

BAB III

MITIGASI BENCANA BERASPEK GEOLOGI GEMPA BUMI, TSUNAMI, LETUSAN GUNUNG API DAN TANAH LONGSOR

3.1. MITIGASI BENCANA GEMPA BUMI

Mitigasi bencana gempa bumi perbincangan mengenai (1) Karakteristik gempa bumi di Indonesia; (2) Pantau dan penilaian kerusakan akibat bencana gempa bumi, (3) Prediksi potensi bencana gempa bumi; (4) Pengelolaan bencana gempa bumi

3.1.1. Karakteristik Gempa Bumi di Indonesia

Bencana oleh benturan lempeng kulit bumi, gerakan lempeng kulit bumi yang kuat hingga sangat kuat yang menyebabkan akumulasi dan pelepasan energi dalam bentuk getaran (gempa bumi), dan menimbulkan patahan, retakan, yang dicirikan dengan adanya tebing dan lereng yang terjal dan memanjang, sering timbul mata air. Bencana gempa bumi merupakan bencana utama beraspek geologi. Gempa bumi terjadi karena gerakan lempeng samudera menumbuk lempeng benua yang mengakibatkan penimbunan kekuatan (energi) sebagian energi tegasan (*stress energy*) yang terlepas (*release*) akibat kekuatan batuan kerak bumi sudah terlampaui. Sumber gempa terletak di darat dan laut di daerah sebaran pergeseran/ patahan. Kekuatan getaran tergantung pada jarak sumber gempa serta kekuatan tanah/ batuan serta media lainnya untuk menghantar getaran. Daerah yang mempunyai risiko gempa tinggi biasanya daerah yang dekat dengan sumber gempa, terutama daerah dengan batuan lunak, wilayah permukiman dan daerah industry. Proses terlepasnya energi yang menyebabkan terjadinya getaran yang kuat (gempa bumi) adalah :

1. Proses terjadinya tegangan secara perlahan-lahan pada batuan di dalam bumi, sehingga sebagian energi yang terlepas akibat proses gerakan lempeng benua.
2. Batuan tersebut harus mampu menimbun tegangan hingga mencapai suatu besaran tertentu ($\pm 1020-1050$ Erg)
3. Bilamana batuan berada dalam tegasan tarikan, maka besarnya tegasan akan melampaui besarnya tegasan kohesi batuan, sehingga suatu batuan akan retak / pecah atau patah bahkan mensesar, proses gerakannya disebut gempa bumi.

Gempa bumi dunia dapat dibedakan dalam tiga macam, yaitu :

1. Gempa tektonik, karena adanya kompresi (tekanan) dan torsi (tarikan) lempeng benua. Sebaran Gempa bumi di permukaan bumi tidak seragam, tetapi lebih menggambarkan bentuk zone-zone yang membelah permukaan kulit bumi, yang dikenal :
 1. *Circum Pasifik Mobile Belt*, 80 % gempa bumi di dunia terjadi di wilayah ini.
 2. *Alpen Caucasus Himalayan Belt / Alpine Belt*, 15 % gempa bumi seluruh dunia terjadi di daerah ini
 3. Indonesia termasuk dalam gempa bumi tersebut bahkan merupakan tempat pertemuan kedua zone gempa bumi tersebut.
2. Gempa vulkanik, karena adanya penumpukan kekuatan magma akan keluar menimbulkan getaran (gempa bumi), sebelum terjadi letusan gunung api atau energi dalam bentuk panas. Gempa bumi vulkanik getaran gempa bumi yang disebabkan oleh gerakan magma. Sumber gempa daerah gunung api, dengan kekuatan getaran lebih kecil dibanding getaran karena benturan lempeng (tektonik), namun biasanya berlangsung lebih lama dan berulang-ulang. Gempa vulkanik biasanya kerusakan yang ditimbulkan relatif kecil dibandingkan gempa bumi tektonik.
3. Gempa runtuh, disebabkan oleh runtuhnya atap gua atau bencana runtuh kegiatan pertambangan (*close pit mining*)

Skala gempa bumi yang digunakan adalah Skala Richter (SR). Perhitungan Skala Richter berdasarkan magnitudo gempa bumi. Magnitudo Gempa bumi (M) adalah karakteristik gempa yang berhubungan dengan jumlah energi total seismik yang dilepaskan dari sumber gempa. Magnitudo adalah skala kekuatan gempa pada sumbernya. Magnitudo tidak mungkin diukur pada sumbernya namun ditentukan besarnya dengan alat seismograf atau seismometer, yaitu dengan cara mengukur amplitudo rekaman gempa bumi kemudian dikonversi menggunakan rumus Richter:

$$M = \log A_g + C$$

Dimana : M = Magnitudo dalam Skala Richter

A_g = Amplitudo dalam micron

C = suatu konstanta

Skala Richter diusulkan oleh Charles Richter didefinisikan logaritma (basis 10) dari amplitudo maksimum, diukur dalam satuan mikrometer dari rekaman gempa bumi pada alat seismometer Wood Anderson, pada jarak 100 km dari pusat gempa bumi. Contoh rekaman gempa bumi atau seismogram dari alat seismometer yang terpasang sejauh 100 km dari pusat gempa bumi, apabila amplitudo maksimum 1 mm, maka kekuatan gempa tersebut adalah $\log 10$ pangkat 3 mikrometer = 3 Skala Richter. Angka 10 pangkat 3, diperoleh dari amplitudo maksimum 1 mm = $10^3 \mu\text{m}$ (mikrometer). Jadi parameter yang harus diketahui adalah amplitudo yang terekam dalam seismometer (dalam mm), dan beda waktu tempuh antara gelombang P (primer) dan gelombang S (skunder) dalam detik atau jarak antara seismometer dengan pusat gempa bumi dalam kilometer (Davidson, 1997).

Di samping Magnitude Gempa bumi (M) ada beberapa istilah yang perlu dipahami dalam mempelajari bencana gempa bumi, yaitu Magnitude Gelombang Bodi (Mb); Magnitude Gelombang Permukaan (Ms); Frekuensi Gempa bumi (N); Intensitas Gempa bumi; dan Percepatan tanah.

Magnitude Gelombang Bodi (Mb) ditentukan berdasarkan energi gelombang *clastic* yang ditransfer dalam bentuk gelombang Primer (P) atau gelombang kompresi dan gelombang Sekunder (S) atau gelombang guncangan "*Shear Wave*" yang berasal dari gelombang Rayleigh (Lr) dan gelombang Love (Lq). Besaran magnitude gelombang bodi (Mb) dengan rumus : **$M_b = \log (A/T) + Q (h)$**

Dimana : Mb = Magnitude gelombang bodi

A = Amplitudo dalam mikron

T = Periode

Q = Fungsi empiris dari h dan A, atau faktor kalibrasi magnitude

Magnitude Gelombang Permukaan (Ms) ditentukan berdasarkan jumlah total energi gelombang Love (Lq) dan gelombang Rayleigh (Lr) dengan asumsi fokus dangkal (30 km), amplitudo maksimum terjadi pada periode 20 detik. Besaran magnitude gelombang permukaan (Ms) sebagai berikut.

$$M_s = \log A_{20} + F + C$$

Dimana : Ms = Magnitude gelombang permukaan

A₂₀ = Amplitudo maks pada periode 20 detik

F = Jarak Episentrum

C = Koreksi stasiun (lokal)

Frekuensi gempa bumi (N) merupakan hubungan antara frekuensi dengan magnitude. Dirumuskan sebagai berikut. **Log N = a - bM**

Dimana : N = Jumlah gempa dengan $M > M'$

a dan b = Parameter seismisitas (harga numerik sebagai ukuran tingkat kegempaan daerah)

Intensitas gempa bumi adalah besarnya kerusakan suatu tempat akibat gempa bumi. Harga intensitas diukur berdasarkan kerusakan yang terjadi seperti pada bangunan, topografi, dan reaksi manusia yang teramati sebagai efek dari guncangan gempa. Harga intensitas merupakan fungsi dari magnitude, jarak ke episenter, lama getaran, kedalaman gempa, kondisi tanah, dan keadaan bangunan. Data intensitas memberikan gambaran tingkat kerusakan suatu tempat dari efek terjadinya gempa bumi. Besaran intensitas yang digunakan di dunia adalah :

1. Skala Rossi – Forel I – X
2. Skala Jepang (JMS) 0 – VII
3. Skala Jakarta I – VII
4. Skala Mercalli I – XII

Intensitas gempa bumi yang populer digunakan adalah Skala Mercalli yang diciptakan oleh seorang ahli di bidang gunung berapi yaitu *Giuseppe Mercalli* (Bangsa Italia) untuk mengukur gempa bumi tahun 1902. Skala Mercalli terbagi dalam 12 skala pecahan berdasarkan informasi orang-orang yang selamat dari gempa bumi. Skala Mercalli sangat subyektif dan kurang tepat dibandingkan dengan perhitungan magnitude lainnya. Saat ini Skala Richter lebih luas digunakan untuk mengukur kekuatan gempa bumi. Namun Skala Marcelli yang dimodifikasi oleh ahli seismologi *Harry Wood dan Frank Neumann* tahun 1931 masih sering digunakan, terutama bila tidak terdapat peralatan seismometer yang dapat digunakan untuk mengukur kekuatan gempa bumi di tempat kejadian. Skala Modifikasi Intensitas Mercalli (*Modified Mercalli Intencity/MMI*) untuk mengukur kekuatan gempa bumi melalui tahap kerusakan yang disebabkan oleh gempa bumi tersebut. Satuan ukuran Skala *Modifikasi Intensitas Mercalli* yang saat ini sering digunakan seperti pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1. Skala Modifikasi Intensitas Mercalli

Skala (MMI)	Karakteristik (Ciri-Ciri)
I MMI	Sangat jarang/hampir tidak ada orang yang merasakan/ tidak terasa ada guncangan, tetapi tercatat di seismograf
II MMI	Terasa oleh sedikit orang dalam keadaan istirahat, terutama pada bangunan tingkat atas. Sebagian orang tidak merasakan.
III MMI	Terasa oleh sedikit orang dalam rumah, tetapi banyak yang tidak menyangkan kalau ada gempa bumi. Mobil parkir sedikit bergetar, guncangan dirasakan seperti ada truk kecil lewat.
IV MMI	Terasa oleh banyak orang dalam rumah seperti truk berat lewat, atau terasa seperti ada barang yang menabrak rumah. Barang tergantung bergoyang, jendela kaca pecah, pintu berderik/ kerangka rumah berbunyi. Di luar rumah jarang yang merasakan.
V MMI	Terasa di luar rumah, orang tidur terbangun, cairan tampak bergerak/ tumpah bila penuh, barang-barang perabotan tidak stabil jatuh, gambar/pigura dinding, buku-buku bergerak/jatuh, bandul lonceng bergerak berhenti (jam mati), jendela kaca pecah, pintu berderik/ kerangka rumah berbunyi.
VI MMI	Terasa pada semua orang, banyak orang lari keluar karena terkejut/ panik, orang berjalan kaki terganggu, barang-barang perabotan jatuh, gambar/pigura dinding, buku-buku bergerak/jatuh, dinding, mebel bergerak/bergeser/berputar, dinding/plester rumah yang tidak kuat pecah-pecah, pohon bergoyang. Cerobong asap pabrik rusak.
VII MMI	Terasa oleh semua orang ketakutan/ panik, terasa pada sopir yang sedang mengemudi mobil, orang berjalan kaki susah berjalan (bergoyang/jatuh), dinding dan langit-langit rumah yang tidak kuat runtuh/jatuh, terjadi pergeseran tanah, selokan irigasi rusak/ pecah-pecah, cabang pohon patah.
VIII MMI	Pengemudi mobil terganggu, bangunan kuat menderita kerusakan ada bagian-bagian yang runtuh, kerangka rumah berpindah dari fondasinya, tanah-tanah basah dan lereng-lereng curam terbelah, cabang pohon patah bahkan pohon-pohon tumbang .
IX MMI	Masyarakat panik, bangunan tidak kuat hancur, bangunan kuat menderita dan mengalami kerusakan pada fondasi dan kerangka bangunan, pipa dalam tanah putus, tanah alluvium terbelah, lumpur dari dalam tanah keluar.

Skala (MMI)	Karakteristik (Ciri-Ciri)
X MMI	Umumnya semua tembok dan rangka rumah rusak, beberapa bangunan kayu kuat dan jembatan rusak, kerusakan berat pada bendungan, tanggul, kolam, danau, dan air melambung (muncrat), pantai dan tanah berpindah secara horisontal, jalan KA bengkok.
XI MMI	Lebih dari Skala X, ditambah semua pipa dalam tanah rusak sama sekali, rel KA bengkok dan patah. Jarang ada bangunan yang masih berdiri.
XII MMI	Terjadi bencana alam seluruh bangunan mengalami kerusakan dan hancur, batu-batu dan barang-barang besar berpindah dan terlempar ke udara

Perpindahan materi biasa disebut *displacement*, apabila dilihat waktu yang diperlukan untuk perpindahan tersebut, maka harus diketahui kecepatan materi. Percepatan adalah parameter yang menyatakan perubahan kecepatan mulai dari keadaan diam sampai pada kecepatan tertentu, pada bangunan yang berdiri di atas tanah dan memerlukan kestabilan tanah, agar bangunan tetap stabil. Percepatan gelombang gempa yang sampai di permukaan bumi disebut percepatan tanah, merupakan gangguan yang perlu dikaji untuk setiap gempa bumi. Percepatan tanah dapat diukur menggunakan rumus empiris yang memberikan hubungan antara intensitas dan percepatan tanah di suatu tempat. Percepatan tanah tidak sama pada setiap tempat. Rumus empirisnya : **$\text{Log } A = 1/3 I - 0,5$**

Dimana : A = Percepatan tanah maksimal dalam gal atau cm per detik kuadrat,

I = Intensitas gempa bumi di suatu tempat

Percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) untuk dipetakan agar bisa memberikan pengertian tentang efek paling parah yang pernah dialami suatu lokasi. Efek primer gempa bumi adalah kerusakan struktur bangunan baik yang berupa gedung perumahan rakyat, gedung bertingkat, fasilitas umum, monumen, jembatan dan infrastruktur lainnya, yang diakibatkan oleh getaran yang ditimbulkannya. Secara garis besar, tingkat kerusakan yang mungkin terjadi tergantung dari kekuatan dan kualitas bangunan, kondisi geologi dan geotektonik lokasi bangunan, dan percepatan tanah di lokasi bangunan akibat dari getaran suatu gempa bumi. Faktor yang merupakan sumber kerusakan dinyatakan dalam parameter

percepatan tanah. Data PGA akibat getaran gempa bumi pada suatu lokasi menjadi penting untuk menggambarkan tingkat risiko gempa bumi di suatu lokasi tertentu. Semakin besar nilai PGA yang pernah terjadi di suatu tempat, semakin besar risiko gempa bumi yang mungkin terjadi. Formula yang digunakan dalam menghitung nilai PGA adalah menggunakan Formula Murphy –O’Brein, yaitu: $PGA = 10^{(0.14 I + 0.24 M) - 0.68(\log d + 0.7)}$

Dimana; **PGA** = *Peak Ground Acceleration*

I = Intensitas standard MMI

M = Magnitude gempa bumi

d = jarak antara lokasi dengan sumber gempa bumi

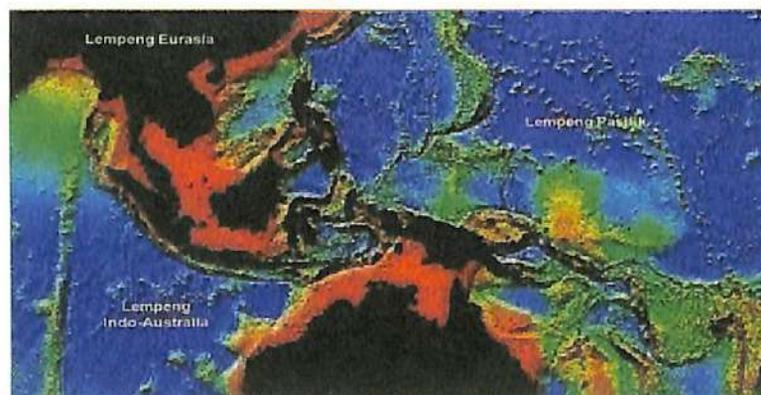
Perhitungan nilai PGA menghasilkan Peta Potensi Bahaya Gempa Bumi. Peta PGA merupakan hasil dari 10% kemungkinan kejadian dalam 50 tahun dan 475 tahun periode ulang gempa. Peta PGA yang dihasilkan merupakan modifikasi dari peta *Global Seismic Hazard Map* oleh *Global Seismic Hazard Assessment Program* (GSHAP). Penyesuaian yang dilakukan adalah melakukan interpolasi pada grid yang lebih kecil (resolusi lebih tinggi) menjadi 500 x 500 m yang disesuaikan dengan ukuran wilayah yang diteliti. Nilai PGA yang dihasilkan dikategorikan menjadi tingkat bahaya kegempaan dengan mengikuti standar klasifikasi dari GSHAP yang dikelompokkan kedalam 4 (empat) kelas, yaitu; Rendah – Sedang – Tinggi – Sangat Tinggi. Namun untuk Indonesia saat ini digunakan pedoman dari BNPB yang tercantum dalam UU No. 24 tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana.

3.1.1.1. Karakteristik Gempa bumi Tektonik Di Indonesia

Gempa bumi tektonik merupakan bencana yang disebabkan oleh benturan lempeng kulit bumi, di mana gerakan lempeng kulit bumi yang kuat hingga sangat kuat itu menyebabkan akumulasi dan pelepasan energi dalam bentuk getaran (gempa bumi), dan menimbulkan patahan, retakan, yang dicirikan adanya tebing dan lereng yang terjal memanjang, sering timbul mata air. Sumber gempa dari gempa bumi tektonik terletak di darat, laut, dan daerah sebaran pergeseran/patahan. Kekuatan getaran tergantung pada jarak sumber gempa dan kekuatan tanah/batuan, serta media lainnya untuk menghantar getaran. Daerah yang mempunyai risiko gempa bumi tinggi biasanya daerah yang dekat dengan sumber gempa, terutama daerah

dengan batuan lunak, wilayah permukiman, dan daerah industri. Gempa bumi tektonik dunia mempunyai karakteristik sebarannya sebagai berikut

1. Sebaran gempa bumi akibat gerakan lempeng tektonik (kerak benua–samudera) dan sebagian besar (> 90%) terjadi di perbatasan lempeng tektonik (*plate boundary*), sehingga pusat-pusat gempa bumi umumnya terjadi di tepian lempengan kulit bumi. Sebaran gempa bumi di permukaan bumi tidak seragam, tetapi lebih menggambarkan bentuk zone-zone yang membelah permukaan kulit bumi, yang dikenal dengan
 - a. *Zone Circum Pasifik Mobile Belt*, di mana 80 % gempa bumi di dunia terletak pada zone ini. *Zone Circum Pasifik Mobile Belt* mencakup wilayah Amerika Selatan – Amerika Utara – Pulau-pulau Aleutian – Kamchatka – Jepang – Formosa – Filipina – Kepulauan Maluku – Irian – New Hebrides – Fiji- Samoa – Tonga – Selandia Baru.
 - b. *Zone Alpen Caucasus Himalayan Belt/Alpine Belt*, di mana 15 % gempa bumi seluruh dunia terdapat pada zone ini. *Zone Alpen Caucasus Himalayan Belt atau Alpine Belt* mencakup wilayah Alpine Medeterania – Asia Kecil – Burma – Sepanjang Himalaya dan bercabang ke utara di daratan Cina bagian atas Sungai Kuning; ke selatan Sumatera – Jawa – Kepulauan Nusa Tenggara – Sulawesi – bertemu dengan *Circum Pasifik Mobile Belt* di Filipina Selatan.
2. Indonesia termasuk dalam kedua zone gempa bumi, bahkan merupakan tempat pertemuan dari kedua zone gempa bumi tersebut, dan merupakan tumbukan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Indo–Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik (**Gambar 3.1**).



Gambar 3.1. Tumbukan tiga lempeng tektonik di Indonesia

- a. Tumbukan lempeng Eurasia dan lempeng Indi-Australia sebagian membentuk pola struktur geologi di Indonesia bagian barat dan sebagian di Indonesia bagian timur, yaitu pola struktur geologi Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara, dan bagian selatan wilayah Maluku. Pola struktur geologinya telah mengakibatkan 11 segmen patahan (Semangko, Makakau, Tanjung Suka- Sebelat, Masurai-Siulak, Batang Saliti-Batanghari, Solok Sianok-Padangpanjang, Batan Gadis-Marumun, Lae Runum, Alas-Kutacane, Banda Aceh-Baro) sepanjang Pulau Sumatera.
 - b. Tumbukan lempeng Indi-Australia dan lempeng Pasifik membentuk pola struktur geologi di Irian Jaya (patahan Mamberamo dan patahan Tarera-Ariduna).
 - c. Tumbukan lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik membentuk pola struktur geologi Irian Jaya bagian utara, Maluku dan Sulawesi mengakibatkan patahan besar Sorong (Irian jaya) dan patahan Palu-Koro (Sulawesi Tengah).
3. Gempa bumi terjadi di sepanjang pantai barat bertambah dalam semakin dekat dengan daratan dan mencapai kedalaman 250 km. Kedalaman gempa bumi (0–50) km tersebar di laut bebas sebelah barat Sumatera, sedangkan gempa bumi dengan kedalaman (50–250) km tersebar di daerah Bukit Barisan. Gempa bumi dangkal pada zone penunjaman samudra umumnya terjadi pada daerah tepian parit, yang dikenal sebagai *trench slope break*. Laju gerakan lempeng tektonik di Indonesia seperti pada Gambar 3.2.

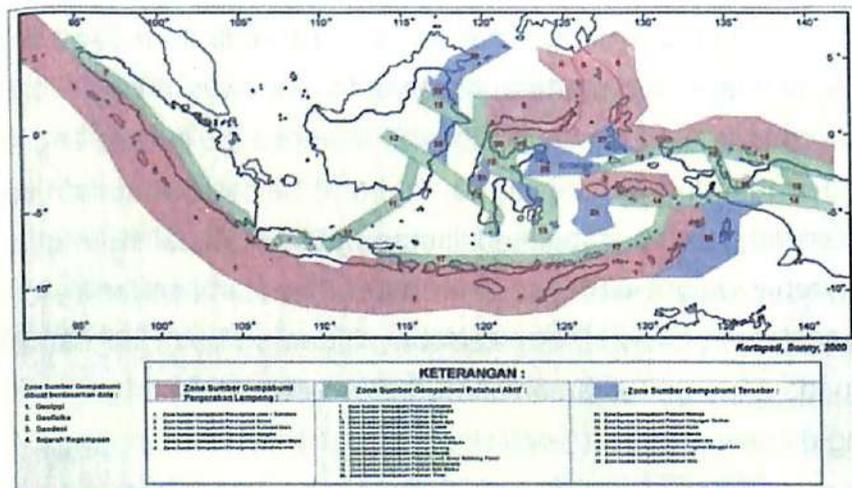


Gambar 3.2. Laju pergerakan lempeng tektonik di Indonesia

4. Mekanisme gempa bumi berhubungan dengan patahan normal yang berkembang dalam zone patahan naik. Patahan normal terjadi akibat tegangan tensional yang

dihasilkan oleh penunjaman lempeng kerak samudra. Daerah ini berkembang gerakan vertical atau terjadi pengangkatan berupa naiknya daratan, yang dinyatakan dalam bentuk undak-undak pantai, terangkatnya terumbu karang (koral), sebagai manifestasi pengangkatan Kuartar (*Quaternary Uplift*).

Peta zona sumber gempa bumi di Indonesia telah dimodelkan oleh Kertopati dan Sonny (2000) berdasarkan data geologi, data geofisika, data geodesi dan sejarah kegempaan pada Gambar 3.3. Model tersebut digunakan untuk menghitung Wilayah Gempa bumi di Indonesia (WGI) dalam SNI 1789-2003.



Gambar 3.3. Peta Zone Sumber Gempa bumi di Indonesia (Kertopati dan Sonny, 2000)

Sebaran gempa bumi di Indonesia berasal dari hasil penunjaman lempeng-lempeng kerak bumi yang kompleks, dibagi dalam tiga kelompok zone gempa bumi

1. Zona sumber gempa bumi Busur Pulau di Indonesia gempa bumi dari gerakan lempeng
2. Zona sumber gempa bumi sesar/patahan aktif di Indonesia
3. Zona sumber gempa bumi sesar/patahan di Indonesia

3.1.1.1.1. Zona sumber gempa bumi busur pulau di Indonesia

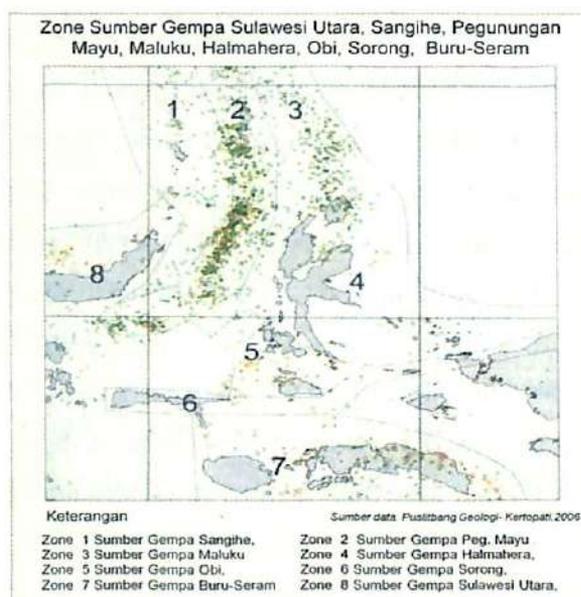
Zone Busur Pulau di Indonesia gempa bumi dari gerakan lempeng (Hindia-Australia, Eurasia, Sirkum Pasifik) terdiri dari 5 (lima) zona/busur pulau aktif, yaitu :

1. Busur Sunda (Andaman-Banda = 5600 km) paling aktif kedalam sekitar 250 km, kecepatan penunjaman 7,7 cm per tahun, gempa paling merusak; Proses terjadinya

lempeng Samudra Hindia-Australia yang bergerak relatif serong di bagian Sumatera, kemudian menunjam dan terus menggelincir di bawah lempeng Eurasia, yang mengakibatkan daratan Sumatera terjadi *Patahan Geser Sumatera*. Di Jawa Barat dan Jawa Timur penunjaman lempeng Samudra Hindia-Australia yang bergerak relatif tegak lurus terhadap sumbu Pulau Jawa dengan kecepatan lebih rendah dari bagian Sumatera, yaitu (4,9 – 6,0) cm/tahun. Penunjaman tersebut menyebabkan di Pulau Jawa berkembang sesar-sesar normal dan naik, sejajar Pulau Jawa, dan semakin ketimur hingga Nusa Tenggara Timur (NTT) sudut penunjaman semakin tajam kedalaman 300 km di wilayah Flores;

2. Busur Banda (Aru-Buru) Gambar 3.4. terletak di bagian timur sistem penunjaman Busur Sunda – Eurasia, berdampingan dengan Busur Sunda. Kedua sistem dibedakan oleh perbedaan lingkungan tektonik dan sistem penunjaman samudra ke sistem tumbukan (*collision*) kepulauan benua, yang terletak di sekitar Kepulauan Tanimbar, sistem ini berbelok tajam dan berlawanan dengan jarum jam, sehingga membentuk busur setengah lingkaran atau kurva U. Sistem penunjaman di bagian selatan ke arah utara, di daerah Aru ke arah barat, dan di daerah Seram ke arah selatan dan berakhir di sekitar Pulau Buru. Zona sumber gempa Busur Banda merupakan bagian dari lempeng Samudra Hindia yang terjebak dan terperangkap bersamaan dengan benua mini yang terletak di sekitar Laut Banda, yang membentuk dua fase, yaitu fase pertama lempeng Samudra Hindia-Australia menunjam ke lempeng Laut Banda, dan fase kedua penunjaman Benua Australia ke dalam Zone Banda. Sistem penunjaman Busur Banda di sekitar Aru dipisahkan oleh sistem patahan Tarera-Aiduna, yaitu bagian utara berhubungan dengan sistem Palung Seram, bagian selatan berhubungan dengan Palung Timor. Kedalaman zona sekitar Busur Banda tidak lebih dari 100 km, kecuali Seram dan Buru lebih dangkal sekitar 70 km (zone 7 **Gambar 3.4.**), sedangkan tempat-tempat lain relatif lebih dangkal;
3. Busur Sangihe dan Pegunungan Mayu berhubungan dengan busur Halmahera membentang melengkung ke utara saling berhadapan, menunjam saling berlawanan. Zone Sangihe dan Halmahera mempunyai ketebalan 15 km. Lempeng Sangihe ke arah timur membentur bawah Busur Sangihe (zona 1 **Gambar 3.4.**) hingga kedalaman 600 km menunjam di bawah Lempeng Peg. Mayu (zona 2

- pada **Gambar 3.4.**) hingga lempengan Maluku (zona 3 pada **Gambar 3.4.**);
4. Busur Halmahera berhubungan dengan Busur Sangihe adalah aktivitas gempa yang mengalami perjalanan panjang dan lama. Zone gempa Busur Halmahera (zona 4 pada **Gambar 3.4.**) relative lebih dangkal sekitar 300 km. Di sekitar zone tersebut terindikasi beberapa sumbergempa lain, yaitu sumber gempa bumi Obi, Maluku (zona 5 pada **Gambar 3.4.**), sumber gempa bumi Sorong (zona 6 pada **Gambar 3.4.**).
 5. Busur Sulawesi Utara merupakan zona penunjaman/ subduksi relatif tua (*dying subduction*), yang robekannya berkembang ke arah timur sepanjang tepian utara Sulawesi arah kemiringan ke selatan, dan kedalaman <50 km. Pusat gempa terkumpul di perairan Laut Sulawesi kedalaman hepisentrum (50–100) km tersebar di bawah busur kepulauan (periksa zona 8 pada **Gambar 3.4.**).



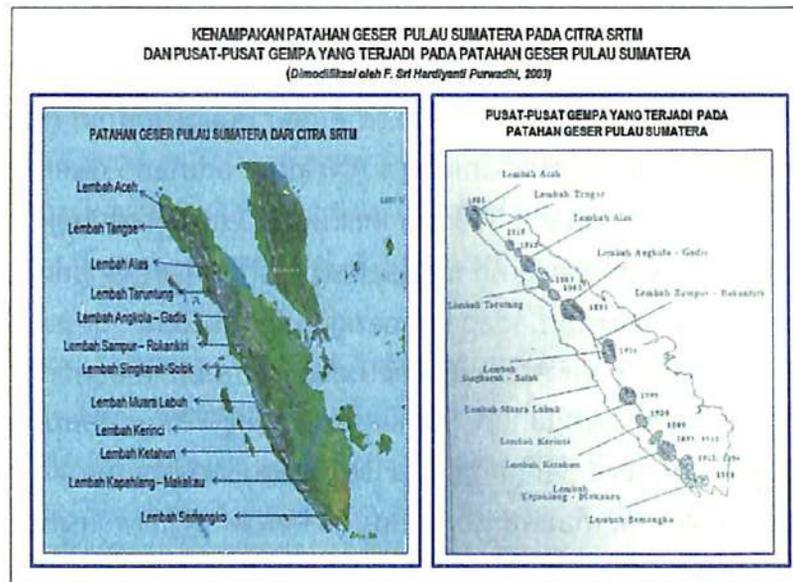
Gambar 3.4. Zone sumber gempa Halmahera dan sekitarnya

3.1.1.1.2. Zona sumber gempa bumi patahan aktif di Indonesia

Zone sumber gempa bumi dari sesar/patahan aktif yang merupakan sumber gempa bumi dangkal dan termasuk penunjaman Busur Sunda. Gempa bumi tektonik pada kerak bumi dangkal berasosiasi dengan pergesekan antara lempeng besar dan sesar-sesar, yang menyebabkan gempa bumi berskala besar. Sesar/patahan yang dipertimbangkan sebagai patahan aktif berdasarkan data geofisik, geodesi, dan

aspek kegempaan/ seismologi (IAEA, 2002 dalam Kertopati 2006). Gempa bumi yang berhubungan dengan sesar/patahan aktif terdiri 14 zona, yaitu

1. Zona sumber gempa bumi patahan aktif Pulau Sumatera merupakan patahan bergerak (geser) ke kanan, memanjang 1700 km. Patahan Geser Pulau Sumatera dari citra SRTM pada Gambar 3.5. Sesar ini ke selatan menghilang di Selat Sunda, ke utara terus Andaman. Gerakan mendatar patahan karena penunjaman miring lempeng Hindia-Australia terhadap lempeng Eurasia. Gerak geser patahan (5-27) mm/tahun. Kecepatan rata-rata geser patahan lebih cepat di bagian barat laut, yaitu Andaman 44 mm/tahun, Sumatera Utara 23 mm/tahun, Sumatera Barat 19 mm/tahun, Sumatera Selatan serta Teluk Semangko hanya 10 mm/tahun. Patahan Geser Pulau Sumatera dari citra SRTM tersebut masing-masing dapat dijelaskan sebagai berikut.
 - a. Terdapat 12 lembah patahan geser di Pulau Sumatera, yaitu Lembah Aceh, Lembah Tangse, Lembah Alas, Lembah Taruntung, Lembah Angkola – Gadis, Lembah Sampur – Rokankiri, Lembah Singkarak-Solok, Lembah Muara Labuh, Lembah Kerinci, Lembah Ketahun, Lembah Kapahiang – Makakau, dan Lembah Semangko.
 - b. Pusat-pusat gempa bumi besar yang terjadi pada patahan aktif atau patahan geser Pulau Sumatera antara lain di Lembah Aceh (1985), Lembah Tangse (1916), Lembah Alas (1921), Lembah Taruntung (1982, 1987), Lembah Angkola-Gadis (1892), Lembah Singkarak-Solok (1926), Lembah Kerinci (1995), Lembah Ketahun (1909), Lembah Kapahiang-Makakao (1893, 1952), Lembah Semangko (1908, 1933, 1994)



Gambar 3.5. Patahan geser dan pusat gempa Pulau Sumatera

2. Zona sumber gempa bumi sesar/patahan aktif Lembang dan Cimandiri, sebagai berikut.
 - a. Patahan Lembang terletak 10 km di utara Kota Bandung, memanjang sekitar 25 km dari barat ke timur. Patahan Lembang termasuk volkano-tektonik yang terbentuk akibat gaya gravitasi, terjadi antara 3000 – 6000 tahun lalu, panjang pergeseran 140 meter (rata-rata geser 30 m/th). Kenampakan Patahan Lembang dari citra Landsat TM tahun 2001 seperti Gambar 3.6. Patahan Lembang termasuk volkano-tektonik terbentuk akibat gaya gravitasi. Patahan lembang merupakan jenis patahan yang berhubungan dengan deformasi kaldera, gravitasi dari aktivitas gunung api yang gerak gesernya berbeda, sehingga terjadi patahan aktif, cenderung tidak terjadi perulangan gerak. Patahan Lembang sudah tidak aktif sejak ratusan tahun lalu, tetapi memiliki rata-rata geser 2 mm/th (Hares & Boen, 1996 dalam Kertopati, 2006). Patahan Lembang mampu menimbulkan gempa 6,3 SR (Juni 2003), dan memicu kembali terjadinya gempa bumi dengan besaran 5,4 Mb, kedalaman 10 km. Guncangan gempa bumi dari Patahan Lembang sangat dirasakan di Kota Bandung.



Gambar 3.6. Citra Landsat TM sesar/patahan Lembang

- b. Sesar/patahan Cimandiri merupakan sesar/patahan normal dengan komponen sesar/patahan geser arah baratdaya – timur laut, yang berhubungan dengan Sesar/Patahan Lembang melalui patahan Rajamandala mempunyai rata-rata geser (*Slip Rate*) 2 mm/th. Patahan Cimandiri bertanggungjawab terhadap gempa bumi merusak di sepanjang Lembah Cimandiri dan sekitarnya, seperti Gempa bumi Gunung Gede (1879, 1997, 2000); Gempa bumi Sukabumi (1879, 1900, 2000); Gempa bumi Cianjur (1844); Gempa bumi Rajamandala. Hubungan sesar/patahan Cimandiri dan sesar/patahan Lembang dapat dilihat pada citra Landsat TM tiga dimensi (3D) seperti Gambar 3.7. Sesar/patahan Cimandiri dengan arah baratdaya – timur laut dilanjutkan oleh kelurusan arah utara menyatu dengan Patahan Rajamandala (arah barat – timur), disambung dengan kelurusan kearah barat laut – tenggara hingga Patahan Lembang arah barat-timur.



Gambar 3.7. Landsat TM 3D Hubungan Patahan Cimandiri, Patahan Rajamandala, dan Patahan Lembang

3. Zona sumber gempa bumi sesar/patahan aktif Baribis, mekanismenya berhubungan dengan gaya kompresi lokal sepanjang garis patahan yang membentang dari Tambakan-Subang sampai Beribis-Kuningan. Gempa bumi merusak yang berkaitan dengan patahan Baribis antara lain gempa bumi Karawang (1892), gempa bumi Kuningan 1842, 1875, gempa bumi Majalengka 1912, 1990, dan 2001 pada kedalaman 25 km dengan besaran 5,8 Mb Skala Richter;
4. Zona sumber gempa bumi sesar/patahan aktif Bumiayu, mekanismenya berhubungan dengan gaya kompresi lokal sepanjang garis patahan yang arahnya barat laut – tenggara pada tepian utara pegunungan vulkanik. Gaya kompresi berlangsung sampai saat ini, yang ditandai dengan adanya undak-undak sungai dengan pelipatan-pelipatan lemah. Gaya geser patahan aktif Bumiayu rata-rata 2 mm/tahun, panjang patahan 100,4 km. Zona sumber gempa bumi Bumiayu ini bertanggungjawab pada gempa di sekitar Cirebon, karena kegiatan sesar/patahan aktif Bumiayu yang memicu kegiatan aktivitas Gunung Ceremai;
5. Zona sumber gempa bumi patahan aktif Lasem, menempati suatu depresi yang porosnya timur laut dengan indikasi kelurusan rendahan gaya berat. Gejala neotektonik mengindikasikan keberadaan patahan dengan adanya 8 (delapan) undak/teras dengan ketinggian 274 meter dan 7 (tujuh) teras dengan ketinggian 265 meter, yang keduanya terletak di sebelah tenggara Kendal; Neotektonik juga terjadi pada patahan Semarang yang ditandai oleh adanya sesar naik dan

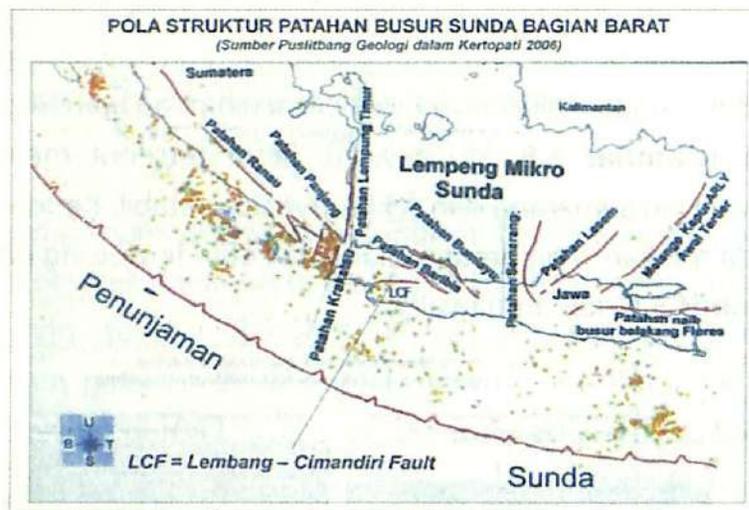
sesar turun, serta struktur lipatan lemah, yang ditunjukkan oleh undak/teras Kali Kreo ketinggian 90 meter (undak pertama ketinggian 25 meter dan teras kedua 65 meter), pengangkatan juga terjadi di Kali Garang setinggi 45 meter. Indikasi pengangkatan juga dapat dilihat pada bekas alur sungai stadium dewasa, dengan ditemukan indikator tanaman rawa pantai "nipah" sekarang pada ketinggian lebih dari 100 meter. Kenampakan lapangan gejala Neotektonik Semarang pada **Gambar 3.8.**, yang berupa kelurusan bukit akibat sesar naik Jebukan, Kecamatan Banyumanik (**Gambar 3.8.** kiri atas), kenampakan gawir sesar turun melingkar di bagian selatan perbukitan (**Gambar 3.8.** kanan atas). Kenampakan struktur lipatan lemah pada perselingan batupasir dan Satuan Breksi Ungaran Tua (berumur Plistosen Atas hingga Holosen), yang memperlihatkan kemiringan lapisan batuan relatif kecil (**Gambar 3.8.** kiri bawah). Sesar tersebut menyebabkan kondisi morfologi wilayah Semarang dan sekitarnya tidak stabil. Ketidak stabilan tersebut terlihat pada retakan yang berupa jalan retak atau terpotong dan bangunan yang rusak (**Gambar 3.8.** kanan bawah).



Gambar 3.8. Kenampakan lapangan gejala Neotektonik Semarang

6. Zona sumber gempa patahan aktif busur belakang Flores terjadi akibat tumbukan lempeng Hindia-Australia pada kecepatan 6 cm/tahun terhadap lempeng Eurasia yang relatif diam. Patahan ini membentang terus ke barat sampai Jawa Timur melalui Selat Madura. Patahan aktif busur belakang Flores ini mengakibatkan gempa bumi dangkal (kedalaman <math>< 30 \text{ km}</math>). Kejadian gempa bumi berkaitan

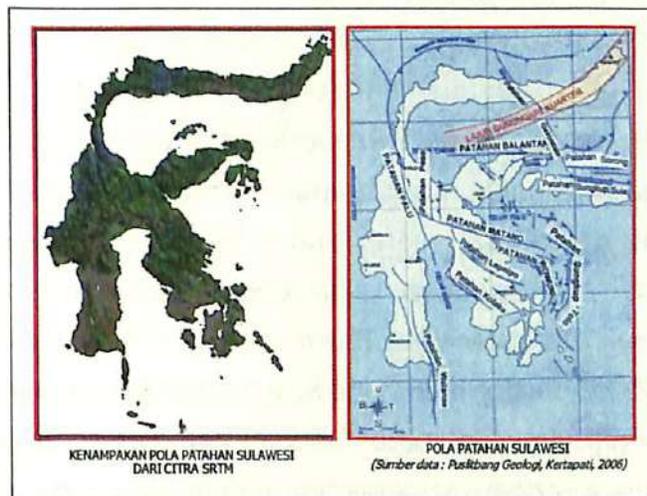
dengan patahan ini antara lain gempa bumi Serarit, Baki 1976, gempa bumi Flores 1992, gempa bumi Karangasem 2004. Gerak geser rata-rata di Bali Utara dan cekungan Bali berkisar antara (2-4) m/tahun (Kertopati, 2006). Hubungan sesar/patahan aktif antara patahan Lembang, patahan Cimandiri, Beribis, patahan Bumiayu, patahan Semarang, patahan Lasem, patahan Malange kearah timur laut hingga Kalimantan Selatan, yang membentuk pola struktur patahan penunjaman Busur Sunda bagian barat, dan bertemu dengan patahan aktif busur belakang Flores di wilayah Jawa Timur, periksa **Gambar 3.9**.



Gambar 3.9. Pola struktur patahan busur Sunda bagian barat hingga busur belakang Flores

7. Zona sumber gempa bumi patahan aktif Walanea, terletak di lengan selatan Sulawesi merupakan depresi arah utara, utara barat hingga barat laut. Akibat sesar ini terjadi gempa bumi besar di Bulukumba 29 Desember 1828 dengan intensitas magnitude VIII-XI MMI;
8. Zona sumber gempa bumi sesar/patahan aktif Palu-Koro, merupakan terbanan yang berukuran lebar 10 km ke arah Selatan menyempit hingga 2 km. Panjang patahan secara keseluruhan sekitar 70 km. Terbanan berupa sesar/patahan berjenjang karena pengangkatan teras/undak mencapai 4,5 mm/th, sedangkan patahan geser Palu-Koro (26-30) mm/th dengan komponen normal sekitar 4 m/tahun. Gejala ini juga terlihat karena adanya pergeseran sungai kearah kiri sepanjang (100-600) meter. Cekungan tarikan resen (*pull-apart basin*) dan

- Magnitude maksimum gempa berdasarkan *slip-rate* zone sumber gempa 7,6 MM dengan periode ulang gempa 162 tahun;
9. Zona sumber gempa bumi patahan aktif Poso, merupakan patahan naik arah utara selatan hingga Teluk Tomini dan memotong patahan Palu-Koro; Kenampakan patahan sulawesi dari citra SRTM dan hubungan sesar/patahan aktif yang merupakan zona sumber gempa Sulawesi, yaitu sesar/patahan Walanea, Palu-Koro, Poso, sesar naik Batui, Sungkup-Sula, Sungkup-Tolo, Kolaka, Waipopo, Matano, Gorontalo, dan Sulawesi Utara, seperti **Gambar 3.10**.

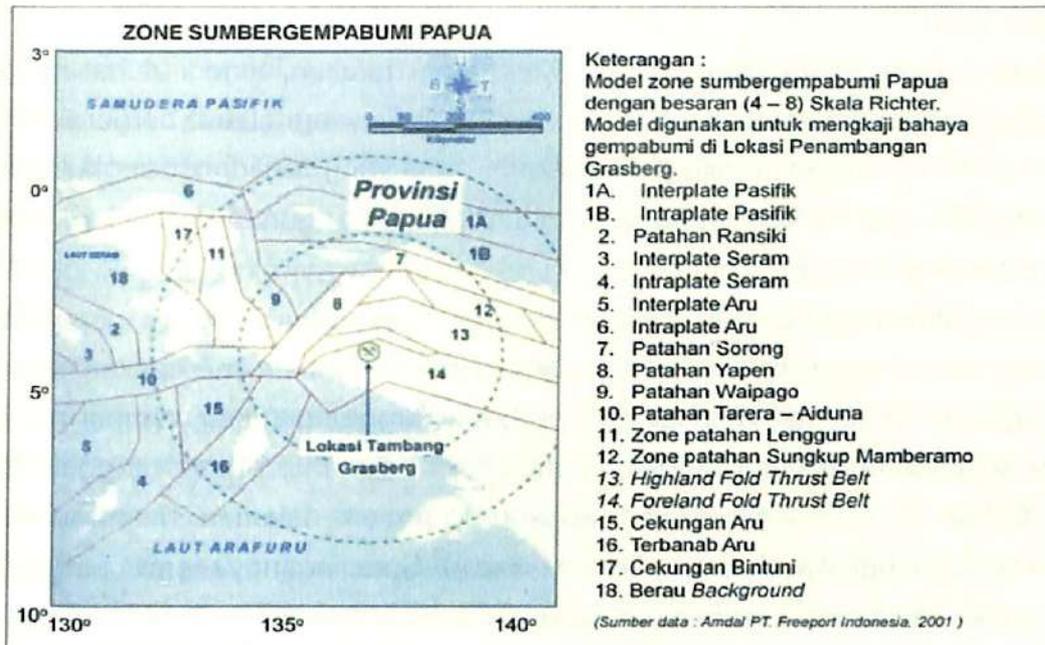


Gambar 3.10. Citra SRTM dan Pola Patahan Sulawesi

10. Zona sumber gempa bumi patahan aktif Batui, merupakan zona patahan Sungkup Batui, merupakan penumpuan paparan Banggai Sula dan jalur Ofiolit Sulawesi Timur dengan kemiringan ke arah barat laut-utara, tetapi bagian timur patahan mencerminkan patahan geser ke arah kanan. Patahan Batui saat bertumbukan antara zona Banggai Sula dan jalur Ofiolit Sulawesi Timur pada Miosen Tengah, namun pada Holosen sesar/patahan ini giat kembali gempa bumi kekuatan magnitude maksimum 7,4 Ms, dan menggeser batuan sepanjang 150 km. Zona-zona gempa bumi Palu-Koro, Walanea, Patahan naik Batui merupakan zona-zona gempa kerak bumi dangkal, yang paling bertanggungjawab terhadap kejadian-kejadian gempa bumi Sulawesi.
11. Zona sumber gempa bumi patahan aktif Torera-Alduna merupakan salah satu patahan di Papua dari penunjaman Phillipina dan Papua Nugini. Patahan Torera-

Alduna memanjang arah barat-timur, memotong zona penunjaman di utara Banda. Patahan ini ke arah timur hingga *foreland frontal fault zone* di areal pertambangan PT Freeport Indonesia. Gerak geser rata-rata (*slip rate*) patahan aktif Torera-Alduna (2–10) mm per tahun, sedangkan pada *foreland frontal fault zone* gerak geser rata-rata (*slip rate*) mencapai (3–6) mm/tahun. Patahan ini mampu menggeser endapan konglomerate setinggi 100 meter dan mengangkat endapan teras setinggi (50 – 500) meter (PT Freeport Indonesia, 2001). Gempa besar terjadi tahun 1981 (6,4 SR) dan 1989 (6,1 SR) di lokasi yang berjarak 48 km dari pertambangan PT Freeport Indonesia;

12. Zona sumber gempa bumi sesar/patahan aktif Sorong, lajur membentang hingga 2500 km dari Sulawesi Tengah melalui Sula dan Banggai, Salawatu Sorong Teluk Cenderawasih, Yapen, daratan Papua sampai Wewak dapat dilihat pada peta sumber gempa bumi patahan aktif Papua (**Gambar 3.11**) Patahan Sorong memiliki lebar bervariasi dari ratusan meter hingga 10 km, dan mengandung bermacam-macam fragmen batuan dari berbagai jenis umur yang beragam. Sesar/ patahan Sorong bergerak mendatar sejak Plio-Plistosen, dan telah mengalami pergeseran sepanjang 350 km sejak Miosen. Indikasi pengangkatan yang terjadi pada sesar/ patahan Sorong mulai 3000 meter hingga 6000 meter. Patahan Sorong 16 Maret 1983 gerakannya sangat giat sehingga menimbulkan gempa bumi besarnya hingga mencapai 6,5 Mb Skala Richter, dengan pusat gempa pada kedalaman 30 km hingga 60 km. Model zone sumber gempa bumi Patahan Papua digambarkan oleh PT Freeport Indonesia untuk mengkaji kemungkinan terjadinya bahaya gempa bumi di wilayah pertambangan Grasberg, Mimika, Papua.



Gambar 3.11. Zone Sumber Gempa bumi Papua
 (Sumber PT Freport Indonesia, 2001)

13. Zona sumber gempa bumi patahan aktif Ransiki (No 2 Gambar 3.11.) membentang sepanjang 43 km dengan lebar 2,5 km. Gerak geser patahan mulai dari Akhir Miosen hingga Pliosen, yang relatif aktif hingga saat ini. Indikasi kegiatan tektonik diantaranya pengangkatan di bagian utara Kepala Burung, Papua Barat. Gempa bumi yang terjadi pada patahan *Ransiki* terjadi 29 Juni 1961 dengan besaran gempa bumi 5,6 Skala *Richter*, dan pada bulan Oktober 2002, kegiatan pada patahan ini gerakannya menimbulkan kerusakan yang cukup parah;
14. Zona sumber gempa bumi patahan aktif Mamberamo (No. 12 Gambar 3.11.) dengan gaya geser rata-rata (*slip rate*) antara (20-25) mm/tahun. Gempa bumi Mamberamo 25 November 1989 dengan besaran $M_w=6$; $M_b=5,9$; dan $M_s=5,9$ SR (PTFI, 2001);

3.1.1.1.3. Zona sumber gempa bumi patahan tersebar di Indonesia

Zona sumber gempa bumi tersebar (*diffuse*), merupakan gempa bumi tektonik yang berhubungan dengan gerak-gerak fragmen benua, yang umumnya tersebar di Indonesia bagian tengah dan timur, yaitu mulai dari Pulau Tarakan hingga sekitar Laut Banda. Gempa bumi tektonik tersebar (*diffuse*), terbagi dalam 8 (delapan) zona

patahan, yaitu

1. Zona sumber gempa bumi patahan Cekungan Tarakan, terjadi akibat benturan fragmen benua dan gerak dorong lempeng pasifik yang relative bergerak ke arah barat melalui patahan Palu-Koro. Gempa bumi yang terjadi di Sangkulirang 14 Mei 1921 dan 19 April 1923, yang merobohkan bangunan dan diikuti tsunami yang menghancurkan Sekuran;
2. Zona sumber gempa bumi patahan Kutai, merupakan sumber gempa bumi Kalimantan Timur, seperti halnya pada patahan Tarakan merupakan benturan fragmen benua. Karakteristik gempa bumi tergolong minor sampai moderat, terjadi pada kerak bumi dangkal. Gempa bumi Kalimantan Timur tanggal 7 Maret 1995 berukuran 5,6 Mb dengan episentrum pada kedalaman 37 km, terletak di Tanjung Mangkaliat (perairan Selat Makasar). Guncangannya terasa hingga Kota Tarakan dan Berau. Gempa bumi tanggal 5 Juli 1996 di Muara Teweh (pedalaman Kalimantan), pusat gempa pada kedalaman 25 km dan besaran $M_s=4,5$;
3. Zona sumber gempa bumi patahan Mamuju, terletak di sebelah barat patahan Palu, merupakan zona *background earthquake* seperti halnya sumber gempa bumi di Sumatera bagian timur (Pulau Bangka), Kalimantan Tengah dan Kalimantan Timur. Sumber gempa yang terjadi di Mamuju tanggal 8 Januari 1984 dengan intensitas VII MMI dan mencapai 7,6 M_s ;
4. Zona sumber gempa sesar/patahan Fragmen Banggai Sula, secara geografis meliputi Kepulauan Banggai-Peleng, dan Sula, merupakan fragmen benua kecil yang disusun oleh bahan asal benua yang dihanyutkan dari asalnya ke arah barat oleh sesar/patahan Sorong. Perjalanan keratan benua kecil Fragmen Banggai Sula ini mendorong Busur Sulawesi bagian timur dan menubruk Busur Sulawesi bagian barat. Di dalam perjalanan fragmen benua ini membentur lajur batuan ofiolit dan penunjaman (subduksi) ke daerah Lengan Timur Sulawesi. Tumbukkan dan penukikan ini terjadi pada zaman Miosen Tengah yang berlanjut hingga sekarang. Mekanisme gempa bumi Banggai yang terjadi 4 Mei 2000 memperlihatkan pergerakan naik dengan kemiringan 43° , pergerakan geser dengan kemiringan 41° , dan pergerakan menunjam (subduksi) dengan kemiringan 56° . Gempa bumi termasuk gempa bumi dangkal dengan ukuran 6,5 M_s , yang diikuti gelombang pasang air laut yang menerpa wilayah pesisir Pulau Peleng;

5. Zona sumber gempa bumi patahan Sulu, merupakan patahan di wilayah antara Sulawesi dan Maluku, penyebab utamanya adalah gempa bumi Maluku Utara-Ternate dan sekitarnya akibat tumbukan lempeng punggungan pegunungan Mayu/ lempeng Talaud dengan lempeng Halmahera hingga kedalaman 350 km. Proses penunjaman untuk kedalaman gempa bumi dipengaruhi oleh proses dehidrasi patahan (*dehydration faulting*). Kedalaman tumbukan lempeng hingga kedalaman 100 km di dasar laut. Mekanisme gempa bumi dangkal dalam punggungan Pegunungan Mayu ke arah barat menunjukkan patahan naik;
6. Zona sumber gempa bumi patahan Obi terletak di baratdaya Pulau Halmahera, mencakup Kepulauan Bacan dan Pulau Obi. Sumber gempa bumi Obi merupakan penunjaman dari zona sumber gempa bumi Pegunungan Mayu ke arah selatan. Patahan Obi menunjam ke selatan ke kepulauan Sula, yang merupakan awal dari jalur sumber gempa bumi Sorong. Gempa bumi 5 Maret 1975 termasuk moderat dengan ukuran 6,5 Mb dan kedalaman normal sekitar 33 km. Guncangan diikuti tsunami dengan ketinggian (1-2) meter;
7. Zona sumber gempa bumi patahan Banda merupakan bagian dari zona sumber gempa bumi Busur Banda dari lempeng Samudra Hindia yang terjebak dan terperangkap bersamaan dengan benua mini yang terletak di sekitar Laut Banda. Patahan Banda merupakan fase pertama penunjaman lempeng Samudra Hindia-Australia ke arah lempeng Laut Banda, dan terjadi penunjaman (subduksi) Benua Australia ke dalam Zona Banda. ;
8. Zona sumber gempa bumi patahan Graben Aru, meliputi Seram Timur, sebelah barat Papua, dan Kepulauan Aru. Aktivitas gempa bumi tergolong kecil ukuran mencapai 5 Skala Richter dan jarang mencapai 6,5 Ms. Mekanisme Gempa bumi Graben Aru lebih banyak dikontrol akibat adanya lajur hancuran tepian Lempeng Australia. Aktivitas gerakan sesar mulai dari daratan Papua masuk ke perairan cekungan (Graben) Aru. Magnitude gampabumi maks 7,5 periode ulang 72 tahun (Tjia, 1978 dalam Kertopati, 2006).

3.1.1.2. Karakteristik gempa bumi vulkanik di Indonesia

Gempa bumi vulkanik umumnya terjadi dalam bentuk getaran *swarm* dan mempunyai magnitudo lebih kecil dibandingkan gempa tektonik. Gempa bumi vulkanik cenderung bervariasi dalam anjang gelombang dan frekuensi. Gempa bumi

tektonik dapat memicu letusan gunung api. Contoh Gempa bumi tektonik yang berukuran sekitar 6 Ms, yang memicu letusan Gunung Krakatau (1883), aktivitas Gunung Ceremai, Jawa Barat (2003) dipicu oleh kegiatan sesar Bumiayu. Gempa bumi vulkanik merupakan bencana yang disebabkan oleh letusan gunung api, dengan karakteristik sebagai berikut

1. Bencana gempa bumi vulkanik terjadi oleh benturan lempeng kulit bumi di sekitar gunung api, selain menimbulkan getaran (gempa bumi) juga dalam bentuk panas (letusan gunung api).
2. Gempa bumi akibat gerakan kulit bumi disebut gempa bumi tektonik, sedangkan getaran gempa bumi yang disebabkan oleh gerakan magma disebut gempa bumi vulkanik.
3. Sumber gempa daerah gunung api, dengan kekuatan getaran lebih kecil dibanding getaran karena benturan lempeng (tektonik), namun biasanya berlangsung lebih lama dan berulang-ulang.
4. Gempa vulkanik kerusakan yang ditimbulkan relatif kecil dibandingkan gempa bumi tektonik.

3.1.1.3. Karakteristik gempa bumi runtuh di Indonesia

Bencana gempa bumi runtuh di Indonesia merupakan karakteristik gerakan bumi yang disebabkan oleh :

1. Bencana gempa bumi akibat runtuhnya atap gua, dapat terjadi karena alam di mana dinding gua yang di bawah terkena erosi dan tidak dapat menahan beban atap gua sehingga runtuh. Sebelum runtuh biasanya terjadi getaran bumi di sekeliling gua. Bencana gempa bumi runtuh juga dapat terjadi akibat kegiatan manusia untuk mengambil batuan yang terdapat di atas gua atau di sekitar gua, misalnya dengan ledakan dinamit yang dapat menyebabkan gempa bumi runtuh.
2. Bencana gempa bumi runtuh yang terjadi dalam kegiatan pertambangan (*close pit mining*). Pengambilan bahan tambang, biasanya dilakukan peledakan di bawah tanah, yang dapat menyebabkan getaran besar, sehingga terjadi runtuh batuan atau tanah sekitar kegiatan.
3. Bencana gempa bumi disebabkan pengisian (*impounding*) bendungan. Kejadian

gempa bumi ini banyak dipengaruhi oleh merapatnya pori-pori batuan sedimen porus (banyak pori-pori). Batuan porus ini terisi air bendungan kemudian retak-retak ketika masih berada dalam kisaran elastis. Proses ini lebih dikenal sebagai kegagalan getas (*brittle failure*). Contoh gempa bumi saat pengisian Bendungan Saguling (Jawa Barat) tanggal 4 Oktober 1985. Kondisi batuan di Bendungan Saguling sangat didominasi batuan-batuan sedimen porus (pasir dan kapur), yang dasarnya berupa batuan lempung (*clay*) tidak porus. Di samping gempa bumi runtuan juga ada bencana ikutan, yaitu kerusakan bangunan, tanah retak, dan terdengar suara gemuruh seperti air mendidih di dalam sumur-sumur gali penduduk di sekitar lokasi Bendungan Saguling.

3.1.1.4. Karakteristik gempa bumi dan bahaya ikutan (*collateral hazards*)

Gempa bumi merupakan getaran pada kulit bumi yang disebabkan oleh proses pelepasan energi. Energi yang dilepaskan bisa berasal dari kegiatan sesar/patahan di darat atau di laut, atau gerakan penunjaman/penukikan/subduksi, serta tumbukan lempeng-lempeng litosfer. Peristiwa alam tersebut menimbulkan bahaya berupa gempa bumi. Bahaya-bahaya yang menimbulkan bencana, yang biasa mengikuti suatu peristiwa gempa bumi menurut Phivolcs (1990) berupa guncangan tanah, geseran tanah, dan tsunami. Proses kejadiannya sebagai berikut.

1. Guncangan tanah (*ground-shaking*), yaitu pada saat terjadi gempa bumi semua yang ada di permukaan tanah bergetar, namun dengan dampak yang berbeda-beda, tergantung kondisi (sifat fisik) tanah. Guncangan tanah ini penyebab utama kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa bumi. Dampak samping dari guncangan tanah dapat berupa tanah longsor, retakan/pencelahan tanah (*lateral spreading*), dan likuifiksi. Dampak samping tersebut berada sekitar (50-100) km atau lebih dari *epicentrum*, yaitu
 - 1) Tanah longsor pada daerah yang berlereng curam dan terletak pada zone pemisah. Bencana ini dapat menimbulkan terpotongnya jalan, tertimbunnya struktur bangunan, aliran lumpur, terbendungnya sungai, terisolasinya perkampungan, hancurnya lingkungan, dan kekacauan sosial-ekonomi;
 - 2) Retakan/pencelahan tanah (*lateral spreading*) wilayah pantai **Gambar 3.12.** pada daerah-daerah lingkungan sungai dan pantai. Lingkungan sungai yang

terkena dampak gempa bumi umumnya di bantaran sungai, dan daerah-daerah reklamasi. Efek samping lainnya biasa terjadi pencelahan atau penurunan tanah. Contoh pantai utara Jakarta telah terjadi penurunan tanah di sekitar Sunda Kelapa. Amblesan atau penurunan tanah (*land subsidence*) dibuktikan dari bangunan gapura di Sunda Kelapa, Jakarta Utara. Pintu gapura semula setinggi lebih dari 4 meter (dapat untuk keluar masuk truk besar, namun saat ini ketinggiannya hanya sekitar 1 meter. Periksa Gambar 3.12. (kiri), bandingkan dengan orang yang berdiri sekitar 2 meter di depan pintu gerbang (wilayah diberi pagar karena sudah tergenang air dan berbahaya). Kemungkinan bencana lainnya berupa kemiringan bangunan (tidak stabil) dan robohnya jembatan. Lingkungan pantai yang rawan *lateral spreading* adalah daerah gump pasir pantai (*sand dunes*). Contoh yang terjadi di pantai selatan Yogyakarta (pantai Parang Tritis), yang merupakan gump pasir yang masih dinamis, banyak bangunan yang tertimbun pasir akibat *lateral spreading* dan proses eolian atau proses angin periksa Gambar 3.12. (kanan atas).

- 3) Likuifiksi adalah proses perubahan tanah granular jenuh, dari keadaan seperti padat/*solid-like* menuju keadaan cair akibat turunnya tegangan efektif tanah. Turunnya tegangan efektif tersebut menyebabkan tanah kehilangan kekuatan gesernya sehingga berperilaku seperti cairan *fluida*. Proses *likuifiksi* akibat guncangan gempa banyak terjadi di lingkungan sungai, zone-zone pantai tua yang lebar atau luas dan di lingkungan rawa. Lingkungan sungai yang terkena dampak *likuifiksi* adalah lingkungan delta sungai, bantaran sungai, endapan rawa tua dan muda, daerah reklamasi, daerah bentukan laguna, terjadinya lumpur-lumpur pasir (*sand-boils*).



Gambar 3.12. *Lateral spreading* wilayah pantai

2. Geseran/patahan tanah (*ground-faulting/surface-faulting*) merupakan pergeseran tanah akibat gempa bumi, terutama di daerah yang terletak di sepanjang dan dekat dengan sesar/patahan aktif. Pergeseran biasanya mengikuti jejak sesar gempa bumi sebelumnya. Efek samping adalah terjadinya tanah longsor, penurunan tanah, dan *likuifiksi*;
3. Tsunami adalah gelombang pasang laut atau gelombang panjang yang timbul karena adanya perubahan dasar laut atau perubahan badan air, yang terjadi tiba-tiba akibat peristiwa ikutan gempa bumi di dasar samudra atau pantai, erupsi gunung api, longsoran bawah laut, bahkan runtuhnya gunung es. Kerusakan akibat tsunami ini sangat dahsyat, memporak porandakan wilayah yang di terjangnya seperti permukiman dan infrastruktur yang ada di wilayah pesisir.

3.1.2. Pantauan dan Penilaian Bencana Gempa Bumi

Pantauan merupakan pengamatan dari catatan sejarah kejadian gempa bumi. Catatan kejadian sebelum dan sesudah terjadi bencana, yang menggambarkan atau menilai sampai seberapa besar kerusakan dan kerugian yang diakibatkan oleh bencana tersebut. Dengan mengetahui catatan sejarah, maka para ilmuwan dapat mengetahui tempat-tempat yang rawan terhadap bencana gempa bumi. Pemantauan dan penilaian merupakan salah satu usaha mitigasi bencana gempa bumi. Mitigasi

bencana gempa bumi merupakan kegiatan untuk memproteksi penduduk terhadap dampak bilamana terjadi gempa bumi di kemudian hari, sehingga dapat mengurangi kerugian dari dampak terjadinya bencana gempa bumi.

Kondisi Indonesia yang aktif secara tektonik, dan sangat banyak terjadi bencana gempa bumi. Hingga saat ini belum ada ilmuwan yang mampu memprediksi secara tepat waktu/kapan terjadinya gempa bumi. Oleh karena itu yang dapat dilakukan adalah usaha mitigasi dengan melakukan

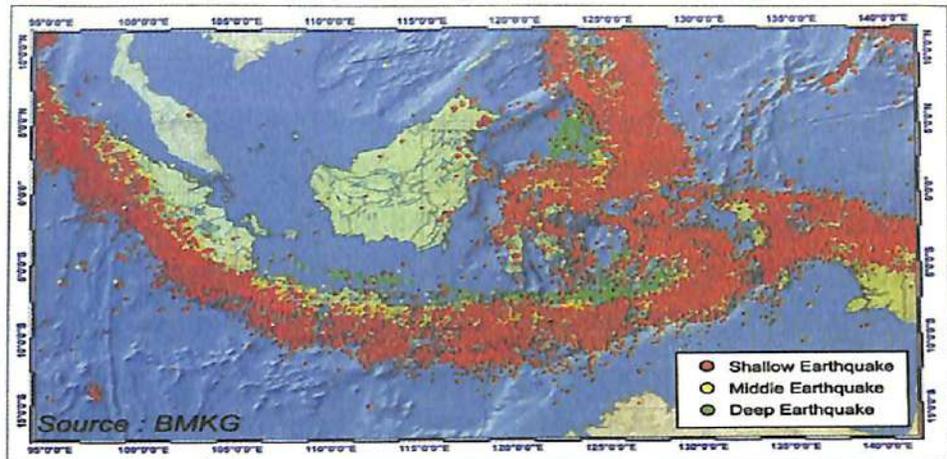
1. Pemetaan wilayah rawan bencana gempa bumi dengan cara mempelajari gempa bumi yang pernah terjadi, melakukan studi pergerakan lempeng tektonik, penelaahan patahan aktif, analisis kerawanan, dan analisis risiko.
2. Pemantauan aktivitas seismic menggunakan seismograf dan alat-alat lainnya.
3. Observasi ilmiah berbasis masyarakat seperti melakukan pengamatan peningkatan kekeruhan air sumur, pencatatan tingkat *gas radon* yang masuk ke dalam sumur.
4. Sosialisasi pada masyarakat mengenai bahaya-bahaya yang berkaitan dengan kesiap siagaan.

Berdasarkan laporan *Committee on Earth Observation Satellites* (CEOS) bahwa kegiatan mitigasi mencakup jenis informasi yang diperlukan untuk mitigasi, kemampuan perolehan informasi dari data penginderaan jauh, penggunaan informasi untuk mitigasi, dan rekomendasi untuk mitigasi bencana gempa bumi (CEOS, 1999). Masing-masing kegiatan dapat diuraikan sebagai berikut.

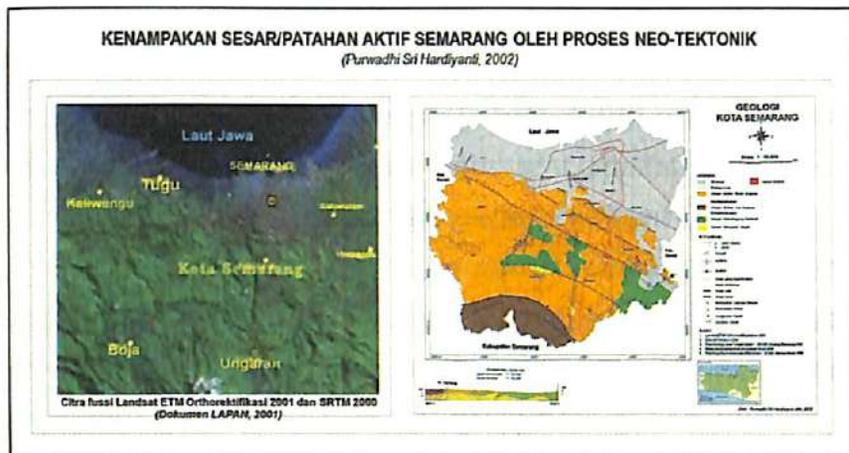
1. Jenis informasi yang diperlukan untuk mitigasi bencana gempa bumi adalah informasi demografi, infrastruktur (jaringan komunikasi, instalasi penting dan berisiko tinggi, rumah sakit, dan pusat-pusat pertolongan), riwayat seismik, neo-tektonik, litologi, lokasi-lokasi yang mempunyai dinamika dan mekanisme yang salah, estimasi renggangan lahan akibat bencana, perkiraan biaya.
2. Kemampuan perolehan informasi dari data penginderaan jauh untuk mitigasi bencana gempa bumi.
 - a. Demografi dan infrastruktur dapat diperoleh dari data penginderaan jauh satelit resolusi tinggi, seperti SPOT Pankromatik, Landsat, digunakan untuk pemetaan daerah yang berada pada zona-zona berrisiko tinggi terhadap bencana, kondisi vegetasi yang rusak dapat dilihat berdasarkan indeks vegetasi, parameter geologi yang dapat diestimasi dari citra radar (ERS, Radarsat, Alos

Palsar), dan sejarah seismik. Data tersebut ditampung dalam basis data SIG dalam layer-layers. Analisis menggunakan algoritma SIG dapat memberikan informasi dengan cepat di mana daerah yang memerlukan pertolongan dan pengelolaan bencana di permukiman penduduk.

- b. Deteksi sebaran tektonik (*tektonic setting*) untuk menaksir sebaran seismiknya dalam suatu basis data. Gambar 3.13. sebaran seismik di Indonesia yang terjadi tahun 1973 – 2007 (BMKG, 2008). Sebaran seismik tersebut menunjukkan sumber gempa bumi dangkal (merah), sumber gempa bumi sedang (kuning), dan sumber gempa bumi dalam (hijau). Beberapa teknik yang melandaskan pada data satelit penginderaan jauh adalah hal-hal yang diperlukan seperti kondisi tektonik dalam suatu wilayah sekitar kejadian dan secara regional, menggunakan satelit geodesi (SLR = *Satellite Laser Ranging, very long base line interferometry*, dan GPS). Penggunaan radar, laser altimetry pada waktu yang akan datang untuk pemetaan identifikasi geografis (geo.id.) dan medan gravitasi di atas lautan. Data satelit telah digunakan termasuk metodenya adalah deteksi medan mekanik untuk mempelajari dan identifikasi daerah tektonik (biasa terjadi gempa tektonik).
- c. Neo-tektonik, seperti halnya *tektonic setting*, dapat menggunakan data penginderaan jauh optik dan radar untuk memperoleh kondisi daerah sesar/patahan aktif dan lipatan yang masih berkembang (*active fault and actively growing folds*) di permukaan bumi, yang dapat menyebabkan kerusakan kondisi topografinya. Contoh pada Gambar 3.14. kenampakan sesar/patahan aktif Semarang dari citra Fussi antara Landsat ETM (2001) dan SRTM (2000) dan peta geologi Kota Semarang.



Gambar 3.13. Sebaran seismik di Indonesia 1978-2007 (Sumber : BMKG, 2008)



Gambar 3.14. Kenampakan sesar/patahan aktif Semarang

- d. Pemetaan patahan atau kelurusan (*lineament*), yaitu dengan mengamati kondisi topografi dan vegetasi menggunakan citra, sehingga dapat mengidentifikasi faktor-faktor seismik dan sumber-sumber aktif di permukaan bumi. Pemetaan kelurusan dari citra penginderaan jauh saat ini merupakan alat yang secara operasional sudah dilaksanakan untuk deteksi daerah-daerah rawan/rentan kejadian gempa bumi. Umumnya digunakan citra penginderaan jauh yang direkam menggunakan panjang gelombang sinar tampak dan inframerah dengan resolusi kurang dari 10 meter. Citra InSAR (hasil produk data NDVI-AVHRR dengan *Quick look* koherensi, dan basis data hasil VHR optik). Citra InSAR *L band* (resolusi 10 meter atau lebih kecil) telah dianjurkan untuk

- pemetaan gerakan dan kelurusan yang dinamis dengan pergeseran sangat kecil (1-2 mm per tahun).
- e. Mekanisme gempa bumi dideteksi dengan pemetaan *co-seismic* untuk mengetahui penyebab terjadinya *displacement* sampai dengan resolusi dalam satuan cm. Deteksi dapat dilakukan menggunakan data InSAR. Data InSAR merupakan kunci untuk mendeteksi mekanisme gempa bumi, sehingga dapat diprediksi risiko atau bahaya gempa bumi yang kemungkinan akan terjadi. Metodanya sudah berstatus operasional:
3. Penggunaan informasi yang diperoleh dari penginderaan jauh untuk mitigasi bencana gempa bumi dapat mencakup beberapa kegiatan adalah
 - a. Perencanaan bangunan dan pembuatan peraturan untuk penempatan bangunan
 - b. Mitigasi dilaksanakan dan tanggung jawab pemerintah
 - c. Pemerintah melalui lembaga-lembaga yang terkait (baik milik negara maupun swasta), yang berhubungan dengan analisis dan jenis dampak gempa bumi, yaitu :
 - i. Badan nasional maupun daerah, yang mungkin melakukan koordinasi dan pengelolaan bencana
 - ii. Lembaga-lembaga penelitian
 - iii. Industri asuransi
 - iv. Konsultan-konsultan pengelola risiko bencana
 - v. Perusahaan swasta (untuk mengurangi dampak kerugian dan kehilangan).
 4. Rekomendasi penggunaan penginderaan jauh untuk mitigasi bencana gempa bumi (CEOS, 1999)
 - a. Basis data global dari zona berisiko seismik agar diperluas dan diintegrasikan dengan distribusi populasi, sejarah seismik, geologi yang relevan, *constrain* yang diketahui, tingkatan risiko, dan koherensi hasil estimasi InSAR (hasil produk data NDVI-AVHRR dengan *Quick look* koherensi, dan basis data hasil VHR optik)
 - b. Sistem dan proses dilengkapi dengan SAR data provider untuk optimasi sistem dan memastikan perolehan data yang terbaik untuk analisis InSAR.
 - c. Perlu pengarsipan data SAR yang telah diproses interferometrinya untuk menghasilkan *record* 9 tahun strain di daerah-daerah seismik
 - d. Data SAR provider agar dilengkapi dengan perencanaan akurasi untuk membangun liputan berulang di daerah-daerah seismik.

3.1.3. Prediksi Potensi Bencana Gempa bumi

Aplikasi penginderaan jauh untuk persiapan terjadinya bencana gempa bumi, merupakan prediksi, dan peringatan dini menurut CEOS (1999) adalah prediksi secara efektif dan akurat, yaitu informasi yang diperlukan untuk persiapan akan terjadinya bencana gempa bumi, prediksi, dan peringatan dini, dapat dilakukan adalah.

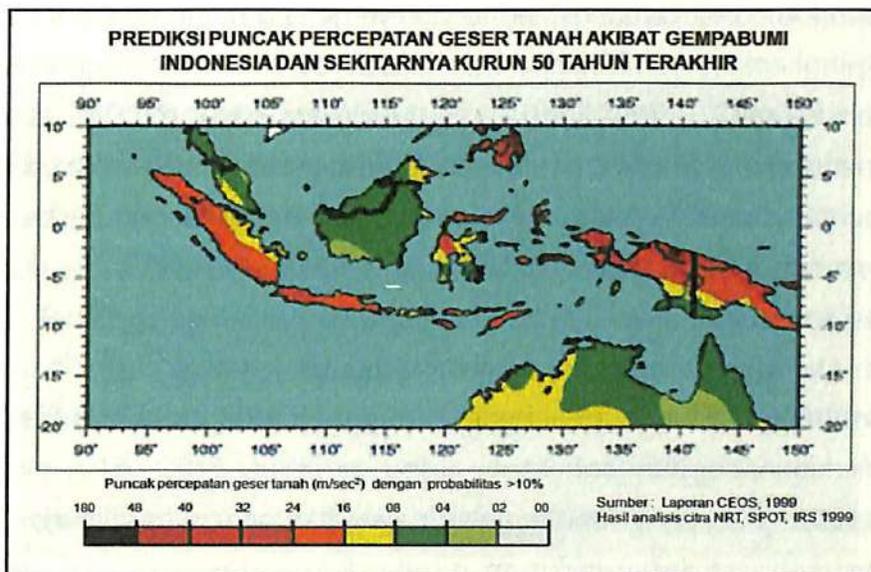
1. Waktu kejadian dengan ketelitian dalam beberapa hari sebelum terjadinya gempa bumi hasil prediksi.
2. Lokasi dan prediksi *epicentrum* dengan ketelitian 15 km. Ketelitian yang diperlukan berbeda-beda tergantung pada tujuan prediksi, yaitu pengumuman sinyal bahaya (*public alerts*), hendaknya mempunyai keakuratan 15 km dari *epicentrumnya*.
3. Besarnya tenaga gempa bumi yang akan terjadi, jarak (magnitude) dan bencana gempa bumi sampai dengan satu unit pengukuran, sedangkan untuk tujuan tertentu dapat dilakukan peringatan dengan ketelitian lebih kecil.

Metode operasional untuk prediksi bencana ini belum ada yang diterima (masih status penelitian), dan teknik-teknik yang sedang diteliti dari reaksi binatang terhadap "*inert gas content of well waters*". Perubahan yang terjadi di dalam medan listrik juga sudah di-"*claim*" menjadi "*precursors*" gempa bumi. Metode perolehan informasi bencana gempa bumi untuk mendukung persiapan terjadinya bencana gempa bumi, prediksi, dan peringatan dini bencana alam gempa bumi, menggunakan sinyal elektromagnetik dan panjang gelombang termal.

Berdasarkan laporan CEOS (1999) Prediksi puncak percepatan geser tanah akibat gempa bumi di Indonesia dan sekitarnya pada kurun waktu 50 tahun terakhir, yang merupakan hasil analisis dari citra NRT (*Near Real Time*), SPOT (*Satellite Probatoire d'opsevation de la Terre*), dan IRS (*India Remote Sensing*) rekaman tahun 1999 (**Gambar 3.15.**). Hasil prediksi puncak percepatan geser tanah (mm/sec) akibat gempa bumi dengan probabilitas > 10 %, sebaran wilayah berikut.

1. Pulau Sumatera bagian barat dan tengah, Pulau Jawa-Bali, Pulau Flores – Sumbawa Timur – Sumba – Timor, Pulau Sulawesi Tengah dan Sulawesi Utara, Kepulauan Maluku, Papua Barat dan Papua bagian utara hingga Papua Nugeni, Phillipina Selatan, dalam kurun waktu 50 tahun terakhir dengan puncak percepatan geser tanah (16-48) mm/sec.

2. Pulau Sumatera bagian timur, Pulau Lombok, Sumbawa Barat, Tanjung Mangkaliat (Gunung Antu) Kalimantan Timur, Sulawesi Barat, Sulawesi Tenggara bagian utara dan lengan timur Sulawesi, Papua dan Papua Nugini bagian tengah selatan, Australia Selatan dan Malaysia baratdaya dan Sabah timur, dalam kurun waktu 50 tahun terakhir menunjukkan puncak percepatan geser tanah antara (8-16) mm/sec.
3. Kalimantan Barat, Kalimantan Selatan, Kalimantan Timur, Kalimantan Utara, Serawak, Sabah, Sulawesi Selatan bagian utara, Sulawesi Tenggara bagian selatan, Papua dan Papua Nugini selatan, Australia bagian utara, dalam kurun waktu 50 tahun terakhir menunjukkan puncak percepatan geser tanah antara (4-8) mm/sec.
4. Kalimantan Tengah bagian selatan (Tanjung Puting dsk), Sulawesi Selatan (Makasar dsk) dalam kurun waktu 50 tahun terakhir menunjukkan puncak percepatan geser tanah antara (2-4) mm/sec.



Gambar 3.15. Prediksi puncak percepatan geser tanah gempa bumi Indonesia dsk
Dalam kurun 50 tahun terakhir (CEOS, 1999)

3.1.4. Pengelolaan Bencana Gempa Bumi

Pengelolaan tanggap darurat dan pasca bencana berupa reaksi cepat, evakuasi, pertolongan, rehabilitasi, rekonstruksi untuk bencana gempa bumi. Pengelolaan tanggap darurat karena harus mempunyai informasi gempa bumi, walaupun masih dalam perkiraan, sehingga penanganan dapat dilakukan dalam beberapa jam setelah terjadi bencana gempa bumi. Informasi tentang terjadinya bencana dan sejarahnya sangat

diperlukan, terutama aspek-aspek penting seperti bangunan- bangunan, infrastruktur, kondisi lingkungan bangunan. Berdasarkan hal tersebut, maka aplikasi penginderaan jauh dan sistem informasi geografis untuk pengelolaan bencana gempa bumi, yang berisi gambaran wilayah dan sejarah bencana gempa bumi dan karakteristiknya, kajian risiko gempa bumi, dan kebijakan pengurangan risiko bencana baik secara administratif, maupun secara teknis.

3.1.4.1. Informasi wilayah bencana gempa bumi

Informasi wilayah bencana dapat membantu pemberian pertolongan dan bermanfaat untuk pembuatan model penaksiran dampak bencana. Model yang berisi data relatif terhadap percepatan seismik berupa data lapisan batuan dasar, jenis tanah, dan kondisi fisik lingkungan lainnya. Data tersebut dapat digunakan untuk mendeteksi kedalaman, kemunculan, dan besarnya tenaga dari kejadian seismik yang digunakan untuk prediksi kemungkinan terjadinya gempa bumi. Model yang dibangun dapat mengungkapkan kemungkinan perluasan dampak dan terjadinya bencana susulan. Oleh karena itu koordinasi basis data (*data base*) mitigasi, prediksi, dan pemulihan perlu dikoordinasikan. Informasi berdasarkan fungsi waktu dan distribusi geografis sangat diperlukan untuk kajian mitigasi bencana gempa bumi. Kriteria informasi tersebut diklasifikasi sebagai berikut.

1. Informasi yang diperlukan untuk pemulihan
 - a. Lokasi, kondisi, dan luas areal bencana;
 - b. Lokasi bangunan atau areal berisiko tinggi terhadap manusia (reaktor nuklir, pabrik kimia, bendungan);
 - c. Perubahan jalan penghubung (jalan rusak, dan pengalihan jalur);
 - d. Lokasi sebaran kemungkinan bencana lain dari dampak gempa bumi (kebakaran, banjir);
2. Penggunaan informasi bencana gempa bumi untuk
 - a. Pelayanan darurat;
 - b. Perwakilan bertugas untuk memberikan pertolongan
 - c. Badan yang bertanggungjawab baik secara lokal maupun nasional;
 - d. Perusahaan asuransi dan konsultan pengelola bencana;
 - e. Badan-badan yang melakukan survei dan pemetaan nasional;

- f. Industri konstruksi;
 - g. Media.
3. Kemampuan perolehan informasi bencana gempa bumi dari data penginderaan jauh. Kemampuan perolehan informasi bencana gempa bumi dari teknologi penginderaan jauh satelit menurut laporan CEOS, 1999 adalah
- a. Pemetaan bencana dengan *metode differensiasi citra NRT (Near Real Time)*, yang ditetapkan dalam mitigasi, maka basis data SIG disiapkan sebagai peta dinamis (bukan statis). Teknik sudah operasional menggunakan data IRS (*India Remote Sensing*) dengan resolusi 5,8 meter. Teknik ini sangat relevan untuk estimasi kerugian karena kerusakan bangunan teridentifikasi.
 - b. Pemetaan medan deformasi menggunakan citra NRT dan InSAR, saat ini sudah status operasional
 - c. Pemetaan bencana terutama lokasi sebaran kemungkinan bencana lain dari dampak gempa bumi antara lain kebakaran dan banjir, dapat dikaji menggunakan citra NRT, SPOT pankromatik, IRS, dan sejak 24 September 1999 digunakan citra IKONOS-2 dengan resolusi spasial 1 (satu) meter. Citra Quickbird dengan resolusi spasial 0,6 meter (60 cm). Status pemetaan masih dalam taraf penelitian, dan sudah disosialisasikan ke negara-negara yang wilayahnya rawan bencana.

Kondisi wilayah secara fisik sangat mudah diperoleh dari citra penginderaan jauh, yaitu tentang penutup/ penggunaan lahan (permukiman, sawah, hutan, perkebunan, dll), bentuk lahan (dataran perbukitan, pegunungan, laut, pulau-pulau kecil), kondisi infrastruktur dan bangunan-bangunan yang bersifat strategis. Contoh pada Gambar 3.16. Citra Quickbird untuk identifikasi bangunan dan infrastruktur yang rusak sesudah gempa bumi Bengkulu tahun 2001 (*Purwadhi, 2001*).

Gambar 3.17. Citra IKONOS untuk identifikasi kerusakan bangunan dan infrastruktur di daerah Sewon, Bantul sesudah bencana gempa bumi Bantul, Yogyakarta tahun 2006. Kerusakan bangunan wilayah Sewon, Bantul sebagian besar rusak parah, bahkan ambruk dan rata dengan tanah. Informasi mengenai sejarah bencana gempa bumi di wilayah Indonesia pada masing-masing daerah dapat peroleh dari data dan informasi bencana di Indonesia (DIBI). Sejarah bencana yang terjadi di Indonesia terekam dalam DIBI dan dapat diakses secara umum (dapat di- *download* di internet).

1. Komponen bahaya gempa bumi disusun berdasarkan parameter intensitas dan probabilitas kejadian gempa bumi.
2. Komponen kerentanan gempa bumi disusun berdasarkan parameter sosial budaya, ekonomi, fisik dan lingkungan.
3. Komponen kapasitas gempa bumi disusun berdasarkan parameter kapasitas regulasi, kelembagaan, sistem peringatan, pendidikan pelatihan keterampilan, mitigasi dan sistem kesiapsiagaan bencana gempa bumi.

Kajian risiko bencana gempa bumi berupa peta risiko dihasilkan mencakup juga peta bahaya gempa bumi, peta kerentanan bencana gempa bumi dan peta kapasitas bencana gempa bumi. Sedangkan dokumen memuat tingkat risiko bencana yang merupakan gabungan dari tingkat kerugian, tingkat ancaman dan tingkat kapasitas bencana gempa bumi.

Kajian risiko bencana gempa bumi diterapkan metode bersifat kualitatif dan kuantitatif. Metode untuk kajian bencana gempa bumi digunakan dalam pengolahan data yang terdiri dari komponen ancaman, kerentanan, dan kapasitas, sehingga dapat diperoleh indeks bencana gempa bumi. Indeks tersebut dijadikan sebagai dasar pembuatan rencana penanggulangan bencana dan peningkatan upaya pengurangan risiko bencana gempa bumi. Contoh kajian risiko bencana gempa bumi di Kabupaten Aceh Besar. Sejarah bencana gempa bumi di Aceh Besar, Provinsi Aceh berdasarkan berdasarkan data dan informasi bencana indonesia yang dipadukan dengan data dari catatan Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Aceh Besar (DIBA, DIBI, BNPB, 2012 dan BPBD Kabupaten Aceh Besar), bencana gempa bumi yang telah terjadi di Aceh Besar sebanyak 2 (dua) kejadian pada rentang waktu 1990 – 2013. Kejadian gempa bumi tersebut di Kabupaten Aceh Besar mengakibatkan 2 (dua) orang meninggal, 4 (empat) orang luka-luka, 660 jiwa mengungsi, 102 bangunan rusak berat, dan 142 bangunan rusak ringan

Gempa bumi Aceh Besar merupakan peristiwa pelepasan energi yang menyebabkan dislokasi (pergeseran) pada bagian dalam bumi secara tiba-tiba di wilayah tersebut. Gempa bumi tektonik akibat pergerakan kulit/lempeng bumi, aktivitas sesar di permukaan bumi atau pergerakan geomorfologi secara lokal. Skala untuk menentukan besarnya gempa bumi dengan skala richter (SR). Intensitas getarannya diukur dengan skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*). Kajian/analisis tingkat ancaman gempa bumi

digunakan matriks tingkat ancaman gempa bumi. Tingkat ancaman gempa bumi dengan memadukan indeks ancaman dan indeks penduduk terpapar. Skala indeks ancaman bencana gempa bumi Kabupaten Aceh Besar dibagi 3 kategori yaitu : rendah (0,0 – 0,3); sedang (> 0,3 – 0,6); tinggi (> 0,6 – 1,0).

Berdasarkan Konferensi pengurangan risiko bencana sedunia (*World Conference for Disaster Reduction/WCDR*) di Kobe, Jepang, pada tanggal 18-25 Januari 2005 dan konferensi asia (*Asian Conference for Disaster Reduction/ACDR*) di Beijing, China, pada tanggal 27-29 September 2005 tentang pengurangan risiko bencana adalah dasar tekad dan program kerja masyarakat sedunia dalam mengurangi risiko bencana, yang melahirkan *Hyogo Framework for Action/HFA* (Kerangka Kerja Aksi Hyogo 2005-2015) yaitu membangun ketahanan bangsa dan komunitas terhadap bencana (*Building the Resilience of nation and communities to disasters*). Konsep HFA telah diadopsi oleh BNPB untuk kajian risiko setiap jenis bencana yang terjadi di Indonesia. Kajian/analisis risiko bencana (13 macam bencana) merupakan gabungan dari kajian ancaman/ bahaya, kajian kerentanan daerah terhadap bencana, dan kajian kapasitas daerah terhadap bencana.

Peta risiko bencana gempa bumi merupakan landasan dalam menentukan kebijakan minimum penanggulangan bencana gempa bumi daerah, untuk mengurangi jumlah penduduk terpapar, kerugian harta benda, dan kerusakan lingkungan. Peta zonasi ancaman (bahaya) gempa bumi disusun berdasarkan parameter Peta SNI Gempa bumi, Jarak dari sesar aktif, Peta MMI 10 tahun, kerapatan patahan, geomorfologi, geologi divalidasi dengan data kejadian sebagai indikatornya. Penentuan rawan ancaman gempa bumi di Aceh Besar, Provinsi Aceh digunakan beberapa parameter ukur seperti Tabel 3.2.

Tabel 3.2.

Parameter peta bahaya gempa bumi

Parameter	Skor			Bobot
	0,333	0,666	1	
Peta SNI Gempa bumi	(pga value < 0,2501)	(pga value 0,2501 – 0,70)	(pga value > 0,70)	40%
Jarak dari Sesar Aktif	10000 m	5000 m	10 m	20%
Peta MMI 10 tahun	< 4 MMI	4 - 7 MMI	> 7 MMI	20%

Parameter	Skor			Bobot
	0,333	0,666	1	
Kerapatan Patahan	< 20 %	20- 40 %	> 40 %	5%
Gemorfologi	– Perbukitan, – Pegunungan	– Dataran aluvial, – Jalur meander	– Dataran banjir, – Dasar lembah	5%
Geologi	sedimen clastik limestone dan sandstone	– Konglomerat, – Kipas aluvial	– Longsor tanah, – Batu gamping	10%

Berdasarkan tabel di atas dapat disimpulkan, bahwa semakin luas area yang masuk dalam zonasi daerah rawan gempa bumi, maka semakin besar ancaman terhadap bahaya gempa bumi di wilayah tersebut. Berdasarkan hasil analisis kajian risiko Kabupaten Aceh Besar, diperoleh kelas bahaya dominan *sedang*. Parameter dan metodologi pemetaan bahaya gempa bumi tingkat kabupaten tersebut ada parameter yang dapat diganti, yaitu parameter geologi dan geomorfologi dapat digantikan PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assesment*) seperti Tabel 3.3., yang telah disusun oleh Badan Informasi Geospasial (BIG), Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM) untuk pemetaan bahaya gempa bumi tingkat kabupaten. PSHA disusun dari parameter geomorfologi dan DEM minimal resolusi spasial 30 meter.

Tabel 3.3. Parameter dan metodologi pemetaan bahaya gempa bumi tingkat kabupaten (BNPB, 2013)

Parameter	Skor			Bobot	Sumber
	0.333	0.666	1		
Peta SNI Gempa bumi	(pga value < 0,2501)	(pga value 0,2501 – 0,70)	(pga value > 0,70)	40%	Tim 9, Kemen. PU
Jarak dari Sesar Aktif	10000 m	5000 m	10 m	20%	Badan Geologi, ESDM
Peta MMI 10 tahun	< 4 MMI	4 - 7 MMI	> 7 MMI	20%	USGS, BMKG
Kerapatan Patahan	tidak ada patahan	Kurang rapat (buffer 1000m satu patahan)	Rapat (dalam buffer 1000 m banyak tampalan patahan)	5%	Badan Geologi ESDM

Parameter	Skor			Bobot	Sumber
	0.333	0.666	1		
PSHA (<i>Probabilistic Seismic Hazard Assesment</i>) dengan parameter penyusun geomorfologi dan Dem minimal resolusi spasial 30 m	< = 0.333	0.334 - 0.666	> 0.666	15%	BIG, Badan Geologi, ESDM

Persentase luas bahaya gempa bumi di Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh dominan 100 % (297.412 Ha) dari luas wilayah Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh. Berdasarkan hal tersebut, maka diperoleh *tingkat bahaya* gempa bumi di Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh adalah *tinggi*. Wilayah rawan ancaman (bahaya) gempa bumi tergambar dalam Peta Bahaya Gempa bumi Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh disajikan pada Gambar 3.18A. Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh terdiri atas 22 kecamatan, yaitu Lhonga, Leupung, Indrapuri, Kuta Cot Glie, Seulimeum, Kota Jantho, Lembah Seulawah, Masjid Raya, Darussalam, Baitussalam, Kuta Baro, Montasik, Blang Bintang, Ingin Jaya, Krueng Barona Jaya, Suka Makmur, Kuta Malaka, Simpang Tiga, Darul Imarah, Darul Kamal, Peukan Bada, Pulo Aceh. Indeks ancaman bencana gempa bumi di Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh per kecamatan secara umum

Tabel 3.4. Berdasarkan tersebut perhitungan kerugian ekonomi Kabupaten Aceh Besar mempunyai kelas

1. Indeks penduduk terpapar bahaya gempa bumi tinggi di Lembah Seluwah 72 jiwa dan di Masjid Raya 19 jiwa, sehingga indeks penduduk terpapar bahaya gempa bumi 102 Jiwa.
2. Indeks penduduk terpapar bahaya gempa bumi sedang (**131623 jiwa**), sehingga indeks kerugian penduduk terpapar **rendah**.
3. Indeks kerugian ancaman bahaya gempa bumi diperoleh dari indeks kelas kerugian dan indeks kelas penduduk terpapar di Kabupaten Aceh Besar pada kelas/tingkat kerentanan **sedang**.

Tabel 3.4.

Indeks Ancaman dan Indeks Penduduk Terpapar Bencana Gempa bumi per kecamatan di Kabupaten Aceh besar (Sumber : Hasil analisis Purwadhi dkk, 2013)

No	Kecamatan	Penduduk Terpapar			Kelas Indeks Dominan Pdd Terpapar	Kelas Dominan Ancaman
		TINGGI	SEDANG	RENDAH		
1	Lhonga	1	4246	0	Rendah	Sedang
2	Leupung	4	468	0	Rendah	Sedang
3	Indrapuri	6	2797	0	Rendah	Sedang
4	Kuta Cot Glie	0	577	0	Rendah	Sedang
5	Seulimeum	0	2626	0	Rendah	Sedang
6	Kota Jantho	0	2168	0	Rendah	Sedang
7	Lembah Seulawah	72	6264	0	Rendah	Sedang
8	Mesjid Raya	19	48076	0	Sedang	Sedang
9	Darussalam	0	10749	0	Sedang	Sedang
10	Baitussalam	0	4015	0	Rendah	Sedang
11	Kuta Baro	0	4070	0	Rendah	Sedang
12	Montasik	0	2166	0	Rendah	Sedang
13	Blang Bintang	0	1785	0	Rendah	Sedang
14	Ingin Jaya	0	5977	0	Rendah	Sedang
15	Krueng Barona Jaya	0	4882	0	Rendah	Sedang
16	Suka Makmur	0	1744	0	Rendah	Sedang
17	Kuta Malaka	0	1069	0	Rendah	Sedang
18	Simpang Tiga	0	613	0	Rendah	Sedang
19	Darul Imarah	0	20979	0	Sedang	Sedang
20	Darul Kamal	0	1270	0	Rendah	Sedang
21	Peukan Bada	0	4683	0	Rendah	Sedang
22	Pulo Aceh	0	399	0	Rendah	Sedang
	ACEH BESAR	102	131623	0	RENDAH	SEDANG

Indeks Kerugian dari ancaman bahaya gempa bumi tersebut diperoleh dari komponen ekonomi, fisik dan lingkungan. Indeks komponen ekonomi tersebut dihitung berdasarkan indikator ancaman bencana gempa bumi dengan rumus :

$$\text{Kerugian Ekonomi} = (0,6 * \text{skor lahan produktif}) + (0,4 * \text{skor PDRB})$$

Indeks kerugian ekonomi dari ancaman bahaya gempa bumi di Kabupaten Aceh Besar dihitung menggunakan rumus diatas sebesar Rp.13.672.511.511.245,- (13,7 triliun), termasuk kelas kerugian tingkat **tinggi** (> 300 Juta). Bahaya gempa bumi Kabupaten Aceh Besar tidak berpotensi untuk merusak lingkungan, sehingga kerusakan lingkungan akibat bahaya gempa bumi dari pengkajian risiko bahaya terhitung tidak ada. Peta sebaran kerentanan bencana gempa bumi Kabupaten Aceh Besar Gambar 3.18.B. dengan kriteria rendah (hijau), sedang (kuning), tinggi (merah).

Penentuan nilai indeks kapasitas Kabupaten Aceh Besar diperoleh dari nilai indeks rata-rata komponen ketahanan HFA (*Hyogo Framework for Action*) dan nilai indeks rata-rata komponen kesiapsiagaan masyarakat seperti pada Gambar 3.18C. Indeks kapasitas bencana gempa bumi di Kabupaten Aceh Besar rata-rata 0,3 (rendah mendekati sedang). Kesiapsiagaan Kabupaten Aceh Besar diukur dengan menganalisis 500 buah kuesioner disebar pada rumah tangga (200 kuesioner), sekolah (5 kuesioner atau 5 sekolah), guru (50) dan murid (145). Berdasarkan pengukuran parameter pencapaian tingkat kesiapsiagaan masyarakat dibagi menjadi 3 tingkatan yaitu: (a) $80 - 100 =$ Kesiapsiagaan Tinggi; (b) $60 - 79 =$ Kesiapsiagaan Sedang; (c) $< 60 =$ Kesiapsiagaan Rendah.

Hasil dari analisis kuesioner tersebut dapat dilihat pada **Tabel 3.5.** maka Total indeks kesiapsiagaan rumah tangga 36,25 (< 60). Komunitas sekolah memiliki total indeks 73,75 (> 60). Hasil kajian nilai indeks ketahanan Kabupaten Aceh Besar diperoleh nilai total prioritas adalah 54 atau < 60 (rendah), berarti Tingkat Ketahanan Kabupaten Aceh Besar dalam menghadapi bencana yang mungkin terjadi pada level 2.

Tabel 3.5.

Hasil kajian komponen ketahanan Kabupaten Aceh Besar

NO	PRIORITAS	TOTAL NILAI PRIORITAS	INDEKS PRIORITAS
1	Memastikan bahwa pengurangan risiko bencana menjadi sebuah prioritas nasional dan lokal dengan dasar kelembagaan yang kuat untuk pelaksanaannya	67.5	3
2	Mengidentifikasi, mengkaji dan memantau risiko bencana dan meningkatkan peringatan dini	51.25	2

NO	PRIORITAS	TOTAL NILAI PRIORITAS	INDEKS PRIORITAS
3	Menggunakan pengetahuan, inovasi dan pendidikan untuk membangun suatu budaya keselamatan dan ketahanan disemua tingkat	36.25	2
4	Mengurangi faktor-faktor risiko yang mendasar	41.25	2
5	Memperkuat kesiapsiagaan terhadap bencana demi respon yang efektif di semua tingkat	73.75	4
TOTAL NILAI PRIORITAS		54	
INDEKS KETAHANAN DAERAH			2

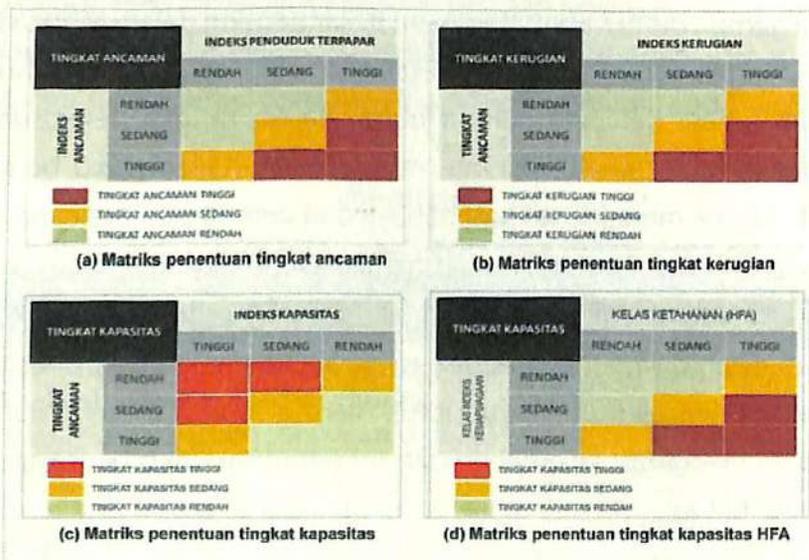
Berdasarkan tabel hasil kajian Tingkat Ketahanan Kabupaten Aceh Besar Kabupaten tersebut, maka wilayah Kabupaten Aceh Besar memiliki ketahanan pada level 2, berarti telah melaksanakan beberapa tindakan pengurangan risiko bencana dengan pencapaian-pencapaian yang masih bersifat sporadis, yang disebabkan belum adanya komitmen kelembagaan dan/atau kebijakan sistematis.

Proses penyusunan peta risiko bencana gempa bumi Kabupaten Aceh Besar diperoleh dengan metode perhitungan berbagai indeks untuk menentukan sifat dan besarnya risiko dengan menganalisis bahaya potensial dan mengevaluasi kondisi kerentanan yang ada dan dapat menyebabkan ancaman atau membahayakan orang, harta benda, mata pencarian, dan lingkungan tempat mereka bergantung. Kajian risiko bencana gempa bumi Kabupaten Aceh Besar penting dalam rangka penyusunan rencana Pengurangan Risiko Bencana (PRB) gempa bumi, untuk mengetahui kerusakan/kebutuhan bila terjadi bencana gempa bumi, dalam rangka penyusunan rencana tindak tanggap darurat, rehabilitasi dan rekonstruksi. Kajian risiko bencana gempa bumi dilakukan untuk mengidentifikasi bahaya dan kerentanan bencana gempa bumi dari suatu daerah yang kemudian menganalisis dan mengestimasi kemungkinan timbulnya potensi ancaman bencana gempa bumi. Selain itu juga untuk mempelajari kelemahan dan celah dalam mekanisme perlindungan dan strategi adaptasi yang ada terhadap bencana gempa bumi, serta untuk memformulasikan rekomendasi realistis langkah-langkah mengatasi kelemahan dan mengurangi risiko bencana gempa bumi yang telah diidentifikasi.



Gambar 3.18. Peta gempa bumi (Bahaya, Kerentanan, Kapasitas, Risiko) Kabupaten Aceh Besar (Purwadhi dkk, 2013; Dok. BNPB, 2013)

Indeks Kapasitas Daerah Kabupaten Aceh Besar ditentukan dengan menggabungkan indeks komponen ketahanan daerah, indeks komponen kesiapsiagaan daerah, dan tingkat ancaman daerah. Disamping itu juga ditentukan Indeks Kapasitas untuk bencana gempa bumi berdasarkan HFA. Perhitungan tingkat ancaman bencana gempa bumi Kabupaten Aceh Besar yang digunakan untuk menyusun tingkat risiko bencana pada **Gambar 3.19.** yaitu tingkat ancaman dan penduduk terpapar (**Gambar 3.19.** kiri atas), Indeks Kerugian (**Gambar 3.19.** kanan atas) dan Indeks Kapasitas (**Gambar 3.19.** kiri bawah), dan ketahanan HFA (**Gambar 3.19.** kanan bawah).



Gambar 3.19. Matrik kajian ancaman, kerugian, kapasitas bencana gempa bumi Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh (Purwadhi dkk, 2013; Dokumen BNPB, 2013)

Hasil kajian matriks Risiko Bencana Gempa bumi Kabupaten Aceh Besar, diperoleh tingkat ancaman dan penduduk terpapar, indeks kerugian, dan indeks kapasitas bencana gempa bumi Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh pada Gambar 3.20. Berdasarkan kajian tersebut, maka sebaran risiko bencana Kabupaten Aceh besar disajikan dalam Peta risiko bahaya gempa bumi Kabupaten Aceh besar pada **Gambar 3.18 D**.

TINGKAT RISIKO BENCANA		TINGKAT KAPASITAS		
		TINGGI	SEDANG	RENDAH
TINGKAT KERUGIAN	RENDAH			
	SEDANG			
	TINGGI			

	TINGKAT RISIKO BENCANA TINGGI
	TINGKAT RISIKO BENCANA SEDANG
	TINGKAT RISIKO BENCANA RENDAH

Gambar 3.20. Matrik kajian risiko bencana gempa bumi Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh (Purwadhi dkk, 2013; Dokumen BNPB, 2013)

3.2. Mitigasi Bencan Tsunami

Bencana tsunami merupakan bencana geologi yang berupa bahaya ikutan (*collateral hazards*) dari bencana gempa bumi tektonik, atau letusan gunung berapi, atau longsor besar yang terjadi di dasar laut. Bencana tsunami akibat dari gempa bumi yang terjadi akibat patahan vertical, baik patahan naik maupun patahan turun yang terjadi di laut dengan kedalaman ribuan meter. Proses terjadinya tsunami oleh gempa bumi di dasar laut karena terjadi akumulasi energy (tegangan) yang mencapai batas ujung lempeng benua dan melenting ke atas sehingga terjadi gelombang besar. Tinggi tsunami saat mendekati pantai akan mengalami pembesaran karena penumpukan massa air akibat adanya penurunan kecepatan penjalaran. Tinggi tsunami yang di laut hanya sekitar 1 – 2 meter, saat mendekati pantai dapat mencapai lebih dari 10 meter. Tinggi tsunami akan mencapai maksimum pada pantai dengan morfologi landai dan berbentuk teluk atau muara sungai. Penyebab terjadinya pusat-pusat gempa tsunami di Indonesia.

1. Kepulauan Indonesia terletak antara dua benua dan dua samudra, dan lokasi ini merupakan interaksi antara tiga lempeng kerakbumi, yaitu
 - a. Lempeng Eurasia (LE) yang merupakan lempeng benua, bergerak dari utara ke selatan,
 - b. Lempeng Samudra Hindia-Australia (LSIA atau Indi-Australia) yang bergerak dari selatan ke arah utara,
 - c. Lempeng Pasifik (LP) yang bergerak dari arah timur ke arah barat/ baratdaya.
 - d. Kedudukan tersebut menjadikan kepulauan Indonesia menjadi kawasan kepulauan yang berpola tektonik kompleks, sehingga banyak terjadi lipatan-lipatan dan patahan-patahan aktif.
 - e. Pergerakan ketiga lempeng yang saling berlawanan menyebabkan terbentuknya sesar-sesar di kepulauan Indonesia. Sesar-sesar tersebut mengakomodasikan komponen tektonik searah dengan batas-batas ketiga lempeng di kepulauan Indonesia.
2. Komponen tektonik tersebut menyebabkan terjadinya interaksi ketiga lempeng dan gerakan patahan aktif, sehingga diikuti kejadian gempa tektonik.
3. Gempa tektonik dapat menimbulkan sesar permukaan, guncangan/ gerakan tanah, tsunami, dan kebakaran di kepulauan Indonesia. Peta pusat gempa tsunami yang menunjukkan arah gerakan ketiga lempeng, dan pusat patahan naik di Indonesia

Pergerakan ketiga lempeng yang saling berlawanan menyebabkan terbentuknya sesar-sesar/patahan-patahan di Kepulauan Indonesia. Sesar-sesar tersebut yang mengakomodasikan komponen tektonik searah dengan batas-batas ketiga lempeng di Kepulauan Indonesia. Komponen tektonik menyebabkan terjadinya interaksi ketiga lempeng dan gerakan patahan aktif, sehingga diikuti kejadian gempa bumi tektonik. Gempa bumi tektonik dapat menimbulkan sesar permukaan, guncangan/gerakan tanah, tsunami, kebakaran di Kepulauan Indonesia. Peta pusat gempa bumi yang memicu tsunami menunjukkan arah gerakan ketiga lempeng, dan pusat patahan naik di Indonesia pada **Gambar 3.21**.



Gambar 3.21. Arah gerakan lempeng dan pusat gempa tsunami
(Bakornas PB, 2001 dengan penambahan)

3.2.1. Pengertian dan Karakteristik Bencana Tsunami

Tsunami adalah gelombang laut yang terjadi akibat adanya deformasi dasar laut secara tiba-tiba. Deformasi dasar laut dapat diakibatkan oleh gempa bumi tektonik, letusan gunung berapi, atau longsor besar yang terjadi di dasar laut, serta komet yang jatuh ke laut. Tsunami berasal dari bahasa Jepang, yaitu *tsu* = pelabuhan dan *nami* = gelombang besar. Tsunami merupakan gelombang panjang, dengan panjang gelombang yang dapat mencapai 100 km. Panjang gelombangnya jauh lebih besar bila dibandingkan dengan kedalaman laut, maka tsunami sering dianggap sebagai gelombang perairan dangkal (*shallow water wave*). Gelombang tsunami menjalar dengan kecepatan sesuai dengan kedalaman laut. Kecepatan akan menjadi mengecil dengan berkurangnya kedalaman laut atau sebaliknya akan membesar dengan bertambahnya kedalaman laut. Kecepatan perjalanan tsunami dapat melebihi 700 km/jam pada laut dengan kedalaman sekitar 4000 meter (KNRT, 2007).

Tsunami yang diakibatkan oleh gempa bumi terjadi akibat patahan vertikal, baik patahan naik maupun patahan turun yang terjadi di laut dengan kedalaman mencapai ribuan meter. Proses terjadinya tsunami di dasar laut akibat terjadinya akumulasi energi (tegangan), dan saat tegangan mencapai batasnya, ujung lempeng benua melenting ke atas dan menyebabkan gempa bumi yang disertai tsunami. Tinggi gelombang tsunami saat mendekati pantai akan mengalami pembesaran atau peningkatan di daerah teluk, menimbulkan arus sejajar pantai, menggerus dasar laut, dan daerah muara sungai. Hal itu karena adanya penumpukan (terakumulasi) massa air akibat adanya penurunan penjalaran.

Tinggi tsunami di laut hanya sekitar (1-2) meter, saat mendekati pantai dapat mencapai puluhan meter. Kejadian semacam ini terjadi pada kasus tsunami di Teluk Pancer, Banyuwangi 2 Juni 1993 di mana tinggi tsunami hingga mencapai 14 meter. Kejadian di Teluk Korem, Biak, Papua 17 Februari 1996, yang mencapai ketinggian 12 meter, serta kejadian di kota Banda Aceh tanggal 26 Desember 2004 ketinggian tsunami sekitar 14 meter. Jarak jangkauan tsunami ke daratan sangat ditentukan oleh terjal dan landainya morfologi pantai. Pantai yang terjal tsunami tidak akan terlalu jauh ke daratan karena tertahan dan dipantulkan kembali oleh tebing pantai.

Di Indonesia tsunami umumnya terjadi dengan ditandai adanya gempa bumi yang merupakan guncangan dengan suara gemuruh dari arah laut, dan disusul dengan surutnya air laut dengan tiba-tiba, kemudian diikuti gelombang besar. Energi gelombang tsunami biasanya terakumulasi dan meningkat pada daerah teluk, menimbulkan arus sejajar pantai, menggerus dasar laut, dan daerah muara sungai.

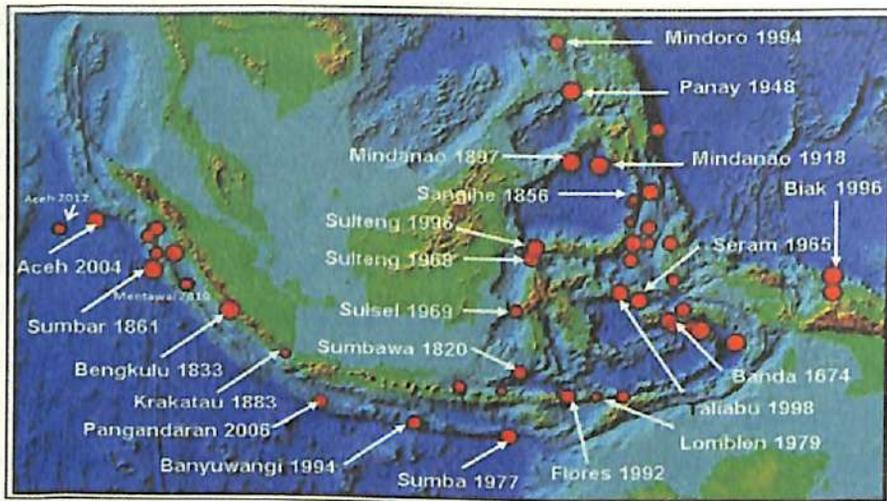
Bencana tsunami disebabkan oleh letusan gunung api yang menyebabkan gelombang terjadi di Indonesia saat letusan Gunung Krakatau 1883, yang mengakibatkan korban sangat besar. Bencana tsunami yang pernah terjadi di Indonesia baik yang disebabkan oleh gempa bumi tektonik maupun gempa bumi letusan gunung api dari tahun 416 – 2005 sebarannya digambarkan dalam peta **Gambar 3.22**.



Gambar 3.22. Bencana Tsunami di Indonesia tahun 416-2005
(Bakornas PB, 2001 dengan penambahan)

Catatan sejarah tsunami di Indonesia menunjukkan bahwa kurang lebih 172 tsunami yang terjadi dalam kurun waktu antara tahun 1600 – 2005. Berdasarkan sumber pembangkitnya diketahui bahwa 90% dari tsunami tersebut disebabkan oleh aktivitas gempa bumi tektonik, 9% akibat aktivitas vulkanik dan 1% oleh tanah longsor yang terjadi dalam tubuh air (danau atau laut) maupun longsor dari darat yang masuk ke dalam tubuh air. Dalam dua dekade terakhir terjadi sedikitnya sepuluh kejadian bencana tsunami di Indonesia. Sembilan di antaranya merupakan tsunami yang merusak dan menimbulkan korban jiwa serta material, yaitu tsunami di Flores (1992); Banyuwangi, Jawa Timur (1994); Biak (1996); Maluku (1998); Banggai; Sulawesi Utara (2000); Aceh (2004); Nias (2005); Jawa Barat (2006); Bengkulu (2007); dan Mentawai (2010). Dampak yang ditimbulkan tsunami tersebut sekitar 170 ribu orang meninggal dunia. Lokasi kejadian tsunami di Indonesia antara tahun 1600 – 2005 seperti pada **Gambar 3.23**.

Dalam Masterplan Pengurangan Risiko Bencana Tsunami (BNPB, 2012) dikatakan bahwa dengan menyadari tingginya tingkat kerawanan dan kerentanan terhadap tsunami, Indonesia telah berupaya meningkatkan kesiapsiagaan dalam menghadapi tsunami dengan membangun *Indonesia Tsunami Early Warning System (Ina-TEWS)* yang diprakarsai oleh Kementerian Koordinator Bidang Kesejahteraan Rakyat; Kementerian Riset dan Teknologi (Kemen Ristek); Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG); Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT); Badan Informasi Geospasial (BIG)¹; dan berbagai instansi terkait lainnya dengan dibantu oleh beberapa negara sahabat seperti Jerman, Australia, Jepang, Amerika Serikat, dan China. *InaTEWS* telah diresmikan penggunaannya oleh Presiden RI pada tanggal 11 September 2011 dengan berpusat di BMKG. Dix samping untuk memberikan peringatan tsunami di Indonesia, *InaTEWS* juga menjadi sumber informasi untuk negara-negara di kawasan pantai Lautan Hindia. Informasi Perkembangan Teknologi Kelautan untuk pemantauan tsunami disosialisasikan pada Lustrum V FTM Usakti (Anugrahadi, dkk, 2005).



Gambar 3.23. Lokasi kejadian tsunami di Indonesia tahun 1600 – 2005 (BNPB, 2012)

Berdasarkan hasil analisis risiko, (BNPB, 2012), teridentifikasi empat kawasan utama yang memiliki risiko dan probabilitas tsunami tinggi. Keempat kawasan tersebut adalah (1) Megathrust Mentawai; (2) Megathrust Selat Sunda dan Jawa bagian selatan; (3) Megathrust selatan Bali dan Nusa Tenggara; (4) Kawasan Papua bagian utara, yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Megathrust Mentawai adalah bagian dari zona penunjaman Sumatera yang merupakan pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Kawasan ini merupakan daerah yang memiliki tingkat seismisitas yang sangat tinggi dan menjadi sumber dari beberapa gempa bumi besar dengan magnitudo lebih dari 8 SR | bahkan hingga mencapai 9,3 SR | dengan periode ulang ratusan tahun. Dalam dua abad terakhir tercatat ada empat gempa bumi besar yang terjadi di zona penunjaman Sumatra, yakni pada tahun 1833 dengan magnitudo 8,8{9,2 SR; pada tahun 1861 dengan magnitudo 8,3{8,5 SR; pada tahun 2004 dengan magnitudo 9,0{9,3 SR; dan pada tahun 2005 dengan magnitudo 8,7 SR.
2. Selat Sunda terletak pada kawasan transisi antara segmen Sumatera dan segmen Jawa dari Busur Sunda, yang juga merupakan daerah di Indonesia yang sangat aktif dalam hal aktivitas vulkanik, kegempaan dan pergerakan tektonik vertikal. Letusan Gunung Krakatau yang terjadi pada tahun 1883 terjadi di tengah Selat Sunda dan memicu tsunami di pesisir Lampung bagian selatan serta bagian utara dan barat Banten. Sementara itu, dalam hal zona penunjaman di selatan Pulau

Jawa, segmen Jawa dari Busur Sunda yang memanjang dari Selat Sunda sampai Cekungan Bali di Timur. Tercatat tiga gempa bumi besar terjadi di zona ini pada tahun 1840, 1867, dan 1875. Dalam tiga ratus tahun terakhir belum ada gempa bumi Megathrust dengan skala sebesar gempa bumi tahun 1833 dan 1861 di Sumatra yang terjadi di kawasan ini. Bila terjadi gempa bumi besar di segmen Megathrust Selat Sunda, daerah yang paling terancam tsunami adalah kawasan industri di Kota Cilegon. Bila kawasan industri di kota ini terkena tsunami, dikhawatirkan akan terjadi bencana susulan dalam bentuk kegagalan teknologi seperti penyebaran bahan kimia berbahaya yang dapat mengancam masyarakat. Sementara itu, gempa bumi besar yang terjadi di zona penunjaman di Jawa bagian selatan dikhawatirkan akan memicu tsunami yang dapat menimpa daerah Pantai Pangandaran, daerah Cilacap dengan kilang-kilang minyaknya, dan pantai-pantai lain di selatan Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

3. Daerah-daerah yang termasuk dalam Provinsi Bali, Nusa Tenggara Barat, dan Nusa Tenggara Timur juga memiliki tingkat aktivitas gunung api dan gempa bumi yang tinggi. Pada tahun 1816 tercatat ada kejadian gempa bumi dan tsunami di Bali yang menelan korban 10.253 korban tewas dan berulang kembali pada tahun 1917 dengan korban lebih dari 1.300 jiwa. Sementara Tsunami Flores pada 12 Desember 1992 menelan hingga 2.500 korban jiwa. Daerah yang terpapar tsunami di Kawasan Bali dan Nusa Tenggara mencapai 32 kabupaten/kota dengan jumlah penduduk terpapar 325.411 jiwa
4. Kawasan Papua juga memiliki sejarah panjang dalam hal ancaman gempa bumi dan tsunami. Tahun 1864 terjadi gempa bumi besar yang diikuti dengan tsunami di Teluk Cendrawasih yang menelan korban sekitar 250 orang tewas. Tahun 1914 terjadi tsunami di Pulau Yapen yang menelan korban beberapa orang tewas. Data terakhir menunjukkan bahwa pada tahun 1996 terjadi tsunami di Biak yang menelan korban 107 orang tewas. Bila terjadi tsunami di kawasan ini, kota yang paling terancam adalah Kota Sorong dan Kota Jayapura yang memiliki tingkat kepadatan penduduk tinggi.

3.2.2. Pemantauan dan Penilaian Bencana Tsunami

Di Indonesia tsunami sebagian besar terjadi karena gempa bumi yang pusatnya di dekat pantai. Bencana tsunami dapat dipantau sejauh gempa bumi yang menyebabkannya tidak dekat. Sedangkan sebaran wilayah-wilayah potensi terjadinya tsunami dapat dibuat zonasi dengan modifikasi model prediksi potensi bencana menggunakan teknologi yang saat ini banyak digunakan, yaitu integrasi antara teknologi penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG). Pantauan dan penilaian bencana tsunami dilakukan dengan metode pendekatan survei geografis dan teknik penginderaan jauh. Kajian dilakukan dengan menggunakan perangkat sistem informasi geografis (SIG) dengan tahapan, yaitu.

1. Mengidentifikasi karakteristik geologi dengan menggunakan pendekatan geomorfologi genesis atau genetika geomorfologi. Pendekatan ini merupakan proses terjadinya dan dinamika kerak bumi, meliputi analisis sejumlah gempa yang terjadi pada kurun waktu tertentu. Analisis sejarah geologi yang dievaluasi dengan mempertimbangkan berbagai faktor geologi, terutama yang menyangkut stratigrafi, tektonik batuan, morfologi (relief), karakteristik pantai, dan keterkaitan dengan proses dominan yang terjadi.
2. Analisis intensitas tingkat terjadinya bencana, jenis serta terjadinya, dengan pendekatan faktor yang mempengaruhi seperti lithologi, sifat fisik batuan, kemiringan lereng, dan parameter kegempaan (kekuatan, kedalaman, jarak, kecepatan, percepatan gempa satu dengan lainnya).
3. Pemetaan karakteristik wilayah sebaran penutup/penggunaan lahan sebelum dan sesudah terjadinya bencana tsunami menggunakan penginderaan jauh multi temporal, untuk mengkaji kerusakan akibat bencana tsunami.

3.2.2.1. Pendekatan geomorfologi genesis untuk bencana tsunami

Pendekatan geomorfologi genesis/genetik atau fisiognomik merupakan salah satu pendekatan dalam kajian geografi, yang menekankan perkembangan dan perubahan bentuk lahan, yaitu studi genesa dan evolusi bentuk lahan, yang dihubungkan dengan bencana tsunami. Studi ini mencakup geologi struktur dan geologi lapangan, mineralogi dan petrografi, geomorfologi daerah. Daerah jalur tumbukan antara ketiga lempeng (Eurasia, Indi-Australia, dan Pasifik) disebut *mikrokontinen* di Indonesia sudah dijelaskan dalam gempa bumi.

1. Karakteristik geologi didekati dari geomorfologi genesis, di mana genetika geomorfologi atau proses terjadinya dan dinamika kerak bumi, meliputi analisis sejumlah gempa yang terjadi pada kurun waktu tertentu. Analisis sejarah geologi dievaluasi dengan dari berbagai faktor geologi, yaitu stratigrafi dan tektonik batuan, morfologi (relief), karakteristik pantai, hubungan proses genesa dominan dari kerak bumi yang terjadi.
2. Analisis intensitas tingkat terjadinya bencana, jenis serta terjadinya, didekati dengan faktor yang mempengaruhinya seperti lithologi, sifat fisik batuan, kemiringan lereng, parameter kegempaan (jarak, kekuatan, kedalaman, kecepatan, percepatan antar gempa yang satu dengan lainnya).
3. Pemetaan karakteristik wilayah sebaran penutup lahan sebelum dan sesudah terjadinya bencana tsunami dapat dilakukan dengan menggunakan penginderaan jauh multi temporal, untuk mengkaji kerusakan akibat bencana tsunami.

Sebaran tsunami mendasarkan pada bentuk lahan atau morfologi yang landai dan dan berlekuk yang dekat dengan garis pantai (teluk, muara sungai). Asumsi yang digunakan adalah semua bentuk lahan yang prosesnya dipengaruhi aktivitas gelombang laut (marin) dan kemiringan lerengnya datar landai dan berlekuk merupakan area rawan tsunami. Asumsi ini tidak sepenuhnya langsung dapat diterima mengingat pada bentuk lahan yang sama dengan kemiringan lereng yang sama potensi ancaman tsunaminya dapat berbeda jika jaraknya dengan garis pantai berbeda. Karakteristik bentuk lahan fluvial dan bentukan marin dianggap berpotensi rawan bahaya tsunami adalah:

1. Jarak dari garis pantai kurang dari 1,5 km potensi ancaman tinggi; Jarak (1,5 – 3,5) km dari garis pantai untuk potensi sedang; jarak dari garis pantai (3,5 - 7,5) km untuk potensi rendah.
2. Menurut HFA (2009) ketinggian kurang dari 1 meter potensi ancaman tinggi; ketinggian (1-3) meter potensi ancaman sedang; dan ketinggian > 3 meter ancaman rendah. Namun bencana di Indonesia saat tsunami Aceh tahun 2004 dan tahun 2012 ketinggian lebih dari 10 meter. Proses delineasi ketinggian dari citra penginderaan jauh **Gambar 3.24**.

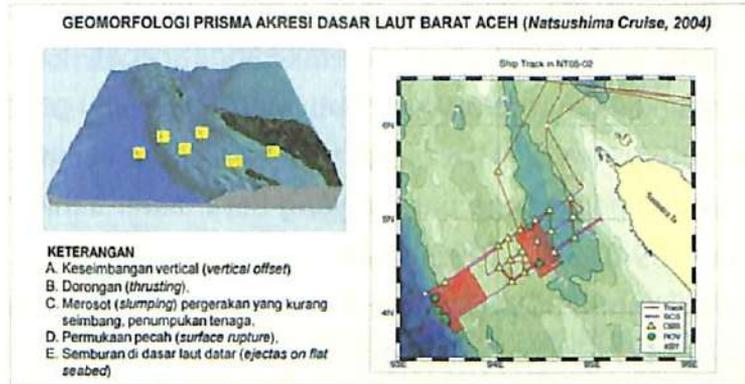


Gambar 3.24. Proses delineasi ketinggian dari citra penginderaan jauh Lokasi Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh (Purwadi dkk., 2012)

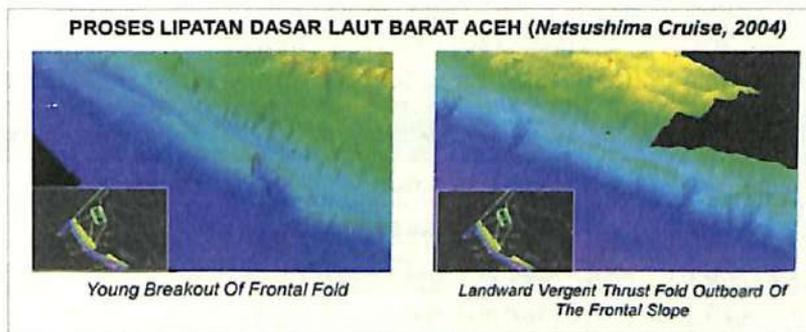
Kajian geomorfologi prisma akresi yang naik kepermukaan laut sebagai pulau prisma akresi pada tsunami Aceh 26 Des 2004, yang diukur menggunakan Sonar oleh survei pelayaran Natsushima (Surveyed Area Of Rv Natsushima Cruise) , kondisi lokasi yang rusak akibat tenaga gempa bumi yang merusak dasar laut pada **Gambar 3.25.** antara lain

1. Lokasi Dengan Keseimbangan Vertical (*vertical offset*) kode A
2. Lokasi yang mengalami gaya dorong (*thrusting*) kode B
3. Lokasi pergerakan yang kurang seimbang, penumpukan tenaga, dan merosot (*slumping*) kode C
4. Lokasi dengan permukaan pecah (*surface rupture*) kode D
5. Lokasi dengan semburan di dasar laut datar (*ejectas on flat seabed*) kode E

Gambar 3.26. menunjukkan kondisi lokasi dasar laut yang mengalami proses pelipatan muda akibat kerusakan (kelolosan) tenaga frontal (*young breakout of frontal fold*) akibat gempa bumi Aceh tahun 2004 pada Gambar 3.26. (kiri), sedangkan lokasi yang mengalami lipatan luar dengan daya dorong tikaman ke darat akibat gempa bumi, sehingga terjadinya lereng frontal (*landward vergent thrust fold outboard of the frontal slope*) pada **Gambar 3.26.** (kanan).



Gambar 3.25. Kondisi geomorfologi prisma akresi dasar laut sebelah barat Aceh (Surveyed Area Of Rv Natsushima Cruise, 2004)



Gambar 3.26. Kokasi Lipatan dasar laut barat Aceh (Surveyed Area Of Rv Natsushima Cruise, 2004)

3.2.2.2. Intensitas gempa bumi dan tsunami di Indonesia

Gempa bumi terjadi sebagai akibat dari terlepasnya energi yang tersimpan dalam bumi pada batas-batas lempeng kerak bumi, di tengah-tengah lempeng tidak ada gempa kecuali beberapa pengecualian. Terlepasnya energi direfleksikan sebagai gerakan tiba-tiba atau dapat juga berupa serentetan gerakan mendadak dari batas lempeng yang bersifat transit dan berasal dari suatu region terbatas yang menyebar kesegala arah. Zone sumber gempa dibuat berdasarkan adanya kesamaan tektonik dan pola struktur geologi serta seismisitasnya (kedalaman gempa, kekuatan, dan periode) Pembagian Zone sumber gempa patahan aktif di Indonesia dibagi dalam 18 (delapan belas) zone, telah diungkapkan di atas.

Pembuatan zonasi sangat bermanfaat dan merupakan salah satu syarat utama dalam penentuan awal sebaran potensi bencana gempa bumi maupun tsunami. Tsunami terjadi karena adanya gempa bumi yang disebabkan oleh proses tektonik

maupun letusan gunung api. Tsunami merupakan gelombang pasang mampu menempuh jarak yang sangat jauh dan bergerak sangat cepat. Tsunami tidak selalu hanya sebuah gelombang, tetapi merupakan suatu rangkaian, yaitu gelombang pertama, kedua, ketiga dan seterusnya. Wilayah Indonesia yang pernah mengalami bencana tsunami dengan dengan gelombang pasang yang besar akhir-akhir ini adalah di NTT (1992), Jawa Timur (1994), Biak (1996), P. Banggai, Sulteng (2000), Aceh (2004), P. Mentawai, Sumatera Utara (2005). **Tabel 3.6.** menunjukkan pusat gempa penyebab tsunami dan *run-off maximum* gelombang tsunami di Indonesia tahun 1961-2005.

Tabel 3.6.

Pusat Gempa Penyebab Tsunami dan *Run-off Maximum* Gelombang Tsunami di Indonesia Tahun 1961-2005 (Sumber : Subandhono, 2004 dengan modifikasi)

Tahun	Pusat Gempa	Run-Up Maximum (m)	Daerah Bencana
1961	8,2 LS; 122BT	Tidak ada data	NTT, Flores Tengah
1964	5,8 LU; 95,6 BT	Tidak ada data	Sumatra
1965	2,4 LS; 126 BT	Tidak ada data	Maluku, Seram, Sanana
1967	3,7 LS; 119,3 BT	Tidak ada data	Tinambung Sulsel
1968	0,7 LU; 119,7 BT	8 - 10	Tambo Sulteng
1969	3,1 LS; 118,8 BT	10	Majene Sulsel
1977	11,1 LS; 118,5 BT	Tidak ada data	NTB, Pulau Sumbawa
1977	8 LS; 125,3 BT	Tidak ada data	NTT, Flores, P. Atauro
1979	8,4 LS; 115,9 BT	Tidak ada data	NTB, Sumbawa, Bali, Lombok
1982	8,4 LS; 123 BT	Tidak ada data	NTT, Larantuka
1987	8,4 LS; 124,3 BT	Tidak ada data	NTT, Flores Timur, P. Pantar
1989	8,1 LS; 125,1 BT	Tidak ada data	NTT, P. Alor
1992	8,5 LS; 121,9 BT	11,2 - 26,2	NTT, Flores, P. Babi
1992	0,5 LS; 136 BT	10-15	P. Biak, Irian Jaya
1994	10,7 LS; 113,1 BT	19,1	Banyuwangi Jatim
1996	1,1 LS; 118,8 BT	Tidak ada data	Palu Sulteng
1996	0,5 LS; 136 BT	13,7	P. Biak, Irian Jaya
1998	2,02 LS; 124,87 BT	2,75	Tabuna Maliabu Maluku
2000	1,34 LS; 123,5 BT	8-10	P. Banggai, Sulawesi Tengah
2004	6,2 LU; 95,2 BT	25-30	Aceh, NAD
2005	2,3 LU ; 98,4 BT	10-15	P. Mentawai, Sumatera Utara

Menurut Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (P3G LIPI, 2001) berdasarkan sejarah kejadian gempa bumi merusak di Indonesia terdapat 25 daerah rawan gempa bumi merusak termasuk penyebab tsunami. Wilayah kejadian dengan tambahan penjelasan dan modifikasi penulis pada **Tabel 3.7**.

Tabel 3.7.

Wilayah Rawan Bencana Gempa bumi dan Tsunami di Indonesia (P3G, LIPI, 2007)

NO.	DAERAH	TAHUN	KETERANGAN
1	Aceh	1939,1964,1967,1983,1990,2004	Ada Tsunami, Merusak
2	Sumatera Utara	1861, 1873, 1921, 1934, 1935, 1936(2x) 1941, 1965, 1971, 1984, 1987, 2005	Sebagian Ada Tsunami, Merusak
3	Sumatera Barat	1835, 1904, 1926, 1935, 1936, 1943, 1974, 1977, 2005	Sebagian Ada Tsunami, Merusak
4	Bengkulu	1871, 1902, 1909, 1914, 1933, 1938, 1952, 1971, 1979, 1995,	Sebagian Ada Tsunami, Merusak
5	Lampung	1780, 1852, 1860, 1883, 1860, 1931, 1933, 1995, 2001, 2005	Sebagian Ada Tsunami, Merusak
6	Sukabumi, Jawa Barat	1833, 1834, 1844, 1852, 1862, 1873, 1875, 1900, 1910, 1912, 1923, 1972, 1973, 1974, 1979, 1980, 1982, 1990, 1996, 2000	Tidak ada tsunami, sebagian merusak
7	Yogyakarta	1840, 1852, 1863, 1867, 1872, 1902, 1906, 1923, 1926, 1943, 1978, 1985, 1995, 1997, 2000, 2002	Tidak ada tsunami, merusak
8	Lawu, Jawa Tengah	1821, 1856, 1866, 1877, 1890, 1924, 1939, 1950	Tidak ada tsunami, sebagian merusak
9	Jawa Timur-Bali	1915, 1917, 1930, 1936, 1938, 1957, 1958, 1960, 1961, 1962, 1963, 1967, 1972, 1976, 1979, 1994	Sebagian Ada Tsunami, Merusak
10	Nusa tenggara Barat	1952, 1982, 1977, 1979	Sebagian Ada Tsunami, Merusak
11	Nusa tenggara Timur (NTT)	1857, 1896, 1908, 1927, 1938, 1954, 1961, 1963, 1975, 1977, 1979, 1982, 1987, 1989 (2x) 1891, 1908,1909, 1991, 1992, 1995	Sebagian Ada Tsunami, Merusak

NO.	DAERAH	TAHUN	KETERANGAN
12	Palung Aru	1920, 1938, 1975	Ada Tsunami, Merusak
13	Mamuju	1964 (2x), 1967, 1969, 1972, 1984	Sebagian ada tsunami, Merusak
14	Buton	1967, 2003	Ada Tsunami, Merusak
15	Sulawesi Tengah	1907, 1910, 1923, 1924, 1925, 1927, 1938, 1939, 1960, 1968, 1972, 1982, 1983 2x, 1984, 1988, 1994, 2000, 2005	Sebagian ada tsunami, Merusak
16	Sulawesi Utara	1845, 1858, 1932, 41, 80, 1900, 1996	Sebagian ada tsunami, Merusak
17	Sangir, Talaud	1936, 1974, 1995, 1999	Ada Tsunami, Merusak
18	Maluku Utara	1846, 1858 (2x), 1859, 1925, 1932, 1936, 1939, 1941, 1955, 1968, 1974, 1975, 1994	Sebagian ada tsunami, Merusak
19	Maluku Selatan	1830, 1835, 1837, 1839, 1841, 1852, 1862, 1876, 1889, 1903, 1920, 1932, 1938, 1965, 1975, 1980, 1983, 1998	Sebagian ada tsunami, Merusak
20	Kepala Burung, Papua Barat	1864 (2x), 1914, 1919, 1921, 1971, 1979 (2x), 2003	Sebagian ada tsunami, Merusak
21	Jayapura (Papua), Biak (Papua Barat)	1914, 1919, 1921, 1971, 1976, 1979, 1992, 1996	Sebagian ada tsunami, Merusak
22	Nabire, Papua	1994	Merusak
23	Wamena, Papua	1976, 1989, 1990	Merusak
24	Kalimantan Timur	1921, 1923, 1925, 1975	Sebagian ada tsunami, Merusak
25	Kalimantan Selatan	1957	Merusak

3.2.2.3. Kerusakan akibat bencana tsunami di Indonesia

Besaran tsunami dan ukuran risiko bencana yang ditimbulkan sangat ditentukan oleh berbagai faktor yang menyebabkan perbedaan magnitudo gempa bumi dasar laut yang menjadi gelombang tsunami. Faktor yang menyebabkan magnitudo gempa bumi menjadi tsunami adalah :

1. Magnitudo gempa bumi dan kedalamannya
2. Lokasi pelepasan dalam kerak bumi dan kecepatan pelepasannya

3. Perambatan gelombang tsunami (efek topografi dasar laut, kedalaman laut dan sebagainya)
4. Variasi arah rambatan
5. Konfigurasi pantai
6. Topografi daratan/bentuk bentang alam
7. Tipe dan ukuran deformasi laut
8. Batimetri dasar laut dan kedalaman laut.

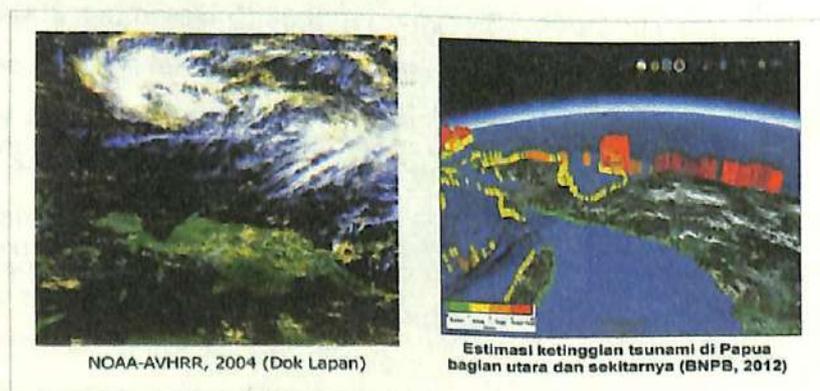
Besar kecilnya tsunami mempunyai korelasi dengan tinggi gelombang tsunami yang mencapai pantai (*run-up*). Secara umum tinggi *run-up* tergantung pada besar kecilnya deformasi dasar laut (akibat gempa bumi tektonik, letusan gunung api, longsor), serta tergantung pada bentuk dan morfologi pantai. Telah disebutkan di atas bahwa deformasi besar pantai dengan morfologi landai dan berlekuk akan menghasilkan *run-up* maksimum. Hal tersebut terjadi di Indonesia pada kasus tsunami di Teluk Pancer, Banyuwangi 2 Juni 1994 ketinggian *run-up* tsunami hingga 14 meter. Di Teluk Korem, Biak, 17 Februari 1996 mencapai tinggi *run-up* tsunami 12 meter. Di Kota Banda Aceh 26 Desember 2004 mencapai tinggi *run-up* tsunami 14 meter. Jarak tsunami ke darat sangat ditentukan oleh terjal atau landainya morfologi pantai, pada pantai yang terjal tsunami akan tidak terlalu jauh mencapai daratan karena tertahan dan dipantulkan kembali oleh tebing pantai.

Kerusakan bencana tsunami dapat dideteksi dengan menggunakan analisis penutup lahan sebelum dan sesudah terjadinya bencana menggunakan data penginderaan jauh multi temporal. Tsunami tanggal 26 Desember 2004 yang telah menimpa Aceh, Malaysia, India dan Thailand membuat kerusakan yang sangat parah. Ketinggian gelombang pasang antara 30 meter telah menghancurkan wilayah pantai dan daerah aliran sungai yang ketinggiannya hampir 30 meter. Perubahan kerusakan penutup lahan akibat terjadinya tsunami di Aceh dapat diamati pada citra Quickbird tanggal 23 Juni 2004 dan citra 28 Desember 2004. Beberapa lokasi yang dapat dilihat perubahannya seperti **Gambar 3.27**.



Gambar 3.27. Kenampakan Aceh sebelum dan sesudah tsunami (Publikasi CRISP, 2004 dengan penambahan informasi)

Penelitian menunjukkan bahwa ketinggian tsunami rata-rata di wilayah Papua antara 3 – 12 meter. Hasil simulasi tsunami untuk wilayah Papua, dapat diketahui bahwa wilayah yang rentan terhadap tsunami adalah wilayah bagian utara Papua dengan estimasi ketinggian tsunami mencapai 5 – 30 meter. Sedangkan wilayah pesisir bagian timur hanya berkisar antara 1 – 5 meter. Wilayah yang memiliki tingkat kerentanan yang paling rendah adalah Papua bagian selatan yang berkisar hanya 0 – 1 meter. Citra penginderaan jauh NOAA-AVHRR dan estimasi run-up tsunami Papua pada **Gambar 3.28**. Citra NOAA-AVHRR tahun 2004 (**Gambar 3.28**. kiri) dan estimasi ketinggian gelombang tsunami berdasarkan hasil simulasi oleh BNPB tahun 2012 (**Gambar 3.28**. kanan).



Gambar 3.28. Citra NOAA AVHRR dan Estimasi *Run-up* Tsunami Papua

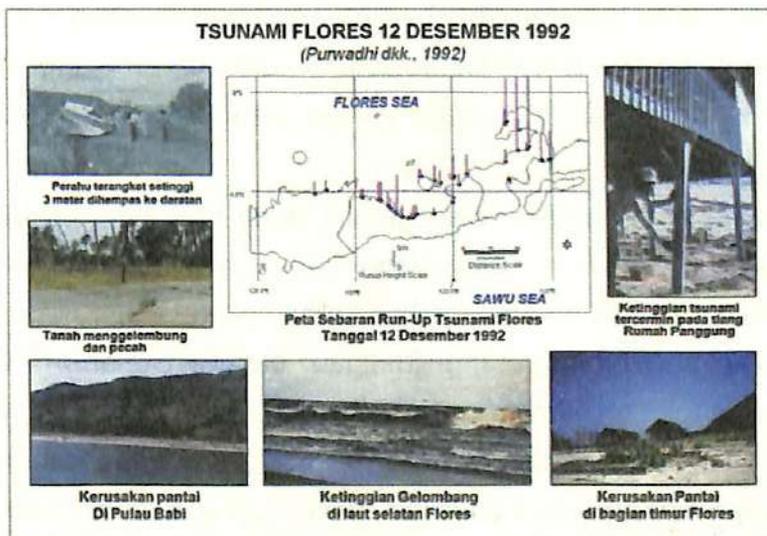
Kerusakan yang diakibatkan oleh bencana tsunami dapat diukur berdasarkan ketinggian gelombang, kecepatan gelombang dan kekuatan gelombang. Gambar

3.29. menunjukkan ketinggian *Run-up* antara 10 hingga 15 meter gelombang tsunami yang melanda Pulau Biak tahun 1992.



Gambar 3.29. *Run-up* di Pulau Biak pada gempa bumi tsunami 1992

Kerusakan akibat bencana tsunami Flores tanggal 12 Desember 1992, dapat diukur berdasarkan ketinggian gelombang, kecepatan gelombang dan kekuatan gelombang melempar benda ke daratan. **Gambar 3.30.** menunjukkan ketinggian *Run-up* antara 10 hingga 15 meter dan kondisi lapangan kerusakan pantai dan bangunan akibat tsunami yang melanda Flores 12 Desember 1992



Gambar 3.30. Peta *Run-up* dan kondisi lapangan akibat tsunami Flores 12 Desember 1992 (Purwadhi dkk., 1992)

3.2.3. Prediksi Bencana Tsunami di Indonesia

Bencana tsunami walaupun dapat diprediksi namun kedatangan gelombang tsunami sangat cepat. Di Indonesia sumber gempa tektonik sebagai salah satu pemicu terjadinya tsunami sangat dekat, hanya dalam 15 – 45 menit dari waktu terjadinya gempa bumi tektonik, tsunami sudah sampai di pantai. Kapan terjadinya tsunami biasanya berkaitan dengan kejadian gempa bumi, namun gempa bumi sulit diprediksi secara tepat, sehingga bencana tsunami tidak dapat dicegah, dan berdampak luas. Perkiraan sebaran potensi dianalisis dengan beberapa pendekatan, walaupun tidak tepat, namun dapat digunakan sebagai upaya pengurangan (mitigasi). Langkah yang dilakukan sebagai berikut.

1. Pembuatan zonasi sangat bermanfaat dan merupakan salah satu syarat utama dalam penentuan awal sebaran potensi bencana gempa bumi maupun tsunami.
2. Tsunami terjadi karena adanya gempa bumi yang disebabkan oleh proses tektonik maupun letusan gunung api.
3. Tsunami yang merupakan gelombang pasang mampu menempuh jarak yang sangat jauh dan bergerak sangat cepat. Tsunami tidak selalu hanya sebuah gelombang, tetapi merupakan suatu rangkaian, yaitu gelombang pertama, kedua, ketiga dan seterusnya.
4. Di Indonesia tsunami umumnya terjadi dengan ditandai adanya gempa bumi yang merupakan guncangan dengan suara gemuruh dari arah laut, dan disusul dengan surutnya air laut dengan tiba-tiba, kemudian diikuti gelombang besar.
5. Energi gelombang tsunami biasanya terakumulasi dan meningkat pada daerah teluk, dan menimbulkan arus sejajar pantai, menggerus dasar laut serta daerah muara sungai.
6. Bencana tsunami disebabkan oleh gempa bumi baik dari letusan gunung api maupun gempa tektonik. Gelombang besar yang disebabkan oleh letusan gunung Krakatau 1883 mengakibatkan korban yang sangat besar.

Para peneliti untuk mengurangi (mitigasi) bahaya tsunami di wilayah pesisir dapat dilakukan dengan teknologi *hard engineering*, *soft engineering*, dan kombinasi keduanya, serta teknologi informasi yang disesuaikan dengan kondisi alam, sosial budaya, dan daya dukung perekonomian. Teknologi *soft engineering* paling ideal diterapkan di Indonesia, yaitu dengan menciptakan hutan mangrove (bakau),

penanaman kelapa, atau vegetasi lainnya di sepanjang pesisir. Teknologi ini selain murah juga ramah lingkungan. Teknologi *hard engineering* dapat dibuat dengan membangun tembok penahan gelombang dan gumuk pasir (*sand dune*) buatan.

Pembuatan model tsunami juga dilakukan oleh para peneliti, dengan cara memperhitungkan terjadinya gempa bumi sebagai pemicunya. Beberapa peneliti di Indonesia mencoba merekonstruksi kejadian tsunami dengan membuat Model Tsunami. Pengembangan permodelan tsunami ke depan diantaranya dilakukan oleh NOAA-USA adalah MOST (*Methods of Splitting Tsunami*); Model COMCOT dikembangkan oleh Commel University; Model TUNAMI N2 oleh Immura (Jepang); Model FUNWAVE-GEOWAVE; dan model TSUNAMI OLEH Rusia dalam program WinITDB. Data yang diperlukan dalam pembuatan model tersebut adalah batimetri, lokasi, besaran sumber gempa bumi, dan karakteristik pantai. Model tersebut menggambarkan wilayah-wilayah yang berpotensi terjadinya tsunami, sehingga pemerintah daerah dapat mengantisipasi dengan rencana kontijensi, tataruang, dan kesiapsiagaan bencana tsunami.

Model spasial kerentanan kawasan pesisir Kota Bandar Lampung terhadap bencana tsunami telah dilakukan oleh Adrian (2014) menggunakan metode *Cell Based Modelling*, dengan 4 (empat) variable, yaitu kerentanan sosial budaya, kerentanan ekonomi, kerentanan fisik, dan kerentanan lingkungan. Variable dan indikator yang digunakan seperti pada **Tabel 3.8**.

Tabel 3.8.

Variabel dan Indikator Kerentanan Bencana Tsunami

NO.	VARIABEL	INDIKATOR	KETERANGAN
1	Sosial Budaya	Kepadatan penduduk	Semakin tinggi kepadatan penduduk maka kerentanan wilayah terhadap tsunami semakin tinggi. Ini berhubungan dengan keselamatan jiwa dan kondisi kesehatan penduduk. Dalam hal ini adalah perbandingan jumlah penduduk dengan luas wilayah (ha).
		Kelompok usia rentan	semakin banyak penduduk dengan usia tua maka kemampuan untuk menghindari bahaya akan semakin kecil dan kerentanan wilayah terhadap tsunami akan semakin tinggi. Penduduk usia tua dalam penelitian ini adalah yang berumur > 60 tahun. semakin banyak penduduk dengan usia balita maka kemampuan untuk menghindari bahaya akan semakin kecil dan kerentanan semakin tinggi. Penduduk usia balita dalam penelitian ini adalah yang berumur < 5 tahun.
2	Kerentanan Ekonomi	Luas lahan produktif	Semakin luas Penggunaan Lahan Produktif (industri, pergudangan, pariwisata, perdagangan, perkantoran dan perikanan) kerentanan wilayah terhadap tsunami akan semakin tinggi.
		Tenaga kerja di sektor rentan	Lokasi yang terisolasi seperti wilayah pedalaman, wilayah yang Semakin banyak penduduk yang bekerja di sektor informal, maka akan semakin rentan terhadap bahaya tsunami.
3	Kerentanan Fisik	Perumahan dan kepadatan bangunan	Semakin tinggi kepadatan bangunan maka kerentanan terhadap tsunami akan semakin tinggi. Dalam hal ini adalah perbandingan jumlah bangunan dengan luas wilayah (ha).
		Infrastruktur / Fasum	Semakin banyak fasilitas umum, kerentanan terhadap tsunami akan semakin tinggi
		Fasilitas kritis	Semakin banyak fasilitas kritis, kerentanan terhadap tsunami akan semakin tinggi
4	Kerentanan Lingkungan	Kawasan lindung	Semakin banyak kawasan lindung, kerentanan terhadap tsunami akan semakin tinggi
		Hutan bakau	Semakin banyak hutan bakau, kerentanan terhadap tsunami akan semakin tinggi
		Hutan alam	Semakin banyak hutan alam, kerentanan terhadap tsunami akan semakin tinggi

Hasil prediksi kerentanan masing-masing variabel pada **Gambar 3.31.** masing-masing variabel dipetakan, yaitu peta simulasi tsunami dari gempa 8,0 SR (**Gambar 3.31.** kiri atas); Peta Kerentanan Sosial Budaya (**Gambar 3.31.** tengah atas), Peta Kerentanan Ekonomi (**Gambar 3.31.** kiri bawah), Peta Kerentanan Fisik

(Gambar 3.31. tengah bawah), dan Peta Kerentanan Lingkungan (Gambar 3.31. kanan bawah).

Berdasarkan variabel tersebut dalam menentukan kerentanan tsunami yang terlebih dahulu harus dilakukan adalah menentukan kelas kerentanan atau rentang nilai kerentanan tsunami. Tahap pertama adalah menghitung nilai kerentanan maksimum (V_{max}) dan kerentanan minimum (V_{min}). Nilai V_{max} didapat dari mengalikan nilai bobot tertinggi dari tiap variabel dengan nilai bobot variabel tersebut, sedangkan V_{min} didapat dari mengalikan nilai bobot terendah dari tiap variabel dengan nilai bobot variabel tersebut. Tujuan dari mencari nilai V_{max} dan V_{min} ini adalah untuk mencari selisih nilai kerentanan (V). Nilai V ini bila dibagi dengan jumlah kelas yang diinginkan maka akan didapat selang kerentanan antar kelas.

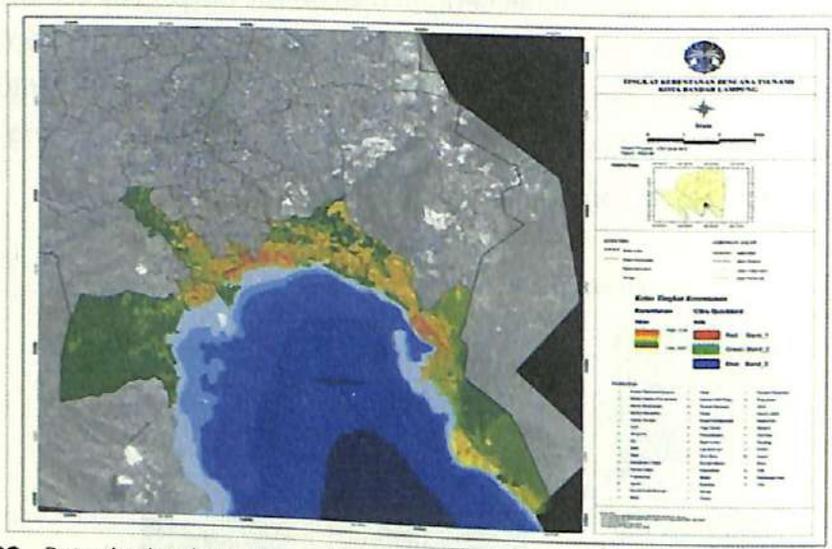


Gambar 3.31. Peta Variabel kerentanan tsunami Kota Bandar Lampung (Adrian, 2014)

Pada penelitian ini kelas kerentanan dibagi menjadi tiga yaitu: Tinggi, Sedang dan Rendah. Cara perhitungan nilai V menggunakan metode *cell based modelling* dengan formula sebagai berikut : **Nilai $V = V_{max} - V_{min}$** Nilai V Kota Bandar Lampung $= 2.35 - 0.97 = 1.38$; Selang kerentanan $= 1.38 / 3 = 0.46$.

Berdasarkan hasil analisis perhitungan menggunakan menggunakan metode *cell based modelling* dengan *tool model builder* dalam *Arc Gis*, dengan analisis grid raster 1 meter dapat menampilkan dan menjelaskan secara details atribut yang ada pada wilayah tersebut, karena peta ditampilkan dengan citra Quickbird yang memiliki resolusi tinggi 0,6 meter sehingga dapat melihat kondisi eksisting penggunaan lahan secara jelas. Dalam melihat daerah yang mempunyai tingkat kerentanan yang tinggi

terhadap tsunami yang digunakan adalah batas administrasi daerah, dengan data yang tersedia. Peta tingkat kerentanan terhadap tsunami Kota Bandar Lampung dapat diketahui jumlah Kecamatan sekaligus Kelurahan yang terdampak oleh tsunami. Berdasarkan proses spatial data analisis tersebut dihasilkan Model Kerentanan Bencana Tsunami di Kota Bandar Lampung yang Berupa Peta Tingkat Kerentanan terhadap bencana tsunami pada Gambar 3.32.



Gambar 3.32. Peta tingkat kerentanan bencana tsunami Kota Bandar Lampung (Adrian, 2014)

3.2.4. Kajian Risiko Bencana Tsunami di Indonesia

Kajian risiko tsunami seperti halnya kajian risiko bencana gempa bumi, maka kajian digunakan sebagai landasan untuk memilih strategi dalam penyusunan kebijakan penanggulangan bencana tsunami. Ditingkat masyarakat hasil pengkajian diharapkan dapat dijadikan dasar yang kuat dalam perencanaan upaya pengurangan risiko bencana tsunami. Nilai risiko bencana tsunami tergantung dari besarnya interaksi antara ancaman dan kerentanan. Interaksi ancaman, kerentanan, dan faktor-faktor luar menjadi dasar untuk melakukan kajian risiko bencana tsunami terhadap suatu daerah. Kajian risiko bencana untuk menghasilkan kebijakan penanggulangan bencana tsunami disusun berdasarkan komponen bahaya, kerentanan dan kapasitas, sebagai berikut

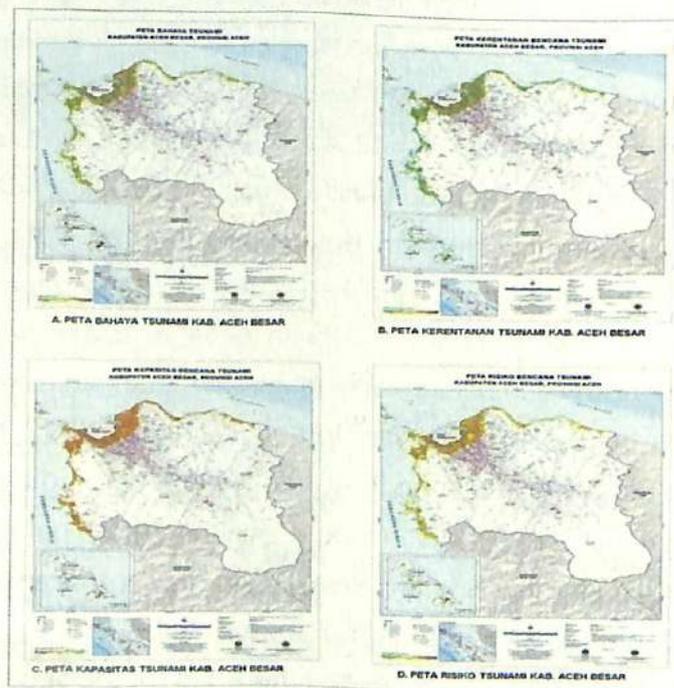
1. Komponen bahaya/ancaman (*Hazard*) adalah suatu fenomena alam atau buatan yang mempunyai potensi mengancam kehidupan manusia, kerugian harta benda

dan kerusakan lingkungan. Komponen bahaya tsunami disusun dari parameter intensitas dan probabilitas kejadian tsunami.

2. Komponen kerentanan (*Vulnerability*) adalah suatu keadaan yang ditimbulkan oleh kegiatan manusia (hasil dari proses-proses fisik, sosial, ekonomi, dan lingkungan) yang mengakibatkan peningkatan kerawanan masyarakat terhadap bahaya. Komponen kerentanan tsunami disusun berdasarkan parameter sosial budaya, ekonomi, fisik dan lingkungan.
3. Komponen kapasitas/ kemampuan (*Capacity*) adalah penguasaan sumber daya, cara, dan kekuatan yang dimiliki masyarakat, yang memungkinkan mereka untuk mempertahankan dan mempersiapkan diri mencegah, menanggulangi, meredam, serta dengan cepat memulihkan diri dari akibat bencana. Komponen kapasitas tsunami disusun berdasar parameter kapasitas regulasi, kelembagaan, sistem peringatan, pendidikan pelatihan keterampilan, mitigasi dan sistem kesiapsiagaan bencana tsunami.

Kajian risiko bencana tsunami berupa peta risiko dihasilkan mencakup juga peta bahaya tsunami, peta kerentanan bencana tsunami dan peta kapasitas bencana tsunami. Sedangkan dokumen memuat tingkat risiko bencana yang merupakan gabungan dari tingkat kerugian, tingkat ancaman dan tingkat kapasitas bencana tsunami. Kajian risiko bencana tsunami diterapkan metode bersifat kualitatif dan kuantitatif. Metode untuk kajian bencana tsunami digunakan dalam pengolahan data yang terdiri dari komponen ancaman, kerentanan, dan kapasitas, sehingga dapat diperoleh indeks bencana tsunami. Indeks tersebut dijadikan sebagai dasar pembuatan rencana penanggulangan bencana dan peningkatan upaya pengurangan risiko bencana tsunami. Bencana Tsunami berdasarkan Perka Nomor 02 Tahun 2012 tentang Pedoman Pengkajian Risiko Bencana, ancaman bencana tsunami dapat dibagi menjadi 3 (tiga) kelas Indeks Ancaman. Komponen dari indeks tersebut adalah peta estimasi ketinggian genangan tsunami/peta bahaya tsunami. Kelas Indeks Rendah Ancaman Bencana Tsunami dengan tinggi genangan kurang dari 1 meter. Kelas Indeks Ancaman Sedang Bencana Tsunami dengan tinggi genangan antara 1-3 meter. Sedangkan kelas Indeks Tinggi Ancaman Bencana Tsunami dengan ketinggian genangan > 3 meter, parameter ukur inudasi maksimum dengan skore 0,333 inudasi < 1 meter; skore 0,666 inudasi 1-3 meter; skore 1 inudasi >3 meter;

Berdasarkan peta zonasi daerah rawan tsunami yang disusun berdasarkan parameter di atas dan divalidasi dengan data kejadian sebagai indikatornya, diasumsikan bahwa semakin luas area yang masuk dalam zonasi daerah rawan tsunami, semakin besar ancaman terhadap bahaya tsunami di wilayah tersebut. Contoh kajian risiko rawan ancaman tsunami di Kabupaten Aceh Besar, berdasarkan hasil analisis kajian risiko, didapatkan kelas bahaya dominan adalah **TINGGI**. Persentase luas bahaya dominan adalah **54,44 % (161.911,09 Ha)** dari luas wilayah Kabupaten Aceh Besar, sehingga diperoleh **tingkat bahaya** tsunami di Kabupaten Aceh Besar adalah **TINGGI**. Penjelasan secara detail indeks ancaman bencana tsunami di Kabupaten Aceh Besar pada Tabel 3.9. Sebaran ancaman bencana tsunami ditampilkan dalam Peta Risiko Bencana Tsunami Kabupaten Aceh Besar pada **Gambar 3.33** mencakup Peta Bahaya Tsunami Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.33A**); Peta Kerentanan Tsunami Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.33B**); Peta Kapasitas Tsunami Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.33C**); Peta Risiko Tsunami Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.33D**)



Gambar 3.33. Peta Kajian Risiko Bencana Tsunami Kabupaten Aceh Besar (Purwadhi dkk, 2013; Dokumen BNPB, 2013)

Tabel 3.9.

Indeks Ancaman dan Indeks Penduduk Terpapar Bencana Tsunami
per kecamatan di Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh

No	Kecamatan	Penduduk Terpapar			Kelas Indeks Dominan Penduduk Terpapar	Kelas Dominan Ancaman
		TINGGI	SEDANG	RENDAH		
1	LHONGA	0	0	3865	RENDAH	RENDAH
2	LEUPUNG	2	2	355	RENDAH	RENDAH
3	INDRAPURI	0	0	0	-	-
4	KUTA COT GLIE	0	0	0	-	-
5	SEULIMEUM	0	0	221	RENDAH	RENDAH
6	KOTA JANTHO	0	0	0	-	-
7	LEMBAH SEULAWAH	0	0	0	-	-
8	MESJID RAYA	0	28	3270	RENDAH	RENDAH
9	DARUSSALAM	0	0	6717	RENDAH	RENDAH
10	BAIUSSALAM	5	74	3853	RENDAH	RENDAH
11	KUTA BARO	0	5	1472	RENDAH	RENDAH
12	MONTASIK	0	0	0	-	-
13	BLANG BINTANG	0	0	20	RENDAH	RENDAH
14	INGIN JAYA	0	0	3163	RENDAH	RENDAH
15	KRUENG BARONA JAYA	0	31	4845	RENDAH	RENDAH
16	SUKA MAKMUR	0	0	0	-	-
17	KUTA MALAKA	0	0	0	-	-
18	SIMPANG TIGA	0	0	0	-	-
19	DARUL IMARAH	0	0	19887	RENDAH	RENDAH
20	DARUL KAMAL	0	0	249	RENDAH	RENDAH
21	PEUKAN BADA	0	1	4640	RENDAH	RENDAH
22	PULO ACEH	115	64	138	RENDAH	SEDANG

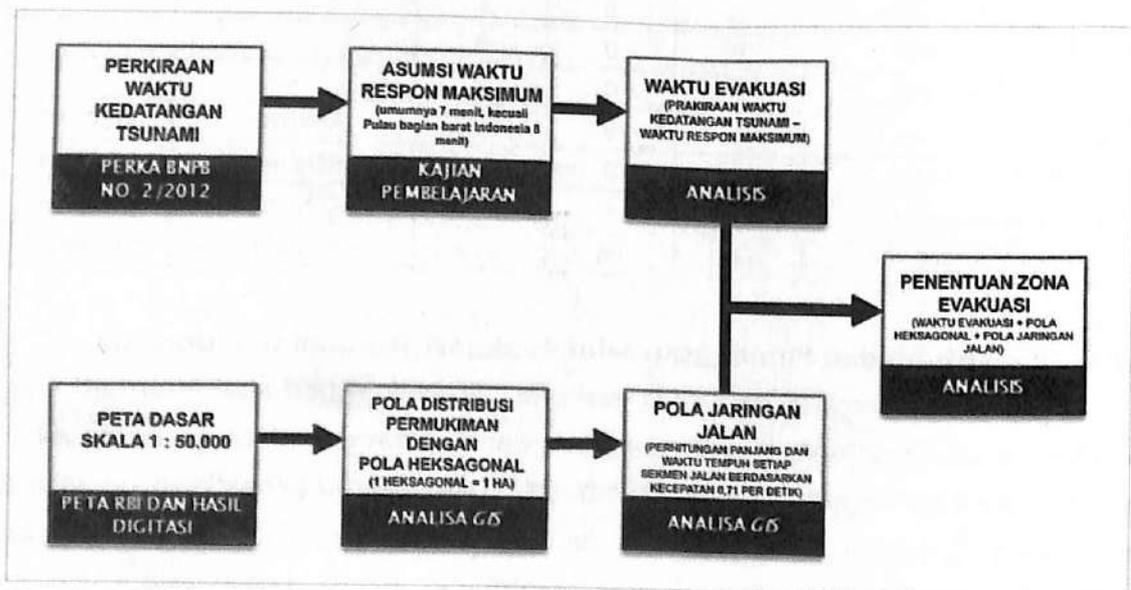
3.2.5. Penentuan dan Pembuatan Jalur Evakuasi Tsunami di Indonesia

Sebelum merancang peta jalur evakuasi, diperlukan berbagai informasi yang dimulai dari penelusuran sejarah kegempaan dan potensi gempa bumi. Berdasarkan informasi tersebut dibuat pemodelan tsunami, baik berupa pemodelan penjalaran gelombang (*run-up*) tsunami maupun pemodelan inundation (daerah rendaman) tsunami. Seperti telah dijelaskan di atas pembuatan zonasi daerah rawan bahaya maupun aman terhadap tsunami, sangat diperlukan dalam pembuatan peta jalur

evakuasi secara cepat. Pembagian zonasi kerawanan bahaya tsunami berpedoman pada garis ketinggian (kontur) permukaan tanah sebagai acuan. Pedoman zona ketinggian permukaan tanah untuk pembuatan peta jalur evakuasi bencana tsunami (BNPB, 2007) diklasifikasikan dalam 4 zona, yaitu

1. Zone Awas ketinggian permukaan tanah 1 – 5 meter;
2. Zone Waspada ketinggian permukaan tanah 5 – 10 meter;
3. Zone Aman Sementara ketinggian permukaan tanah 10 – 15 meter;
4. Zone Aman ketinggian permukaan tanah >15 meter.

Tsunami biasanya bersifat lokal, di mana air laut akan menyapu pantai dalam waktu sangat pendek, kurang dari 1 (satu) jam (rata-rata dalam kisaran antara 20-45 menit) setelah gempa besar di laut terjadi. Selain merendam kawasan pantai yang landai, air laut akan mengalir ke arah daratan melalui sungai-sungai atau jaringan pembuangan air. Air laut dalam peristiwa tsunami tidak hanya berupa aliran air laut tetapi bercampur dengan berbagai material endapan sedimen permukaan laut, sampah, reruntuhan rumah seperti bambu, balok kayu/bambu maupun rongsokan sarana transportasi, sehingga upaya paling penting adalah menghindarinya dengan berlari ke tempat tinggi. Penetapan Zona Evakuasi Bencana Tsunami dilaksanakan dengan tahapan seperti **Gambar 3.34**.

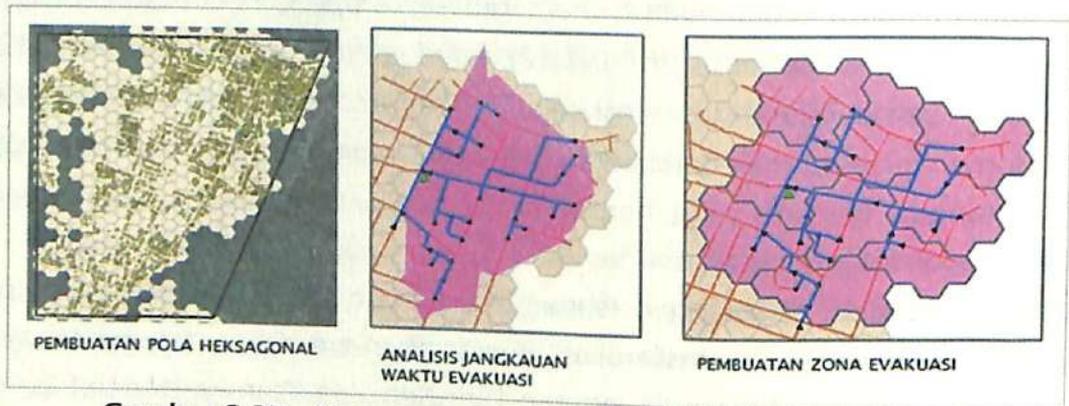


Gambar 3.34. Alur Pelaksanaan Penentuan Zona Evakuasi Bencana Tsunami (BNPB,2012)

Tahapan pelaksanaan pembuatan jalur evakuasi bencana tsunami ada tujuh tahapan seperti alur di atas dimulai dari perhitungan waktu evakuasi, diarahkan kepada persiapan peta untuk kemudian dianalisis dengan bantuan data penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG), yaitu.

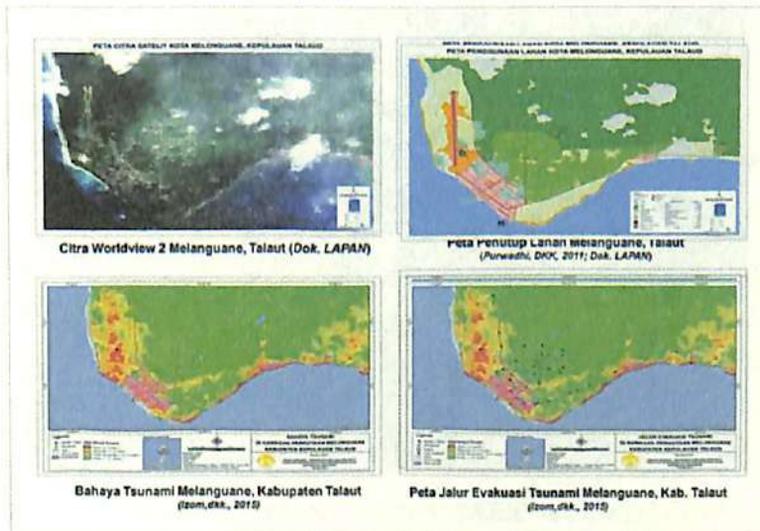
1. Perkiraan waktu kedatangan tsunami didasarkan pada Pedoman Pengkajian Risiko Bencana Tsunami (BNPB,2012) untuk penghitungan indeks bahaya tsunami sesuai referensi potensi kejadian dan genangan tsunami Indonesia. Pedoman tersebut memperlihatkan ketinggian tsunami maksimum dan waktu kedatangan tsunami yang berpotensi terjadi pada sebagian besar daerah kabupaten/kota di Indonesia.
2. Perkiraan waktu kedatangan tsunami ini kemudian dikurangi dengan nilai asumsi waktu respon masyarakat. Berdasarkan berbagai dokumen kajian, serta kemampuan Sistem Peringatan Dini Bencana Tsunami terlihat bahwa rata-rata waktu respon masyarakat untuk melaksanakan evakuasi adalah 7 menit setelah kejadian gempa bumi terjadi.
3. Penetapan waktu evakuasi dilakukan dengan menghitung waktu sisa yang dapat digunakan oleh masyarakat untuk melaksanakan evakuasi. Perhitungan diperoleh dari perkiraan waktu kedatangan tsunami dikurangi asumsi waktu respon masyarakat untuk evakuasi. Bila suatu daerah memiliki perkiraan waktu kedatangan tsunami adalah 30 menit, dengan asumsi waktu respon 7 menit berarti masyarakat hanya memiliki waktu 23 menit untuk melaksanakan evakuasi hingga ke tempat aman. Waktu evakuasi ini kemudian dimasukkan kedalam perangkat analisis pada sistem informasi geografis (SIG) yang telah dipersiapkan sebelumnya.
4. Persiapan analisis dengan GIS dilaksanakan dengan memetakan pola distribusi pemukiman dan pola hexagonal. Pola hexagonal ini adalah pola pembantu untuk menghitung dengan lebih rinci informasi yang ada pada kawasan hexagonal yang dipetakan pada skala 1:10.000. Setiap hexagonal mewakili luasan 1 hektar pada kawasan sebenarnya. Setelah seluruh kawasan terpapar diberikan hexagonnya, maka dengan pola jaringan jalan serta waktu evakuasi yang telah diperoleh, dapat disusun bentang daerah minimum jarak evakuasi masyarakat terlemah. Bentang daerah ini diperoleh dengan memberikan

nilai asumsi kecepatan masyarakat rentan sebesar 0,71 m/detik seperti yang disarankan oleh *Japan Institute For Fire Safety And Disaster Preparedness* ditambah faktor koreksi 5%. Alur penggambaran zone evakuasi tsunami digambarkan pada **Gambar 3.35**.



Gambar 3.35. Alur penggambaran zona evakuasi bencana tsunami

5. Pemetaan jalur evakuasi tsunami diperlukan penyiapan Peta Dasar Daerah yang akan dipetakan yang telah dikeluarkan instansi pemerintah. Biasanya digunakan peta rupa bumi Indonesia (RBI) atau peta topografi.
6. Pembuatan Peta distribusi permukiman digunakan data terbaru, dapat diperoleh dari interpretasi data penginderaan jauh resolusi tinggi terbaru (agar tidak ada wilayah permukiman yang terlewatkan) atau peta penggunaan lahan terbaru yang telah disusun oleh daerah.
7. Pembuatan peta penutup lahan dan jaringan jalan serta wilayah bahaya tsunami dari citra penginderaan jauh
8. Pembuatan Peta Jalur Evakuasi Tsunami. Proses pembuatan Peta Jalur Evakuasi Tsunami dari citra penginderaan jauh Kota Melanguane, Kabupaten Talaut, pada **Gambar 3.36**.

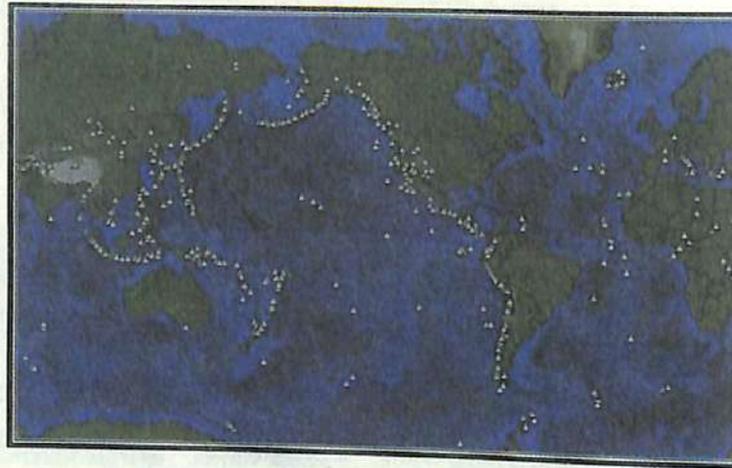


Gambar 3.36. Proses pembuatan Peta Jalur Evakuasi Tsunami Kota Melanguane, Kab. Talaut. (Purwadi dkk., 2011 dan Izom dkk., 2015)

3.3. MITIGASI BENCANA GUNUNG API

Gunung api adalah suatu tempat atau lobang darimana keluar batuan kental, pijar atau gas, umumnya kedua-duanya (disebut magma) mempunyai suhu sangat panas antara (900-1200) $^{\circ}$ C. Bahan keluar dari dalam bumi ke permukaan bumi dan batuan yang dikeluarkan terkumpul di sekeliling lobang membentuk suatu bukit atau gunung. Dapur magma umumnya terletak di bawah tubuh gunung api (Macdonald, 1972). Masyarakat menyebutnya dengan gunung api, karena kalau meletus mengeluarkan api atau pijar. Proses terjadinya gunung api merupakan pergerakan lempeng kerak bumi yang merupakan sumber terjadinya penimbunan energi (*stress energy*), sehingga di daerah belakang (*back arc*) terbentuk batuan penutup (*mantle rock*) panas yang menembus kerak bumi.

Proses Ekstrusi dari dua lempeng kerak bumi berpisah saling menjauhi dan muncul material baru yang dilahirkan dari mantel bumi ke bagian atas. Pemisahan biasanya terjadi pada retakan bumi (umumnya di dasar laut) yang biasa disebut pematang tengah samudra. Daerah ini lempeng dasar samudra biasanya tumbuh dan bergerak saling menjauhi karena desakan cairan magma dari dalam bumi, sehingga wilayah volcano (gunung api) dunia memiliki sebaran seperti pada **Gambar 3.37**.



Gambar 3.37. Sebaran Gunung api Dunia

3.3.1. Bentuk, Tipe, Struktur, dan Letusan Gunung api

Bentuk dan tipe gunung api merupakan ujud nyata dari lempeng tektonik global, karena bagian tepi lempeng ditabrak terdapat pula serangkaian gunung api aktif, yang terletak sejajar dengan palung yang terdekat, yang dapat dijelaskan sebagai berikut

1. Bentuk-bentuk gunung api, yaitu
 - a. Bentuk kerucut, umumnya dijumpai pada gunung api berlapis. Bentuk kerucut ini dapat dibangun oleh bahan lepas gunung api. Onggokan batuapung akan membentuk kerucut batuapung.
 - b. Bentuk kubah, biasanya dijumpai pada gunung api lava. Kubah lava merupakan bentukan dari leleran lava kental yang keluar melalui celah dan dibatasi oleh sisi curam di sekelilingnya. Bentuk-bentuk kubah sangat dipengaruhi oleh viskositas lava. Contoh : disepanjang sesar lampung
 - c. Bentuk maar yaitu pada gunung api gas, yang banyak dijumpai di Hawaii.
 - d. Bentuk datar tinggi dijumpai pada gunung api lava, berupa datartinggi yang relatif menonjol pada daerah sekitarnya yang tersusun oleh lava tebal dan umumnya bersifat basalan, sehingga disebut dengan basal tinggi. Tapi ada yang dikenal dengan datar tinggi bahan lepas gunung api, yang tersusun oleh endapan batuapung dan abu yang diletuskan dari celah dan mempunyai struktur kaldera atau lekuk ambrukan. Contoh : daerah disekitar danau Toba (Sumatera Utara).

- e. Bentuk barangko (*barranco*), yaitu alur-alur pada tubuh gunung api yang kasar dan tak teratur yang disebabkan oleh erosi dan sesar
- f. *Cinder Cones*, merupakan tipe gunung api yang sederhana yang terbentuk oleh partikel dan lava yang dikeluarkan oleh vent tunggal. Karena tekanan gas, lava tersembur keras ke udara dan pecah menjadi fragmen kecil yang padat, sehingga jatuh sebagai cinder di sekitar vent yang kemudian membentuk melingkar atau *cone* yang oval. Sebagian cinder cone mempunyai kawah berbentuk mangkok dan jarang muncul lebih dari seratus kaki atau di bawah lingkungannya, *cinder cone* ini kebanyakan terdapat di Amerika Utara bagian barat sebagai bagian dari terrain vulkanik dunia.
- g. *Composite Volcanoes*, kadang-kadang dinamakan *stratovolcanoes*, biasanya saling bersisian, berbentuk kerucut simetris yang besar dengan lapisan berasal dari aliran lava, debu vulkanik, cinder, *block* dan *bomb* yang dimungkinkan muncul di sekitar 8000 kaki di atas pusatnya. Contoh *composite volcano* adalah gunung fuji di Jepang, Gunung St Helens, Gunung Merapi, Gunung Agung, Gunung Rinjani. Pada puncak *composite volcano* kebanyakan terdapat kawah yang berisikan *vent* utama atau kumpulannya. Lava yang mengalir memecah dinding kawah atau melalui sisi *cone*. Bagian terpenting dari *composite volcano* adalah sebuah sistem *conduit* (saluran), dimana magma dari reservoir di bawah kerak bumi meningkat ke permukaan *volcano* dibangun oleh akumulasi material yang tererupsi melalui *conduit* dengan meningkatnya ukuran lava, cinder, debu serta yang lainnya, yang menambah kemiringan *volcano*. Apabila *composite volcano* sedang tidak aktif, erosi atau pengikisan terjadi pada *cone*. Magma yang telah keras/beku mengisi saluran (sumbat vulkanik) mengikuti jalur pada *cone*, dan rekahan (*dikes*) membuka dimana prosesnya akan berkurang perlahan-lahan oleh adanya erosi. Sampai akhirnya, dari proses lengkapnya hanya tersisa *plug* dan *dike* di bawah permukaan tanah, tinggal *volcano* dengan kenampakan bagian yang hilang.
- h. *Shield Volcano* merupakan tipe gunung api yang terbentuk kebanyakan dari aliran lava cair, aliran setelah tertuang ke segala arah dari *vent* pusat atau kumpulan *vent*, yang meluas, menumpahkan *vent* dari daratan, *domical shape*, dengan profil dengan tameng prajurit. Aliran tersebut terbentuk secara

perlahan dengan akresi ribuan lava cair yang disebut lava basalt, yang melebar seiring bertambahnya jarak. Lava biasanya bererupsi dari *vent* selama retakan yang berkembang di pinggir *cone*.

- i. *Lava Domes* tipe ini terbentuk relative kecil, berbentuk seperti umbi lava, konsekuensinya, timbunan lava yang berasal dari sekitar vent. Sebuah dome (kubah) tumbuh besar dengan ekspansi dari dalam ketika tumbuh, permukaan luarnya dingin dan keras, kemudian hancur menumpahkan fragmen di sisi-sisinya. Beberapa dome berbentuk tonjolan karang atau *spine* yang bentuk lainnya pendek, aliran lava bersisian (*steep side*). Volcanic dome biasanya berada dalam kawah atau pada sisi *composite volcano*.

2. Tipe-Tipe gunung api adalah

- a. Tipe gunung api berdasarkan bahan lepas yang dihasilkan adalah gunung api lava/ gunung api tameng (*shield volcano*) yang menghasilkan lava basalan. Gunung api tameng dibentuk oleh lava yang sangat cair dari lava basalan atau andesitan. Ada dua tipe jenis gunung api tameng, yaitu tipe Hawaii dan tipe Iceland yang dibedakan berdasarkan skala dan jalur retakan yang ada.
 - i. Tipe Hawaii tipe ini akan membentuk gunung api tameng yang dibangun oleh leleran lava yang keluar dari beberapa retakan dan memencar membentuk suatu jalur celah yang cukup besar contoh : Mauna Loa di Hawaii.
 - ii. Tipe Iceland : Dicitrakan dengan lavanya yang keluar dari kawah utama dan mempunyai skala yang lebih kecil dari tipe Hawaii. contoh : Izu peninsula (Iceland), Hakone (Jepang), dan fase pertama gunung Tambora (Sumbawa).
- b. Tipe gunung api piroklastik, merupakan gunung api yang dibentuk oleh bahan lepas gunung api piroklastik. Contoh Gunung Lamongan, Gunung Tambora (Sumbawa)
- c. Tipe gunung api gas yaitu gunung api yang terjadi karena kegiatan magmatik umumnya membentuk mar yaitu suatu lekukan yang disebabkan oleh letusan tunggal yang bersifat meledak, dikelilingi oleh kawah berbentuk cincin dan umumnya terisi air. Contoh : kaki utara pegunungan tengger, Jawa Timur, Gunung Iwo Jima (Jepang).

3. Struktur Gunung api

- a. *Main Vent* merupakan tempat yang diterobos oleh batuan cair dari magma chamber ke permukaan. *Main vent* seperti pipa dimana lava dapat mengalir, terkadang *main vent* memiliki cabang, jika mereka mencapai permukaan dari bentukan *secondary cone* atau *fumarole*. Ketika gunung api meletus, lava, gas, dan fragmen batuan menuju ke *main vent* dan bergerak keluar melalui *crater*. Apabila letusan gunung api berhenti, lava dapat turun kembali ke pipa atau membentuk danau lava di dalam *crater*.
- b. *Lava Flow* adalah aliran lava merupakan letusan yang berupa molten rock di bawah permukaan bumi yang keluar dari vulkanik vent (magma). Lava berwarna merah panas saat keluar dari vent, tetapi secara cepat berubah menjadi warna merah gelap. Abu-abu, hitam atau warna yang lain berdasarkan pengaruh proses yang dialaminya. Lava yang sangat panas mengandung gas yang terdiri dari besi dan magnesium berupa cairan, yang mengalir seperti tar panas, sedangkan yang agak dingin, mengandung silicon, sodium dan potassium yang berupa cairan dan mengalir seperti madu yang kental.
- c. Strata lava dan abu merupakan lapisan yang terbentuk pada gunung api ketika lava dan abu dari gunung api aktif terlempar keluar. Abu berisikan fragmen kecil batuan, beberapa sama baiknya dengan partikel debu kecil, bongkahan lainnya dapat lebih besar dari kepalan tangan. Abu gunung api biasanya keluar dari gunung berapi sebelum lava. Abu yang mengendap ke bawah dan membentuk kumpulan di pinggir yang curam.
- d. *Secondary Cone* merupakan kerucut yang brau terbentuk pada gunung api, ketika saluran utama membentuk cabang. Lapisan batuan dan abu yang membentuk gunung berapi sering retak dan terlemahkan oleh ledakan yang terjadi selama letusan gunung berapi. Jika retakan ini membentuk garis/jalur dari main vent ke permukaan, magma mampu bergerak ke saluran baru dan mencapai permukaan. Karena letusan, abu dan lava menyebar ke udara seperti air mancur
- e. *Magma chamber* atau dapur magma merupakan daerah sebagai tempat induk magma berada. Ukuran magma chamber baik yang berhubungan langsung dengan gunung api ataupun yang terpisah hanya berupa tubuh magma

dapat mencapai ratusan ribu kilometer kubik. Pembentukan magma chamber primer pada kerak sangat dipengaruhi oleh ukuran, pola dan kecepatan gerak rekahan, disamping macam batuan dan ketebalan kerak bumi. Titik potong dua rekahan akan mempermudah jalannya magma, sedangkan jalur gesur akan memperlambat pergerakannya karena selain sifat bidang rekahan yang rapat, juga adanya milonit.

- f. *Fumarole* merupakan retak pada terusan permukaan dimana uap panas dan gas dapat keluar. Magma di bawah permukaan memanaskan air sampai titik dimana air berubah menjadi uap panas dan mampu melarutkan mineral dari batuan di sekitarnya. Ketika gas mencapai permukaan maka gas tersebut panas dan bertekanan rendah. Gas ini mendingin dan mengembang, mengendapkan mineral yang terlarut di sekitar saluran.
 - g. *Crater* gunung api merupakan struktur amblesan yang terjadi di permukaan gunung api karena kegiatan gunung api biasanya membuat lubang di bagian atas saluran. Kawah dibentuk dari lava, gas, dan debu yang meledak ke arah atas dari *main vent*. Material jatuh kembali ke bumi di sekitar saluran dan secara perlahan menumpuk membentuk rim di sekitarnya. Di dalam kawah selalu tetap bersih disebabkan adanya gaya gerakan ke atas material yang secara konstan memindahkan runtunan yang jatuh.
4. Letusan Gunung api terdapat beberapa tipe letusan, yaitu
- a. Tipe *strombolian* dimana material halus dari lava cair menyembur dari kawah membentuk suatu gugusan cahaya di langit terkumpul di cekungan gunung, lava cair tersebut kemudian meluncur ke bawah membentuk suatu aliran berapi. Contoh letusan gunung api Irazu di Costa Rica tahun 1965. Ciri-ciri gunung api tipe *stromboli* : lava cair, dapur magma dangkal tapi lebih dalam dari tipe Hawaii, tekanan gas sedang.
 - b. Tipe *vulcanian* dimana awan tebal yang terdiri dari abu dan letusan gas dari kawah kemudian timbul hingga di atas puncak. Abu yang terdiri dari gas tersebut membentuk awan keputih-putihan pada dekat puncak. Ciri-ciri tipe *volcano* : lava agak cair, terbentuk awan debu berbentuk bunga kol, tekanan gas sedang. Contoh : Gunung Raung dan letusan gunung api Paricutin tahun 1947.

- c. Tipe Vesuvian merupakan tipe letusan tipe volcano yang disesuaikan dengan letusan gunung Vesuvius di Italia pada tahun 79 BC, abu serta gas dengan kuantitas sangat besar keluar pada saat letusan kemudian terdapat awan yang berbentuk kembang kol melambung tinggi di atas gunung api tersebut. Ciri-ciri tipe visuvian seperti tipe volcano : lava agak cair, terbentuk awan debu berbentuk bunga kol, tekanan gas sedang.
- d. Tipe Peelean merupakan erupsi Pelean atau awan terang seperti yang terjadi di letusan Gunung Mayon Philipina 1968, material yang sangat besar dan banyak gas seperti debu, abu, gas dan fragmen-fragmen lava keluar dari tengah kawah, jatuh ke bawah, membentuk seperti lidah. Massa yang sangat besar dan bercahaya yang meluncur menuruni kemiringan dengan kecepatan yang sebanding dengan 100 mil per jam. Ciri-ciri tipe Peele : viskositas lava hampir sama dengan tipe merapi, tekanan gasnya cukup besar, peletusan mendatar. Erupsi semacam itu akan menyebabkan kerusakan yang sangat besar dan akan menyebabkan kematian pada populasi area tersebut seperti di St Pierre tahun 1902 saat terjadi letusan Gunung Peele
- e. Tipe Erupsi Hawaii merupakan tipe erupsi tipe yang dapat terjadi sepanjang celah dan retakan yang merupakan vent yang linier, seperti pada letusan gunung Mauna Loa di Hawaii 1950 atau letusan dapat terjadi di tengah vent. Erupsi tipe celah, lava cair menyembur dari celah di *zona rift* gunung api dan membentuk aliran lava yang menuruni lereng. Erupsi di *vent* sentral membentuk suatu semburan lava yang membumbung sampai beberapa ratus kaki. Ciri-ciri tipe Hawaii : lava cair, dapur magma yang dangkal, tekanan gas rendah. Contoh : gunung api perisai di Hawaii, yaitu Kilauea dan Maunaloa.
- f. Tipe erupsi Phreatik merupakan erupsi semburan uap, yang dikendalikan oleh ledakan uap hasil dari tanah yang dingin atau permukaan air yang bersinggungan dengan *hot rock* atau magma. Perbedaan tipe Phreatik ini dengan tipe lain adalah tipe Phreatik hanya mengeluarkan fragmen batuan dari saluran vulkanik, tidak ada magma yang dikeluarkan. Aktivitas phreatik secara umum lemah tetapi juga berubah menjadi dahsyat seperti saat letusan gunung api Taal di Philipina tahun 1965.

- g. Tipe Erupsi Plinian merupakan erupsi yang paling kuat yang ditandai dengan ledakan lava kental. Contoh erupsi Plinian yang paling besar pada 18 Mei 1980 di Gunung St. Helens atau di Pinatubo Philipina tahun 1991. Letusan tersebut membawa abu dan gas sejauh 10 mil ke udara, aliran piroklastik yang sangat cepat dan mematikan juga merupakan ciri letusan dari erupsi Plinian.
- h. Tipe Vincent merupakan tipe erupsi yang disertai dengan lava yang kental dan tekanan gas sedang, berasal dari dapur magma yang dangkal. Ciri-ciri tipe Vincent : lava agak kental, tekanan gas sedang, kawahnya terdapat danau. Contoh Gunung Kelud di Jawa Timur dan Gunung St Vincent di Kepulauan Antiles.
- i. Tipe Perret merupakan erupsi dengan ledakan yang sangat dahsyat disertai dengan semburan material ke atas karena tekanan gas yang sangat tinggi. Ciri-ciri tipe Perret : tekanan gas sangat kuat, lava encer, penyebab kaldera. Contoh : Gunung Krakatau di Selat Sunda, Indonesia
- j. Tipe Merapi merupakan erupsi lava yang keluar bersifat kental dan mengalir secara perlahan karena adanya tekanan gas yang rendah, sehingga membentuk sumbat kawah. Adanya akumulasi tekanan gas dapat menyebabkan sumbat kawah tersebut pecah dan disertai dengan munculnya awan panas. Ciri-ciri tipe Merapi: lava agak kental, dapur magma agak dangkal, tekanan gas rendah, terdapat sumbat lava dan kubah lava. Contoh: Gunung Merapi di Jawa Tengah, Indonesia.

Penampang gunung api dan material hasil erupsi gunung api seperti pada **Gambar 3.38.** dapat dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 3.38. Penampang gunung api dan material hasil erupsi

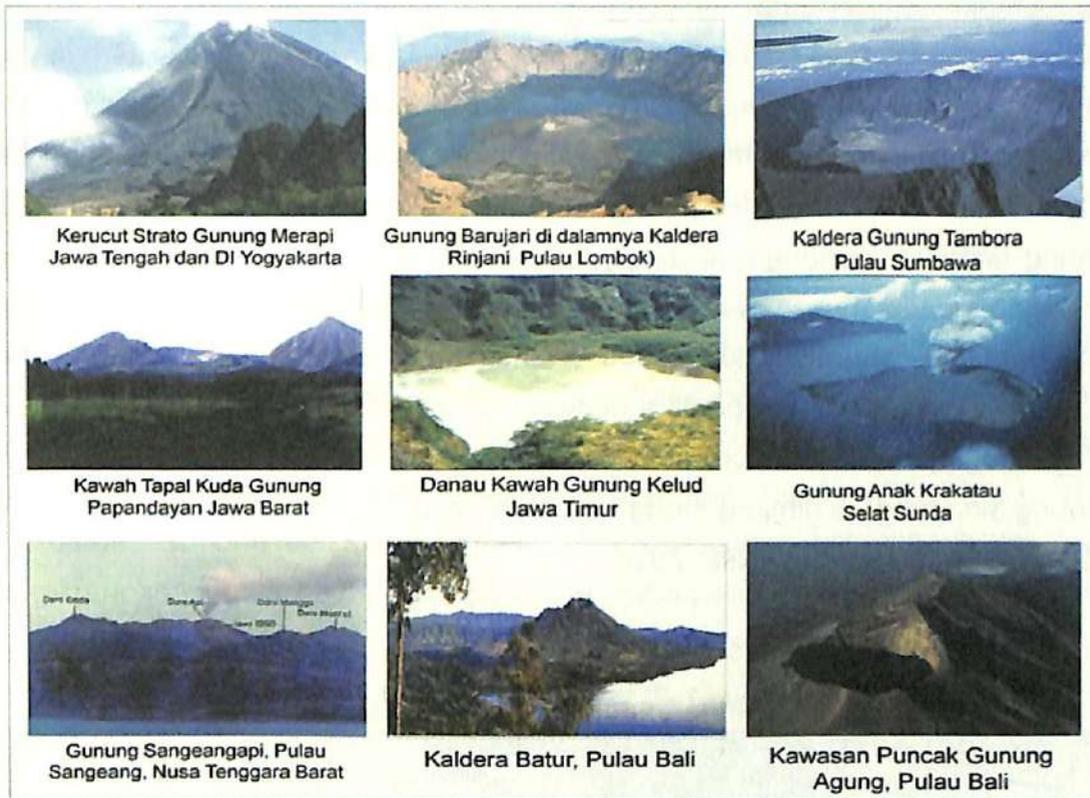
1. Aliran Piroklastis : Aliran massa secara turbulen berupa bahan padat berbagai ukuran dari debu hingga bongkah-bongkah menuruni lereng gunung api secara cepat (80-100 km/jam, suhu panas (300-500)°C
2. Deformasi Permukaan terjadi karena longsoran grafitasi lereng gunung, longsoran dinding kawah dan graben, terjadi penerobosan (intrusi/ injeksi) magma pada kedalaman relatif dangkal. Akibat deformasi maka permukaan tanah menjadi berubah baik miring, vertikal, horisontal. Gerakan berupa sesar/ patahan, rekahan, undulasi/ pembumbungan atau amblesan permukaan tanah. Di Jepang gerakan horisontal bisa mencapai 100 meter (Gunung api Usu di Hokkaido)
3. *Groundtermal anomalies* karena peningkatan dan fluktuasi temperatur bawah permukaan, biasanya berasosiasi dengan kegiatan gunung api, sehingga terjadi pembentukan fumarol baru dan permukaan beruap (*steaming ground*) dapat mematikan tumbuhan dan mengganggu kestabilan lereng karena dapat terjadi subsiden (amblesan)
4. Peningkatan suhu air tanah hingga gradient panas mendekati titik didih, akan mengganggu kestabilan batuan dan tanah di atasnya
5. Letupan freatik atau letupan uap air akan membentuk Gunung Maar.

3.3.2. Bencana Gunung api di Indonesia

Kawasan gunung api di Indonesia merupakan daerah pertanian yang subur dan selalu padat penduduk sejak zaman dahulu, walaupun tidak lepas dari ancaman

bencana letusan. Letusan gunung berapi atau erupsi adalah peristiwa keluarnya magma dari dalam perut bumi yang terdorong oleh gas yang bertekanan sangat tinggi. Sebagian besar gunung api di Indonesia mempunyai bentuk strato. Hal ini disebabkan oleh material yang dikeluarkan berselang-seling antara lava cair – encer dan lava cair – kental. Namun demikian ada beberapa gunung di Indonesia yang mempunyai bentuk maar, seperti gunung Rinjani di Nusa Tenggara serta Gunung Lamongan dan Gunung Bromo di Jawa Timur. Pengelompokan gunung api aktif seperti tersebut di atas, hanya berdasarkan pernah dan tidaknya gunung api tersebut meletus sejak tahun 1600, sehingga tidak menginformasikan jenis ancaman bahaya dan karakteristik gunung api tersebut secara sistematis. Kajian terhadap sebagian dari 129 gunung api aktif di Indonesia, terutama tipe A, yaitu gunung api yang pernah meletus setelah tahun 1600, mengindikasikan bahwa terdapat perbedaan karakter erupsi yang secara langsung berhubungan dengan potensi ancaman bahaya letusannya. Potensi ancaman bahaya letusan gunung api berkaitan dengan keadaan bentang alam puncak (bentuk kawah), tipe dan dinamika letusannya. Ritmann (1960) menghubungkan bentuk gunung api dengan kualitas dan kuantitas magmanya. Kualitas magma dinyatakan dalam kekentalannya (*viskositas*), yaitu proporsi antara mineral yang telah terbentuk dalam magma dan larutan magmatik yang tersisa pada saat terjadi proses pembekuan magma. Magma yang relatif encer (*fluid*), yang biasanya bersusunan basalt cenderung akan membentuk aliran (leleran) lava, sedangkan yang kental (*viscous*) cenderung membentuk kubah lava (Van Padang, 1951 dan Kusumadinata, 1979).

Kenyataan di lapangan adalah sangat bergantung pada dinamika pembentukannya. Kuantitas magma dinyatakan dalam volume magma yang di erupsikan, dinyatakan dalam meter kubik atau kilometer kubik, baik dalam bentuk material yang di erupsikan (lava atau piroklastika) atau dalam satuan yang ekuivalen dengan batuan padat (*Dense Rocks Equivalent = DRE*), yaitu dengan mengkonversikan kandungan fluidanya (gas dan abu halus). Bentuk dan struktur kawah gunung api dipengaruhi oleh geometri pipa kepundannya, yaitu dalam bentuk tabung (*central vent*) yang membentuk bentang alam gunung api kerucut tunggal (*monogenetic*), atau bentuk rekahan memanjang, sehingga membentuk bentang alam berupa deretan kerucut-kerucut (*polygenetic*) pada **Gambar 3.39**.



Gambar 3.39. Beberapa bentuk Gunung api aktif di Indonesia

Bentuk gunung api dan terjalnya lereng yang dibangun oleh material hasil letusannya mencerminkan sejarah panjang evolusi kegiatan gunung api tersebut, baik yang berkaitan dengan tipe-tipe letusan yang pernah terjadi maupun kegiatan tektonik lokal, atau kombinasi keduanya (*volcano-tectonics*). Kajian geologi gunung api (*geo-volcanology*) terhadap produk letusan yang dikombinasikan dengan penarikan umur, baik secara relatif maupun radiometrik dapat dipergunakan untuk mereka ulang (*reconstruction*) tipe dan mekanisme letusannya (Stromboli, Vulcano, Pelee, Hawaii, Merapi, dan lain-lain), sehingga dapat dipergunakan untuk pemodelan dan prakiraan perulangan letusan berdasarkan periode waktu istirahatnya (*repose period*). Pemahaman karakter dan pemantauan kegiatan suatu gunung api secara berkelanjutan, dapat menunjang usaha untuk mengurangi risiko kerugian jiwa dan harta benda akibat letusan gunung api (mitigasi). Letusan gunung api adalah merupakan bagian dari aktivitas vulkanik yang dikenal dengan istilah "erupsi". Hampir semua kegiatan gunung api berkaitan dengan zona kegempaan aktif sebab

berhubungan dengan batas lempeng. Batas lempeng terjadi perubahan tekanan dan suhu yang sangat tinggi sehingga mampu melelehkan material sekitarnya yang merupakan cairan pijar (magma). Magma akan mengintrusi batuan atau tanah di sekitarnya melalui rekahan- rekahan mendekati permukaan bumi. Erupsi gunung api di Indonesia yang berkaitan dengan pembentukan kaldera, antara lain Gunung Kelud, Gunung Tambora, Gunung Krakatau, yang dampak letusannya mempengaruhi iklim dunia, dan mendatangkan bencana geologi di beberapa bagian bumi, yaitu ditandai oleh terjadinya penurunan suhu pada belahan bumi bagian utara. Menurut hasil Evaluasi bencana 2015 dan prediksi bencana tahun 2016 di Indonesia, bahwa dari 127 gunung api aktif di Indonesia saat ini terdapat 1(satu) gunung berstatus Awas (Gunung Sinabung), 5 (lima) gunung berstatus Siaga, 14 gunung berstatus Waspada pada **Tabel 3.10.** (Sutopo BNPB, 2016)

Tabel 3.10.

Status Gunung api di Indonesia

No	Status	Gunung api	Lokasi	Mulai tanggal	Pengungsi (Jiwa)
1	Awas	Gunung Sinabung	Sumatera Utara	02/06/2015	9.319
2	Siaga	Gunung Bromo	Jawa Timur	04/12/2015	-
3	Siaga	Gunung Karangetang	Sulawesi Utara	03/09/2013	-
4	Siaga	Gunung Soputan	Sulawesi Utara	04/01/2016	-
5	Siaga	Gunung Lokon	Sulawesi Utara	24/07/2011	958
6	Siaga	Gunung Egon	Nusa Tenggara Timur	13/01/2016	-
7	Waspada	Gunung Awu	Sulawesi Utara	24/11/2015	-
8	Waspada	Gunung Rinjani	Nusa Tenggara Timur	25/10/2015	-
9	Waspada	Gunung Raung	Jawa Timur	24/08/2015	-
10	Waspada	Gunung Galatama	Maluku Utara	10/03/2015	-
11	Waspada	Gunung Sangeangapi	Nusa Tenggara Barat	17/06/2014	-
12	Waspada	Gunung Rokatenda	Nusa Tenggara Timur	07/04/2014	-
13	Waspada	Gunung Ibu	Maluku Utara	10/12/2013	-
14	Waspada	Gunung Gamkonora	Maluku Utara	01/07/2013	-
15	Waspada	Gunung Papandayan	Jawa Barat	06/06/2013	-
16	Waspada	Gunung Semeru	Jawa Tengah	02/05/2012	-
17	Waspada	Gunung Anak Krakatau	Banten	26/01/2012	-
18	Waspada	Gunung Marapi	Sumatera Barat	03/08/2011	-

No	Status	Gunung api	Lokasi	Mulai tanggal	Pengungsi (jiwa)
19	Waspada	Gunung Dukono	Maluku Utara	15/06/2008	-
20	Waspada	Gunung Kerinci	Jambi	09/09/2007	-

Sumber: Sutopo, BNPB, 2016

3.3.2.1. Bencana Gunung Kelud

Gunung Kelud yang terletak di Kabupaten Kediri, Jawa Timur merupakan salah satu Gunung berapi yang termasuk kategori aktif di Dunia. Akhir-akhir ini aktivitas vulkanik dari beberapa Gunung berapi di Indonesia mulai naik. Gunung api Kelud ini berbentuk strato yang diklasifikasikan sebagai gunung api aktif tipe A. Secara morfologis, Gunung api Kelud ditandai oleh keberadaan beberapa bekas kawah yang tumpang tindih berbentuk tapal kuda di bagian tertentu. Hal ini mencirikan bahwa telah terjadi erupsi secara berulang dan bersifat eksplosif. Telah teridentifikasi sebuah danau kawah pada ketinggian ± 1.200 m yang terbuka ke arah barat, dan diyakini sebagai bekas kaldera letusan yang telah terisi air, serta teramati masih menunjukkan aktivitas vulkanisme. Abad ke XX (dua puluh) tercatat telah lima kali letusan magmatik Gunung Kelud, yaitu pada tahun 1901, 1919, 1951, 1966, dan 1990. Gunung api ini dikenal di dunia karena bencana lahar letusan yang terjadi pada tahun 1919, dan menelan jiwa korban lebih dari 5.000 orang. Kajian atas proses, tipe dan produk letusan Gunung Kelud yang terjadi pada tanggal 10 Februari 1990 memberikan kejelasan karakteristik letusan gunung api ini, yaitu bertipe *St. Vincent* dengan tinggi tiang asap letusan mencapai lebih dari 10 km, memuntahkan 150 – 200 juta m³ rempah letusan (*piroklastika*) dalam waktu yang relatif singkat (kurang dari 10 jam). Lahar letusan terjadi jika volume air danau kawah mencapai lebih dari 5 juta m³, dan dampak letusan yang memusnahkan kawasan puncak gunung api ini, paling tidak dalam radius 5 km dari titik erupsi akibat *seruakan* (*surge*) awan panas letusan. Setiap letusannya selalu diakhiri dengan pembentukan sumbat lava pada lubang kepundannya (Diskom Jatim, 2014).

Kenaikan aktivitas vulkanik ditandai dengan beberapa kejadian sebelum terjadi letusan, awan panas yang diikuti hujan abu sering terjadi. Gunung Kelud meletus pada 13 Februari 2014 mengakibatkan banyak material Alam yang dimuntahkan oleh Gunung berapi tersebut. Material yang terdapat di Alam tersebut dapat digunakan

secara langsung maupun tidak langsung. Dalam dunia konstruksi sebagian besar material mempergunakan material yang tersedia di Alam, salah satunya yaitu beton. Pembuatan beton dapat dilakukan dengan mencampurkan agregat halus, agregat kasar, semen *portland*, air dan bahan tambah. Bahan tambah yang digunakan dalam pembuatan beton dapat dibedakan menjadi dua yaitu bahan tambah yang bersifat mineral (*additive*) maupun bersifat kimiawi (*admixture*).

Gunung Kelud adalah salah satu gunung api yang terdapat pada deretan gunung api aktif di Jawa Tengah, Jawa Timur, dan Bali seperti pada **Gambar 3. 40.**, yaitu Gunung Slamet, Gunung Dieng, Gunung Sindoro, Gunung Sumbing, Gunung Merapi, Gunung Kelud, Gunung Bromo, Gunung Semeru, Gunung Iyang Argopuro, Gunung Ijen, Gunung Raung, Gunung Batur, Gunung Agung. Di samping itu gunung-gunung yang saat ini tidak aktif antara lain Gunung Muria, Gunung Merbabu, Gunung Lawu dan beberapa gunung kecil baik di Jawa Tengah, maupun di Jawa Timur.



Gambar 3.40. Deretan Gunung api di Jawa Tengah, Jawa Timur, Bali

Selama ini bahan muntahan dari kegiatan vulkanik Gunung Kelud yang banyak dimanfaatkan dalam dunia konstruksi adalah pasir dan batuan yang diolah lagi untuk mendapatkan campuran beton. Padahal akibat aktivitas vulkanik tersebut juga menghasilkan material yang dalam jumlah relative banyak yaitu abu vulkanik (*volcanic ash*). Abu vulkanik Gunung Kelud memiliki kandungan unsur oksida silica (SiO_2), oksida alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3) yang cukup tinggi, sehingga dapat digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen untuk meningkatkan sifat mekanik beton Unsur-unsur tersebut bersifat pozolan yang akan menjadikan beton lebih rapat air, dan lebih tahan terhadap serangan kimia (garam, sulfat,

dan air asam). Kenampakan Gunung Kelud dari citra penginderaan jauh dan data lapangan **Gambar 3.41**. Citra Quikbird tahun 2012 Gunung Kelud (**Gambar 3.41** kiri atas). Citra mosaik Landsat 2012 dan DEM SRTM Gunung Kelud (**Gambar 3.41** tengah atas). Citra Landsat 8 LDCM OLI tahun 2013 Gunung Kelud (**Gambar 3.41** kanan atas). Foto lapangan Gunung Kelud (**Gambar 3.41** bawah) adalah saat terjadi bencana letusan tanggal 13 Februari 2014, dan beberapa hari sesudah terjadi letusan, dan beberapa bulan sesudah terjadi letusan.



Gambar 3.41. Kenampakan Gunung Kelud dari citra penginderaan jauh letusan 2014 dan sesudahnya (Citra : Dokumen LAPAN dan Purwadhi dkk., 2014)

3.3.2.2. Bencana Gunung Tambora

Sutawijoyo (2014) mengungkapkan bahwa Letusan Gunung Tambora pada 1815 merupakan letusan terbesar dalam sejarah manusia. Letusan yang memuntahkan 100 km kubik batuan vulkanik, menghancurkan hampir setengah dari tubuhnya yang setinggi ± 4000 meter, dan menghasilkan kaldera berdiameter sepanjang 7 kilometer dan kedalaman 1 kilometer itu, menyebabkan bencana bukan saja di Pulau Lombok dan sekitarnya, melainkan sampai ke Eropa dan belahan bumi bagian utara lainnya. Letusan Tambora 1815 di Pulau Sumbawa menyebabkan dua buah kerajaan musnah terkubur, sebuah kerajaan tertimbun setengahnya, dan beberapa kota hilang. Korban jiwa keseluruhan di Indonesia akibat letusan itu lebih dari 100.000 orang meninggal. Letusan itu juga menyebabkan dampak atmosfer terbesar. Di Eropa dan

belahan bumi bagian utara lainnya terjadi musim dingin berkepanjangan, penyakit dan kelaparan akibat "tahun tanpa musim panas" yang disebabkan oleh letusan katastrofis tersebut. Hasil penelitian dengan mengandalkan metode nondestruktif dan penggalian pada tahun 2004 terhadap kawasan di sekitar Tambora, menemukan bukti-bukti lebih lanjutnya tentang malapetaka hebat di tahun 1815 tersebut. Temuan memberikan informasi awal tentang model penghancuran komunitas oleh letusan gunung api, kehidupan dan budaya penduduk Kerajaan Tambora sebelum 1815 dan keinginan kuat untuk melindungi dan melestarikan situs arkeologi Tambora, serta mempromosikannya sebagai tujuan wisata.

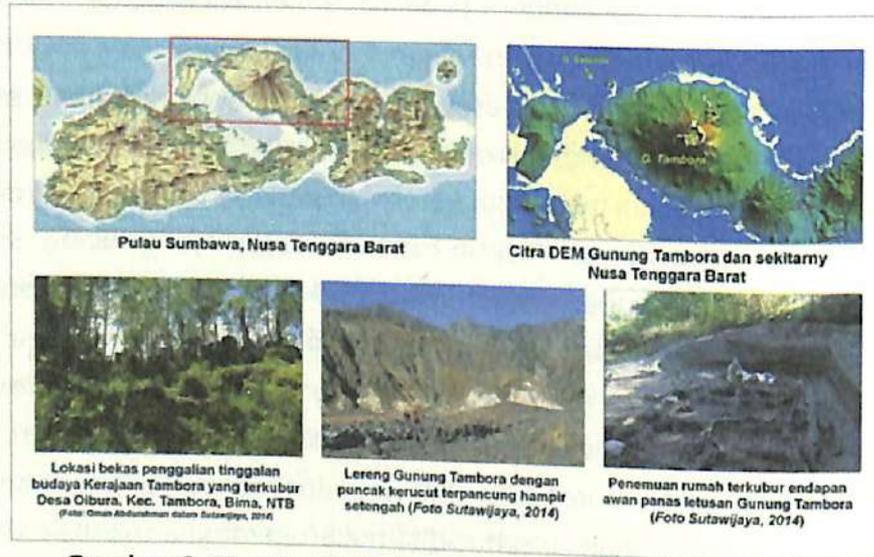
Letusan Gunung Tambora tahun 1815 menghasilkan kolom asap setinggi 33 km yang merupakan letusan jenis *plinian*. Kolom asap ini terdiri atas material batu apung, didorong oleh angin ke arah daratan Sumbawa dan sekitar Gunung Tambora, mengendapkan abu vulkanik dan material batu apung yang hampir menutupi seluruh pulau Sumbawa. Setelah tenggang waktu beberapa hari dengan aktivitas tingkat rendah, letusan mencapai puncaknya pada malam hari 10 April 1815, berupa letusan *plinian* dengan kolom asap mencapai tinggi 44 km. Runtuhnya kolom asap tersebut menghasilkan awan panas yang mengalir ke seluruh lereng gunung ini dan sebagian awan panas ini menerjang air laut hingga menyebabkan tsunami. Catatan sejarah menyebutkan bahwa letusan Tambora ini menghancurkan hampir setengah tubuhnya dari tinggi asalnya sekitar 4000 m menjadi elevasi rata-rata 1500 m dan membentuk kaldera berdiameter 7 km dengan kedalaman kaldera lebih dari 1 km. Letusan ini merupakan peristiwa vulkanik yang mengakibatkan dampak atmosfer terbesar dalam sejarah, karena abu yang dikirim dari Tambora menutup sinar matahari di daratan Eropa dan Kanada sehingga mereka kehilangan musim panas selama setahun, yang dikenal sebagai "tahun tanpa musim panas" (*year without summer*). Letusan Tambora 1815 menyebabkan pula pendinginan global akibat emisi sulfur dioksida dalam jumlah sangat besar menyebar di stratosfer dan mengakibatkan pembentukan aerosol asam sulfat. Pendinginan global ini merupakan peristiwa paling parah yang disebabkan oleh kegiatan gunung api, dan merupakan catatan sejarah yang mengakibatkan krisis ekonomi, sosial, dan politik di dunia barat. Awan panas dan gelombang tsunami adalah fase letusan yang menerjang Pulau Sumbawa dan sekitarnya. Hujan abu dan batu apung di Sumbawa, Lombok dan Bali juga menyebabkan kelaparan yang parah

yang banyak berujung pada kematian. Sebelumnya diketahui bahwa di lereng barat laut terdapat kota Kerajaan Tambora, di lereng timur terdapat Kerajaan Sanggar, dan di lereng selatan terdapat Kerajaan Pekat. Akibat letusan Tambora 1815 itu, Kerajaan Tambora dan Kerajaan Sanggar, dan sebagian Kerajaan Pekat benar-benar hilang terkubur awan panas. Letusan Tambora pada 1815 menjadi kegiatan vulkanik global yang menelan korban jiwa keseluruhan sekitar 117.000 orang.

Penelitian terhadap dampak letusan Tambora tersebut dilakukan pada bulan Agustus 2004, bekerja sama dengan Prof. Haraldur Sigurdsson dari Universitas Rhode Islands, Amerika. Penelitian ini mengukur ketebalan endapan awan panas di beberapa lokasi yang diduga sebagai lokasi masing-masing kerajaan yang hilang, serta untuk mengukur temperatur awan panas saat kejadian. Hasil pengukuran menggunakan GPR (*Ground Penetrating Radar*) menunjukkan bahwa pada bagian alas endapan awan panas ini ditemukan balok-balok kayu yang terarangkan. Penelusuran lebih lanjut ternyata balok-balok kayu tersebut merupakan balok-balok tiang rumah yang roboh, terbakar dan porak poranda akibat terjangan awan panas letusan tahun 1815. Di dalam robohan rumah tersebut ditemukan kerangka manusia dan tulang-tulangnya yang juga terarangkan, terdiri dari dua orang dalam posisi terlentang dan lainnya menelungkup. Diperkirakan kerangka ini adalah penghuni rumah tersebut. Benda lainnya yang ditemukan di sekitar robohan rumah ini adalah tembikar, pecahan porselen Cina, potongan kain, pepaya, kopi, beras yang semuanya sudah terarangkan. Pengukuran temperatur awan panas saat itu berdasarkan pendekatan analisis terhadap panas yang mengubah balok-balok kayu dan benda-benda lainnya menjadi arang tersebut menunjukkan temperatur 600-800oC. Bukti tersebut juga dapat dijumpai di sepanjang pantai Kenanga, di mana batang-batang pohon berdiameter sampai 30 cm seluruhnya terangkat.

Eksplorasi endapan awan panas letusan Gunung Tambora 1815 dilakukan tahun 2006 dan 2008, bekerja sama dengan Prof. Haraldur Sigurdsson dari Universitas Rhode Island, USA. Sebelumnya, telah dilakukan survei awal untuk mengungkap seberapa parah letusan Gunung Tambora ini berdampak terhadap daerah sekitarnya ataupun dampak global. Pemetaan endapan awan panas dilakukan sejak 2004, bahkan Sigurdsson memetakan kawasan Gunung Tambora dan pulau di sekitarnya sejak 1983. Selama kegiatan itu, banyak ditemukan artefak berupa pecahan porselen

buatan Cina pada torehan endapan awan panas oleh ekskavator yang dilakukan PT. Veneer dalam pembuatan jalan untuk mengangkut gelondongan kayu hasil tebangan mereka di lereng Gunung Tambora. Kondisi lapangan Gunung Tambora (Sutawidjaya, 2014) dan lokasi Gunung Tambora pada citra DEM pada **Gambar 3.42**.



Gambar 3.42. Citra DEM Gunung Tambora (Dok LAPAN) dan Foto Lapangan (Sutawidjaya, 2014)

3.3.2.3. Bencana Gunung Krakatau

Gunung Krakatau adalah gunung api di Selat Sunda yang menyebabkan bencana besar pada tanggal 26-27 Agustus 1883, Krakatau adalah pulau vulkanis yang *still-dangerous*, terletak di Selat Sunda, Indonesia. Gunung Krakatau meletus sehingga menewaskan ribuan penduduk, secara resmi, lebih dari 37,000 orang tewas. Muntahan lebih dari 21 kilometer kubik batu dan debu membumbung hingga setinggi 70 mil, dengan tsunami yang ditimbulkannya, korban bisa lebih besar lagi. Rangkaian ledakan dahsyat yang mengerikan dengan kekuatan 13,000 kali lebih besar dari bom Hiroshima. Suara letusannya terdengar hingga ke Perth, Australia dan disebut sebagai suara yang sangat berisik karena terus terjadi selama kurun waktu 40 tahun. Letusan Gunung Krakatau yang terjadi pada tahun 1883 melontarkan lebih dari 10 km³ (DRE) material piroklastika, baik dalam bentuk aliran awan panas letusan maupun abu letusan. Letusan ini menyebabkan jatuhnya korban jiwa lebih dari 36.000 orang meninggal dunia, disebabkan oleh hempasan gelombang pasang (*tsunami*)

yang terjadi akibat hempasan runtuh dinding kawah gunung api ini (*sector failure*) dan aliran awan panas letusan ke dalam laut (Simkin & Fiske, 1983; Camus *et al.*, 1984; Valentine & Fisher, 2000).

Menurut para peneliti di University of North Dakota, ledakan Krakatau bersama ledakan Tambora (1815) mencatatkan nilai Volcanic Explosivity Index (VEI) terbesar dalam sejarah modern. The Guinness Book of Records mencatat ledakan Krakatau sebagai ledakan yang paling hebat yang terekam dalam sejarah. Ledakan Krakatau telah melemparkan batu-batu apung dan abu vulkanik dengan volume 18 kilometer kubik. Semburan debu vulkanisnya mencavai 80 km. Benda-benda keras yang berhamburan ke udara itu jatuh di dataran pulau Jawa dan Sumatera bahkan sampai ke Sri Lanka, India, Pakistan, Australia dan Selandia Baru. Abu letusan Gunung Krakatau menyelimuti atmosfer menyebabkan berkurangnya intensitas sinar dan cahaya matahari yang jatuh ke permukaan bumi, yang bertahan hingga hampir satu tahun lamanya. Efek jangka panjangnya adalah matahari terlihat redup selama setahun serta turunnya suhu udara secara global hingga abad ke-20. Menurut teori dari para ahli vulkanologi, erupsi besar ini akan terulang kembali dalam periode lebih dari 100 tahun. Di lokasi bekas runtuh Gunung Krakatau saat ini telah muncul gunung api baru yang diberi nama Gunung Anak Krakatau. Gunung ini setiap hari tumbuh semakin besar, dengan bertambah tinggi 4–6 meter per tahun dan bertambah lebar 12 meter per tahun. Gunung api Anak Krakatau merupakan pulau Gunung api yang tersusun oleh perselingan lapisan antara aliran lava dan endapan piroklastika. Kompleks Gunung api Krakatau terdiri atas empat pulau, yaitu Rakata, Sertung, Panjang, dan Anak Krakatau. Ketiga pulau pertama merupakan sisa pembentukan kaldera Gunung Krakatau purba, sedangkan Pulau Rakata adalah Gunung api yang tumbuh bersamaan dengan Gunung api Danan dan Perbuatan sebelum terjadi letusan besar pada tahun 1883.

Sejak munculnya di permukaan laut pada 1929 hingga saat ini, pertumbuhan Gunung api Anak Krakatau sangat cepat. Tinggi puncak Gunung api Anak Krakatau dari tahun 1930 hingga 2005, selama 75 tahun, mencapai 315 m. Berdasarkan perhitungan, volume tubuhnya dari dasar laut sejak tahun 1927 sampai dengan 1981 mencapai 2,35 km³, kemudian tahun 1983 menjadi 2,87 km³ dan tahun 1990 mencapai 3,25 km³. Pengukuran terakhir tahun 2000 volume tubuhnya mencapai 5,52 km³. Kegiatan letusan Gunung api Anak Krakatau tahun 1992 sampai 2001

terjadi hampir setiap hari, sehingga dalam sembilan tahun, Gunung api ini bertambah tinggi lebih dari seratus meter, dan penambahan luas areanya sebanyak 378.527 m². Apabila pertambahan tinggi dan volume konsisten, maka diperkirakan pada tahun 2020 volume Gunung api Anak Krakatau sudah melebihi volume Gunung api Rakata, Gunung api Danan, dan Gunung api Perbuwatan (11,01 km³) menjelang letusan katastrofis 1883.

Bemmelen (1949 dalam Sutawidjaya, 2006) berpendapat bahwa kemungkinan erupsi katastrofis dapat terulang kembali apabila komposisi kimia batuan hasil erupsi, berubah dari magma basa (SiO₂ rendah) ke magma asam (SiO₂ tinggi). Ia juga menegaskan bahwa erupsi berbahaya bagi Krakatau umumnya diawali oleh masa istirahat ratusan tahun untuk pengumpulan energi baru. Seperti telah diterangkan sebelumnya, bahwa pertumbuhan Gunung api Anak Krakatau membangun tubuhnya sangat cepat dengan endapan piroklastika dan lava. Dengan melihat pertumbuhan kerucut Gunung api Anak Krakatau yang sangat cepat; semakin tinggi dan besar, kemungkinan dapat terjadi periode penghancuran berikutnya, sekurang-kurangnya terjadi seperti letusan 1883, maka ancaman bahayanya akan melanda kawasan Selat Sunda yang sangat padat penduduk dan menjadi kawasan industri.

Kegiatan letusan Gunung api Anak Krakatau saat ini tidak menimbulkan bencana bagi penduduk di sekitar Selat Sunda maupun bagi pelayaran yang melewati Selat Sunda, karena jangkauan lontaran batu (pijar) terbatas di dalam kompleks Gunung api Anak Krakatau atau beradius 3 km dari pusat erupsi, tinggi tiang asap berkisar antara 100 sampai 1000 m. Namun kondisi ini dikhawatirkan abu yang diterbangkan angin sehingga mencapai jalur pesawat terbang, yang apabila terhisap mesin jet, maka akan merusak mesin tersebut. Berdasarkan hal tersebut, maka segala aspek yang menjadi faktor pendorong peningkatan bahaya atau risiko bagi masyarakat jika terjadi letusan patut diperhitungkan.

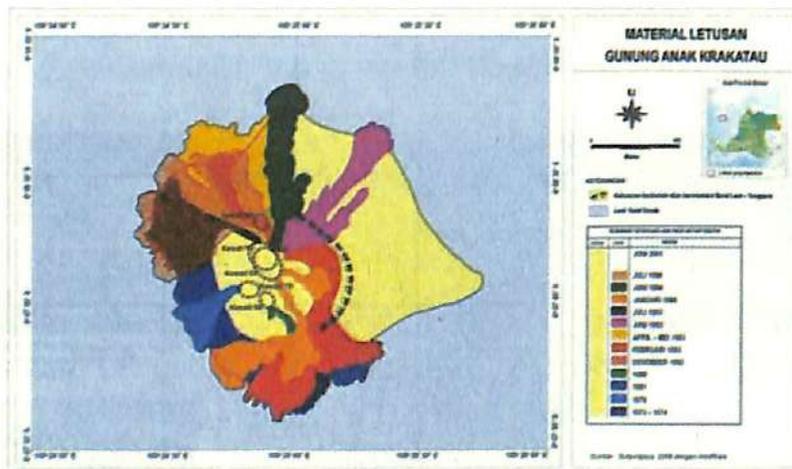
Gunung api Anak Krakatau tumbuh di pusat Kaldera 1883 setelah 44 tahun beristirahat. Tahun 1927 terjadi letusan di bawah laut di pusat Kaldera 1883, dan letusan tersebut menerus sehingga pada tahun 1929, onggokan material vulkanik muncul di permukaan laut yang dinyatakan sebagai kelahiran Gunung api Anak Krakatau. Pertumbuhan Gunung Anak Krakatau yang hingga sekarang ini berlangsung dengan cepat, karena seringkali terjadi letusan (**Gambar 3.43**). Letusan lontaran batuan pijar di dalam kompleks Gunung api Anak Krakatau pada **Gambar 3.43 A** dan letusan abu

yang sering terjadi di Gunung api Anak Krakatau (**Gambar 3.43C**). Sejak tumbuhnya Gunung api ini di permukaan air laut, daerah tertentu seperti di tepi pantai timur masih banyak ditumbuhi vegetasi, sedangkan bagian lereng sampai ke atas masih gundul karena suhu rembesan gas cukup tinggi dan kekurangan air. Kondisi vegetasi daerah gundul selalu mengalami suksesi tumbuhan yang tidak pernah klimaks, tetapi beberapa tumbuhan seperti gelagah (*Saccharum sp.*) dan cemara laut (*Casuarina sp.*) sebagai tumbuhan pionir, terutama di tepi pantai timurnya dapat tumbuh cukup cepat setelah letusan terhenti (**Gambar 3.43B**). Munculnya kerucut baru gunung api ini di atas permukaan air laut ditandai oleh seri erupsi tipe *Surtsey* yang terjadi dari tanggal 29 Desember 1927 sampai tanggal 5 Februari 1928 (Stehn, 1929) pada **Gambar 3.43D**. Kegiatan gunung api ini berlanjut, yang dicirikan oleh erupsi tipe Stromboli disertai aliran lava yang bersusunan basal. Gunung ini tumbuh sebagai sebuah pulau gunung api, Gunung Anak Krakatau, yang hingga saat ini telah mencapai ketinggian lebih dari 300 m di atas permukaan laut (**Gambar 3.43E**). Terumbu karang yang tumbuh pada leleran lava yang masuk ke dalam laut sepuluh tahun lalu, pertumbuhannya sangat lamban dibandingkan dengan yang tumbuh di sekitar Pulau Rakata, Pulau Panjang, dan Pulau Sertung. Hal tersebut kemungkinan karena pendinginan lava memakan waktu cukup lama, walaupun permukaan lava tersebut berbongkah (Sutawidjaya, 2006).



Gambar 3.43. Jenis letusan dan suksesi vegetasi di kompleks Gunung Anak Krakatau (Sutawidjaya, 2006 dengan modifikasi)

Pertumbuhan Gunung api Anak Krakatau sendiri muncul pada kelurusan yang berarah barat laut - tenggara, seperti halnya pertumbuhan Gunung Rakata, Gunung Danan, dan Gunung Perbuwatan, letusan terjadi pada kelurusan akibat letusan tahun 1883, yang tampak dari bentuk kaldera berbentuk elips berorientasi barat laut - tenggara. Pertumbuhan cepat Gunung api Anak Krakatau ini diikuti dengan peningkatan persentase silika secara berangsur, maka kemungkinan dapat terjadi periode penghancuran berikutnya, maka ancaman bahayanya akan melanda kawasan Selat Sunda yang sangat padat penduduk dan menjadi kawasan industri. Beberapa erupsi Gunung Anak Krakatau diakhiri dengan leleran lava dan setiap leleran lava tersebut dipetakan dalam Peta Material Letusan (Gambar 3.44.). Analisis batuan lava-lava tersebut menghasilkan komposisi silika yang berbeda dan persentase silikanya cenderung meningkat dari setiap erupsinya, seperti persentase silika pada Lava Nopember 1992 = 53,95 %, pada Lava Februari 1993 = 53,53%; dan pada Lava Juni 1993 = 53,97% dan leleran lava terakhir dari rentetan letusan tersebut adalah Juli 1996 dengan persentase silika 54,77 %. Kandungan silika tertinggi hasil analisis kimia batuan tersebut di plot kedalam diagram, dan tampak garis kandungan persentase silika meningkat secara halus. (Sutawidjaya, 2006).



Gambar 3.44. Peta Sebaran Material Gunung Anak Krakatau (Sutawidjaya, 2006 dengan modifikasi)

3.3.2.4. Bencana Gunung Merapi

Letusan gunung api dalam sejarah Indonesia merupakan hal yang sudah sangat sering terjadi. Hal karena Indonesia memiliki kurang lebih 500 gunung api, di mana

129 gunung api diantaranya merupakan gunung api aktif. Sejarah letusan gunung api dengan dampak yang sangat besar bahkan tercatat dalam masa sejarah, yakni letusan Gunung api Tambora Tahun 1815 yang menewaskan sekitar 92.000 jiwa dan letusan Gunung api Krakatau Tahun 1883 yang menyebabkan korban jiwa sekitar 36.000 jiwa. Selain itu, saat ini jumlah penduduk yang bermukim di sekitar Gunung api yang aktif di Indonesia sangat banyak.

Hasil penelitian stratigrafi menunjukkan sejarah terbentuknya Gunung Merapi sangat kompleks. Wirakusumah (1989 dalam Subandriyo, 2011) membagi Geologi Merapi menjadi 2 kelompok besar yaitu Merapi Muda dan Merapi Tua. Berthommier (1990) membagi sejarah Gunung Merapi lebih rinci, yaitu menjadi 4 (empat) periode :

1. **Pra Merapi** (+ 400.000 tahun lalu). Periode ini menyisakan Gunung Bibi dengan magma andesit-basaltik berumur \pm 700.000 tahun terletak 2,5 km di lereng timur Merapi termasuk Kabupaten Boyolali. Batuan Gunung Bibi bersifat andesit-basaltik namun tidak mengandung orthopyroxen.
2. **Merapi Tua** (60.000 - 8000 tahun lalu), pada masa ini mulai lahir yang dikenal sebagai Gunung Merapi yang merupakan fase awal dari pembentukannya dengan kerucut belum sempurna. Ekstrusi awalnya berupa lava basaltik yang membentuk Gunung Turgo dan Plawangan berumur sekitar 40.000 tahun. Produk aktivitasnya terdiri dari batuan dengan komposisi andesit basaltik dari awan panas, breksiasi lava dan lahar.
3. **Merapi Pertengahan** (8000 - 2000 tahun lalu), terjadi beberapa lelehan lava andesitik yang menyusun bukit Batulawang dan Gajah Mungkur, yang saat ini nampak di lereng utara Merapi. Batuannya terdiri dari aliran lava, breksiasi lava dan awan panas. Aktivitas Merapi dicirikan dengan letusan efusif (lelehan) dan eksplosif. Diperkirakan pernah terjadi letusan eksplosif dengan " " ke arah barat yang meninggalkan morfologi tapal-kuda dengan panjang 7 km, lebar 1-2 km dengan beberapa bukit di lereng barat. Pada periode ini terbentuk Kawah Pasarbubar.
4. **Merapi Baru** (2000 tahun lalu - sekarang), dalam kawah Pasarbubar terbentuk kerucut puncak Merapi yang saat ini disebut sebagai Gunung Anyar yang saat ini menjadi pusat aktivitas Merapi. Batuan dasar dari Merapi diperkirakan berumur Merapi Tua. Sedangkan Merapi yang sekarang ini berumur sekitar 2000 tahun.

Letusan besar dari Merapi terjadi di masa lalu yang dalam sebaran materialnya di dasar Candi Sambisari yang terletak \pm 23 km selatan dari Merapi. Studi stratigrafi yang dilakukan oleh Andreastuti (1999) telah menunjukkan bahwa beberapa letusan besar, dengan indek letusan (VEI) sekitar 4, tipe Plinian, telah terjadi di masa lalu.

Tipologi erupsi Gunung Merapi berdasarkan kejadian erupsi yang pernah terjadi, tipe erupsi Merapi ternyata bervariasi sehingga tidak bisa diklasifikasikan ke dalam satu tipe erupsi saja. Berdasarkan keragaman erupsi yang pernah terjadi, Hartmann (1934) membuat klasifikasi erupsi Merapi menjadi 4 tipe yaitu tipe A, tipe B, tipe C dan tipe D. Berturut-turut berkaitan dengan kualitas letusan yang makin besar, dimana kualitas letusan ditentukan oleh kandungan gas di dalam magma meskipun dijelaskan secara kuantitatif. Para ahli Gunung api menyusun kriteria besaran letusan secara lebih kuantitatif berdasarkan jumlah meterial dikeluarkan dan ketinggian kolom letusan yang dinamakan VEI (*Volcano Explosivity Index*) dengan skala 0 – 8 (USGS, 2010) seperti **Tabel 3.11**.

Tabel 3.11.

Ekuivalensi indeks letusan dengan tinggi kolom dan volume material (USGS, 2010)

VEI	Tinggi Kolom	Volume	Tipe erupsi	Contoh Letusan
0	< 100 m	1000-an m ³	Hawaiian	Kilauea
1	100-1000 m	10.000-an m ³	Strombolian	Stromboli
2	1-5 km	1.000.000-an m ³	Vulcanian	Galeras (1992)
3	3-15 km	10.000.000-an m ³	Vulcanian	Merapi (2006)
4	10-25 km	100.000.000-an m ³	Plinian	Galunggung (1982)
5	>25 km	1-an km ³	Plinian	St.Helens (1980)
6	>25 km	10-an km ³	Ultra Plinian	Krakatau (1883)
7	>25 km	100-an km ³	Ultra Plinian	Tambora (1815)
8	>25 km	1000-an km ³	Ultra Plinian	Toba (74 ribu tahun lalu)

Tipe erupsi Gunung Merapi dapat dikategorikan sebagai tipe Vulkanian lemah. Tipe lain seperti Plinian merupakan tipe vulkanian dengan daya letusan yang sangat kuat. Erupsi Merapi pada umumnya tidak eksplosif dengan membentuk aliran piroklastik akibat longsornya kubah lava aktif yang terbentuk selama proses erupsi, yang biasa disebut awan panas guguran. Tetapi sesekali terjadi erupsi eksplosif tanpa

diawali oleh pembentukan kubah lava dan menghasilkan awan panas letusan seperti yang terjadi pada tahun 1872 dan 2010. Berdasarkan statistik erupsi Gunung api (Subandriyo, 2011), sampai tahun 2010, sudah tercatat 84 kali kejadian. Selang waktu letusan berkisar antara 1 – 18 tahun, dengan rata-rata 4 tahun. Apabila dikaitkan dengan indeks letusannya terjadi bisa dibuat kriteria sebagai berikut :

1. Letusan dengan VEI 1-2, rata-rata terjadi setiap 4 tahun
2. Letusan dengan VEI 3, berpeluang terjadi setiap 10 – 30 tahun
3. Letusan dengan VEI 4, berpeluang terjadi setiap 100 – 200 tahun
4. Letusan dengan VEI 5, berpeluang terjadi setiap 250 – 500 tahun

Arah erupsi Gunung Merapi, baik yang kecil (normal) maupun besar yang bersifat eksplosif, mempunyai arah dominan ke sektor tertentu. Erupsi Merapi yang normal biasanya diawali dengan pertumbuhan kubah lava yang kemudian longsor membentuk awan panas guguran. Arah bukaan kawah sangat menentukan arah utama awan panas. Kawah utama dalam perkembangannya akan tertutupi oleh sisa-sisa kubah lava dari beberapa kali erupsi. Apabila sudah relatif penuh, erupsi berikutnya akan menjebol kubah lava lama sehingga ada kemungkinan terjadi perubahan arah erupsi. Erupsi Gunung Merapi, normalnya diawali oleh pemunculan kubah lava dan diakhiri pertumbuhan kubah lava baru, setelah erupsi mencapai puncaknya. Pertumbuhan kubah lava selalu mencari zona-zona lemah yang dapat berupa celah antara lava lama dan lava sebelumnya dalam kawah aktif. Munculnya kubah ini dapat diawali dengan letusan vulkanian kecil ataupun hanya mendesak lava lama hingga menghasilkan guguran lava pijar. Kejadian ini sangat tergantung tekanan gas yang terbentuk ketika magma akan keluar dalam proses erupsi. Letusan awal ini akan membongkar sumbat lava lama dan akan menentukan arah erupsi, bisa berubah atau masih mengikuti arah utama bukaan kawah. Dalam sejarah erupsi Gunung Merapi, pernah beberapa kali terjadi perubahan arah erupsi akibat perubahan morfologi puncak. Beberapa letusan telah mengubah morfologi puncak antara lain letusan periode 1822-1823 menghasilkan kawah berdiameter 600 m, periode 1846 - 1848 (200 m), periode 1849 (250 – 400 m), periode 1865 - 1871 (250 m), 1872 - 1873 (480 - 600 m), 1930/1931 dan 2006 (Subandriyo, 2011).

Erupsi Gunung Merapi 2010, merupakan erupsi besar pertama setelah 80 tahun sejak erupsi besar tahun 1930 atau 1931 (VEI 3) tidak terjadi erupsi besar. Secara kronologis, erupsi diawali oleh letusan vulkanian dan menghasil semburan

awan panas pada 26 Oktober 2010, pukul 17.02 WIB yang mengarah ke sektor selatan antara Kali Kuning dan Kali Gendol sejauh 8 km. Awan panas pertama ini menyapu Dusun Kinahrejo dan sekitarnya yang membawa korban tokoh terkenal, Juru Kunci Merapi Mbah Marijan dan 25 orang di sekitarnya. Setelah itu aktivitas erupsi sedikit mereda, tetapi suara gemuruh masih terus berlangsung. Aktivitas erupsi meningkat kembali pada tanggal 29 Oktober 2010. Erupsi tersebut menghasilkan awan panas yang makin membesar hingga mencapai puncaknya pada 5 Nopember 2010. Erupsi Merapi 2010 bersifat eksplosif membentuk kolom letusan setinggi 10 km dari puncak. Sedangkan awan panas (aliran piroklastik) yang utama mengarah ke Kali Gendol (tenggara) sejauh 15 km dari puncak Merapi. Pola erupsinya lebih mirip dengan erupsi Merapi pada 15 April 1872 kemudian reda selama 2 hari, baru pada 17 – 20 April 1872 terjadi letusan utamanya. Kawah yang terbentuk antara kedua letusan tersebut hampir sama dengan diameter antara 480-600 m (Subandriyo, 2011).

Paska erupsi 2010, ancaman bencana yang dominan sektor barat Gunung Merapi adalah banjir lahar yang terjadi di alur Kali Putih dan Kali Pabelan yang merupakan gabungan dari tiga sungai yaitu Kali Senowo, Kali Trising dan Kali Apu. Semua sungai utama di sektor barat seperti Kali Krasak, Kali Putih dan Kali Pabelan bermuara di Kali Progo. Endapan lahar yang masif volumenya mencapai puluhan juta meter kubik dalam satu kali letusan, sangat mungkin endapan sedimen lahar secara kumulatif akan memenuhi alur Kali Progo. Disamping itu arah alur Kali Progo dari utara-selatan relatif tegak lurus dengan sungai-sungai yang berhulu di Gunung Merapi dengan arah timur-barat, akan mengurangi laju aliran utama Kali Progo yang membawa sedimen lahar menuju laut selatan (Subandriyo, 2011).

3.3.2.5. Bencana Gunung Sinabung

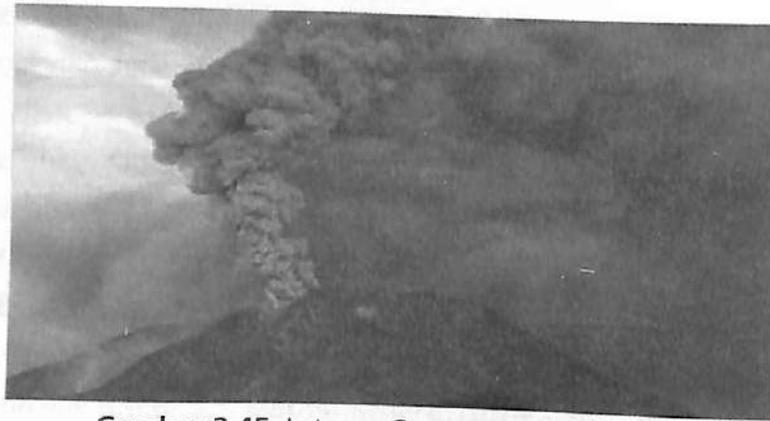
Gunung Sinabung merupakan salah satu gunung di dataran tinggi Kabupaten Karo, Sumatera Utara, Indonesia. Puncak tertinggi Gunung Sinabung ada 2.460 meter dari permukaan laut yang menjadi puncak tertinggi gunung api di Sumatera Utara. Gunung ini belum pernah tercatat meletus sejak tahun 1600. Aktivitas Gunung Sinabung terjadi pada tanggal 27 Agustus 2010, gunung ini mengeluarkan asap dan abu vulkanis. Kemudian, tanggal 17 September 2013, Gunung Sinabung mengeluarkan lava. Abu Gunung Sinabung cenderung meluncur dari arah barat daya

menuju timur laut. Letusan Gunung Sinabung menyemburkan debu vulkanis setinggi 3 – 5 kilometer dan gempa bumi vulkanis yang dapat terasa hingga lebih dari 100 kilometer di sekitarnya. Hasil erupsi Gunung Sinabung mengeluarkan kabut asap yang tebal berwarna hitam disertai hujan pasir dan debu vulkanik yang menutupi ribuan hektar tanaman para petani yang berjarak dibawah radius enam kilometer. Debu vulkanik mengakibatkan tanaman petani yang berada di lereng gunung banyak yang mati dan rusak. Tanah-tanah yang berada disekitar kawasan Gunung Sinabung sebelum meletus akhir-akhir ini memiliki kesuburan yang lebih tinggi sehingga tanaman yang tumbuh di atasnya dapat tumbuh subur, karena material-material yang dikeluarkan dari gunung pada letusan sebelumnya, mengandung hara yang baik bagi tanah setelah melapuk. Debu dan pasir vulkanik yang disemburkan ke langit mulai dari berukuran besar sampai berukuran yang lebih halus. Debu dan pasir vulkanik ini merupakan salah satu batuan induk tanah yang nantinya akan melapuk menjadi bahan induk tanah dan selanjutnya akan mempengaruhi sifat dan ciri tanah yang terbentuk.

Abu vulkanik adalah bahan material vulkanik jatuhan yang disemburkan ke udara saat terjadi suatu letusan dan dapat jatuh pada jarak mencapai ratusan bahkan ribuan kilometer dari kawah karena pengaruh hembusan angin. Debu yang didominasi oleh pasir dan debu halus yang merupakan material padat. Bahan letusan gunung api yang berupa padatan dapat disebut sebagai bahan piroklastik. Bahan padatan ini berdasarkan diameter partikelnya terbagi atas debu vulkan ($< 0.26 \text{ mm}$) yang berupa bahan lepas dan halus, pasir ($0.25 - 4 \text{ mm}$) yang lepas dan tumpul, lapilli (*little stone*) diameter 4-32 cm, yang berbentuk bulat hingga persegi dan bom ($> 32 \text{ mm}$) yang bertekstur kasar. Adanya debu dan pasir vulkanik, yang masih segar akan melapisi permukaan tanah dalam proses peremajaan (*rejuvenate soils*).

Debu vulkanik Sinabung bukanlah produk pembakaran, seperti bahan berbulu lembut yang diciptakan oleh pembakaran kayu, daun, atau kertas. Debu vulkanik sulit, tidak larut dalam air, sangat kasar dan agak korosif, dan melakukan listrik bila basah. Debu vulkanik terbentuk selama letusan gunung berupa ledakan. Letusan peledak terjadi ketika gas-gas dilarutkan dalam batuan cair (magma) memperbesar dan melarikan diri keras ke udara, dan juga ketika air dipanaskan oleh magma dan tiba-tiba berkedip menjadi uap. Kekuatan gas melarikan diri keras menghancurkan

batuan padat. Memperluas gas juga cabik magma dan ledakan itu ke udara, dimana ia membeku menjadi fragmen-fragmen batuan vulkanik dan kaca. Setelah di udara, angin bisa meniup partikel kecil debu puluhan hingga ribuan kilometer jauhnya dari gunung berapi. Ukuran rata – rata butir fragmen batuan dan debu vulkanik meletus dari lubang vulkanik meledak sangat bervariasi antara letusan yang berbeda dan selama letusan ledakan tunggal yang berlangsung berjam – jam sampai berhari – hari. Lebih berat, berukuran fragmen batu besar biasanya jatuh kembali ke tanah pada atau dekat dengan gunung berapi dan lebih kecil dan ringan fragmen yang ditiup semakin jauh dari gunung berapi oleh angin. Debu vulkanik, partikel-partikel terkecil (2 mm atau lebih kecil), dapat melakukan perjalanan ratusan hingga ribuan kilometer arah angin dari gunung api tergantung kecepatan angin, volume debu meletus, dan ketinggian kolom letusan seperti **Gambar 3.45**.



Gambar 3.45. Letusan Gunung Sinabung 2010

Peristiwa erupsi Gunung Sinabung pada 27 Agustus 2010 dan 17 September 2013, menyisakan masalah krusial dengan tetap berada di pengungsian warga/masyarakat Kabupaten Karo yang semula menempati wilayah zona merah (radius 3-5 km) dari puncak Gunung Sinabung yaitu warga yang berasal dari beberapa Desa/Dusun di Kecamatan Payung, Tiganderket, Namanteran dan Kecamatan Simpang Empat. Erupsi dan semburan lahar serta awan panas yang belum menunjukkan tanda-tanda untuk berakhir hingga kini mendorong diperlukannya kawasan untuk relokasi penduduk ke daerah yang aman dari ancaman erupsi Gunung Sinabung. Pasca letusan gunung Sinabung saat terdapat material hasil letusan yang sangat besar dan mengandung banyak jenis unsur hara sehingga berpotensi untuk digunakan

pada tanah sebagai ameliran dan sumber multi-hara tanaman. Debu yang menutupi lapisan atas tanah lambat laun melapuk dan dimulai proses pembentukan (*genesis*) tanah baru. Debu vulkanik terdeposisi di atas permukaan tanah mengalami pelapukan kimiawi dengan bantuan air dan asam-asam organik yang terdapat di dalam tanah. Akan tetapi, proses pelapukannya memakan waktu sangat lama atau dapat mencapai ribuan bahkan jutaan tahun bila terjadi secara alami. Hasil pelapukan lanjut dari debu vulkanik mengakibatkan terjadinya penambahan kadar kation-kation (Ca, Mg, K dan Na) di dalam tanah hampir 50% dari keadaan sebelumnya. Erupsi Gunung Sinabung disertai luncuran awan panas terjadi hari Sabtu 13 Juni 2015 dan hingga saat ini masih dinyatakan berstatus AWAS dengan zona bahaya 7 km arah selatan dan tenggara, serta 4 kilometer arah utara dan timur. Gunung Sinabung ternyata aktivitas vulkanisnya meningkat, sehingga pada hari Rabu tanggal 24 Agustus 2016, kubah lava atau sumbat lava yang 2,6 juta meter kubik runtuh dari kawah gunung. Awan panas guguran terjadi 2 – 6 kali meningkat 20 kali dalam sehari, hingga jam 17.30, terjadi 20 kali awan panas guguran dengan jarak luncur 3,5 km jumlah gempa guguran sebanyak 137 kali, dengan amplitude 5 – 120 milimeter dan lama gempa 37 – 776 detik (BPBD Kabupaten Karo dan pengamat Gunung Sinabung 2016)

3.3.2.6. Bencana Beberapa Gunung api lainnya

Letusan Gunung Slamet (Jawa Tengah) pada periode April-Mei 2014 agaknya berhenti mendadak. Letusan magmatik berupa strombolian berakhir dengan freatik yang menghasilkan abu dan berhenti pada minggu pertama Mei 2014. Status kegiatan Slamet dinyatakan Waspada (level II) pada 12 Mei 2014 yang sebelumnya berstatus Siaga (level III). Setelah istirahat selama dua bulan, pertengahan Juli 2014 aktivitas vulkanik Slamet meningkat. Hal ini ditandai dengan terjadinya letusan abu yang mencapai tinggi 1.500 meter di atas puncak. Gejala visual tersebut didukung dengan terekamnya gempa vulkanik tipe A. Meskipun jumlahnya tidak banyak, tetapi dapat dimaknai bahwa fluida mulai menekan. Pada 17 Juli 2014 tengah malam terdengar suara gemuruh lemah dari Gunung Slamet akibat letusan abu di dasar kawah. Dua minggu kemudian, pada 29 Juli 2014 penduduk dikagetkan dengan suara dentuman. Suara tersebut mengiringi letusan yang cukup besar. Pada 31 Juli mulai terlihat sinar api di puncak pertanda adanya temperatur yang tinggi di dalam kawah. Saat itu,

boleh jadi magma sudah mencapai permukaan. Kondisi ini sangat memungkinkan karena pada periode April-Mei 2014 sesungguhnya fluida magma Gunung Slamet sudah dangkal yang ditandai dengan adanya letusan strombolian. Tanggal 8 Agustus 2014 gempa vulkanik mulai terekam. Meskipun hanya dua kejadian, tetapi indikasi ini menunjukkan bahwa magma mulai memanfaatkan kondisi batuan penutup yang mulai lemah. Atas kejadian tersebut, pada 12 Agustus 2014 status Gunung Slamet dinaikkan kembali menjadi Siaga (level III). Kedalaman sumber gempa vulkanik dapat diketahui dengan menggunakan persamaan :

$$h = k (s-p).$$

Dimana : h adalah kedalaman gempa; k merupakan suatu konstanta yang untuk gunung api andesit bernilai antara 2,5-3; dan (ps) adalah selisih gelombang sekunder (s) dengan gelombang primer (p). Karena $(s-p)$ dari gelombang yang terekam bernilai antara 0,8-1,3 detik, maka gempa vulkanik itu terjadi pada kedalaman 2-3,2 km di bawah kawah. Karena perekahan atau gempa vulkanik tidak terjadi pada wilayah yang *liquid*, maka dapat diduga bahwa kantong magma lebih dangkal dari sumber gempa, atau lebih dangkal dari 2 km. Itulah sebabnya setiap terjadi kenaikan tekanan yang mendadak, selalu diikuti oleh lontaran lava pijar. Paling tidak, setiap terjadi kepulan asap dari dalam kawah, pada malam hari, selalu memancarkan sinar merah pertanda adanya magma dangkal. Bahkan, bukan tidak mungkin lava sudah muncul di dasar kawah. Kedalaman kawah sekitar 150 m. Hingga 23 Agustus 2014 letusan yang dianggap terbesar terjadi pada 17 Agustus 2014. Saat itu letusan strombolian terjadi berkali-kali disertai suara dentuman dan gemuruh. Pantulan sinarnya mencapai ketinggian 500 meter di atas puncak.

3.3.3. Pengelolaan Bencana Gunung api

Pengelolaan tanggap darurat dan pasca bencana letusan gunung api berupa reaksi cepat, evakuasi, pertolongan, rehabilitasi, rekonstruksi untuk bencana letusan gunung api. Pengelolaan tanggap darurat karena harus mempunyai informasi kondisi gunung api, walaupun masih dalam perkiraan, sehingga penanganan dapat dilakukan dalam beberapa jam setelah terjadi bencana letusan gunung api. Informasi tentang terjadinya bencana dan sejarahnya sangat diperlukan, terutama aspek-aspek penting seperti bangunan-bangunan, infrastruktur, kondisi lingkungan bangunan. Berdasarkan hal tersebut, maka aplikasi penginderaan jauh dan sistem informasi geo-

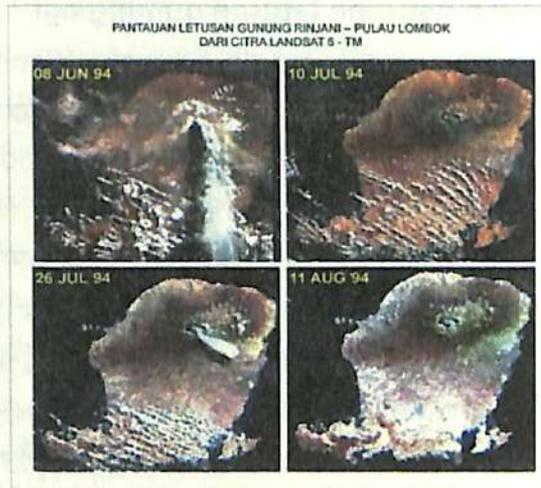
grafis untuk pengelolaan bencana letusan gunung api, yang berisi gambaran wilayah dan sejarah bencana letusan gunung api, dan karakteristiknya, kajian risiko letusan gunung api, kebijakan pengurangan risiko bencana secara administratif, dan secara teknis.

3.3.3.1. Informasi wilayah bencana letusan gunung api

Informasi wilayah bencana dapat membantu pemberian pertolongan dan bermanfaat untuk pembuatan model penaksiran dampak bencana. Model yang berisi data relatif terhadap percepatan seismik gempa sebelum terjadi letusan gunung api, berupa data lapisan batuan dasar, jenis tanah, dan kondisi fisik lingkungan lainnya. Data tersebut dapat digunakan untuk mendeteksi kedalaman, kemunculan, dan besarnya tenaga dari kejadian seismik yang digunakan untuk prediksi kemungkinan terjadinya gempa bumi yang terjadi sebelum letusan gunung api. Model yang dibangun dapat mengungkapkan kemungkinan perluasan dampak dan terjadinya bencana susulan. Oleh karena itu koordinasi basis data (*data base*) mitigasi, prediksi, dan pemulihan perlu dikoordinasikan. Informasi berdasarkan fungsi waktu dan distribusi geografis sangat diperlukan untuk kajian mitigasi bencana letusan gunung api. Kriteria informasi tersebut diklasifikasi sebagai berikut.

1. Informasi yang diperlukan untuk pemulihan
 - a. Lokasi, kondisi, dan luas areal bencana;
 - b. Lokasi bangunan atau areal berisiko tinggi terhadap manusia (reaktor nuklir, pabrik kimia, bendungan);
 - c. Perubahan jalan penghubung (jalan rusak, dan pengalihan jalur);
 - d. Lokasi sebaran kemungkinan bencana lain dari dampak gempa bumi (kebakaran, banjir);
2. Penggunaan informasi bencana letusan gunung api untuk
 - a. Pelayanan darurat;
 - b. Perwakilan petugas untuk memberikan pertolongan
 - c. Badan yang bertanggung jawab baik secara lokal maupun nasional;
 - d. Perusahaan asuransi dan konsultan pengelola bencana;
 - e. Badan-badan yang melakukan survei dan pemetaan nasional;
 - f. Industri konstruksi;
 - g. Media.

3. Kemampuan perolehan informasi bencana letusan gunung api dari data penginderaan jauh satelit, merupakan informasi kondisi gunung api sebelum, saat, dan sesudah terjadinya letusan (erupsi) gunung api. Pemantauan letusan Gunung Rinjani pada tahun 1994 yang dilakukan dengan menggunakan Citra Lansat 5 TM bulan Juni – Agustus 1994 pada **Gambar 3.46**.



Gambar 3.46. pantauan Letusan Gunung Rinjani dari citra Landsat (Purwadh, dkk, 1994 dari citra Dokumen LAPAN, 1994)

3.3.3.2. Kajian risiko bencana gempa bumi

Bencana gunung api yang berpengaruh secara langsung pada manusia adalah letusan gunung api yang berupa lava (lelehan, batu pijar) yang memiliki suhu sangat tinggi, guguran batu pijar, lontaran batu pasir dan kerikil, hujan abu dan lumpur panas, serta awan panas yang dapat turun menyusuri gunung. wilayah rawan ancaman bahaya letusan gunung api dapat ditentukan menggunakan beberapa parameter ukur **Tabel 3.12**.

Tabel 3.12.

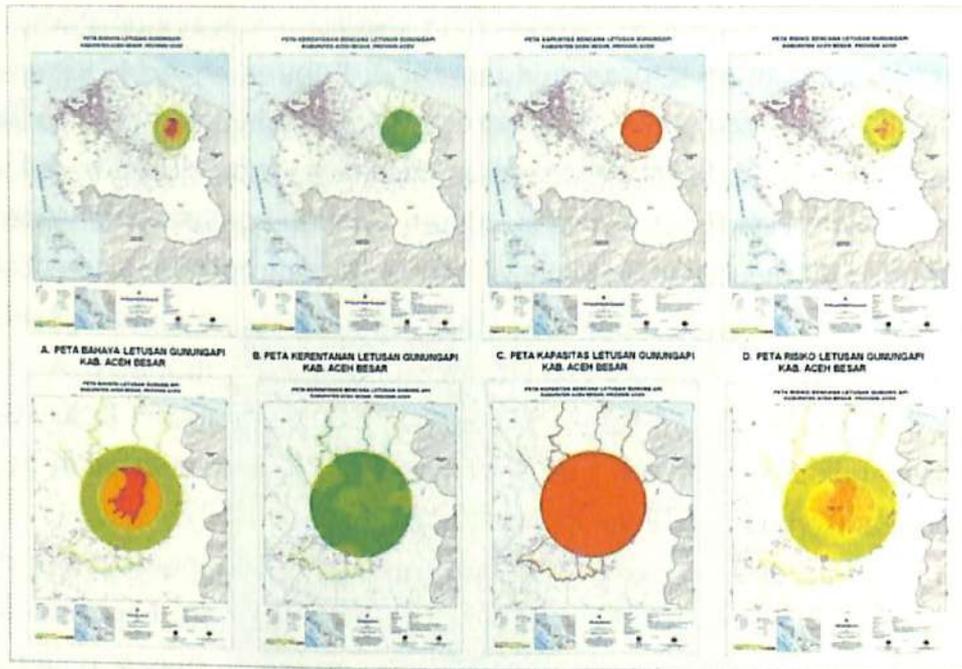
Parameter Penyusunan Peta Bahaya Letusan Gunung api

Parameter	Skor			Bobot
	0,333	0,666	1	
Kawasan KRB	1	2	3	100%

Contoh rawan ancaman bencana gunung api di Kabupaten Aceh Besar. Berdasarkan peta zonasi daerah rawan letusan gunung api disusun berdasarkan

parameter di atas dan divalidasi dengan data kejadian sebagai indikatornya, maka wilayah rawan ancaman letusan gunung api di Kabupaten Aceh Besar. Indeks ancaman bencana letusan gunung api per kecamatan di Kabupaten Aceh Besar secara umum pada Tabel 3.13. Sedangkan sebaran ancaman bencana letusan gunung api ditampilkan dalam Peta Risiko Bencana Letusan Gunung api Kabupaten Aceh Besar pada **Gambar 3.47** mencakup Peta Bahaya Letusan Gunung api Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.47 A**); Peta Kerentanan Letusan Gunung api Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.47 B**); Peta Kapasitas Letusan Gunung api Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.47 C**); Peta Risiko Letusan Gunung api Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.47 D**). sedangkan wilayah yang terkena adalah di Kecamatan Lembah Seulawah dan Kecamatan Lembah Seulimeum.

Berdasarkan peta zonasi daerah rawan bencana gunung api yang disusun berdasarkan parameter di atas dan divalidasi dengan data kejadian sebagai indikatornya, diasumsikan bahwa semakin luas area yang masuk dalam zonasi daerah rawan bencana gunung api, semakin besar ancaman terhadap bahaya gunung api di wilayah tersebut. Berdasarkan hasil analisis kajian risiko, tidak ada wilayah kelas bahaya gunung api **TINGGI** di wilayah Kabupaten Aceh Besar, kelas bahaya letusan gunung api **SEDANG** terletak di Kecamatan Seulimeum. Kelas **tingkat bahaya** letusan gunung api **RENDAH** di Kabupaten Aceh Besar di Kecamatan Lembah Seulawah. Kelas indeks penduduk terpapar di Kecamatan Seulimeum sedang dengan jumlah penduduk terpapar 323, sedangkan di Kecamatan Lembah Seulawah dengan jumlah penduduk terpapar 3966.



Gambar 3.47. Peta Kajian Risiko Bencana Letusan Gunung api Kabupaten Aceh Besar (Purwadi dkk, 2013; Dokumen BNPB, 2013)

Tabel 3.13.

Indeks Ancaman Dan Indeks Penduduk Terpapar Bencana Letusan Gunung api Per Kecamatan di Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh

No	KECAMATAN	PENDUDUK TERPAPAR			Kelas Indeks Dominan Penduduk Terpapar	Kelas Dominan Ancaman
		Tinggi	Sedang	Rendah		
1	LHONGA	0	0	0	-	-
2	LEUPUNG	0	0	0	-	-
3	INDRAPURI	0	0	0	-	-
4	KUTA COT GLIE	0	0	0	-	-
5	SEULIMEUM	0	0	323	SEDANG	RENDAH
6	KOTA JANTHO	0	0	0	-	-
7	LEMBAH SEULAWAH	0	0	3966	RENDAH	TINGGI
8	MESJID RAYA	0	0	0	-	-
9	DARUSSALAM	0	0	0	-	-
10	BAIUSSALAM	0	0	0	-	-

No	KECAMATAN	PENDUDUK TERPAPAR			Kelas Indeks Dominan Penduduk Terpapar	Kelas Dominan Ancaman
		Tinggi	Sedang	Rendah		
11	KUTA BARO	0	0	0	-	-
12	MONTASIK	0	0	0	-	-
13	BLANG BINTANG	0	0	0	-	-
14	INGIN JAYA	0	0	0	-	-
15	KRUENG BARONA JAYA	0	0	0	-	-
16	SUKA MAKMUR	0	0	0	-	-
17	KUTA MALAKA	0	0	0	-	-
18	SIMPANG TIGA	0	0	0	-	-
19	DARUL IMARAH	0	0	0	-	-
20	DARUL KAMAL	0	0	0	-	-
21	PEUKAN BADA	0	0	0	-	-
22	PULO ACEH	0	0	0	-	-

3.4. MITIGASI BENCANA TANAH LONGSOR

Tanah longsor (*landslide*) didefinisikan sebagai proses yang menghasilkan pergerakan kebawah maupun kesamping dari lereng alam maupun buatan yang memiliki kandungan material tanah, batu, tanah timbunan buatan atau gabungan dari tanah dan batu. Terjadinya tanah longsor dipicu oleh faktor – faktor alam seperti jenis batuan, bentuk lahan, struktur dan perlapisan batuan, kemiringan lereng, tebal tanah atau bahan lapuk, curah hujan dan tutupan vegetasi. Secara teknis dapat dikatakan longsor terjadi jika kondisi lereng yang stabil berubah menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan terjadi karena gaya pendorong pada lereng lebih besar dari gaya penahan. Gaya pendorong diakibatkan oleh besarnya sudut kemiringan lereng, air, beban yang membebani tanah di atasnya serta berat jenis tanah batuan. Penyebab gaya penahan adalah kekuatan batuan dan kepadatan tanah (Fabio, 2011).

Ditinjau dari segi gerakannya, maka selain erosi longsor masih ada beberapa erosi yang diakibatkan oleh gerakan massa tanah, yaitu rayapan (*creep*), runtuh batuan (*rock fall*) dan aliran lumpur (*mud flow*). Massa yang bergerak dalam longsor merupakan massa yang besar maka seringkali kejadian tanah longsor akan membawa korban, berupa kerusakan lingkungan, lahan pertanian, permukiman dan infrastruktur serta harta bahkan hilangnya nyawa manusia. Berdasarkan hal tersebut, maka dalam

mempelajari bencana tanah longsor dapat dipandu dengan beberapa pertanyaan berikut.

1. Apakah tanah longsor itu ?
2. Apa saja tipe tanah longsor yang terjadi
3. Bagaimana dapat sering terjadi dan dimana ?
4. Bagaimana dapat terjadi tanah longsor?
5. Apa penyebab utamanya ?
6. Bagaimana penanganan agar yang akan datang tidak terjadi lagi?

Solusi dari setiap pertanyaan tersebut akan membawa kita dalam rencana aksi, mulai dari landasan teori, inventarisasi kejadian, dan cara pengelolaan bencana, sebagai berikut

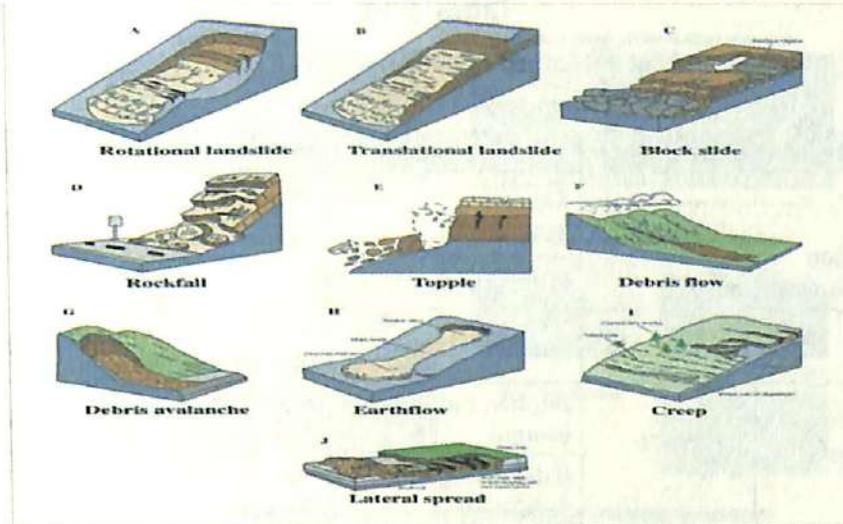
1. Pertanyaan 1 hingga pertanyaan 3, dapat dijawab dengan hasil Inventarisasi mengenai tanah longsor (*Landslide inventory*)
2. Pertanyaan ke 4 dan ke 5 dapat dijawab dari pengetahuan (landasan teori) mengenai tanah longsor (*Expert Knowledge*)
3. Sedangkan pertanyaan ke 6 solusinya dengan pembuatan zonasi rawan bencana tanah longsor dan cara pengelolaan bencana (*Landslide Hazard Zonation And Management*)

3.4.1. Jenis-Jenis Tanah Longsor

Menurut Vernes (1978, dalam USGS, 2004) tanah longsor diklasifikasikan menjadi 6 tipe yang disajikan dalam Gambar 5.48. yang dirinci dalam **Tabel 3.14**.

1. Jatuhan (*Fall*)
2. Longsor Bidang Lengkung/Jungkiran (*Troopple*)
3. Longsor Bidang Datar (*Slide*) ada dua macam rotasi (*slump*) dan translasi (*translation*)
4. Longsor Hambaran/Menyebar (*Lateral Spread*)
5. Longsor Aliran (*Flow*)
6. Longsor Gabungan/ Majemuk (*Complex/Compound*)

Menurut Subowo (2003) enam jenis bencana tanah longsor, digambarkan seperti pada **Gambar 3.49**.



Gambar 3.48. Jenis-jenis tanah longsor (USGS, 2011)

No	Jenis Longsoran	Sketsa	Keterangan
1	Longsoran Translasi	<p>Menunjukkan bidang gelincir yang relatif rata dan menggelombang landai.</p>	Longsoran translasi adalah bergesernya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk rata atau menggelombang landai.
2	Longsoran Rotasi	<p>Menunjukkan bidang gelincir yang berbentuk cekung.</p>	Longsoran rotasi adalah bergesernya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk cekung.
3	Pergerakan Blok	<p>Menunjukkan blok yang bergeser.</p>	Pergerakan blok adalah bergesernya batuan pada bidang gelincir berbentuk rata. Longsoran ini disebut longsoran translasi blok batu.
4	Runtuhan Batu	<p>Menunjukkan jatuhnya batu.</p>	Runtuhan batu adalah runtuhnya sejumlah besar batuan atau material lain bergerak ke bawah dengan cara jatuh bebas. Umumnya terjadi pada lereng yang terjal hingga menggantung.
5	Rayapan Tanah	<p>Menunjukkan tanah yang bergerak lambat.</p>	Rayapan tanah adalah jenis gerakan tanah yang bergerak lambat. Jenis gerakan tanah ini hampir tidak dapat dikenali. Rayapan tanah ini bisa menyebabkan sang telepon, pohon, dan rumah miring.
6	Aliran Bahan Rombakan	<p>Menunjukkan aliran massa tanah yang didorong oleh air.</p>	Gerakan tanah ini terjadi karena massa tanah bergerak didorong oleh air. Kecepatan aliran dipengaruhi kemiringan lereng, volume dan tekanan air, serta jenis materialnya. Gerakannya terjadi di sepanjang lembah dan mampu mencapai ribuan meter.

Gambar 3.49. Jenis-jenis tanah longsor (Subowo, 2003)

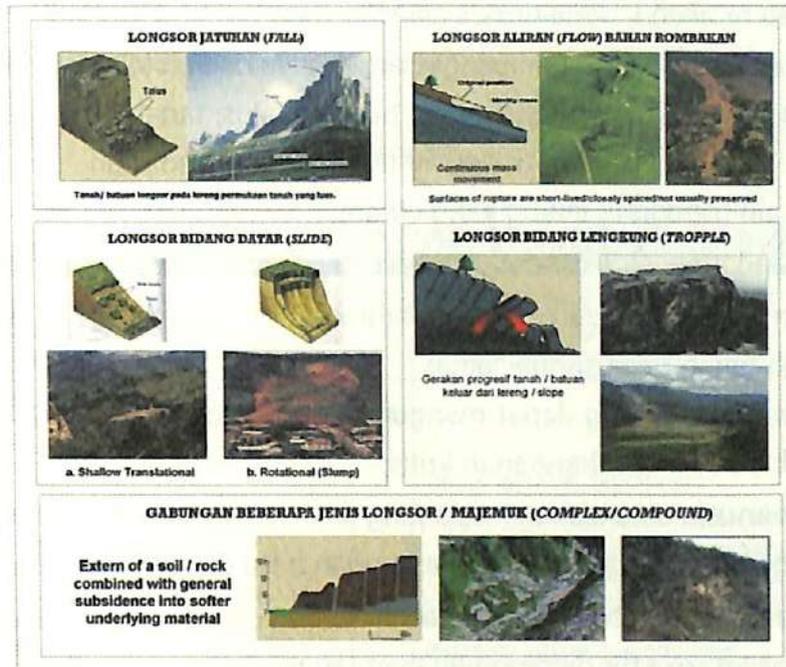
Tabel 3.14.

Klasifikasi Tanah Longsor (*landslide*)

(Sumber : Vernes (1978) dalam USGS, 2004)

JENIS GERAKAN TANAH			JENIS MATERIAL		
Runtuhan Butir kasar Runtuhan batuan Runtuhan bahan rombakan			Batuan	Tanah teknik	
			Butir halus		
			Runtuhan tanah		
Robohan			Robohan batuan	Robohan bahan rombakan	Robohan tanah
Longsor	Rotasi	Beberapa unit	Jatuhan batuan (slump)	Jatuhan batuan (slump)	Jatuhan tanah
			Bidang lengkung (luncuran)	Bidang lengkung (luncuran)	Bidang lengkung (luncuran)
	Translasi	Banyak unit	Luncuran blok batuan	Longsor blok bahan rombakan	Longsor blok tanah
			Luncuran batuan (bidang lurus)	Longsor bahan rombakan	Longsor tanah
Longsor Hamparan/Menyebar/pencaran (<i>Lateral Spread</i>)			Hamparan/Pencaran batuan	Hamparan/Pencaran bahan rombakan	Hamparan/pencaran tanah
Longsor Aliran (<i>Flow</i>) Lavina bahan rombakan Rayapan bahan rombakan Aliran blok			Aliran batuan (rayapan dalam) Aliran pasir kering Aliran tanah Aliran lepas	Aliran bahan rombakan solifluction	Aliran pasir / lanau basah
Longsor aliran Gabungan/ Majemuk (<i>Complex/Compound</i>)			Campuran dari dua atau lebih jenis gerakan		

Keenam jenis bencana tanah longsor yang paling banyak terjadi di Indonesia adalah jenis tanah longsor translasi dan rotasi. Hal tersebut karena tingkat pelapukan batuan di Indonesia (daerah tropis) yang tinggi, sehingga tanah yang terbentuk cukup tebal. Sedangkan tanah longsor yang paling banyak menelan korban harta, benda dan jiwa manusia adalah aliran bahan rombakan, karena longsor jenis aliran bahan rombakan dapat menempuh jarak yang cukup jauh, yaitu bisa mencapai ratusan bahkan ribuan meter, terutama pada daerah-daerah aliran sungai di sekitar gunung api. Kecepatan longsor jenis ini sangat dipengaruhi oleh kemiringan lereng, volume dan tekanan air, serta jenis materialnya. Kenampakan di lapangan dari setiap jenis tanah longsor dalam penelitian Purwadhi dkk (2008) seperti pada **Gambar 3.50**.



Gambar 3.50. Jenis-jenis tanah longsor dan kenampakan lapangan (Purwadhi dkk, 2008)

3.4.2. Penyebab Terjadinya Tanah Longsor

Penyebab terjadinya tanah longsor merupakan jawaban dari pertanyaan ke 4 Bagaimana dapat terjadi tanah longsor? dan pertanyaan ke 5 Apa penyebab utamanya? Seperti telah dikatakan di atas bahwa jawabannya berdasarkan pengetahuan (landasan teori) mengenai tanah longsor (*Expert Knowledge*). Faktor penyebab terjadinya gerakan pada lereng juga tergantung pada kondisi batuan dan tanah penyusun lereng, struktur geologi, curah hujan, vegetasi penutup dan penggunaan lahan pada lereng tersebut, namun secara garis besar dapat dibedakan sebagai faktor alami dan manusia. Menurut Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (2005), tanah longsor dapat terjadi karena faktor alam dan faktor manusia sebagai pemicu tanah longsor, yaitu :

1. **Faktor alam**, yang menjadi faktor utama terjadinya longsor antara lain:
 - a. Kondisi geologi: batuan lapuk, kemiringan lapisan, sisipan lapisan batu lempung, lereng yang terjal yang diakibatkan oleh struktur sesar dan kekar (patahan dan lipatan), gempa bumi, stratigrafi dan gunung api, lapisan batuan yang kedap air miring ke lereng yang berfungsi sebagai bidang longsor,

- adanya retakan karena proses alam (gempa bumi, tektonik).
- b. Keadaan tanah : erosi dan pengikisan, adanya daerah longsoran lama, ketebalan tanah pelapukan bersifat lembek, butiran halus, tanah jenuh karena air hujan.
 - c. Iklim: curah hujan yang tinggi, air (hujan. di atas normal)
 - d. Keadaan topografi: lereng yang curam.
 - e. Keadaan tata air: kondisi drainase tersumbat, akumulasi massa air, erosi dalam, pelarutan dan tekanan hidrostatika, susut air cepat, banjir, aliran bawah tanah pada sungai lama).
 - f. Penutup lahan yang dapat mengurangi tahan geser, misalnya lahan kosong, semak belukar di lahan/tanah kritis.
2. **Faktor manusia** atau ulah manusia yang tidak bersahabat dengan alam antara lain:
- a. Pemotongan tebing pada penambangan batu di lereng yang terjal.
 - b. Penimbunan tanah urugan di daerah lereng.
 - c. Kegagalan struktur dinding penahan tanah.
 - d. Perubahan tata lahan seperti penggundulan hutan menjadi lahan basah yang menyebabkan terjadinya pengikisan oleh air permukaan dan menyebabkan tanah menjadi lembek
 - e. Adanya budidaya kolam ikan dan genangan air di atas lereng.
 - f. Sistem pertanian yang tidak memperhatikan irigasi yang aman.
 - g. Pengembangan wilayah yang tidak diimbangi dengan kesadaran masyarakat, sehingga RUTR tidak ditaati yang akhirnya merugikan sendiri.
 - h. Sistem drainase daerah lereng yang tidak baik yang menyebabkan lereng semakin terjal akibat penggerusan oleh air saluran di tebing.
 - i. Adanya retakan akibat getaran mesin, ledakan, beban massa yang bertambah dipicu beban kendaraan, bangunan dekat tebing, tanah kurang padat karena material urugan atau material longsoran lama pada tebing.
 - j. Terjadinya bocoran air saluran dan luapan air saluran

Menurut Purwadhi (2001) penyebab terjadinya tanah longsor mencakup gaya pemicu, gaya penyebab, gaya penahan, dan prinsip kestabilan lereng, yang dapat mempengaruhi terjadinya gerakan tanah antara lain : tingkat kelerengan, karakteristik tanah, keadaan geologi, keadaan vegetasi, curah hujan/hidrologi, dan aktivitas manusia di wilayah tersebut. Tanah longsor sering terjadi disebabkan oleh beberapa

faktor yang terjadi secara bersamaan antara faktor pemicu, faktor penyebab, dan faktor penahan. Faktor penyebab terjadinya tanah longsor seperti pada **Tabel 3.15**.

Tabel 3.15.

Faktor penyebab dan pemicu terjadinya tanah longsor (*Purwadhi, 2001*)

FAKTOR ALAM		FAKTOR MANUSIA	
1	Lereng terjal diakibatkan oleh 1. Adanya patahan-lipatan 2. Pengikisan/ erosi	1	Lereng menjadi terjal akibat 1. Pemotongan lereng 2. Penggerusan air saluran di tebing
2	Bidang lemah pada longoran lama	2	-
3	Tanah tebal karena proses pelapukan	3	-
4	Tanah lembek 1. Batuan halus (lempung-lanau) 2. Jenuh air karena hujan	4	Tanah lembek dipicu oleh 1. Merubah lahan dengan tanaman berakar kuat menjadi lahan sawah 2. Adanya kolam genangan air
5	Adanya retakan karena proses alam/ gempa tektonik	5	Adanya retakan karena getaran mesin atau ledakan, penambangan dsb
6	Beban masa tanah/ batuan karena proses alam	6	Beban tanah bertambah dipicu oleh beban kendaraan, bangunan dekat tebing
7	Tanah kurang padat/ lepas karena faktor alam	7	Tanah kurang padat karena tanahurugan atau longoran lama pada tebing
8	Air 1. Hujan di atas normal 2. Susut air cepat 3. Banjir 4. Aliran di bawah tanah pada sungai lama	8	Air 1. Bocoran air saluran 2. Luapan air saluran 3. Kolam-kolam 4. Lahan sawah
9	Lapisan batuan yang kedap air miring ke arah lereng	9	-
10	-	10	Pengikisan oleh air permukaan karena penggundulan hutan

Penyebab terjadinya tanah longsor tersebut dapat bersifat statis dan dinamis (**Tabel 3.16**). Statis merupakan kondisi alam seperti sifat batuan (geologi) dan lereng dengan kemiringan sedang hingga terjal, sedangkan dinamis adalah ulah manusia. Ulah manusia banyak sekali jenisnya dari perubahan tata guna lahan hingga pembentukan gawir yang terjal tanpa memperhatikan stabilitas lereng. (Surono, 2003).

Tabel 3.16.

Faktor penyebab dan pemicu tanah longsor (Surono, 2003)

No	Penyebab/Pemicu	Parameter
1	Faktor Pemicu Dinamis	1. Curah hujan
		2. Kemiringan lereng
		3. Penggunaan lahan (aktivitas manusia)
2	Faktor Pemicu Statis	4. Jenis batuan dan struktur geologi
		5. Kedalaman kolom tanah
		6. Permeabilitas tanah
		7. Tekstur tanah

3.4.2.1. Faktor curah hujan

Curah Hujan merupakan salah satu pemicu terjadinya tanah longsor, karena besarnya curah hujan mengakibatkan tekanan lateral pada tanah. Tekanan lateral yang diakibatkan oleh air terutama air hujan. Hujan pemicu gerakan tanah adalah hujan yang mempunyai curah tertentu dan berlangsung selama periode waktu tertentu, sehingga air yang jatuh akan berinfiltrasi ke dalam tanah. Air yang berinfiltrasi ke dalam tanah akan berakumulasi di sepanjang bidang longsor akan mereduksi tegangan efektif dan mengurangi kuat geser tanah.

Tipe hujan deras hanya akan efektif memicu longsor pada lereng-lereng yang tanahnya mudah menyerap air misalnya pada tanah lempung pasir atau tanah pasir yang bersifat *permeable*. Lereng yang demikian longsor dapat terjadi pada bulan awal-awal musim hujan. Apabila tanah pembentuk lereng merupakan tanah lempung yang sulit meloloskan air (*impermeable*), hujan yang deras kurang efektif meresap (berinfiltrasi) ke dalam tanah dan hanya akan menjadi aliran permukaan/limpasan (*run off*). Jadi bisa disimpulkan bahwa hujan yang tidak deras tetap durasinya lama, lebih efektif memicu terjadinya gerakan tanah / longsor.

Hujan dengan durasi lama ini dikenal dengan nama hujan *anteseden*. Ancaman tanah longsor di Indonesia biasanya dimulai pada bulan November karena meningkatnya intensitas curah hujan. Musim kering yang panjang akan menyebabkan terjadinya penguapan air di permukaan tanah dalam jumlah besar. Hal itu mengakibatkan munculnya pori-pori atau rongga tanah hingga terjadi retakan dan merekahnya tanah permukaan. Awal musim hujan biasanya sering terjadi intensitas

hujan yang tinggi, sehingga kandungan air pada tanah menjadi jenuh dalam waktu singkat. Hujan lebat pada awal musim dapat menimbulkan longsor, karena melalui tanah yang merekah air akan masuk dan terakumulasi di bagian dasar lereng, sehingga menimbulkan gerakan lateral. Apabila ada pepohonan di permukaannya, tanah longsor dapat dicegah karena air akan diserap oleh tumbuhan. Akar tumbuhan juga akan berfungsi mengikat tanah.

4.4.2.2. Faktor kelerengan / kestabilan lereng

Faktor kelerengan menjadi faktor yang sangat penting dalam proses terjadinya tanah longsor. Pembagian zona kerentanan sangat terkait dengan kondisi kemiringan lereng. Kondisi kemiringan lereng lebih 15° perlu mendapat perhatian terhadap kemungkinan bencana tanah longsor dan tentunya dengan mempertimbangkan faktor-faktor lain yang mendukung. Pada dasarnya sebagian besar wilayah di Indonesia merupakan daerah perbukitan atau pegunungan yang membentuk lahan miring. Namun tidak selalu lereng atau lahan yang miring berbakat atau berpotensi longsor. Potensi terjadinya gerakan pada lereng juga tergantung pada kondisi batuan dan tanah penyusun lerengnya, struktur geologi, curah hujan, vegetasi penutup, dan penggunaan lahan pada lereng tersebut. Lereng yang rentan untuk bergerak/longsor terdapat 3 tipologi, yaitu :

1. Lereng yang tersusun oleh tumpukan tanah gembur dialasi oleh batuan atau tanah yang lebih kompak atau lereng timbunan tanah residual yang dialasi oleh batuan kompak
2. Lereng yang tersusun oleh pelapisan batuan miring searah lereng atau lereng batuan yang berlapis searah lereng topografi.
3. Lereng yang tersusun oleh blok-blok batuan.

Kemantapan suatu lereng (kestabilan lereng) tergantung kepada gaya penggerak dan gaya penahan yang ada pada lereng tersebut. Gaya penggerak adalah gaya-gaya yang berusaha untuk membuat lereng longsor, sedangkan gaya penahan adalah gaya-gaya yang mempertahankan kemantapan lereng tersebut. Jika gaya penahan ini lebih besar daripada gaya penggerak, maka lereng tersebut tidak akan mengalami gangguan atau berarti lereng tersebut mantap. Faktor - faktor kestabilan lereng penyebab tanah longsor umumnya dipengaruhi oleh kondisi geometri lokasi,

pola drainase, dan kondisi geologi lokal atau kondisi tanah/batuan. Struktur geologi material pembentuk lereng sangat menentukan kestabilan lereng. Ketidakmenerusan (*discontinuity*) seperti patahan-patahan (*faults*), lipatan-lipatan (*folds*) dan kekar-kekar (*joints*).

Faktor kestabilan lereng tersebut akan mengontrol kemantapan suatu lereng agar tidak terjadi tanah longsor. Kestabilan pada lereng ditentukan oleh gaya-gaya yang berusaha melongsorkan (*driving forces*) tanah atau batuan dan gaya-gaya yang berusaha mempertahankan (*resisting forces*) tanah atau batuan itu tetap pada posisinya. Besarnya kuat geser tanah atau batuan dikontrol oleh kohesi (c) dan sudut gesek dalam antara partikel-partikel penyusun tanah atau batuan (ϕ). Besarnya nilai kohesi tergantung pada kekuatan ikatan antara atom-atom atau molekul-molekul penyusun partikel-partikel tanah atau batuan ataupun tergantung pada kekuatan sementasi antar partikel-partikel tanah atau batuan. Sudut gesek dalam merupakan nilai yang mengekspresikan kekuatan friksi antara partikel-partikel penyusun tanah atau batuan. Menurut Coulomb (1976 dalam Karnawati, 2005) mendefinisikan fungsi kuat geser sebagai berikut :

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan\phi$$

Dimana : τ = kuat geser tanah (kN/m^2);

c = kohesi tanah (kN/m^2);

σ = tegangan normal (kN/m^2);

u = tekanan air pori (kN/m^2);

ϕ = sudut gesek dalam tanah ($^\circ$)

Kontribusi pengurangan kuat geser tanah pada lereng alam yang mengalami longsor disebabkan oleh faktor yang dapat berasal dari alam itu sendiri, erat kaitannya dengan kondisi geologi antara lain jenis tanah, tekstur (komposisi) dari tanah pembentuk lereng sangat berpengaruh terjadinya longsor, misalnya adanya lapisan tanah serpih (*shale*), tanah berbutir halus (*loess*), pasir lepas (*loose sand*), dan bahan organik. Bentuk butiran tanah (bulat atau tajam) sangat berpengaruh terhadap gesekan (*friction*) yang terjadi dalam tanah, pelapisan tanah, pengaruh gempa, geomorfologi (kemiringan lereng), iklim, terutama hujan dengan intensitas tinggi atau sedang, dengan durasi yang lama di awal musim hujan, atau menjelang akhir

musim hujan, menimbulkan perubahan parameter tanah yang berkaitan dengan pengurangan kuat gesernya. Pengurangan kuat geser pada batuan dapat diakibatkan oleh adanya diskontinuitas, sifat kekakuan, arah *bedding*, *joint*, orientasi lereng, derajat sementasi batuan misalnya konglomerat, batuan pasir, breksi, dan lain - lain. Kestabilan suatu lereng yaitu perbandingan antara gaya-gaya penahan logsor dan gaya-gaya penyebab longsor, atau dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$FK = \text{Gaya penahan longsor} / \text{Gaya penyebab longsor}$$

Dimana :

FK merupakan faktor keamanan (*Factor of Safety*) yang menggambarkan kondisi suatu lereng.

1. Lereng dalam kondisi stabil jika $FK > 1$;
2. Lereng dalam kondisi kritis jika $FK = 1$;
3. Lereng dalam kondisi tidak stabil atau telah longsor jika $FK < 1$.

Berdasarkan hal tersebut lereng terjal atau tebing yang terjal akan memperbesar gaya pendorong. Lereng yang terjal terbentuk karena pengikisan air sungai, mata air, air laut, dan angin. Kebanyakan sudut lereng dengan kemiringan $> 40^\circ$ sangat rentan terhadap longsor. Lereng terjal yang banyak batuan lepas sangat berbahaya, terutama bagi kendaraan yang melintas di bawahnya. Lereng di sisi jalan atau lereng bekas galian badan jalan merupakan lokasi yang rawan longsor. Kaki lereng di sepanjang galian sangat mudah tergerus air sehingga menghilangkan dukungan tanah terhadap longsor.

3.4.2.3. Faktor aktivitas manusia

Faktor aktivitas manusia seperti penggalian atau pemotongan kaki lereng, penataan pemanfaatan lahan, penggundulan hutan, pengaturan drainase yang buruk dapat menyebabkan tanah longsor.

1. Longsor (tanah longsor) akibat penggalian kaki lereng dapat mengurangi tekanan *overburden*, sehingga tanah atau batuan mengembang dan kuat gesernya turun. Penggalian yang mempertajam kemiringan lereng. Banyak kejadian longsor dipicu oleh penggalian lereng untuk jalan raya, jalan keretaapi (rel) dan pembangunan di atas lereng. Muka air tanah memotong lereng, dimana

- air tanah yang memotong lereng akan menimbulkan munculnya mata air pada daerah ini. Mata air ini diakibatkan oleh terakumulasinya air yang berinfiltrasi ke dalam lereng yang akan melunakkan tanah atau batuan pembentuk lereng.
2. Jenis penggunaan lahan yang banyak terjadi tanah longsor di daerah lahan persawahan, perladangan, daerah genangan air di lereng yang terjal. Lahan persawahan akarnya kurang kuat untuk mengikat butir tanah dan membuat tanah menjadi lembek dan jenuh dengan air sehingga mudah terjadi longsor. Sedangkan untuk daerah perladangan penyebabnya karena akar pohonnya tidak dapat menembus bidang longsorannya umumnya terjadi di daerah longsorannya lama.
 3. Penggundulan hutan umumnya banyak terjadi tanah longsor di daerah yang relatif gundul dimana pengikatan air tanah kurang. Selain itu akibat penggundulan hutan di sekitar tikungan sungai, tebing akan menjadi terjal dan mudah tererosi. Perubahan tersebut menyebabkan penurunan tahanan geser tanah pembentuk lereng akibat kenaikan kadar air, kenaikan tekanan air pori, tekanan rembesan oleh genangan air di dalam tanah, tanah pada lereng mengandung lempung yang mudah mengembang dan lain-lain. Penutup vegetasi berpengaruh terhadap aliran permukaan, erosi, dan longsor melalui (1) Intersepsi hujan oleh tajuk vegetasi/tanaman, (2) Batang mengurangi kecepatan aliran permukaan dan kanopi mengurangi kekuatan merusak butir hujan, (3) Akar meningkatkan stabilitas struktur tanah dan pergerakan tanah, (4) Transpirasi mengakibatkan kandungan air tanah berkurang. Keseluruhan hal ini dapat mencegah dan mengurangi terjadinya erosi dan longsor. Tanaman mampu menahan air hujan agar tidak merembes untuk sementara, sehingga bila dikombinasikan dengan saluran drainase dapat mencegah penjuhan material lereng dan erosi buluh.
 4. Buruknya sistem drainase atau drainase tidak berfungsi dengan baik akan memicu aliran air kemana-mana. Air akan berusaha mencari tempat yang lebih rendah dan sebagian akan berinfiltrasi ke dalam tanah. Air yang mengalir di dalam tanah dapat menjenuhkan dan melunakkan tanah timbunan dan tanah pondasi jalan yang dapat berakibat rusaknya konstruksi. Demikian pula air permukaan (*run off*) yang tidak mengalir dengan baik ke luar struktur timbunan, akan menjenuhkan tanah atau merembes masuk ke dalam rekahan batuan yang akan mengurangi kestabilan lereng. Perubahan posisi muka air secara cepat (*rapid drawdown*) pada

sungai, bendungan, dan lain-lain. Susut muka air danau dan bendungan yang cepat mengakibatkan gaya penahan lereng menjadi hilang, dengan sudut kemiringan waduk 22° akan mudah terjadi longsor dan penurunan tanah yang biasanya diikuti oleh retakan. Pengikisan atau erosi banyak dilakukan oleh air sungai ke arah tebing.

5. Daerah pembuangan sampah yang tidak diperhitungkan kondisi infiltrasi air ke tanah akan menimbulkan tanah longsor. Penggunaan lapisan tanah yang rendah untuk pembuangan sampah dalam jumlah banyak dapat mengakibatkan tanah longsor apalagi ditambah dengan guyuran hujan, seperti yang terjadi di Tempat Pembuangan Akhir Sampah Leuwigajah di Cimahi. Bencana ini menyebabkan sekitar 120 orang lebih meninggal.

3.4.2.4. Faktor geologi

Faktor geologi yang mempengaruhi terjadinya gerakan tanah adalah struktur geologi, sifat batuan, hilangnya perekat tanah karena proses alami (pelarutan), dan gempa. Struktur geologi yang mempengaruhi terjadinya gerakan tanah adalah kontak batuan dasar dengan pelapukan batuan, retakan/rekahan, perlapisan batuan, dan patahan. Zona patahan merupakan zona lemah yang mengakibatkan kekuatan batuan berkurang sehingga menimbulkan banyak retakan yang memudahkan air meresap (Surono, 2003).

3.4.2.4.1. Kestabilan bidang kontak antar batuan

Bidang kontak antara tanah penutup dengan batuan dasar dapat terjadi diskontinuitas (bidang tidak sinambung). Bidang longsor mengikuti permukaan bidang kontak antara

1. Tanah pelapukan dan batu,
2. Tanah urugan dengan tanah asli pada lereng,
3. Batuan yang mempunyai retakan dengan batuan masif,
4. Jenis dan sifat tanah yang berbeda pada perlapisan batuan

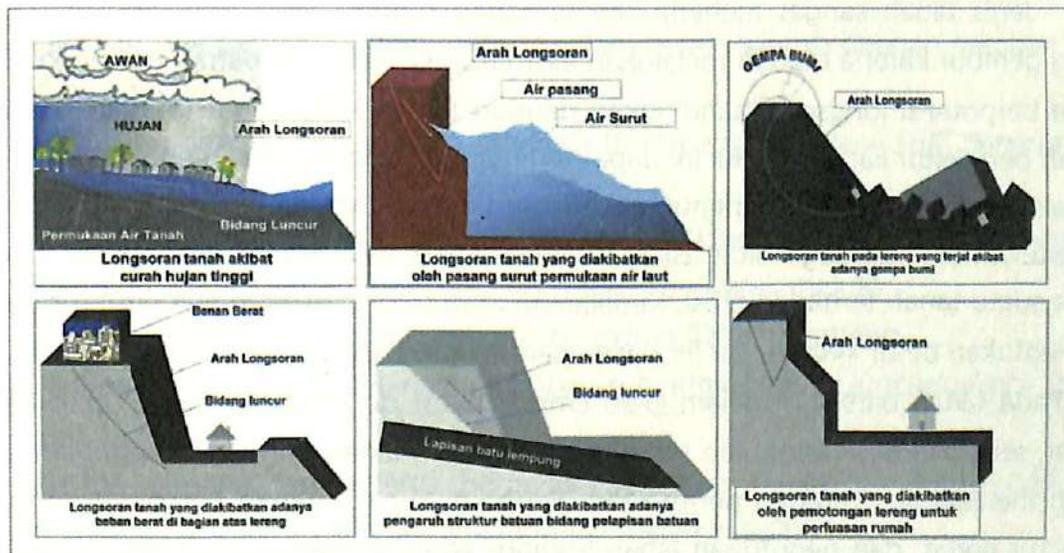
Bidang yang merupakan bidang lemah dan dapat berfungsi sebagai bidang luncuran tanah longsor. Bidang-bidang tersebut memiliki ciri-ciri pada bidang perlapisan batuan, yaitu.

1. Bidang kontak antara batuan yang retak-retak dengan batuan yang kuat; Bertambahnya beban pada lereng seperti bangunan, beban dinamis yang disebabkan tiupan angin pada pohon-pohon dan lain-lain. Adanya beban tambahan seperti beban bangunan pada lereng, dan kendaraan akan memperbesar gaya pendorong terjadinya longsor, terutama di sekitar tikungan jalan pada daerah lembah. Akibatnya adalah sering terjadinya penurunan tanah dan retakan yang arahnya ke arah lembah. Formasi batuan kurang kuat, batuan endapan gunung api dan batuan sedimen berukuran pasir dan campuran antara kerikil, pasir, dan lempung umumnya kurang kuat. Batuan tersebut akan mudah menjadi tanah bila mengalami proses pelapukan dan umumnya rentan terhadap tanah longsor bila terdapat pada lereng yang terjal.
2. Bidang kontak antara batuan yang dapat melewatkan air dengan batuan yang tidak melewatkan air (kedap air); Pengurangan kuat geser pada batuan dapat diakibatkan oleh adanya diskontinuitas, sifat kekakuan, arah *bedding*, *joint*, orientasi lereng, derajat sementasi batuan misalnya konglomerat, batuan pasir, breksi, dan lain - lain. Gaya penahan utama gerakan longsor adalah tahanan geser material di sepanjang bidang longsor. Tahanan geser di sepanjang bidang geser terkait dengan sudut gesek terdrainase (*drained friction angle*) tanah pada bidang longsor. Tahanan terhadap longsor juga dapat tereduksi oleh naiknya tekanan air pada bidang longsor. Kenaikan tekanan air ini mengurangi tahanan gesek, karena gaya normal pada bidang longsor menjadi berkurang.
3. Bidang kontak antara tanah yang lembek dengan tanah yang padat. Tanah yang kurang padat dan tebal adalah jenis tanah lempung atau tanah liat dengan ketebalan lebih dari 2,5 m dan sudut lereng lebih dari 22°. Tanah jenis ini memiliki potensi untuk terjadinya tanah longsor terutama bila terjadi hujan. Selain itu tanah ini sangat rentan terhadap pergerakan tanah karena menjadi lembek terkena air dan pecah ketika hawa terlalu panas. Adanya material timbunan pada tebing. Pengembangan wilayah permukiman umumnya untuk memperluas lahan dilakukan pemotongan tebing dan penimbunan lembah. Tanah timbunan pada lembah tersebut belum terpadatkan sempurna seperti tanah asli yang berada di bawahnya, sehingga apabila turun hujan akan terjadi penurunan tanah, yang kemudian diikuti dengan retakan tanah sehingga mengakibatkan longsor.

3.4.2.4.2. Bidang lemah bekas longsor lama

Bekas longsor lama, biasanya terjadi pengendapan misalnya material gunung api pada lereng yang relatif terjal atau pada saat atau sesudah terjadi patahan kulit bumi. Gambaran mengenai longsor berdasarkan penyebabnya seperti pada **Gambar 3.51**. (Purwadhi dkk, 2008). Bekas longsor lama memiliki ciri-ciri akan munculnya tanah longsor sebagai berikut

1. Adanya tebing terjal yang panjang melengkung membentuk tapal kuda.
2. Umumnya dijumpai mata air, pepohonan yang relatif tebal, karena tanahnya gembur dan subur.
3. Daerah badan longsor bagian atas umumnya relatif landai.
4. Dijumpai longsor kecil terutama pada tebing lembah.
5. Dijumpai tebing-tebing relatif terjal yang merupakan bekas longsor kecil pada longsor lama.
6. Dijumpai alur lembah dan pada tebingnya dijumpai retakan dan longsor kecil
7. Longsor lama ini cukup luas.



Gambar 3.51. Gambaran tanah longsor berdasarkan penyebabnya (Purwadhi dkk, 2008)

Berdasarkan hal tersebut, maka dapat diketahui ciri-ciri akan munculnya tanah longsor, yaitu munculnya retakan-retakan di lereng yang sejajar dengan arah tebing. Biasanya terjadi setelah hujan dan munculnya mata air baru secara tiba-tiba. Tebing rapuh dan kerikil mulai berjatuh. Tanda - tanda awal dari longsor adalah adanya

retakan di bagian atas lereng yang relatif tegak lurus arah gerakan. Retakan ini bila tidak segera ditutup, saat hujan akan terisi oleh air yang berakibat selain melunakkan tanah, juga menambah gaya horisontal yang memicu longsor.

3.4.2.4.3. Getaran atau gempa bumi

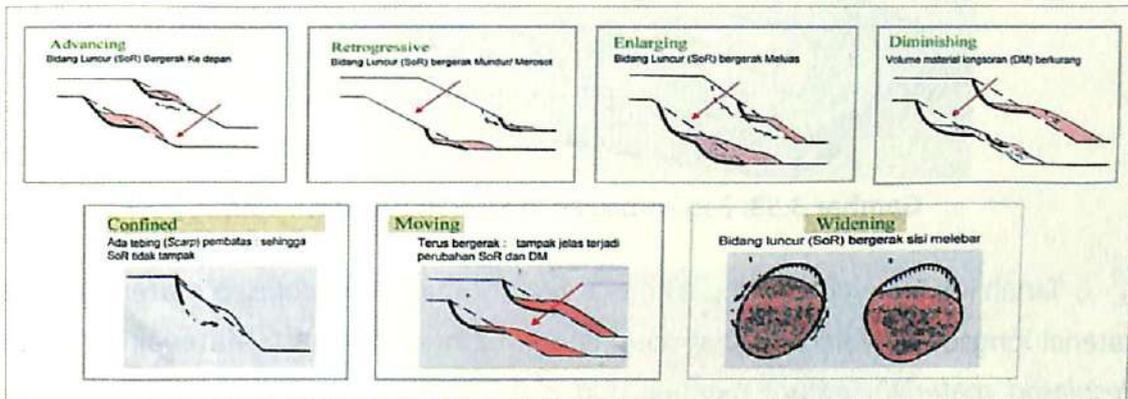
Faktor Getaran yang terjadi biasanya diakibatkan oleh gempa bumi, ledakan, getaran mesin, dan getaran lalu lintas kendaraan. Akibat yang ditimbulkannya adalah tanah, badan jalan, lantai, dan dinding rumah menjadi retak. Getaran atau gempa bumi menyebabkan terjadinya *liquefaction* pada pasir atau lanau longgar yang jenuh air. Ketika terjadi getaran, maka air akan menyusup ke bagian yang tanah/batuan yang retak, sehingga tanah dengan cepat mengembang kembali dan terjadi longsor atau tanah longsor. Pengaruh gaya gempa atau getaran pada terjadinya longsor juga sulit diperkirakan.

3.4.2.5. Faktor tanah

Jenis tanah sangat menentukan terhadap potensi erosi dan longsor. Tanah yang gembur karena mudah melalukan air masuk ke dalam penampang tanah akan lebih berpotensi longsor dibandingkan dengan tanah yang padat (*massive*) seperti tanah bertekstur liat (*clay*). Hal ini dapat terlihat juga dari kepekaan erosi tanah. Nilai kepekaan erosi tanah (K) menunjukkan mudah tidaknya tanah mengalami erosi, ditentukan oleh berbagai sifat fisik dan kimia tanah. Makin kecil nilai K makin tidak peka suatu tanah terhadap erosi. Kedalaman atau solum, tekstur, dan struktur tanah menentukan besar kecilnya air limpasan permukaan dan laju penjenjutan tanah oleh air. Pada tanah bersolum dalam (>90 cm), struktur gembur, dan penutupan lahan rapat, sebagian besar air hujan terinfiltrasi ke dalam tanah dan hanya sebagian kecil yang menjadi air limpasan permukaan. Sebaliknya, pada tanah bersolum dangkal, struktur padat, dan penutupan lahan kurang rapat, hanya sebagian kecil air hujan yang terinfiltrasi dan sebagian besar menjadi aliran permukaan. (Litbang Departemen Pertanian, 2006). Namun kekritisasi stabilisasi lereng pada intensitas hujan yang sama (127,4 mm/jam), tekstur tanah pasir cenderung lebih cepat mencapai kondisi kritis sekitar 0,023 jam, dibandingkan tekstur tanah lempung 0,03 jam dan tanah liat sekitar 0,08 jam setelah terjadi hujan.

3.4.3. Mekanisme dan Demensi Bencana Tanah Longsor

Pemahaman tanah longsor tentang bagian-bagian geometri longsor sangat diperlukan dalam upaya pencegahan dan penanggulangan longsor. Menurut Vernes (1992) terdapat 7 (tujuh) jenis mekanisme tanah longsor dalam hubungannya dengan gerakan dan volume rombakannya seperti pada **Gambar 3.52**.



Gambar 3.52. Mekanisme tanah longsor dan volume rombakannya (Vernes, 1992)

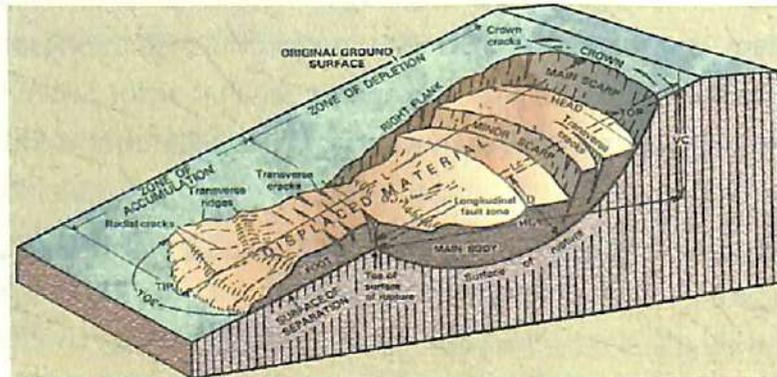
Mekanisme bencana tanah longsor dalam hubungannya dengan gerakan dan volume rombakannya yaitu

1. Advancing dimana bidang luncur/gelincir (*surface of rupture* = SoR) bergerak ke depan
2. Retrogressive dimana bidang luncur/gelincir (SoR) bergerak mundur/ merosot
3. Enlarging dimana bidang luncur/gelincir (SoR) bergerak meluas
4. Diminishing dimana Volume material longsor (DM) berkurang
5. Confined dimana ada tebing pembatas, sehingga bidang luncur/gelincir (SoR) tidak tampak
6. Moving dimana tanah terus bergerak, sehingga terjadi perubahan Volume material longsor (DM) dan bidang luncur/gelincir (SoR)
7. Widening dimana bidang luncur/gelincir (SoR) bergerak ke sisi/ melebar

Bagian-bagian longsor menurut Cruden dan Varnes (1992) seperti pada Gambar 3.53. Tanah longsor dibagi dalam tiga bagian, yaitu :

1. Mahkota (*crown*) terletak di bagian ujung atas longsor merupakan puncak atau wilayah retakan awal terjadinya longsor
2. Badan longsor terletak di tengah longsor

3. Kaki longsor terletak di ujung bawah longsor



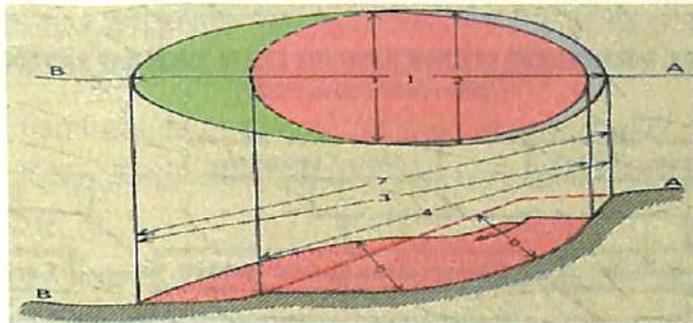
Gambar 3.53. Bagian-bagian longsor (Vernes, 1992)

Tanah longsor yang merupakan material rombakan (*desplased material*) adalah material longsor mulai dari mahkota hingga ujung longsor. Material Rombakan (*desplased material*) terbagi menjadi dua zona, yaitu zona pengurangan (*zone of depletion*) merupakan badan longsor yang terletak diantara permukaan tanah asli (*original ground surface*), dan zona akumulasi (*zone of accumulation*) merupakan kaki longsor.

1. Zona pengurangan (*zone of depletion*) terletak pada bidang gelincir atau bidang luncur/gelincir (*surface of repture = SoR*) yang merupakan tubuh utama (*main body*) yang mengalami zona patahan longitudinal (*longitudinal fault zone*). Zone pengurangan dibatasi oleh sayap kiri dan kanan (jari longsor = *tue landslide*). Didalam zona pengurangan terdapat antara lain.
 - a. Gawir terdiri dari gawir utama (*mainscap*) dan gawir minor (*minorscap*). Gawir utama merupakan gawir yang tebing utama yang posisinya dibawah mahkota, sedangkan gawir minor merupakan gawir yang ada di bawahnya.
 - b. Kepala (*head*) merupakan ujung paling atas dari tanah longsor (dibawah gawir utama).
 - c. Rombakam melintang (*transverse cracks*) merupakan rombakan tanah melintang yang berbentuk setengah gawir.
2. Zona akumulasi (*zone of accumulation*) merupakan tupukan material rombakan. Zone akumulasi dengan zone pengurangan dipisahkan oleh retakan melintang (*transverse cracks*). Di dalam zone akumulasi biasanya terdapat beberapa bukit melintang (*transverse redges*), dan terdapat retakan-retakan radial (*radial cracks*).

Tanah longsor mempunyai dimensi lebar, panjang, dan tinggi yang dapat dijelaskan seperti pada Gambar 3.54. Tanah longsor terdiri atas 7 (tujuh) dimensi, yaitu :

1. Lebar tanah longsor (DM = W_d)
2. Lebar bidang luncur (SoR = W_r)
3. Panjang tanah longsor (DM = L_d)
4. Panjang bidang luncur (SoR = L_r)
5. Tinggi (dalam) tanah longsor (DM = D_d) : $\perp W_d$ & L_d
6. Tinggi (dalam) tanah longsor (SoR = D_r)
7. Jumlah panjang (L)

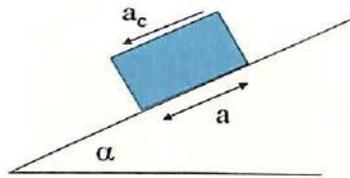


Gambar 3.54. Dimensi tanah longsor (Vernes, 1992)

3.4.4. Model Analisis Tanah Longsor Akibat Gempa bumi

Model analisis tanah longsor akibat gempa bumi dengan menggunakan bantuan teknologi penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG) seperti pada diagram alir Gambar 3.55. dilakukan dalam enam tahap, yaitu

1. Lokalisasi tingkat kerawanan dilakukan dengan membuat batas wilayah delineasi pada peta atau citra penginderaan jauh yang kemungkinan terkena dampak tanah longsor.
2. Perhitungan kritis/ rawan gempa bumi dan tanah longsor dapat didekati dengan formula Vernes (1992) berdasarkan percepatan kritis, faktor keamanan, percepatan gravitasi, dan kelereng sebagai berikut.



Rumus :

$$a_c = (FS - 1) g \sin \alpha$$

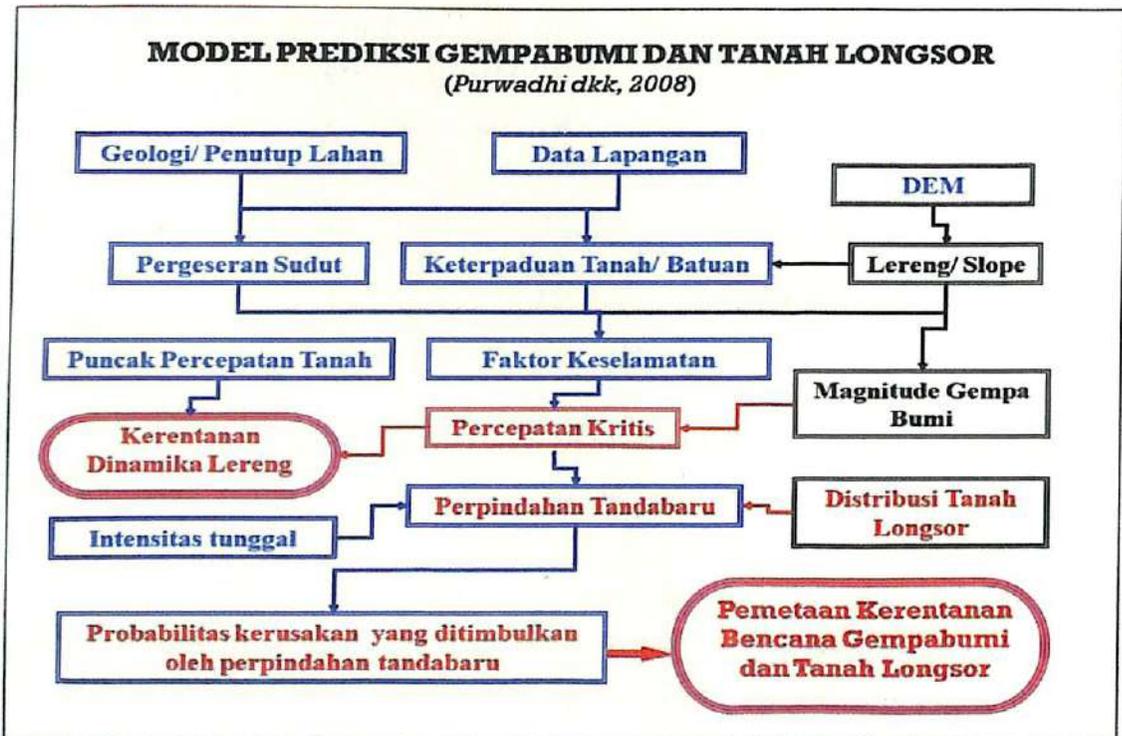
Dimana :

a_c : percepatan kritis (*critical acceleration*)

FS : Faktor Keamanan (*Factor of Safety*)

g : percepatan gravitasi (*gravitational acceleration*) = 9.81 m/s²

α : kelerengan (*slope*)



Gambar 3.55. Model prediksi gempa bumi dan tanah longsor (Purwadi dkk, 2008)

3. Perhitungan puncak percepatan tanah {*peak ground acceleration (PGA)*} dapat didekati dengan formula Vernes (1992) berdasarkan :

$$\log_{10} A_{\max} = 0,41 M_s - \log_{10} (R + 0.032 \cdot 10^{0,41 M_s}) - 0,0034 R + 1,30$$

Dimana :

A_{max} : rata-rata puncak percepatan dari dua komponen horizontal (*The mean of peak acceleration from two horizontal components*) (dalam ukuran gal)
 R : jarak terdekat dari bidang gelincir (*The closest distance to the fault rupture*) (dalam km)

M_s : besarnya getaran permukaan tanah (*Surface wave magnitude*)

4. Perhitungan kerawanan dan percepatan kritis (*critical acceleration (CA)* dan menggunakan *PGA*) dengan formula $Map Cal = CA - PGA$
5. Perhitungan arias intensity / kebolehjadian (probabilitas) intensitas gempa tinggi dapat didekati dengan formula $\log I_a = M - 2\log \sqrt{R^2 + h^2} - 4.1$

Dimana :

I_a : Intensitas Area (*Areas Intensity*) (dalam cm/s)

M_w : Besaran saat terjadinya gempa (*Moment magnitude of an earthquake*)

d : Jarak dari patahan (*distance from the fault*)

h : kedalaman local gempa (*local depth of an earthquake*)

6. Perhitungan longsor (*newmark displacement*) diukur dengan menggunakan formula berikut

$$\log D_n = 1.521 \log I_a - 1.993 \log a_c - 1.546$$

Dimana :

D_n : Perpindahan tanda/ciri longsor baru (*Newmark Displacement*) (dalam cm)

I_a : Intensitas Area (*Areas Intensity*)

a_c : Percepatan Kritis Kelerengan (*Critical Acceleration of Slope*)

Pemindahan tanda longsor baru (cm) > 10 cm merupakan wilayah dengan kelerengan kritis yang patut dipertimbangkan

3.4.5. Potensi Tanah Longsor

Prediksi potensi tanah longsor dapat dilakukan dengan menggunakan data penginderaan jauh dan sistem informasi geografis (SIG). Kecepatan gerak tanah longsor bermacam-macam antara yang sangat perlahan (kurang dari 6 centimeter per tahun) hingga yang luar biasa cepatnya (lebih dari 3 meter per detik). Lantaran inilah barangkali kemampuan kita untuk melacak gejala dan meramalkannya pun berbeda-beda. Bila yang dimaksud adalah ramalan akurat dan pasti sangat sulit dibuat. Kapan dan seberapa besar daya kelongsoran akan sulit diperkirakan sekalipun adanya situasi pemicu yang kuat ramalan akan terjadi hujan lebat, adanya kegiatan seismik dsb.

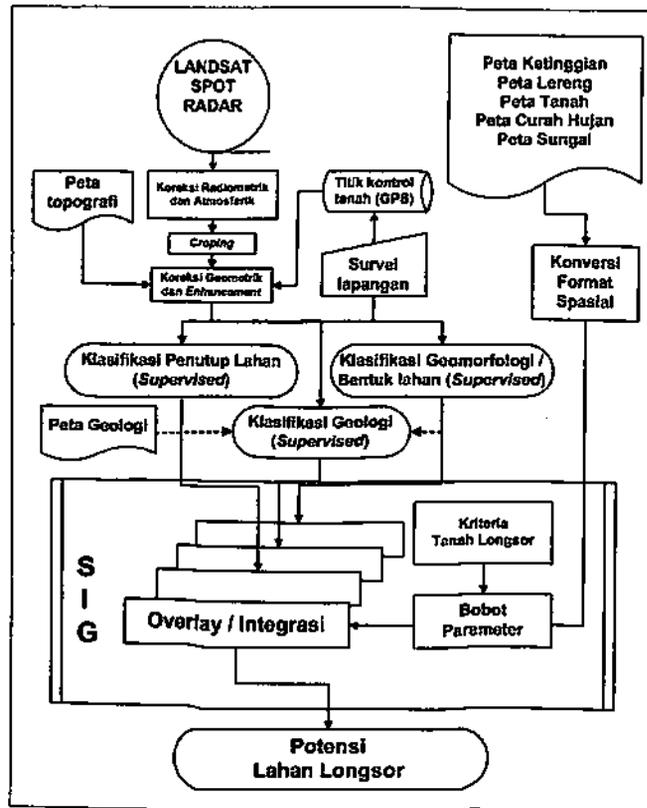
Berpadu dengan pengamatan kelongsoran tanah memungkinkan bisa menjadi panduan memperkirakan kemungkinan waktu (secara garis besar) dan dampak-dampak yang mungkin timbul. Prediksi untuk memperkirakan terjadinya kelongsoran diperlukan data-data geologi (kejadian struktur, kandungan dan proses perkembangan bumi) geomorfologi (kajian tentang bentuk-bentuk permukaan tanah, hidrologi (kajian tentang daur peredaran air) dan flora di daerah tertentu.

Prediksi potensi bahaya tanah longsor dengan menggunakan data penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) dapat dilakukan dengan cepat, mudah dan akurat. Bahaya tanah longsor dapat diidentifikasi secara cepat melalui data penginderaan jauh dan dianalisis menggunakan perangkat Sistem Informasi Geografis dengan menggunakan metode tumpang susun atau overlay terhadap parameter-parameter tanah longsor seperti: kemiringan lereng, tekstur tanah, permeabilitas tanah, tingkat pelapukan batuan, kedalaman efektif tanah, kerapatan torehan (retak tanah), kedalaman muka air tanah, dan curah hujan sedangkan faktor non alami meliputi: penggunaan lahan dan kerapatan vegetasi. Melalui Sistem Informasi Geografis diharapkan akan mempermudah penyajian informasi spasial khususnya yang terkait dengan penentuan tingkat bahaya tanah longsor serta dapat menganalisis dan memperoleh informasi baru dalam mengidentifikasi daerah- daerah yang menjadi sasaran tanah longsor. Prosedur prediksi potensi tanah longsor tersebut dapat digambarkan seperti pada diagram alir **Gambar 3.56**.

1. Data penginderaan jauh dapat digunakan resolusi menengah untuk melihat wilayah secara luas terutama untuk melihat bentuk lahan dan penutup lahan; data resolusi tinggi digunakan untuk melihat kondisi lokal wilayah secara rinci; citra radar untuk melihat kondisi fisik lahan tanpa gangguan penutup awan.
2. Data sekunder dalam bentuk spasial (peta) maupun non spasial, yaitu peta topografi (peta ketinggian, kontur), peta lereng, peta tanah (jenis dan struktur), peta curah hujan dan data curah hujan harian/bulanan; peta DAS (daerah aliran sungai), peta geologi.
 - a. Data Geologis ada dua aspek geologis yang penting artinya untuk menilai kestabilan tanah dan meramalkan terjadinya kelongsoran : (1) Litologi – kajian tentang ciri-ciri batuan – kandungannya, tampilan permukaan / teksturnya atau berbagai ciri lain – yang akan mempengaruhi pembawaan batu itu.

Semua ciri akan menentukan kekuatan, daya bentuk, kepekaan terhadap bahan kimia dan pengolahan fisik, serta berbagai faktor penentu kestabilan lereng. (2) Struktur batuan dan tanah – tampilan – tampilan struktural yang mungkin mempengaruhi kestabilannya, termasuk urutan dan corak lapisan, perubahan-perubahan litologis, bentangan-bentangan titik-titik pertemuan / persendian antar bagian, patahan / sesar dan lipatan.

- b. Data geomorfologis terpenting untuk membantu meramalkan tanah longsor adalah sejarah kelongsoran tanah di daerah yang teliti. Faktor-faktor penting lainnya mencakup kemiringan / kecuraman sehubungan dengan kekuatan bahan-bahan yang membentuknya serta aspek arah itu dan bentuk kemiringannya.
 - c. Data Hidrologis dan Klimatologis adalah kajian tentang sumber, gerakan, jumlah dan tekanan air di daerah itu harus dilakukan. Demikian pula cuaca (khusus, jangka pendek) dan iklim (umum, jangka panjang) perlu dikaji. Pola-pola iklim bertemu corak-corak tanah bias menimbulkan berbagai jenis kelongsoran yang berbeda-beda. Umpamanya musim hujan di daerah tropis seperti Indonesia dapat menyebabkan aliran batu, tanah dan limbah organik dalam jumlah besar.
 - d. Data penutup lahan berupa flora atau tanaman-tanaman yang menumbuhkan lereng bisa menyumbangkan pengaruh positif atau justru sebaliknya negatif terhadap ketangguhan lereng itu. Akar-akar tumbuhan mungkin akan menahan air dan meningkatkan ketahanan tanah namun bisa juga malah memperlebar patahan / sesar-patahan / sesar batu dan mendorong masuknya air yang menyebabkan pencairan dan pelongsoran.
3. Pengolahan data penginderaan jauh (koreksi, penajaman)
 4. Interpretasi data penginderaan jauh mengenai penutup lahan dan bentuk lahan (geomorfologi)
 5. Klasifikasi geologi (struktur dan litologi)
 6. Pembobotan parameter tanah longsor dengan kriteria untuk identifikasi kerawanan tanah longsor yang dilakukan dengan menggunakan perangkat dalam sistem informasi geografis (GIS) untuk penilaian potensi tanah longsor.



Gambar 3.56. Diagram alir prosedur penilaian potensi daerah rawan longsor (Purwadhi, 2001)

Kriteria tanah longsor dapat diidentifikasi berdasarkan bentuk erosi (pemindahan massa tanah) yang pengangkutan atau pemindahan tanahnya terjadi pada suatu saat secara tiba-tiba dalam volume yang besar (sekaligus). Tanah longsor akan terjadi apabila ada 3 (tiga) kondisi, yaitu:

1. Lereng cukup curam,
2. Terdapat bidang peluncur yang kedap air dibawah permukaan tanah,
3. Terdapat cukup air dalam tanah di atas lapisan kedap (bidang luncur) sehingga tanah jenuh air.

Karakteristik tanah longsor menurut UNDP (1992), terdapat 9 karakteristik bencana tanah longsor seperti pada Tabel 3.17. mencakup fenomena sebab-akibat, karakteristik umum, bisa diramalkan/ diprediksi, faktor yang member kontribusi kerentanan tanah longsor, pengaruh-pengaruh umum yang merugikan, tindakan pengurangan risiko, tindakan kesiapan khusus, kebutuhan khusus pasca bencana, dan alat-alat penilaian dampak.

Tabel 3.17.

Karakteristik bencana tanah longsor (UNDP, 1992)

No	Kriteria	Uraian
1	Fenomena sebab akibat	Meluncurnya tanah pada lereng dan bebatuan sebagai akibat getaran-getaran yang terjadi secara alami, perubahan-perubahan secara langsung kandungan air, hilangnya dukungan yang berdekatan, pengisian beban, pelapukan, atau manipulasi manusia terhadap jalur-jalur air dan komposisi lereng
2	Karakteristik Umum	Tanah longsor berbeda-beda dalam tipe gerakannya (jatuh, meluncur, tumbang, menyebar ke samping, mengalir), dan mungkin pengaruh-pengaruh sekundernya adalah badai yang kencang, gempa bumi dan letusan gunung berapi. Tanah longsor lebih menyebar dibandingkan dengan kejadian geologi lainnya.
3	Bisa diramalkan	Frekuensi kemunculannya, tingkat, dan konsekuensi dari tanah longsor bisa diperkirakan dan daerah-daerah yang beresiko tinggi ditetapkan dengan penggunaan informasi pada area geologi, geomorphologi, hidrologi, & klimatologi dan vegetasi
4	Faktor-faktor yang memberikan kontribusi terhadap kerentanan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tempat tinggal yang dibangun pada lereng terjal, tanah yang lembek, puncak batu karang 2. Tempat hunian yang dibangun pada dasar lereng yang terjal, pada mulut-mulut sungai dari lembah-lembah gunung. 3. Jalan-jalan, jalur-jalur komunikasi di daerah-daerah pegunungan 4. Bangunan dengan pondasi lemah. 5. Jalur-jalur pipa yang ditanam, pipa-pipa yang mudah patah. 6. Kurangnya pemahaman akan bahaya tanah longsor.
5	Pengaruh-pengaruh umum yang merugikan	Kerusakan fisik - Segala sesuatu yang berada di atas atau pada jalur tanah longsor akan menderita kerusakan. Puing-puing bisa menutup jalan-jalan, jalur komunikasi atau jalan-jalan air. Pengaruh-pengaruh tidak langsung bisa mencakup kerugian produktifitas pertanian atau lahan-lahan hutan, banjir, berkurangnya nilai <i>property</i> . Korban Kematian terjadi karena runtuhnya lereng. Luncuran puing-puing yang hebat atau aliran lumpur telah membunuh ribuan orang.
6	Tindakan pengurangan risiko	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pemetaan bahaya 2. Legislasi dan peraturan penggunaan bahaya 3. Asuransi

No	Kriteria	Uraian
7	Tindakan kesiapan khusus	1. Pendidikan komunitas
		2. Monitoring
		3. Sistem peringatan dini
		4. Jalur evakuasi
8	Kebutuhan khusus pasca bencana	1. SAR terutama untuk penggunaan peralatan dalam memindahkan tanah longsor
		2. Bantuan medis, emergensi tempat berlindung bagi yang tidak memiliki tempat tinggal.
9	Alat-alat penilaian dampak	Formulir pengkajian kerusakan

Analisis pembobotan untuk mengetahui potensi tanah longsor atau daerah yang rentan tanah longsor digunakan formula kerentanan tanah longsor dengan menyusun faktor-faktor atau parameter yang mempengaruhi, yaitu faktor alami dengan faktor manajemen wilayah, yaitu

1. Faktor alam berupa (1) hujan harian kumulatif 3 hari berurutan, (2) lereng lahan, (3) geologi/batuan, (4) keberadaan sesar/patahan/gawir, (5) kedalaman tanah sampai lapisan kedap.
2. Faktor manajemen meliputi : (1) penggunaan lahan, (2) infrastruktur, dan (3) kepadatan pemukiman.

Bobot parameter diklasifikasikan dalam 5 (lima) bersaran dengan kategori nilai dan skor seperti diungkapkan oleh Purwadhi (2001) seperti pada Tabel 3.18. Dimana jumlah hasil kali bobot dan skor dibagi 100 merupakan nilai yang menunjukkan tingkat kerentanan/kerawanan pada unit peta/lahan terhadap tanah longsor suatu daerah/wilayah. Contoh hasil prediksi potensi tanah longsor hasil penelitian Purwadhi dkk (2010) dalam rangka kerjasama Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) dengan Kabupaten Bulungan, Kalimantan Timur (sekarang Kalimantan Utara) dengan hasil prediksi lokasi/kawasan berpotensi tanah longsor. Kawasan/lokasi potensi bencana adalah kawasan yang ditetapkan sebagai kawasan yang mempunyai tingkat kerawanan tinggi terhadap kemungkinan terjadinya bencana tanah longsor. Kawasan potensi rawan bencana tanah longsor Kabupaten Bulungan dipetakan pada Gambar 3.57. Kawasan tanah longsor di Kabupaten Bulungan adalah kawasan yang terdapat pada zona tanah bergerak yang disebabkan karena adanya patahan/ kelurusan atau

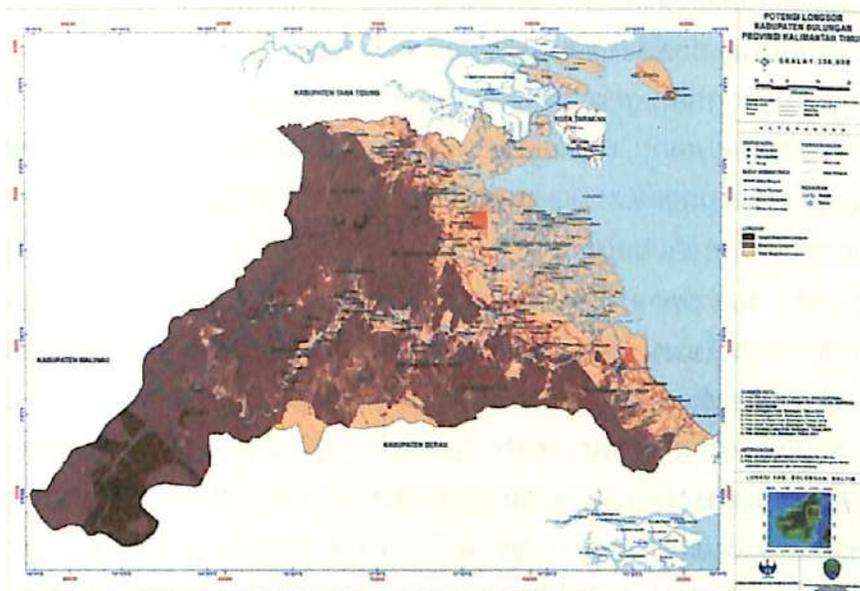
pergeseran batuan induk pembentuk tanah. Kawasan potensi tanah longsor terdapat di Kecamatan Peso dan Sekatak (wilayah tambang). Kawasan yang sering terjadi erosi tanah dan tanah longsor ini, dalam pembuatan rencana tata ruang wilayah, sebaiknya tidak digunakan untuk pemukiman dan aktivitas lain, karena dapat membahayakan keselamatan manusia dan lingkungan. Wilayah ini yang paling cocok dihindarkan kembali atau dilakukan reboisasi hutan, dan dialokasikan sebagai kawasan lindung dan resapan air.

Tabel 3.18.

Parameter bobot dan klasifikasi tanah longsor (Purwadhi, 2001)

NO	PARAMETER BOBOT	KLASIFIKASI	KATEGORI	SKOR
A	ALAMI BOBOT 60 %			
a	Hujan harian kumulatif 3 hari berurutan (mm/3 hari) Bobot (25 %)	< 50	Rendah	1
		50 - 99	Agak rendah	2
		100 - 199	Sedang	3
		200 - 300	Agak tinggi	4
		> 300	Tinggi	5
b	Lereng Lahan (%) Bobot (15 %)	< 15	Rendah	1
		15 - 24	Agak rendah	2
		25 - 40	Sedang	3
		41 - 60	Agak tinggi	4
		> 60	Tinggi	5
c	Geologi (Batuan) Bobot (10 %)	Dataran aluvial	Rendah	1
		Perbukitan kapur	Agak rendah	2
		Perbukitan granit	Sedang	3
		Bukit batuan sedimen	Agak tinggi	4
		Bukit basal - Clay shale	Tinggi	5
d	Keberadaan sesar/patahan/gawir (5 %)	Ada	Rendah	1
		Tidak ada	Tinggi	5

NO	PARAMETER BOBOT	KLASIFIKASI	KATEGORI	SKOR
	e Kedalaman tanah (regolit) sampai lapisan kedap Bobot (5 %)	< 1	Rendah	1
		1 – 2	Agak rendah	2
		2 – 3	Sedang	3
		3 – 5	Agak tinggi	4
		> 5	Tinggi	5
B	MANAGEMEN BOBOT 40 %			
a	Penggunaan Lahan Bobot (20 %)	Hutan Alam	Rendah	1
		Semak/Belukar/Rumput	Agak Rendah	2
		Hutan/Perkebunan	Sedang	3
		Tegal/Pekaranga	Agak Tinggi	4
		Sawah/Permukiman	Tinggi	5
b	Infrastruktur (Jika lereng < 25 % = skore 1) Bobot 15 %)	Tidak ada jalan	Rendah	1
		Jalan memotong lereng/ lereng terpotong	Tinggi	5
c	Kepadatan pemukiman (orang/km ²) (Jika lereng < 25 % = skore 1) Bobot (5 %)	< 2000	Rendah	1
		2000 – 5000	Agak rendah	2
		5000 – 10000	Sedang	3
		10000 – 15000	Agak tinggi	4
		> 15000	Tinggi	5



Gambar 3.57. Lokasi potensi tanah longsor di Kabupaten Bulungan, Kalimantan Utara
(Dokumen LAPAN dan Bappeda Kab. Bulungan, 2010)

Kawasan potensi tanah longsor di Kabupaten Bulungan dinilai berdasarkan karakteristik lahan (sistem lahan, jenis tanah, formasi batuan, kelereng, curah hujan) yang berbeda satu dengan yang lain. Penyebab tanah longsor sangat kompleks (bukan hanya satu faktor saja). Misalnya di Kabupaten Bulungan diidentifikasi pada kelereng curam hingga sangat curam, maka gaya gravitasi menariknya ke bawah terjadi terus menerus (sepanjang waktu), dan air selalu meresap ke dalam tanah meskipun tidak terjadi gerakan tanah pada lereng tersebut. Namun dua faktor penting yang dapat menentukan tipe-tipe gerakan tanah di Kabupaten Bulungan, yaitu faktor kecepatan gerakan (berhubungan dengan struktur dan formasi batuan) dan faktor kandungan air didalam materi (batuan) yang mengalami gerakan. Kemungkinan yang dapat diprediksi terjadinya bencana tanah longsor tergantung parameter yang bersifat sebagai faktor pengontrol dan faktor pemicu. Gangguan yang merupakan pemicu gerakan tanah merupakan proses alamiah atau non alamiah (aktivitas manusia) ataupun gabungan kondisi keduanya (kecepatan gerak dan kandungan air), yang secara aktif mempercepat proses berkurangnya kestabilan lereng. Oleh karena itu pemicu yang dapat berperan dalam mempercepat peningkatan gayaluncur dan mengurangi gaya penahan gerakan ataupun sekaligus mengakibatkan keduanya,

sedapat mungkin harus dihindari. Pemicu gerakan tanah yang menyebabkan terjadinya tanah longsor berasal dari faktor alam dan kegiatan manusia, yaitu

1. Curah hujan yang tinggi menyebabkan debit aliran tinggi, tanah jenuh air, daya rekat batuan berkurang, maka puing batuan bergerak lambat hingga cepat, bekas gerakan terjadi longsor cekung membentuk lereng tidak teratur, sehingga terjadi longsor tanah/ batu.
2. Getaran ada dua pemicu, yaitu alam dan aktivitas manusia berupa peledakan (pengambilan batuan/ penambangan dan gerakan kendaraan). Getaran yang terjadi menyebabkan goyangan pohon, penjepit dan pengumpil, pemotongan tebing. Bahan batuan atau tanah lepas, berat massa batuan meningkat, mudah bergerak, stabilitas lereng menurun, maka terjadi tanah longsor.
3. Aktivitas manusia lainnya berupa pemenggalan lereng, penambangan, pengurangan (penambahan beban) merupakan faktor *antropogen*, yang dapat mempengaruhi kestabilan lereng, yaitu stabilitas lereng rendah atau berat massa meningkat, penyebab terjadinya tanah longsor.
4. Kawasan potensi bencana longsor di Kabupaten Bulungan dikelaskan dalam tiga kriteria, yaitu sangat berpotensi, berpotensi, dan tidak berpotensi. Luas kawasan berpotensi longsor di Kabupaten Bulungan sebagai berikut
 - 1) Sangat berpotensi longsor 47146.64 Ha
 - 2) Berpotensi longsor 763781.45 Ha
 - 3) Tidak berpotensi longsor 583338.90 Ha

3.4.6. Analisis Risiko Bencana Tanah Longsor

Risiko bencana adalah interaksi antara kerentanan daerah dengan ancaman bahaya yang ada. Tingkat kerentanan daerah dapat dikurangi, sehingga kemampuan dalam menghadapi ancaman tersebut semakin meningkat. Besarnya risiko bencana dapat dinyatakan dalam besarnya kerugian yang terjadi (harta, jiwa, cedera) untuk suatu besaran kejadian tertentu. Analisis risiko bencana mencakup analisis mengenai bahaya bencana tanah longsor, analisis kerentanan daerah bencana tanah longsor, analisis kapasitas daerah terhadap bencana tanah longsor, dan analisis risikonya.

Seperti halnya bencana lainnya, maka analisis risiko bencana tanah longsor pada suatu daerah bergantung kepada beberapa faktor berikut:

1. Alam/geografi/geologi (kemungkinan terjadinya fenomena bahaya)
2. Kerentanan masyarakat terhadap fenomena (kondisi dan banyaknya bangunan)
3. Kerentanan fisik daerah (kondisi dan banyaknya bangunan)
4. Konteks strategis daerah
5. Kesiapan masyarakat setempat untuk tanggap darurat dan membangun kembali, dan faktor lain.

3.4.6.1. Parameter bahaya tanah longsor

Kajian risiko bencana (KRB) menggunakan kajian ketahanan daerah dengan pendekatan *Hyogo Framework for Action (HFA)* dimana faktor pendorong adalah faktor-faktor yang memengaruhi kondisi material sendiri, sedangkan faktor pemicu adalah faktor yang menyebabkan bergerakinya material tersebut. Contoh untuk penentuan wilayah rawan ancaman tanah longsor di Kabupaten Aceh Besar menggunakan parameter ukur seperti pada **Tabel 3.19**.

Tabel 3.19. Parameter Bahaya Tanah Longsor

Parameter	Skor			Bobot
	0,333	0,666	1	
Persen Kemiringan Lereng	< 15	15 - 30	> 30	40%
Gemorfologi	Perbukitan, Pegunungan	Dataran Aluvial, Jalur Meander	Dataran Banjir, Dasar Lembah	30%
Tutupan Vegetasi	> 80 %	40-80 %	< 40 %	25%
Jarak Sesar/ Patahan	10000 m	5000 m	10 m	5%

Parameter ukur bahaya tanah longsor pada tabel diatas juga dapat digunakan untuk penyusunan peta rawan bencana tanah longsor. Setelah adanya parameter ukur tersebut, maka di-validasi juga dengan data kejadian sebagai indikatornya. Semakin luas area yang masuk dalam zonasi daerah rawan bencana tanah longsor, maka semakin besar ancaman terhadap bahaya bencana tanah longsor di Kabupaten Aceh Besar. Indeks ancaman bencana tanah longsor di Kabupaten Aceh Besar per kecamatan di Kabupaten Aceh Besar secara umum pada **Tabel 3.20**. berikut.

Tabel 3.20.

Indeks ancaman dan indeks penduduk terpapar bencana tanah longsor per kecamatan di Kabupaten Aceh Besar

No	Kecamatan	Penduduk terpapar			Kelas Indeks Dominan Penduduk Terpapar	Kelas Dominan Ancaman
		TINGGI	SEDANG	RENDAH		
1	LHONGA	217	1	0	RENDAH	TINGGI
2	LEUPUNG	73	1	0	RENDAH	TINGGI
3	INDRAPURI	25	4	0	RENDAH	TINGGI
4	KUTA COT GLIE	5	0	0	RENDAH	TINGGI
5	SEULIMEUM	159	4	0	RENDAH	TINGGI
6	KOTA JANTHO	60	2	0	RENDAH	TINGGI
7	LEMBAH SEULAWAH	539	0	0	RENDAH	TINGGI
8	MESJID RAYA	139	4	0	RENDAH	TINGGI
9	DARUSSALAM	0	0	0	RENDAH	RENDAH
10	BAIUSSALAM	0	0	0	RENDAH	RENDAH
11	KUTA BARO	0	0	0	RENDAH	RENDAH
12	MONTASIK	0	0	0	RENDAH	RENDAH
13	BLANG BINTANG	1	0	0	RENDAH	RENDAH
14	INGIN JAYA	0	0	0	RENDAH	RENDAH
15	KRUENG BARONA JAYA	0	0	0	RENDAH	RENDAH
16	SUKA MAKMUR	0	0	0	RENDAH	RENDAH
17	KUTA MALAKA	0	0	0	RENDAH	RENDAH
18	SIMPANG TIGA	0	0	0	RENDAH	RENDAH
19	DARUL IMARAH	24	0	0	RENDAH	TINGGI
20	DARUL KAMAL	3	0	0	RENDAH	SEDANG
21	PEUKAN BADA	60	0	0	RENDAH	TINGGI
22	PULO ACEH	95	1	0	RENDAH	TINGGI

Berdasarkan hasil analisa kajian risiko Kabupaten Aceh Besar, didapatkan kelas bahaya dominan adalah **RENDAH**. Sedangkan persentase luas bahaya dominan adalah 6,75 % (**20.075,31 Ha**) dari luas wilayah Kabupaten Aceh Besar. Dengan demikian maka didapatkan **tingkat bahaya** Tanah Longsor di Kabupaten Aceh Besar adalah **RENDAH**.

4.4.6.2. Parameter kerentanan lingkungan tanah longsor

Indikator yang digunakan untuk kerentanan lingkungan adalah penutupan lahan (hutan lindung, hutan alam, hutan bakau/mangrove, rawa dan semak belukar). Indeks kerentanan fisik berbeda-beda untuk masing-masing jenis ancaman dan diperoleh dari rata-rata bobot jenis tutupan lahan. Parameter konversi indeks kerentanan lingkungan digabung melalui faktor-faktor pembobotan yang ditunjukkan pada persamaan untuk masing-masing jenis ancaman di bawah ini. Indikator yang digunakan untuk kerentanan lingkungan adalah penutupan lahan (hutan lindung, hutan alam, hutan bakau/mangrove, rawa dan semak belukar). Indeks kerentanan fisik berbeda-beda untuk masing-masing jenis ancaman dan diperoleh dari rata-rata bobot jenis tutupan lahan. Parameter konversi indeks kerentanan lingkungan di ancaman bencana tanah longsor seperti pada **Tabel 3.21**.

Tabel 3.21.

Parameter Kerugian Lingkungan untuk Ancaman Bencana Tanah Longsor

Parameter	Bobot (%)	Kelas			Skor
		Rendah	Sedang	Tinggi	
Hutan Lindung	40	<20 ha	20 – 50 ha	>50 ha	Kelas/ Nilai Max Kelas
Hutan Alam	40	<25 ha	25 – 75 ha	>75 ha	
Hutan Bakau/Mangrove	10	<10 ha	10 – 30 ha	>30 ha	
Semak Belukar	10	< 10 ha	10 – 30 ha	> 30 ha	
$\text{Kerugian lingkungan} = (0,4 * \text{skor hutan lindung}) + (0,4 * \text{skor hutan alam}) + (0,1 * \text{skor hutan bakau}) + (0,1 * \text{skor semak belukar})$					

4.4.6.3. Indikator Ketahanan Daerah terhadap Bencana Tanah Longsor

Berdasarkan pengukuran indikator pencapaian ketahanan daerah maka dapat dibagi kedalam 5 (lima) tingkatan, yaitu :

1. Level 1 Daerah telah memiliki pencapaian-pencapaian kecil dalam upaya pengurangan risiko bencana dengan melaksanakan beberapa tindakan maju dalam rencana-rencana atau kebijakan.
2. Level 2 Daerah telah melaksanakan beberapa tindakan pengurangan risiko bencana dengan pencapaian-pencapaian yang masih bersifat sporadis yang disebabkan belum adanya komitmen kelembagaan dan/atau kebijakan sistematis.

3. Level 3 Komitmen pemerintah dan beberapa komunitas terkait pengurangan risiko bencana di suatu daerah telah tercapai dan didukung dengan kebijakan sistematis, namun capaian yang diperoleh dengan komitmen dan kebijakan tersebut dinilai belum menyeluruh hingga masih belum cukup berarti untuk mengurangi dampak negatif dari bencana.
4. Level 4 Dengan dukungan komitmen serta kebijakan yang menyeluruh dalam pengurangan risiko bencana di suatu daerah telah memperoleh capaian- capaian yang berhasil, namun diakui masih ada keterbatasan dalam komitmen, sumber daya finansial ataupun kapasitas operasional dalam pelaksanaan upaya pengurangan risiko bencana di daerah tersebut.
5. Level 5 Capaian komprehensif telah dicapai dengan komitmen dan kapasitas yang memadai di semua tingkat komunitas dan jenjang pemerintahan.

Ketahanan daerah berdasarkan HFA, dimana Nilai Indeks Ketahanan Kabupaten Aceh Besar diperoleh dari nilai indeks rata-rata komponen ketahanan daerah dan nilai indeks rata-rata komponen kesiapsiagaan daerah berdasarkan hasil pemetaan kajian ketahanan dari kuesioner HFA, terlihat bahwa Tingkat Ketahanan Kabupaten Aceh Besar dalam menghadapi bencana yang mungkin terjadi adalah pada level 2 seperti yang dapat dilihat pada **Tabel 3.22**.

Tabel 3.22.

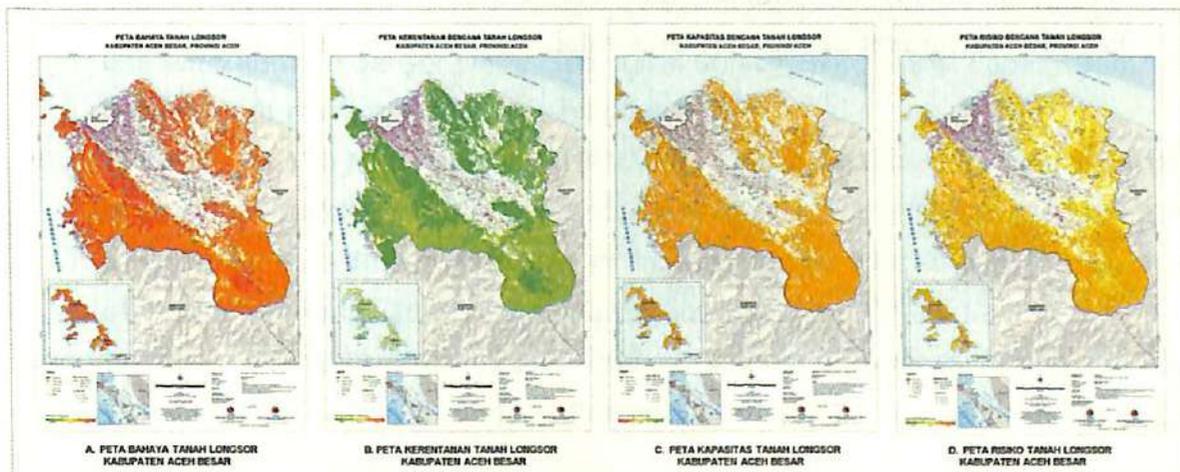
Hasil Kajian Komponen Ketahanan Bencana Tanah Longsor Kabupaten Aceh Besar

NO	PRIORITAS	TOTAL NILAI PRIORITAS	INDEKS PRIORITAS
1	Memastikan bahwa pengurangan risiko bencana menjadi sebuah prioritas nasional dan lokal dengan dasar kelembagaan yang kuat untuk pelaksanaannya	67.5	3
2	Mengidentifikasi, mengkaji dan memantau risiko bencana dan meningkatkan peringatan dini	51.25	2
3	Menggunakan pengetahuan, inovasi dan pendidikan untuk membangun suatu budaya keselamatan dan ketahanan di semua tingkat	36.25	2
4	Mengurangi faktor-faktor risiko yang mendasar	41.25	2
5	Memperkuat kesiapsiagaan terhadap bencana demi respon yang efektif di semua tingkat	73.75	4

NO	PRIORITAS	TOTAL NILAI PRIORITAS	INDEKS PRIORITAS
	TOTAL NILAI PRIORITAS	54	
	INDEKS KETAHANAN DAERAH		2

Berdasarkan **Tabel 3.22** di atas dapat dikatakan bahwa daerah telah melaksanakan beberapa tindakan pengurangan risiko bencana dengan pencapaian-pencapaian yang masih bersifat sporadis yang disebabkan belum adanya komitmen kelembagaan dan/atau kebijakan sistematis.

Peta hasil kajian risiko bencana tanah longsor seperti pada **Gambar 3.58** adalah Peta Bahaya tanah longsor Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.58 A**); Peta Kerentanan tanah longsor Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.58 B**); Peta Kapasitas tanah longsor Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.58 C**); Peta Risiko tanah longsor Kabupaten Aceh Besar (**Gambar 3.58 D**). Wilayah rentan terhadap tanah longsor ada di 13 kecamatan, dari 22 kecamatan yang ada di Kabupaten Aceh besar, yaitu Kecamatan Lhonga, Kecamatan Leupung, Kecamatan Indrapuri, Kecamatan Kuta Cot Glie, Kecamatan Seulimeum, Kota Jantho, Kecamatan Lembah Seulawah, Kecamatan Mesjid Raya, Kecamatan Blang Bintang, Kecamatan Darul Imarah, Kecamatan Darul Kamal, Kecamatan Peukan Bada, dan Kecamatan Pulo Aceh.



Gambar 3.58. Peta tanah longsor (Bahaya, Kerentanan, Kapasitas, Risiko) Kabupaten Aceh Besar (Purwadhi dkk, 2013; Dok. BNPB, 2013)

4.5. PENGELOLAAN BENCANA BERASPEK GEOLOGI

Pengelolaan bencana tanah longsor di Indonesia dapat dilakukan dengan mengikuti pentahapan sebagai berikut

1. **Pemetaan** menyajikan informasi visual tentang tingkat kerawanan bencana alam geologi di suatu wilayah, sebagai masukan kepada masyarakat dan atau pemerintah kabupaten/kota dan provinsi sebagai data dasar untuk melakukan pembangunan wilayah agar terhindar dari bencana.
2. **Penyelidikan** mempelajari penyebab dan dampak dari suatu bencana sehingga dapat digunakan dalam perencanaan penanggulangan bencana dan rencana pengembangan wilayah.
3. **Pemeriksaan** melakukan penyelidikan pada saat dan setelah terjadi bencana, sehingga dapat diketahui penyebab dan cara penanggulangannya.
4. **Pemantauan** dilakukan di daerah rawan bencana, pada daerah strategis secara ekonomi dan jasa, agar diketahui secara dini tingkat bahaya, oleh pengguna dan masyarakat yang bertempat tinggal di daerah tersebut.
5. **Sosialisasi** memberikan pemahaman kepada Pemerintah Provinsi /Kabupaten / Kota atau Masyarakat umum, tentang bencana alam tanah longsor dan akibat yang ditimbulkannya. Sosialisasi dilakukan dengan berbagai cara antara lain, mengirimkan poster, booklet, dan leaflet atau dapat juga secara langsung kepada masyarakat dan aparat pemerintah. Pemeriksaan bencana longsor.