

TUGAS AKHIR

**STUDI KEGEMPAAN KOTA MAMUJU DENGAN METODE
PSHA (*PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS*)**

***CASE STUDY OF SEISMICITY IN MAMUJU USING
PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS***

OKTAVIANNE PABENDAN

D011 17 1327



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2021

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

STUDI KEGEMPAAN KOTA MAMUJU DENGAN METODE PSHA

Disusun dan diajukan oleh:

OKTAVIANNE PABENDAN

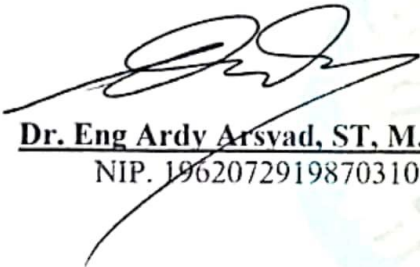
D011 17 1327

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 6 September 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

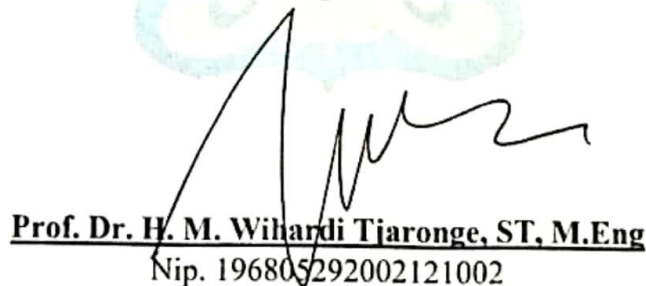


Dr. Eng Ardy Arsvad, ST, M.Eng.Sc
NIP. 196207291987031001



Sitti Hijraini Nur, ST, MT
NIP. 197912262005011001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
Nip. 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Oktavianne Pabendan, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**Studi Kasus Kegempaan Kota Mamuju dengan metode PSHA**", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu, semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Gowa, September 2021

Yang membuat pernyataan,



Oktavianne Pabendan

D011171327

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yesus Kristus yang atas limpahan kasih dan rahmat-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Studi Kasus Kegempaan Kota Mamuju dengan metode PSHA” sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Selesainya proses penulisan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak. Penulis sangat menghargai semangat, ide, dan dukungan moril, serta doa-doa yang telah dipanjatkan. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sebagai bentuk apresiasi penulis kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penggarapan tugas akhir, yaitu kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T, M.Eng, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Dr. Eng. Ardy Arsvad, ST., M.Eng.Sc dan Ibu Sitti Hijraini Nur, S.T, M.T selaku dosen pembimbing yang telah bersedia menyediakan waktunya untuk membimbing dan mengarahkan penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Ayahanda Alfred Pabendan dan Ibunda Agustina Pulung serta adik-adik, Mayrischa dan Marselinus Pabendan, yang telah memberi banyak dukungan moral, doa, dan semangat kepada penulis.
5. Bapak/Ibu Dosen Pengajar di Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberi banyak ilmu ketekniksipilan kepada penulis.
6. Saudara Andi Imam M. Ardiyansyah, S.T, atas bantuan serta masukannya dalam proses penulisan skripsi ini.
7. Teman seperjuangan Tugas Akhir, Andi Anggraini Hamzah dan Cindy Rofaany Rantesalu yang telah berjuang bersama dan saling suport dalam proses penggarapan tugas akhir.

8. Teman-teman KMKT 2017 : Rara, Stefani, Chika, Richard, Gerald, William, Jomi, Jovan, Ace, Andrew, Evan, Arson, Yubel, Wawan, Refandi, dan Eugene, yang telah memberi semangat serta bantuan kepada penulis.
9. Teman-teman di Pondok Meranti : Geil, Ryni, Ovi, Vanya, dan Windra yang selalu menemani, berbagi cerita, dan juga memberi semangat.
10. Teman-teman KMKO Sipil 2017, atas bantuan doa, dan dukungan semangat untuk penulis.
12. Keluarga Asisten Laboratorium Ukur Tanah, Kak Raihan, Kak Ara, Kak Alif, Kak Fathur, Kak Fachmy, Kak Fajar, Arfan, Arung, Nidya, Nune, Alifia, Yusriah, Ifa, Rudy, Eddy, dan Doni.
13. Rekan serta saudaraku Sipil Angkatan 2017 (PLASTIS 2018), yang telah banyak membantu dalam berbagai urusan.
14. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, terima kasih untuk semuanya.

Penulis sangat mengharapkan kiranya tugas akhir ini dapat memberi manfaat kepada pembaca. Adapun penulisan skripsi ini tidak lepas dari ketidaksempurnaan. Oleh karena itu, saran dan kritik dari pembaca sangat diharapkan sebagai masukan untuk penulis kedepannya.

Gowa, September 2021

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	xiii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	2
C. Tujuan Penelitian.....	3
D. Batasan Masalah.....	3
E. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
A. Kondisi Geologi, Tektonik, dan Geoteknik.....	6
B. Gempa.....	8
C. Pemodelan Sumber Gempa Subduksi	9
D. Parameter Seismik	14
E. Magnitudo Maksimum	16
F. Analisis Seismik Hazard	17

G.	Probabilistic Seismic Hazard Analysis.....	20
G.1.	Teori Probabilitas.....	23
H.	Fungsi Atenuasi.....	26
H.1	Persamaan Atenuasi Boore and Atkinson (2008)	28
H.2.	Persamaan Atenuasi Cambell – Bozorgnia (2008)	29
H.3.	Persamaan Atenuasi Chiou-Youngs (2008) NGA.....	29
I.	Logic-Tree	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		34
A.	Lokasi Penelitian	34
B.	Bahan dan Peralatan Pengolahan Data	34
B.1.	Bahan.....	34
B.2.	Alat.....	35
C.	Pengumpulan Data	36
D.	Pengolahan Data Gempa.....	36
D.1	Konversi Skala Magnitude Gempa	36
D.2.	Identifikasi dan Pemodelan Sumber Gempa.....	38
D.3.	Karakterisasi Sumber Gempa.....	38
D.4.	Penurunan Fungsi Atenuasi.....	41
D.5.	Logic Tree.....	42
D.6.	Analisis Seismik Hazard	43
D.7	Kurva Bahaya Gempa (<i>Seismic Hazard Curve</i>).....	43

E. Bagan Alir Penelitian	44
F. Flowchart Penelitian	45
G. Prosedur Penggunaan Aplikasi PSHAtool.....	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	60
A. Analisis Probabilistik Seismik Hazard Analysis (PSHA)	60
A.1 Percepatan Tanah Maksimum di Batuan Dasar (PGA).....	62
B. Perbandingan dengan Hasil Penelitian SNI 1726:2019.....	64
C. Kurva Bahaya Gempa (<i>Seismic Hazard Curve</i>)	70
D. Uniform Hazard	73
BAB V PENUTUP	77
A. Kesimpulan.....	77
B. Saran.....	78
Daftar Pustaka	

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Data dan parameter sumber gempa subduksi (Megathrust) ..	11
Tabel 3. 1. Korelasi Konversi antara beberapa skala magnitudo untuk wilayah Indonesia (Irsyam dkk, 2010)	36
Tabel 3. 2. Data dan parameter sumber gempa fault untuk daerah Sulawesi dan sekitarnya	39
Tabel 4. 1. Perbandingan PGA antara hasil PSHAtools dengan SNI 1726:2019	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Peta Geologi dan Tatanan Tektonik Pulau Sulawesi (Geology of Sulawesi Island, Kadarusman et al., 2004)	7
Gambar 2 Model segmentasi dan parameter sumber gempa subduksi (Megathrust)(Peta Sumber dan Bahaya Gempa 2017).....	12
Gambar 3. Penampakan sesar Palu-Koro dan sesar Poso sari data SRTM serta model mekanisme gempa yang terjadi di sekitarnya.(Peta Sumber dan Bahaya Gempa 2017)	13
Gambar 4. Grafik Gutnberg-Richter	15
Gambar 5. Penggunaan Grafik Gutenberg-Richter pada data gempa (An Earthquake Catalogue, T.J Bsylliss dan P.W. Burton, 2007) .	16
Gambar 6. Langkah-langkah metode PSHA (Reiter. L, 1990)	22
Gambar 7. Logic tree sederhana untuk memodelkan ketidak-pastian Seismic Hazard Analysis	33
Gambar 8. Peta Lokasi Penelitian.....	34
Gambar 9. Tampilan Software PSHtools	35
Gambar 10. Tampilan Software Google Earth Pro.....	35
Gambar 11. Proses Konversi Skala Magnitude Gempa.....	37
Gambar 12. Declustering Data Gempa $\leq 4M_w$	37
Gambar 13. Data Patahan yang Telah Diplot Pada Google Earth	38
Gambar 14. Karakterisasi Sumber Gempa	40
Gambar 15. Input Parameter Patahan	40
Gambar 16. Menginput Data Seismik Terhadap Fault	41

Gambar 17. Model Logic-tree Sumber Gempa Fault	42
Gambar 18. Flowchart Penelitian.....	48
Gambar 19. Aplikasi PSHAtool	49
Gambar 20. Main Window pada Softwawre PSHAtool	50
Gambar 21. Input Peta pada Aplikasi PSHA Tool.....	50
Gambar 22. Source Editor Window untuk meng input data gempa	51
Gambar 23. Proses Konversi Magnitudo	52
Gambar 24. Proses Pemisahan Aftershock terhadap Mainshock.....	53
Gambar 25. Tampilan Katalog Seismik yang Dibedakan Berdasarkan Ukuran dan Rentang Warna Untuk Magnitude yang Berbeda	54
Gambar 26. Penginputan 3D Fault	55
Gambar 27. Seismicity Parameter Window	55
Gambar 28. Input Parameter Patahan (Fault) untuk Menghitung Nilai RJB, RX, Rmin, dan Rmax	56
Gambar 29. Prinsip Perhitungan Parameter pada Fault Builder	56
Gambar 30. Proses Input Model Atenuasi	58
Gambar 31. Penambahan Fungsi Atenuasi pada Logic-tree	58
Gambar 32. Hazard Curve Window	59
Gambar 33. Gempa Hasil Declustering dengan Software PSHAtool	61
Gambar 34. Data gempa shallow crustal fault	62
Gambar 35. Grafik Rerata Peluang Keterlampauan Tahunan	63
Gambar 36. Hubungan Kejadian Kala Ulang (T) dengan PGA	64
Gambar 37. Grafik Nilai PGA pada periode ulang 200 tahun	65

Gambar 38. Nilai PGA Pada Periode Ulang 500 Tahun	66
Gambar 39. Nilai PGA Pada Periode Ulang 2500 Tahun	66
Gambar 40. Nilai PGA Untuk Periode Ulang 5000 Tahun	67
Gambar 41. Nilai PGA Pada Periode Ulang 10000 Tahun	67
Gambar 42. Peta Zonasi Gempa Indonesia Periode Ulang 200y (Peta Gempa Indonesia 2017)	68
Gambar 43. Peta Zonasi Gempa Indonesia Periode Ulang 500 Tahun (Peta Gempa Indonesia 2017).....	69
Gambar 44. Peta Zonasi Gempa Indonesia Periode Ulang 2500 Tahun	69
Gambar 45. Peta Zonasi Gempa Indonesia Periode Ulang 10000 Tahun(Peta Gempa Indonesia 2017)	70
Gambar 46. Rerata Peluang Keterlampaian Tahunan Periode Ulang 200 Tahun.....	71
Gambar 47. Rerata Peluang Keterlampaian Tahunan Periode Ulang 500 Tahun.....	71
Gambar 48. Rerata Peluang Keterlampaian Tahunan Periode Ulang 2500 Tahun.....	72
Gambar 49. Rerata Peluang Keterlampaian Tahunan Periode Ulang 5000 Tahun.....	72
Gambar 50. Rerata Peluang Keterlampaian Tahunan Periode Ulang 10000 Tahun.....	73
Gambar 51. USH Periode Ulang 200 Tahun – Chiou & Youngs (2008)...	74
Gambar 52. USH Periode Ulang 500 Tahun – Chiou & Youngs (2008)...	75
Gambar 53. USH Periode Ulang 2500 Tahun – Chiou & Youngs (2008).	75

Gambar 54. USH Periode Ulang 5000 Tahun – Chiou & Youngs (2008). 76

Gambar 55. USH Periode Ulang 10000 Tahun – Chiou & Youngs (2008)

..... 76

ABSTRAK

STUDI KEGEMPAAN KOTA MAMUJU DENGAN METODE PSHA (PROBABILISTIK SEISMIC HAZARD ANALYSIS)

Oleh :

Oktavianne Pabendan

Kejadian gempa bumi yang menimpa Kota Mamuju pada tanggal 15 Januari 2021 menjadi latar belakang dilakukannya studi kegempaan di Kota Mamuju, dimana daerah tersebut termasuk dalam kawasan yang cukup rawan gempa bumi. Tingginya seismisitas dipengaruhi oleh aktivitas sesar (patahan) aktif di sekitar lokasi pusat gempa bumi. Penelitian ini dimaksudkan untuk membantu memahami resiko bencana serta meningkatkan mitigasi bencana gempa. PSHA (Probabilistik Seismic Hazard Analysis) adalah metode analisis bahaya gempa secara probabilistik dimana faktor ketidakpastian dari magnitude, lokasi, dan frekuensi terjadinya gempa digabungkan untuk mendapatkan nilai PGA (Peak Ground Acceleration). Nilai percepatan tanah maksimum (PGA) didapatkan secara probabilistik dengan bantuan software PSHtools. Analisis seismic hazard dengan metode probabilistik yang dihasilkan berupa nilai percepatan tanah maksimum pada periode ulang 200 tahun, 500 tahun, 2500 tahun, 5000 tahun, dan 10000 tahun.

Kata kunci : PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis), PGA

ABSTRACT

CASE STUDY OF SEISMICITY IN MAMUJU USING PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD ANALYSIS

Oktavianne Pabendan

The earthquake that hit Mamuju City on January 15, 2021 became the background for the earthquake that occurred in Mamuju City, where the area is included in an area that is quite prone to earthquakes. The high seismicity is influenced by active fault (fault) activity around the location of the epicenter of the earthquake. This research is to help understand disasters and improve earthquake disaster mitigation. PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) is a method of analyzing earthquake hazards in a probabilistic manner in which the uncertainty factors of the magnitude, location, and frequency of earthquakes are combined to obtain the PGA (Peak Ground Acceleration) value. The maximum ground acceleration (PGA) value was obtained probabilistically with the help of PSHtools software. Seismic hazard analysis using the probabilistic method resulted in the maximum ground acceleration values at return periods of 200 years, 500 years, 2500 years, 5000 years, and 10000 years.

Keyword : PSHA (Probabilistic Seismic hazard Analyaua), PGA

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kota Mamuju adalah sebuah Ibu Kota dari Provinsi Sulawesi Barat yang berada di antara Palu (Ibu Kota Provinsi Sulawesi Tengah) dan Makassar (Ibu Kota Provinsi Sulawesi Selatan). Secara geografis Kota Mamuju berada ditepi barat Pulau Sulawesi. Secara topografi wilayah ini berupa pesisir hingga pegunungan dengan rentang ketinggian antara 0 sampai >1500 meter di atas permukaan laut. Secara geologi, Kabupaten Mamuju membentuk perbukitan lembah serta darat, tersusun dari berbagai macam batuan. Kondisi batuan yang ada bersifat lunak, lepas, dan belum padat (unconsolidated). Selain itu, Kota Mamuju berada tidak jauh dari patahan (sesar naik) termasuk Sesar Mamuju dan Sesar Somba Majene. Kondisi ini menyebabkan tanah batuan di daerah Mamuju dan Majene rawan terhadap guncangan gempa.

Pada tanggal 15 Januari 2021 pada pukul 01.30 WITA dini hari, terjadi gempa di Kota Mamuju dengan Magnitudo 6,2 pada kedalaman 10 km berjarak sekitar 35 km selatan Kota Mamuju dan berjarak sekitar 62,2 km utara Kota Majene. Berdasarkan lokasi pusat gempa bumi, kedalaman serta data mekanisme sumber, maka gempa tersebut merupakan akibat dari aktivitas sesar (patahan) aktif di sekitar lokasi pusat gempa bumi dan terjadinya slip. Gempa ini menyebabkan kerugian yang sangat besar di

antaranya korban jiwa, korban luka, dan banyak bangunan perumahan serta fasilitas publik, dan sebagainya.

Gempa bumi adalah getaran atau guncangan yang disebabkan pergerakan lempeng bumi. Dampak dari suatu gempa bumi dapat diminimalisir dengan membuat peta bahaya gempa (*seismic hazard*) yang berisi informasi tata cara perencanaan ketahanan gempa bangunan di suatu daerah tertentu. Hal ini akan membantu untuk memahami resiko bencana gempa yang terjadi pada suatu wilayah, meningkatkan mitigasi bencana, serta meningkatkan kesiapan menghadapi bencana.

Oleh karena itu, studi ini melakukan *assesment* bahaya gempa Mamuju dengan melalui analisis probabilistik seismik hazard (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA*). PSHA adalah suatu cara untuk menganalisa *seismic hazard* pada suatu wilayah secara probabilistik dimana faktor ketidakpastian dari magnitude, lokasi dan ferkuensi terjadinya gempa diperhitungkan dan digabungkan untuk memperoleh gambaran yang lebih lengkap yaitu probabilitas percepatan gempa maksimum yang mungkin terjadi pada periode ulang tertentu.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, maka dibuat rumusan masalah sebagai berikut;

1. Bagaimana kondisi geologi, geoteknik, dan tektonik Kota Mamuju?

2. Bagaimana kondisi patahan-patahan yang memengaruhi kegempaan Kota Mamuju dihitung secara probabilistik?
3. Berapa besaran nilai PGA gempa bumi pada periode ulang 200, 500, 2500, 5000, dan 10000 tahun?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kondisi geologis, geoteknik, dan tektonik Kota Mamuju.
2. Memperkirakan pergerakan patahan yang berpotensi sebagai sumber gempa bumi pada Kota Mamuju secara probabilistik
3. Mengetahui besaran nilai *peak ground acceleration* (PGA) Kota Mamuju pada periode ulang 200 tahun, 500 tahun, 2500 tahun, 5000 tahun, dan 10000 tahun dengan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*.

D. Batasan Masalah

Ruang lingkup pembahasan dari penelitian ini adalah:

1. Data gempa dan sesar/patahan dalam radius 150 km dari Kota Mamuju pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017.

2. Data gempa 100 tahun di Kota Mamuju yang diambil dari katalog gempa lembaga geologi AS, USGS (*United State Geological Survey*).
3. Data gempa kemudian di analisis dengan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* dengan menggunakan PSHAtool.

E. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan disusun agar perubahan tugas akhir ini lebih terarah pada inti permasalahan dan kerangka isi. Gambaran umum mengenai isi penelitian ini, dapat dituliskan sebagai berikut :

BAB 1. PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang penelitian ini dilakukan, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penelitian.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Memaparkan teori-teori dasar dan tinjauan umum sehubungan dengan judul penulisan yaitu Studi Kasus Kegempaan Kota Mamuju dengan Metode PSHA

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Menerangkan teknis penelitian yang dilakukan serta cara pengolahan data hasil penelitian.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Menyajikan data hasil penelitian dan analisis data untuk mencapai hasil penelitian.

BAB 5. PENUTUP

Menerangkan tentang kesimpulan hasil analisis data penelitian dan saran sebagai hasil pandangan penelitian yang diperlukan untuk penelitian lebih lanjut dari tugas akhir ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

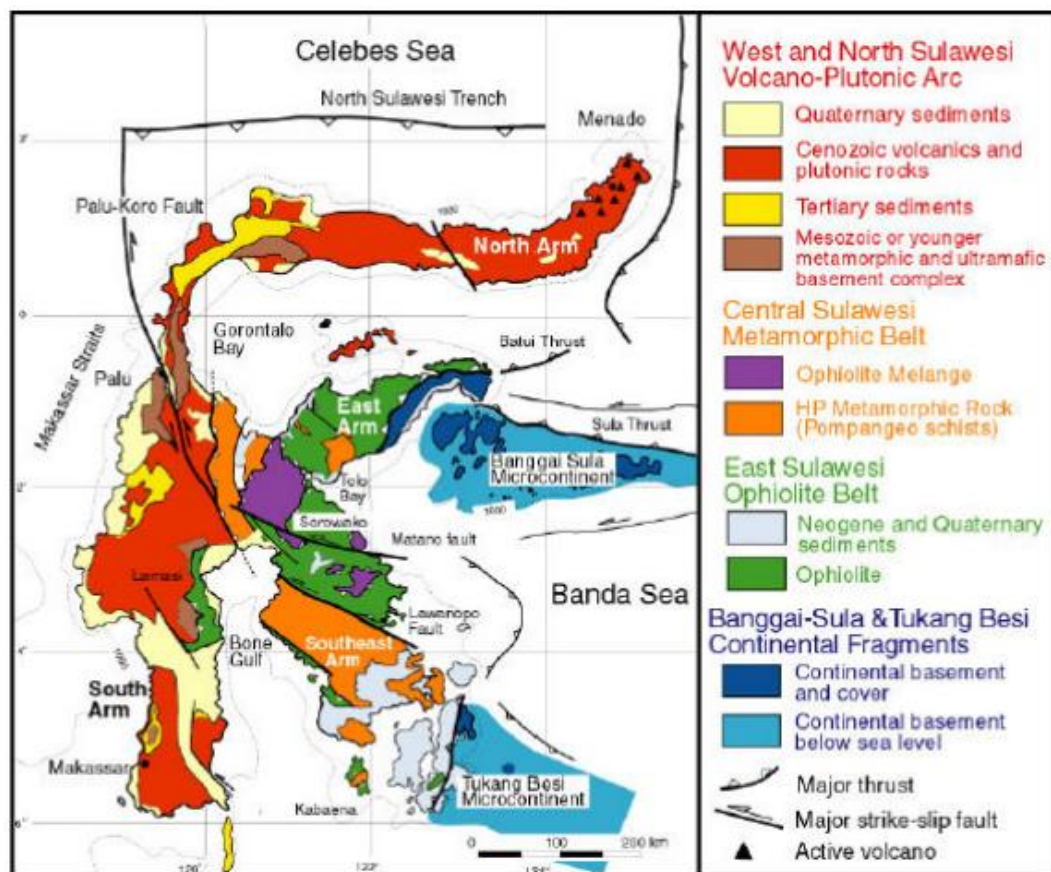
A. Kondisi Geologi, Tektonik, dan Geoteknik

Pulau Sulawesi khususnya pada bagian barat daya, secara aktif berubah bentuk dan membentuk sesar naik. Pergerakan ini menyebabkan seringnya terjadi gempa pada daerah tersebut. Kota Mamuju merupakan daerah dengan kondisi-kondisi yang meliputi geomorfologi, stratigrafi, struktur geologi, serta vulkanisme. Secara umum daerah Mamuju batuan vulkanik yang terbentuk karena proses tektonik yang kompleks, yaitu pertemuan antara Lempeng Eurasia, Indo-Australia dan Pasifik (Hamilton, 1979).

Secara geologi, gempa bumi di dataran Sulawesi Barat terjadi pada Jalur Lipatan dan Patahan Naik Majene yang terbentuk akibat benturan pada Pulau Sulawesi. Berdasarkan catatan USGS dalam kurun waktu 1969 hingga saat ini, daerah Mamuju sering mengalami gempa bumi dengan magnitudo antara 5M hingga 6M. Gempa-gempa bumi tersebut kerap terjadi di Kabupaten Mamasa dan daerah yang berbatasan dengan Sulawesi Selatan. Hampir seluruh kawasan pantai barat Sulawesi Barat, termasuk Mamuju, termasuk ke dalam daerah dengan kerentanan tinggi terhadap guncangan gempa bumi. Selain dekat dengan sumber gempa yaitu Makassar Thrust, karakteristik batuan di kawasan tersebut yang berumur lebih muda mengakibatkan tingginya tingkat kerawanan. Batuan

berumur lebih muda pada daerah dengan topografi yang lebih datar cenderung lebih lunak daripada batuan tua yang ada di pegunungan.

Sebaran batuan gunung api merupakan batuan yang mendominasi daerah Mamuju. Batuan gunung api Adang merupakan hasil dari proses vulkanisme yang memiliki beberapa pusat erupsi dan kubah lava, sehingga membentuk morfologi perbukitan dan pegunungan dengan lereng yang cukup terjal dan elevasi tinggi. Kondisi geologi serta tatanan geologi dapat dilihat pada **Gambar 2.1** di bawah.



Gambar 1. Peta Geologi dan Tatanan Tektonik Pulau Sulawesi (Geology of Sulawesi Island, Kadarusman et al., 2004)

B. Gempa

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Pergerakan lempeng-lempeng tektonik tersebut kemudian menghasilkan akumulasi energi yang dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempa sehingga efeknya sangat dirasakan hingga ke permukaan bumi (Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika). Menurut teori lempeng tektonik, permukaan bumi menjadi beberapa lempeng tektonik yang besar. Lempeng tektonik merupakan bagian keras kerak bumi yang mengapung di atas astenosfer. Oleh karena itu, lempeng tektonik ini bergerak bebas dan berinteraksi satu sama lain. Terdapat tiga kemungkinan pergerakan jika suatu lempeng tektonik terhadap lempeng lainnya bertemu pada suatu sesar, yaitu kedua lempeng saling menjauhi (*spreading*), saling mendekati (*collision*) dan saling bergeser (*transform*). Secara umum, gerakan ini berlangsung lambat dan tidak dapat dirasakan manusia namun terukur sebesar 0-15 cm tiap tahunnya. Terkadang gerakan ini mengalami macet dan saling mengunci yang mengakibatkan akumulasi energi yang berlangsung sampai suatu saat batuan pada lempeng tersebut tidak lagi kuat menahan gerakan tersebut sehingga terjadi pelepasan mendadak yang dikenal sebagai gempa bumi.

Gempa dibedakan berdasarkan penyebab terjadinya gempa (Bolt, 1978), yaitu gempa tektonik (*tectonic earthquake*), gempa vulkanik (*vulcanic earthquake*), gempa runtuh (*collapse earthquake*), gempa

ledakan (*explosion earthquake*). Gempa yang disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik umumnya lebih besar bila dibandingkan dengan jenis gempa lainnya.

Menurut (Fowler, 1990), gempa diklasifikasikan berdasarkan kedalaman fokus yaitu gempa dangkal (kurang dari 70 km), gempa menengah (kurang dari 300 km), dan gempa dalam (lebih dari 300 km).

Adapun menurut (Ginanjar, 2008) gempa dibedakan pula berdasarkan waktu terjadinya:

1. Gempa Utama (*mainshock*) yaitu gempa yang terjadi pada guncangan awal akibat deformasi karena adanya interaksi antar lempeng.
2. Gempa Susulan (*aftershock*) merupakan gempa yang terjadi setelah datangnya gempa utama. Gempa susulan dapat terjadi lebih dari satu kali pada wilayah yang sama dengan gempa utama.
3. Gempa Pendahuluan (*foreshock*) merupakan gempa yang mendahului gempa utama dengan magnitudo yang lebih kecil dan terjadi pada wilayah yang sama dengan gempa utama.

C. Pemodelan Sumber Gempa Subduksi

Zona sumber gempa diidentifikasi sebagai suatu area yang mempunyai derajat gempa yang sama, di mana setiap titik dalam zona tersebut mempunyai kemungkinan yang sama terjadinya gempa di masa mendatang. Model sumber gempa diperlukan sebagai hubungan antara

data kejadian gempa dengan model perhitungan yang digunakan dalam menentukan tingkat bahaya gempa dan memberikan gambaran distribusi episenter kejadian gempa historik, frekuensi kejadian gempa dan pergeseran relatif lempeng (*slip-rate*) dari suatu sumber gempa. Batasan model zona sumber gempa yang digunakan adalah:

1. Kedalaman sumber gempa dibatasi hingga 300 km.
2. Jarak lokasi sumber gempa ke lokasi yang ditinjau dibatasi hingga 400 km.
3. Fungsi atenuasi yang digunakan untuk tiap-tiap model adalah fungsi yang dianggap sesuai dengan karakteristik kegempaan dan model sumber gempa wilayah Indonesia.

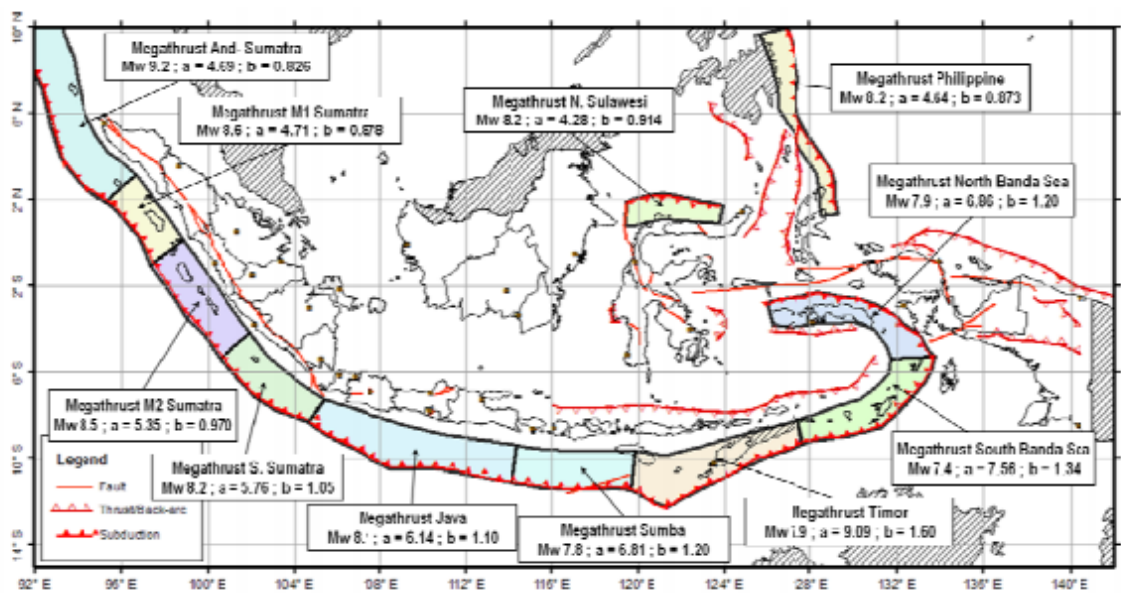
Secara umum zona sumber kejadian gempa bumi berdasarkan mekanisme fisik dibagi menjadi tiga (3) meliputi :

1. Sumber Gempa Subduksi, yaitu zona pertemuan lempeng dimana lempeng samudera menunjam ke dalam lempeng benua atau dua benua yang saling menumpu dan menghasilkan gempa-gempa besar (Kertapati, 2006). Model sumber gempa subduksi merupakan model yang didapat dari data seismotektonik yang telah teridentifikasi dengan baik. Parameter model ini meliputi lokasi subduksi yang dimasukkan dalam koordinat *latitude* dan *longitude*, kemiringan bidang subduksi (*dip*), *rate*, dan *b-value* dari area subduksi yang bisa didapat dari data gempa historis serta batas kedalaman area subduksi.

Nilai magnituda maksimum, a-b value serta besarnya M_{max} historis untuk sumber gempa subduksi interface atau Megathrust yang banyak mempengaruhi nilai kegempaan wilayah Indonesia bisa dilihat pada **Tabel 2.1**. Parameter dan pemodelan segmen-segmen subduksi tersebut diatas bisa dilihat pada **Gambar 2.1**.

Tabel 2. 1. Data dan parameter sumber gempa subduksi (Megathrust)

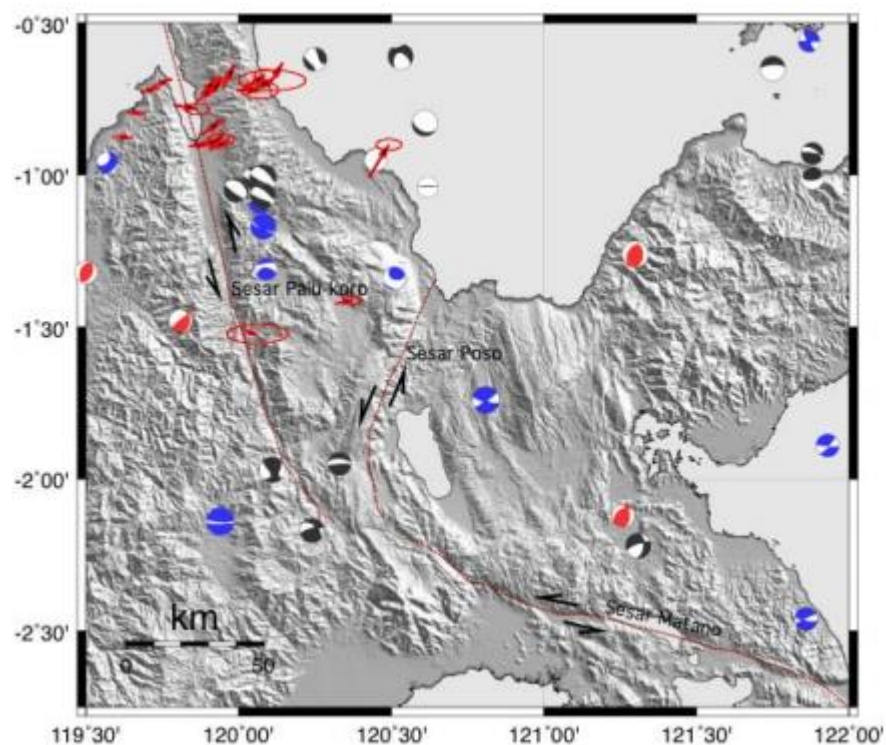
No	Megathrust	M_{max} History	b-val	a-val	M_{max} (Desain)	
					GR	Char
1	Andaman-Sumatra	9.2 (26-12- 2004)	0.826	4.69	8.0	9.2
2	Nias (Mid-1 Sumatra)	8.7 (28-03-2005)	0.878	4.71	8.7	8.7
3	Siberut (Mid-2 Sumatra)	8.5 (12-09-2007)	0.970	5.35	8.5	8.5
4	Southern Sumatra	7.9 (04-06-2000)	1.050	5.76	8.2	8.2
5	Java	8.1 (27-02-1903)	1.100	6.14	8.1	8.1
6	Sumba	7.8 (11-08-1937)	1.200	6.81	7.8	-
7	Timor	7.9 (20-10-1938)	1.600	9.09	7.9	-
8	North Banda Sea	7.9 (01-03-1948)	1.200	7.26	7.9	-
9	South Banda Sea	7.1 (23-04-1964)	1.340	7.56	7.0	-
				7.56	7.4	-
10	Northern Sulawesi	7.9 (01-01-1996)	0.914	4.82	8.2	-
11	Philippine	8.2 (14-04-1924)	0.878	4.64	8.2	-



Gambar 2 Model segmentasi dan parameter sumber gempa subduksi (Megathrust)(Peta Sumber dan Bahaya Gempa 2017)

2. Sumber Gempa Sesar (*fault*), yaitu zona kejadian gempa patahan dangkal (*Shallow Crustal Fault*) dengan mekanisme *strike-slip*, *reverse*, atau normal yang terjadi pada patahan-patahan. Sumber gempa patahan dangkal dimodelkan hingga kedalaman 15 km. Model sumber gempa ini disebut juga sebagai sumber tiga dimensi karena dalam perhitungan probabilitas jarak, yang dilibatkan adalah dari site ke hypocenter. Jarak ini memerlukan data dip dari sesat yang akan dipakai sebagai perhitungan probabilitas tersebut. Parameter-parameter yang diperlukan dalam menanalisa probabilitas dengan model sumber gempa sesar adalah: fault trace, mekanisme pergerakan sesar, slip-rate, dip, panjang dan lebar sesar, dimana data-data tersebut didapat dari para ahli geologi dan

geofisika. Penentuan lokasi sesar ini berdasarkan data penelitian yang telah dipublikasikan yang kemudian di-*trace* ulang dengan menggunakan aplikasi *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) yang berbentuk peta geomorfologi dan data gempa historis yang sudah direlokasi (Gambar 2.3). Dari hasil *trace* ini didapat panjang dari sesar yang dicari.



Gambar 3. Penampakan sesar Palu-Koro dan sesar Poso sari data SRTM serta model mekanisme gempa yang terjadi di sekitarnya.(Peta Sumber dan Bahaya Gempa 2017)

3. Sumber Gempa *Background*, yaitu sumber gempa yang belum diketahui secara jelas. Model sumber gempa ini sangat cocok untuk daerah yang sesar atau patahannya elum teridentifikasi dengan jelas namun daerah tersebut memiliki sejarah kejadian gempa.

Kejadian gempa pada zona *background* biasanya adalah gempa-gempa kecil sampai sedang. Model gempa ini digunakan untuk mengestimasi rate dari kejadian gempa sedang yang akan datang di daerah fault dan gempa-gempa acak di luar *fault* (Petersen *et al* , 2008). Model ini memprediksi bahwa kejadian gempa yang lebih besar kemungkinan dapat terjadi di daerah sekitar gempa-gempa kecil sampai sedang yang telah terjadi sebelumnya. Oleh karena itu, pada daerah yang data *fault*-nya belum teridentifikasi dengan jelas, tetapi di daerah tersebut mempunyai sejarah kejadian gempa, maka model ini sangat sesuai. Model *gridded* ini dalam analisisnya dibagi dalam lima interval kedalaman, yaitu *shallow background source* (0–50 km), dan *deep background source* (50–100 km), (100–150 km), (150–200 km) dan (200–300 km).

D. Parameter Seismik

Dalam menganalisa resiko gempa dibutuhkan beberapa parameter seismik dari setiap pemodelan area sumber gempa. Perhitungan parameter seismik menggunakan persamaan Gutenberg & Richter (1944) untuk mendapatkan nilai *activity rate* (λ) dan *a-b value*. *A-b value* dapat dikatakan sebagai parameter yang menggambarkan karakteristik tektonik serta aktivitas gempa pada suatu daerah.

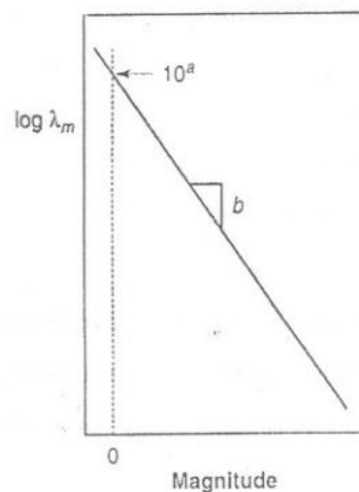
Model Guttenberg-Richter, λ_M adalah frekuensi terjadinya gempa dengan magnitude $M \geq m$ per satuan waktu, menurun secara

eksponensial dengan meningkatnya megnitudo gempa. Hubungan tersebut dinyatakan dalam persamaan berikut:

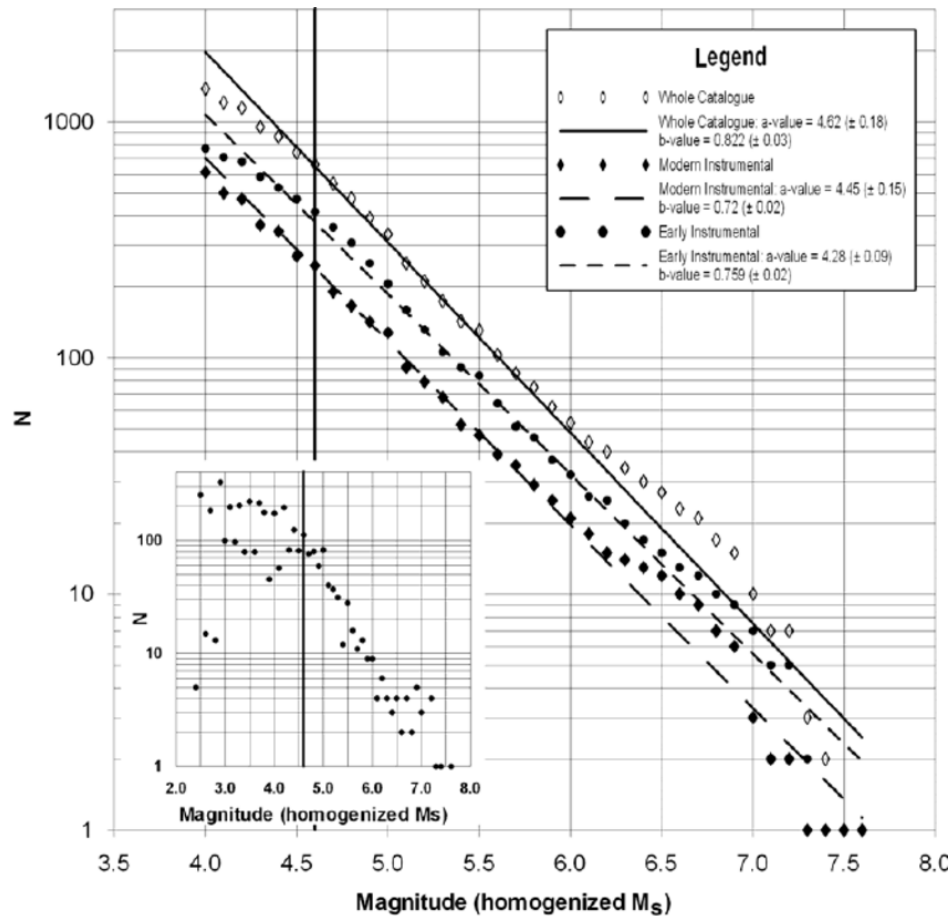
$$\text{Log} (\lambda) = a - b. M$$

2.1

Dimana a merupakan nilai konstanta dari setiap area sumber gempa berdasarkan waktu pengamatan dan tingkat intensitas gempa dan b merupakan konstanta tiap area yang mempresentasikan kemiringan grafik, dan M merupakan magnitudo. Nilai a menunjukkan keaktifan seismik yang sedang diamati dan tergantung pada periode pengamatan dan tingkat gempa di daerah tersebut. Adapun nilai b menunjukkan gradien atau kemiringan dari persamaan linier hubungan frekuensi dengan magnitudo. Hukum pengulangan Guttenberg-Richter yang memperluhatkan parameter a dan b dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 4. Grafik Gutnberg-Richter



Gambar 5. Penggunaan Grafik Gutenberg-Richter pada data gempa (An Earthquake Catalogue, T.J Bsylliss dan P.W. Burton, 2007)

E. Magnitudo Maksimum

Penentuan magnitudo maksimum dalam analisa hazard gempa dari suatu sumbar gempa yang sudah dimodelkan adalah hal penting. Magnitudo maksimum merupakan gambaran magnitudo gempa terbesar yang terjadi di suatu wilayah tersebut atau *historic earthquake* berdasarkan penelitian para ahli atau perhitungan geofisika menurut kondisi tektonik dan pergeseran batuan suatu wilayah. Magnitudo maksimum dapat pula ditentukan menggunakan katalog gempa.

Ada dua cara dalam menentukan magnitudo maksimum dari suatu sumber gempa. Yang pertama, ditentukan dengan membandingkan gempa historik maksimum yang mungkin terjadi berdasarkan pertimbangan data tektonik yang ada, hal ini dilakukan pada daerah sumber gempa yang mempunyai data gempa historik yang cukup banyak. Yang kedua, ditentukan pada daerah sumber gempa dimana data gempa historiknya sedikit dan data magnitudo maksimumnya rendah tapi dari data geologi (fault system) yang ada mempunyai potensi akan terjadi gempa yang cukup besar magnitudenya, sehingga nilai magnitudo maksimum yang diambil bila panjang segmen patahannya diketahui bisa didapat dengan menggunakan persamaan Wells dan Coppenrsmith (1994).

F. Analisis Seismik Hazard

Analisa bahaya gempa bertujuan untuk menentukan batas intensitas gempa tertentu yang berlaku berdasarkan kemungkinan yang akan terjadi atau yang terlampaui pada periode tertentu. Untuk melakukan analisis seismik hazard kita perlu pemahaman mengenai beberapa pengetahuan dan teori dasar terkait sismotektonik, kegempaan, geologi, dan geotektonik. Pengetahuan dasar tersebut meliputi pengetahuan mengenai teori tektonik lempeng, teori *elastic rebound*, kondisi seismotektonik wilayah yang ditinjau gambaran umum kondisi tektonik Indonesia, analisa resiko gempa, fungsi atenuasi, *logic-tree*, dan parameter seismik terlampaui.

Seismik Hazard dan resiko seismik merupakan dua bentuk yang berbeda. Seismik hazard merupakan bentuk fisik dari bahaya itu sendiri, meliputi *ground motion*, pergeseran patahan, liquifaksi, dan lain-lain yang dapat menyebabkan suatu bahaya. Sedangkan untuk resiko seismik sendiri adalah kemungkinan dari kehilangan harta benda maupun korban jiwa yang diakibatkan oleh seismik hazard. Untuk mengantisipasi dan mengurangi resiko-resiko gempa yang mungkin terjadi maka diperlukan berbagai upaya mitigasi. Membuat peta hazard gempa sangat berguna dalam perencanaan bangunan tahan gempa dan menggambarkan efek gempa pada suatu lokasi yang akan membantu dalam rangka mengantisipasi dan meminimalisir korban jiwa maupun kerugian harta benda (Susilo & Adnan, 2013).

Analisis Seismik Hazard merupakan metode yang sering digunakan ahli gempa untuk memperkirakan tingkat guncangan tanah (*ground motion*) pada suatu wilayah. Karena adanya ketidak-pastian kejadian gempa pada suatu wilayah, maka SHA selalu mengaitkan keberagaman (uncertainties) dan parameter kekuatan gempa (magnitude), lokasi kejadian gempa dan tingkat pengulangan kejadian gempa. Salah satu langkah mendasar pada analisa seismik hazard adalah melakukan pemilihan fungsi atenuasi (*Ground motion Prediction Equation/GMPE*). Fungsi atenuasi merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk mengestimasi tingkat guncangan tanah akibat gempa dengan magnitudo, jarak dari sumber ke lokasi pengamatan dan sumber gempa tertentu.

Analisis Seismic Hazard mencakup perkiraan kuantitatif dari guncangan dasar tanah pada sebuah daerah tertentu. Bagian terpenting dari analisis seismik hazard adalah menentukan Peak Ground Acceleration (PGA) pada wilayah yang ditinjau. Hal ini dikarenakan PGA dan PSA dapat diterapkan dalam pengembangan response spektrum untuk tipe material pondasi yang berbeda misalnya bebatuan, tanah keras, atau tanah lunak. Analisa dari jalur patahan membantu untuk memahami aktivitas regional seismotektonik pada suatu wilayah. Peak Ground Acceleration (PGA) sendiri adalah percepatan puncak di dasar batuan, sedangkan Peak Surface Acceleration (PSA) adalah percepatan puncak di permukaan tanah.

Analisa seismik hazard dapat dilakkan dengan menggunakan dua metode, yaitu secara deterministik (Deterministic Seismic Hazard Analysis) dan secara probabilistik (Probabilistic Seismic Hazard Analysis). Dalam metode deterministik, skenario kejadian gempa telah ditentukan. Akenario tersebut meliputi skenario mengenai kejadian gempa dengan magnitudo tertentu yang akan terjadi pada lokasi tertentu. Sedangkan untuk metode probabilistik dipertimbangkan faktor ketidakpastian dalam magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa (Sunardi, 2013). Pendekatan dengan menggunakan pendekatan probabilistik dianggap lebih praktis dibanding dengan analisis deterministik. Hasil analisis probabilistik dapat digunakan langsung untuk memprediksi hazard gempa dari suatu lokasi yang berkaitan dengan konsekuensi terburuk yang mungkin terjadi. Secara prinsip, *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*

adalah metode deterministik yang analisisnya melibatkan banyak skenario dan tidak hanya bersumber dari parameter seismik yang berasal dari *ground motion* terbesar. Metode ini digunakan dalam analisis bahaya seismik berdasarkan definisi dari fungsi distribusi probabilitas untuk mendapatkan level resiko kejadian gempa di lokasi penelitian (Susilo & Adnan, 2013).

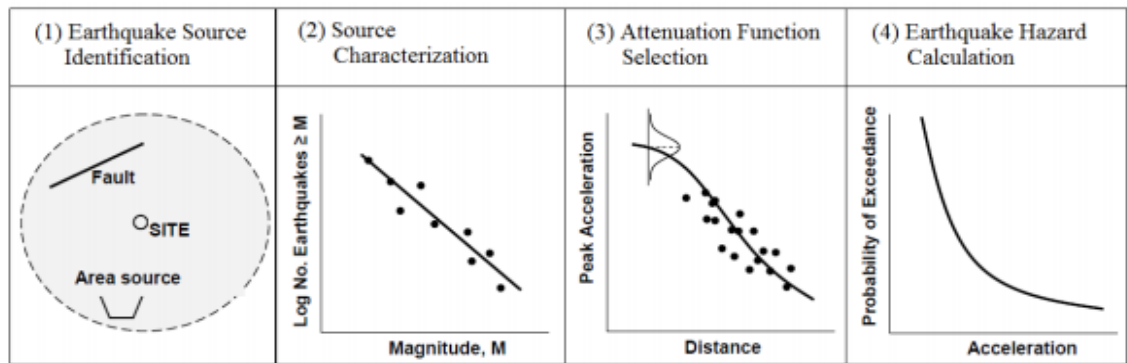
G. Probabilistic Seismic Hazard Analysis

Probabilistic Seismic Hazard Analysis adalah analisis seismik hazard yang dilakukan secara probabilistik. Analisis ini bertujuan untuk menentukan probabilitas terlampauinya nilai percepatan gempa pada suatu periode ulang tertentu. Pada metode ini ketidakpastian dari magnitudo, lokasi, dan waktu kejadian gempa diperhitungkan dan digabungkan. Teori mengasumsikan bahwa gempa dengan *magnitude* (M) dan *distance* (R) sebagai suatu variable acak. Tahapan metode PSHA terdiri dari 4 langkah utama yang dijelaskan (Reiter L.,1990), yaitu seperti berikut:

1. Identifikasi sumber gempa yang mempengaruhi suatu lokasi. Pengidentifikasian dilakukan terhadap tiap-tiap geometri sumber gempa, potensi gempa, serta lokasi reruntuhan yang terjadi di sekitar lokasi tersebut. Distribusi probabilitas seragam digunakan untuk masing-masing zona sumber dengan menganggap bahwa gempa yang terjadi memiliki besaran yang sama pada semua titik

didalam zona sumber. Distribusi tersebut kemudian digabungkan dalam geometri sumber untuk mendapatkan distribusi probabilitas jarak sumber ke lokasi.

2. Karakterisasi korelasi perulangan kejadian gempa (recurrence relationship) mendefinisikan laju rata-rata akan terlampauinya suatu besaran gempa yang dipergunakan untuk karakterisasi tingkat gempa di masing-masing zona sumber. Parameter ini dapat dipergunakan untuk memprediksi nilai maksimum gempa dari sumber gempa.
3. Pemilihan fungsi atenuasi. Ground motion yang dihasilkan oleh gempa pada suatu lokasi dengan ukuran tertentu pada lokasi tertentu di setiap zona sumber harus ditentukan menggunakan predictive relationship dengan memperhitungkan faktor ketidakpastian. Model probabilitas diturunkan untuk memprediksi kemungkinan tiap sumber dapat menimbulkan gempa dengan magnitudo tertentu dalam satu periode waktu tertentu.
4. Penggabungan perkiraan lokasi gempa, ukuran gempa dan parameter ground motion dengan memperhitungkan faktor ketidakpastian dilakukan untuk mendapatkan probabilitas parameter *ground motion* akan terlampaui/*exceeded* dalam selang waktu tertentu.



Gambar 6. Langkah-langkah metode PSHA (Reiter. L, 1990)

Memperhitungkan bahaya gempa berdasarkan akumulasi kejadian gempa dan *ground motion* yang bisa saja terjadi menjadi konsep dasar dari metode PSHA. Namun masukan hazard terbesar pada site dari probabilitas 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. Di satu sisi, metode PSHA menguntungkan karena berbagai asumsi atau skenario tentang sumber gempa potensial dan keberulangan kejadian gempa diintegrasikan menjadi satu.

Satu nilai dominan (*most likely*) tertentu dari magnitudo (M) dan jarak site ke sumber (R) menyebabkan hazard gempa menjadi suatu fungsi, baik secara sendiri-sendiri maupun kombinasi untuk menghubungkan hasil analisis resiko gempa.. Konsep ini digunakan untuk mendapatkan informasi jarak dan magnitudo tersebut dipergunakan dalam mencari input time histories yang memiliki karakteristik yang mendekati kondisi yang

diinginkan dan dipergunakan sebagai input motion dalam spektral matching. Pemilihan didasarkan atas karakteristik sumber gempa seperti mekanisme, magnitude dan jarak yang paling mendekati hasil deagregasi.

G.1. Teori Probabilitas

Parameter - parameter ditinjau dengan memperhitungkan sifat ketidakpastian parameter menggunakan metode probabilistik total. Rumus dasar Teori Probabilistik Total yang dikembangkan Mc Guire, 1976 adalah sebagai berikut:

$$P[I \geq i] = \iint P[I \geq i; m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr \quad 2.2$$

Dimana: f_M = fungsi probabilitas magnitude

f_R = fungsi probabilitas dari jarak ke sumber

$P(I \geq i; m; r)$ = probabilitas berkondisi dari intensitas I yang sama atau lebih besar dari intensitas I di suatu lokasi dengan kekuatan gempa M dan jarak sumber gempa R .

Persamaan ini kemudian dikembangkan untuk memodelkan sumber gempa tiga dimensi (3-D), dengan maksud agar hasil yang diperoleh lebih akurat.

$$P[I \geq i] = \int f_M(m) \int f_{LR}(l) \int P[I \geq i; m, r] f_{R,M,LR}(r, m, l) dr dl dm \quad 2.3$$

Nilai intensitas I untuk kekuatan gempa M dan jarak sumber ke lokasi R ditentukan berdasarkan rumusan attenuasi yang dipakai. Nilai $P[I \geq i; m, r]$ dapat dikorelasikan dengan nilai *cumulative distribution function* (CDF) dengan persamaan :

$$P[I \geq i; m, r] = 1 - F_I(i) \quad 2.4$$

Nilai $F_I(i)$ tergantung dari distribusi probabilitas yang dipergunakan untuk mewakili besaran intensitas gempa dan parameter ground motion yang umumnya diasumsikan terdistribusi secara log normal. Frekuensi kejadian gempa tahunan selalu mempertimbangkan adanya gempa minimum yang didefinisikan sebagai batas gangguan/kerusakan minimum yang terjadi pada suatu daerah. Batasan magnitude tersebut menjadikan perhitungan terhadap frekuensi kejadian gempa tahunan menurut (Mc Guire and Arabasz, 1990) adalah sebagai berikut:

$$N(m) = v \frac{\exp[-\beta(m - m_0)] - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]} \quad 2.5$$

$$\text{Dimana } v = \exp(\alpha - \beta \cdot m_0) \quad 2.6$$

Dari nilai frekuensi kejadian gempa tahunan tersebut dapat diturunkan nilai probability density function, yaitu :

$$f_M(m) = \frac{d}{dm} F_M(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{\max} - m_0)]} \quad 2.7$$

$$F_M(m) = \frac{N(m_0) - N(m)}{N(m_0) - N(m_{\max})}$$

Dimana 2.8

Probability Density Function untuk jarak r_R sangat ditentukan dari geometri sumber gempa yang juga tergantung pada kondisi geologi dan seismologi sumber gempa. Dalam analisa selanjutnya geometri sumber gempa dapat digambarkan dalam suatu model tertentu baik dalam bentuk 2-dimensi seperti sumber gempa titik, garis atau area maupun dalam bentuk 3- dimensi yang menggambarkan sumber gempa dalam bentuk geometri yang mendekati kondisi sesungguhnya.

Dalam pembuatan PSHA, zona sumber gempa bumi diklasifikasikan ke dalam tiga jenis yaitu: (1) sumber gempa bumi sesar (*fault*), yaitu zona kejadian gempabumi yang terjadi pada patahan-patahan yang sudah terdefinisi jelas, termasuk mekanisme, *slip rate*, *dip*, panjang patahan dan lokasinya. (2) Sumber gempa bumi subduksi, yaitu zona kejadian gempa bumi yang berada dekat dengan batas pertemuan antara lempeng samudera yang menunjam masuk ke bawah lempeng benua. Gempa subduksi ini dibatasi hingga kedalaman 50 km (*megathrust*). Gempa bumi dengan kedalaman lebih dari 50 km akan dinyatakan sebagai sumber gempa bumi *deep background*. (3) Sumber gempa bumi *background (gridded seismicity)*, yaitu sumber gempa bumi yang belum diketahui secara jelas, tetapi pada tempat tersebut terdapat beberapa kejadian gempabumi. Model sumber gempa ini diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *shallow background* (kedalaman hingga 50 km) dan *deep background* (kedalaman lebih dari 50 km). Model sumber gempa bumi *deep*

background sendiri dibagi dalam empat interval yaitu kedalaman 50-100 km, 100-150 km, 150-200 km, dan 200-300 km.

H. Fungsi Atenuasi

Ketika mencakup evaluasi Peak Ground Acceleration (PGA) yang ditentukan oleh perbedaan jarak sumber pada lokasi yang ditinjau, pemilihan magnitudo maksimum akan berdasar pada jarak yang paling dekat dengan titik tinjau. Dengan mengetahui magnitudo maksimum dari suatu patahan dan jarak terdekat sumber patahan ke titik tinjau, kita dapat mengestimasi percepatan horizontal pada suatu lokasi dengan menggunakan persamaan atenuasi.

Persamaan atau fungsi atenuasi merupakan persamaan matematika yang menghubungkan antara parameter kegempaan di lokasi pusat gempa (magnitudo M dan jarak R) dengan parameter pergerakan tanah (spektra percepatan) di lokasi tinjauan.

Fungsi atenuasi dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti:

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 pada suatu daerah tertentu. Namun, karena kurangnya ketersediaan data percepatan tanah di Indonesia menyebabkan sulitnya menemukan fungsi atenuasi yang baik. Oleh karena itu, untuk analisis

seismic hazard digunakan fungsi atenuasi dari daerah lain yang memiliki kemiripan tektonik dan geologi wilayah Indonesia. Pemilihan fungsi atenuasi yang paling penting adalah berdasarkan mekanisme kejadian gempa, dimana secara umum dikategorikan dalam zona gempa subduksi, zona gempa *background* dan zona gempa *shallow crustal* (Hutapea & Mangape, 2009).

Berdasarkan hasil penemuan Tim Teknis Revisi Peta Gempa Indonesia pada tahun 2010, data pencatatan *accelorograph* yang telah dilakukan oleh BMKG merupakan data percepatan yang berada di permukaan tanah (Asrurifak, 2010). Selain itu kondisi lapisan tanah dimana alat pendeteksi gerakan tanah diletakkan juga belum diketahui secara pasti. Berdasarkan kondisi tersebut digunakan beberapa fungsi atenuasi untuk wilayah Indonesia berdasarkan kondisi masing-masing sumber gempa yaitu:

- a. Sumber gempa *shallow crustal* dengan medel yang digunakan berasal dari *fault* dan *shallow background* menggunakan fungsi atenuasi yang dikembangkan oleh Boore dan Atkinson (2008), Campbell dan Bozorgnia (2008), dan Chiou-Youngs (2008). Ketiga fungsi tersebut merupakan hasil pembaharuan terhadap beberapa fungsi atenuasi zona patahan yang dikembangkan dan termasuk dalam kelompok fungsi *Next Generation Attenuation* (NGA).
- b. Sumber gempa subduksi *megathrust* menggunakan fungsi atenuasi yang dikembangkan oleh Youngs et al. (1997), Atkinson dan Boore (2003), dan Zhao et al. (2006).

- c. Sumber gempa *benioff* menggunakan fungsi atenuasi yang dikembangkan oleh Atkinson dan Boore (2003) *intraslab seismicity Cascida*, Atkinson dan Boore (2003) *intraslab seismicity worldwide* dan Young et al.(2997) *Geometric seismicity rock*.

H.1 Persamaan Atenuasi Boore and Atkinson (2008)

Persamaan ini dikembangkan untuk gempa yang berada pada area *shallow crustal (strike-slip, reverse, dan normal)*. Persamaan disusun dengan model regresi dari 1.574 data *motion ground* dari 58 kejadian gempa utama (*mainshock*) gempa dangkal patahan aktif dengan rentang jarak 0 sampai 400 km dan rentang magnitude $M = 5$ sampai dengan $M = 8$. Parameter yang digunakan pada Boore and Atkinson (2008) NGA dapat dilihat persamaan berikut:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S-30}, R_{JB}, M) + \epsilon\sigma_T \quad 2.10$$

Pada kondisi $M \leq M_h$

$$F_M(M) = e_1U + e_2SS + e_3NS + e_4RS + e_5(M - M_h) + e_6(M - M_h)^2 \quad 2.11$$

Pada kondisi $M \geq M_h$

$$F_M(M) = e_1U + e_2SS + e_3NS + e_4RS + e_5(M - M_h) \quad 2.12$$

$$F_D(R_{JB}, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \ln\left(\frac{R}{R_{ref}}\right) + c_3(R - R_{ref}) \quad 2.13$$

Nilai R dihitung dengan persamaan berikut

$$R = \sqrt{R^2_{JB} + h^2} \quad 2.14$$

H.2. Persamaan Atenuasi Cambell – Bozorgnia (2008)

Persamaan atenuasi ini digunakan pada area *shallow crustal* (*strike slip*, *reverse*, dan *normal*). Dasar persamaan ini adalah 64 kejadian gempa yang tercatat di peta hazard 2010. Gempa-gempa tersebut memiliki rentang magnitude 4.3-7,9 dan nilai *rupture radius* 0,1-1999 km, dengan total jumlah data 1561. Persamaan Cambell-Bozorgnia umumnya dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\ln Y = f_{mag} + f_{dis} + f_{flt} + f_{hng} + f_{site} + f_{sed} \quad 2.15$$

Parameter-parameter persamaan di atas adalah sebagai berikut:

f_{mag} (fungsi yang nilainya bergantung pada besarnya magnitudo)

f_{dis} (fungsi yang nilainya bergantung pada jarak sumber ke *site*)

f_{flt} (fungsi yang nilainya bergantung pada *style faulting*)

f_{hng} (fungsi yang nilainya bergantung pada efek *hanging wall*)

H.3. Persamaan Atenuasi Chiou-Youngs (2008) NGA

Persamaan Chiou-Young merupakan persamaan atenuasi ketiga untuk area *shallow crustal* (*strike slip*, *reverse*, dan *normal*). Persamaan ini

dikembangkan dengan menggunakan 3.551 data dari 173 kejadian gempa utama (*mainshock*) dan gempa susulan (*foreshock*). Persamaan Chiou-Youngs diturunkan untuk mendapatkan percepatan tanah dan *pseudo spectral acceleration* dengan rasio 5% dengan rentang preioda dari 0,01-10 detik. Chiou-Youngs (2008) NGA merupakan pengembangan dari persamaan Sadigh dkk. (1997) sehingga kedua fungsi ini memiliki sedikit.

Parameter-parameter yang diperhitungkan dalam Chiou-Young (2008) NGA, dapat dilihat pada persamaan-persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 \ln(SA_{1130ij}) = & c_1 + c_{1a}F_{Rvi} + c_{1b}F_{Nmi} + c_7(Z_{TORi} - 4) + c_2(M_i - 6) \\
 & + \frac{C_2 - C_3}{C_n} \ln(1 + e^{c_n(C_M - M_i)}) \\
 & + C_4 \ln(R_{RUPij} + C_5 \cosh(C_6(M_i - C_{HM, 0})_{max})) \\
 & + (C_{4a} - C_4) \ln\left(\sqrt{R_{RUPij}^2 + C_{RB}^2}\right) \\
 & + \left\{C_{Y1} + \frac{C_{Y2}}{\cosh((M_i - C_{Y3, 0})_{max})}\right\} \cdot R_{RUPij} \\
 & + c_9 \cdot \cos^2 \delta_1 \cdot \tanh\left(\frac{R_{RUPij}}{2}\right) \tan^{-1}\left(\frac{W_i \cos \delta_1}{2(Z_{TORi} + 1)}\right) \frac{1}{\pi/2} \left\{1 - \frac{R_{Bij}}{R_{RUPij} + 0.001}\right\} + \tau \cdot Z_I
 \end{aligned}$$

2.16

$$\begin{aligned}
 \ln(SA_{ij}) = & \ln(SA_{1130IJ}) + \phi_1 \left(\ln\left(\frac{V_{a30IJ}}{1130}\right) \cdot 0 \right) \min \\
 & + \phi_2 \left(e^{\phi_3((V_{s30IJ})^{113})^{min-360}} - e^{\phi_3(11360-360)} \right) \cdot \ln\left(\frac{SA_{1130IJ} + \phi_4}{\phi_4}\right) + \sigma Z_{IJ}
 \end{aligned}$$

2.17

Dengan

R_{RUP} = jarak terdekat ke bidang *rupture* (km)

- R_{JB} = jarak Joiner-Boore (km)
- δ = sudut *dip rupture*
- OW = lebar *rupture* (km)
- Z_{TOR} = lebar *rupture* (km)
- F_{RV} = 1 untuk $30^\circ \leq \lambda \leq 150^\circ$; nilai $F_{RV} = 0$ untuk mekanisme lain
(*reverse* dan *reverse-oblique*)
- F_{NM} = 1 untuk $-120^\circ \leq \lambda \leq -60^\circ$; nilai $F_{NM} = 0$ untuk mekanisme lain
(*normal* dan *normal-oblique*)
- λ = sudut *rake*
- V_{s30} = kecepatan geser rata-rata untuk kedalaman tanah 30 m paling
atas (m/dtk)
- τ = standar error untuk *inter-event*
- σ = standar error untuk *intra-event*

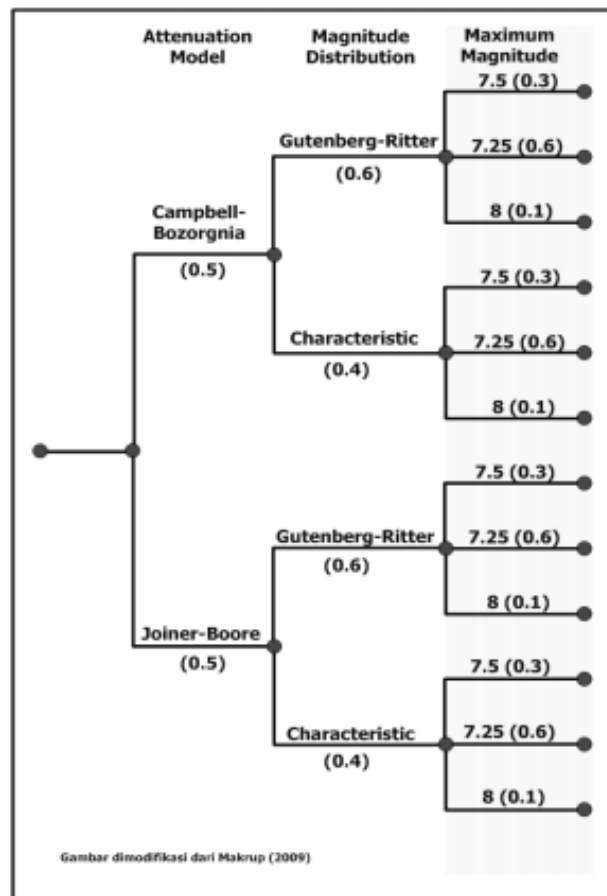
I. Logic-Tree

Persoalan penting yang selalu dihadapi pada analisis seismic hazard adalah ketidak-pastian kejadian gempa dimasa yang akan datang baik lokasi, kekuatan serta waktu kejadian. McGuire (2008) menyampaikan bahwa ketidak-pastian yang timbul pada analisis seismic hazard secara umum diakibatkan kejadian acak pada gempa dan kurang lengkapnya

model dan parameter gempa yang dapat dimasukkan pada analisis seismic hazard.

Pendekatan sistematis terhadap pengelolaan parameter sumber gempa perlu diterapkan pada analisis seismik hazard. Untuk mengatasi ketidak-pastian dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi *logic-tree*. Konsep pendekatan logic tree adalah penggunaan model alternatif pada pengambilan keputusan atau penentuan parameter keputusan. Analisis seismik hazard menggunakan pendekatan logic tree adalah dengan memasukkan faktor pembobot untuk setiap alternatif. Faktor pembobot yang dimaksud merupakan kemungkinan relatif dari model untuk menjadi betul. **Gambar 2.7** menunjukkan contoh *logic tree* (Makrup, 2009).

Logic tree pertama kali diperkenalkan oleh (Kulkarni et al., 1984) dan menjadi populer pada analisis *seismic hazard*. *Logic tree* memperhitungkan ketidak-pastian parameter dengan menggunakan probabilitas, yaitu fungsi atenuasi, pemilihan *recurrent rate*, *occurent rate*, dan magnitudo maksimum. Kebebasan menggunakan berbagai model memberi tingkat keakuratan yang lebih tinggi dan lebih terkontrol karena *logic tree* memberikan faktor bobot yang berbeda untuk tiap-tiap model. Antara model yang satu dengan yang lain dapat dibandingkan nilainya untuk melihat komparasi akurasi dengan tingkat kepercayaan terhadap parameter yang ada. Jumlah faktor bobot dari semua faktor bobot yang dimasukkan sebagai alternatif metode untuk parameter yang sama harus sama dengan satu (Sunardi,2013).



Gambar 7. Logic tree sederhana untuk memodelkan ketidak-pastian Seismic Hazard Analysis