

TESIS GEOFISIKA

Analisis Seismic Hazard Function (SHF) di Wilayah Sulawesi Bagian Tengah

Disusun dan Diajukan Oleh:

MUH. FARID WAJEDY

H042221002



DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



HALAMAN JUDUL

Analisis Seismic Hazard Function (SHF) di Wilayah Sulawesi Bagian Tengah

TESIS

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Magister Sains

Pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH:

MUH. FARID WAJEDY

H02221002

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR



HALAMAN PENGESAHAN TESIS

Analisis *Seismic Hazard Function* (SHF) di Wilayah Sulawesi Bagian Tengah

Disusun dan Diajukan Oleh:

MUH. FARID WAJEDY

H042221002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Geofisika Sekolah
Pascasarjana Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 12 Februari 2024

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui:

Pembimbing Pertama



Prof. Dr. Ir. Muh. Altin Massinai, M.T. Surv. IPM
NIP. 196406161989031006

Pembimbing Pendamping



Dr. Muhammad Taufiq Rafie, S. Si., MT.
NIP. 199502072022115001

**Ketua Program Studi
Magister Geofisika**



Dr. Sakka, M. Si.
P. 196410251991021002

**Dekan Fakultas MIPA
Universitas Hasanuddin**




Dr. Eng. Amiruddin, M.Si.
NIP. 197205151997021002



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muh. Farid Wajedy
Nim : H02221002
Program Studi : Geofisika
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**“Analisis *Seismic Hazard Function* (SHF) di Wilayah Sulawesi Bagian
Tengah”**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain. Tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 12 Februari 2024

Yang menyatakan



MUH. FARID WAJEDY



Optimization Software:
www.balesio.com

SARI BACAAN

Sulawesi berada di bagian tengah dari jalur triple junction Asia Tenggara sehingga mengakibatkan daerah ini sering terjadi gempa bumi. Pemahaman mengenai tingkat bahaya gempa bumi di wilayah ini sangatlah penting dalam mengurangi resiko gempa bumi dan desain infrastruktur. Salah satu gempa besar yang terjadi pada awal abad 21 yaitu gempa pada tahun 2018 Mw 7.5 Palu-Donggala yang menyebabkan banyaknya bangunan vital rusak, liquifaksi serta tsunami lokal di daerah Palu dan Donggala. Riset ini bertujuan mengetahui kondisi seismotektonik dan tingkat bahaya gempa bumi di lokasi penelitian.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa daerah yang memiliki a-value dan b-value tinggi ialah Kabupaten Morowali, Tojo Una-una dan sebagian wilayah Banggai yang mengindikasikan pelepasan energi terus menerus terjadi dalam bentuk gempa bumi yang bermagnitudo kecil, sehingga kecil kemungkinan terjadinya gempa bumi bermagnitudo besar. Wilayah dengan a-value dan b-value rendah ialah Kabupaten Sigi, Parigi, Donggala, Poso, Pasangkayu, Mamuju Tengah, Morowali Utara, Luwu Utara, Luwu Timur, Kota Palu, sebagian wilayah dari Banggai dan Banggai Kepulauan. A-value dan b-value rendah pada daerah ini mengindikasikan adanya proses akumulasi stress sehingga besar kemungkinan daerah tersebut mengalami gempa bumi bermagnitudo besar.

Pada analisis PGA, Kabupaten Parigi, Donggala, Sigi, Poso, Pasangkayu, Luwu Utara, Morowali Utara, Kota Palu, sebagian wilayah Banggai, Banggai Kepulauan dan Tojo Una-una memiliki nilai PGA tinggi. Hal ini disebabkan daerah tersebut berada pada wilayah yang memiliki V_{s30} rendah dan juga terdapat sesar aktif seperti Sesar Palu-Koro, Matano, Parigi, Poso, Balantak dan Batui yang sering menimbulkan gempa bumi dengan magnitudo yang relatif tinggi. Sedangkan daerah memiliki nilai PGA rendah ialah Kabupaten, Morowali, Luwu Timur, Mamuju, Mamuju Tengah dan Mamasa. Daerah ini memiliki sesar aktif seperti Sesar Matano dan Mamuju. Walaupun memiliki beberapa sesar aktif namun daerah ini hanya mengalami deretan gempa bumi dengan magnitudo yang kecil hingga sedang.

Penelitian ini menunjukkan wilayah yang memiliki tingkat bahaya gempa bumi tinggi ialah klaster 5 yang meliputi daerah Kabupaten Parigi dan Donggala. Klaster 5 memiliki bahaya gempa bumi tinggi disebabkan daerah ini berada di sekitar Sesar Palu - Koro yang dapat memicu terjadinya gempa bumi dengan frekuensi yang tinggi dan memiliki magnitudo yang besar. Sedangkan wilayah yang dengan bahaya gempa bumi rendah ialah klaster 2 yang meliputi daerah Morowali. Klaster 2 berada di salah satu segmen Sesar Matano yang memiliki struktur homogen sehingga frekuensi terjadinya gempa bumi dengan magnitudo tinggi daerah ini sangat rendah.

Kata Kunci; Sulawesi; Gempabumi; Seismic Hazard



ABSTRACT

Sulawesi is in the middle of the triple junction route of Southeast Asia, so this area often experiences earthquakes. Understanding the level of earthquake hazard in this region is very important in reducing earthquake risk and infrastructure design. One of the major earthquakes that occurred at the beginning of the 21st century was the 2018 Mw 7.5 Palu-Donggala earthquake which caused many vital buildings to be damaged, liquefaction and a local tsunami in the Palu and Donggala areas. This research aims to determine the seismotectonic conditions and level of earthquake hazard at the research location.

The results of this research show that the areas that have high a-values and b-values are the Regency, Morowali, Tojo Una-una and parts of the Banggai region which indicates that energy releases continuously occur in the form of small magnitude earthquakes, so there is little possibility of large magnitude earthquakes occurring. . Regions with low a-values and b-values are Sigi, Parigi, Donggala, Poso, Pasangkayu, Central Mamuju, North Morowali, North Luwu, East Luwu, Palu City, parts of Banggai and Banggai Islands. The low a-value and b-value in this area indicate that there is a stress accumulation process so that there is a high possibility that the area will experience an earthquake with a large magnitude.

In the PGA analysis, the districts of Parigi, Donggala, Sigi, Poso, Pasangkayu, North Luwu, North Morowali, Palu City, parts of Banggai, Banggai Islands and Tojo Una-una have high PGA scores. This is because the area is in an area that has low Vs30 and there are also active faults such as the Palu-Koro, Matano, Parigi, Poso, Balantak and Batui faults which often cause earthquakes with relatively high magnitudes. Meanwhile, regions with low PGA scores are Regency, Morowali, East Luwu, Mamuju, Central Mamuju and Mamasa. This area has active faults such as the Matano and Mamuju Faults. Even though it has several active faults, this area only experienced a series of earthquakes with small to moderate magnitudes.

This research shows that the area that has a high level of earthquake danger is cluster 5 which includes the Parigi and Donggala Regencies. Cluster 5 has a high earthquake hazard because this area is located around the Palu - Koro Fault which can trigger earthquakes with high frequency and large magnitude. Meanwhile, the area with low earthquake hazard is cluster 2 which includes the Morowali area. Cluster 2 is in a segment of the Matano Fault which has a homogeneous structure so that the frequency of high magnitude earthquakes in this area is very low.

Keywords; Sulawesi; Earthquake; Seismic Hazard



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim, segala puji bagi Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga tesis ini bisa diselesaikan dengan judul **Analisis Seismic Hazard Function (SHF) di Wilayah Sulawesi Bagian Tengah** yang merupakan suatu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains di Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Terima kasih saya ucapkan kepada kedua orangtua saya, **Sakariah** dan **Hj. Farida**, serta saudara saya **Muh. Aslam**, **Uswatun Hasanah** dan **Khaerunnisa**, serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan dan motivasi sehingga saya dapat menyelesaikan tesis ini. Selain itu, ucapan terima kasih juga diberikan kepada:

1. Bapak **Prof. Dr. Ir. Muhammad Altin Massinai, MT. Surv, IPM.** selaku dosen pembimbing utama tesis ini yang selalu memberikan masukan serta motivasi selama saya duduk di bangku perkuliahan maupun pada saat proses penulisan tesis ini.
2. Bapak **Dr. Muhammad Taufiq Rafie, S. Si, MT.** selaku dosen pembimbing pertama yang telah memberikan masukan-masukan serta ilmunya dalam menyelesaikan tesis ini.
3. Bapak **Dr. Sakka, M.Si, Dr. Muhammad Alimuddin Hamzah, M. Eng** dan bapak **Andi Muhamad Pramatadie, S. T., M. Eng., Ph. D** selaku penguji yang telah memberikan masukan dan koreksi dalam penulisan tesis ini.

Anto, Pak Putra serta Pak Fadli yang banyak membantu dalam pengurusan administrasi.



5. Seluruh Dosen dan Staf Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin yang telah banyak memberikan ilmu serta motivasi.
6. Seluruh pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penulisan tesis ini yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Semoga tesis ini bermanfaat bagi pembaca maupun penulis. Penulis telah mengerahkan segala kemampuan dalam proses penyusunan tesis ini hingga selesai.

Namun sebagai manusia biasa yang memiliki kekurangan, penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna karena kesempurnaan hanya milik Allah SWT.



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
SARI BACAAN	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Rumusan Masalah	3
I.3. Tujuan Penelitian	4
I.4. Manfaat Penelitian	4
I.5. Ruang Lingkup	4
I.6. Hipotesis	5
I.7. Defenisi dan Istilah	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
II.1. Tektonik Sulawesi Bagian Tengah	7
II.2. Proses Terjadinya Gempabumi	10
II.3. Analisis A-Value dan B-Value	11
II.4. Parameter <i>Ground Motion Prediction Equation (GMPE)</i>	13
II.5. <i>Seismic Hazard Function (SHF)</i>	17
METODE PENELITIAN	19
Rancangan Penelitian	19
Waktu dan Lokasi Penelitian	20



III.3. Data dan Pengolahan Data	21
III.3.1 Data	21
III.3.2 Pengolahan Data.....	22
III.4. Analisis Data dan Interpretasi	24
III.7. Bagan Alir Penelitian	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	26
IV.1. Hasil	26
IV.1.1 Declustering data gempa.....	26
IV.1.2 Klasterisasi K-Means	27
IV.1.3 Kondisi Seismotektonik Wilayah Sulawesi Bagian Tengah.....	30
IV.1.4 Parameter Ground Motion Prediction Equation	33
IV.2. Pembahasan.....	36
IV.2.1 Implikasi Seismotektonik Wilayah Sulawesi Bagian Tengah	36
IV.2.2 <i>Seismic Hazard Function (SHF)</i>	40
BAB V PENUTUP.....	46
V.1. Kesimpulan.....	46
V.2. Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA	48
LAMPIRAN.....	53



DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1 Seismisitas di wilayah Sulawesi bagian Tengah dengan rentang waktu 1990-2020	3
Gambar II.1 Model pembagian blok yang ada wilayah Sulawesi bagian Tengah	8
Gambar II.2 Peta sesar aktif wilayah Sulawesi bagian Tengah (modifikasi dari PuSGeN, 2017).....	10
Gambar II.3 Contoh model <i>plane source</i> Sumatera (A) dan <i>point source</i> (B) ...	11
Gambar II.4 Contoh Estimasi SHF di wilayah Padang dan Bengkulu	18
Gambar III.1 Lokasi Penelitian.....	20
Gambar III.2 Data gempa bumi hasil kompilasi katalog <i>United States Geological Survey</i> (USGS), Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) dan <i>International Seismological Centre-Global Earthquake Model</i> (ISC-GEM) periode 1990-2020.....	21
Gambar IV.1 Data seismisitas yang telah dilakukan proses decluster untuk menghilangkan aftershock.....	26
Gambar IV.2 Grafik data sebelum dan sesudah dilakukan proses decluster menggunakan formula Gardner & Knopoff (1974) yang telah dikembangkan oleh Gruenthal (1985).....	27
Gambar IV.3 Grafik Elbow Method.....	27
Gambar IV.4 Hasil Klasterisasi K-Means.....	29
Gambar IV.5 Grafik a-value dan b-value pada setiap klaster, a sampai k merupakan grafik untuk klaster 1 sampai 9 sedangkan j merupakan grafik untuk semua event gempa pada lokasi penelitian.....	31
Gambar IV.6 Hasil GMPE Idriss (2008).....	34
Gambar IV.7 Hasil GMPE Boore and Atkinson (2008)	35
Gambar IV.8 Peta sebaran nilai a-value (a) dan density rate yang telah dinormalisasi (b)	37
Gambar IV.9 Peta sebaran nilai b-value.....	40
IV.10 Peta sebaran nilai rata-rata PGA	42
IV.11 Kurva SHF probability of exceedance vs PGA (a) dan annual rate of exceedance vs PGA (b).....	43



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Hubungan percepatan tanah maksimum dengan intensitas gempabumi.....	14
Tabel 2.2. Konstanta GMPE Idriss (2008)	16
Tabel 4.1 Jumlah event gempabumi pada setiap klaster	29
Tabel 4.2 a-value dan b-value pada setiap klaster.....	32



DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

SINGKATAN	NAMA	PEMAKAIAN PERTAMAKALI PADA HALAMAN
PGA	<i>Peak Ground Acceleration</i>	2
SA	<i>Spectral Acceleration</i>	2
PSHA	<i>Probability Seismic Hazard Analysis</i>	2
SHF	<i>Seismic Hazard Function</i>	2
BMKG	<i>Badan Meteorologi dan Geofisika</i>	4
USGS	<i>United States Geological Survey</i>	4
ISC-GEM	<i>International Seismological Centre- Global Earthquake Model</i>	5
MMI	<i>Modified Mercalli Intensity</i>	14
GMPE	<i>Ground Motion Prediction Equation</i>	16
PE	<i>Probability of Exceedance</i>	17
LAMBANG		
a	a-value	11
b	b-value	11
M	Magnitudo	11
\bar{M}	Magnitudo rata-rata	13
M_c	Magnitudo Completeness	13
a	Percepatan tanah (gal)	16



$\alpha, \beta, \gamma, \varphi$	Konstanta persamaan Idriss (2008)	16
F	Mekanisme Sumber Gempa	16
R_{rup}	Jarak rupture (km)	16
FM	Fungsi magnitudo	16
FD	Fungsi jarak	16
FS	Fungsi amplifikasi situs tanah	16
R_{jb}	Jarak horizontal terdekat ke permukaan proyeksi bidang patahan (km)	16
P	<i>Probability of Exceedance</i>	17
V	<i>Annual rate</i>	17
m_0	<i>Magnitudo minimum</i>	17
m_{max}	<i>Magnitudo maksimum</i>	17
Π	<i>PI</i>	17
T	<i>Periode pengamatan (tahun)</i>	18
t	<i>Waktu (hari)</i>	22
d	<i>Jarak antar event (km)</i>	22
SSE (<i>Inertia</i>)	<i>Sum of Squared Error</i>	23
K	<i>Banyaknya klaster</i>	23
X_i	<i>Data</i>	23
C_k	<i>Posisi centroid</i>	23



BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan pertemuan empat lempeng. Lempeng tersebut terdiri dari tiga lempeng terbesar di dunia yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, lempeng Indo-Australia, dan satu lempeng mikro yang berada di sebelah utara pulau Sulawesi yaitu lempeng mikro Philipina (Ranging, et al., 1999). Salah satu wilayah di Indonesia yang menjadi titik pertemuan lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia adalah pulau Sulawesi terkhusus bagian Tengah Sulawesi. Bagian Tengah Sulawesi terbentuk tiga blok, yaitu Blok Makassar, Blok Sula Utara dan Blok Sula Timur (lihat **Gambar II.1**). Ketiga blok tersebut pergerakannya diakomodasi oleh Sesar Matano berlanjut ke Sesar Palu-Koro menuju ke Utara hingga ke zona subduksi dibagian utara Sulawesi (Hinschberger, et al., 2000; Socquet, et al., 2006).

Interaksi dari ketiga blok tersebut memicu terjadinya beberapa gempa-gempa yang bermagnitudo tinggi di Sulawesi bagian Tengah seperti gempa Donggala 1998 Mw 6.0 (Vigny, et al., 2002), gempa Poso 2017 Mw 6.7 (Wang, et al., 2019), gempa Donggala 2018 Mw 7.5 (Huda, et al., 2023) dan gempa Mamasa 2018 Mw 6 (lihat **Gambar I.1**). Gempa ini menimbulkan banyak korban jiwa sekaligus merusak beberapa bangunan vital di daerah tersebut. Oleh karena itu diperlukan studi bahaya gempabumi untuk mengurangi dampak dari gempabumi. Studi bahaya gempabumi dapat dilakukan dengan pendekatan deterministik atau probabilitistik

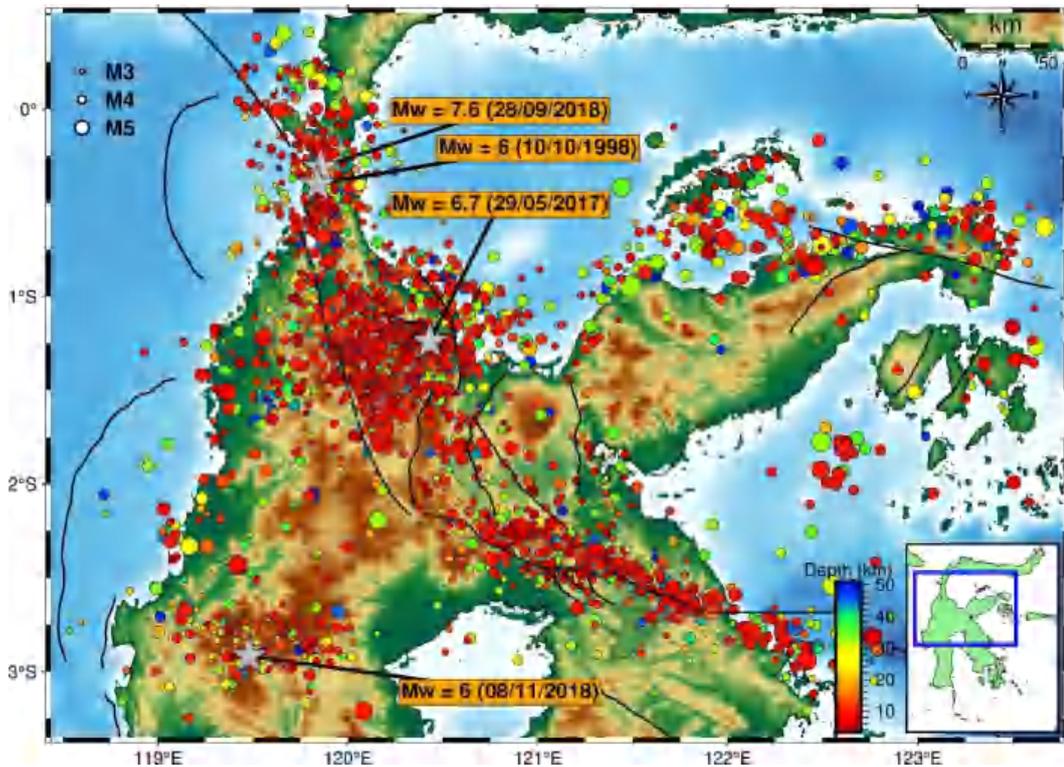
asarkan pada kondisi geologi regional dan informasi kegempaan daerah bersangkutan (Anbazhagan, et al., 2009).



Kurva bahaya atau *seismic hazard function*, menunjukkan variasi parameter gerakan tanah tertentu, seperti *Peak Ground Acceleration* (PGA) atau *Spectral Acceleration* (Sa), terhadap *probability of exceedance* atau *annual rate of exceedance* yang merupakan keluaran utama dari PSHA. Tingkat gerakan tanah itu merupakan nilai desain, sesuai dengan waktu pengembalian desain yang telah ditetapkan sebelumnya (Bommer & Abrahamson, 2006; Anbazhagan, et al., 2009). Bahaya seismik pada dasarnya ditentukan oleh seberapa baik atau seberapa andal potensi fungsi model gempabumi; sedangkan keandalan suatu model potensi gempa ditentukan oleh sejauh mana pengetahuan kita mengenai pemahaman kemungkinan sumber, kelengkapan data, dan laju kegempaan lebih lanjut, potensi gempa pada suatu wilayah tertentu dapat diperkirakan berdasarkan laju momen seismik (Triyoso, et al., 2020).

Penelitian mengenai analisis *seismic hazard* secara detail sangatlah penting dilakukan agar dapat mengurangi resiko gempabumi. Beberapa studi mengenai *seismic hazard* atau PSHA telah banyak dilakukan diantaranya Triyoso & Suwondo (2022), Triyoso et al. (2020), Cipta (2019) dan Anbazhagan et al. (2009). Oleh karena itu, maka penelitian mengenai *Seismic Hazard Function* (SHF) ini dilakukan untuk mengetahui bahaya gempabumi yang ada di wilayah Sulawesi bagian Tengah. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan referensi dalam mitigasi bencana gempabumi di wilayah Sulawesi bagian Tengah.





Gambar I.1 Seismisitas di wilayah Sulawesi bagian Tengah dengan rentang waktu 1990-2020.

I.2. Rumusan Masalah

Bagian ini menjelaskan mengenai permasalahan dalam penelitian ini yang akan diselesaikan berdasarkan beberapa pendekatan yang digunakan untuk menyelesaikannya. Berikut rumusan masalah dalam penelitian ini:

1. Wilayah Sulawesi bagian Tengah merupakan salah satu wilayah dengan tatanan tektonik aktif di Pulau Sulawesi sehingga perlu analisis lebih dalam mengenai kondisi seismotektonik di ini.
2. Kurangnya penelitian yang komprehensif mengenai analisis sebaran nilai PGA di wilayah Sulawesi bagian Tengah, oleh karena itu analisis secara detail mengenai sebaran nilai PGA wilayah Sulawesi bagian Tengah perlu dilakukan.



3. Pemahaman yang lebih detail mengenai daerah dengan bahaya gempabumi tinggi di wilayah Sulawesi khususnya Sulawesi bagian Tengah berdasarkan kurva *Seismic Hazard Function*

I.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Menjelaskan variasi nilai a-value dan b-value di wilayah Sulawesi bagian Tengah.
2. Mengestimasi nilai PGA di wilayah Sulawesi bagian Tengah.
3. Memberikan informasi mengenai daerah-daerah yang memiliki resiko bahaya gempabumi di wilayah Sulawesi bagian Tengah.

I.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman secara mendalam mengenai a-value dan b-value daerah penelitian.
2. Menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi nilai PGA pada lokasi penelitian.
3. Mengestimasi bahaya gempabumi yang pada lokasi penelitian berdasarkan kurva SHF.

I.5. Ruang Lingkup

Penelitian ini dibatasi pada perhitungan dan pemetaan nilai a-value, b-value, PGA dan pembuatan kurva SHF menggunakan data sekunder *United States Geological Survey* (USGS), Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) dan *International*



Seismological Centre-Global Earthquake Model (ISC-GEM) periode 1990-2020. Data tersebut berupa waktu kejadian gempa, koordinat, kedalaman 10 – 50 km serta $M_w < 6$. Kemudian langkah selanjutnya melakukan klasterisasi K-means serta perhitungan dan pemetaan a-value, b-value, PGA dan SHF di wilayah Sulawesi bagian Tengah.

I.6. Hipotesis

Hipotesis awal diadopsi dari beberapa penelitian yang berkaitan dengan penelitian ini. Kemudian dijadikan pernyataan awal dalam menyelesaikan masalah pada penelitian ini. Adapun hipotesis penelitian ini yaitu:

1. Beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengindikasikan daerah yang mengalami akumulasi stress tinggi memiliki a-value dan b-value rendah.
2. Penelitian PSHA yang telah dilakukan di Sulawesi memberikan informasi bahwa daerah yang memiliki tingkat bahaya gempabumi tinggi ialah wilayah yang berada di sekitar Sesar Palu-Koro karena sesar tersebut memiliki slip rate yang tinggi sehingga memungkinkan terjadinya gempa bermagnitudo besar.



I.7. Defenisi dan Istilah

1. Sesar merupakan bidang patahan yang mengalami pergeseran relatif satu blok dengan blok yang lain.
2. Magnitudo gempa adalah ukuran besar kecilnya energi yang dilepaskan sumber gempa.
3. Hiposenter adalah sumber gempa yang berada di bawah permukaan.
4. Koefisien adalah faktor pengali dalam sebuah ekspresi.
5. PGA adalah nilai percepatan maksimum tanah.
6. *Accelerograph* adalah alat untuk mengukur nilai percepatan tanah.
7. Kurva SHF adalah sebuah kurva yang menjelaskan tingkatan bahaya gempabumi.
8. *Return period* gempabumi adalah periode ulang gempabumi



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Tektonik Sulawesi Bagian Tengah

Indonesia bagian timur menunjukkan konfigurasi tektonik fase awal pergeseran antara tiga lempeng besar: lempeng Eurasia, lempeng India-Australia, dan lempeng Laut Filipina. Pola tektonik ini terdiri dari banyak blok atau lempeng mikro yang berasal dari berbagai sumber. Dengan bentuk K-nya yang khas, Sulawesi berada di persimpangan antara lempeng Eurasia dan Australia. Tampaknya menjadi zona *suture* utama di sepanjang samudera cekungan *Tethyan Affinity* yang direduksi selama Paleosen (Surmont, et al., 1994).

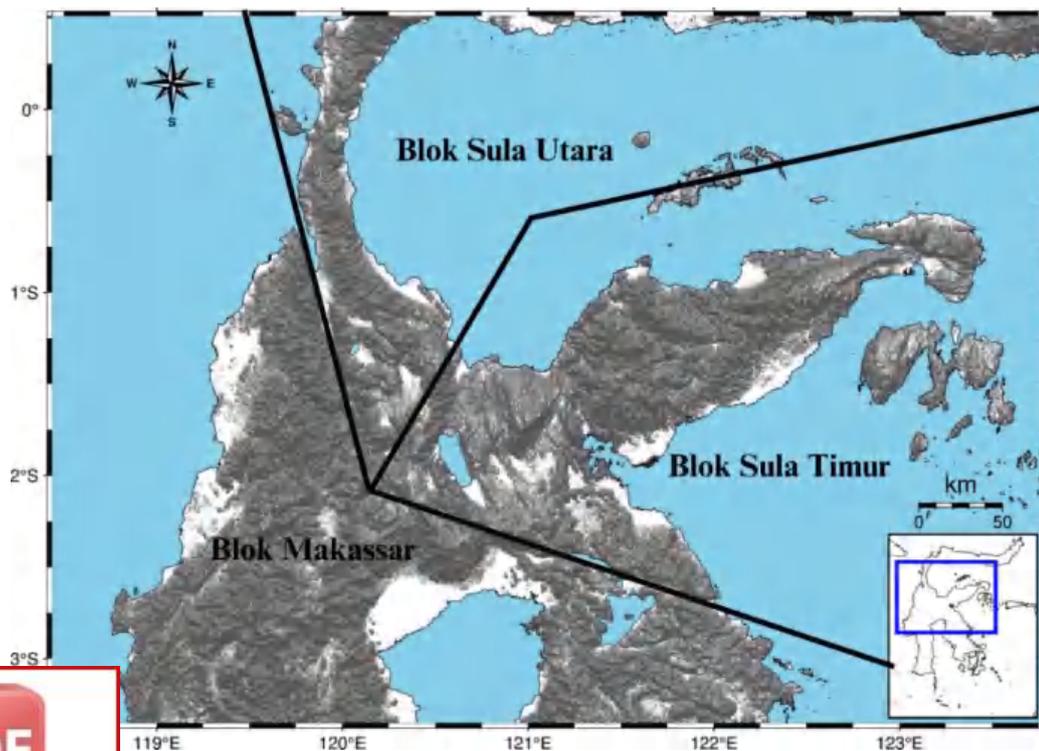
Sulawesi berada di bagian tengah dari jalur *triple junction* Asia Tenggara. Bagian utara pulau bertabrakan dengan Lempeng Sunda, yang sebagian besar pergerakannya diakomodasi oleh Gerakan *sinistral strike-slip* sepanjang Sesar Matano/Lawanopo (Hinschberger, et al., 2000; Socquet, et al., 2006). Gerakan ini berlanjut ke Sesar Palu-Koro, yang kemudian menyambung ke Palung Minahasa, tempat subduksi terjadi (Bellier, et al., 2006; Beaudouin, et al., 2003). Sesar Palu Koro adalah struktur aktif utama di Sulawesi, yang bersambung ke tenggara hingga Matano Sesar dan Sesar Lawanopo. Sesar Palu Koro membelah dua Pulau Sulawesi, Blok Makassar di barat daya dan Blok Sula Utara di timur laut. (Walpersdorf & Vigny, 1998; Stevens, et al., 1999; Socquet, et al., 2006).

Tiga blok terbentuk di Sulawesi Tengah: Blok Makassar, Blok Sunda Utara, dan Blok Sunda Timur (lihat **Gambar II.1**). Pergerakan relatif ketiga blok ini

diakomodasi oleh gerak *sinistral strike-slip* terjadi di sepanjang Sesar Matano/Lawanopo. Gerakan ini berlanjut ke utara ke Sesar Palu-Koro, yang kemudian menyambung ke Palung Minahasa, tempat subduksi terjadi (Socquet, et al., 2006).



Akibat interaksi ketiga blok ini mengakibatkan adanya sesar aktif di Pulau Sulawesi Khususnya Sulawesi bagian Tengah seperti Sesar Palu-Koro, Matano, dan Soroako (lihat **Gambar II.2**). Sesar Palu-Koro adalah zona sesar mendatar besar yang aktif yang membentang dari utara-barat laut ke selatan-tenggara di pulau Sulawesi di Indonesia. Meskipun sesar ini mendatar, ia bergerak tegak lurus di beberapa tempat. Sesar ini terletak di dekat kota Palu dan membentuk sisi barat Cekungan Palu, sebuah cekungan tarik kecil yang berkembang melalui sistem sesar. Laju pergerakan di Sesar Palu-Koro saat ini diperkirakan berkisar antara 30 hingga 40 milimeter per tahun. Jika pergerakan ini terjadi pada sesar dan terkunci pada suatu kedalaman kemungkinan menghasilkan satu gempa berkekuatan 7 setiap 100 tahun (Wells & Coppersmith, 1994; Socquet, et al., 2006). Histori yang tercatat dari jaringan seismik lokal dan global menunjukkan bahwa aktifitas seismik di bagian Tengah Sulawesi didominasi oleh gempa *shallow crustal* (Beaudouin, et al., 2003)



II.1 Model pembagian blok yang ada wilayah Sulawesi bagian Tengah (modifikasi dari Socquet et al., 2006)

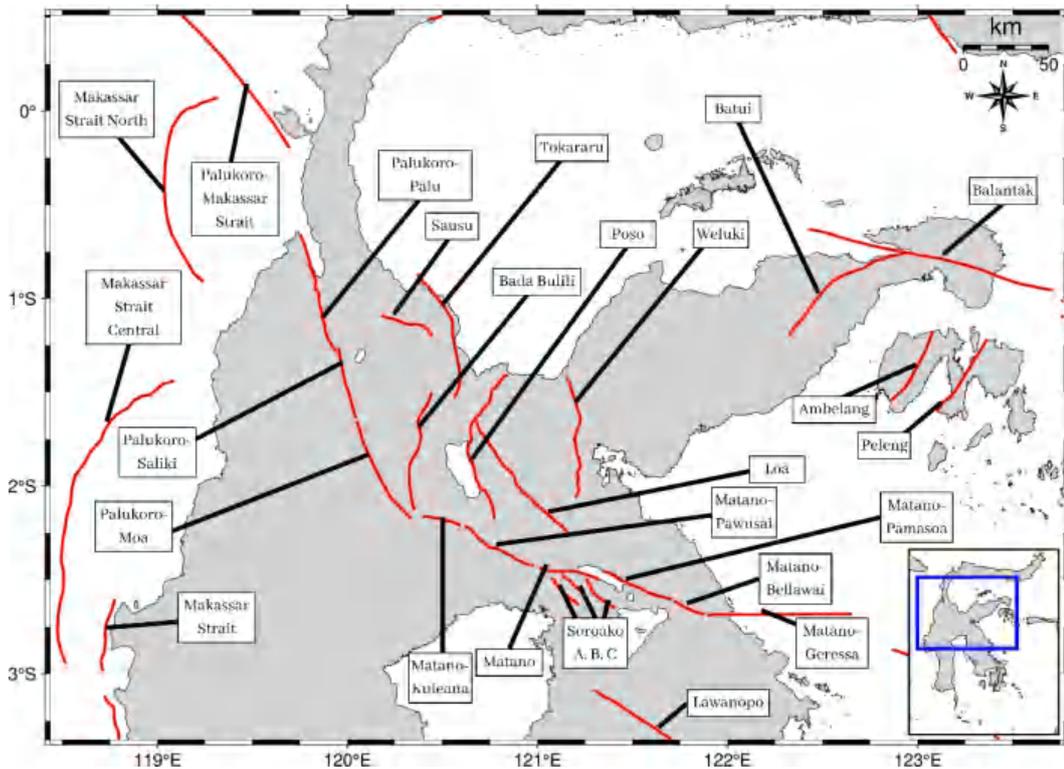


Sesar Matano terletak di bagian tengah Sulawesi dan merupakan bagian dari perpanjangan Sesar Palu Koro dari arah barat laut ke tenggara hingga memotong Danau Matano. Sesar ini juga merupakan sesar geser mengiri atau slip geser sisi kiri. Sesar Matano memiliki enam segmen morfologi: Kuleana, Pewusai, Matano, Pamsoa, Ballawai, dan terakhir Geressa. Nilai geser keenam segmen adalah 4–32 mm/tahun. Kebanyakan sesar Matano berada di wilayah Sulteng, tetapi beberapa memasuki wilayah Sulsel melalui wilayah Kabupaten Luwu Timur, yang mencakup Kecamatan Mangkutana, Wasuponda, dan Nuha. Segmen Kuleana, Pewusai, dan Matano dari barat ke timur (Santoso, et al, 2021).

Sesar Soroako berada di Sulawesi Selatan, di sebelah barat Sesar Matano. Ini adalah sesar naik. Sesar ini terdiri dari tiga bagian, yaitu (Santoso, et al, 2021):

1. Panjang Soroako Segmen A adalah 24 km dari arah Barat ke Timur melalui Kabupaten Luwu Timur dari Wasuponda hingga Towuti.
2. Soroako Segmen B adalah 20 km dari arah Barat ke Timur melalui Kabupaten Luwu Timur dari Wasuponda hingga Towuti.
3. Soroako Segmen C adalah 16 km dari arah Barat ke Timur melalui Kabupaten Luwu Timur dari Wasuponda hingga Towuti.





Gambar II.2 Peta sesar aktif wilayah Sulawesi bagian Tengah (modifikasi dari PuSGeN, 2017)

II.2. Proses Terjadinya Gempabumi

Gempabumi terjadi pertama kali pada bagian kecil patahan sebelum menyebar ke seluruh patahan (Beroza & Kanamori, 2007; Rafie, 2022). Beberapa model teoritik menjelaskan bahwa gempabumi terjadi karena pelepasan energi pada rekahan yang berkembang menjadi patahan. (Andrews, 1976; Rafie, 2022). Ketika energi yang dilepaskan setara atau lebih, tegasan tersebut meluas secara cepat, menghasilkan retakan permukaan baru. Proses nukleasi gempabumi menentukan waktu awal robekan dan lokasi gempabumi. Proses ini disebut proses nukleasi gempabumi, dan zona nukleasi adalah bagian patahan di mana perluasan robekan dipercepat (Beroza & Kanamori, 2007; Rafie, 2022).

Proses ini dapat didekati sebagai titik atau *point-source* jika ukuran nukleasinya kecil. Metode ini biasanya menganggap bahwa gelombang gempa menjalar pada



$$N(M) = e^{\alpha - \beta M}$$

$$\alpha = 2.303a; \text{ dan } \beta = 2.303b$$

N merupakan frekuensi kejadian gempa dengan M adalah magnitudo gempa $\geq M_c$ (Gui, et al., 2019). Parameter a-value menunjukkan keaktifan seismik suatu daerah. Wilayah yang memiliki a-value yang tinggi maka wilayah tersebut memiliki keaktifan seismik yang tinggi, begitupun sebaliknya.

B-value adalah konstanta tektonik suatu daerah. Daerah yang memiliki b-value yang tinggi maka daerah tersebut memiliki tingkat kerapuhan batuan yang tinggi sehingga daerah tersebut berpotensi mengalami gempabumi dengan magnitudo rendah. Sedangkan nilai b-value yang rendah memiliki potensi mengalami guncangan gempabumi dengan magnitudo yang besar (Gadkari & Mukherjee, 2023).

A-value dan b-value dapat dihitung dengan menggunakan dua cara yaitu *least square method* dan *maximum likelihood method*. Namun, pendekatan *least square method* hasilnya akan bias pada besaran yang lebih tinggi karena asumsinya bahwa semua titik data memiliki bobot yang sama dan residu yang terdistribusi secara Gaussian (Letamo, et al., 2023). Untuk menghindari hasil yang bias tersebut *maximum likelihood method* usulan (Aki, 1965) dapat digunakan dengan persamaan sebagai berikut (Gui, et al., 2019):



$$b = \frac{\log_{10} e}{\left[(\bar{M}) - \left(M_c - \frac{\Delta M_{bin}}{2} \right) \right]} \quad (2.2)$$

Dimana b adalah b-value, \bar{M} magnitudo rata-rata, M_c magnitudo completeness, $\Delta M_{bin} = 0.1$ dan $e = 0.434$. Dengan menggunakan persamaan Gutenberg-Richter (lihat persamaan 2.1) nilai a-value dapat diketahui.

II.4. Parameter *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE)

PGA (*Peak Ground Acceleration*) atau percepatan tanah maksimum adalah besarnya nilai percepatan tanah dalam periode tertentu akibat adanya kejadian gempa bumi. PGA dapat mengidentifikasi daerah yang mengalami efek terparah dari kejadian gempa bumi (Massinai, et al., 2016). Nilai PGA didasarkan pada 3 parameter yaitu magnitudo, jarak sumber gempa bumi serta kondisi geologi daerah tersebut (Fauzi, 2005).

Percepatan tanah maksimum merupakan parameter yang biasa digunakan untuk mengidentifikasi besar kecilnya dampak dari gempa bumi. Sehingga sangat membantu dalam proses perencanaan bangunan tahan gempa (Brotospito, 2012). Nilai PGA dapat diketahui dengan 2 cara yaitu melalui rekaman alat *accelerograph* dan melalui pendekatan empiris. Pengukuran percepatan tanah secara langsung menggunakan alat *accelerograph* sering mengalami keterbatasan dari segi ketersediaan alat dan cakupan wilayah sehingga diperlukan metode pendekatan empiris untuk menutupi kekurangan tersebut (Kapojos, et al., 2015). Metode

an empiris untuk mengetahui percepatan tanah dapat dilakukan dengan rumus yang telah diturunkan dari nilai magnitudo maupun intensitas



gempabumi. Metode pendekatan empiris tidak selalu benar, dari beberapa kasus hasil metode pendekatan empiris satu dengan yang lainnya berbeda. Akan tetapi hasil dari metode pendekatan empiris dapat memberikan gambaran mengenai percepatan tanah maksimum suatu daerah.

Nilai PGA dapat disajikan dalam bentuk peta percepatan tanah maksimum, nilai percepatan tanah maksimum dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Fauzi, 2005):

Tabel 2.1. Hubungan percepatan tanah maksimum dengan intensitas gempabumi (MMI) (BMKG, 2022)

Skala SIG BMKG	Warna	Detesis Sederhana	Detesis Rinci	Skala MMI	PGA (gal)
I	Putih	TIDAK DIRASAKAN (<i>Not Felt</i>)	Tidak dirasakan atau dirasakan hanya oleh beberapa orang tetapi terekam oleh alat.	I-II	< 2,9
II	Hijau	DIRASAKAN (<i>Felt</i>)	Dirasakan oleh orang banyak tetapi tidak menimbulkan kerusakan. Benda-benda ringan yang digantung bergoyang dan jendela kaca bergetar.	III-V	2,9-88
III	Kuning	KERUSAKAN RINGAN (<i>Slight Damage</i>)	Bagian non struktur bangunan mengalami kerusakan ringan, seperti retak rambut pada dinding, genteng bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan.	VI	89-167



IV	Jingga	KERUSAKAN SEDANG (<i>Moderate Damage</i>)	Banyak retakan terjadi pada dinding bangunan sederhana, sebagian roboh, kaca pecah. Sebagian plester dinding lepas. Hampir sebagian besar genteng bergeser ke bawah atau jatuh. Struktur bangunan mengalami kerusakan ringan sampai sedang.	VII-VIII	168-564
V	Merah	KERUSAKAN BERAT (<i>Heavy Damage</i>)	Sebagian besar dinding bangunan permanen roboh. Struktur bangunan mengalami kerusakan berat. Rel kereta api melengkung.	IX-XII	> 564

Melalui rekaman *accelerograph* atau memodifikasi rumus pendekatan empiris yang pernah dilakukan dari orang lain, rumus empiris baru yang cocok untuk suatu daerah dapat ditemukan. Ada beberapa rumus empiris yang telah dikemukakan oleh beberapa ahli, diantaranya Idriss (2008) dan Boore and Atkinson (2008).

Berikut rumus empiris Idriss (2008) dan Boore and Atkinson (2008) (Douglas, 2021):

1. Idriss (2008)

Idriss (2008) menggunakan katalog gempabumi berjenis *shallow crustal* dalam memperkirakan *spectral acceleration* (SA). Model yang dipilih sederhana dan parameter modelnya juga diperkirakan menggunakan rekaman yang dikumpulkan dari proyek generasi baru atenuasi (NGA). model ini disajikan untuk situs tanah

$V_{s30} > 900 \text{ m/s}$ dan $450 \text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 900 \text{ m/s}$. Berikut persamaan GMPE

(08):



$$\begin{aligned} \ln a = & \alpha_1(T) + \alpha_2(T)M - [\beta_1(T) + \beta_2(T)M] \ln(R_{rup} + 10) \\ & + \gamma(T)R_{rup} + \varphi(T)F \end{aligned} \quad (2.3)$$

Keterangan (Idriss & Eeri, 2008):

a = Percepatan tanah (gal)

M = Magnitudo momen

R_{rup} = Jarak *rupture* ke permukaan (Km)

F = Mekanisme sumber gempa

α , β , γ , φ adalah konstanta dengan nilai sebagai berikut:

Tabel 2.2. Konstanta GMPE Idriss (2008)

M	α_1	α_2	β_1	β_2	γ	φ
$M \leq 6.75$	3.7066	-0.1252	2.9832	-0.2339	0.00047	0.12
$M \geq 6.75$	5.6315	-0.4104	2.9832	-0.2339	0.00047	0.12

2. Boore and Atkinson (2008)

Persamaan GMPE Boore and Atkinson (2008) memprediksi pergerakan tanah dari rata-rata PGA komponen horizontal sebagai fungsi magnitudo gempa, jarak dari sumber ke lokasi, kecepatan rata-rata gelombang geser dan tipe patahan. Parameternya diperoleh melalui regresi dari rekaman database proyek PEER NGA (*Pacific Earthquake Engineering Research Center's Next Generation Attenuation*) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\ln a = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon\sigma_T \quad (2.4)$$

Keterangan (Boore, et al., 2008):

a = Percepatan tanah (gal)



M = Magnitudo momen

R_{JB} = Jarak horizontal terdekat ke permukaan proyeksi bidang patahan (Km)

Dalam persamaan ini, FM, FD, dan FS mewakili skala magnitudo, fungsi jarak, dan amplifikasi situs tanah, (lihat lampiran **A** dan **B**) untuk perhitungan lebih detail Boore and Atkinson (2008) dan nilai Vs30 wilayah Sulawesi.

II.5. Seismic Hazard Function (SHF)

SHF dibangun dengan cross-plot probabilitas pelampauan (PE) dan percepatan tanah puncak (PGA) dari magnitudo referensi tertentu (M_{ref}) serta jarak antara sumber dan tempat pengamatan (Triyoso, 2023). Formulasi PE dari tingkat gempa tahunan yang magnitudonya lebih besar atau sama dengan M_{ref} , yang merupakan parameter yang dipakai dalam estimasi percepatan tanah maksimum diwakili dengan a , dihitung dengan menggunakan GMPE pada suatu titik pengamatan. Karena sumber gempa pada grid k dapat dituliskan sebagai (Triyoso, 2023):

$$P(a \geq a_0) = P_k(m \geq m(a_0, R_k)) = 1 - e^{(-V_k(\geq m(a_0, R_k)))} \quad (2.5)$$

Dimana $P_k(m \geq m(a_0, R_k))$ adalah PE tahunan gempa bumi di grid atau sel ke- k , $m(a_0, R_k)$ adalah magnitudo di grid sumber ke- i yang akan menghasilkan estimasi PGA sebesar a_0 atau lebih besar di lokasi, $V_k = v \frac{\exp[-\beta(m-m_0)] - \exp[-\beta(m_{max}-m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{max}-m_0)]}$ (*annual rate*) dan R_k adalah jarak antara lokasi dan sumber. Fungsi $m(a_0, R_k)$ adalah relasi GMPE. Dengan mengikutkan persamaan PE PGA didapatkan:

$$P(a \geq a_0) = 1 - \Pi P_k(m \geq m(a_0, R_k)) \quad (2.6)$$



Jadi, dengan mensubstitusi GMPE pada Persamaan. 2.6, kita dapat menghitung PE tahunan PGA tertentu sebagai berikut:

$$P(a \geq a_0) = 1 - \prod e^{(-V_k(\geq m(a_0, R_k)))} = 1 - e^{(-\sum V_k(\geq m(a_0, R_k)))} \quad (2.7)$$

Untuk waktu pengamatan tertentu T, PE bisa dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$P(a \geq a_0) = 1 - \prod e^{(-TV_k(\geq m(a_0, R_k)))} = 1 - e^{(-\sum TV_k(\geq m(a_0, R_k)))} \quad (2.8)$$

Berikut adalah contoh estimasi SHF di wilayah Padang dan Bengkulu menggunakan metode pembagian wilayah dalam bentuk grid:

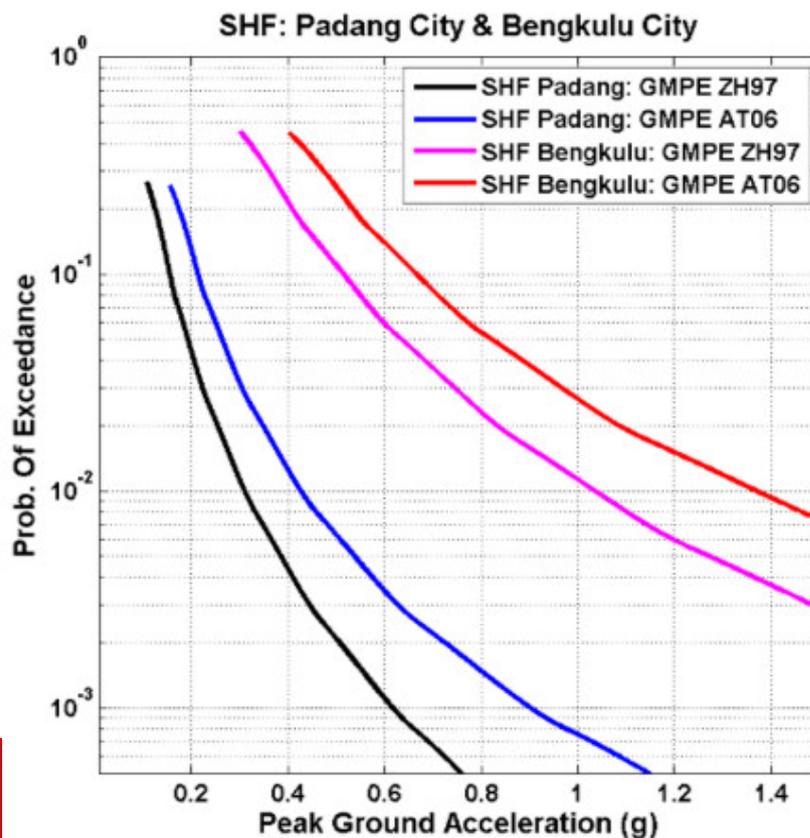


Fig. II.4 Contoh Estimasi SHF di wilayah Padang dan Bengkulu (Triyoso, et al., 2020)

