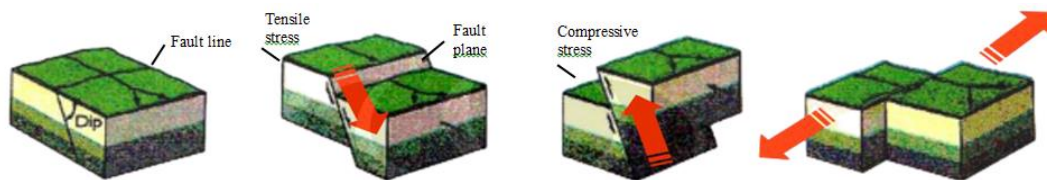


BAB II

TEORI DASAR

2.1 Gempa Bumi

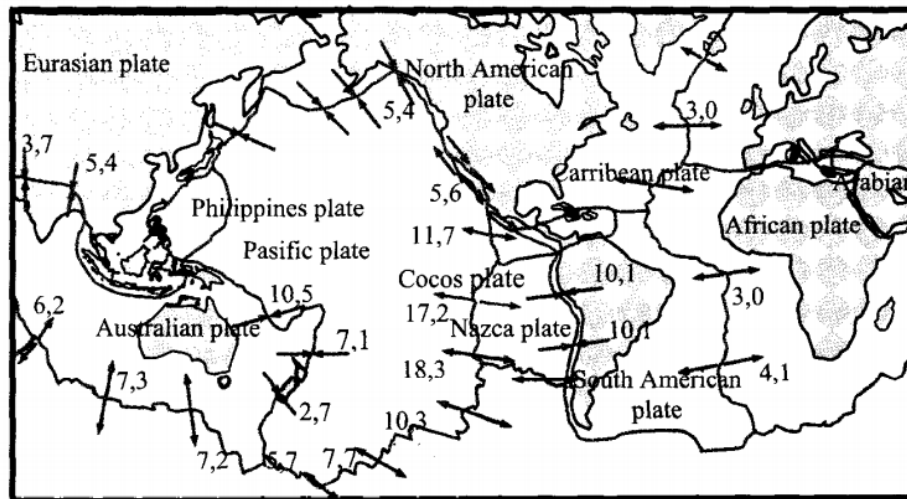
Gempa bumi merupakan peristiwa berguncangnya bumi yang disebabkan oleh kehadiran patahan/sesar aktif, aktivitas gunung berapi, runtuh batuan, dan pergerakan lempeng bumi [12]. Gempa bumi terjadi karena pada batas lempeng terdapat penumpukan energi yang kemudian menyebabkan lempeng bergerak secara konvergen, divergen, dan *transform* atau pada patahan/sesar dimana batuan tidak dapat menahan batas elastisnya, sehingga terjadi pelepasan energi berupa rangkaian gelombang seismik yang disebut sebagai gempa bumi [13].



Gambar 2. 1 Mekanisme Pergerakan Lempeng atau Patahan [13].

2.1.1 Teori Lempeng Tektonik

Teori Lempeng Tektonik menyatakan bahwa lapisan litosfer bukanlah lapisan yang padat dan seragam, tetapi merupakan lapisan yang tersusun atas lapisan yang lunak dan pecah-pecah. Pecahnya lapisan litosfer tersebut terjadi karena adanya proses pelapukan pada saat pembentukan lapisan di dalam bumi. Lapisan litosfer yang tidak seragam tersebut menyebabkan pecahnya lapisan ini juga tidak teratur, dimana rekahan-rekahan pada lapisan ini terdapat pada bagian yang relatif lemah.[4] Lempeng-lempeng tersebut bergerak di atas astenosfer. Penyebab utama terjadinya gempa bumi disebabkan oleh pergerakan lempeng-lempeng yang menghasilkan penumpukan energi. Energi tersebut tersebar ke segala arah berupa gelombang seismik, sehingga efeknya dapat dirasakan hingga ke permukaan bumi sebagai guncangan atau getaran tanah [14]. Batas antara dua buah lempeng dinamakan retakan kerak bumi atau *fault*.

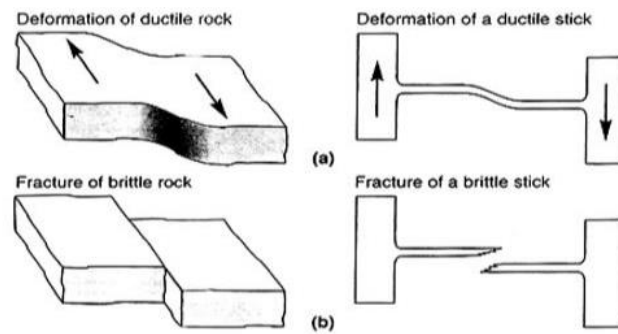


Gambar 2. 2 Arah dan Kecepatan Gerakan Lempeng Tektonik [4].

2.1.2 Teori *Elastic Rebound*

Teori *Elastic Rebound* dikemukakan oleh Seismolog Amerika, H.F Reid, didasarkan oleh penelitian terhadap retakan yang muncul di *San Andreas Fault* ketika gempa San Fransisco terjadi pada tahun 1906 [15]. Teori ini menjelaskan bahwa gempa bumi terjadi akibat adanya deformasi batuan yang terjadi pada lapisan litosfer sehingga menyebabkan pelepasan energi regangan elastisitas batuan. Deformasi batuan terjadi akibat adanya tekanan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada lapisan bumi. Tekanan atau regangan yang terus menerus memberikan energi pada batuan akan mencapai batas maksimum dan mulai menyebabkan pergeseran dan akhirnya terjadi patahan secara tiba-tiba [4].

Teori *elastic rebound* juga menyatakan bahwa karakteristik batuan memengaruhi tingkat deformasi batuan. Jika batuan bersifat lemah (*ductile*), maka energi regangan yang dilepaskan akan lambat. Jika batuan bersifat kuat (*brittle*), maka deformasi batuan akan lebih cepat terjadi dan menyebabkan gempa. Setelah gempa terjadi, proses akumulasi energi akan terus berlanjut hingga suatu saat gempa kembali terjadi [16].



Gambar 2. 3 Teori *Elastic Rebound* [17].

2.1.3 Jenis Gempa Bumi

Menurut Bolt pada tahun 1987 [18], gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan penyebabnya menjadi 4 jenis, yaitu :

1. Gempa bumi tektonik, yaitu gempa bumi yang disebabkan oleh pelepasan energi elastis yang tersimpan dalam lempeng tektonik secara tiba-tiba. Gempa ini merupakan gempa bumi terdahsyat yang tidak dapat diprediksi ukuran dan waktu terjadinya.
2. Gempa bumi vulkanik, yaitu gempa bumi yang diakibatkan oleh aktivitas gunung berapi. Magma yang berada di dapur magma mengalami tekanan dan melepaskan energinya secara tiba-tiba sehingga menyebabkan tanah bergetar.
3. Gempa bumi runtuh, yaitu gempa bumi lokal yang terjadi ketika bebatuan di daerah batuan karst atau lokasi pertambangan runtuh. Gempa ini juga tidak dapat terprediksi waktu kedatangannya, namun energi yang ditimbulkan dari gempa ini relative lebih kecil dibanding kedua gempa sebelumnya.
4. Gempa bumi buatan atau gempa yang timbul akibat dari kegiatan manusia, yaitu seperti, peledakan dinamit, ledakan bom, pekerjaan yang menggunakan alat berat atau alat palu bumi.

Menurut Subardjo pada tahun 2004 [14], gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan kekuatannya menjadi 7, yaitu :

1. Gempa bumi sangat besar Magnitudo > 8 SR
2. Gempa bumi besar Magnitudo 7 - 8 SR
3. Gempa bumi merusak Magnitudo 5 - 6 SR

4. Gempa bumi sedang Magnitudo 4 - 5 SR.
5. Gempa bumi kecil Magnitudo 3 - 4 SR
6. Gempa bumi mikro Magnitudo 1 - 3 SR
7. Gempa bumi ultra mikro Magnitudo < 1 SR

Menurut Fowler pada tahun 1990 [14], gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan posisi kedalaman hiposenter menjadi 3, yaitu :

1. Gempa bumi dalam, kedalaman hiposenter berada > 300 km.
2. Gempa bumi menengah, kedalaman hiposenter berada antara 50-300 km.
3. Gempa dangkal, kedalaman hiposenter berada < 50 km.

Berdasarkan urutan kejadiannya, gempa bumi dapat diklasifikasikan menjadi 3 [14], yaitu :

1. Gempa utama (*mainshock*), merupakan gempa yang timbul pada guncangan awal karena deformasi yang diakibatkan oleh adanya aktivitas antar lempeng.
2. Gempa susulan (*aftershock*), adalah gempa yang muncul setelah gempa utama terjadi, berlaku di wilayah yang sama dengan gempa utama.
3. Gempa pendahuluan (*foreshock*), merupakan gempa yang mendahului kejadian gempa utama dengan magnitudo yang lebih kecil dan terjadi di wilayah yang sama dengan gempa utama

2.1.4 Parameter Gempa Bumi

Parameter gempa bumi adalah kumpulan informasi terkait aktivitas gempa bumi, yaitu:

1. Waktu kejadian gempa bumi (*origin time*), yaitu waktu ketika penimbunan tegangan (*stress*) yang berupa penjalaran gelombang seismik terlepas dan dinyatakan dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*).
2. Hiposenter, yaitu titik di dalam bumi dimana pergeseran tanah atau gempa terjadi.
3. Episenter, yaitu titik hiposenter atau fokus gempa bumi yang diproyeksikan tegak lurus ke permukaan bumi.
4. *Bedrock*, yaitu batuan dasar tempat gaya gempa mulai bekerja atau terbentuk.

5. Percepatan tanah, yaitu percepatan yang terjadi di permukaan maupun di batuan dasar bumi yang diakibatkan oleh gempa bumi.
6. Faktor amplifikasi, yaitu faktor pembesaran percepatan gempa yang terjadi pada permukaan tanah akibat jenis tanah tertentu.
7. Skala intensitas gempa, yaitu suatu ukuran kekuatan gempa yang menunjukkan dampak kerusakan yang muncul akibat gempa bumi. Skala ini disebut dengan skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*). Skala Richter merupakan skala yang menunjukkan ukuran magnitudo gempa bumi.

2.2 Seismic Hazard Analysis (SHA)

Seismic Hazard Analysis atau analisis bahaya kegempaan adalah suatu analisis yang dilakukan di wilayah penelitian tertentu yang bertujuan untuk menentukan batas intensitas gempa berdasarkan nilai probabilitas terlampaui dalam suatu periode tertentu. Hasil analisis bahaya kegempaan berupa percepatan tanah di batuan dasar (*bedrock*) maupun di permukaan, spektra percepatan, serta *time-histories*. Hasil analisis ini dapat dimanfaatkan sebagai pembuatan peta bahaya gempa. Untuk membuat peta bahaya gempa, perlu dilakukan *gridding* terhadap daerah penelitian dengan ukuran spasi tertentu. Dari setiap *grid* tersebut kemudian akan diestimasi besaran amplitudo dari tiap parameter gerakan tanah (*ground motion*). Parameter gerakan tanah yang dihitung umumnya adalah percepatan tanah di batuan dasar (*bedrock*) [1], [19], [20].

Terdapat dua metode analisis bahaya kegempaan, yaitu metode deterministik (*Deterministic Seismic Hazard Analysis*) dan metode probabilistik (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*). Bahaya seismik dapat dianalisis secara deterministik, dengan menentukan skenario kejadian gempa yang meliputi gempa dengan besaran magnitudo tertentu pada lokasi tertentu, atau secara probabilistik, di mana faktor ketidakpastian seperti besaran magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa secara aktual dipertimbangkan [21], [22].

Berdasarkan hasil studi dan kajian rekayasa bangunan serta sains kebumih, pemetaan kemungkinan bahaya guncangan akibat gempa ialah metode yang sangat efisien untuk dapat dimanfaatkan sebagai upaya mengantisipasi risiko bahaya yang disebabkan oleh guncangan gempa. Secara umum, dengan asumsi bahwa gempa yang destruktif akan terjadi di daerah zona sesar aktif (*late*

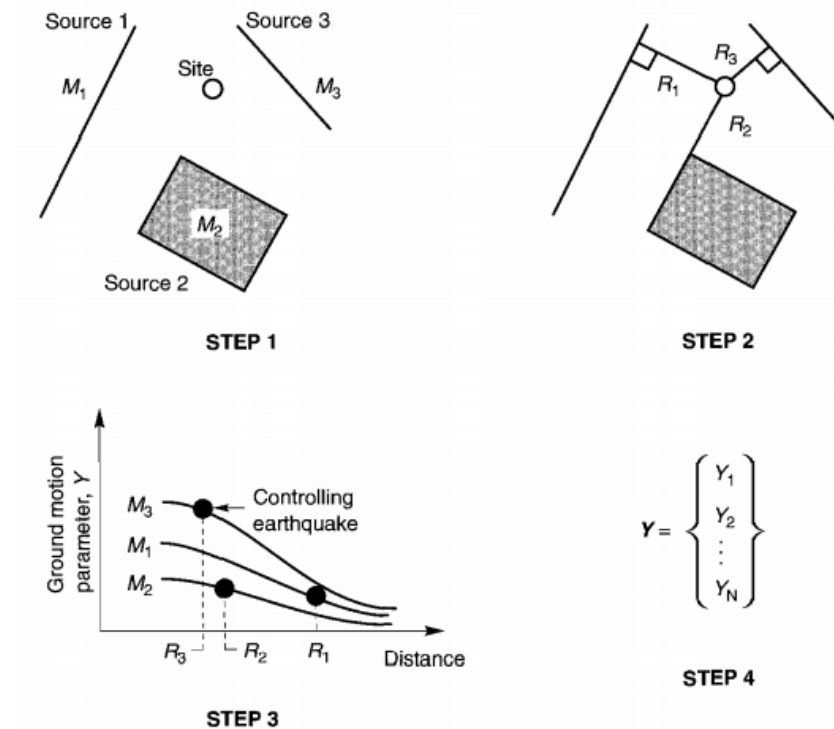
quaternary active fault), atau terjadi di lokasi dekat peristiwa gempa di masa lalu, *Probabilistic Seismic Hazard* (PSHA) merupakan metode yang cukup efektif untuk mengetahui distribusi potensi guncangan serta dasar yang dapat dipercaya untuk memperkirakan risiko pada suatu daerah hunian atau infrastruktur yang ada [23]–[25].

Metode deterministik umumnya digunakan pada awal perkembangan rekayasa gempa dan metode ini skenario kejadian gempa telah ditentukan. Skenario tersebut meliputi kejadian gempa dengan magnitudo tertentu yang akan terjadi pada lokasi tertentu. Sedangkan metode probabilistik merupakan metode yang mempertimbangkan faktor ketidakpastian baik dalam hal magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa [22].

2.2.1 Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA)

Metode DSHA dilakukan dengan mengidentifikasi skenario “kasus terburuk” dari *ground motion* yang meliputi asumsi mengenai kejadian gempa dengan magnitudo tertentu yang akan terjadi pada lokasi yang telah ditetapkan [8]. Metode ini pada umumnya digunakan untuk menghitung percepatan gempa pada perencanaan bangunan vital strategis dengan pertimbangan akan sangat membahayakan jika terjadi kerusakan akibat guncangan gempa. Reiter pada tahun 1990 menggambarkan metode DSHA dalam empat tahapan proses seperti berikut ini [19]:

1. Pengidentifikasian dan karakterisasi semua sumber gempa di suatu lokasi yang berpotensi menghasilkan *ground motion* yang signifikan,
2. Penentuan parameter jarak sumber gempa ke lokasi kajian *site* untuk setiap zona sumber gempa.
3. Pemilihan gempa (*controlling earthquake*) yang diperkirakan akan menghasilkan guncangan terbesar dengan cara membandingkan besar guncangan yang dihasilkan gempa pada jarak dan lokasi tertentu.
4. Pendefinisian bahaya yang terjadi pada suatu lokasi dalam bentuk *ground motion* yang terjadi akibat pemilihan gempa (*controlling earthquake*).



Gambar 2. 4 Tahapan Proses *Deterministic Seismic Hazard Analysis* [19].

Dalam metode DSHA, pendapat subjektif para ahli selalu diikutsertakan dalam pengambilan keputusan untuk penentuan potensi bahaya gempa. Hal ini terkadang mengakibatkan kesulitan untuk mencapai kesepakatan mengenai potensi gempa yang terjadi [6], [22].

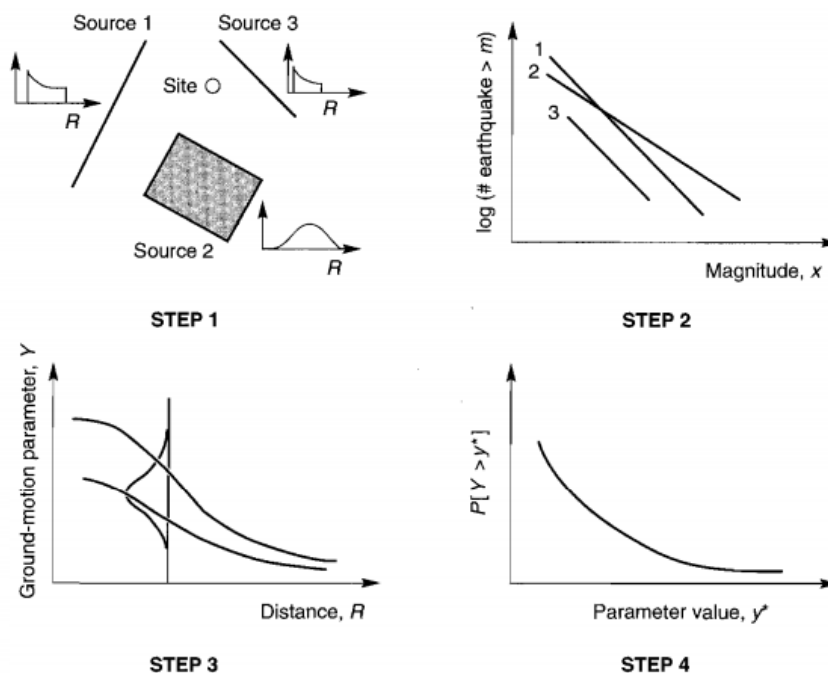
2.2.2 Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)

Metode PSHA adalah metode analisis bahaya gempa probabilistik dengan memperhitungkan dan menggabungkan faktor ketidakpastian dari besaran magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa. Metode PSHA ini dikembangkan oleh Cornell (1968 dan 1971), kemudian dilanjutkan oleh Merz dan Cornell (1973). Model dan konsep dari analisis ini tetap dipakai sampai sekarang, namun model dari analisis dan teknik perhitungannya yang terus dikembangkan oleh McGuire R. K. (1976) [26]. Hasil analisis ini berupa probabilitas parameter gempa pada tingkat selesainya periode tertentu. PSHA juga memiliki empat tahapan proses [19], yang masing-masing memiliki beberapa kemiripan dengan tahapan prosedur DSHA sebagai berikut :

1. Identifikasi dan karakterisasi sumber-sumber gempa yang mempengaruhi, distribusi probabilitas lokasi potensi *rupture* juga harus dikarakterisasi.

Distribusi ini kemudian digabungkan dengan geometri sumber untuk mendapatkan distribusi probabilitas yang sesuai dari jarak sumber-ke-situs.

2. Seismisitas atau distribusi temporal dari pengulangan gempa harus dikarakterisasi. *Recurrence relationship*, yang menentukan kecepatan rata-rata gempa dengan ukuran tertentu akan terlampaui, digunakan untuk mengkarakterisasi seismisitas dari setiap zona sumber.
3. Gerakan tanah yang dihasilkan di lokasi oleh gempa bumi dengan ukuran apa pun yang mungkin terjadi di setiap titik yang memungkinkan di setiap zona sumber harus ditentukan dengan menggunakan hubungan prediktif. Ketidakpastian yang melekat dalam hubungan prediktif juga dipertimbangkan dalam PSHA.
4. Menentukan ketidakpastian kejadian gempa, besaran, dan prediksi percepatan maksimum lokasi untuk menghasilkan probabilitas terlampauinya percepatan dimaksud dalam jangka waktu tetentu.



Gambar 2. 5 Tahapan Proses *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* [19].

Menghitung ancaman gempa berdasarkan kumpulan hasil semua kejadian gempa dan ground motion yang mungkin terjadi di masa datang adalah merupakan konsep dasar PSHA. Namun, sumbangan besar pada *site* dari analisis kemungkinan besaran magnitudo (M) dan jarak (R) ke sumber gempa tertentu

tidak terlihat dalam PSHA. Pada kondisi seperti ini PSHA menjadi kurang lengkap memberikan informasi tentang M dan R yang dominan dan tunggal. Namun pada satu sisi, analisis PSHA menguntungkan karena berbagai asumsi tentang sumber gempa potensial dan keberulangan kejadian gempa diintegrasikan menjadi satu [27].

2.3 Teori Dalam *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA)

Teori PSHA mengasumsikan magnitudo gempa bumi M dan jarak R adalah variabel acak kontinu dan independen [28]. Dalam bentuk umum, teori probabilitas dapat dinyatakan dalam persamaan dibawah ini [8]:

$$P(IM > x) = \int_{mmin}^{mmax} \int_0^{rmax} P(IM > x|m,r) f_{Mi}(m) f_{Ri}(r) dr dm \quad (2.1)$$

Dimana $P(IM > x | m,r)$ berasal dari model *ground motion*, $f_M(m)$ merupakan fungsi distribusi dari magnitudo, dan $f_R(r)$ merupakan fungsi distribusi jarak, kemudian semua magnitudo dan jarak yang dianggap diintegrasikan. Operasi integrasi menambahkan probabilitas kondisional pelampauan yang terkait dengan semua kemungkinan magnitudo dan jarak. Persamaan (2.1) adalah probabilitas terlampaui yang diberikan dan gempa bumi, dan tidak termasuk informasi tentang seberapa sering gempa bumi terjadi pada sumber yang diteliti. Kita dapat membuat modifikasi sederhana pada persamaan tersebut, untuk menghitung laju $IM > x$, daripada probabilitas $IM > x$ pada kejadian gempa bumi

$$\lambda(IM > x) = \lambda(M_i > m_{min}) \int_{mmin}^{mmax} \int_0^{rmax} P(IM > x|m,r) f_{Mi}(m) f_{Ri}(r) dr dm \quad (2.2)$$

dimana $\lambda(M > mmin)$ adalah laju terjadinya gempa bumi yang lebih besar dari $mmin$ dari sumbernya, dan $\lambda(IM > x)$ adalah laju $IM > x$. Untuk menggeneralisasi analisis lebih lanjut, kami ingin mempertimbangkan kasus dengan lebih dari satu sumber. Menyadari bahwa laju $IM > x$ saat mempertimbangkan semua sumber hanyalah jumlah laju $IM > x$ dari masing-masing sumber, kita dapat menulis

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{nsources} \lambda(M_i > m_{min}) \int_{mmin}^{mmax} \int_0^{rmax} P(IM > x|m,r) f_{Mi}(m) f_{Ri}(r) dr dm \quad (2.3)$$

di mana $nsources$ adalah jumlah sumber yang dipertimbangkan, dan M_i & R_i menunjukkan besarnya & distribusi jarak untuk sumber i .

Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) bertujuan untuk memperhitungkan beberapa faktor ketidakpastian dan menggabungkannya untuk menghasilkan

distribusi getaran yang mungkin terjadi di sebuah situs di masa yang akan datang. Untuk menilai risiko terhadap suatu struktur bangunan dari guncangan gempa, pertama-tama kita harus menentukan probabilitas tahunan (*annual rate of exceedance*).

Metode DSHA dan PSHA akan saling melengkapi tetapi tetap memberikan penekanan pada salah satu hasil. Hasil dari PSHA adalah kurva *hazard* atau peta yang merepresentasikan nilai dari parameter kekuatan *ground motion* daerah penelitian yang memiliki probabilitas yang melampaui periode tertentu. Untuk keperluan desain infrastruktur tahan gempa, umumnya digunakan metode PSHA.

2.4 Pemodelan Sumber Gempa

Pemodelan sumber gempa merupakan salah satu komponen utama dalam PSHA. Zona sumber gempa didefinisikan sebagai area yang mempunyai derajat gempa yang sama, dimana setiap titik dalam zona tersebut mempunyai kemungkinan yang sama akan terjadi gempa di masa mendatang. Model sumber gempa diperlukan sebagai hubungan antara data kejadian gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat resiko gempa [26]. Batasan pemodelan suatu zona sumber gempa yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Kedalaman sumber gempa dibatasi hingga 300 km.
2. Jarak lokasi sumber gempa ke lokasi yang ditinjau dibatasi hingga 500 km.
3. Fungsi atenuasi yang digunakan untuk tiap-tiap model adalah fungsi atenuasi yang dianggap sesuai dengan karakteristik kegempaan dan model sumber gempa wilayah Indonesia.

Pemodelan sumber gempa dilakukan berdasarkan interpretasi terhadap kondisi seismotektonik yang diketahui dari data geologi, geofisika dan seismologi. Model sumber gempa dapat diklasifikasikan dalam tiga (3) macam meliputi :

1. Zona sumber gempa subduksi atau *megathrust*

Zona gempa subduksi adalah model yang didapat dari data seismotektonik. Zona ini biasanya terdapat didekat batas pertemuan antara lempeng benua dan lempeng samudra, dimana lempeng samudra menunjam kebawah akibat massa jenisnya yang lebih besar.

2. Zona sumber gempa patahan atau *fault*

Zona fault atau patahan merupakan model gempa akibat patahan dangkal dengan mekanisme *reverse*, normal maupun *strike-slip* yang terjadi pada patahan yang sudah terdefinisi dengan jelas baik dalam hal lokasi, mekanisme, *slip-rate*, *dip*, dan panjang patahan. Model sumber gempa *fault* diidentifikasi berdasarkan geometri *fault* tersebut. Zona Sumber gempa patahan dangkal dimodelkan hingga kurang dari 20 km [29].

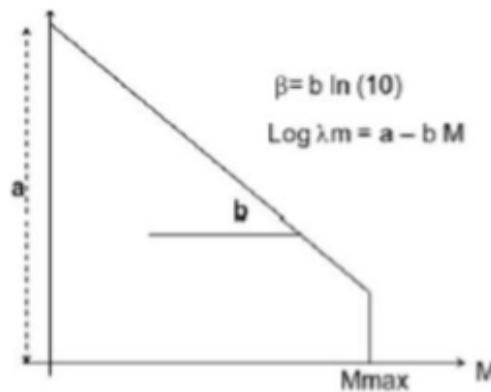
3. Zona sumber gempa *background*

Zona *background* yaitu zona sumber gempa yang belum diketahui secara jelas, tetapi pada lokasi tersebut terjadi beberapa kejadian gempa. Sumber gempa *background* pada penelitian kali ini dibagi berdasarkan kedalamannya yaitu *shallow background* (kedalaman kurang dari 50 km) dan *deep background* (kedalaman 50 km hingga 300 km).

2.5 Karakterisasi Sumber Gempa

Karakteristik dan aktivitas kegempaan suatu wilayah tercermin dalam parameter seismik yang dipergunakan dalam analisis bahaya gempa. Parameter yang digunakan dalam analisis bahaya gempa di antaranya adalah *a-value*, *b-value*, *slip-rate*, magnitudo maksimum, mekanisme, dimensi patahan dan lain-lain [22].

1. Parameter *a* dan *b* sebagai karakteristik tektonik kegempaan suatu daerah. Nilai *a* dan *b* diperoleh dari Gutenberg-Richter *reccurence relationship*. Parameter *a* dan *b* dapat dikatakan sebagai parameter seismisitas yang menggambarkan karakteristik atau aktifitas tektonik kegempaan pada daerah tertentu.
 - Nilai *a* adalah konstanta dari persamaan linier dengan hubungan antara frekuensi dan magnitudo. Nilai *a* menunjukkan keaktifan seismik yang tergantung pada periode pengamatan, luas daerah dan tingkat seismisitas suatu daerah. Nilai *a* yang merupakan konstanta karakteristik daerah gempa yang tergantung pada jangka waktu pengamatan dengan tingkat kegempaan daerah sumbernya.
 - Nilai *b* adalah konstanta karakteristik dari daerah gempa yang menyatakan penyebaran relatif dari magnitudo gempa pada sembarang titik pada daerah sumber gempa. Nilai *b* menunjukkan gradien atau kemiringan dari persamaan linier hubungan frekuensi dan magnitudo.



Gambar 2. 6 Hubungan a dan b Dari Garis Guttenberg-Richter [22].

2. Magnitudo maksimum dan *slip-rate* untuk setiap zona sumber gempa. Magnitudo maksimum adalah nilai magnitudo gempa bumi terbesar yang pernah terjadi pada suatu wilayah penelitian dan pada periode waktu tertentu. Magnitudo maksimum didasarkan pada katalog gempa atau hasil yang telah didapatkan oleh para peneliti terdahulu. Laju geser (*slip-rate*) merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam analisis bahaya kegempaan di suatu daerah, besar maupun arahnya dapat ditentukan menggunakan metode survei GPS.
3. Fungsi atenuasi untuk setiap model sumber gempa yang ada, dianggap sesuai dengan karakterisasi kegempaan dan model sumber gempa di wilayah Indonesia. Fungsi atenuasi merupakan suatu fungsi yang menggambarkan hubungan antara parameter pergerakan tanah (spektra percepatan), magnitudo (M), dan jarak (R) dari suatu sumber titik dalam daerah penelitian. Secara umum, fungsi atenuasi tergantung pada faktor-faktor berikut, antara lain:
 - a. Tipe mekanisme sumber gempa daerah yang ditinjau
 - b. Jarak episenter
 - c. Kondisi lapisan kulit bumi yang dilintasi oleh gelombang gempa
 - d. Kondisi tanah lokal di sekitar lokasi
4. Klasifikasi jenis tanah yang didasarkan pada kecepatan gelombang geser lapisan tanah sampai kedalaman 30 m (V_{s30}).

2.6 Fungsi Atenuasi

Fungsi atenuasi merupakan suatu fungsi yang menggambarkan hubungan antara parameter pergerakan tanah (spektra percepatan), magnitudo (M), dan jarak (R) dari suatu sumber titik dalam daerah penelitian. Secara umum, fungsi atenuasi tergantung pada faktor-faktor berikut, antara lain:

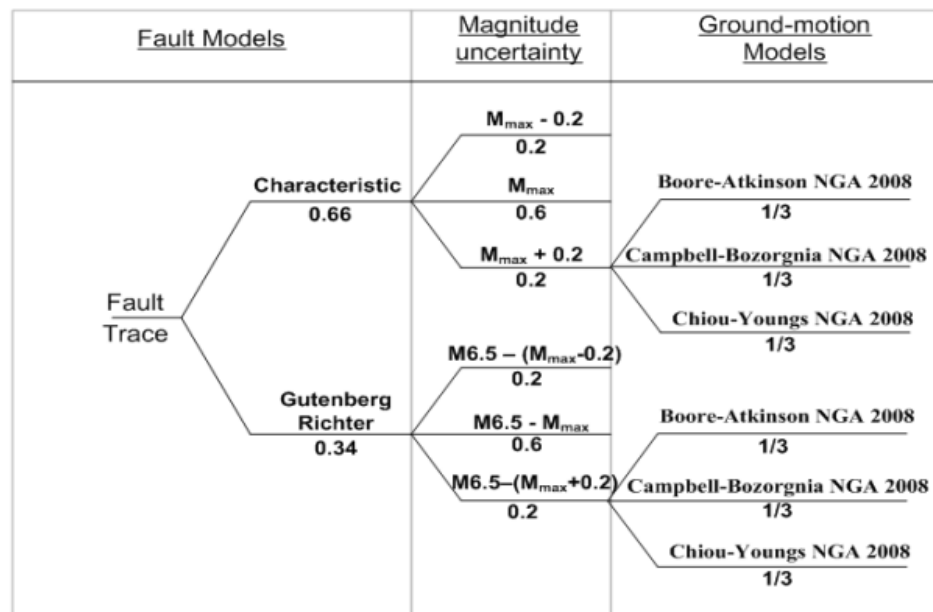
1. Tipe mekanisme sumber gempa daerah yang ditinjau
2. Jarak episenter
3. Kondisi lapisan kulit bumi yang dilintasi oleh gelombang gempa
4. Kondisi tanah lokal di sekitar lokasi.

Fungsi atenuasi merupakan suatu fungsi khas yang diturunkan dari data gempa pada suatu lokasi tertentu. Penurunan semua model atenuasi didasarkan atas analisis statistik dan gerakan tanah terekam. Sejumlah peneliti telah mempublikasi beberapa fungsi atenuasi berdasarkan catatan gempa yang pernah terjadi dan dicatat oleh *accelerograph*. Untuk mendapatkan fungsi atenuasi yang sesuai maka diperlukan data percepatan tanah yang banyak dari daerah penelitian. Namun, hingga saat ini belum ada fungsi atenuasi yang dihasilkan dari catatan gempa di wilayah Indonesia. Hal ini dikarenakan minimnya data pencatatan *time history* di wilayah Indonesia. Maka untuk penelitian *seismic hazard* kali ini, digunakan fungsi atenuasi dari negara lain. Penentuan fungsi atenuasi didasarkan pada persamaan kondisi geologi dan tektonik dari wilayah di mana fungsi atenuasi tersebut dibuat [22].

2.7 Logic Tree

Logic Tree merupakan suatu metode untuk memperhitungkan seluruh ketidakpastian pada parameter yang digunakan ketika melakukan perhitungan analisis bahaya kegempaan dengan pendekatan probabilitas. *Logic tree* pertama kali diperkenalkan untuk analisis bahaya kegempaan pada tahun 1984 oleh Kulkarni dan menjadi alat yang populer pada analisis bahaya kegempaan [30]. Dengan menggunakan metode *logic-tree* ini kebebasan dalam menggunakan berbagai model lebih dapat dikontrol tingkat keakuratannya karena *logic-tree* memberikan faktor bobot yang berbeda-beda untuk masing-masing model. Sehingga antara model satu dengan model yang lainnya dapat dilakukan komparasi akurasi. Faktor bobot tersebut akan dikalikan dengan tiap model yang

diwakilinya. Jumlah faktor bobot dari tiap alternatif model adalah bernilai satu [22].



Gambar 2. 7 Contoh Model Logic-Tree untuk Sumber Gempa Sesar (Fault) [1].

2.8 Risiko Gempa (Seismic Risk)

Risiko gempa adalah kemungkinan terlampauinya (*probability of exceedance*) suatu gempa dengan intensitas tertentu serta periode ulang rata-rata tertentu selama suatu masa bangunan. Risiko gempa dapat dinyatakan dalam bentuk sebagaimana pada persamaan (2.4) di bawah ini [22].

$$R_n = 1 - (1 - R_a)^N \quad (2.4)$$

dengan :

R_n = Risiko gempa

R_a = Risiko tahunan $1/T$

T = Periode ulang rata-rata gempa

N = Masa guna bangunan

Analisis dari potensi bencana alam itu sendiri meliputi estimasi nilai percepatan gempa maksimum (PGA) dan respon spektra pada periode ulang tertentu berdasarkan teori probabilitas total dengan memperhitungkan kemungkinan terlampaui.

Tabel 2. 1 Hubungan Parameter Resiko Gempa [31].

Annual Rate (Resiko Tahunan)	T (Periode Ulang)	R _n (Resiko Gempa/ <i>Probability of Exceedance</i>)	N (Umur Bangunan)
	(tahun)	(%)	(tahun)
0.002105	475	10	50
0.000404	2474	2	50
0.000202	4950	2	100

Peraturan terbaru mengenai bangunan internasional untuk bangunan tahan gempa sudah menggunakan peta *hazard* gempa dengan resiko terlampaui sebesar 2% selama masa bangunan 50 tahun atau setara dengan periode ulang gempa 2.475 tahun, seperti yang telah disebutkan pada NEHRP 1997, ASCE 7-98, dan IBC 2000 [10].

2.9 Percepatan Tanah (*Ground Acceleration*)

Percepatan gelombang seismik atau yang lebih sering disebut sebagai percepatan tanah merupakan salah satu parameter penting dalam bidang seismologi teknik atau *earthquakes engineering*. Besar nilai dari percepatan tanah ini menunjukkan resiko gempa yang perlu diperhitungkan sebagai salah satu bagian dalam merencanakan bangunan tahan gempa. Semakin kecil nilai percepatan tanah di suatu lokasi, maka semakin kecil pula resiko gempa yang mungkin terjadi, begitu pula sebaliknya.

Seismograf umumnya mencatat parameter gempa berupa simpangan kecepatan dalam satuan dyne (cm/s). *Displacement* merupakan simpangan yang terukur dalam satuan mikrometer atau dengan kata lain perpindahan materi yang terukur, sedangkan *acceleration* (percepatan dalam satuan gal atau cm/s²) biasa digunakan dalam hal kepentingan *engineering*. Percepatan tanah ini diukur oleh sebuah alat bernama *accelerograph*. Berdasarkan perpindahan materi oleh gelombang dalam satuan waktu dapat diketahui nilai kecepatannya. Dari perubahan kecepatan inilah didapatkan nilai percepatan.

Percepatan tanah merupakan salah satu parameter yang menjadi sumber kerusakan. Besar gaya yang dialami oleh suatu bangunan akibat terjadinya gempa dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti berat bangunan, beberapa faktor koreksi,

dan koefisien seismik. Koefisien seismik ini ditentukan oleh percepatan tanah dan periode ulang gempa. Percepatan tanah efektif pada suatu bangunan bergantung pada jarak sumber gempa ke lokasi, kedalaman sumber, besar magnitudo gempa, kualitas bangunan, dan lain-lain. Data percepatan tanah maksimum akibat getaran gempa pada suatu lokasi menjadi penting untuk menggambarkan tingkat risiko gempa. Semakin besar nilai percepatan tanah maksimum di suatu tempat, maka semakin besar juga risiko gempa yang terjadi [32].

2.10 Kecepatan Gelombang Geser (V_s30)

Perambatan vertikal gelombang geser merupakan perambatan gelombang yang hanya menyebabkan perpindahan materi dalam arah horizontal. Percepatan gelombang gempa dapat diperkirakan pada batuan dasar dan pada permukaan tanah. Batuan dasar merupakan tanah atau batuan yang lebih keras dan padat di bawah lapisan tanah yang lebih lunak dan tidak kompak.

Dari nilai kecepatan rata rata gelombang geser sedalam 30 meter (V_s30) yang mewakili suatu lokasi maka dapat diketahui kondisi tanah permukaan yang menjadi dasar untuk menentukan klasifikasi jenis tanah di lokasi penelitian. Dalam penelitian tugas akhir ini klasifikasi jenis tanah akan mengacu pada Peraturan Gempa Indonesia dalam SNI 1726:2019 [31].

Tabel 2. 2 Klasifikasi Situs [31].

Kelas Situs	$\bar{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{s}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $w \geq 40\%$, 3. Kuat geser nirair, $\bar{s}_u < 25 \text{ kPa}$		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs yang mengikuti 0)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik berikut: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3 \text{ m}$)		

2.11 Faktor Amplifikasi

Gelombang gempa yang menjalar dari batuan dasar ke permukaan akan mengalami amplifikasi. Besar nilai amplifikasi ini tergantung dari jenis atau sifat fisik tanah itu sendiri. Sampai sekarang, umumnya standar besar amplifikasi yang dipakai adalah nilai kecepatan gelombang permukaan sampai kedalaman 30 meter (V_{s30}).

Kerusakan struktur bangunan akibat gempa dipengaruhi oleh kondisi geologi dan kondisi tanah setempat. Batuan sedimen yang lunak diketahui dapat memperkuat gerakan tanah selama gempa dan oleh karena itu kerusakan yang diakibatkan akan menjadi lebih parah daripada lapisan yang lebih keras. Ada dua sebab terjadinya amplifikasi gelombang gempa yang mengakibatkan kerusakan bangunan. Pertama, adanya gelombang gempa yang terjebak di lapisan lunak, jika gelombang ini mempunyai frekuensi yang relatif sama maka akan terjadi proses resonansi gelombang gempa. Akibat resonansi ini gelombang tersebut akan saling menguatkan. Kedua, adanya kesamaan frekuensi natural anatar geologi setempat dengan bangunan. Amplifikasi dicirikan dengan adanya batuan sedimen yang berada di atas basement dengan perbedaan densitas.

Faktor amplifikasi tergantung pada kelas situs pada Tabel 2.2 sebelumnya. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi pada kondisi PGA, faktor amplifikasi pada periode pendek 0,2 detik (F_a), dan faktor amplifikasi pada periode panjang 1,0 detik (F_v). Besar nilai amplifikasi untuk setiap periode ditentukan pada Tabel 2.3, 2.4, dan 2.5 dibawah ini:

Tabel 2. 3 Koefisien Situs F_{PGA} [31].

Kelas Situs	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA \geq 0,5$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,1
SE	2,4	1,9	1,4	1,2	1,1
SF	SS ^(a)				

Tabel 2. 4 Koefisien Situs Periode Pendek 0,2 Detik (F_a) [31].

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T=0,2$ detik, S_s				
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,1	1,0	1,0
SE	2,4	1,7	1,1	0,9	0,8
SF	SS ^(a)				

Tabel 2. 5 Koefisien Situs Periode Panjang 1 Detik (F_v) [31].

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko-tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode $T=1$ detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
SD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
SE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
SF	SS ^(a)					

2.12 Percepatan Tanah di Permukaan

Nilai percepatan tanah di permukaan dapat diperoleh dengan cara mengalikan besar percepatan tanah di batuan dasar yang telah diperoleh sebelumnya menggunakan metode probabilitas dengan faktor amplifikasi. Untuk mendapatkan nilai *Peak Surface Acceleration* (PSA) digunakan persamaan (2.5) dibawah ini:

$$PSA = F_{PGA} \times PGA \quad (2.5)$$

Keterangan:

PSA = Percepatan tanah maksimum di permukaan (g)

FPGA = Faktor amplifikasi untuk PGA

PGA = Percepatan tanah maksimum di batuan dasar (g)

Sedangkan untuk nilai percepatan di permukaan pada kondisi spektral $T=0,2$ detik dan $T=1$ detik ditentukan dengan perumusan (2.15) dan (2.16) sebagai berikut:

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad (2.6)$$

Keterangan:

SMS = Percepatan tanah di permukaan pada $T=0,2$ detik (g)

Fa = Faktor amplifikasi $T=0,2$ detik

Ss = Percepatan tanah di batuan dasar pada $T=0,2$ detik (g)

$$S_{M1} = F_v \times S_1 \quad (2.7)$$

Keterangan:

SM1 = Percepatan tanah di permukaan pada $T=1$ detik (g)

F_v = Faktor amplifikasi $T=1$ detik

S_1 = Percepatan tanah di batuan dasar pada $T=1$ detik (g)