya. Tebal aliran (y_c) adalah fungsi non-linear tegangan-regangan aliran dan gradien lereng (S ; %), yaitu: $y_c = \tau_c / x S$. Pada sedimen dengan diameter fragmen gravel, nilai Shields pada permulaan aliran tidak bergantung pada nilai Reynold. Dalam lembah yang lebar, hubungan Reynold dan Shields: $\frac{yS}{(\dots_s - 1)w} = \text{konstan}$; S : gradien lereng, y : tebal aliran, ρ_s : densitas

kering sedimen dan δ : diameter fragmen ke-35. Untuk sedimentasi laminar, Andrews (1983) mendapatkan hasil ekstrapolasi konstanta Shields $\geq 0,06$, dan di lapangan ketika sedimen diam menjadi 0,045 atau 0,03 (Gambar 6.75).



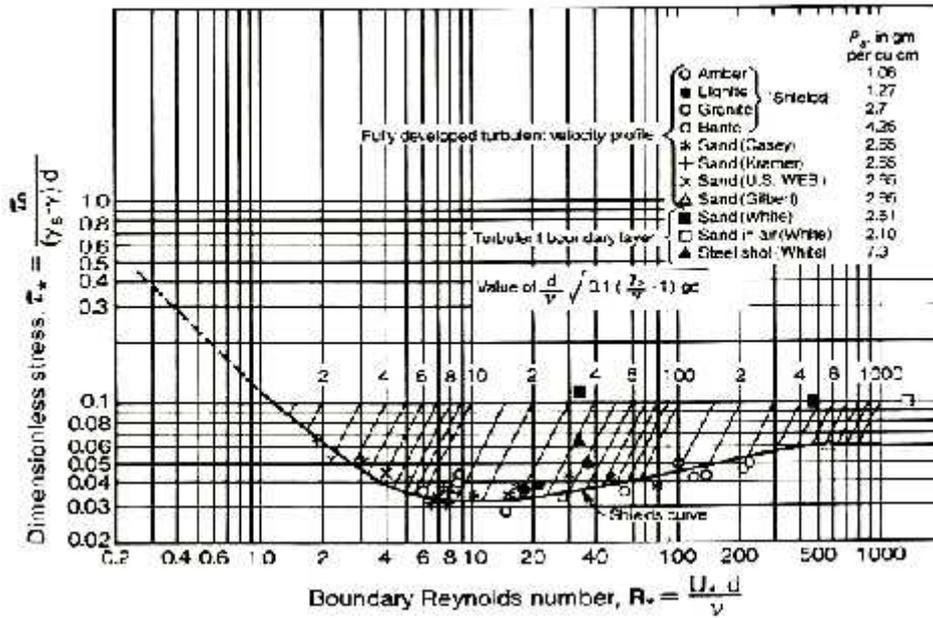
Gambar 6.75. Diagram hubungan ukuran butir terhadap kecepatan aliran (Anonim, 1994.a)

Gaya traktif (τ_c) dapat ditentukan secara tepat dengan memisahkan masing-masing komponen tegangan-regangan butiran yang selanjutnya dijumlahkan membentuk kesatuan nilai tegangan-regangan lapisan. Total tegangan-regangan lapisan (Nm^{-3}) disebut tegangan-regangan aliran dan sebagai kriteria erosi yang bersumber pada pergerakan butiran per lapisan sedimen. Menurut Einstein (1950), dengan menggabungkan persamaan (8.22-25), maka tegangan-regangan butiran pada aliran uniform berlaku persamaan:

$$\tau_o = \tau' + \tau'' = \dots rS$$

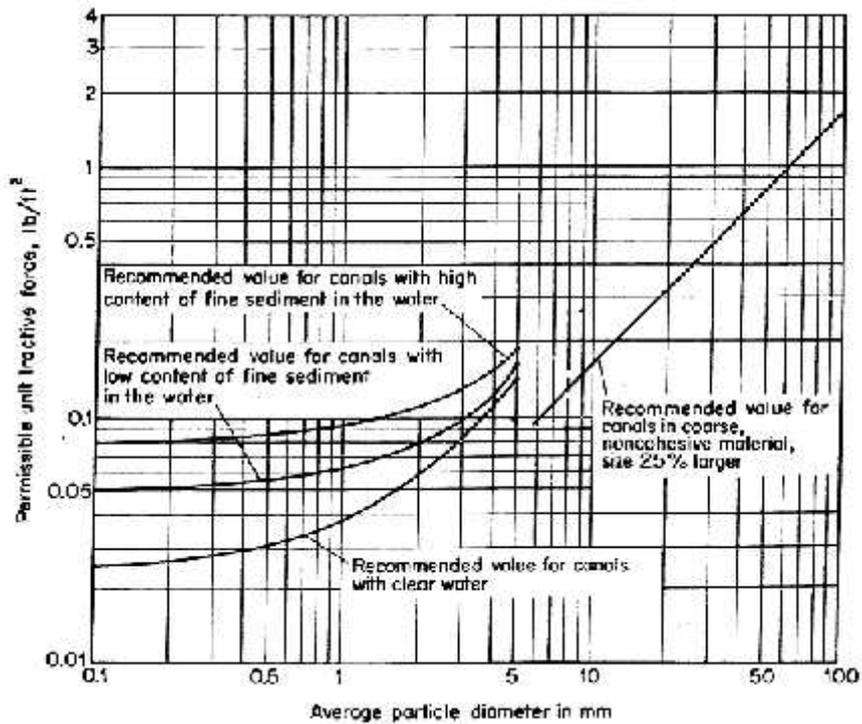
τ_o = total tegangan-regangan lapisan; τ' = tegangan-regangan butiran dan τ'' = tegangan-regangan bentuk; \dots = berat jenis air (1 kg/cm^{-3}), r jari-jari hidraulika dan S : gradien lereng. Jika tegangan-regangan maksimum diketahui, maka tebal aliran diketahui; pada aliran transien nilai $r \approx$ tebal aliran (y), r sendiri \cong total tebal aliran (h), total tegangan aliran menjadi: $\tau_o = \frac{W}{v} \left[0,1 \left(\frac{\dots}{\dots} - 1 \right) gW \right]^{0,5}$

δ : diameter butir (m), g : percepatan gravitasi bumi, v : viskositas kinematika ($1,306 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dt}$). Nilai tegangan-regangan tak berdimensi (τ^*) dapat diketahui jika menyentuh kurva Shield's.



Gambar 6.76. Diagram Shield tegangan-regangan kritis tak berdimensi (Anonim, 1994.a).

Untuk menentukan τ_* , parameter Shields lahar semikohesif hingga kohesif dengan $\delta \leq 10$ cm, didapatkan dari diagram pada Gambar 6.77 di bawah.



Gambar 6.77. Hubungan tegangan-regangan aliran material granular (U.S. Bureau of Reclamation, op cit. Chow, 1959).

Dengan menggabungkan persamaan (8.17, 8.25 dan 8.27) pada $\delta/d > 0,3$, dan nilai K_s 4,5 δ , maka kecepatan aliran rata-rata (V_c) menjadi: $V_c = (\gamma^{2/3} S^{1/2}) / n$. Selanjutnya parameter ini dapat digunakan untuk menentukan nilai kekasaran

lembah untuk daerah dengan evolusi geomorfologi yang sangat cepat, seperti di Indonesia yang dipengaruhi oleh curah hujan yang tinggi. Aliran debris dikontrol oleh densitas dan gaya gravitasi bumi, dengan menggunakan formula Coolbrook-White, maka kecepatan aliran rata-rata (V_c): $V_c = \sqrt{8gS} / f^{1/2}$

g : percepatan gravitasi bumi (9,81 m/dt²). Jika aliran dianggap tetap dan fluida berada pada titik kritis, maka persamaan berubah menjadi: $V=0,18 (\Delta \cdot 10^3)^{0,847}$ (Costa, 1984). Selanjutnya Williams et al. (1984) menentukan nilai kecepatan aliran maksimum dan minimum yang didasarkan pada nilai koefisien Manning's dan Darcy-Weisbach, pada $C_{4min} = 2,05$ dan $C_{4max} = 14,53$, maka $V_c = C_4 \Delta^{1/2}$; (Δ dalam meter). Sebagai bahan acuan, berikut adalah tabel kecepatan aliran dari Anonim (1994.a; Gambar 6.78). Saat aliran massa berlangsung, terjadi erosi lateral (pada dinding lembah), berikut juga dicantumkan beberapa contoh kecepatan erosi pada beberapa material sedimen di US akibat proses erosi samping tersebut (Tabel 6.9-10).

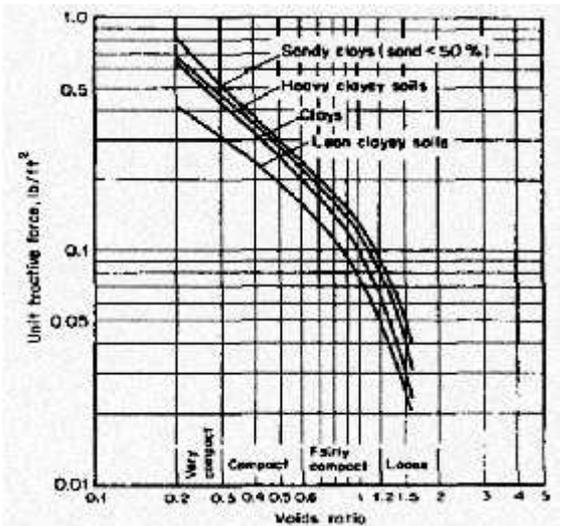
Tabel 6.9 Hubungan kecepatan aliran maksimum dan gaya gesek unit (Fortier & Scobey, 1926 vide Anonim, 1994.a). Pada kedalaman air > 0,9 kecepatannya ditambah 0.54864 km/jam, aliran sangat pekat dikurangi 0,54864 km/jam dan pada debit tinggi dan sangat cepat (debris) ditambah 30 %.

Material endapan	n	Air bersih (diversi)		Koloid pada slope sedang- rendah	
		V (km/jam)	t _o (kg/m ²)	V (km/jam)	t _o (kg/m ²)
Pasir halus, koloid	0,020	1,64592	0,13	2,7432	0,3662
Lumpur pasiran	0,020	1,92024	0,18	2,7432	0,3662
Lumpur lanauan	0,020	2,19456	0,234	3,29184	0,537
Lanau aluvial	0,020	2,19456	0,234	3,84048	0,7324
Lumpur	0,020	2,7432	0,3662	3,84048	0,7324
Abu vulkanik	0,020	2,7432	0,3662	3,84048	0,7324
Lempung pejal (koloid)	0,025	4,1148	1,27	5,4864	2,246
Lanau aluvial (koloid)	0,025	4,1148	1,27	5,4864	2,246
Serpih dan <i>hardpans</i>	0,025	6,58368	3,27	6,58368	3,27
Gravel halus	0,020	2,7432	0,366	5,4864	1,562
Tanah bergradasi-couple	0,030	4,1148	1,855	5,4864	3,222
Lanau bergradasi-couple	0,030	4,38912	2,1	6,03504	3,906
Gravel kasar, bukan koloid	0,025	4,38912	1,465	6,58368	3,271
Couple dan <i>shingles</i>	0,035	5,4864	4,443	6,03504	5,3707

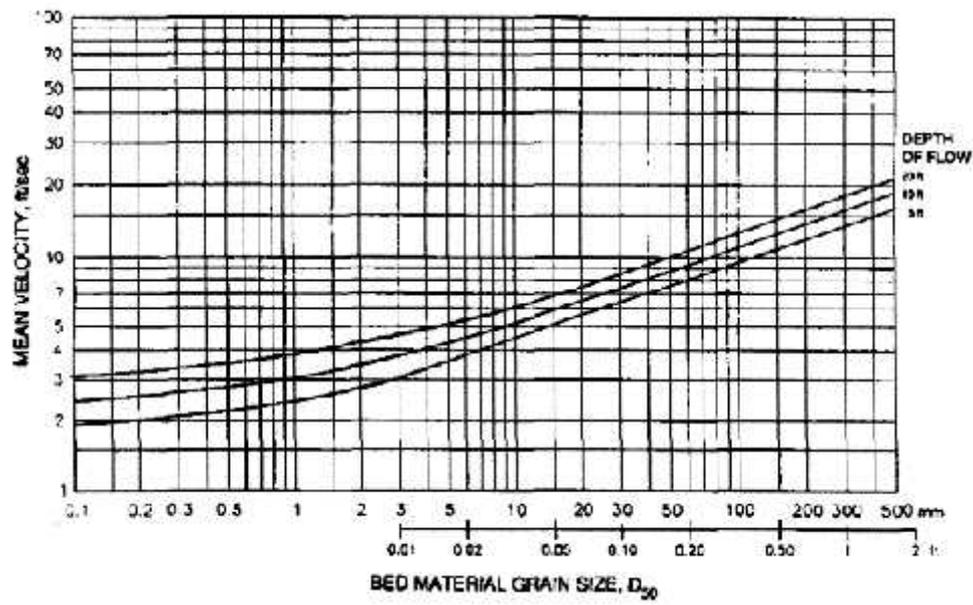
Tabel 6.10 Contoh data kecepatan aliran pada beberapa material erosi (Anonim, 1994.a), aslinya dalam kaki/dt

Material lembah	Kecepatan aliran rata-rata (km/jam)
Pasir halus	2,19456
Pasir kasar	4,38912
Gravel	6,58368
Tanah:	

Lanau pasiran	2,19456
Lempung lanauan	3,84048
Lempung	6,58368
Tanah berrumput dengan kemiringan lereng <5%	6,58368
1. Rerumputan di Bermuda: Lanau pasiran-Lempung lanauan	8,77824
2. Rerumputan di Kentucky	5,4864
Lanau pasiran	7,68906
Lempung lanauan	10,9728
Batuan lembek (biasanya sedimen)	8,77824
1. Batupasir lembek	3,84048
2. Serpih lembek	
Batuan beku dan metamorf keras	21,9456



Gambar 6.78. Contoh tegangan-regangan pada material kohesif (Anonim, 1994.a).



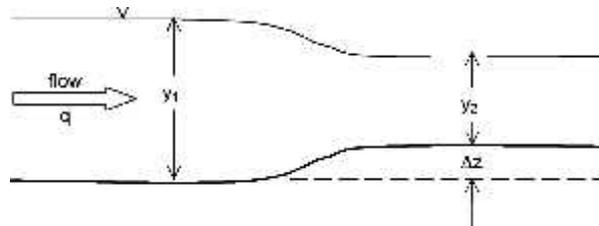
Gambar 6.79. Hubungan kecepatan aliran dan kedalaman pada material granular (Anonim, 1994.a).

Dalam suatu aliran fluida, sebagai suatu aliran Newton, dengan tekanan alirannya ditentukan sebagai fungsi gaya per satuan luas, yaitu: $P = \frac{F}{A} = \gamma \frac{\tilde{v}_0}{d}$

$\gamma \frac{\tilde{v}_0}{d}$ adalah nilai viskositas kinematika (ν) yaitu $1,306 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dt}$, gaya (F) = $P \cdot A$.

Menurut Hogg et al. (2000); nilai Reynold tinggi terjadi pada dasar aliran graviti dua dimensi. Dari hasil percobaan pada aliran turbulen, selanjutnya Hogg et al (2000) menyimpulkan bahwa konsentrasi fluida pekat dan energi aliran terbesar (H) berada pada setengah aliran, yang posisinya ditentukan dengan persamaan Bernoulli: $H = y + z + \frac{v^2}{2g}$

y : kedalaman aliran, z : tebal lapisan, g : percepatan gravitasi bumi, v :kecepatan aliran ($v^2/2g$). Kenyataan di lapangan, morfologi lembah selalu tidak uniform, sehingga kecepatan dan energi alirannya juga tidak uniform (Gambar VIII.39). Dengan menganggap dimanapun dan dalam kondisi apapun berlaku hukum kesetimbangan energi, maka energi yang dilepaskan oleh aliran dengan anomali sebesar Δz (E_1) akan ditangkap oleh media pada aliran massa selanjutnya yang melalui morfologi di E_2 . Sehingga $E_1 = E_2 + \Delta z$; dan energi spesifik aliaran (E) adalah:



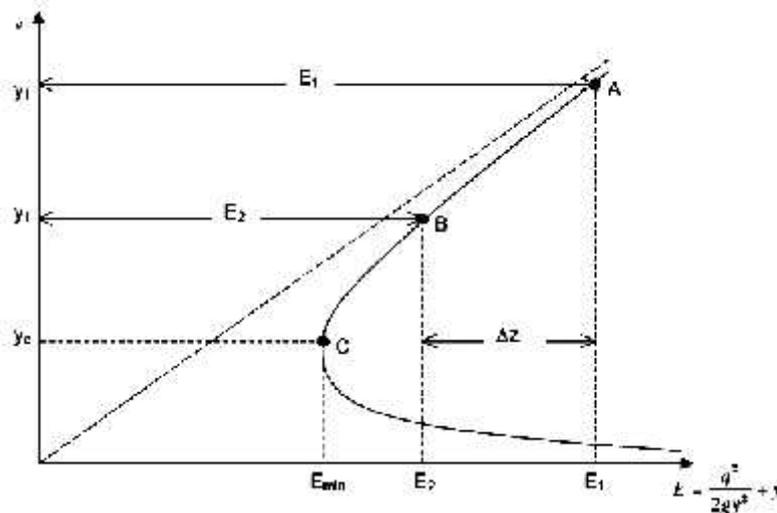
$$E = y + \frac{v^2}{2g} = y + \frac{q^2}{2gy^2}$$

Gambar 6.80. Debit aliran (q) dengan kedalaman y_1 di hulu melalui lembah sempit dengan kedalaman y_2 di hilir, maka terjadi luapan sebesar Δz (Hogg et al.,2000).

Aliran yang hampir mendekati titik kritis (E_1 pada y_1) melepaskan energi secara besar-besaran; pada titik y_1 , energi aliran terkumpul pada mulut lembah, akibatnya aliran tidak terkendali hingga melampaui lebar lembah dengan tebal aliran menjadi y_2 dan energi aliran menjadi E_2 (Gambar 6.81). Besarnya peningkatan energi pada Δz dalam aliran kritis adalah :

$$q^2 = gy_c^3 \text{ atau } v_c = \sqrt{gy_c}$$

Jika tebal aliran berubah dari y_1 ke y_2 , nilai Froude < 1 : jika energi aliran besar maka aliran menjadi tipis, sebaliknya jika energi aliran kecil maka aliran sangat lambat dan dalam. Untuk menentukan kedalaman y pada E_1 atau E_2 , digunakan formula sebagai berikut: $Fr = \frac{v}{\sqrt{2gy}}$



Gambar 6.81. Hubungan kedalaman aliran (y) dan energi aliran (E); dimodifikasi dari Anonim (1994.a).

6.2 Penanggulangan Bencana

Pembahasan penanggulangan bencana ini mengacu pada aturan dan kebijakan yang telah disusun oleh Badan Penanggulangan Bencana Nasional (BAPENAS) 2017. Dijelaskan sebelumnya, bahwa Indonesia merupakan bagian dari sabuk vulkanik (*volcanic arc*) dunia yang memanjang dari Pulau Sumatera-Jawa-Nusa Tenggara-Sulawesi. Sisi-sisi kepulauan itu adalah pegunungan vulkanik dan dataran rendah yang sebagian didominasi oleh rawa-rawa. Kondisi tersebut sangat berpotensi bencana letusan gunung api, gempa bumi, tsunami, banjir dan gerakan massa. Data menunjukkan bahwa Indonesia memiliki tingkat kegempaan yang tinggi di dunia, lebih dari 10 kali lipat dari Amerika Serikat (Arnold, 1986).

Gempa bumi tektonik sering diikuti tsunami, apabila pusat gempanya berada di samudera. Tsunami yang terjadi di Indonesia sebagian besar disebabkan oleh gempa-gempa tektonik di sepanjang daerah subduksi dan daerah relatif aktif lainnya (Puspito, 1994). Selama kurun waktu 1600-2000 terdapat 105 kejadian tsunami; 90% oleh gempa tektonik, 9% oleh letusan gunung api dan 1% oleh gerakan massa (Latief dkk., 2000). Pantai barat Sumatera, pantai selatan Jawa, pantai utara dan selatan Nusa Tenggara, Maluku, pantai utara Papua dan sepanjang Sulawesi berpotensi tsunami saat gempabumi tektonik berlangsung.

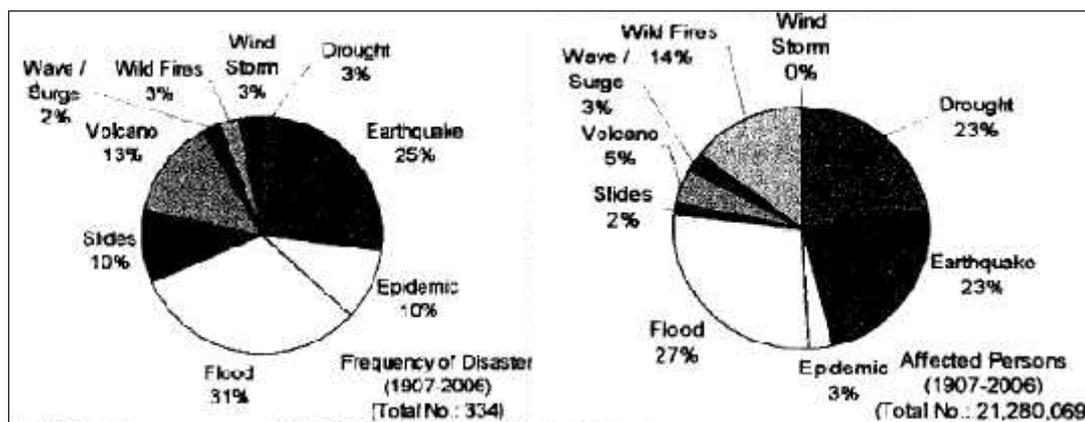
Iklm tropis dengan musim kemarau pada bulan April-Oktober dan musim hujan pada Oktober-April, didukung dengan kondisi geologi pada tepian tektonik aktif, menjadikan kepulauan Indonesia subur, namun berpotensi bencana banjir, gerakan massa, kebakaran hutan dan kekeringan. Seiring dengan berkembangnya waktu dan meningkatnya aktivitas manusia, kerusakan lingkungan cenderung meningkat, memicu meningkatnya jumlah kejadian dan intensitas bencana-bencana tersebut. Pada tahun 2016-17 saja terjadi bencana gerakan massa dan banjir bandang di Kediri, Kulon Progo, Jember, Padang, Banjarnegara, Manado, Trenggalek dan daerah-daerah lainnya.

A. Jenis dan Frekuensi Bencana

Telah disebutkan di atas bahwa Indonesia memiliki potensi bencana dari waktu ke waktu. BAKORNAS PB telah mengumpulkan dan mempublikasikan data bencana domestik baik bencana alam maupun bukan alam. Berdasarkan publikasi pertama antara tahun 2002-2005, terdapat lebih dari 2.000 bencana di Indonesia, yaitu 743 banjir (35% dari jumlah total), 615 kekeringan (28% dari jumlah total), 222 gerakan massa (10% dari jumlah total), dan 217 kebakaran (9,9% dari jumlah total). Jumlah korban yang sangat besar dalam tahun-tahun tersebut yakni sejumlah 165.945 korban jiwa (97 % dari jumlah total) dari gempa bumi dan tsunami, diikuti jumlah 2.223 (29 % dari jumlah total) disebabkan konflik sosial. Di sisi lain, banjir membuat sebagian orang kehilangan rumah mereka, yang menyebabkan jumlah korban yang mengungsi sebanyak 2.665.697 jiwa (65% dari jumlah total). Buku ini menghitung kejadian sebagai bencana ketika berdampak pada kematian dan kerugian material.

B. Kecenderungan Bencana dalam Jangka Panjang

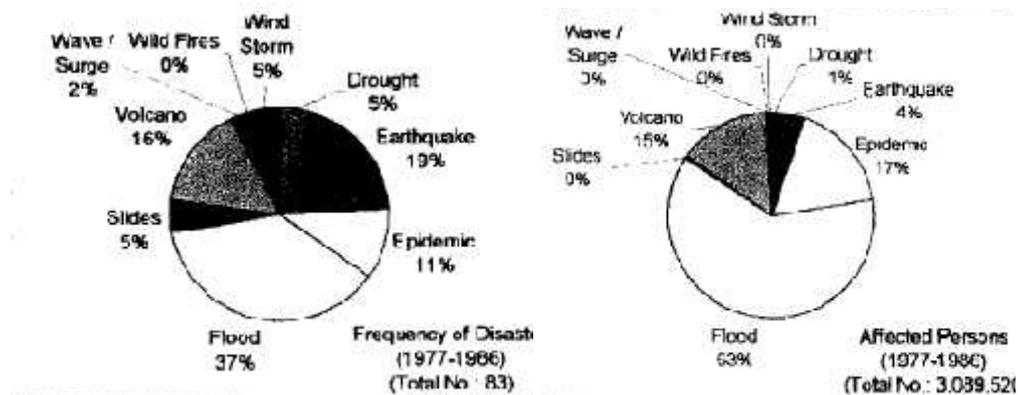
Kecenderungan bencana dalam jangka panjang di Indonesia diperiksa menggunakan EM-DAT Basis Data Bencana Internasional (*The International Emergency Disasters Database*). Basis data berisikan data bencana besar di dunia, yang diklasifikasikan menjadi berbagai jenis bencana alam seperti gempa bumi, banjir, longsor (longsor), badai, ombak/gelombang (tsunami) dan gunung berapi, serta bencana epidemik. Gambar berikut menunjukkan frekuensi bencana dan jumlah korban akibat bencana dalam waktu 100 tahun terakhir di Indonesia berdasarkan data EM-DAT. Seperti yang ditunjuk dalam gambar, frekuensi tinggi bencana di Indonesia adalah banjir, gempa bumi, gunung berapi, longsor dan epidemik, serta bencana yang sangat mempengaruhi kehidupan masyarakat adalah banjir, gempa bumi, kekeringan dan kebakaran.



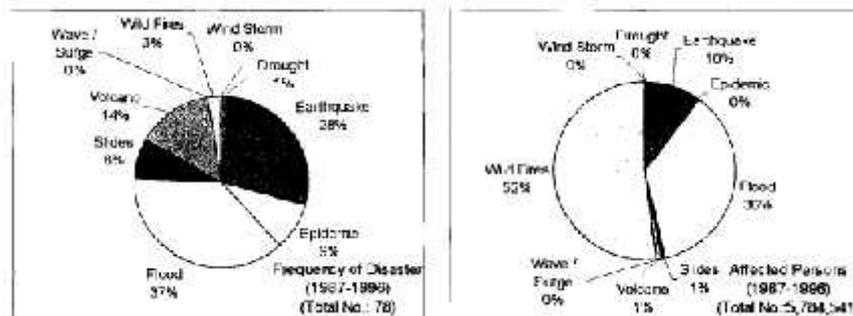
Gambar 6.82. Frekuensi Bencana dan Korban Tahun 1907 -2006

Gambar selanjutnya menunjukkan frekuensi bencana dan korban bencana setiap periode 10 tahun sekali dari tahun 1977 di Indonesia berdasarkan data EM-DAT. Dari gambar terlihat, sangat jelas bahwa baik frekuensi bencana dan korban bencana cenderung meningkat dari serangkaian tahun. Bencana yang sering muncul hampir sama tiap periode waktu. Banjir, gempa bumi dan

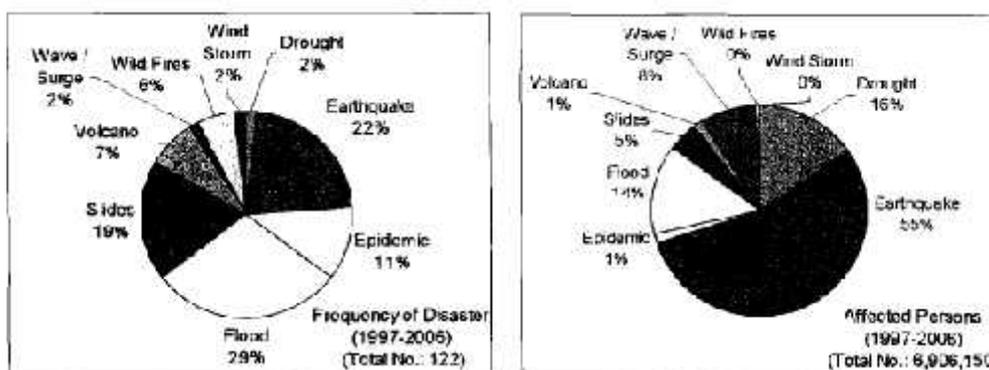
gunung berapi adalah bencana yang sering muncul. Di sisi lain, bencana yang paling memiliki dampak kepada masyarakat berbeda dalam tiap periode waktu. Banjir berdampak paling besar tahun 1977-1986, kebakaran berdampak paling besar 1987-1996, dan gempa bumi berdampak paling besar pada tahun 1997-2006. Selain itu, frekuensi longsor dan kebakaran cenderung meningkat setiap periode waktu, yang disebabkan oleh kegiatan masyarakat seperti penebangan kayu.



Gambar 6.83. Frekuensi Bencana dan Korban Bencana tahun 1977 -1986



Gambar 6.84. Frekuensi Bencana dan Korban Bencana tahun 1987 -1996



Gambar 6.85. Frekuensi Bencana dan Korban Bencana tahun 1997 -2006

C. Distribusi Daerah Bencana

Dari data yang juga dikeluarkan oleh basis data bencana internasional diketahui bahwa distribusi daerah bencana untuk wilayah Indonesia adalah sebagai berikut :

- Banjir: Sumatera, Jawa Barat, Kalimantan, Sulawesi dan Nusa Tenggara.
- Longsor: barat laut Sumatra, Jilwa, Sulawesi dan Nusa Tenggara.
- Gempa bumi: pantai barat Sumatera, pantai selatan Jawa, Sulawesi, Nusa Tenggara, Maluku dan Papua.
- Tsunami: pantai barat Sumatra, pantai selatan Jawa, Sulawesi dan Nusa Tenggara.

D. Kerugian Ekonomi

Sepanjang tahun 2004-2007, Indonesia dilanda paling sedikit tujuh bencana besar yang menimbulkan kerugian sangat besar. Bencana tersebut adalah dua gempa bumi dan dua tsunami, banjir besar di Jabotabek, flu burung dan lumpur panas di Sidoarjo, Jawa Timur. Semua bencana ini mengakibatkan kerugian ekonomi, baik langsung maupun tidak langsung, sebesar 12 triliun dollar AS, atau sekitar Rp. 110 triliun, setara dengan 3,1 % dari total PDB tahun 2007, setara dengan 15,8 % APBN 2007, serta dengan korban >150.000 jiwa.

Indonesia terletak di kawasan yang dinamakan "Pacific Ring of Fire", yaitu sebuah zona dimana sangat sering terjadi gempa bumi dan meletusnya gunung berapi. Lebih dari 90 persen gempa bumi yang terjadi didunia, dan sekitar 81 persen gempa berkategori kuat terjadi di zona ini. Indonesia juga memiliki 129 gunung berapi yang masih aktif. Banyak diantaranya meletus dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir. Gunung api teraktif di dunia terletak di Jawa Tengah, dinamakan Gunung Merapi. Letusan besar terakhir terjadi pada bulan April 2006 mengakibatkan lebih dari 20.000 orang mengungsi. Dari total 12 milyar dollar AS tersebut, tiga bencana mengakibatkan jumlah kerugian ekonomi yang paling besar, yaitu: tsunami Aceh & Nias (4,5 milyar dollar AS), gempa Yogyakarta & Jawa Tengah (3,1 milyar dollar AS) serta lumpur panas di Sidoarjo, Jawa Timur (3 milyar dollar AS).

Pada tanggal 27 Mei 2006, gempa bumi melanda kota Yogyakarta dan sebagian Jawa Tengah. Pusat gempa terletak di Samudera Hindia sekitar 33 km arah selatan dari Kabupaten Bantul, dengan kekuatan 6,3 Skala Richter. Gempa ini menyebabkan 6.000 jiwa meninggal, 40.000 orang terluka dan ratusan ribu orang kehilangan tempat tinggal. Bappenas memperkirakan total kerugian sebesar 3,1 milyar dollar AS, dimana 90 persen kerugian dialami oleh rakyat sipil karena rusaknya rumah-rumah penduduk dan fasilitas produksi usaha skala kecil dan Menengah (UKM).

Dua hari setelah terjadinya gempa Yogyakarta, sumur explorasi gas dan minyak di Sidoarjo, 20 km sebelah selatan Surabaya, mulai menyemburkan lumpur panas. Sidoarjo sebelumnya dikenal sebagai pusat kawasan industri di Surabaya. Kompleks perumahan dan industri sangat banyak terdapat disini. Perekonomian daerah berkembang sangat stabil dan bagus dari tahun ke tahun. Kini, kolam penampungan lumpur panas tersebut masih terus bertambah 100.000-150.000 meter kubik perhari. Penyebab semburan lumpur belum diputuskan pemerintah, faktor alam atau kegagalan teknis pemboran. Tingkat kerusakan yang ditimbulkan adalah lebih dari 11.000 orang dari delapan desa

harus diungsikan, dua puluh lima pabrik ditutup, kerusakan infrastruktur (jalan tol, rel kereta api, jaringan listrik PLN, pipa gas milik Pertamina, dan jalan-jalan kecil). Diduga, lumpur akan berhenti menyembur dengan sendirinya setelah 30 tahun. Semua kegiatan untuk menghentikan semburan tersebut telah gagal dicoba. Pemerintah menganggarkan Rp. 600 milyar (2007) dan Rp. 1,57 triliun (2008) di APBN untuk mendanai Pembangunan infrastruktur yang rusak. PT. Lapindo sendiri harus mengeluarkan dana sekitar Rp. 2,5 triliun untuk mendanai relokasi dan membeli tanah-tanah milik penduduk yang tidak bisa ditinggali lagi, karena terendam lumpur. Pemerintah membentuk sebuah badan baru yang disebut BPLS (Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo) diketuai oleh Menteri PU pada tanggal 31 Maret 2007 untuk mengatasi bencana.

Begitu besarnya nilai kerugian ekonomi yang diderita oleh bangsa Indonesia, karena bencana hanya dalam jangka waktu 3 tahun (2004-2007), telah mengakibatkan pemerintah kehilangan begitu banyak sumber dana dan telah memberikan tekanan ekstra kuat terhadap anggaran belanja pemerintah, tentu dengan tidak mengesampingkan kerugian korban jiwa yang terjadi. Dengan nilai defisit tahunan sebesar Rp. 62 triliun (2007) dan Rp. 75 trilyun (RAPBN 2008), pemerintah tidak memiliki ruang gerak yang cukup apabila bencana kategori besar seperti tsunami Aceh dan gempa Yogyakarta kembali melanda Indonesia. Oleh sebab itu, tindakan pencegahan dan sosialisasi bencana merupakan hal yang tidak bisa ditunda lagi. Pemerintah juga harus fokus dalam mengembangkan kebijakan-kebijakan di bidang manajemen bencana, strategi apa yang harus diterapkan serta sarana dan prasarana untuk meminimalisir kerugian ekonomi dan korban jiwa apabila sesuatu yang tidak kita harapkan tersebut terjadi kembali.

Tabel 6.11 Daftar Kejadian Bencana Besar Sepanjang 2004 -2007

No	Nama Bencana	Kerugian Ekonomi (US\$ milyar)		
		Langsung	Tidak Langsung	Total
1	Tsunami Aceh & Nias 26 Desember 2004	2.92	1.53	4.45
2	Flu Burung' (2004 -2005)	0.6	-	0.6
3	Letusan Merapi-April 20069	-	-	20,000 orang mengungsi
4	Gempa Yogyakarta -27 Mei 2006	2.5	0.7	3.1
5	Lumpur Panas Sidoarjo lawa Timur -29 Mei 2006	1.2	1.8	3
6	Tsunami di selatan lawa 17 Juli 2006	0.031	0.063	0.094
7	Banjir Jabodetabek hingga Februari 2007	0.7	-	0.7
TOTAL (US\$ milyar)				12
• 3.1 persen dari PDB Indonesia (2007)				(110.4 triliun rupiah)
• 15.8 persen dari total APBN 2007				

E. Evaluasi Sistem Penanggulangan Bencana

Sistem penanggulangan bencana di Indonesia didasarkan pada kelembagaan yang ditetapkan oleh pemerintah. Pada waktu yang lalu, penanggulangan bencana dilaksanakan oleh satuan kerja-satuan kerja terkait. Penanggulangan bencana berskala besar dipimpin langsung oleh pemerintah pusat/daerah; untuk mengkoordinasi satuan-satuan kerja terkait. Hal itu diatur dalam UU No. 24 tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, yang mengatur semua fase penanggulangan bencana, diawali dari fase kesiapsiagaan, tanggap darurat hingga pemulihan pasca bencana. Undang-undang No. 24 tahun 2007 terdiri dari 12 pasal, yaitu: pembahasan i), pembagian umum ii), tujuan iii), tanggungjawab dan kekuasaan pemerintah iv), struktur lembaga v), kewajiban dan hak masyarakat vi), peran badan internasional dan dunia usaha vii), organisasi penanggulangan bencana viii), bantuan dana dan penanggulangan bencana dan pengaturan sanksi dan denda. Secara umum, peraturan ini telah mampu memberi keamanan bagi masyarakat dan wilayah Indonesia dengan cara penanggulangan bencana dalam hal karakteristik, frekuensi dan pemahaman terhadap kerawanan dan risiko bencana. Dengan UU No. 24/2007 tentang Penanggulangan Bencana, maka:

- 1. Terdapatnya satu kepastian hukum akan penanggulangan bencana,** sehingga semua pihak memahami peran dan fungsinya, serta memiliki kepastian untuk mengambil tindakan terkait dengan penanggulangan bencana di semua tahapannya. Saat bencana berlangsung, semua pihak memiliki arah dan pijakan yang jelas dalam bertindak.
- 2. Perubahan Paradigma dan Sistem Penanggulangan Bencana;** yaitu dari tanggap darurat menjadi siaga bencana. Bencana tidak lagi dianggap sebagai sesuatu yang harus diterima begitu saja, tetapi bisa dicegah dan diantisipasi, meliputi bencananya, korban dan dampaknya. Perubahan paradigma harus diikuti dengan perubahan sistem penanggulangan bencana, meliputi tindakan, tanggung jawab dan wewenang pemerintah pusat dan daerah melalui kegiatan pembangunan, keamanan masyarakat, dan keamanan bantuan bagi penanggulangan bencana. Disamping itu aturan ini juga membahas tentang kewajiban dan tanggung jawab masyarakat, badan internasional, dan juga lembaga usaha. Peraturan ini juga membahas tentang pembiayaan yang menjadi tanggung jawab Pemerintah Pusat dan Daerah dan juga bantuan dari masyarakat. Terdapat juga sanksi hukum kepada mereka yang menghalangi keamanan negara dalam rangka melaksanakan aktivitas penanggulangan.
- 3. Memaksa semua pihak untuk memandang dan menyusun sistem penanggulangan bencana secara lebih serius dan menjadi bagian tak terpisahkan dalam sistem penyelenggaraan negara.** Aturan main tentang pelaksanaan sistem penanggulangan bencana semakin jelas dengan dikeluarkannya empat aturan turunan UU No. 24/2007, yaitu:
 - 1) Peraturan Presiden No. 08/2008 tentang Badan Nasional Penanggulangan Bencana.

- 2) Peraturan Pemerintah No. 21/2008 tentang Penyelenggaraan penanggulangan bencana.
- 3) Peraturan Pemerintah No. 22/2008 tentang Pendanaan dan Pengelolaan Bantuan Bencana.
- 4) Peraturan Pemerintah No. 23/2008 tentang Peran serta lembaga internasional dan lembaga asing non pemerintah dalam penanggulangan bencana.

F. Kelembagaan Penanggulangan Bencana

Kelembagaan penanggulangan bencana diatur dalam Keputusan Presiden Nomor 3 Tahun 2001 tentang Badan Koordinasi Nasional Penanggulangan Bencana dan Penanganan Pengungsi, yang diperbaiki melalui Peraturan Pemerintah No. 83 tahun 2005 tentang Badan Koordinasi Nasional Penanganan Bencana (Bakornas-PB) dan UU No. 24 tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana, yang mengatur pembentukan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menggantikan Badan Koordinasi Nasional Penanganan Bencana (Bakornas-PB) dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) menggantikan Satkorlak dan Satlak di daerah.

Tabel 6.12 Matrik Perbandingan Kelembagaan Bakornas PB & BNPB

Aspek	Bakornas PB	BNPB
Dasar hukum	Peraturan Presiden	Undang-Undang
Status kelembagaan	lembaga non struktural yang berkedudukan di bawah dan bertanggung jawab langsung kepada Presiden	Lembaga Pemerintah Nondepartemen setingkat menteri
Fungsi	a. perumusan dan penetapan kebijakan nasional di bidang penanganan bencana dan kedaruratan; b. koordinasi kegiatan dan anggaran lintas sektor serta fungsi dalam pelaksanaan tugas di bidang penanganan bencana dan kedaruratan; c. pemberian pedoman dan arahan terhadap upaya penanganan bencana dan kedaruratan; d. pemberian dukungan, bantuan dan pelayanan di bidang sosial, kesehatan, sarana dan prasarana, informasi dan komunikasi, transportasi dan keamanan serta dukungan lain terkait dengan	Fungsi pengarah: a. merumuskan konsep kebijakan penanggulangan bencana nasional; b. memantau; dan c. mengevaluasi dalam penyelenggaraan penanggulangan bencana. Fungsi pelaksana: Koordinasi, komando, dan pelaksana dalam penyelenggaraan penanggulangan bencana.

Pimpinan Lembaga Anggota	masalah bencana dan kedaruratan.	
	Wakil Presiden Republik Indonesia	Kepala Badan setingkat menteri
	Menteri yang terkait	Pengarah:
	Panglima TNI	a. 10 (sepuluh) Pejabat Pemerintah Eselon I atau yang setingkat, yang diusulkan oleh Pimpinan Lembaga Pemerintah;
	Kepala Kepolisian	b. 9 (sembilan) Anggota masyarakat profesional.
	Ketua PMI	Pelaksana: Tenaga penuh waktu

Dari sisi wewenang, BNPB memiliki wewenang yang lebih luas dibanding Bakornas PB, karena merupakan sebuah lembaga setingkat menteri dan memiliki fungsi yang lebih luas meliputi semua tahapan bencana. Dari sisi puncak komando, Bakornas dipimpin langsung oleh Wakil Presiden dan anggotanya adalah para pengambil keputusan sehingga lebih efektif dalam melakukan koordinasi. Aturan turunan pelaksanaan terhadap pembentukan BNPB sudah disahkan juga oleh pemerintah melalui Peraturan Presiden No. 8 tahun 2008 tentang Pembentukan BNPB.

G. Sistem Pendanaan

Sistem pendanaan penanggulangan bencana dalam mekanisme Bakornas PB dilaksanakan melalui anggaran masing-masing departemen/satuan kerja pemerintah. Apabila dalam pelaksanaan terdapat kekurangan, maka pemerintah melalui ketua Bakornas PB dapat melakukan alih anggaran dan mobilisasi dana. Pada mekanisme tersebut, peranan masyarakat dan lembaga donor tidak terintegrasi dengan memadai. Dengan adanya perubahan sistem khususnya melalui BNPB dan BPBD maka alokasi dana untuk penanggulangan bencana, baik itu di tahap mitigasi hingga rehabilitasi dan rekonstruksi tetap memiliki alokasi yang cukup melalui BNPB maupun BPBD. Aturan dana cadangan diatur oleh UU. Alokasi anggaran penanggulangan bencana daerah terletak pada kemampuan keuangan daerah.

H. Peran Masyarakat

Pasal 26 ayat (1) UU No. 24/2007 merumuskan hak masyarakat dalam penanggulangan bencana, yaitu (1) mendapatkan perlindungan sosial dan rasa aman, khususnya bagi kelompok masyarakat rentan bencana; (2) mendapatkan pendidikan, pelatihan, dan ketrampilan dalam penyelenggaraan penanggulangan bencana; (3) mendapatkan informasi secara tertulis dan/atau lisan tentang kebijakan penanggulangan bencana; (4) berperan serta dalam perencanaan, pengoperasian, dan pemeliharaan program penyediaan bantuan pelayanan kesehatan termasuk dukungan psikososial; (5) berpartisipasi dalam

pengambilan keputusan terhadap kegiatan penanggulangan bencana, khususnya yang berkaitan dengan diri dan komunitasnya; dan (6) melakukan pengawasan sesuai dengan mekanisme yang diatur atas pelaksanaan penanggulangan bencana. Kewajiban masyarakat dalam penanggulangan bencana sesuai Pasal 27 UU No. 24/2007 adalah (1) menjaga kehidupan sosial masyarakat yang harmonis, memelihara keseimbangan, keserasian, keselarasan, dan kelestarian fungsi lingkungan hidup; (2) melakukan kegiatan penanggulangan bencana; dan (3) memberikan informasi yang benar kepada publik tentang penanggulangan bencana. (Tabel 6.13)

Tabel 6.13 Peraturan sistem penanggulangan bencana di Indonesia setelah UU No 24 tahun 2007

	SISTEM LAMA	SISTEM BARU
Dasar Hukum	Bersifat sektoral	Berlaku umum dan mengikat seluruh departemen, masyarakat dan lembaga non pemerintah
Paradigma	Tanggap darurat	Mitigasi, tanggap darurat, rehabilitasi dan rekonstruksi
Lembaga	Bakornas PB, Satkorlak dan Satlak	BNPb, BPBD PROPINSI, BPBD Kab/Kota
Peran Masyarakat	Terbatas	Melibatkan masyarakat secara aktif
Pembagian Tanggung Jawab	Sebagian besar pemerintah pusat	Tanggung jawab pemerintah pusat, propinsi dan kabupaten
Perencanaan Pembangunan	Belum menjadi bagian aspek perencanaan pembangunan	Rencana Aksi Nasional Pengurangan Resiko Bencana (RAN PRB) <ul style="list-style-type: none"> • Rencana Penanggulangan Bencana (RPB) • Rencana Aksi Daerah Pengurangan Resiko Bencana (RAD PRB)
Pendekatan Mitigasi	Kerentanan	Analisa resiko (menggabungkan antara kerentanan dan kapasitas)
Forum kerjasama antar pemangku kepentingan	Belum ada	<i>National Platform</i> (akan) <i>Provincial Platform</i> (akan)
Alokasi Anggaran	Tanggung jawab pemerintah pusat	Tergantung pada tingkatan bencana
Pedoman Penanggulangan Bencana	Terpecah dan bersifat sektoral	Mengacu pada pedoman yang dibuat oleh BNPB dan BPBD

Keterkaitan Dengan Tata Ruang	Belum menjadi aspek	Aspek bencana harus diperhitungkan dalam penyusunan tata ruang
-------------------------------	---------------------	--

Sumber: BNPB

6.3 Isu Implementasi Kebijakan Penanggulangan Bencana Nasional

Undang-Undang No. 24 Tahun 2007 telah mendefinisikan bencana, namun belum ditentukan dimensinya dan belum mengatur penetapan status bencana (nasional, provinsi, dan kabupaten/kota), yang berdampak pada sistem penganggaran dan pendanaan penanggulangan bencana serta sumber dari dana penanggulangan. Masih banyak aturan pelaksana yang bersifat teknis dan operasional yang merupakan penjabaran dari UU No. 24/2007 yang belum dibuat, sehingga menghambat implementasi berbagai sistem Penanggulangan Bencana yang diatur dalam Undang-undang. Disamping itu, masih terdapat berbagai aturan yang saling tumpang tindih dengan aturan yang sudah ada, misalnya dengan aturan tata ruang, aturan pengelolaan wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil, peraturan yang terkait dengan keuangan dan lain-lain. Masalah lainnya yang juga cukup penting dalam upaya mengarusutamakan penanggulangan bencana ke dalam sistem perencanaan pembangunan adalah belum adanya integrasi kebijakan penanggulangan bencana dengan kebijakan lainnya, seperti kebijakan untuk masalah kemiskinan, otonomi daerah dan pengelolaan sumber daya alam.

Disamping isu tersebut di atas masih terdapat beberapa isu kelembagaan yang harus segera diselesaikan dan cenderung menghambat proses implementasi sistem penanggulangan bencana, karena beberapa pertimbangan berikut:

- Dengan status lembaga setingkat menteri (BNPB), banyak instansi K/L yang meragukan pelaksanaan tata komando ketika terjadi bencana dapat terlaksana secara efektif di lapangan.
- Proses seleksi anggota Unsur Pengarah diperkirakan akan memakan waktu lama, belum lagi masalah kualitas SDM yang terbatas, sistem penggajian yang belum jelas, dan kewenangan dalam mengintervensi kebijakan Unsur Pelaksana serta peran unsur pengarah dengan lembaga teknis lainnya yang berada di luar BNPB.
- Fungsi “Pelaksana” dari BNPB punya kecenderungan untuk berbenturan dengan fungsi departemen-departemen teknis lainnya yang terkait dengan penanggulangan bencana.
- Fungsi koordinasi antara BNPB dan BPBD akan cenderung sulit dilaksanakan secara efektif, karena BPBD sebagai perangkat daerah akan tunduk kepada Kepala Daerah dan Anggaran Daerahnya masing-masing.

1. Strategi dan Operasi

Beragam masalah yang ditemukan pada sektor strategi dan operasi penanggulangan bencana adalah:

- Lemahnya legalitas Implementasi RAN-PRB agar dilaksanakan secara konsisten oleh Departemen Teknis terkait.

- Belum ada mekanisme untuk mengintegrasikan RAN-PRB ke dalam dokumen RPJMN, sehingga belum dijadikan acuan dalam menyusun program dan kegiatan terkait dengan kebencanaan.
- Belum ada relasi (mandat) yang jelas antara RAN-PRB dengan RAD-PRB.
- Masih banyak pedoman teknis (termasuk Protap-Protap) tersebar di berbagai departemen (sektor) yang belum memiliki kesamaan standarisasi.

2. Evaluasi Sistem Dan Implementasi Penanggulangan Bencana Daerah

Apa yang terjadi pada tingkat nasional tentu saja akan mempengaruhi proses implementasi kebijakan tingkat daerah. Dari hasil evaluasi yang dilakukan maka terdapat berbagai temuan implementasi penanggulangan (Tabel 6.14).

Tabel 6.14 Karakteristik dan keunikan kebijakan dan implementasi penanggulangan bencana

Provinsi	Kebijakan Penanggulangan Bencana	Catatan
Daerah Istimewa Yogyakarta	<ul style="list-style-type: none"> • Kebijakan penanggulangan bencana tidak ada. • Telah dibentuk tim untuk menyusun Rencana Aksi Daerah (RAD). Draft RAD sudah ada. • Kab. Bantul merevisi RPJMD dengan menambahkan aspek bencana 	<ul style="list-style-type: none"> • Kabupaten2 di DIY telah memiliki RAD dengan difasilitasi oleh lembaga internasional. • Sleman telah memiliki kelembagaan dan prosedur tetap terkait dengan Merapi → dibentuk Forum Merapi. • Dibentuk forum PRB, fungsi: pertimbangan ke pemerintah.
Sumatera Barat	<ul style="list-style-type: none"> • Pemprov telah mengeluarkan Perda Mitigasi Bencana (RPB) dan saat ini sedang mempersiapkan RAD. • Pemkot Padang telah memiliki RAD dan Protap Penanggulangan Bencana 	<ul style="list-style-type: none"> • Pemprov telah membentuk tim untuk menyusun draft RAD • Pemkot Padang telah menguji protap penanggulangan bencana dalam <i>evacuation drill</i>
Sulawesi Utara	<ul style="list-style-type: none"> • Pemprov belum memiliki kebijakan terkait penanggulangan bencana. • Pemkot Tomohon telah memiliki perda tentang program penanggulangan bencana berbasis masyarakat desa. 	<ul style="list-style-type: none"> • RPJMD provinsi tidak secara langsung mengandung unsur penanggulangan bencana. • Konsep program penanggulangan bencana Kota Tomohon diadaptasi dari Jepang
Jawa Tengah	<ul style="list-style-type: none"> • Pemprov belum memiliki kebijakan terkait 	<ul style="list-style-type: none"> • Kebijakan penanggulangan bencana

	<p>penanggulangan bencana</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kab. Karanganyar belum memiliki kebijakan penanggulangan bencana yang permanen. Kebijakan yang ada bersifat sementara sebagai respon bencana longsor yang terjadi dan mengatur ganti rugi. 	<p>akan disusun oleh tim yang difasilitasi oleh sekretariat BPBD.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Telah dibentuk forum PRB yang terdiri dari berbagai stakeholder untuk memberikan masukan kebijakan dan operasi kepada pemerintah.
Kalimantan Timur	<ul style="list-style-type: none"> • Pemprov belum memiliki kebijakan penanggulangan. • Kebijakan: penanggulangan kebakaran hutan → sudah terimplementasi. • Kab. Kutai Kertanegara belum memiliki kebijakan penanggulangan bencana 	<ul style="list-style-type: none"> • Dinas kehutanan dengan bantuan GTZ telah merumuskan beberapa kebijakan untuk menanggulangi kebakaran hutan
Jawa Barat	<ul style="list-style-type: none"> • Kebijakan penanggulangan bencana telah ada dalam bentuk Rencana Induk PB, saat ini statusnya sedang didiskusikan dengan kabupaten/kota • Setiap SKPD yang terkait PB telah memiliki SOP. • Kab Ciamis telah memasukkan program PB dalam program SKPD yang terkait 	<ul style="list-style-type: none"> • Terdapat beberapa program dari lembaga multilateral yang membantu pemda dalam pengurangan risiko bencana
DKI Jakarta	<p>Fokus kebijakan bencana adalah kebakaran dan banjir, beberapa perda yang terkait telah disusun. Kebijakan dalam bentuk RPB dan RAD belum disusun</p>	<p>Peraturan yang ada dirasakan oleh Pemda sudah memadai, kecuali yang terkait dengan pembangunan infrastruktur.</p>

Sumber: BNPB

Gelombang kesadaran perlunya kebijakan PB mengemuka terutama setelah terjadinya bencana tsunami di Aceh tahun 2004 diikuti berbagai bencana lain. Proses perumusan kebijakan PB pada daerah-daerah bencana pada umumnya merupakan bagian dari proses penanganan bencana yang terjadi. Hal ini menyebabkan berbagai kebijakan PB di daerah disusun sebelum UU No. 24/2007 dikeluarkan. Sebagai akibatnya berbagai kebijakan PB di daerah memiliki format dan isi yang berbeda dengan yang dimaksudkan dalam UU No. 24/2007 (Tabel 6.15).

Tabel 6.15 Karakteristik strategi dan operasi yang dikembangkan daerah dalam menanggulangi bencana

Provinsi	Strategi & Operasi	Catatan
Daerah Istimewa Yogyakarta	<ul style="list-style-type: none"> • Mengoptimalkan mekanisme dan kelembagaan yang sudah ada (Satkorlak dan Satlak) • Membuka diri untuk bekerja sama dengan berbagai pelaku non pemerintah seperti lembaga internasional • Membentuk forum multi stakeholder untuk mengkaji dan mengusulkan kebijakan sekaligus menjadi sarana koordinasi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peran dari pelaku non pemerintah sangat dominan • Berbagai hal terkait dengan bencana ditumpukan kepada lembaga dan orang tertentu.
Sumatera Barat	<ul style="list-style-type: none"> • Pemprov menetapkan kebijakan sebagai payung hukum sehingga kegiatan PB berikutnya dapat dilaksanakan • Kelembagaan masih menggunakan yang ada (Satkorlak, Satlak, dan Pusdalops) • Pemkot Padang mengandalkan Dinas PKPB untuk menyusun dan melaksanakan strategi dan operasi PB. • Kerja sama dengan pelaku non pemerintah sangat dominan 	<ul style="list-style-type: none"> • Inisiatif dari pelaku non pemerintah sangat dominan • Urusan PB masih terkonsentrasi pada dinas dan individu tertentu.
Sulawesi Utara	<ul style="list-style-type: none"> • Pemprov merencanakan membentuk BPBD yang akan diberi tugas untuk menyusun strategi dan mengkoordinir pelaksanaan PB. • PB dilaksanakan sesuai tupoksi SKPD • Pemkot Tomohon mengembangkan kesiapsiagaan dan ketahanan masyarakat desa sebagai prioritas, pemkot bersifat mendukung. 	<ul style="list-style-type: none"> • Koordinasi dan inisiatif bertumpu pada kepala daerah
Jawa Tengah	<ul style="list-style-type: none"> • Pemprov membentuk BPBD dan telah dilengkapi dengan infrastruktur serta staf untuk dapat berfungsi pada tahap awal. • Staf dan fungsi BPBD dipindah 	<ul style="list-style-type: none"> • BPBD merupakan terobosan dari beberapa aturan yang saling tumpang tindih • Kepala BPBD secara <i>ex</i>

Kalimantan Timur	<p>dari bidang yang terkait PB di SKPD lain.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forum PRB difungsikan menjadi partner dari BPBD • Kab. Karanganyar menggunakan mekanisme satlak dan kerja sama dengan pelaku non pemerintah dibawah koordinasi satlak. • Jaringan komunikasi antar desa diperkuat dan dibuat menjadi mekanisme rutin. • Pemda masih menggunakan mekanisme yang ada (satkorlak dan satlak). • Untuk kebakaran hutan sudah dibentuk lembaga yang khusus dan melekat pada Dinas Kehutanan. • Usulan strategi dan program PB di Kab. Kutai Kertanegara belum mendapatkan dukungan sebagaimana diharapkan. 	<p><i>officio</i> dirangkap Sekda, pelaksana harian ditunjuk pejabat lain.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ketiadaan kepala daerah karena kasus korupsi menghambat proses PB
Jawa Barat	<ul style="list-style-type: none"> • Mekanisme satkorlak dan satlak masih digunakan sebagai kelembagaan PB • Secara khusus dinas social yang menjadi sekretaris satkorlak berperan sangat besar • Kerja sama dengan beberapa lembaga yang ada seperti badan vulkanologi dikembangkan. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rotasi pejabat menghambat pengembangan sistem PB
DKI Jakarta	<ul style="list-style-type: none"> • Fokus kebijakan bencana adalah kebakaran dan banjir • Pemda telah mengembangkan kesbanglinmas sehingga memiliki infrastruktur yang memadai untuk menjalankan fungsi PB 	<ul style="list-style-type: none"> • Teknologi informasi dimanfaatkan secara optimal

Sumber: BNPB

Strategi dan operasi Penanggulangan Bencana (PB) yang pada saat ini dilaksanakan di daerah pada umumnya masih menggunakan mekanisme yang saat ini ada, yaitu Satkorlak dan Satlak. Mekanisme ini masih dipakai, karena beberapa alasan:

- Jenis dan tingkat bencana masih dapat ditangani oleh mekanisme yang ada.

- Mekanisme yang ada masih dapat dioptimalkan dengan beberapa penyesuaian seperti alokasi dana yang memadai.
- Belum adanya informasi mengenai arah PB ke depan.
- Belum adanya kelembagaan dan mekanisme baru yang jelas.

Upaya pengembangan strategi dan operasi PB di daerah dilakukan dengan melakukan optimalisasi mekanisme dan fungsi yang ada. Beberapa daerah berpandangan lebih efektif untuk mengoptimalkan mekanisme yang ada dan mendorong SKPD menjalankan tupoksinya secara optimal. Agar hal ini dapat berjalan, diperlukan keterlibatan kepala daerah tertinggi, dengan penunjukan pimpinan satkorlak/satlak serta dinas yang tepat, serta alokasi anggaran yang memadai.

PENGELOLAAN SAMPAH

Sampah pada dasarnya adalah segala hal baik yang memiliki bentuk maupun yang tidak memiliki bentuk, yang harus dibuang karena telah tidak dipakai lagi. Sampah dapat berupa benda padat, cair dan gas; dalam beberapa kasus dapat berupa unsur radioaktif, yang terbentuk oleh proses dekomposisi (peluruhan) yang berlangsung di udara, air maupun tanah. Jadi, dalam konteks ini ada dua hal penting yang menjadi kunci dalam penentuan sampah; yaitu “dibuang” dan “tidak dipakai”, artinya telah tidak bermanfaat. Dewasa ini, marak di telinga kita tentang istilah “daur ulang sampah” atau dalam bahasa Inggrisnya “reuse”. Dalam hal ini benda/barang tersebut tentunya tidak termasuk ke dalam kategori sampah, karena masih dapat dimanfaatkan kembali.

Sampah ada yang dapat diuraikan (membusuk) dan kebanyakan tidak / sulit terurai. Untuk itu diperlukan metode yang paling tepat untuk meminimalkan volume sampah. Langkah yang paling mudah adalah melalui daur ulang. Daur ulang dapat berupa pemanfaatan kembali menjadi benda lain, atau melalui peleburan yang selanjutnya dicetak menjadi bentuk lain. Contoh daur ulang adalah pemanfaatan sampah plastik (bungkus deterjen dan botol-botol tempat makanan dan minuman ringan) di wilayah Kabupaten Bantul (Daerah Istimewa Yogyakarta), yang diolah kembali menjadi benda-benda yang bermanfaat, seperti tas, bingkai pigura, hiasan alat-alat rumahtangga dan lain-lain. Sejauh ini, usaha tersebut telah berhasil mengurangi sedikitnya 20% volume sampah anorganik di kota Yogyakarta, dan upaya tersebut pun telah dikembangkan dengan baik di beberapa wilayah di sebagian wilayah Kab. Sleman, Kodya Yogyakarta dan Kab. Bantul.

Permasalahannya adalah, tidak semua sampah anorganik tersebut dapat dimanfaatkan atau diolah kembali menjadi benda-benda yang berharga lainnya, seperti sampah rumah sakit dan industri. Untuk itu masih diperlukan metode pengolahan dan / atau teknik pembuangan yang memadai. Analisis geologi diperlukan untuk menentukan letak dan konstruksi tempat pembuangan akhir sampah (TPA).

7.1 Permasalahan Sampah

Hingga saat ini pemahaman tentang pembuangan sampah yang benar dan sehat di kota-kota besar di Indonesia masih sangat kurang. Sebagai contoh, tiap saat hampir sebulan sekali sampah menumpuk di sudut-sudut kota, dan bahkan telah menjadi permasalahan utama pemerintah kota, seperti di Bandung, Jakarta, Surabaya dan Semarang. Bau yang sangat menyengat akibat sampah cair yang mengalir dari rumah-rumah penduduk di kota Surabaya, serta sampah-sampah yang menumpuk di sepanjang tepian Sungai Berantas juga menjadi masalah umum. Sampah dan pengolahannya juga telah menjadi isu yang sangat kompleks di kalangan penduduk Bogor (sebagai wilayah buangan) dan Jakarta (sebagai

wilayah suplai sampah). Contoh kasus permasalahan pembuangan sampah lain di dunia juga banyak dijumpai, seperti di Meksiko, India, Pakistan dan lain-lain.

Kurangnya kesadaran tentang manajemen sampah bagi masyarakat menengah ke bawah, juga menjadi problem yang kompleks. Walaupun pendidikan dan penyuluhan tentang manajemen sampah telah banyak dilakukan, namun dampak pembuangan sampah yang kurang baik bagi tanah, masih saja sering terjadi. Kerusakan-kerusakan lingkungan yang sering ditimbulkan oleh sampah antara lain berupa longsor di Leuwigajah (Cimahi, Bandung), pencemaran airtanah (Surabaya, Semarang, Yogyakarta dan lain-lain), pencemaran sungai, tanah dan pantai (Kepulauan Seribu, Surabaya, Jakarta dan lain-lain), serta keluhan kesehatan. Kerusakan lahan akibat zat-zat kimia, baik yang ditimbulkan oleh industri maupun kegiatan pertanian (insektisida, pestisida dan pupuk kimia) menjadikan tanah pertanian menjadi berkurang kegunaannya, sehingga justru tidak subur lagi. Di samping itu, campur-tangan yang kurang pas dari oknum-oknum tertentu yang kurang memahami permasalahan penanganan sampah, menjadi penghambat yang signifikan terhadap daur-ulang / pengolahannya, seperti di Bojong (Bogor) dan Puteh (Surabaya). Sampah hingga saat ini masih menjadi masalah prioritas, untuk segera ditangani baik di kalangan masyarakat maupun di tingkat pemerintah kota.

Penyebab utama perilaku membuang sampah sembarangan ini bisa terbentuk dan bertahan kuat dalam perilaku masyarakat, karena :

1. Dalam pikiran alam bawah sadar, masyarakat menganggap bahwa membuang sampah sembarangan bukan merupakan suatu hal yang salah karena tidak ada regulasi yang mengaturnya, sehingga tidak ada sanksi di dalamnya.
2. Norma dari lingkungan sekitar seperti keluarga, sekolah, masyarakat, dan lingkungan kerja, tidak mendukung terhadap perilaku membuang sampah yang baik dan benar.
3. Seseorang akan melakukan suatu tindakan yang dirasa mudah untuk dilakukan. Jadi, orang tidak akan membuang sampah sembarangan jika tersedianya banyak tempat sampah.
4. Tempat yang kotor dan memang sudah banyak sampahnya. Tempat yang asal mulanya terdapat banyak sampah, bisa membuat orang yakin bahwa membuang sampah sembarangan diperbolehkan di tempat itu. Jadi, warga sekitar tanpa ragu untuk membuang sampahnya di tempat itu.
5. Kurang banyak tempat sampah. Kurangnya tempat sampah membuat orang sulit untuk membuang sampahnya. Jadi, orang dengan mudah akan membuang sampahnya sembarangan.

7.2 Dampak yang Ditimbulkan oleh Sampah

Sampah-sampah yang berserakan pada tumpukan sampah yang berlebihan memicu tumbuhnya binatang pengurai, seperti lalat, belatung, dan amoeba. Pertumbuhan organisme-organisme tersebut tentu dapat membahayakan kesehatan lingkungan, dengan mencemari udara, tanah dan airtanah. Dampak negatif yang ditimbulkan oleh tumpukan sampah tersebut adalah :

a. Munculnya bakteri dan virus agen / pemicu berbagai macam penyakit, seperti diare, kolera, dan tifus yang dapat menyebar dengan cepat dari pusat sampah tersebut, ketika pengelolaan sampah tidak tepat. Begitu juga limbah-limbah karsinogenik, seperti limbah rumahsakit, limbah pabrik dan lain-lain yang selanjutnya akan meresap ke dalam tanah hingga mencemari tanah dan airtanah. Selain menjadi sarang berbagai agen penyakit, juga menjadi sarang binatang pengerat atau binatang-binatang lainnya, yang jika selanjutnya berhubungan dengan manusia, maka akan menjadi agen penyakit berikutnya, seperti:

1. Tikus; binatang pengerat yang identik dengan lingkungan kotor dan penyakit. Penyakit ditularkan melalui urin, gigitan atau lewat gigitan kutu yang menempel di tubuhnya, yaitu:

1) Leptospirosis; dikenal dengan penyakit “kencing tikus”. Penyebabnya adalah bakteri leptospira yang sering dibawa oleh tikus cecurut, anjing, kucing dan hewan ternak seperti kambing, sapi dan kuda. Cara penularannya melalui kencing hewan yang terkena penyakit, masuk ke dalam genangan air yang ada di lingkungan sekitar, dan jika terdapat luka di kaki atau tangan kita, sedangkan kondisi tubuh kita sedang tidak fit, maka bakteri tersebut akan masuk ke dalam tubuh kita dan kita akan tertular. Gejala atau tanda-tandanya adalah demam dan meriang disertai pegal atau nyeri pada betis. Pada penderita yang sudah parah: kekuningan seperti pada penyakit hati (penyakit kuning), mata kemerahan, dan yang fatal adalah gagal ginjal.

2) Pes: pernah menjadi wabah penyakit yang mengerikan di Eropa pada masa lampau. Hampir sepertiga hingga dua per tiga penduduk di Eropa meninggal karena menderita penyakit ini. Di Indonesia, wabah pes pernah terjadi di Boyolali (Jawa Tengah), kini jarang dilaporkan kembali. Walau demikian tetap waspada, mengingat penyakit tersebut dapat menimbulkan kematian dengan cepat. Ada beberapa jenis penyakit pes. Tetapi yang paling berbahaya yaitu jenis Pes Pnemonik yang menyerang pernafasan. Penyebab pes adalah bakteri *Yersinia pestis*. Bakteri tersebut menular melalui gigitan kutu yang hidup pada tikus. Gejala yang dialami oleh penderita antara lain demam tinggi dan nyeri pada lipat paha atau ketiak. Pada penderita yang sudah parah dapat pula mengalami gangguan pernafasan hingga menimbulkan kematian.

3) Murine typhus, disebut juga Tipus Endemik. Penyebabnya adalah bakteri *Rickettsia typhi* yang ditularkan melalui kotoran kutu pada tikus yang kemudian masuk ke dalam luka gigitan kutu atau luka lain yang ada di kulit kita. Gejala utamanya adalah demam dan nyeri otot, kadang pula disertai ruam atau bintik kemerahan. Tipus ini jarang menimbulkan kematian, tetapi cukup mengganggu kesehatan manusia.

4) Scrub typhus, yaitu sejenis penyakit tipus yang juga ditularkan melalui kotoran tungau yang mengenai luka di kulit, termasuk luka akibat gigitan tungau. Tungau atau disebut “tengu” oleh orang Jawa, adalah sejenis laba-laba sangat kecil, yang dapat hidup juga pada tikus.

Penyebab penyakit Scrub typhus disebut *Orientia tsutsugamushi*. Gejalanya demam, sakit kepala, nyeri pada ketiak atau pangkal paha. Gatal-gatal akibat penyakit ini sangat mengganggu manusia.

- 5) Hantavirus, berasal dari nama sungai di Korea yaitu Sungai Hantan. Penyakit yang disebabkan oleh virus Hantaaan disebut **demam berdarah dengan sindrom renal**(HFRS). Gejalanya antara lain telapak tangan berkeriat, demam, kencing berbusa, dan bisa menyebabkan sulit bernafas sehingga menyebabkan kematian. Virus hantaaan ditularkan melalui kencing, ludah, kotoran serta gigitan tikus.
 - 6) Masih banyak lagi penyakit-penyakit yang ditularkan melalui tikus. Untuk itu, kita harus waspada terhadap tikus di sekitar kita, terlebih di dalam rumah kita. Perilaku hidup bersih seperti cuci tangan dengan sabun, merawat luka dengan baik, misalnya dengan menutupnya menggunakan plester, rajin cuci tangan dengan sabun, menutup makanan agar tidak terkena tikus maupun kencing atau kotorannya, adalah beberapa cara praktis dan sederhana yang seringkali kita sepelekan ternyata dapat mencegah penularan penyakit berbahaya
2. Selama ini ada anggapan bahwa sampah menimbulkan pemanasan global. Berdasarkan penelitian anggapan tersebut tidak 100% benar. Sampah yang dibuang begitu saja berkontribusi dalam mempercepat pemanasan global, karena sampah dapat menghasilkan gas metan (CH₄) yang dapat merusak atmosfer bumi. Rata-rata tiap satu ton sampah padat menghasilkan 50 kg gas metan. Gas metan itu sendiri mempunyai kekuatan merusak hingga 20-30 kali lebih besar dari karbondioksida (CO₂). Gas metan berada di atmosfer selama sekitar 7-10 tahun dapat meningkatkan suhu sekitar 1,3°C per tahun.
 3. Sampah dapat menyebabkan banjir. Sampah yang dibuang sembarangan, salah satunya yang dibuang kesungai atau aliran air lainnya. Lama kelamaan akan menumpuk dan menyumbat aliran air, sehingga air tidak dapat mengalir dengan lancar dan akan meluap menyebabkan banjir. Selain pernyataan diatas, sampah juga dapat merusak pemandangan.

7.3 Pengolahan Sampah

Selain berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan sekitar, sebenarnya sampah juga berguna bagi kepentingan manusia, selama pengelolaannya baik dan benar. Salah satunya dengan diolah atau di daur ulang, misalnya sebagai kerajinan yang bernilai ekonomi, bercita rasa seni dan unik. Ada tiga tahap daur ulang, yaitu : pengumpulan, pengangkutan, dan pembuangan akhir/pengolahan. Baru pada tahap pembuangan akhir/pengolahan, sampah akan mengalami proses-proses fisik, kimiawi, dan biologis (penguraian). Ada dua proses dalam pembuangan akhir, yaitu penimbunan terbuka dan *sanitary landfill* (pembuangan secara sehat). Pada proses *open dumping*, sampah ditimbun secara bergantian dengan tanah sebagai lapisan penutupnya.

a. Alternatif lain dalam Mengolah Sampah

Langkah ini disebut juga dengan 4R, yaitu *reduce, reuse, recycle* dan *replace*:

- 1) *Reduce* (mengurangi), sebisa mungkin kita meminimalisasi barang atau material yang kita gunakan. Semakin banyak kita menggunakan barang atau material, semakin banyak sampah yang kita hasilkan
- 2) *Reuse* (menggunakan kembali), sebisa mungkin pilihlah barang-barang yang masih bisa dipakai kembali. Hal ini dapat memperpanjang waktu pemakaian barang sebelum barang menjadi sampah.
- 3) *Recycle* (mendaur ulang), sebisa mungkin, barang-barang yang tidak berguna di daur ulang kembali. Tidak semua barang bisa didaur ulang, tetapi saat ini sudah banyak industri informal dan rumah tangga yang memanfaatkan sampah menjadi barang lain.
- 4) *Replace* (mengganti), teliti barang yang kita pakai sehari-hari. Gantilah barang-barang yang hanya bisa dipakai sekali dengan barang yang lebih tahan lama dan hanya barang-barang yang lebih ramah lingkungan.

Dalam mengelola daur ulang, yang harus dilakukan adalah pemilahan, pengumpulan, pemrosesan, pendistribusian, dan pembuangan produk/material bekas pakai, atau jika usaha daur ulang berkembang dengan pesat, kita bisa melakukan semua kegiatan tersebut secara bersamaan.

b. **Peran Masyarakat dalam Mengelola Sampah**

Peran serta masyarakat dalam mengolah sampah sangat diperlukan untuk mengurangi jumlah dan volume sampah.

- 1) **Kriteria Peningkatan Peran Masyarakat**, dalam menumbuhkan, mengembangkan, dan membina peran serta masyarakat adalah:
 - Harus dilaksanakan secara intensif dan berorientasi pada penyebaran pengetahuan, penanaman kesadaran, peneguhan sikap dan pembentukan perilaku.
 - Perencanaan program untuk membentuk perilaku (a) mengerti dan memahami masalah kebersihan lingkungan; (b) turut serta secara aktif dalam mewujudkan kebersihan lingkungan; (c) bersedia mengikuti prosedur/tata cara pemeliharaan kebersihan; (d) bersedia membiayai pengelolaan sampah; (e) turut aktif menularkan kebiasaan hidup bersih pada anggota masyarakat lainnya; dan (f) aktif memberi masukan (saran-saran) yang membangun.

- 2) **Strategi peningkatan peran serta masyarakat**

Pengembangan peran serta masyarakat dibidang kebersihan diterapkan melalui pendekatan edukatif tentang (1) pengembangan petugas; yaitu keterbukaan dan komunikasi timbal balik dari unsur petugasnya, antar petugas dan / atau masyarakat dan anggota masyarakat; dan (2) pengembangan masyarakat melalui kesamaan persepsi antara masyarakat dan petugas; komunikasi dikatakan berhasil ada umpan balik dari pesan yang diberikan. Isinya adalah informasi, penjelasan dan penyuluhan tentang pengelolaan sampah di lingkungannya. Umpan baliknya berupa kesadaran masyarakat untuk memenuhi kewajibannya dalam membayar retribusi,

memelihara kebersihan lingkungan dan dukungan moril kepada petugas kebersihan. Berikut ini penjabaran strategi peningkatan peran serta masyarakat :

- a) Menyampaikan informasi, atau meneruskan informasi melalui media masa.
- b) Membujuk dan menghukum, untuk mempengaruhi (kepercayaan, nilai, dan cara bertindak) pihak yang diajak berkomunikasi. Bila bujukan belum berhasil, dilakukan hukuman yang merupakan senjata terakhir untuk memaksa masyarakat mengubah sikap.
- c) Mengadakan dialog.

3) **Aspek yang menentukan peran serta masyarakat**

Keberhasilan peningkatan peran serta masyarakat bergantung pada (a) komunikasi yang menumbuhkan pengertian yang berhasil; (b) perubahan sikap, pendapat dan tingkah laku yang menumbuhkan kesadaran; (c) kesadaran yang didasarkan pada perhitungan dan pertimbangan; (d) antusiasme dalam menumbuhkan spontanitas; dan (e) rasa tanggung jawab terhadap kepentingan bersama.

7.4 Pengelolaan Sampah (*Solid Waste Management*)

Manajemen (pengelolaan) sampah pada awalnya dilakukan hanya untuk sampah padat. Yang paling umum dan paling mudah dilakukan adalah dengan “mengumpulkannya, lalu segera memasukkannya ke lubang”, menguburnya atau membakarnya. Kini, sejalan dengan kebutuhan manusia yang makin berkembang dan dengan jenis sampah yang makin bervariasi, konsep tersebut makin menjauhi penanganan yang benar dan sehat. Sebagai contoh adalah asap hasil pembakaran sampah plastik, yang mengandung Kini dengan menggandeng komunitas “stakeholder” dari berbagai pihak bersama-sama dengan industri, penanganan sampah telah berhasil ditata dan direncana dengan baik. Penimbunan tanah dengan sampah padat, atau sampah berbahaya, kini dapat dilakukan dengan rekayasa struktur dan perencanaan yang baik. Hal itu dapat dirancang agar tidak lagi mengontaminasi akifer-akifer airtanah (air layak minum), serta menghilangkan atau setidaknya mengurangi bahayanya. Kerjasama antara masyarakat lokal dan pelaksana industri sangat diperlukan agar sampah dapat ditangani dengan tepat, efektif dan ekonomis. Sayangnya, hal itu bukan sesuatu yang mudah untuk dilakukan, sebagaimana yang kini terjadi di Bojong (Bogor).

Selama ini, penanganan sampah diserahkan sepenuhnya pada Dinas Pertamanan Kota dan Permukiman dan Prasarana Wilayah (Kimpraswil) daerah setempat. Hal itulah yang harus dirubah secara total, karena sampah merupakan permasalahan bersama, sehingga diperlukan penanganan secara menyeluruh, dengan melibatkan berbagai kalangan dari stakeholders pemerintah dan swasta, serta masyarakat. Selama ini, yang termasuk dalam kelompok *stakeholders* (penanam modal) dalam penanganan sampah tersebut, secara normal meliputi: para pekerja kantor (*officials*) dan pembuat keputusan (*decision maker*) daerah setempat, para pelaksana bisnis industri dan pengusaha (*entrepreneurs*), para kolektor (pemungut sampah) dan operator pembuangan, masyarakat, masyarakat tetangga, dan para kelompok (organisasi) masyarakat (lingkungan), para otoritas regulator, para

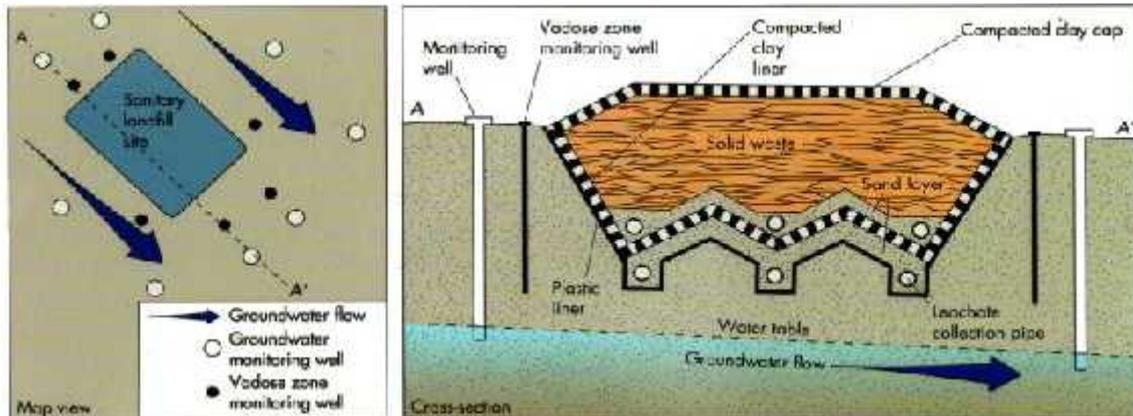
penyedia pelayanan daur-ulang, para pengolah material sekunder dan para pengguna. Dalam hal ini perlu adanya kerjasama yang baik oleh seluruh pihak, dari masyarakat penyedia sampah, pemerintah, pengolah daur-ulang, pengguna hasil daur-ulang dan manajemen yang baik yang dapat mengaturnya.

Permasalahan yang sering muncul dalam rangka kerjasama penanganan sampah tersebut justru sering berasal dari kelompok "**stakeholder**". Para stakeholder yang terkadang tidak memahami atau secara teknis kurang mampu membantu penyelesaian daur-ulang dan pembuangan sisa daur-ulangnya, sering berselisih paham dalam penentuan arah pengembangan dan pelaksanaan urugan. Ditambah lagi dengan banyaknya alasan kemanusiaan yang sering dilontarkan oleh masyarakat yang tidak memahami dengan benar tentang konsep daur-ulang dan pengembangan konstruksi tempat pembuangan, justru sering mempersulit dan memperkeruh suasana. Sebagai contoh adalah perilaku penolakan tempat pembuangan akhir sampah (TPA), lokasi daur-ulang dan lokasi pengolahan sampah lanjut, sebagaimana yang terjadi di banyak pinggiran kota besar. Padahal, penentuan lokasi-lokasi penanganan sampah tersebut harus dilakukan melalui analisis geologi teknik yang memadai, sehingga tidak mencemari airtanah, tanah dan lingkungan.

Sosialisasi terhadap pemahaman penempatan dan perancangan sistem urugan sampah terhadap masyarakat yang tinggal di sekitar calon TPA dan masyarakat tetangga akan sangat membantu, untuk melancarkan penanganan sampah tersebut. Lambat-laun, dengan ditambah kesadaran yang tinggi dengan berbagai upaya minimalisasi volume sampah; ke depan, suatu benda yang pada awalnya adalah sampah, justru dapat meningkatkan tingkat ekonomi masyarakatnya.

Sanitary Landfill

Yaitu metode pembuangan akhir sampah yang dilaksanakan di TPA dalam bentuk urugan (*landfilling*); lahan urugan sampah yang telah memperhatikan aspek sanitasi lingkungan. Sampah diletakkan di lokasi lembah, kemudian dihamparkan lalu dipadatkan untuk kemudian dilapisi dengan tanah penutup, yang setiap hari di akhir operasi, dipadatkan kembali setebal 10% -15% dari ketebalan lapisan sampah, untuk mencegah berkembangnya penyakit, penyebaran debu dan sampah ringan yang dapat mencemari lingkungan di sekitarnya. Pada bagian atas timbunan tanah penutup harian tersebut dihamparkan lagi sampah yang kemudian ditimbun lagi dengan tanah penutup harian. Demikian seterusnya hingga terbentuk lapisan-lapisan sampah dan tanah. Bagian dasar konstruksi *sanitary landfill* dibuat lapisan kedap air yang dilengkapi dengan pipa pengumpul dan penyalur *air lindi* (*leachate*) yang terbentuk dari proses penguraian sampah organik. Terdapat juga saluran penyalur gas untuk mengolah gas metan yang dihasilkan dari proses degradasi limbah organik. Metode ini merupakan cara yang ideal namun memerlukan biaya investasi dan operasional yang tinggi.



Gambar 7.1 Prinsip dasar *sanitary landfill* (Anonim, 2016)

Fungsi Sanitary Landfill

Timbulan gas metan dan air lindi terkontrol dengan baik sehingga tidak mencemari lingkungan. Timbulan gas metan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Setelah selesai pemakaiannya, area lahan urug dapat digunakan untuk berbagai keperluan seperti areal parkir, lapangan golf, dan kebutuhan lain. Kerugiannya adalah pplikasi sistem pelapisan dasar (*liner*) yang rumit, aplikasi tanah penutup harian yang mahal, dan aplikasi sistem lapisan penutup akhir, biaya aplikasi pipa penyalur gas metan dan instalasi pengkonversian gas metan menjadi sumber energi, serta dibutuhkan biaya aplikasi pipa-pipa pengumpul dan penyalur air lindi (*leachate*) dan intalasi pengolah air lindi.

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam sanitary landfill, yaitu :

1. Semua landfill adalah warisan bagi generasi mendatang
2. Memerlukan lahan yang luas
3. Penyediaan dan pemilihan lokasi pembuangan harus memperhatikan dampak lingkungan
4. Aspek social harus mendapat perhatian
5. Harus dipersiapkan instalasi drainase dan system pengumpulan gas
6. Kebocoran ke dalam sumber air tidak dapat ditolerir (kontaminasi dengan zat-zat beracun)
7. Memerlukan pemantauan yang terus-menerus

Masalah-masalah lain yang mungkin dapat timbul akibat landfill yang tidak terkontrol adalah:

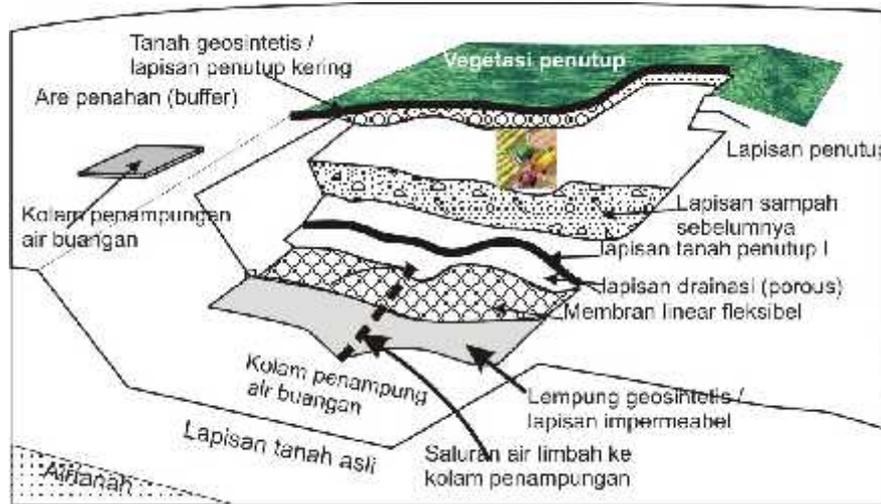
1. Lahan yang luas akan tertutup oleh sampah dan tidak dapat digunakan untuk tujuan lain
2. Cairan yang dihasilkan akibat proses penguraian (*leachate*) dapat mencemari sumber air
3. Sungai dan pipa air minum mungkin teracuni karena bereaksi dengan zat-zat atau polutan sampah
4. Penyumbatan badan air
5. Merupakan tempat yang menarik bagi berbagai binatang (tikus, anjing liar)
6. Merupakan sumber dan tempat perkembangbiakan organisme penyebar penyakit

7. Gas yang dihasilkan dalam proses penguraian akan terperangkap di dalam tumpukan sampah dapat menimbulkan ledakan jika mencapai kadar dan tekanan tertentu.

Langkah-langkah penempatan dan perancangan konstruksi TPA meliputi:

1. Dalam menentukan penempatan dan perancangan material urugan (*Lanfills*), hal-hal yang dilakukan adalah:
 - a) Karakterisasi dan evaluasi beberapa alternatif lokasi penempatan, perencanaan operasi dan pengurusan ijin operasi.
 - (1) Analisis geologi regional dilakukan pada wilayah dengan radius 150 km untuk sampah radioaktif, 60 km untuk sampah cair dan 10 km untuk sampah padat pada beberapa calon tapak berotensi.
 - (2) Langkah penapisan dilakukan setelah mendapatkan calon tapak pembuangan sampah, untuk memilih lokasi yang paling tepat, baik secara geomorfologi maupun geologi.
 - (3) Perancangan dan perencanaan konstruksi bangunan; tapak TPA harus terletak pada litologi yang impermeabel, seperti batuan beku masif dan batulempung. Jika dibangun pada batuan yang permeabel (seperti batupasir, pasir fluvial dan breksi gunung api) dapat menyebabkan kontaminasi cairan sampah terhadap airtanah dan tanah. Adanya rekahan (deformasi: sesar dan kekar pada batuan) yang memiliki pola tertentu juga dapat menyebabkan kontaminasi airtanah, dan menyebarnya berbagai penyakit.
 - b) Perencanaan pengembangan lokasi, spesifikasi dan penentuan biaya operasional; tahap ini dilakukan jika penempatan tapak TPA telah dilakukan. Disain TPA disusun sedemikian rupa untuk menghindari kebocoran.
 - c) Sistem peletakan kolom-kolom sampah, parameter, penyusunan runtunan dan sistem pelurusan (*liner*); kolom-kolom sampah harus memenuhi standar konstruksi TPA, meliputi lahan penampungan sampah yang berada di atas lapisan kedap air. Di bawah lapisan kedap air tersebut harus dibangun lapisan drainasi sintesis yang dapat menampung cairan sampah, yang kemudian dialirkan melalui saluran air buangan, dan ditampung dalam kolam penampungan air buangan. Untuk menghindari kebocoran air limbah, di bawah lapisan sintesis porous adalah lapisan kedap air yang menumpang di atas membran yang disusun secara linear terhadap lapisan kedap air. Membran linear sendiri juga harus menumpang di atas lapisan impermeabel paling bawah (dapat berupa lempung sintesis atau batuan dasar (batuan beku). Air yang ditampung dalam kolam penampung air limbah selanjutnya dijernihkan secara suspensi untuk menghilangkan residu, bau dan rasa. Dari kolam pengolahan, selanjutnya air dialirkan ke kolam penampungan air buangan yang selanjutnya dapat langsung diinjeksikan ke dalam tanah. Gambar 7.2 adalah teknis konstruksi *sanitary landfill* (tempat pembuangan akhir sampah).
 - d) Sistem pengontrol *leachate* (larian) terhadap gas, airtanah dan kontrol lingkungan lain.

- e) Perencanaan lapisan penutup dan di atas penutup, monitoring, pengujian dan pengawasan konstruksi



Gambar 7.2 Contoh bangunan *sanitary landfill* (tempat pembuangan akhir sampah)

2. Penempatan *site* dan penyusunan rancangan pemberhentian antara (*Transfer Stations*)

- Standard penempatan lokasi, evaluasi komparatif, dan seleksi akhir
- Layout fasilitas, rancangan, rencana dan spesifikasinya
- Penggabungan fungsi-fungsi pemulihan material
- Dokumentasi perijinan dan proses-prosesnya
- Pelayanan pendukung manajemen konstruksi

3. Penempatan dan penyusunan rancangan fasilitas untuk pemulihan bahan (*Material Recovery Facilities*)

- Merencanakan kebutuhan-kebutuhan dalam penanganan daur ulang sampah dan proses-prosesnya, meliputi pengosongan (*off-loading*), pengangkutan, pemilahan, pemisahan, *upgrading* (peningkatan), konsolidasi (pemampatan) dan penyimpanan.
- Pemerian peralatan, evaluasi dan seleksi
- Penentuan biaya operasi dan keuntungan (kapital) yang dapat dicapai untuk berbagai macam konfigurasi MRF
- Pengaturan pasokan material multi-party dan kontrol kualitas
- Pertolongan dengan penentuan ketepatan lokasi (*site*), analisis proposal yang diajukan, ijin penggunaan fasilitas, rekayasa konsep rancang bangun akhir, administrasi konstruksi, pemulaian operasi dan pengawasan pelaksanaannya.

4. Pengembangan program daur-ulang

- Strategi dan kebijakan pemulihan untuk sektor-sektor permukiman dan non-permukiman
- Mempertimbangkan faktor-faktor institusi, organisasi dan politik

- c) Bercakupan dan berkoordinasi dengan penyelia pelayanan di masing-masing sektor dan pelaksana fasilitas
- d) Biaya pelaksanaan dan pilihan pembayaran
- e) Analisis pasar dan inisiatif (ide) perluasan pasar

5. Pengembangan program pengurangan asal sampah

- a) Rekomendasi program dan kebijakan
- b) Penggantian materials dan operasi pemanfaatan kembali
- c) Hukum dasar (fondamental) dan pelaksanaannya bagi pengurus rumah produksi
- d) Teknik meminimalkan sampah halaman
- e) Metode mengukur hasil

6. Pengembangan program pemberdayaan kompos (Pupuk Organik)

- a) Pendugaan cadangan makanan dan pilihan alternatifnya
- b) Pilihan-pilihan teknologi dalam pemrosesan material
- c) Seleksi lokasi (site) dan penyusunan operasional
- d) Perencanaan pemasaran bagi produk akhir yang dihasilkan
- e) Penggabungan dengan penolakan dan pelayanan daur-ulang

7. Karakterisasi sampah

- a) Pengambilan keputusan yang didasarkan pada data dasar sampah
- b) Pendugaan komponen sampah yang kemungkinan (dapat) ditolak
- c) Pendugaan volume (jumlah) material sampah yang dapat ditampung (diterima)
- d) Proyeksi pembuangan dan pengalihan sampah
- e) Dampak pada rancangan program dan fasilitasnya

8. Ekonomi dan keuangan

- a) Menyoroti rincian biaya proses produksi dan proses-proses selanjutnya
- b) Pembiayaan pengambilan daerah pasokan (sumber) dan mekanisme pengumpulan, pengambilan, pengangkutan, peletakan, pengolahan kembali dan pemasarannya
- c) Implikasi dan alokasi pembiayaan masing-masing personal (individu) yang terkait di dalamnya
- d) Penanganan dampak operasi / kepemilikan umum pengelolaan sampah terhadap individu (masyarakat) setempat yang terkena dampaknya.
- e) Analisis rata-rata pembiayaan dan struktur pengelolaan

9. Komunikasi, daya dukung dan pembelajaran

- a) Menyiasati semua hal demi keberhasilannya dalam penempatan fasilitas kerja, implementasi program dan peran serta masyarakat umum
- b) Penyampaian paparan-paparan dalam workshop, seminar, forum, pelatihan, orientasi, event-event penting, dan pertemuan ilmiah
- c) Mempersiapkan brosur kerja, surat kabar (media), lembar kerja (selebaran) dan promosi /informasi lain terhadap material olahan terkait

- d) Penyusunan sajian dalam bentuk grafik dari data teknis, informasi, hasil penelitian dan simpulan proyek
- e) Mediasi dan resolusi terhadap konflik yang muncul, membangun rekanan kerja dan konsensus dan koalisi bangunan

10. **Bantuan implementasi**

- a) Memformulasikan permintaan dan peraturan-peraturannya (regulasi)
- b) Petunjuk dan pengembangan kebijakan
- c) Koordinasi dan hubungan antar pemerintahan
- d) Fasilitasi terhadap adanya negosiasi-negosiasi dengan sektor umum/ sektor pribadi
- e) Proses, dokumen dan koreksi (peninjauan kembali) dalam usahanya mendapatkan penjual

11. **Monitoring dan evaluasi**

- a) Definisi mengukur keberhasilan tujuan dan maksud yang akan dicapai (evaluasi)
- b) Laporan dan prosedur penyusunan laporan
- c) Layanan, fasilitas dan koreksi kelangsungan penjualan produk
- d) Analisis informasi kuantitatif dan kualitatif
- e) Pengenalan program, modifikasi, dan mengukur probabilitas hasil

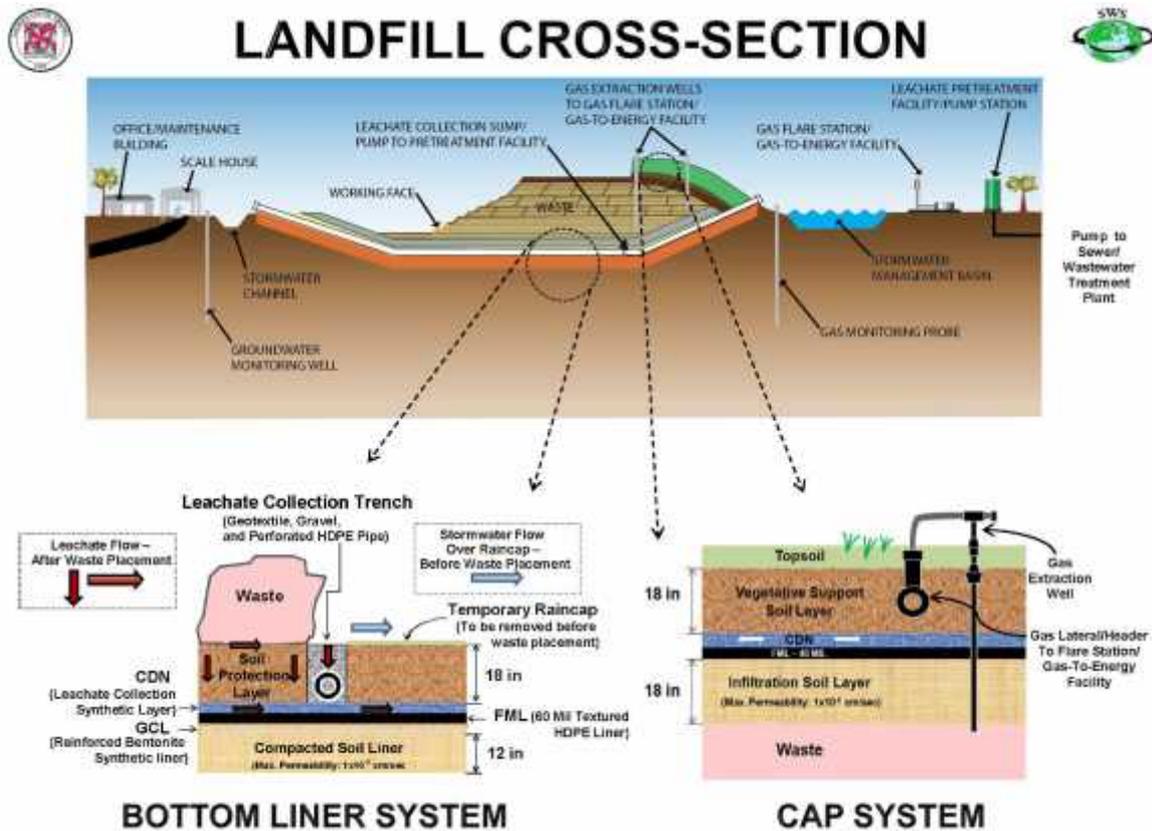
12. **Layanan manajemen sampah tambahan**

- a) Kapasitas urugan di masa depan dan perkiraan biaya pengolahan
- b) Investigasi geoteknik dan hidrologi untuk penempatan fasilitas
- c) Analisis dan konfigurasi rute material (sampah terkumpul) yang ditolak (tidak dapat didaur-ulang)
- d) Studi rerata dan negosiasi kontrak kerja (franchise)
- e) Metode pembuangan dan pengalihan untuk kabel, kayu, sampah makanan, material konstruksi/penghancuran dan sampah-sampah khusus lainnya.
- f) Penyusunan/pematangan rencana bangunan untuk mengantisipasi kemungkinan jika terjadi kerusakan lingkungan akibat bencana longsor (debris) sampah dan untuk memulihkannya.
- g) Merancang perumahan yang tahan terhadap bahaya sampah dan bahaya akibat proses transportasi dan penampungan akhirnya
- h) Penghitungan sampah site penampungan secara spesifik dan meminimalkan material (dengan program daur-ulang) untuk bisnis dan industri
- i) Data suplai/keuntungan /harga dan strategi pengambilan / usaha mendapatkan sampah kertas
- j) Evaluasi dengan membandingkan program-program umum dan operasi, pelayanan dan fasilitas pribadi/kepemilikan.

Teknik lain dalam pengelolaan sampah pada TPA adalah dengan melapisi sepenuhnya cekungan sampah lama dan menggantikannya dengan yang baru, dengan lapisan liner dan cap tertentu sesuai dengan kebutuhannya. Gambar 7.3 menampilkan penampang melintang tempat pembuangan akhir sampah yang khas. Metode dan aturan yang secara ketat mengatur TPA, tentu membutuhkan sejumlah besar pembiayaan untuk menutup tempat pembuangan akhir. "Penutup"

TPA pada dasarnya berarti meletakkan tutup di atas tempat pembuangan akhir dan menutupnya.

Ketika landfill mencapai batas ketinggian yang telah ditentukan, maka tutup tanah liat dan tanah yang tebal ditempatkan di seluruh situs. Begitu tutupnya sudah terpasang, seluruh area ditutup dengan rumput agar tampak lebih indah. Tutupan tersebut untuk mencegah infiltrasi air hujan dari penyaringan TPA ke dalam akifer airtanah. Setelah tutupan dipasang dan rumput tumbuh, TPA harus dipantau selama 30 tahun. Pemantauan meliputi pemotongan dan pemeriksaan secara berkala (dan memperbaiki, jika perlu) tutupannya, air lindi yang dihasilkannya dan instalasi gas dan air lindi terus mengalir ke tangki dan harus diangkut ke fasilitas pengolahan.



Gambar 7.3 Penampang melintang tempat pembuangan akhir sampah dalam pengelolaan sampah

KESINAMBUNGAN DAYA DUKUNG LINGKUNGAN (*SUSTAINABLE DEVELOPMENT*)

Suatu wilayah tentunya memiliki berbagai daya dukung yang memadai dan dapat dimanfaatkan keberadaannya untuk kepentingan rakyatnya, antara lain lahan, sumber daya alam hayati, batuan dan mineral bernilai ekonomi dan sumber daya manusia. Revolusi Industri di Eropa yang berlangsung pada pertengahan abad ke-19, diakui dan telah disadari oleh berbagai pihak telah banyak mempengaruhi dan merusak kondisi lingkungan. Eksploitasi sumber daya alam secara besar-besaran dan penggunaan bahan tak-terurai dalam kehidupan selama ini, telah menyebabkan kemampuan bumi dalam mencerna dan mengolahnya menjadi berkurang. Ditambah lagi dengan meningkatnya konsumsi olahan industri akibat meningkatnya populasi penduduk, semakin besar pula volume material tak-terpakai yang harus segera ditangani dengan arif dan bijaksana.

Memang benar, tidak semua wilayah dapat memiliki semua sumber daya tersebut. Kita masih ingat bahwa selama 3,5 abad, Indonesia dijajah habis-habisan oleh pemerintah kolonial Belanda, yang selanjutnya selama 3,5 tahun beralih oleh rejim NIPPON Jepang. Selama itu pula, pendidikan dan peradaban di wilayah ini semakin terpuruk, sehingga kesadaran akan ilmu pengetahuan dan pembangunan sektor umum pun mengalami keterlambatan. Di kemudian hari, pemanfaatan sumber daya alam dipercayakan kepada pihak investor, baik lokal, regional maupun internasional, yang pada akhirnya kesadaran akan kaidah-kaidah pengembangan berkesinambungan tersebut semakin jauh. Banyak pengambiln sumber daya alam yang juga diikuti dengan kerusakan lingkungan, bencana alam, dan kecelakaan pekerja. Contoh lain adalah pengembangan kawasan permukiman di daerah Bandung, yang dilandasi dengan kondisi geologi yang kurang sesuai. Hal itu dipicu dengan kesalahan penggunaan konsep geologi yang mengacu pada konsep geologi “kue lapis”, yaitu anggapan bahwa susunan litologi yang menyusun daerah tersebut seperti kue lapis dengan sebaran yang homogen secara lateral. Padahal, litologi yang menyusunnya adalah batuan gunung api, yang sebarannya terdistribusi secara teranyam, mengikuti pola aliran yang berkembang di dalamnya. Akibatnya, kini terjadi kelangkaan airtanah karena daerah yang seharusnya berfungsi sebagai daerah resapan, justru dikembangkan sebagai lahan permukiman padat.

Untuk itulah diperlukan langkah konkrit untuk mengurangi berbagai dampak negatif yang ditimbulkan oleh pemanfaatan sumber daya alam tersebut. Dengan manajemen pemanfaatan sumber daya yang berkesinambungan, maka sumber

daya alam tersebut dapat dirasakan sejauh-jauhnya oleh anak keturunan kita. Pengembangan sumber daya alam yang berkesinambungan, atau yang lebih dikenal dengan “sustainable development” kini telah menjadi agenda utama dunia untuk turut menyelamatkan bumi. Agenda tersebut dikenal sebagai “Agenda 21”, sebagai agenda internasional Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB). Pada bulan November 2007 telah dilaksanakan konferensi Internasional, yang diselenggarakan di Bali. Kegiatan tersebut ditujukan untuk membahas tentang upaya dunia dalam penyelamatan bumi, yaitu dalam rangka mengurangi efek rumah kaca akibat pemanasan global. Telah disepakati bersama, bahwa dunia akan mengurangi emisi gas di udara, baik yang ditimbulkan oleh pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor, industri dan menekan kebakaran hutan secara bersama-sama. Dalam mendukung kesepakatan tersebut, kini Indonesia telah menerapkan uji emisi gas untuk kendaraan bermotor, serta pengolahan limbah gas akibat emisi gas yang ditimbulkan oleh industri. Langkah konkrit untuk menekan kebakaran hutan juga telah diupayakan, meskipun belum sepenuhnya berhasil.

8.1 Pengertian Kesinambungan Daya Dukung (*Sustainable Development*)

Konsep pengembangan lingkungan yang berkesinambungan (*sustainable development*) pertama kali dikemukakan oleh Brundland Commission pada tahun 1987 (Anonim, 2004): ***"To meet the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs."***

Suatu daya dukung lingkungan atau “sustain” adalah suatu upaya dalam menjaga apa yang menjadi milik kita agar tetap ada, baik berupa sumber daya hayati maupun non hayati, dan baik sumber daya geologi maupun non geologi. Hal itu, bukan berarti tanpa adanya perubahan atau tanpa berubah. Segala sesuatu di alam pasti dan tetap akan berubah, namun dengan upaya pengembangan dan pemeliharaan secara berkesinambungan, perubahan lingkungan tersebut tetap dapat terkontrol, sehingga apa yang dapat kita nikmati sekarang dapat pula dinikmati oleh keturunan kita. Inti dari pengembangan daya dukung lingkungan (*sustainable development*) adalah segala hal yang berhubungan dengan upaya merubah dan membuat alam / lingkungan menjadi lebih baik dan tetap terjaga kemenerusannya.

Prinsip ini menjelaskan tentang berbagai aktivitas manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya pada masa kini maupun masa depan. Konsep ini mencakup metode-metode yang aman dalam mencari, menemukan, mengambil dan menggunakan sumber daya alam yang tersedia. Hal itu dilatarbelakangi oleh kenyataan bahwa kini banyak dijumpai nutrisi yang buruk, permukiman yang tidak layak dan pencemaran air sehingga menjadi tidak layak minum.

Tingkat pendidikan yang makin tinggi jakan turut meningkatkan rasa tanggungjawab terhadap antargenerasi, dalam mewariskan lingkungan / alam yang nyaman di masa mendatang. Itulah sebabnya, pendidikan pengembangan dan manajemen lingkungan sangat dibutuhkan pada masa kini. Pada awal tahun 1990an, konsep pengembangan lingkungan ini secara luas telah mencakup aspek-

aspek sosial yaitu lebih difokuskan pada perlindungan dan peningkatan kesempatan bagi generasi mendatang untuk mendapatkan kesempatan yang sama dalam limpahan sumber daya alam.

Definisi tersebut bukanlah bertujuan untuk mencela jika terjadi pengosongan sumber daya alam tak-terbarukan. Namun diharapkan generasi berikutnya berkesempatan dapat ikut pula memanfaatkan semua jenis bahan bakar tersebut (sulit dipraktekkan). Atau jika tidak mampu maka mereka mampu mencari material alternatif yang dapat menggantikan sumber daya alam tersebut. Yang terpenting adalah mencari metode eksplorasi dan eksploitasi terhadap sumber daya alam yang masih tersisa namun hingga saat ini belum dapat tereksploitasi. Teknologi yang lebih baru dan lebih kualified akan turut membantu mengembangkan site-site yang belum terjamah tersebut.

Pada 1785, James Hutton mengemukakan salah satu prinsip geologi yang sangat terkenal, yaitu “uniformitarianism”. Konsep tersebut berisi tentang:

Amid all the revolutions of the globe, the economy of nature has been uniform ... and her laws are the only things that have resisted the general movement. The rivers and the rocks, the seas and the continents have been changed in all their parts; but the laws which direct these changes, and the rules to which they are subject, have remained invariably the same.

Selanjutnya pada 1802 konsep tersebut diilustrasikan dan dijabarkan secara lebih gamblang oleh Playfair, dan pada 1811 disederhanakan oleh Lyell yang kita kenal dengan “the present is the key to the past”.

Dalam kurun waktu yang panjang, Hutton memberlakukan konsep “no vestige of a beginning and no prospect of an end”. Konsep tersebut dapat diartikan bahwa dalam prinsip geologi tidak ada tanda-tanda (sisa-sisa) berawalnya suatu proses dan tidak ada pula kemungkinan akan ada akhirnya. Diperlukan penjelasan yang sangat panjang untuk dapat memahami konsep tersebut, karena bumi tidak ada dengan sendirinya. Kenyataan di alam membuktikan bahwa bumi diciptakan setidaknya sebelum 4,6 k jtl. Dari waktu ke waktu selalu terjadi perubahan bentukan lempeng bumi, yang sebelumnya hanya terdiri dari dua lempeng hingga Trias yaitu Gondwana dan Eurasia. Jadi, pemahaman tersebut tidak dapat diberlakukan dalam kurun waktu selama Bumi diciptakan, namun lebih pendek lagi dan pada kondisi yang konstan. Dari waktu ke waktu sumber daya alam bukanlah habis begitu saja. Di alam, batuan mengalami rejuvenasi oleh proses tektonik lempeng, hasil pelelehan dari bagian lempeng yang menunjam muncul kembali ke permukaan hingga kemudian berfungsi sebagai sumber daya alam, setelah mengalami perjalanan yang panjang.

Uniformitarianisme bukanlah paham yang unik dalam geologi. Kejadian masa kini yang dapat menunjukkan adanya kejadian-kejadian pada masa lampau, seharusnya mencakup proses penghancuran (katastropis) yang berkonotasi dengan bencana, serta suatu kejadian-kejadian alam (geologis) yang berlangsung secara gradual (tidak dapat dirasakan secara langsung). Jika kini permukaan bumi

tersusun atas batuan-batuan vulkanik, maka pada masa lampau tentu berkembang proses-proses vulkanisme, begitu pula dengan proses tektonisme, geomorfologi dan dampak bencana yang ditimbulkannya. Mengapa penyebaran reservoir dengan kandungan minyak bumi, gas alam, panas bumi dan mineral logam melimpah hanya pada lokasi-lokasi tertentu? Karena proses geologi yang mempengaruhi pembentukannya tersebut tidaklah homogen. Mengapa kini dijumpai geomorfologi pegunungan, perbukitan dan dataran dengan pola tertentu? Karena proses geologi yang bekerja di dalamnya sangatlah kompleks dan berlangsung dalam periode waktu yang berbeda pula.

Dengan mengenal proses geologi masa lampau di suatu wilayah, maka dapat diinterpretasi sebaran sumber daya alam yang terkandung didalamnya. Eksplorasi minyak bumi, logam mulia atau batubara terbatas pada sedimen atau batuan dalam kerak bumi yang berumur tidak lebih dari 600 jtl. Pengenalan proses-proses geologi dalam kepentingan eksplorasi minyak bumi, haruslah memperhatikan analogi-analogi bentuk masa kini, seperti proses-proses geologi delta, turbidit, fluvial dan tektonisme gradual. Penjelasan runtunan stratigrafi dalam kepentingan eksplorasi minyak bumi juga belum pernah mengacu pada kejadian-kejadian geologi global yang bersifat katastrofis, seperti jatuhnya meteorit, atau dalam periode (waktu) yang pasti seperti dengan adanya kepunahan suatu masa akibat proses geologi tersebut.

8.2 “Sustainable Development” dalam Geologi Lingkungan

Pengembangan daya dukung lingkungan yang berkesinambungan dapat diartikan bermacam-macam; yaitu daya dukung terhadap komunitas, hasil-hasil budidaya, pertanian dan usaha-usaha yang lain. Kesemua itu memiliki definisi yang berbeda; di dalam lingkungan pertanian dapat saja sesuatu hal memiliki arti daya dukung, namun tidak bagi kalangan perindustrian atau pertambangan; dan dapat pula berarti sama dalam lingkungan kehutanan. Suatu batuan mungkin dapat bernilai daya dukung bagi Kalimantan, Sulawesi atau Papua; namun tidak bagi Jawa, Sumatra dan Nusa Tenggara. Suatu wilayah mungkin dapat berfungsi sebagai daya dukung di Indonesia, Nepal atau India, namun tidak bagi Singapura, Malaysia, Brunei atau bahkan Thailand. Dan masih banyak contoh yang lain lagi.

Pengembangan daya dukung lingkungan yang berkesinambungan (*Sustainable Development*) dapat diartikan sebagai suatu perubahan komunitas, yaitu bagaimana agar kehidupan kita menjadi lebih baik, bukan sekedar sebagai perubahan lingkungan semata. Konsep tersebut mengacu pada pengertian konsep *Sustainable Development* yang dikemukakan dalam “Agenda 21”, yaitu:

- 1) *Sustainability* bukan sekedar perkembangan lingkungan yang sebenarnya, namun merupakan perkembangan suatu komunitas. Dalam hal ini, manusia adalah bagian dari ekosistem, dan kita (semua) harus belajar dalam mengintegrasikan antara ekonomi dan sosial / budaya dalam perencanaan dan pengembangan dalam meningkatkan daya dukung lingkungan, dari pada mengurangi atau bahkan menghancurkannya.

- 2) *Sustainable development* bukan pula pertumbuhan / penambahan daya dukung.
- 3) Hidup yang didukung dengan sumber daya (kapasitas dari dalam bumi) adalah komponen dasar dalam menunjang pengembangan daya dukung lingkungan (*sustainability*)
- 4) Suatu komunitas pendukung seharusnya mampu merancang dan mengelola tiga unsur utama dari kapital komunitas, yaitu: alam, sosial dan keuangan / pembangunan.
- 5) Dalam konteks pertumbuhan daya dukung komunitas (manusia), geografi wilayah adalah bagian dari komunitas tersebut; dapat berupa kota kecil (desa atau kecamatan), daerah urban (kota propinsi), bahkan daerah yang lebih besar atau dapat pula dalam cakupan negara.
- 6) Indikator-indikator tradisional membawa kita untuk fokus dalam penelaahan aspek tunggal dalam komunitas, yang secara berkesinambungan dapat diukur dengan besarnya rupiah yang dikeluarkan atau yang dapat dihasilkan dari menjalankan suatu aktivitas perorangan. Contoh: dalam menjalankan kegiatan-kegiatan yang berhubungan dengan budaya, pendidikan, lingkungan, pemerintah, kesehatan, perumahan, populasi penduduk, keamanan umum, peningkatan kualitas hidup, sosial, sumber daya yang digunakan, rekreasi dan transportasi.
- 7) Indikator-indikator pengukuran dalam suatu komunitas yang berdaya dukung seharusnya memperlihatkan adanya hubungan yang erat antara perbedaan aspek-aspek yang ada dalam suatu komunitas tersebut, serta hasil-hasil tolok ukur keberhasilannya, bukan apa pengeluarannya.
- 8) Hal itu tidak dapat dilihat dalam waktu yang cepat (secara *instant*), namun dalam jangka panjang, minimum 25-50 tahunan, di mana setiap anggota dalam suatu komunitas telah ambil bagian turut berperan serta dalam pengembangan ekonomi, lingkungan dan sosial, tergantung dari kapasitas lingkungan yang dimiliki, yang selanjutnya dapat diukur hasil-hasil pencapaiannya. Kapasitas lingkungan yang dimiliki tersebut adalah sumber daya alam dan sumber daya manusia yang tersedia, yang dalam perkembangannya akan terjadi ketidak-setimbangan antara sumber daya alam sebagai produsen dan sumber daya manusia sebagai konsumen. Pada fasa ini akan terjadi limitasi daya muat (*carrying capacity*).

Lalu apa yang disebut dengan limitasi daya muat (*carrying capacity*) dalam sustainabilitas? Daya muat (*carrying capacity*) dalam sustainabilitas adalah besarnya populasi yang dapat hidup secara menerus dengan menggunakan sumber daya alam yang tersedia, di mana populasi tersebut berada. Sebagai contoh adalah dalam suatu pulau ditinggali oleh sekelompok kelinci. Kelinci-kelinci tersebut tentunya memerlukan pasokan makanan dan air. Di samping itu, kelinci-kelinci tersebut juga bermetabolisme, dengan membuang material lain yang harus diuraikan oleh bumi. Dalam waktu yang lama, jumlah komunitas kelinci tersebut tentunya tidak tetap, tapi akan beranak-pinak menjadi koloni yang lebih

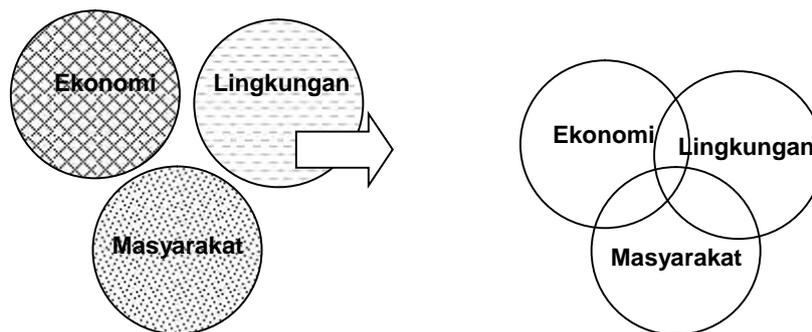
besar. Populasi kelinci terus bertambah, sedangkan sumber daya pendukung yang tersedia makin menipis. Akibatnya, ada kelinci yang dapat jatah makanan dan ada pula yang tidak kebagian, sehingga pada periode tertentu populasi kelinci menjadi menurun. Pada batas kritis tersebutlah yang disebut sebagai kapasitas daya muat (*carrying capacity*). Kapasitas daya muat (*carrying capacity*) dalam suatu pengembangan lingkungan bukanlah suatu angka yang pasti; tergantung dari faktor-faktor seperti seberapa besar masing-masing kelinci makan, seberapa cepat suplai makanan dapat tumbuh, dan sebaik apa kondisi alam mampu menampung sampah yang dihasilkan oleh koloni.

Begitu pula dengan manusia. Bumi adalah pulau kita tempat hidup dan berpijak. Kita tentunya tidak akan bernasib sama dengan koloni kelinci tersebut, karena manusia diberi akal dan perasaan. Manusia mampu mengembangkan teknologi yang dapat memperlambat menipisnya sumber daya alam. Manusia juga mampu mengembangkan teknologi yang mampu menyediakan sumber daya makanan, seperti pertanian, perkebunan, kehutanan dan pengolahan makanan. Dengan teknologi tersebut, manusia juga mampu mengembangkan sumber daya alam non hayati, agar dari sejumlah kecil sumber daya alam yang tersedia tersebut dapat ditingkatkan daya gunanya. Jadi, kapasitas daya muat (*carrying capacity*) secara klasik adalah suatu fungsi dari: berapa jumlah orang (manusia) yang tinggal dalam suatu wilayah; jumlah / limpahan sumber daya alam yang mendukung lingkungan tersebut; seberapa tinggi/besar tingkat konsumsi masing-masing orang per tahun; dan seberapa besar kemampuan bumi dalam menampung dan memproses sisa-sisa aktivitas (sampah) yang dihasilkan oleh aktivitas manusia yang tinggal dalam wilayah itu. Pada perkembangannya, tingginya perkembangan teknologi telah menyebabkan manusia untuk terus bereksplorasi. Jika pada awalnya, hanya manusia yang tinggal di wilayah itulah yang dapat memanfaatkan sumber daya alam yang tersedia, namun kini masyarakat tetangga juga turut menentukan keberlanjutan daya dukung lingkungan dari suatu wilayah. Data statistik menjumpai, justru masyarakat tetangga, yang dalam hal ini adalah para investor baik domestik maupun asing, yang telah memanfaatkan sumber daya alam yang tersedia di wilayah tersebut. Pemahaman terhadap pengembangan daya dukung lingkungan yang berkesinambungan dalam arti pengembangan geologi lingkungan adalah suatu upaya dalam menjaga kesetimbangan antara populasi baik setempat maupun tetangga, sumber daya alam yang tersedia, tingkat konsumsi manusia dan tingkat penerimaan yang merata dari sampah (residu) yang dihasilkannya oleh bumi, sehingga dapat diolah dan diuraikan.

8.3 Parameter Keberhasilan Pengembangan Daya Dukung Lingkungan

Dalam mengembangkan komponen daya dukung lingkungan, melibatkan berbagai sektor, yaitu komunitas (masyarakat umum) sebagai subyek maupun obyek, pemerintah dan stockholder (investor) sebagai subyek, sumber daya (alam maupun manusia) sebagai obyek dan sosial/budaya, dalam hal ini termasuk adanya faktor kearifan lokal. Secara umum, di dalam suatu komunitas mencakup apapun yang menjadi komponen di dalamnya, manusia dan bukan manusia (binatang dan

tumbuhan), sumber daya alam (batuan, mineral dan energi), serta dalam beberapa kasus mencakup pula lingkup politik seperti desa, kota, propinsi dan adat-istiadat. Kesemua komponen tersebut satu sama lain saling berhubungan dan saling mendukung, dengan peran sesuai dengan kapasitasnya masing-masing. Secara umum, ada tiga komponen utama daya dukung lingkungan, yang pada awalnya masing-masing disusun saling terpisah, yaitu lingkungan, ekonomi dan masyarakat (Gambar XI.1). Namun, pada perkembangannya, justru ketiganya tidak dapat terpisah satu sama lain, yang dalam hal ini harus saling mendukung dengan menghilangkan warnanya masing-masing, bahwa ketiganya adalah satu-kesatuan yang tak-terpisahkan.



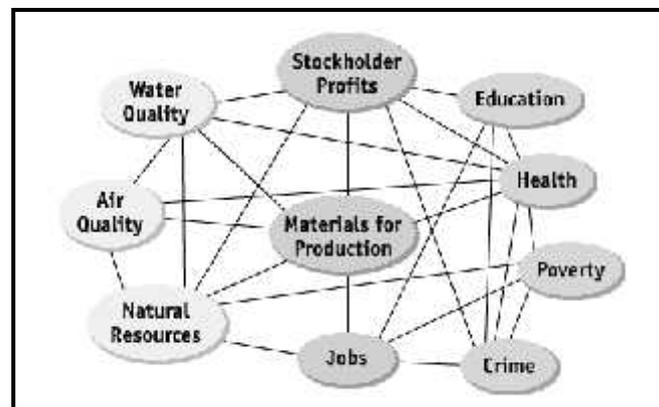
<i>Lingkungan:</i>	<i>Ekonomi:</i>	<i>Masyarakat:</i>
<i>Kualitas air, Kualitas udara, Sumber daya alam</i>	<i>Keuntungan, Material untuk produksi, Lapangan pekerjaan</i>	<i>Pendidikan, Kesehatan, Kemakmuran, Kriminalitas</i>

Gambar 8.1 Tiga komponen terpisah daya dukung lingkungan (Anonim, 2004)

Ketiga komponen tersebut keberhasilannya dapat diketahui melalui kondisi masyarakatnya yang kondusif, tingkat pendapatan per kapita yang cukup, minimnya pengangguran, penanganan sampah yang memadai, dan tingkat pembangunan yang seimbang dengan kealamian lingkungan hidupnya. Potensi geologi yang dimiliki dapat dikalkulasi secara statistik, dan keberadaannya dapat diprediksi dapat mendukung masyarakat yang tinggal di dalamnya, dalam pemenuhan rencana jangka panjang (sekala 25 tahunan). Untuk mengetahui keberhasilan dalam usaha-usaha pengembangan lingkungan tersebut, digunakan tolok ukur yaitu (Gambar 8.2):

1. Kondisi sumber daya alam yang tersedia, yaitu bentang alam (lahan), batuan, tanah, mineral dan sumber daya hayati: kosong, ada sedikit, masih banyak atau telah rusak sama sekali,
2. Material hasil olahan, yaitu hasil-hasil industri dari pemanfaatan sumber daya alam: besar, kecil atau tidak ada lagi,
3. Kualitas air permukaan maupun bawah permukaan: jernih dan besar, besar dan sedikit tercemar atau sedikit dan telah tercemar,
4. Kualitas udara: bersih dan segar atau penuh dengan polusi,
5. Keuntungan yang diperoleh pengguna (*stockholders*): besar atau kecil atau malah merugi,

6. Pendidikan: mayoritas masyarakat berpendidikan tinggi atau sama sekali masyarakatnya buta huruf,
7. Kesehatan: seberapa besar masyarakat yang tiap tahunnya masuk ke rumah sakit, puskesmas, dokter dan praktisi kesehatan lainnya, forum pelayanan kesehatan dan sarana kesehatan lainnya, serta distribusi penyakit yang dikeluhkan
8. Poverti: tingkat kemiskinan masyarakat tinggi atau rendah, kebanyakan masyarakat miskin atau sebagian kecil masyarakat miskin, serta yang miskin makin miskin dan yang kaya makin kaya atau sebaliknya,
9. Tingkat kejahatan (kriminalitas): tinggi atau rendah
10. Distribusi lapangan pekerjaan: seberapa besar tingkat pengangguran di kalangan masyarakat umum, berapa penghasilannya dan di mana lapangan pekerjaan pada umumnya.



Gambar 8.2 Tolok ukur dan hubungan masing-masing tolok ukur dalam mengukur keberhasilan pengembangan daya dukung lingkungan (Anonim, 2004)

Tolok ukur berhasilnya keberlanjutan fungsi sumber daya alam, dapat diukur dari dua variabel utama daya dukung lingkungan; yaitu sustainabilitas lemah dan sustainabilitas kuat. Keberlanjutan kedua sustainabilitas tersebut adalah tanggung-jawab bersama dari seluruh komponen stakeholder (masyarakat, masyarakat tetangga, investor dan pemerintah).

Sustainabilitas lemah adalah suatu sumber daya alam yang dapat digunakan selama sumber daya tersebut dapat digantikan dengan hasil budidaya / teknologi atau industri manusia dengan nilai yang sama. Sebagai contoh adalah hutan; secara umum manusia dapat meremajakan hutan yang telah rusak sehingga fungsinya dapat dikembalikan. Pada sumber daya air; manusia dapat menjaga keberadaan dan kualitasnya agar ekosistem air tetap baik; yaitu memperbaiki daerah imbuhan dan mengatur pemanfaatannya. Salah satu metodenya adalah dengan menjaga air hujan agar tidak hanya menjadi air larian. Sebagian air diresapkan ke dalam tanah, sehingga sumber air minum dapat dipertahankan. Untuk sumber daya udara, manusia dapat menjaga dan menggantikan udara yang terpolusi dengan usaha-usaha penghijauan dengan mengurangi emisi gas pabrik dan kendaraan bermotor. Yaitu dengan jalan mengusahakan pembakaran yang

sempurna pada kendaraan bermotor dan pabrik. Sumber daya alam non hayati yang memiliki sifat tak-terbarukan namun memiliki fungsi yang dapat digantikan oleh hasil budidaya manusia, seperti minyakbumi, batubara, bijih besi, batuan, mineral dan lain-lain; dapat dikategorikan sebagai sustainabilitas lemah. Minimnya sumber daya alam non hayati tersebut di alam, dengan kemajuan teknologi dapat dipertahankan fungsinya, serta jika mungkin dapat digantikan dengan teknologi yang baru lagi. Jadi, segala sesuatu yang ada di alam yang fungsinya dapat digantikan oleh hasil budidaya manusia disebut dengan sustainabilitas lemah.

Komponen sustainabilitas kuat adalah fungsi-fungsi lingkungan yang memiliki pengaruh kuat bagi alam, namun secara langsung tidak memberikan akuntabilitas bagi pengembangan industri, serta tidak dapat diduplikasi oleh hasil budidaya manusia. Sebagai contoh adalah lapisan ozon, yang jika mengalami kerusakan maka fungsinya tidak dapat digantikan oleh hasil budidaya manusia.

Jika kedua jenis sustainabilitas tersebut dapat dikontrol dengan baik, maka keberkesinambungan daya dukung tersebut dapat diukur dengan baik. Terutama dalam upaya menjaga kemenerusan sustainabilitas lemah, karena manusia dengan teknologi yang dimilikinya dapat menggantikannya. Otomatis, dengan kesadaran dan peran serta masyarakat sebagai pelaku utama dalam pengembangan daya dukung lingkungan, sustainabilitas kuat dapat ikut terjaga.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, 2000, The Leading Edge, *Soc. of Explor. Geophysicists*, v. 9, no. 9, p. 39.
- Andreastuti, SD., (2000), *Stratigraphy and geochemistry of Merapi Volcano, Central Java, Indonesia: implication for the assessment of volcanic hazard*, Disertasi PhD at University of Auckland, New Zealand, 455
- Anonim, 2000, *Kamus Besar Bahasa Indonesia*, ed. 3, Balai Pustaka, Jakarta
- Anonim, 2005. The Archipelago of Indonesia. *BKKBN NKRI*, tidak dipublikasikan.
- Allen, J.R.L. (1982), *Sedimentary Structures: Their character and physical basis, Sedimentology*, I, 594-644
- Anonim, 1970, Peraturan Pemerintah No. 33 Tahun 1970 tentang Perencanaan Hutan, Jakarta, Tidak Dipublikasikan.
- Anonim, 1982, Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 1982 tentang Tata Pengaturan Air, Jakarta, Tidak Dipublikasikan.
- Anonim, 1972, Peraturan Pemerintah No. tentang perencanaan dan pengembangan fisik jangka panjang, Jakarta, Tidak Dipublikasikan.
- Anonim, 1973. *Glossary of Geology*. Gary, M., McCafee Jr., R., dan Wolf, C. R. editors. American Geological Institute Washington DC, 805 hal. isi dan 52 hal. lampiran
- Anonim, 2004, *Agenda 21*, UN Departement of Economic and Social Affairs, Division of Sustainable Development, www.un.org.esa.susdev/agenda21
- Anonim, 1987, Pedoman penanganan pasca bencana, Set. BAKORNAS PBP.
- Anonim, 2005, Badan Koordinasi Nasional Penanggulangan Bencana dan Penanganan Pengungsi, Set. BAKORNAS PBP, Kantor Menko Kesra, Jl. Medan Merdeka Barat no. 3F, Jakarta Pusat, 10
- Anonim, 2002, World commission on Environment and Development, *Our Common Future*, Oxford
- Anonim, 1984: *The Hydrologic Cycle*, USGS report.
- Anonim, 1997, *Volcanoes and associated topics in relation to nuclear power plant siting*, Provisional Safety Standards Series no. 1, Internat. Atomic Energy Agency, Vienna, 49.
- Anonim, 1997, *Pedoman Penyusunan Prosedur Tetap Satuan Koordinasi Pelaksanaan Penanggulangan Bencana (Protap Satkorlak PB)*, Sekretariat Bakornas PB, Kantor Menko Kesra, Jl. Medan Merdeka Barat no. 3F, Jakarta Pusat, 10.
- Anonim, 2007, *Pengenalan karakteristik bencana dan upaya mitigasinya di Indonesia*, edisi II, Pelaksana Harian BAKORNAS PB, Jakarta Pusat, 98.
- Brantley, S.R. (ed.), 1990, The eruption of Redoubt Volcano, Alaska, December 14, 1989 - August 31, 1990: *U.S. Geological Survey Circular 1061*, p. 33.
- Bronto, S., 1999, *Indonesia rentan akan bencana alam geologi*, laporan pengabdian masyarakat pada Sarasehan Bidang Geologi dan Sumberdaya Mineral bagi wartawan dengan tema Manusia dan Lingkungan, DPE, 9.
- Bronto, S., 2000, Volcanic hazard assessment of Krakatau volcano, Sunda Strait Indonesia, *Buletin Geol. Tata Lingk.*, v.12, n.1, 20-29.
- Bronto, S., 2001, Penilaian Potensi Bahaya G. Galunggung Kabupaten Tasikmalaya, Jawa Barat, *Alami: Jurnal, Air, Lahan, Lingkungan dan Mitigasi Bencana*, v.6 n. 2, BPPT, Jakarta, 1-13.
- Bronto, S., dan Hadisantono, R., 2001, *Buku Pegangan Kursus Manajemen Penanggulangan Bencana Geologi Gunungapi*, Bahan Kursus dalam rangka PIT ke 30 IAGI, Yogyakarta, 10 Sept., 44.
- Carter, N.W., 1992, *Disaster Management : A Disaster manager's Hand Book*, Asian Development Bank, Manila, 417.

- Cas, R.A.F. and J.V. Wright, 1987, *Volcanic successions, Modern and Ancient*, Allen & Unwin, London, 528.
- Decker, Robert, and Decker, Barbara, 1989, *Volcanoes*: W.H. Freeman and Company, New York, 285 p. (Revised edition).
- Decker Robert and Hadikusumo Djajadi, 1961, Results of the 1960 Expedition to Krakatau, *Bulletin of Volcanology*, V.20, no.3.
- Dorava, J.M., and Meyer, D.F., 1994, Hydrologic hazards in the lower Drift River basin associated with the 1989-1990 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 62, p. 387-407.
- Editors, 1982, *Volcano*:- in the series Planet Earth, Alexandria, Virginia, Time-Life Books, 176 p.
- Ferari, L., 1995, *Data base for assessment of volcano capability*, IAEA, contract BC: 100.1010.5410.241.I.201.94CL9070.
- Fisher, R.V., 1961, Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72, 1409-1414.
- Fisher, R.V. and H.U. Schmincke, 1984, *Pyroclastic Rocks*, Springer-Verlag, Berlin, 472.
- Fisher, R. V. & G.A. Smith, (Eds.), 1991, *Sedimentation in Volcanic Settings*, SEPM (Society for Sedimentary Geology), Spec. Pub. No. 45, Tulsa, Oklahoma, USA, 257.
- Fichtel, R., 2000, *Plate Boundaries and Interplate Relationships*, www.csmres.jmu.edu/geollab/fichtel.
- Francis, P.W., 1995, *Volcanoes. A Planetary Perspective*, Oxford Univ. Press Inc., New York, 443.
- Goodman, R.E., 1993, *Engineering Geology: Rock in Engineering Construction*, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 412.
- Hamilton, W. (1979), *Tectonic of the Indonesian Regions*, US Geological Survey. Prof. paper , 345.
- Howari, F., 2003, Environmental geology: definition, scope and tools, *J. of Environmental Geology*, Preprint
- Karnawati, D. 2006, *Kajian Aspek Geologi sebagai Faktor Resiko Bencana Gerakan Tanah. Makalah pada Lokakarya Penataan Ruang sebagai Wahana untuk meminimalkan Potensi Kejadian Longsor, Jakarta*
- Keller, Edward A., 2000, *Environmental Geology*, 8th ed. Pearson Prentice Hall Publ.
- Kious, W.J, dan Tilling, RI, 2001, *The Dynamic Earth*, U.S. Government Printing Office Superintendent of Documents, Mail Stop SSOP Washington, DC 20402-9328, 77
- Lawrence, M. G. dan Crutzen, P.J. (1999), Influence of NO_x emissions from ships on tropospheric photochemistry and climate, *Nature* 402, 167-170
- Newhall, C. G., Bronto, S., Alloway, B., Banks, N. G., Bahar, I., del Marmol, M. A., Hadisantono, R. D., Holcomb, R. T., McGeehin, J., Miksic, J. N., Rubin, M., Sayudi, S.D., Sukhyar, R., Andreastuti, S. D., Tilling, R. I., Torley, R., Trimble, D. dan Wirakusumah, A. D. (2000), 10,000 years of explosive eruptions of Merapi Volcano, Central Java: archeological and modern implications. *J. Volc. And Geothermal Res.*, 100, 9-50.
- Macdonald, G. A., 1972, *Volcanoes*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 510.
- McPhie. J., Doyle, M. dan Allen, R. (1993), *Volcanic textures*, Centre for ore deposit and exploration studies, Key Centre, Univ. Tasmania, 198
- Mulyaningsih, S., 2006, *Geologi lingkungan di daerah lereng selatan Gunungapi Merapi, Yogyakarta, pada waktu sejarah (historical time)*, Disertasi S3 di Program Pasca Sarjana Teknik Geologi Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, ITB, Bandung, Tidak Dipublikasikan, 372.
- Mulyaningsih, S. (1999), *Rekonstruksi bencana alam purba di Daerah Kalasan dan sekitarnya, Daerah Istimewa Jogjakarta*, thesis S-2 di Jurusan Teknik Geologi, FIKTM, Institut Teknologi Bandung, 157.

- Newhall, C.G. dan Self, S., 1982, The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism, *J. Geophysical Research*, 87, 1231-1238.
- Nelson, 2003, *Metamorphism and Metamorphic Rocks*, Earth Science Australia, Tulane University, Australia
- Paine, D.P., 1981, *Aerial Photography and Image Interpretation for Resource Management*, John Wiley & Sons, Inc., Oregon, USA, 833.
- Parnell A R and Burke K J.(1990) Impacts of acid emissions from Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on selected terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42, pg. 69-88
- Peccerillo, A. & S.R. Taylor, 1976, Geochemistry of Eocene calc alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey, *Contr. Min. Petr.*, 58, 63-81.
- Peterson, D.W. & R.I. Tilling, 1983, Interactions between scientists, civil authorities and the public at hazardous volcanoes, in : Kilburn, C.R.J. & Luongo, G., (Eds.), *Active Lavas*, UCL Press, London, pp. 339-365.
- Pettijohn, F.J., 1975, *Sedimentary Rocks*, 3rd ed., Harper & Row Pub., New York, 628. Palmer, 1997
- Rahardjo., W., Sukandarrumidi dan Rosidi, H.M.D. (1977), *Peta Geologi lembar Jogjakarta, Jawa skala 1: 100.000*, Edisi II, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung
- Rutherford, N.F. (2003), The X-Y-Z of geochemical dispersion from mineralisation in the Cobar Terrain, *Exploration Field Workshop Cobar Region 2003, Proceedings. CRC LEME Report*, Eds. McQueen, K. G. and Scott, K. M. Cobar, 107.
- Simkin, T. dan Siebert, L. (1994), *Volcanous on the world*, 2nd edition Geoscience Press, Tuscon, AZ., 349
- Simkin, T. and R.S. Fiske, 1983, *Krakatau 1883, The Volcanic Eruption and its Effects*, Smithsonian Institution Press, Washington, 464.
- Simkin, T., 1993, Terrestrial Volcanism in Space and Time, *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 21, 427-52
- Sparks, R.S.J. & J.V. Wright, 1979, Welded air-fall tuffs, *Geol. Soc. Amer.*, Spec. Pap. 180, 155-166.
- Sparks, R.S.J., Wilson, L. dan Hulme, G. (1978), Theoretical modeling of the generation, movement, and emplacement of pyroclastic flows by column collapse. *J. Geophys. Res.*, 83, 1727-1739
- Sparks, R.S.J., Bursik, M.I., Carey, S.N., Gilbert, J.S., Glaze, L.S., Sigurdsson, H. dan Woods, A.W. (1997), *Volcanic Plumes*, J.Wiley and Sons, New York, 557
- Stehn, Ch.E., 1929. The Geology and Volcanism of the Krakatau Group. *Proceedings of the Fourth Pacific Science Congress* (Batavia), h. 1-35.
- Tatsumi, Y., M. Sakuyama, H. Fukuyama & I. Kushiro, 1983, Generation of arc basalt magmas and thermal structure of the mantle wedge in subduction zones, *J. Geophys. Res.*, 88, h. 5815-5825.
- Tilling, R.I., 1989, *Volcanic Hazards and Their Mitigation*, a shorth course conducted during the IAVCEI General Asembly, Santa Fe, New Mexico, 90
- Utomo, K., S., Intrusi Air Laut Di Kabupaten Pematang, *Jurnal TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN*, Nomor 2 Volume 13 – Juli 2011, hal:141 – 150
- Uyeda, S., 1978. *The New View of the Earth*, W.H. Freeman and Co.
- Undang-Undang Nomor 11 Tahun 1974 Wilayah Sungai adalah kesatuan wilayah tata pengairan
- Wadati, K., 1935, On the activity of deep-focus earthquakes in the Japan islands and neighborhoods: *Geophysical Magazine*, v. 8, p. 305-325.
- Wirakusumah, A.D., Bronto, S. & Surmayadi, M., 2000, *Volcanic hazard assessment of Muria Peninsula*, Central Java
- <http://www.usgs.gov/science/>
- http://daac.gsfc.nasa.gov/DAAC_DOCS/geomorphology/GEO_4/GEO_PLATE_F-9.HTML

Open File 93-641 (<http://www.water.usgs.gov/public/pubs/FS/OFR93-641/>)
<http://www.uccs.edu/~geogenvs/flood/>
<http://www.millenicom.com/~davec/Jeep/Moab/1993>
<http://www.volcano.und.nodak.edu>
<http://pubs.usgs.gov/gip/hazards>
<http://wapi.isu.edu/envgeo/index.htm>

LAMPIRAN:

DAFTAR ISTILAH

Abrasi	: pengikisan batuan oleh air, es atau angin yang mengandung dan mengangkut hancuran bahan
Absorpsi	: daya ikat ion-ion dalam menetralkan muatannya
Abu gunung api	: lontaran piroklastik halus dengan partikel yang berdiameter lebih kecil dari 2 mm
<i>Accretionary lapilli</i>	: lapilli yang terbentuk oleh penggumpalan abu gunung api karena menyentuh uap dingin atau gerimis di udara; biasanya terbentuk ketika letusan gunung api berlangsung pada saat gerimis
Air asin (<i>saline water</i>)	: air berasa asin dengan konsentrasi asam yang sangat tinggi, biasanya merupakan air konat dalam lingkungan terisolasi atau air laut dengan konsentrasi garam tinggi
Air juvenil	: air asal, yaitu air yang berasal dari tubuh batuan atau air yang terjebak pada saat diagenesis
Air konat	: air yang berasal dari air sisa organisme ketika mengalami dekomposisi
Air larian	: air hujan yang mengalir di permukaan hingga menjangkau sungai, danau atau laut
Air meteorik	: air atmosfer, yaitu air yang berasal dari hasil presipitasi gas/uap di udara, yang membentuk air hujan kemudian menjadi air larian atau meresap ke dalam tanah menjadi airtanah
Air payau (<i>brine water</i>)	: air yang sedikit berasa asin, campuran antara air tawar dan air asin; biasanya dijumpai di daerah dekat pantai atau rawa-rawa
Air tawar (<i>fresh water</i>)	: air yang tidak berasa, yang berasal dari presipitasi air meteorik; air yang dapat dikonsumsi
Airtanah	: air yang berada di bawah muka airtanah, tersusun atas air tawar dan merupakan air yang paling baik untuk dikonsumsi
Akifer	: batuan porous yang dapat menyimpan dan melalukan airtanah; biasanya tersusun atas batupasir, pasir sungai, breksi dan batugamping
Akifer artesis	: akifer tertekan yang sebagian tubuh akifernya terpotong di permukaan, karena tekanannya sangat tinggi maka menghasilkan pancaran / semburan air membentuk air mancur
Akifer tak-tertekan	: akifer yang terletak di atas bidang pizometri
Akifer tertekan	: akifer yang berada di bawah bidang pizometri bidang pizometri adalah bidang datar semu di atas permukaan tanah yang terletak di bawah garis muka airtanah secara umum; biasanya terletak pada daerah dengan geomorfologi yang berrelief kasar
Aliran debris	: aliran batuan dan bahan rombakan lainnya yang mendadak dan digerakkan oleh gravitasi, sering disertai dengan air dalam jumlah yang banyak, tetapi terkadang sedikit jika terdapat komponen magmatik baru
Aliran lumpur	: aliran massa yang tersusun atas campuran air dan partikel berukuran halus sampai sangat halus; biasanya dengan konsentrasi partikel:air 20:80, berupa suspensi / koloid banjir bandang, lahar atau material tsunami
Aliran massa	: aliran batuan dan bahan rombakan, dengan kecepatan yang kecil maupun tinggi, dengan mekanisme rayapan hingga debris
Aliran piroklastika	: kepingan padat, dengan atau tanpa partikel yang mencair, tersuspensi dalam gas yang panas dan

	: mengembang, didorong oleh gaya gravitasi bergerak/mengalir secara turbulen di atas permukaan tanah
Alur sungai bermeander	: aliran sungai yang berkelok-kelok oleh proses erosi lateral, berada pada daerah dengan kemiringan lereng landai sampai agak landai
Alur sungai lurus	: aliran sungai yang lurus, dengan erosi vertikal, berada pada daerah dengan stadia muda atau daerah jalur sesar atau pada daerah dengan kemiringan lereng yang curam
Alur sungai teranyam	: aliran sungai yang dipengaruhi oleh proses sedimentasi dengan arus laminar
Aluvium	: endapan hasil rombakan batuan yang ada di atasnya, dapat berupa hasil longoran (talus) atau hasil denudasi normal
Amblesan	: proses gerakan massa yang menyebabkan penurunan muka tanah, dapat disebabkan oleh runtuhnya sinkhole atau pengambilan air berlebih pada daerah berlitologi lempung, atau proses pembebanan
Amfibol	: salah satu mineral diskontinus berwarna hitam dengan belahan dua arah membentuk sudut lancip, bersusunan rantai silika tetrahedra, dan tersusun atas $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ untuk yang monoklinik dan $(\text{Mg,Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ untuk yang orthorombik
Amfibolit	: batuan metamorf yang tersusun atas mineral-mineral amfibol
Amplitudo	: panjang gelombang
Andesit:	: batuan vulkanik dengan butiran halus yang gelap, biasanya bersifat porphyritic yang mengandung 53% – 63 % SiO_2
Aquitard atau aquiclude	: batuan akuifer yang relatif impermeabel, yang mampu menyerap air tetapi tidak / kurang mampu melalukannya
Arch (busur) (vulkanik)	: magmatic arch atau volcanic arch ~ busur gunung api
Arus piroklastika berdensitas (<i>pyroclastic density currents</i> atau PDC)	: massa aliran debris piroklastika yang bergerak menuruni lereng dengan dikontrol oleh gaya gravitasi bumi, sehingga tidak dapat dipisahkan antara aliran dan seruakannya
Atmosfer	: lapisan udara yang mengelilingi bumi hingga ketinggian 300 km dan tersusun atas berbagai gas, seperti O_2 , H_2O , CO_2 , NO_3 , SO_3 dan lain-lain
Awan panas	: awan panas (~900°C; pada ujungnya sejauh lk 8 km dari puncak masih 450°C) bergas yang berpijar, berolak, bergerak sangat cepat; tersembur dari kawah gunungapi; bagian bawahnya mengandung abu beserta bahan klastika; di Merapi dikenal sebagai <i>wedus gembel</i> (<i>nue ardente</i> atau <i>glowing cloud</i>)
Bahaya geologi	: kondisi yang berhubungan dengan proses-proses geologi yang berpotensi merusak kehidupan dan menghilangkan harta benda
Banjir	: peristiwa terbenamnya daratan yang biasanya kering, karena volume air yang meningkat, biasanya secara tiba-tiba
Basalt	: batuan vulkanik dengan butiran halus yang gelap, biasanya bersifat vesicular yang mengandung 45% - 53 % SiO_2
Bathimetri	: alat untuk mengukur kedalaman laut
Batholit	: tubuh intrusi batuan beku dalam, di bawah tubuh gunung api; biasanya berada pada 5 km atau lebih dalam
Batuan	: sekumpulan mineral/paduan mineral yang membentuk bagian utama kerak bumi
Batuan beku	: batuan yang terbentuk oleh proses pembekuan magma;

	<p>dapat berlangsung di dalam bumi maupun di permukaan bumi</p>
Batuan induk	: batuan yang menjadi sumber batuan sedimen atau batuan yang menjadi sumber dari proses pencairan hidrokarbon (minyak dan gas bumi)
Batuan metamorf	: batuan yang terbentuk dari proses metamorfisme; dapat dibentuk oleh proses penambahan tekanan, suhu atau kedua-duanya
Batuan pondasi	: batuan yang digunakan untuk membuat pondasi bangunan (material konstruksi)
Batuan sedimen	: batuan yang terbentuk oleh proses sedimentasi
Batubara	: batuan berwarna hitam yang tersusun atas akumulasi arang kayu, yang tersimpan di bawah tanah pada kondisi reduksi; akumulasi sisa-sisa tumbuhan yang mati dalam jumlah yang besar dalam lingkungan unaerob (tanpa oksigen)
Batugamping	: batuan sedimen yang tersusun atas kalsium dan karbon dioksida, dapat berupa bioklastik maupun terumbu karang
Batulempung	: batuan sedimen yang tersusun atas material klastika berukuran lempung (diameter butir kurang dari 1/256 mm)
Batupasir	: batuan sedimen klastika yang tersusun atas material berukuran pasir (1/16-2 mm)
Bencana	: sesuatu yang menyebabkan / menimbulkan kesusahan, kerugian, atau penderitaan
Bidang gelincir	: bidang licin akibat jenuh air yang membatasi batuan dasar dan soil; bidang ini merupakan bidang yang memicu terjadinya longsoran
Bidang <i>Mohorovicic</i>	: bidang semu bagian dari struktur bumi yang membatasi lapisan plastis astenosfer dan lapisan kerak bumi
Biotit	: mineral pipih dengan belahan berlembar berwarna hitam, biasanya terdapat dalam batuan beku, tersusun atas $K_2(Mg,Fe)_2AlSi_3O_{10}(OH,O,F)_2$
Blok gunung api	: kepingan batuan padat yang dilontarkan keluar dengan bentuk tajam dan berdiameter lebih besar dari 64 mm
Bom gunung api	: kepingan magma atau magma yang berbentuk bulat yang dilontarkan ketika masih cukup cair sehingga dapat berubah bentuk atau membentuk bulatan selama di udara. bom lebih besar dari lapilli (64 mm) dan tidak seperti block, tidak mempunyai bentuk tajam kecuali pecah saat tumbukan
Breksi	: batuan klastika yang tersusun atas fragmen berbentuk butir menyudut hingga menyudut tanggung berdiameter lebih dari 2 mm yang tertanam dalam matriks klastika berukuran lebih halus
Breksi vulkanik	: breksi yang tersusun atas fragmen dan matriks asal gunung api; dapat berupa endapan piroklastika
Bukit	: suatu morfologi yang lebih tinggi dari daerah di sekelilingnya, yang lebih rendah dari gunung, yaitu daerah dengan ketinggian kurang dari 600 m
<i>Burial metamorphism</i>	: terjadi pada kedalaman ratusan meter di bawah permukaan bumi dengan suhu ~300°C tanpa differential stress. terbentuk mineral baru namun batumannya tidak menunjukkan kenampakan berubah, contoh zeolites
Busur	: bentukan/garis melengkung atau berlengkung-lengkung
Busur kepulauan	: jalur /lajur kepulauan berbentuk lengkungan; secara tektonik terbentuk oleh proses penunjaman lempeng tektonik samudera dengan lempeng samudera
Busur magmatik	: busur / lajur / gugusan yang menghubungkan deretan

Busur volkanisme	: gunung api, yang terbentuk oleh proses tektonik lempeng : sama dengan busur magmatik
<i>Cataclastic metamorphism</i>	: proses metamorfisme yang terjadi dari deformasi mekanika, seperti pada dua tubuh batuan yang bergeser satu sama lain. panas terbentuk dari gesekan tersebut, batuan metamorf yang dihasilkan sebatas pada zona gesekan tersebut
<i>Cherts</i> (rijang)	: batuan sedimen silika klastika maupun non-klastika, biasanya berwarna kuning hingga coklat kehijauan, sangat keras sehingga dapat digunakan sebagai pemantik api, yang tersusun atas fosil radiolaria yang diendapkan pada lingkungan laut dalam
Chlorite	: mineral ubahan dari plagioklas, lempung atau feldspar berwarna hijau yang terbentuk oleh proses metamorfisme burial
Cincin tuf	: kawah gunung api berdinding rendah dibentuk oleh letusan tunggal atau beberapa letusan yang berdekatan. dasarnya lebih tinggi dari permukaan tanah asli
Citra penginderaan jauh (inderaja)	: salah satu metode pengamatan geomorfologi / morfologi permukaan bumi dengan menggunakan foto atau citra satelit / srt dan sebagainya
<i>Contact metamorphism</i>	: biasanya terjadi karena adanya intrusi batuan beku disebut sebagai <i>metamorphicaureole</i> . pada bagian luar tubuh batuan tak-terubah dan makin mendekati tubuh intrusi maka makin terubah. contoh batumannya adalah <i>hornfels</i> : berukuran halus dan tanpa foliasi
Daerah urban (permukiman)	: daerah permukiman di perkotaan; atau yang berhubungan dengan kota
Danau	: suatu cekungan besar (berdiameter lebih dari 1 km dan dalam (lebih dari 200 m) yang terisi air dan dikelilingi oleh daratan
Dapur magma	: ruang dalam kerak bumi di mana magma disimpan dan bisa naik dan dikeluarkan pada saat letusan
Daratan	: permukaan tanah yang sangat luas
Dasit	: batuan vulkanik dengan butiran halus, biasanya bersifat porphyritic, pertengahan antara andesit dan riolit
Dataran banjir	: dataran di sekitar aliran sungai, yang biasanya kering, jika air sungai meluap maka dataran tersebut terkena luapannya
Debris	: longsoran / gerakan massa secara cepat pada kondisi yang bermacam-macam; aliran lumpur kaya material berukuran kasar berdensitas tinggi; biasanya terjadi pada lereng yang tidak stabil dan ketika hujan lebat yang tidak biasanya
Dekomposisi	: proses pelapukan yang dipengaruhi oleh adanya reaksi kimia yang merubah struktur batuan / mineral
Derajat metamorfisme	: tingkatan metamorfisme
Destruksi	: proses penghancuran
<i>Dewatering</i>	: proses pengeringan suatu lahan; biasanya dipersiapkan untuk konstruksi bangunan
Diatomite	: batuan sedimen laut dalam, karbonat, non klastika yang tersusun atas fosil diatome
Dike	: intrusi dangkal batuan beku yang memotong bidang perlapisan; biasanya mengikuti arah / pola rekahan sesar ekstensi; merupakan bagian dari hasil aktivitas gunung api
Diorit	: batuan beku abu-abu terang, fanerik-fanerik halus, intrusi batholit berafinitas intermediet (sio ₂ 50-63%) pada kedalaman tinggi
Disintegrasi	: proses penghancuran material / batuan baik spontan

	atau akibat suatu imbasan yang dibarengi dengan proses fragmentasi
Divergen	: zona pemekaran lantai samudera, akibat gaya tarik, membentuk gugusan gunung api tengah samudera berkomposisi basaltik
<i>Drainage basin</i>	: pola pengaliran dalam suatu daerah, paralel jika alur-alur sungainya bersusunan sejajar; dendritik jika alur-alur sungainya berkumpul dalam satu das hingga berbentuk seperti cabang-cabang pohon
Dunit	: batuan beku ultra basa yang terdapat pada gugusan gunung api tengah samudera
Eh	: enthalpi, yaitu energi kalor dalam suatu zat yang dihasilkan oleh getaran atau rotasi ion dalam atom atau molekul
Eklogit	: batuan metamorf yang terbentuk oleh cataclismic metamorphism, pada kedalaman lebih dari 50 km oleh proses penunjaman lempeng samudera di bawah lempeng benua
Ekspansi panas (<i>thermal expansion</i>),	: batuan dan mineral mengembang dalam rangka merespon panas
Eksplorasi	: proses pengambilan (sumber daya alam) secara besar-besaran
<i>Eluviation</i>	: pencucian unsur hara / mineral / zat-zat pada lapisan tanah oleh air permukaan, dan mengendapkannya pada lapisan di bawahnya (<i>enrichmen</i>)
Endapan aliran piroklastika,	: kepingan padat, dengan atau tanpa partikel yang mencair, tersuspensi dalam gas yang panas dan mengembang, didorong oleh gaya gravitasi bergerak/mengalir secara turbulen di atas permukaan tanah
Endapan jatuhan piroklastika,	: tephra yang dilontarkan pada sudut tinggi dan diendapkan setelah jatuh melewati atmosfer
Endapan serukan piroklastika	: aliran turbulen suspensi campuran gas dan padatan yang bergolak di atas permukaan tanah yang dilontarkan dengan kecepatan tinggi oleh pelepasan gas yang mendadak yang tidak terlalu mengikuti topografi sebagaimana aliran piroklastik
Endapan kerucut sinder	: gundukan kecil berbentuk kerucut yang dibentuk oleh letusan strombolian dan sebagian besar terdiri dari scoria dan bomb
Energi panas bumi (geotermal)	: energi yang berasal dari dalam bumi, dapat berasal dari tubuh batuan panas, uap panas, magma dan mataair panas
Epiklastika	: endapan gunungapi yang telah mengalami sedimentasi kembali akibat erosi; dapat berupa lahar, endapan fluvium dan / talus gunungapi
Episenter	: posisi pusat gempa bumi
Erosi	: proses pengikisan permukaan bumi oleh tenaga eksogen (asal luar), yaitu air, angin, es dan salju yang mencair
Erupsi eksplosif	: erupsi bertekanan besar dengan melontarkan sebagian besar tubuh gunung api yang disertai dengan lontaran-lontaran ejekta dalam volume yang besar
Erupsi kataklismik	: erupsi yang beresifat menghancurkan → dapat menimbulkan huru-hara
Erupsi kolossal- superkolossal	: erupsi yang sangat hebat, dengan disertai penghancuran sebagian besar tubuh kerucut gunung api, menghasilkan material lontaran dengan volume yang sangat besar, sering membentuk kaldera, seperti danau toba
Erupsi magmatik	: erupsi dengan melontarkan material hasil fragmentasi magmatik

Erupsi mega-kolossal	: erupsi yang intensitasnya lebih besar dari erupsi superkolosal
Erupsi non-explosif	: sama dengan erupsi yang menghasilkan aliran lava
Erupsi paroksismal	: intensitas erupsinya lebih kecil dari erupsi kolosal
Evaporasi	: Proses yang terjadi apabila jumlah molekul yang keluar ke permukaan lebih besar dari yang kembali ke permukaan air
Faktor keamanan	: Faktor hasil perhitungan yang didapat dari perbandingan gaya penahan dengan gaya penggerak dalam gerakan massa; suatu massa batuan akan segera bergerak jika faktor kemamanannya kurang dari satu
Fasies distal	: fasies gunungapi yang meliputi kaki dan dataran gunungapi, litologinya tersusun atas perselingan lahar distal dan endapan fluvium; lahar fasies distal adalah lahar yang telah jauh dari sumber piroklastikanya, biasanya strukturnya laminasi-berlapis dengan diameter butir pasir halus hingga kerakal dan sortasinya sedang-baik
Fasies medial	: fasies gunungapi yang meliputi lereng bawah sampai tengah gunungapi, biasanya litologinya tersusun atas perselingan endapan piroklastika dan lahar; lahar fasies medial masih dekat dengan sumbernya, diameter fragmen boulder (~ 2 m), sortasi jelek dan struktur sedimen gradasi-masif
Fasies proksimal	: fasies gunungapi yang meliputi lereng atas dan puncak gunungapi, didominasi oleh endapan piroklastika dan lava
Fasies pusat	: lubang dimana magma atau gas dikeluarkan yang dan untuk kondisi morfologinya dibentuk oleh akumulasi dari hasil letusannya
Fasies sedimenter	: Lingkungan sedimentasi; dapat berada di darat, laut, sungai, pantai maupun lakustrin
Feldspatoid	: Salah satu mineral kelompok feldspar miskin silika berwarna putih susu, bentuk kristal prisma dipiramid, yang tersusun atas $KAlSiO_8$
<i>Ferricrete</i>	: pelapukan mineral/batuan sulfida yang menghasilkan oksida amorf fe yang terkonsentrasi sebagai semen pada bagian luar matriks dalam soil hasil pelapukan
Fonolit	: Batuan beku ekstrusi bertekstur halus berwarna terang, tersusun atas mineral K-Feldspar, terutama sanidin atau ortoklas
Formasi	: Runtunan perlapisan / stratum / komposisi batuan dalam suatu wilayah tertentu yang memiliki ciri litologi tertentu atau memiliki kandungan fosil tertentu sehingga dinyatakan dengan umur tertentu pula; contoh: Formasi Sambipitu memiliki komposisi litologi breksi epiklastika yang sebagian gampingan dengan fosil tertentu, dan dengan lokasi tipe di daerah Sambipitu
Fosil	: Sisa organisme yang tersimpan dalam batuan dalam waktu jutaan tahun, sehingga membatu
Foto udara	: Foto hasil jepretan di udara yang ditujukan untuk menggambarkan permukaan bumi; dapat berupa foto pankromatik maupun infra merah
Fragmen litik	: Fragmen batuan yang menyusun breksi atau konglomerat
Fraksionasi mineral	: Tingkat / fraksi kristalisasi mineral yang berlangsung dari dalam dapur magma hingga pembekuannya
Freatik	: berhubungan dengan air meteorik atau air hujan (lihat phreatomagmatic)
Freatomagmatik	: aktivitas letusan yang menghasilkan gas dari magma dan

	: uap, bersamaan dengan bahan rombakan/fragmen padat yang terdiri dari gelas vulkanik baru dan kepingan batuan yang lebih tua, disebabkan oleh kontak antara magma dan air
Frekuensi banjir	: Data statistik jumlah kejadian banjir per periode waktu tertentu dalam suatu wilayah
Gabro	: Batuan beku berwarna hitam sampai sangat hitam, berkomposisi mineral mafik (olivin dan piroksen), fanerik dan terbentuk pada kedalaman tinggi
Garnet	: Salah satu mineral silika yang berwarna merah, tersusun atas $A_3B_2(SiO_4)_3$, A: Ca, Mg, Fe^{2+} dan Mn^{2+} , sedangkan B: Al, Fe^{3+} , Mn^{3+} dan Cr
Gawir sesar	: Suatu morfologi gawir (tebing sangat curam) memanjang dan lurus yang terbentuk akibat adanya suatu pergeseran/deformasi oleh sesar
Gas vulkanik	: gas yang dilepaskan dari magma, umumnya mengandung banyak H_2O , CO_2 , dan gas sulphur
Gaya gravitasi bumi	: Gaya yang ditimbulkan oleh medan magnet bumi, dengan percepatan $9,28 \text{ cm/dt}^2$
Gaya penahan (<i>resisting forces</i>)	: Gaya yang digunakan untuk menahan agar tetap stabil saat bergerak menuruni lereng
Gaya penggerak (<i>driving forces</i>)	: Gaya yang dipicu oleh gaya gravitasi bumi pada saat bergerak menuruni lereng
Gelas vulkanik	: bahan mengkilap yang berasal dari magma kental yang mendingin dengan cepat
Gelombang P	: Gelombang yang merambat pada material padat dan cair, dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan gelombang S
Gelombang S	: Gelombang yang hanya dapat merambat melalui material padat, gelombang ini tidak mampu merambat pada lapisan astenosfer di bawah lapisan kerak bumi
Gempabumi	: getaran yang terjadi di permukaan bumi, yang disebabkan oleh pergerakan kerak bumi
Gempa tektonik	: Gempabumi yang disebabkan oleh perlepasan tenaga yang terjadi karena pergeseran lempengan pelat tektonik seperti layaknya gelang karet ditarik dan dilepaskan dengan tiba-tiba
Gempa vulkanik	: adalah gempa bumi yang disebabkan oleh letusan gunung api, pergerakan magma di bawah-permukaan, atau runtuhan atau pergeseran bagian padat bangunan gunung api
Geografi	: Ilmu tentang segala hal yang berhubungan dengan permukaan bumi, meliputi bentuk rupa bumi, iklim, cuaca, flora dan fauna, kependudukan dan segala hal yang dapat diambil dari bumi
Geologi lingkungan	: Cabang ilmu geologi yang mempelajari segala bentuk interaksi antara manusia dengan lingkungannya
Geologi teknik	: Cabang ilmu geologi yang diaplikasikan untuk kepentingan-kepentingan konstruksi teknik, seperti pengembangan wilayah, permukiman, instalasi sarana dan prasarana umum, dan semua kegiatan konstruksi dalam rangka penanggulangan bencana
Geomorfologi	: Cabang ilmu geologi yang mempelajari tentang bentuk permukaan bumi masa kini dan proses-proses yang mempengaruhi pembentukannya
Gerakan massa	: suatu debris / gerakan massa batuan dan tanah yang terjadi karena adanya gaya gravitasional; hal itu dipicu oleh adanya kegagalan lereng
Gneis	: Salah satu batuan metamorf yang terbentuk pada tingkat metamorfisme lebih tinggi, yang dicirikan oleh hadirnya

	lembaran silikat tak-stabil, horenblende dan piroksen; yang membentuk kumpulan butiran-butiran secara berjajar, tegak lurus terhadap arah gaya maksimum, dan membentuk foliasi gneisik
Gondwana	: Lempeng benua yang terbentuk pada Jaman Perm, yang kini terdiri atas lempeng Amerika Selatan, Australia, Antartika dan India
Gradien lereng	: Perubahan lereng dalam suatu wilayah, dinyatakan dengan persen
Gradien sungai	: perubahan elevasi alur sungai atau <i>vertical drop</i> dari suatu lembah sungai, dalam suatu wilayah pada jarak tertentu secara horizontal
Granit	: Salah satu batuan beku berwarna terang, hanya sedikit mengandung bintik hitam, fanerik, dan sangat kaya akan mineral felsik (>2/3 bagian) dan kuarsa
Granulit	: metamorfisme tingkat tertinggi yang ditandai oleh semua mineral hydrous dan lembaran silikat menjadi tidak stabil sehingga muncul penjajaran beberapa mineral; menghasilkan tekstur granulitik yang kenampakannya sama dengan tekstur faneritik pada batuan beku
Greenschist	: Metamorfisme pada batuan beku basalt: olivin, piroksen, dan plagioklas dalam berubah menjadi amfibol dan klorit (hijau)
Gunung api komposit / strato	: gunung api besar dengan lereng curam yang tersusun terutama fragmen ejecta yang diseling oleh lava dan lahar
Gunung api perisai	: adalah suatu gunung api dengan lereng landai yang sebagian besar dibentuk oleh lava cair
Gunung api	: bukaan atau kaldera, tempat magma, material lain dan gas muncul ke permukaan
Gunung api aktif	: gunung api yang meletus, mempunyai riwayat letusan atau bukti lain bahwa gunung api tersebut tidak diam atau tidak sedang istirahat
Gunung	: tinggian di atas 600 m dpl yang dikelilingi oleh daerah yang lebih rendah
Hidrasi	: Proses masuknya air ke dalam rongga pori batuan, kemudian mengikis dan menguraikannya, membentuk soil di bawah permukaan tanah; hal itu menyebabkan material batuan mengembang sehingga uap air yang masuk di dalamnya semakin banyak
Hidrogeologi	: cabang ilmu geologi yang mempelajari keberadaan, sebaran dan pengaruh dari airtah pada geologi suatu wilayah
Hidrotermal	: emisi kaya dengan gas yang mudah menguap, biasanya pada suhu di bawah 1000 oc dan kaya akan air, karbondioksida dan gas sulphur. istilah ini juga digunakan untuk endapan dan batuan berubah atau teralterasi yang berhubungan dengan emisi tersebut
Hidrolisis	: reaksi antara unsur-unsur mineral dan ion hidrogen dalam ion air. kation-kation logam terpisah dari strukturnya dan digantikan oleh h ⁺ ; selama kebanyakan kation bersifat terlarut, maka pelarutan dan hidrolisis saling berhubungan
Hiposenter	: Pusat gempa bumi dangkal
Holokristalin	: Tekstur batuan beku yang secara keseluruhan tersusun atas kristal mineral
Holosen	: periode masa kuartar dari akhir pleistosen sampai sekarang
Horenblenda	: salah satu mineral amfibol yang terdapat dalam batuan

	<p>beku intermediet, tersusun atas $Ca_2Na(Mg,Fe^{2+})_4(Al,Fe^{3+},Ti)(Al,Si_8O_{22}(O,OH)_2$</p>
Hukum pengapungan benua	: Hukum / konsep yang melandasi lahirnya teori tektonik lempeng; permukaan bumi tersusun atas fragmen-fragmen yang mengapung di atas massa cair, seperti perahu; dalam hal ini benua diibaratkan sebagai perahu yang mengapung di atas air laut
<i>Hummocky</i>	: Suatu geomorfologi yang tersusun atas perbukitan dengan susunan yang tidak beraturan
<i>Illuviation</i>	: zona akumulasi material hasil pencucian, dan dicirikan oleh lapisannya padat
Imbuhan	: Zona yang di dalamnya berfungsi sebagai daerah resapan, yaitu masuknya air hujan ke dalam tanah menjadi airtanah
Insitu	: belum mengalami perpindahan posisi dari kondisi posisi dan kondisi awal saat diendapkan pertama kali. contoh fragmen lahar insitu: fragmen lahar yang kondisinya masih sama saat lahar tersebut diendapkan, belum dipindahkan manusia / tertransportasi oleh proses berikutnya; fragmen batu candi insitu: fragmen batu candi yang kondisinya masih sama dengan saat mengalami runtuh, tidak dipindahkan oleh manusia akibat penggalian
Inti bumi	: Bagian terdalam bumi, yang sifatnya padat, tersusun atas logam sangat berat yaitu Ni dan Fe, yang juga merupakan sumber dari gaya gravitasi bumi
Intrusi pluton	: Intrusi batuan beku sangat dalam, yang menghasilkan gabro. Di atasnya adalah diorit dan granit.
Jalur <i>ring of fire</i>	: Jalur yang menghubungkan gugusan busur gunung api dan zona subduksi
Jaman sejarah	: Jaman setelah manusia mengenal peradaban dengan budaya menulis
Jangkauan material letusan	: Jangkauan lontaran (ejecta) material gunung api secara lateral, jika secara vertikal disebut kolom erupsi; jangkauan bahan yang dilontarkan dari lubang gunung api
Jatuhan piroklastika	: tephra yang dilontarkan pada sudut tinggi dan diendapkan setelah jatuh melewati atmosfer
Kaldera	: depresi di daerah vulkanik yang berbentuk cekungan besar, lebih kurang seperti lingkaran, yang mempunyai diameter jauh lebih besar dari lubang kawah atau celah gunung api yang terdapat di dalamnya
Karst	: Salah satu satuan geomorfologi yang di dalamnya terdiri atas dolin-dolin, sinkhole, ovala, polje dan lain-lain; yang biasanya berkembang baik pada batugamping
Kawah	: depresi berbentuk cekungan atau corong, biasanya dibentuk oleh letusan eksplosif di atau dekat puncak gunung api. diameter dasar sama atau sedikit lebih besar dari lubangnya
Kegagalan lereng	: Gerakan massa atau longsoran
Kekar lembar	: Kekar yang terbentuk pada batuan beku dengan susunan berlembar; yang terbentuk oleh proses pembekuan yang sangat cepat di permukaan bumi
Kekar <i>platty</i>	: Kekar lembar yang lebih tipis
Kepundan	: lubang tempat asal produk vulkanik dikeluarkan
Kerak bumi	: Bagian / lapisan terluar bumi, yang bersifat sangat kaku dan mudah patah, yang tersusun atas batuan beku, batuan metamorf, batuan sedimen dan batuan gunung api
Kerucut gunung api	: gunung api besar dengan lereng curam yang tersusun

Kerucut skoria	: terutama fragmen ejecta yang diseling oleh lava dan lahar : gundukan kecil berbentuk kerucut yang dibentuk oleh letusan strombolian dan sebagian besar terdiri dari scoria dan bomb
Kerucut tuf	: kawah gunung api berdinding rendah dibentuk oleh letusan tunggal atau beberapa letusan yang berdekatan. dasarnya lebih tinggi dari permukaan tanah asli
Kipas laut dalam	: Hasil longsoran kipas yang terjadi dalam lingkungan laut dalam, karena adanya deformasi, seperti sesar akibat tektonik
Klastika	: Material hancuran dapat berasal dari batuan beku, batuan sedimen, batuan metamorf maupun batuan gunung api
Koluvium	: Hasil pengendapan material aluvium dengan bentuk butir relatif membulat; jika telah membatu namanya konglomerat
Kompaksi	: Bagian dari proses diagenesis dalam batuan sedimen atau batuan gunung api klastika, yang di dalamnya berlangsung pemampatan sehingga terjadi pengurangan air
Konsolidasi	: Proses berbaurnya material klastika di dalam air atau di bawah permukaan bumi; dapat juga diartikan sebagai suatu upaya sosialisasi manajemen / peraturan pada saat pasca-bencana alam
Konstruksi	: Segala hal yang berhubungan dengan upaya membangun, dapat berupa gedung, sarana transportasi, instalasi prasarana umum, jembatan, saluran irigasi, dam penahan, bendungan dan lain-lain
Kontur	: Titik-titik yang menghubungkan ketinggian yang sama
Konvergen	: Salah satu bagian dari tektonik lempeng, yang ditandai dengan adanya dua lempeng atau lebih yang saling bergerak mendekat, dapat saling bertumbukan dan dapat pula salah satu menunjam di bawahnya
Korosi	: Berreaksinya unsur Fe atau logam lain dalam suatu benda dengan oksigen, sehingga terjadi pengikisan di bagian luar, yang makin lama makin ke dalam
Krisis lingkungan	: Krisis akibat perubahan lingkungan yang bersifat merusak, sehingga mengakibatkan beralihnya fungsi lingkungan menjadi lebih buruk
Kuarsa	: Mineral silika tidak berwarna (transparan), berbentuk dipiramid, yang tersusun atas SiO ₂
Kuarsit	: Batuan metamorf hasil ubahan dari kuarsa
Kuarter	: periode waktu geologi termasuk jangka waktu pleistosen dan holosen, dimulai kira-kira 2 juta tahun yang lalu dan berlanjut sampai sekarang
Kubah lava	: intrusi lava dengan viskositas (kekentalan) cukup tinggi, dangkal atau berbentuk bola dan bersisi curam
Lagoon	: Morfologi cekungan di dasar laut dangkal yang dibatasi oleh tanggian (biasanya terumbu karang) sehingga tidak berhubungan langsung dengan laut lepas
Lahar	: istilah dalam bahasa indonesia untuk mendiskripsi aliran lumpur abu gunungapi tak-terkonsolidasi, debu, breksi dan bongkah yang terbentuk saat endapan piroklastika atau lava bercampur dengan air hujan, air danau kawah dan / air sungai dan / air dari mencairnya es
Lahar kohesif (<i>cohesive</i>)	: lahar kohesi; campuran material dan air dengan konsentrasi tinggi sehingga membentuk campuran yang tak terpisahkan dan menghasilkan endapan masif
Lahar tak-kohesif (<i>non-cohesive</i>)	: lahar tak-kohesi; aliran massa rendah partikel sehingga membentuk campuran dengan pemilahan yang baik

Lakolit	: Intrusi dangkal batuan beku yang memotong bidang perlapisan, karena kekentalannya maka terhenti pada posisi tertentu dan membentuk tudung cembung di ujungnya
Lanau	: Batuan sedimen klastika berukuran 1/16-1/256
Lapilli	: lontaran bahan piroklastik dalam rentang ukuran 2 – 64 mm
Lapisan kapiler	: Disebut juga sebagai membran; yaitu lapisan yang membatasi rongga kapiler tempat mengalirnya fluida di dalam pori batuan
Lapolit	: Intrusi dangkal batuan beku yang memotong bidang perlapisan, karena kekentalannya maka terhenti pada posisi tertentu dan membentuk tudung cekung di ujungnya
Latit	: Disebut juga kristal latit, yaitu kristal lain yang terbentuk dalam suatu mineral tertentu
Laurasia	: Lempeng benua kedua setelah Gondwana yang terbentuk pada jaman Perm, yang kini tersusun atas lempeng benua Eurasia dan Amerika Utara
Lahar	: aliran bahan rombakan dari gunung api yang heterogen bercampur dengan air pada suhu lebih rendah dari titik didih, mungkin dibentuk selama letusan atau proses setelahnya atau karena lereng yang tidak stabil
Laut	: Permukaan bumi yang tertutup oleh air dalam luasan yang besar dan dalam yang menghubungkan pulau-pulau
Lava	: istilah umum yang digunakan untuk batuan cair yang keluar (dari sumber vulkanik) dan batuan padat yang terbentuk akibat dari pendinginannya
Lava bantal	: Struktur aliran lava berkomposisi basaltik yang encer dan menyentuh tubuh air yang sangat dingin, sehingga terjadi pembekuan yang sangat cepat di dalam air
<i>Lava fountain</i>)	: Persentuhan tubuh lava panas (biasanya basaltik) dengan airtanah atau tubuh air sehingga membentuk pancaran / hembusan uap panas yang membubung tinggi, yang bercampur dengan gelas membentuk abu
Lembah	: Morfologi paling rendah di antara morfologi yang tinggi
Lempeng kontinen	: Lempeng penyusun kerak bumi yang berkomposisi asam, sangat tebal dan tersusun atas batuan sedimen, metamorf dan beku sebagai lempeng kratonik
Lempeng samudera	: Lempeng penyusun kerak bumi yang berkomposisi basaltik, lebih tipis dari lempeng benua, dan umurnya lebih muda
Lempeng tektonik	: Proses tektonik yang dibentuk oleh lempeng-lempeng penyusun kerak bumi; di dalamnya berlangsung gerak saling menjauh dari lempeng-lempeng, saling mendekat, dan adanya penunjaman lempeng samudera di bawah lempeng benua. Pada awalnya (Perm) terjadi perpecahan lempeng dari Pangea menjadi Gondwana dan Laurasia. Selanjutnya secara bertahap dalam waktu yang sangat lama (ratusan juta tahun) berkembang dan pecah membentuk lempeng-lempeng yang lebih kecil disertai dengan pembentukan lempeng-lempeng baru yang lebih tipis.
Letusan gunung api	: Aktivitas gunung api menghasilkan material letusan, berupa fragmental dan lava koheren
Lherzolit	: Sejenis peridotit yang kaya olivin, klinopiroksen dan orthopiroksen, olivin lebih melimpah
<i>Liquifaction</i>	: Proses munculnya massa koloid atau suspensi berukuran halus, biasanya secara menyembur, oleh adanya suatu deformasi pada lapisan batuan

	impermeabel yang bertekanan tinggi
Litologi	: Batuan, yaitu sekumpulan mineral atau bahan klastika yang memiliki struktur, tekstur dan komposisi tertentu; penyusun kerak bumi
Logam	: Komponen / unsur / mineral yang tidak tembus pandang, dapat menghantarkan listrik dan panas dengan baik
Longsor	: Debris avalanche
Luahan	: Tempat terakumulasinya aliran airtanah dalam suatu akifer; ditandai dengan muka airtanah dangkal, banyaknya titik kemunculan airtanah di permukaan (mataair)
Maar,	: kawah gunung api berdinding rendah dibentuk oleh letusan tunggal
Magma	: massa cair, pijar dari lelehan batuan, berasal dari dalam bumi dan mampu mencapai permukaan karena tekanannya yang tinggi dan membentuk material intrusi dan ekstrusi. material dimana batuan beku mengalami pembekuan ; <i>naturally occurring molten rock material, generated within the earth and capable of intrusion and extrusion, from which igneous rocks have been derived through solidification and related processes</i>
Magma terasimilasi	: Magma yang telah mengalami proses pembauran dengan batuan di sekitarnya / batuan yang dilewatinya selama perjalanannya
Magma terdiferensiasi	: Magma yang telah mengalami proses ubahan oleh penambahan komposisi kimia / mineral dari dinding dapur magma atau di sepanjang perjalanannya
Magnitudo	: Besaran intensitas (gempabumi)
Manajemen dan mitigasi bahaya	: Sistem penanggulangan bahaya (dalam hal ini geologi / alam) yang dipusatkan pada berbagai pihak, terutama masyarakat sebagai obyek bencana
Manajemen sistem lingkungan	: Sistem pengendalian lingkungan dengan menggunakan konsep pengendalian daya dukung lingkungan ("sustainable development")
Mantel bumi	: Lapisan penyusun struktur bumi yang terletak di bagian tengah, antara inti bumi dan kerak bumi, bersifat cair, bersuhu sangat tinggi, dan terdiri atas mantel atas dan mantel bawah
Marmer	: Batuan metamorf yang berasal dari batugamping, yang dicirikan oleh struktur non-foliasi
Masif	: Struktur batuan yang hingga 40 cm ketebalannya tidak terstruktur, padat (tidak berrongga), kompak dan tidak dijumpai struktur khusus seperti perlapisan atau skoria atau vesikuler
Mikroklin	: Mineral K-feldspar Triklinik berwarna putih hingga pink dengan belahan dua arah pola kembaran menetak / melintang (tartan plaid), dengan bidang optis hampir \perp bidang 010 dan sifat optisnya negatif $2VX = 65-88^\circ$
Mineral	: Benda padat / cair yang terbentuk secara alamiah, anorganik maupun organik dan umumnya menyusun batuan
Mineral felsik	: istilah untuk mendeskripsikan batuan kaya silika yang menyusun sebagian besar mineral berwarna cerah, seperti felspar dan kuarsa
Mineral mafik	: Mineral berwarna gelap yang tersusun atas komponen utama Fe dan Mg, yaitu olivin, piroksen, amfibol dan biotit
Mineral potasik	: Mineral berwarna cerah kaya potasium
Minyak bumi	: Suatu cairan berwarna hitam atau coklat gelap agak

	kehijauan yang tersusun atas hidrokarbon, hasil pencairan sisa organisme dalam massa batuan, mudah terbakar dan mudah menguap
Monzonit	: Batuan beku kaya mineral potasik (>2/3 bagian) dan kuarsa yang berwarna cerah
Mud cracks	: Rekahan-rekahan dalam material lempung karena proses dehidrasi (pengeringan), morfologi rekahan berbentuk heksagonal
Muka airtanah (<i>water table</i>)	: Batas antara lapisan jenuh air (di bawah) dan lapisan tidak jenuh air (di atas)
Muskovit	: mineral pipih berlembar berwarna pink transparan yang terdapat dalam batuan metamorf, seperti sekis dan filit; tersusun atas $K_2(Al_2Si_4O_{10})(OH)_2$
Napal	: batuan sedimen klastika berukuran halus (lanau: 1/256-1/16 mm) yang tersusun atas lanau silika dan karbonat (< 50%)
Observasi	: peninjauan secara cermat, sebelum pekerjaan sebenarnya dilaksanakan
Oil shale	: merupakan batuan sedimen klastik kaya organik yang selanjutnya berubah menjadi minyak bumi selama diagenesanya
Olivin	: mineral berwarna hijau botol hingga kuning keemasan, berbentuk membutir, tanpa belahan dan tersusun atas $(Mg,Fe)_2SiO_4$
Oksidasi	: hilangnya unsur elektron dalam suatu senyawa yang selanjutnya digantikan oleh ion oksigen
Ortoklas	: mineral berwarna putih hingga pink, bentuk kristal monoklinik, $KAlSi_3O_8$
Palung	: daerah yang terletak di antara dua daerah bertekanan tinggi dan memiliki tekanan udara yang lebih rendah dari tekanan udara di sekitarnya
Pankromatik	: Jenis foto udara yang tampilannya hitam-putih
Pantai	: Daerah dengan pasang-surut airlaut
<i>Partial melting</i>	: Lelehan batuan sebagian yang dibentuk oleh proses gesekan antara lempeng yang menunjam (lempeng samudera) dengan lempeng yang ditunjam (lempeng benua atau lempeng samudera) pada proses tektonik lempeng, yang karena panas yang ditimbulkan oleh gesekan tersebut sebagian lempeng yang berhubungan tersebut meleleh, menghasilkan batuan leleh (magma)
Paya	: Daerah di sekitar rawa-rawa
Pelapukan	: Proses penguraian partikel (batuan/mineral) akibat penambahan oksigen, uap air, air atau senyawa gas dan molekul lain hingga mengembang dan terurai menjadi partikel-partikel (butiran) yang lebih halus
Pelapukan penggaraman (<i>salt weathering</i>)	: Proses pelapukan oleh penambahan senyawa garam (NaCl, KCl, MgCl, CaCl, BaCl dll) hingga terurai membentuk soil karbonat
Pelarutan	: Proses penelanjangan material lapuk (biasanya batuan karbonat) oleh air hujan yang bersifat asam, melalukannya hingga ke lapisan pengayaan
Pelepasan tekanan (<i>pressure unloading</i>)	: proses pengembangan bagian terbesar dari permukaan tubuh batuan ketika daya ikat antar partikel dalam tubuh batuan terlepas akibat proses erosi
<i>Pele's hair</i>	: Serpihan-serpihan gelas basaltik yang membentuk belahan-belahan rambut berwarna keemasan akibat aliran lava basaltik yang tertiuap angin
<i>Pele's tears</i>	: Butiran-butiran gelas basaltik oleh cipratan lava basaltik yang menuruni lereng secara cepat

Penambangan bawah permukaan	: <i>Underground mining</i> , yaitu proses penambangan dengan pembuatan terowongan, biasanya pada tambang emas yang pencariannya difokuskan pada urat-uratnya
Pencegahan (<i>prevention</i>)	: Upaya pencegahan bencana dengan cara pengembangan teknologi
Pendulum	: Bagian dari seismograph berupa bandul yang jika terjadi getaran maka akan segera bergerak sesuai dengan besaran getaran tersebut, ujung pendulum terdapat pena yang berfungsi untuk perekaman besarnya getaran tersebut
Penggantian ion	: substitusi ion-ion ke dalam suatu larutan yang diikat oleh butiran-butiran mineral itu sendiri
Pergerakan translasional	: Pergerakan lempeng atau tubuh batuan secara translasional, biasanya dipicu oleh tektonik
Peridotit	: Batuan beku ultrabasa berwarna sangat hitam, tersusun atas sebagian besar piroksen klino, dan terbentuk di permukaan sehingga bertekstur halus
Peta	: Gambaran / denah yang digambar di atas kertas yang melukiskan tempat atau jalur atau kondisi morfologi, sarana dan prasarana dan budaya dari suatu wilayah
Peta bahaya	: Peta yang menggambarkan zonasi tingkatan bahaya dalam suatu daerah, ct: peta bahaya gunung api, peta rawan longsor, peta bahaya tsunami dan lain-lain
Peta geologi	: Peta yang menggambarkan kondisi geologi dari suatu wilayah; meliputi sebaran litologi, struktur geologi dan potensi sumber daya alam yang terkandung di dalamnya
Peta kerentanan tanah	: Peta yang menggambarkan kondisi tingkat kerentanan tanah
Peta topografi	: Peta yang menggambarkan bentuk relief (kekasaran) permukaan tanah dalam suatu wilayah
Ph	: Tingkat keasaman, dimulai dari nilai 1-5 (asam), 6-7 (netral) dan >7 (basa)
Piroklastika	: suatu kata sifat yang menunjukkan produk dalam bentuk kepingan / fragmen dari letusan eksplosif, biasanya bersuhu tinggi
Piroksen ortho	: mineral inosilikat $-Si_2O_6$ miskin Ca berwarna hitam, orthorombik, memiliki belahan dua arah membentuk sudut 90°
Piroksen klino	: mineral berwarna hitam, monoklinik, belahan dua arah membentuk sudut lancip, yang secara kimia tersusun atas $Ca-Si_2O_6$
Piroksenit,	: salah satu batuan beku ultra basa yang secara keseluruhan tersusun atas mineral piroksen
Plagioklas	: mineral berwarna putih hingga pink, berbentuk prisma panjang, yang secara kimiawi tersusun atas : $(Na,Ca)(Si,Al)_4O_8$
Planimeter	: alat untuk mengukur luas bidang datar
Plinian	: suatu tipe letusan gunung api yang dicirikan oleh letusan besar gas yang disemburkan dalam bentuk kolom gas disertai bahan rombakan piroklastik yang naik sampai ketinggian beberapa kilometer
Prasejarah	: jaman ketika manusia belum mengenal tulisan
Presipitasi	: Proses pengendapan kondisi jenuh pada suatu larutan, senyawa atau fluida
Probabilitas banjir	: Kemungkinan / prosentasi terjadinya banjir dalam satuan ruang dan waktu tertentu
Profil alur sungai	: Gambaran secara umum tubuh sungai secara melintang
Profil lereng	: Penampang melintang dari suatu lereng
Profil tanah	: penampang secara vertikal dari horizon tanah. Profil

	tanah ini dikelompokkan menjadi horizon-horizon tanah berdasarkan atas ciri fisik dan komponen yang terkandung di dalamnya
Proses oksidasi	: proses penambahan oksigen dalam suatu proses pengendapan, biasanya berada pada lingkungan laut dangkal, sungai, atau daerah-daerah yang berhubungan dengan udara bebas, dicirikan oleh terbentuknya sedimen / material yang berwarna kemerahan hingga kecoklatan, contoh: tanah pelapukan
Proses reduksi	: proses pengurangan oksigen yang terjadi dalam lingkungan / cekungan, biasanya berada dalam laut dalam, dasar lagoon, dasar danau atau rawa, ditandai dengan terbentuknya endapan / material yang berwarna gelap (hitam)
Pumis	: gelas felsic sangat berongga dengan komposisi menengah sampai silika, yang berhubungan dengan letusan eksplosif magma kental yang kaya akan gas
<i>Raindrop marks</i>	: Lubang-lubang bekas titik-titik hujan yang tercetak dalam batuan yang lunak, dan selanjutnya tersimpan/terbatukan
Rawa	: suatu morfologi yang rendah, biasanya di sekitar pantai, yang tergenang air, dengan banyak tumbuhan air atau semak-semak tumbuhan basah
Rayapan	: Proses gerakan massa secara perlahan, dapat diketahui dari bentuk batang-batang pohon yang melengkung
Reaksi Bowen	: Proses kristalisasi magma membentuk mineral <i>continous form</i> (plagioklas) dan <i>discontinous form</i> (mineral mafik) yang diawali dari proses kristalisasi mineral mafik dan plagioklas Ca hingga pembentukan mineral mika, feldspar dan kuarsa, sesuai dengan komposisi magmanya
Reduksi	: kebalikan dari oksidasi, yaitu proses penghilangan elektron oksigen dalam suatu senyawa yang selanjutnya digantikan oleh unsur lain
<i>Regional metamorphism</i>	: berlangsung secara regional yang dicirikan oleh deformasi tingkat tinggi di bawah kondisi stress differensial
Rehabilitasi (<i>recovery</i>)	: suatu langkah pemulihan terhadap suatu wilayah, masyarakat atau lahan yang rusak atau traumatik akibat kejadian bencana
Rekahan <i>tension</i>	: Rekahan yang terbentuk oleh gaya tensi (gesek)
Rekonstruksi (<i>development</i>)	: suatu kegiatan atau tindakan untuk mengembalikan / mengingat peristiwa yang telah lalu
Rekristalisasi	: suatu langkah (kegiatan) yang
Relief	: perbedaan ketinggian pada permukaan bumi
Remediasi	: suatu tindakan atau proses dalam penyembuhan
Reservoir	: suatu wadah yang bersifat porous dan impermeabel yang dapat menyimpan dan melalukan fluida, seperti minyak dan gas bumi serta airtanah. wadah tersebut dapat tersusun atas batupasir, breksi dan batugamping
Reservoir magma	: suatu wadah di dalam perut bumi sebagai tempat berakumulasinya magma; dapat berada di bawah tubuh gunung api
Resistensi batuan	: Kemampuan batuan dalam menahan tekanan hancuran (penguraian, pukulan dan reaksi kimia)
<i>Retrograde metamorphism</i>	: saat tekanan dan suhu lingkungan menurun secara tiba-tiba selama proses metamorfisme berlangsung, proses metamorfisme mengalami pembalikan ke posisi awal, saat sebelum terjadi metamorfisme
<i>Rhizosphere</i>	: Akar-akar tumbuhan menyediakan habitat kaya nutrisi untuk mikroorganisme tanah

Rhyolit	: batuan vulkanik dengan butiran halus, biasanya porphyritic atau mengkilap yang mengandung lebih dari 68 % SiO_2
<i>Ring of fire</i>	: Busur api, yaitu suatu jalur tektonik aktif, yang terdiri atas jalur zona subduksi (penunjaman) dan busur gunung api
<i>Ripple marks</i>	: Struktur batuan sedimen berupa gelembur yang terbentuk oleh adanya arus gelembur (gelombang) pada saat proses sedimentasi berlangsung
Risiko (bencana)	: suatu akibat yang bersifat merugikan yang ditimbulkan oleh suatu kejadian yang bersifat membahayakan
Sampah	: segala hal yang harus dibuang karena sudah tidak dimanfaatkan lagi
Sanidin	: Mineral K-Feldspar tak berwarna – pink monoklinik, yang banyak dijumpai dalam batuan riolitik dan trakitik
Saprolit	: Soil hasil pelapukan batugamping
<i>Scarp</i>	: Gawir, yaitu morfologi miring curam yang memanjang, dapat terbentuk oleh proses tektonik yang membentuk sesar atau akibat letusan kaldera yang membentuk tebing curam
Sedimentasi	: suatu proses alam (geologis) yang berhubungan dengan kegiatan pengendapan, meliputi pelapukan, erosi, transportasi, pengendapan dan diagenesis
Seismik	: suatu gelombang yang berhubungan dengan gaya atau tekanan yang berasal dari dalam bumi → sering berhubungan dengan gempa bumi (tektonik dan vulkanik)
Seismisitas	: hal-hal yang berhubungan dengan gelombang seismik
Seismograf	: alat untuk mencatat gempa bumi, yang menunjukkan kekuatan (intensitas), lamanya, arah (kedudukannya) dan jaraknya dari titik pengamatan
Seismometer (detektor)	: alat untuk mengukur (merekam) getaran gempa bumi: kekuatan, lamanya, arah (kedudukannya) dan jaraknya dari titik pengamatan
Sekis	: Batuan metamorf berwarna kecoklatan dengan struktur foliasi, tekstur sekistose, tersusun atas mineral mika (muskofit)
Semburan air (lumpur)	: Memancarnya suspensi atau koloid air-partikel halus (lempung-lanau) oleh tekanan burial yang tinggi (= <i>liquifaction</i>)
Serpentine	: Batuan metamorf berwarna hijau tua, hasil ubahan batuan beku ultrabasa, yang banyak tersusun atas mineral piroksen
Serpih	: Batuan metasedimen (biasanya lempung-lanau) yang telah mengalami metamorfisme burial tingkat rendah, berstruktur menyerpih
Seruakan piroklastika	: adalah aliran turbulen suspensi campuran gas dan padatan yang bergolak di atas permukaan tanah yang dilontarkan dengan kecepatan tinggi oleh pelepasan gas yang mendadak yang tidak terlalu mengikuti topografi sebagaimana aliran piroklastik
Seruakan abu cendawan (<i>ash cloud surge</i>)	: Bagian dari tubuh aliran piroklastika yang tersusun atas campuran gas dan partikel dengan konsentrasi butiran sangat rendah, yang menyusun bagian atas tubuh aliran; disebut juga awan panas
Seruakan dasar (<i>ground surge</i>)	: awan gas yang berbentuk cincin dan suspensi bahan rombakan padat yang bergerak dengan kecepatan tinggi dari dasar sebuah kolom letusan, biasanya bersamaan dengan letusan freatomagmatik
Seruakan pangkal (<i>base surge</i>)	: Awan gas yang berada di pangkal aliran piroklastika

Sesar naik	: Sesar yang terbentuk oleh gaya kompresi, dicirikan oleh pergerakan relatif <i>hanging wall</i> ke atas
Sesar <i>transform</i>	: Sesar geser mendatar pada busur gunung api bawah laut, yang terbentuk akibat gaya geser transform
Sesar turun	: Sesar yang terbentuk oleh gaya ekstensi, dengan ditandai oleh pergerakan relatif <i>hanging wall</i> turun
Siklus hidrogeologi	: Siklus air meteorik yang diawali dengan menguapnya air permukaan (air sungai, danau laut, mataair) membentuk uap jenuh yang kemudian bergerak dan karena jenuhnya terpresipitasi membentuk air hujan. Air hujan sebagian berinfiltrasi ke dalam tanah hingga akifer dan sebagian yang lain mengalir sebagai air larian. Di bawah tanah airtanah mengalir melalui batuan akifer dan tersimpan di bawah muka airtanah, sedangkan di permukaan air larian terkumpul kembali ke dalam genangan dan menguap kembali dan seterusnya
Siklus manajemen penanggulangan bencana	: Siklus penanganan dan pengendalian bencana alam; diawali dari prabencana hingga pasca-bencana meliputi tanggap darurat, pemulihan, pembangunan, pencegahan, mitigasi, kesiap-siagaan dan seterusnya secara berulang
Sill	: Intrusi batuan beku dangkal yang searah dengan bidang perlapisan
Sinkhole	: Rongga/sumuran hasil pelarutan batugamping
Sistem pengaliran (cekungan drainasi)	: kawasan yang dibatasi oleh pemisah topografis (punggung bukit), yang menampung, menyimpan dan mengalirkan air hujan yang jatuh di atasnya, ke sungai utama yang bermuara ke danau atau lautan, sebagai kumpulan dari banyak sub DAS yang lebih kecil, dengan bentuk dan ukuran yang berbeda
Sistem peringatan dini atau "early warning system"	: usaha penyelamatan diri anggota masyarakat yang berada di kawasan rawan bencana, yang disosialisasikan sedini mungkin kepada masyarakat tersebut, yang terdiri atas tingkatan-tingkatan kondisi bencananya; contoh tingkat normal, waspada, siaga dan awas
Skala mercalli (MMI)	: Skala intensitas gempabumi yang didasarkan pada tingkat kerusakan yang ditimbulkannya
Skala Richter (SR)	: Skala gempabumi yang didasarkan pada nilai kekuatan / magnitudonya
Skoria	: kepingan/fragmen piroklastik berwarna gelap yang sangat berongga dengan komposisi basaltik atau andesitik
Kerucut skoria	: Akumulasi skoria yang dihasilkan oleh aktivitas gunung api, biasanya oleh letusan tipe Stromboli, hingga membentuk morfologi kerucut setinggi beberapa ratus meter
<i>Spheroidal weathering</i>	: proses disintegrasi yang berlangsung pada batuan masif, tekstur dan komposisi batuan yang homogen, seperti batupasir masif dan batuan beku. pada awalnya, permukaan batuan (fragmen batuan) berbentuk runcing (<i>cornering</i>), kemudian proses pelapukan menjadikan ujung-ujung keruncingannya membulat, yang dari waktu ke waktu makin menyerupai kulit bawang
Stabilitas lereng	: Tingkat kestabilan lereng terhadap kemampuannya dalam menahan gerakan massa; yang ditentukan dengan didasarkan atas besarnya gaya yang bekerja di antara dua tipe gaya, yaitu gaya penggerak (<i>driving forces</i>) dan gaya penahan (<i>resisting forces</i>)
Stakeholder	: Pemegang kebijakan; dapat investor maupun pengembang
Stereoskop	: Alat yang digunakan dalam pengamatan fotoudara
<i>Strike-slip</i>	: Sesar yang arah pergerakannya mengikuti arah jurusnya

<i>Stromboli</i>	: suatu tipe letusan gunung api yang dicirikan oleh letusan yang memancarkan bom pijar putih dan scoria sering dihubungkan dengan lava scoria, biasanya dalam jumlah kecil
Struktur geologi	: Arsitektur kulit bumi, dapat berupa deformasi dan susunan bumi; dapat dibentuk oleh proses tektonisme dan pembentukan litologi penyusun
Subduksi aktif	: Zona berlangsungnya proses penunjaman lempeng samudera di bawah lempeng benua atau di bawah lempeng samudera yang lain, secara aktif pada masa kini
Sulfatara	: celah di permukaan tanah yang mengeluarkan gas vulkanik yang kaya akan gas sulphur (so ₂ , h ₂ s, dll)
Sumber daya alam	: Segala hal di alam yang dapat dimanfaatkan untuk kepentingan manusia; dapat berupa lahan, batuan, mineral, flora (vegetasi) dan fauna (binatang)
Sumber daya geologi	: Sumber daya alam yang berhubungan dengan kondisi geologi yaitu lahan, mineral dan batuan
Sungai	: Suatu lembah yang dialiri oleh air dalam waktu yang lama, dapat musiman (intermiten) maupun permanen
Sungai efluen	: Sungai dengan muka airnya lebih tinggi dari muka airtanah, sehingga dapat mengisi muka airtanah
Sungai influen	: Sungai dengan suplai airnya berasal dari mata airtanah, muka airtanah lebih tinggi dari muka air sungai
Superkontinen	: Lempeng benua yang besar, contoh: Lempeng Eurasia, Lempeng Gondwana, Lempeng Pangea, Lempeng Amerika dan Lempeng Afrika
Suspensi	: Sistem koloid zat padat yang terserak dalam zat cair; partikelnya tidak mudah mengendap karena berdiameter kecil dan tidak mudah menggumpal karena sering menolak
<i>Sustainable development</i>	: Konsep pengembangan sumber daya alam dengan memandang ke masa depan, agar dapat dimanfaatkan sejauh-jauhnya oleh keturunan kita
Syenit	: Batuan beku intrusi plutonik berwarna abu-abu terang kaya K-feldspar, miskin kuarsa
Talc	: Mineral berwarna putih, sangat lunak (kekerasan 1) berukuran lempung
Tanah	: Material hasil pelapukan batuan berwarna abu-abu gelap hingga kemerahan sampai kecoklatan
Tatasurya Bimasakti	: Gugusan bintang yang jumlahnya beribu-ribu di langit, salah satunya adalah bumi kita, sehingga kelihatan sebagai lajur cahaya di langit
Tefra	: istilah umum untuk semua tipe bahan piroklastik
Tektonik	: cabang geologi yang berhubungan dengan pola umum pembentukan kerak bumi bagian atas, dalam hal asal mula dan sejarah evolusi struktur atau deformasi regional
Teluk	: Bagian laut yang menjorok ke darat, lawannya tanjung
Teras sungai	: Undak sungai yang terbentuk oleh perubahan morfologi sungai, dapat karena erosi maupun tektonik
Tersier	: periode waktu geologi termasuk jangka waktu pleistosen dan holosen, dimulai kira-kira 2 juta tahun yang lalu dan berlanjut sampai sekarang
Tinggi kolom letusan	: Tinggi lontaran material gunung api pada saat meletus, sehingga di bagian puncaknya membentuk payung yang disebut <i>umbrella region</i>
Tipe Phreatoplini	: Tipe letusan dengan tinggi kolom letusan kurang dari 55 km
Tipe Plini (Vesuvian)	: Tipe letusan dengan tinggi kolom letusan lebih dari 40

	km
Tipe Stromboli	: Tipe letusan dengan tinggi kolom letusan 100 m
Tipe Surtsey	: Tipe letusan dengan tinggi kolom letusan kurang dari 20 km
Tipe Ultraplini	: Tipe letusan dengan tinggi kolom letusan kurang dari 55 km
Tipe Vulkan	: Tipe letusan dengan tinggi kolom letusan kurang dari 20 km
Trakit	: Batuan beku vulkanik intermediet yang mengandung mineral foid (K-feldspar miskin silika)
Troktolit	: Batuan beku ultrabasa yang mengandung plagioklas anorthit (Ca), kaya olivin dan sedikit piroksen
Tsunami	: gelombang besar yang disebabkan oleh gempa bumi, letusan eksplosif gunung api atau pergeseran tanah / longsoran besar yang terjadi dilaut
Tuf	: abu asal gunung api berukuran halus sampai sangat halus (≤ 2 mm) yang telah membatu
Tuf terelaskan	: Material hasil erupsi gunung api berukuran abu yang pada waktu pengendapannya masih berupa material plastis sehingga ketika diendapkan antara butiran yang satu dengan yang lain saling lengket terelaskan
Tumbukan	: Kolisi; proses pertemuan dua lempeng yang sama, yaitu lempeng benua dan lempeng benua, yang karena sifatnya yang sama maka kedua-duanya saling menumbuk
Tunjaman	: Subduksi
Turbidit	: Proses pengendapan dengan arus yang sangat cepat, biasanya diawali dengan longsoran / debris, yang berlangsung di bawah laut sehingga material sedimennya juga sering disebut sebagai endapan kipas bawah laut
<i>Unloading</i>	: proses pengembangan bagian terbesar dari permukaan tubuh batuan ketika daya ikat antar partikel dalam tubuh batuan terlepas akibat proses erosi
Vesikuler	: Struktur batuan beku ekstrusif yang dicirikan oleh adanya rongga-rongga bekas keluarnya gas dengan sebaran dan ukuran yang seragam
<i>Vulnerability</i>	: proporsi atau persentase nilai yang akan hilang di daerah bahaya apabila terlanda bencana
<i>Watershed</i>	: Alur-alur sungai tersebut adalah bagian dari sistem pengaliran yang disebut sebagai dasar aliran sungai (DAS), yang prosesnya dikontrol oleh suatu sistem cekungan pengaliran
Websterit	: Batuan beku ultrabasa yang kaya mineral piroksen klino dan piroksen ortho
Zeolit	: mineral silikat yang dapat melunakkan air
Zona	: salah satu dari lima bagian besar permukaan bumi yang dibatasi oleh garis khayal di sekeliling bumi, sejajar dengan katulistiwa daerah dengan pembatasan khusus
Zona freatik	: zona yang berhubungan dengan air meteorik atau air hujan (lihat phreatomagmatic)
Zona hotspot	: suatu titik / zona yang paling dekat dengan sumber magma
Zona jenuh air	: zona dengan komposisi airtanah jenuh
Zona tanah	: zona berlangsungnya pelapukan / pembentukan tanah
Zona tektonisme aktif	: zona dengan tektonik aktif, terletak pada jalur api dunia (<i>ring of fire</i>): busur vulkanisme dan subduksi aktif
Zona <i>vadose</i>	: zona jenuh air, yang di dalamnya terjadi aliran airtanah yang berarah variasi tergantung dari sistem perlapisan batuan akifer, geomorfologi dan sistem akifernya sendiri

(tertekan atau tak-tertekan