

**IDENTIFIKASI RISIKO GEMPA MERUSAK DI BALI DENGAN
MENGUNAKAN FUNGSI ATENUASI ZHAO DAN MODIFIKASI ZHAO**

SKRIPSI

Oleh:

MARETA HELMALIA PUTRI
NIM. 210604110003



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

HALAMAN JUDUL

**IDENTIFIKASI RISIKO GEMPA MERUSAK DI BALI DENGAN
MENGUNAKAN FUNGSI ATENUASI ZHAO DAN MODIFIKASI ZHAO**

SKRIPSI

**Diajukan kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Oleh:
MARETA HELMALIA PUTRI
NIM. 210604110003**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

HALAMAN PERSETUJUAN

IDENTIFIKASI RISIKO GEMPA MERUSAK DI BALI DENGAN
MENGUNAKAN FUNGSI ATENUASI ZHAO DAN MODIFIKASI ZHAO

SKRIPSI

Oleh:
Mareta Helmalia Putri
NIM. 210604110003

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada tanggal, 18 Juni 2025

Pembimbing I



Ahmad Luthfin, M.Si
NIP. 19860504 201903 1 009

Pembimbing II



Ahmad Abtokhi, M.Pd
NIP. 19761003 200312 1 004

Mengetahui,
Kepala Program Studi



Ham Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002

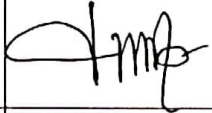
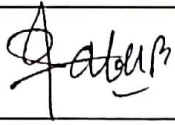
HALAMAN PENGESAHAN

IDENTIFIKASI RISIKO GEMPA MERUSAK DI BALI DENGAN MENGUNAKAN FUNGSI ATENUASI ZHAO DAN MODIFIKASI ZHAO

SKRIPSI

Oleh:
Mareta Helmalia Putri
NIM. 210604110003

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada Tanggal, 24 Juni 2025

Penguji Utama :	<u>Irian, M.Si.</u> NIP. 19691231 200604 1 003	
Ketua Penguji :	<u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji :	<u>Ahmad Lutfin, M.Si.</u> NIP. 19860504 201903 1 009	
Anggota Penguji :	<u>Ahmad Abtokhi, M.Pd</u> NIP. 19761003 200312 1 004	

Mengesahkan,
Dewan Program Studi



Abdullah Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : MARETA HELMALIA PUTRI

NIM : 210604110003

Jurusan : FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : Identifikasi Risiko Gempa Merusak Di Bali Dengan
Menggunakan Fungsi Atenuasi Zhao Dan Modifikasi Zhao

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 25 Juni 2025
Yang Membuat Pernyataan



Mareta Helmalia Putri
NIM. 210604110003

MOTTO

“Tuhan menaruhmu ditempat sekarang bukan karena kebetulan. Orang hebat tidak dihasilkan melalui kemudahan, kesenangan dan kenyamanan. Mereka dibentuk melalui kesukaran, tantangan dan air mata”. ~Dahlan Iskan

“Tidak akan ada yang dapat meruntuhkan wanita, jika ia menemukan keindahan dalam setiap dirinya”

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini kupersembahkan untuk:

- Ibunda Anisa'ul Inayah yang tidak pernah berhenti mengusahakan apapun, selalu menjadi alasan dibalik kuatnya penulis bertahan sampai titik ini, yang mengusap air mata penulis dan menjadi sandaran saat dunia hampir runtuh, bukan penulis yang kuat tapi doa ibunya yang hebat.
- Ayahanda Gatot Mulyadi yang menjadikan penulis seberani ini, selalu bertahan dan kuat di keadaan apapun, perempuan mungkin punya sisi lemah tapi tidak untuk putri didikan ayah.
- Kakak Heri Arif, Sonia Rizki dan kedua keponakan kecilku yang selalu mendukung, menghibur dan menyemangati setiap langkah penulis.
- Keluarga besar di rumah, Pakde Budi, Ayah Joko yang percaya akan kemampuan penulis, mendoakan, memotivasi dan mendukung penulis dalam meraih cita-citanya.
- Keluarga Bani Salim, Akung, Uti, Tante, Paman dan para sepupu yang mensupport dan memberikan semangat penulis.
- Untuk aku yang dulu takut melangkah, kini telah membuktikan bahwa tekad bisa mengalahkan rasa ragu, yang telah melewati malam-malam penuh bimbang dan perjuangan melelahkan. Terima kasih telah kuat untuk berjalan, bertahan, berjuang, dan tidak menyerah meski berkali-kali ingin berhenti.
- Almamaterku, Prodi Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'aalamiin, segala puji syukur penulis haturkan kepada Allah Swt. atas segala rahmat dan karunia-Nya serta nikmat berupa kekuatan, kesehatan, ketekunan, kesabaran dan kemudahan. Dan selalu memudahkan segala kesulitan, memberikan kelancaran dan menjadi tempat berteduh di setiap badai dan rintangan. Sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul "Identifikasi Risiko Gempa Merusak di Bali dengan Menggunakan Fungsi Atenuasi Zhao dan Modifikasi Zhao".

Sholawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Rasulullah Saw. Mudah-mudahan dengan limpahan berkahnya kita semua mendapatkan syafaatnya di Yaumiljaza nanti. Aamiin.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan serta bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penyusunan laporan ini dapat diselesaikan dengan baik. Ucapan terima kasih ini penulis tujukan kepada:

1. Prof. Dr. H. M. Zainuddin, MA selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Imam Tazi, M.Si selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Ahmad Luthfin, M.Si selaku Pembimbing pertama yang telah sabar membimbing, memberikan arahan, serta dukungan moril dan akademik selama

proses penyusunan skripsi ini. Kesabaran dan kebaikan Bapak yang membimbing dalam setiap kesulitan yang dihadapi sangat berarti bagi Penulis. Semoga segala ilmu, waktu, dan perhatian yang telah diberikan menjadi amal jariyah dan mendapatkan balasan terbaik dari Allah Swt.

5. Ahmad Abtokhi, selaku Pembimbing integrasi yang telah memberikan ilmunya, membimbing dan mengarahkan penulis.
6. Bapak Irjan, M.Si dan Bu Erika Rani, M.Si selaku Penguji yang senantiasa memberikan saran untuk penelitian ini sehingga penulis jauh lebih berkembang dalam segi keilmuan, berwawasan luas dan berpemikiran kritis.
7. Ibunda Anisa'ul Inayah, Ayahanda Gatot Mulyadi, Kakak serta keluarga besar yang tiada henti melangitkan do'a kepada penulis. Mendengarkan setiap keluh kesah tanpa menuntut apapun dari penulis, menjadi rumah ternyaman untuk pulang saat badai menghantam, dan mensupport dalam segi apapun. Semoga hal-hal baik terus berdatangan hingga tak henti mengucap rasa syukur, serta segala harapan yang disebut dalam diam segera terwujud.
8. Sahabat yang kuanggap seperti saudara yaitu Aprilina Eka Sari, Agustina Dwi Pratiwi, dan Yunita Nur Aini. Terima kasih sudah kebersamaan 4 tahun yang berkesan ini, kalian tempat penulis pulang saat jauh dari keluarga, motivator segala masalah, dan yang mengulurkan tangan saat penulis jatuh. Semoga tali silaturahmi ini tidak pernah putus, dan dipertemukan kembali dalam kabar bahagia yang sudah menanti kita.
9. Teman - teman di Program Studi Fisika'21 yang telah membantu selama proses perkuliahan, penelitian dan menjadi rumah kedua untuk penulis. Khususnya teman-teman peminatan Geofisika yang selalu memberikan dukungan dan

berbagi ilmu selama proses pengerjaan skripsi ini. Semoga Tuhan memberikan kemudahan dalam setiap langkah kecil kita pada kehidupan mendatang dan keberkahan ilmu yang kita arungi membawa kita menuju jalan kesuksesan.

10. Teman – teman organisasi baik himpunan, senat mahasiswa, unit olahraga, kepanitiaan tingkat prodi, fakultas maupun universitas yang pernah bekerja sama untuk satu tujuan yang sama, terima kasih untuk segala pengalaman berharga yang mungkin tidak pernah penulis dapatkan di dunia luar sana. Setiap dari kalian mengajarkan hal baru yang melahirkan pola pikir kritis, aksi yang nyata sehingga membentuk pemikiran penulis yang jauh lebih maju dari sebelumnya.
11. Segenap Dosen, Laboran dan Admin Program Studi Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang yang membantu selama kegiatan belajar penulis.
12. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung penulis dalam penulisan skripsi ini.

Penulis juga menyadari bahwa perjalanan dalam menyusun skripsi ini tidaklah mudah dan penuh tantangan. Namun, dengan adanya semangat, doa, serta dukungan dari berbagai pihak, proses ini dapat dilalui dengan baik.. Semoga skripsi ini tidak hanya menjadi syarat akademik semata, tetapi juga dapat memberikan manfaat nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya. Semoga Allah Swt. senantiasa meridhoi setiap ikhtiar dan usaha kita dalam menuntut ilmu. Aamiin Ya Rabbal ‘Alamiin.

Malang, 25 Juni 2025

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
مستخلص البحث.....	xviii
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan.....	6
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	7
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 8
2.1 Gempa Bumi	8
2.2 Mekanisme Gempa Bumi Tektonik	11
2.3 Klasifikasi Gempa Bumi	12
2.4 Gelombang Seismik	20
2.4.1 Gelombang Badan (<i>Body Wave</i>)	20
2.4.2 Gelombang Permukaan (<i>Surface Wave</i>).....	22
2.5 Fungsi Atenuasi.....	23
2.5.1 Zhao et al (2006)	23
2.5.2 Modifikasi Zhao	25
2.6 Kecepatan Gelombang Geser (<i>Vs30</i>)	27
2.7 Percepatan Tanah Maksimum	27
2.8 Intensitas Gempa Bumi	29
2.9 Tingkat Risiko Bencana Gempa Bumi.....	33
2.10 Tinjauan Geologi Daerah Bali.....	34
 BAB III METODE PENELITIAN	 38
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	38
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	38
3.3 Jenis Data	39
3.4 Prosedur Penelitian.....	39
3.4.1 Metode Pengambilan Data	39
3.4.2 Menentukan Rumus Atenuasi Modifikasi Zhao	40

3.4.3 Perhitungan <i>Peak Ground Acceleration</i> (PGA)	40
3.4.4 Pemetaan Berdasarkan Nilai <i>Peak Ground Acceleration</i> PGA dan Peta Risiko Bencana	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Analisis Tahapan Pengolahan Data	45
4.2 Analisis Data dan Pembahasan	53
4.2.1 Analisis Hasil Modifikasi	54
4.2.2 Analisis Peta Percepatan Tanah Maksimum	57
4.2.3 Analisis Peta Risiko Bencana Gempa Bumi	62
BAB V PENUTUP	72
5.1 Kesimpulan.....	72
5.2 Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA	74
LAMPIRAN	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tektonik Aktif Indonesia: Pergerakan kerak bumi dari studi GPS (Bock <i>et al</i> , 2003).	9
Gambar 2.2 Tumbukan Kedua Lempeng dan Sumber Gempa (Nur, 2022).....	11
Gambar 2.3 Kedalaman dan Episenter (Agustina, 2016).	17
Gambar 2.4 Ilustrasi Gerak Gelombang Primer (Hidayat, 2020).....	21
Gambar 2.5 Ilustrasi Gerak Gelombang Sekunder (Hidayat, 2020).....	22
Gambar 2.6 Ilustrasi Gerak Gelombang Reyleigh (Hidayati, 2010).	22
Gambar 2.7 Ilustrasi Gerak Gelombang Love (Hidayati, 2010).	23
Gambar 2.8 Peta Geologi Regional Pulau Bali (Helmi dkk, 2021).....	35
Gambar 2.9 Sesar di Pulau Bali dan Sekitarnya (ESDM, 2025).	36
Gambar 3.1 Peta Daerah Penelitian Pulau Bali.	38
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian.....	43
Gambar 4.1 Titik Gempa Bumi Wilayah Penelitian.....	46
Gambar 4.2 Grid atau Titik Pengukuran Wilayah Bali dengan Ukuran $0,0527^{\circ} \times 0,0527^{\circ}$ atau $5,8482 \text{ km}^2 \times 5,8482 \text{ km}^2$	48
Gambar 4.3 Grid atau Titik Pengukuran Wilayah Bali di Darat.	48
Gambar 4.4 Hasil Modifikasi pada Command Window Matlab R2024a.	54
Gambar 4.5 Perbandingan Koefisien Zhao et al (2006) dan Modifikasi.....	55
Gambar 4.6 Peta Pergerakan Tanah Maksimum Metode Zhao <i>et al</i> (2006).	58
Gambar 4.7 Peta Pergerakan Tanah Maksimum Modifikasi Zhao et al (2006)..	60
Gambar 4.8 Peta Risiko Gempa Bumi Metode Zhao <i>et al</i> (2006).	63
Gambar 4.9 Peta Risiko Gempa Bumi Modifikasi Zhao <i>et al</i> (2006).....	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konversi nilai PGA ke Intensitas (Rahman dkk, 2015).	30
Tabel 2.2 Skala MMI (Allan,1982).	30
Tabel 2.3 Skoring Komponen Penyusun Risiko Gempabumi (BNPB, 2018).....	34
Tabel 4.1 Perbedaan Koefisien Zhao et al (2006) dan Hasil Modifikasi.	55
Tabel 4.2 Klasifikasi Getaran Tanah Maksimum Wilayah Bali dengan Metode Zhao et al (2006).....	59
Tabel 4.3 Klasifikasi Getaran Tanah Maksimum Wilayah Bali dengan Metode Modifikasi Zhao et al (2006).	61
Tabel 4.4 Tabel Kelas Indikator Bahaya Gempabumi (Oktariadi, 2009 dengan modifikasi Hidayat 2014).	65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Gempa Bumi Tahun 2011-2024.....	81
Lampiran 2 Hasil Nilai Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA) Metode Zhao <i>et al</i> (2006).....	83
Lampiran 3 Hasil Nilai Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA) Metode Modifikasi Zhao <i>et al</i> (2006)	87
Lampiran 4 Hasil Skoring Peta Resiko Bencana Metode Zhao <i>et al</i> (2006)	91
Lampiran 5 Hasil Skoring Peta Resiko Bencana Metode Modifikasi Zhao <i>et al</i> (2006).....	92

ABSTRAK

Putri, Mareta Helmalia. 2025. **Identifikasi Risiko Gempa Merusak Di Bali Dengan Menggunakan Fungsi Atenuasi Zhao Dan Modifikasi Zhao**. Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing : (I) Ahmad Lutfin, M.Si. (II) Ahmad Abthoki, M.Pd

Kata Kunci: Gempa bumi, Percepatan Tanah Maksimum, Bali, Zhao

Potensi gempa bumi yang tinggi akibat keberadaan zona subduksi Lempeng Indo-Australia di selatan, back arc thrust di sebelah utara, serta terdapat sesar aktif di daratan Pulau Bali sangat penting untuk dikaji. Mengingat peran strategis Bali sebagai pusat pariwisata nasional, dengan kunjungan wisatawan mancanegara mencapai 4,7 juta orang pada Januari–November 2024. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai percepatan tanah maksimum (PGA) dan intensitas gempa di Pulau Bali menggunakan dua metode yaitu fungsi atenuasi Zhao *et al.* (2006) dan modifikasi Zhao, serta memetakan tingkat risiko bahaya gempabumi. Data yang digunakan berasal dari katalog gempa USGS tahun 2011–2024 dengan magnitudo ≥ 4 SR dan kedalaman 0–60 km. Hasil menunjukkan bahwa nilai PGA tertinggi dengan metode Zhao mencapai 81,10 gal, sedangkan dengan modifikasi Zhao sebesar 80,38 gal, keduanya berkisar dalam intensitas II–V MMI. Daerah dengan risiko tinggi berada di wilayah selatan Bali seperti Badung, Gianyar, dan Denpasar; risiko sedang di Klungkung; dan risiko rendah di utara Bali seperti Buleleng, Tabanan, Jembrana, Karangasem, dan Bangli. Hasil ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam perencanaan mitigasi bencana, seperti perkuatan struktur bangunan dan penyusunan rencana evakuasi oleh pemerintah dan masyarakat.

ABSTRACT

Putri, Mareta Helmalia. 2025. **Identification of Damaging Earthquake Risk in Bali Using Zhao Attenuation Function and Modified Zhao**. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University of Malang. Advisors: (I) Ahmad Lutfin, M.Si. (II) Ahmad Abthoki, M.Pd.

Keywords: Earthquake, Peak Ground Acceleration, Bali, Zhao

The high earthquake potential due to the presence of the Indo-Australian Plate subduction zone in the south, back-arc thrust in the north, and active faults on the island of Bali is essential to study. This is particularly important given Bali's strategic role as a national tourism center, with international tourist arrivals reaching 4.7 million from January to November 2024. This research aims to determine the Peak Ground Acceleration (PGA) values and earthquake intensity in Bali using two methods: the Zhao *et al.* (2006) attenuation function and its modified version, and to map the earthquake hazard risk levels. The data used were obtained from the USGS earthquake catalog from 2011 to 2024 with a magnitude of ≥ 4.0 and a depth of 0–60 km. The results show that the highest PGA value using the Zhao method is 81.10 gal, while the modified Zhao yields a maximum of 80.38 gal, both falling within the II–V MMI intensity scale. High-risk areas are found in southern Bali, including Badung, Gianyar, and Denpasar; moderate risk is observed in Klungkung; and low-risk areas are located in northern Bali, including Buleleng, Tabanan, Jembrana, Karangasem, and Bangli. These findings are expected to serve as a basis for disaster mitigation planning, such as strengthening building structures and preparing evacuation plans by both the government and the community.

مستخلص البحث

فوتري، ماريتا هيلماليا. 2025. تحديد مخاطر الزلازل المدمرة في بالي باستخدام دالة التخفيف **Zhao** وتعديل Zhao. بحث جامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف: (1) أحمد لطفين، الماجستير. (2) أحمد ابطاكي، الماجستير.

الكلمة الرئيسية: الزلازل، الحد الأقصى لتسارع الأرض، بالي، Zhao

إن إمكانية حدوث زلازل عالية بسبب وجود منطقة الانغماس للوحة الإندونيسية الأسترالية في الجنوب، ودفع القوس الخلفي في الشمال، فضلاً عن وجود صدع نشط على اليابسة في جزيرة بالي، أمرٌ مهمٌ جداً للدراسة. نظراً للدور الاستراتيجي لبالي كمركز سياحي وطني، حيث وصل عدد الزوار الدوليين إلى 4,7 مليون شخص في يناير - نوفمبر 2024. تهدف هذه الدراسة إلى معرفة قيمة تسارع الأرض الأقصى (PGA) وشدة الزلازل في جزيرة بالي باستخدام طريقتين، وهما دالة التخفيف لـ Zhao *et al.* (2006) وتعديل Zhao، وكذلك تحديد مستوى خطر الزلازل. البيانات المستخدمة مصدرها من كتالوج الزلازل USGS من عام 2011 إلى 2024 مع $SR \leq 4$ درجات ريختر وعمق 0-60 km. تظهر النتائج أن أعلى قيمة لـ PGA بواسطة طريقة زهاو وصلت إلى 81.10 gal، بينما تعديلات زهاو بلغت 80.38 gal، وكلاهما تقع ضمن شدة II-V وفقاً لمقياس شدة الزلازل. المناطق المعرضة لمخاطر عالية توجد في جنوب بالي، مثل بادونغ، جيانبار، وديباسار؛ المخاطر متوسطة في كلونكونغ؛ والمخاطر منخفضة في شمال بالي، مثل بوليلينغ، تابانان، جيمبرانا، كارنجاسيم، وبانغلي. ومن المتوقع أن تكون هذه النتائج أساساً في التخطيط للحد من الكوارث، مثل تعزيز بناء الهياكل ووضع خطط للإخلاء من قبل الحكومة والمجتمع.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagian wilayah Indonesia sering dilanda gempa bumi akibat aktivitas pergerakan lempeng tektonik. Hal ini terjadi karena Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik, yang masing-masing bergerak dengan kecepatan 0-15 cm per tahun (BMKG, 2024). Kondisi ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu wilayah dengan aktivitas tektonik tinggi dan tingkat kegempaan yang signifikan. Secara umum, lokasi-lokasi aktif secara tektonik di Indonesia dapat ditemukan di sepanjang perbatasan lempeng tektonik. Ketika lempeng-lempeng ini bertabrakan, bergeser, atau saling menjauh, tekanan yang terakumulasi dapat menyebabkan retakan di dalam kerak bumi, menghasilkan getaran yang kita rasakan sebagai gempa bumi (Sari, 2012).

Dalam Al-Qur'an telah dijelaskan oleh Allah Swt., fenomena gempa bumi ini yaitu dalam Q.S Az-Zalzalah (99) : 1,

إِذَا زُلْزِلَتِ الْأَرْضُ زِلْزَالَهَا ①

Artinya: "Apabila bumi diguncangkan dengan guncangan yang dahsyat" (Q.S Az-Zalzalah (99): 1.

Kata (إِذَا) *idza* dalam Al-Qur'an digunakan untuk menyatakan sesuatu yang pasti terjadi, berbeda dengan kata (إِنْ) *in* yang biasanya menunjukkan sesuatu yang belum atau jarang terjadi, serta berbeda pula dengan (لَوْ) *lau* yang digunakan untuk mengandaikan sesuatu yang tidak mungkin terjadi. Oleh karena itu, ayat di atas menegaskan kepastian akan terjadinya goncangan bumi sebagaimana dijelaskan

dalam ayat tersebut. Kata (الارض) *al-ardh* mengandung makna bahwa guncangan dan pengosongan bumi mencakup seluruh wilayah tanpa pengecualian. Hal ini berbeda dengan gempa bumi yang biasa terjadi, yang hanya terbatas pada wilayah tertentu (Shihab, 2002). Guncangan yang dimaksud merujuk pada pergerakan lapisan bumi, yaitu lempeng tektonik, yang memicu gempa bumi. Jika terjadi pergerakan besar pada lempeng-lempeng tersebut, gaya gempa yang dihasilkan dapat merusak bangunan-bangunan di permukaan bumi.

Dalam ayat tersebut, Allah Swt. menggambarkan bahwa bumi akan bergetar dan berguncang dengan sangat hebat, menunjukkan betapa luar biasanya peristiwa yang akan terjadi. Kejadian ini bukan hanya sekadar fenomena alam, tetapi juga merupakan peringatan bagi umat manusia, terutama bagi mereka yang kafir, agar mau berpikir dan merenungkan kebenaran. Seolah-olah ada pesan yang disampaikan kepada mereka bahwa jika bumi yang kokoh dapat berguncang sedemikian rupa, maka seharusnya mereka juga dapat menyadari kelalaian mereka dan segera meninggalkan kekafiran mereka (Lajnah, 2011).

Seperti yang telah dijelaskan dalam Al-Qur'an, gempa bumi besar memang pasti akan terjadi, dan beberapa telah tercatat di wilayah Indonesia. Diantaranya pada tahun 2011 hingga 2024, pulau Bali mengalami beberapa gempa bumi yang mengakibatkan kerusakan signifikan. Pada 13 Oktober 2011, gempa berkekuatan 6,8 Skala Richter mengguncang Bali, menyebabkan kepanikan di kalangan warga dan kerusakan pada sejumlah bangunan di Denpasar. Lokasi pusat gempa berada di wilayah Nusa Dua. Dengan gempa utama terjadi pada pukul 11.16 WITA dan berlangsung sekitar 1 menit, diikuti beberapa gempa susulan dengan kekuatan yang lebih kecil. (Artanti dkk, 2011). Pada 18 Oktober 2021, gempa dengan magnitudo

4,8 melanda wilayah Karangasem dan Bangli, mengakibatkan 1.131 bangunan mengalami kerusakan, tiga warga meninggal dunia, sembilan luka berat dan 74 luka ringan (BPBD, 2021). Dan data terbaru yaitu pada September 2024 dengan magnitudo 4,8 dan 4,9 yang menyebabkan kerusakan di Kabupaten Gianyar. Lokasi pusat gempa bumi terletak di darat pada kedalaman 22 km (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2024). Data ini menunjukkan bahwa Bali rentan terhadap gempa bumi yang dapat menyebabkan kerusakan material dan korban jiwa, sehingga penting bagi masyarakat dan pemerintah setempat untuk terus meningkatkan kesiapsiagaan dan mitigasi bencana.

Salah satu penyebab utama dari gempa bumi yang terjadi ini adalah pergerakan Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara dan menunjam ke bawah Lempeng Eurasia. Selain itu, di utara pulau Bali juga terdapat patahan yaitu Sesar Naik Busur Belakang (*Flores Back Arc Thrust*) yang berpotensi menimbulkan gempa bumi. Sesar ini merupakan patahan naik aktif yang membentang di sepanjang pesisir utara Kepulauan Sunda Kecil, mencakup Flores, Sumbawa, Lombok, dan Bali (Hamilton, 1979). Keberadaan *back arc thrust* di sebelah utara dan zona subduksi Lempeng Indo-Australia ke Lempeng Eurasia di selatan Pulau Bali turut meningkatkan potensi terjadinya gempa merusak khususnya di wilayah Bali (Helmi dkk, 2021).

Gempa bumi menghasilkan percepatan tanah di lokasi tertentu, yang dikenal sebagai PGA (*Peak Ground Acceleration*) atau nilai percepatan maksimum tanah. Mengetahui nilai PGA sangat penting untuk memperkirakan kekuatan guncangan tanah serta dampak yang mungkin dirasakan akibat gempa. Dengan menggunakan rumus redaman, intensitas pergerakan tanah di suatu lokasi dapat diprediksi

berdasarkan jaraknya dari sumber gempa. Fungsi atenuasi merupakan model matematis yang menjelaskan penurunan amplitudo gelombang seismik seiring bertambahnya jarak dari sumber gempa. Penurunan amplitudo ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis batuan yang dilalui gelombang seismik, kedalaman hiposenter, dan frekuensi gelombang gempa (Boore, 2003).

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model peta kerentanan gempa bumi di wilayah Bali berdasarkan analisis fungsi atenuasi untuk menentukan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA). Fungsi atenuasi yang dipakai adalah menggunakan metode Zhao *et al* (2006) dan modifikasi Zhao. Rumus dan konstanta umum yang digunakan Zhao *et al* (2006) untuk daerah subduksi akan diterapkan dengan membandingkan dengan rumus yang sudah dimodifikasi berdasarkan daerah penelitian.

Fungsi atenuasi Zhao *et al* (2006) memiliki keterbatasan jika diterapkan tanpa modifikasi di wilayah Bali. Perbedaan karakteristik tanah dan batuan, serta struktur tektonik di Bali dibandingkan dengan wilayah Asia Timur, dapat mengurangi akurasi prediksi gempa yang dilakukan dengan fungsi Zhao *et al* (2006). Untuk itu, diperlukan modifikasi tertentu agar model ini dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan relevan. Modifikasi ini bertujuan untuk menyesuaikan fungsi Zhao dengan kondisi lokal Bali. Seperti memperhitungkan faktor-faktor lokal seperti kondisi geologis, struktur batuan, dan distribusi sesar aktif di sekitar Bali. Dengan adanya penyesuaian ini, hasil prediksi risiko gempa menjadi lebih representatif dan relevan untuk perencanaan mitigasi di Bali. Selanjutnya akan diperoleh nilai PGA dari kedua metode tersebut. Dari nilai PGA ini dapat dibuat peta PGA suatu wilayah

yang menggambarkan peta risiko tingkat kerusakan akibat gempa bumi di wilayah ini.

Bencana alam ini tidak dapat diprediksi, oleh karena itu harus terus diwaspadai melalui upaya mitigasi bencana. Mitigasi bencana dapat dilakukan melalui pemetaan wilayah pembangunan, peningkatan kapasitas dan kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapinya (Basid dkk, 2021). Identifikasi risiko gempa yang akurat akan membantu pemerintah dan masyarakat Bali dalam menyiapkan langkah-langkah mitigasi yang efektif. Hal ini sangat penting, terutama mengingat peran vital Bali sebagai pusat pariwisata. Menurut Badan Pusat Statistik data kunjungan pariwisata dari turis mancanegara per tahun Januari - November 2024 mencapai 4,7 juta. Jumlah kunjungan yang besar ini menunjukkan tingginya aktivitas ekonomi yang bergantung pada kelancaran operasional sektor pariwisata, yang dapat terganggu secara signifikan oleh bencana gempa. Identifikasi risiko gempa tidak hanya bermanfaat untuk menyusun rencana evakuasi yang lebih baik, tetapi juga untuk memastikan infrastruktur wisata seperti hotel, bandara, dan tempat-tempat rekreasi mampu bertahan dalam situasi darurat.

Melalui studi ini, diharapkan dapat dihasilkan model prediksi yang lebih akurat untuk intensitas gempa di Bali. Hal ini juga membuka peluang bagi studi lebih lanjut mengenai atenuasi gempa di Indonesia. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu mitigasi bencana, khususnya dalam menghadapi risiko gempa. Dengan demikian, penelitian ini menjadi langkah penting dalam mendukung upaya mitigasi gempa yang lebih baik dan terstruktur di Bali.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa di pulau Bali menggunakan fungsi atenuasi Zhao dan modifikasi Zhao?
2. Bagaimana pemetaan nilai percepatan tanah maksimum dan tingkat resiko bahaya gempa bumi di pulau Bali?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah:

1. Mengetahui nilai percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa di pulau Bali dengan dua metode berbeda yaitu fungsi atenuasi Zhao dan modifikasi Zhao.
2. Untuk mengetahui pola pemetaan nilai percepatan tanah maksimum dan tingkat resiko bahaya gempa bumi di pulau Bali.

1.4 Batasan Masalah

Untuk batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Wilayah yang digunakan dalam penelitian adalah pulau Bali dengan kordinat $8.00^{\circ}\text{LS} - 9.50^{\circ}\text{LS}$ dan $114.43^{\circ}\text{BT} - 115.73^{\circ}\text{BT}$.
2. Metode yang digunakan adalah Zhao *et al* (2006) dan modifikasi Zhao.
3. Data gempa diperoleh dari katalog gempa USGS dengan rentang tahun 2011-2024.
4. Magnitudo yang digunakan adalah $(M) \geq 4$ SR dengan kedalaman 0-60 km.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang dilakukan diharapkan diperoleh manfaat sebagai berikut:

1. Diperolehnya hasil modifikasi yang memperhitungkan struktur geologi dan parameter kegempaan di pulau Bali.
2. Penelitian ini dapat meningkatkan kesadaran masyarakat akan risiko gempa bumi di wilayah mereka. Dengan memahami tingkat kerentanan wilayah tempat tinggal mereka, masyarakat dapat lebih siap menghadapi potensi bencana.
3. Dengan mengetahui daerah-daerah yang paling rentan, masyarakat dapat mengambil tindakan preventif untuk mengurangi potensi kerugian akibat gempa bumi, seperti menyusun rencana evakuasi dan memperkuat struktur bangunan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

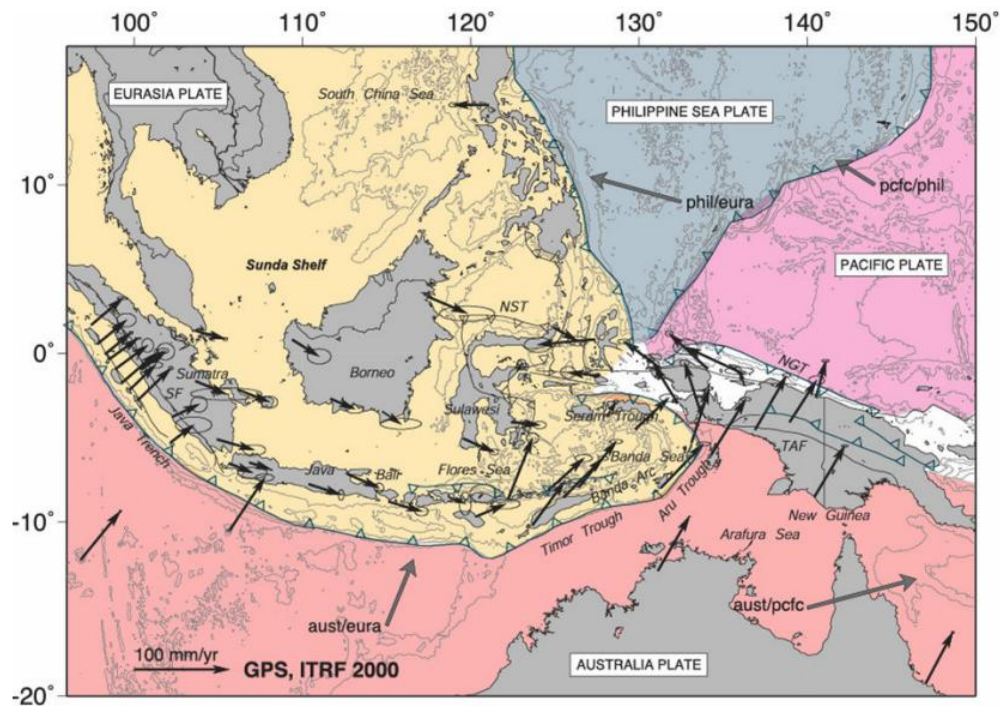
2.1 Gempa Bumi

Gempa bumi terjadi akibat pergeseran lapisan batuan di kerak bumi yang menyebabkan patahan. Pergeseran ini disebabkan oleh tekanan dan tarikan terus-menerus dari lapisan bumi, yang mengakibatkan akumulasi energi. Ketika batuan tidak lagi mampu menahan tekanan tersebut, gempa bumi pun terjadi. Aktivitas pergerakan lempeng tektonik menghasilkan penumpukan energi yang dilepaskan dalam bentuk gelombang seismik, yang dapat dirasakan hingga ke permukaan bumi. Intensitas gempa bergantung pada jumlah energi yang dilepaskan, semakin besar energi, semakin kuat gempa yang dirasakan (Sunarjo dkk, 2012).

Gempa bumi terjadi secara acak, baik dari segi waktu maupun lokasi, sehingga keberadaannya sulit untuk diprediksi (Ghofur dkk, 2022). Gempa bumi yang berskala besar biasanya didahului oleh sejumlah guncangan kecil, dan setelah gempa utama terjadi, sering kali diikuti oleh gempa susulan. Gempa susulan merupakan getaran yang muncul di sekitar wilayah pusat gempa utama, namun dengan kekuatan yang lebih lemah dan dapat terjadi di beberapa titik selama jangka waktu tertentu (Rini dkk, 2019).

Letak tektonik Indonesia berada di zona pertemuan beberapa lempeng tektonik besar dunia serta sejumlah lempeng kecil atau *microblocks* (Bird, 2003), memiliki potensi besar mengalami banyak gempa bumi. Dengan dikelilingi oleh empat lempeng utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik (PuSGen, 2017). Menjadikan Indonesia sangat rentan terhadap bencana gempa bumi, terutama gempa tektonik. Kompleksitas

tektonik yang berkaitan dengan zona tumbukan lempeng tersebut menyebabkan frekuensi gempa yang tinggi di wilayah ini (Helmi dkk, 2021). Penumpukan energi akibat pergerakan lempeng tektonik memicu terjadinya gempa bumi dan melepaskan energi. Energi ini menyebar ke segala arah dalam bentuk gelombang, sehingga getarannya bisa dirasakan hingga ke permukaan bumi. (BMKG, 2024).



Gambar 2.1 Tektonik Aktif Indonesia: Pergerakan kerak bumi dari studi GPS (Bock *et al*, 2003).

Pergerakan lempeng yang terus berlangsung menyebabkan terjadinya gempa bumi tektonik. Lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia saling bertumbukan di wilayah lepas pantai barat Pulau Sumatera, lepas pantai selatan Pulau Jawa, serta lepas pantai selatan Kepulauan Nusa Tenggara, lalu berbelok ke utara menuju perairan selatan Maluku. Di sekitar Papua, terjadi pertemuan antara lempeng Australia dan lempeng Pasifik. Sementara itu, di kawasan Sulawesi, ketiga lempeng tersebut saling bertemu. Hal inilah yang menyebabkan tingginya frekuensi gempa bumi di pulau-pulau sekitar pertemuan tiga lempeng tersebut (Murtianto, 2010).

Menurut Sunarjo dkk. (2012), gelombang seismik diciptakan oleh energi yang menyebabkan getaran atau guncangan tanah hingga mencapai permukaan bumi. Ketika gelombang gempa bumi merambat melalui batuan, elastisitas batuan memungkinkan gelombang tersebut untuk melewatinya. Dengan demikian, pergerakan permukaan dapat terjadi setelah gempa bumi. Studi gempa bumi memberikan informasi yang bermanfaat untuk studi parameter gempa bumi, serta pemahaman tentang dampak gempa bumi (Arimuko et al., 2019).

Dengan adanya ilmu pengetahuan dan kecanggihan teknologi masa kini, bencana gempa bumi dapat dipantau melalui sensor seismometer sehingga memudahkan dalam proses evakuasi apabila berdampak pada masyarakat seperti keruntuhan bangunan atau hingga menelan korban. Adapun pada Al-Qur'an telah dijelaskan sebagaimana pada Q.S Yasin (23) : 42 mengenai teknologi yang membantu manusia dimasa modern ini.

وَخَلَقْنَا لَهُمْ مِنْ مِثْلِهِ مَا يَرْكَبُونَ ﴿٤٢﴾

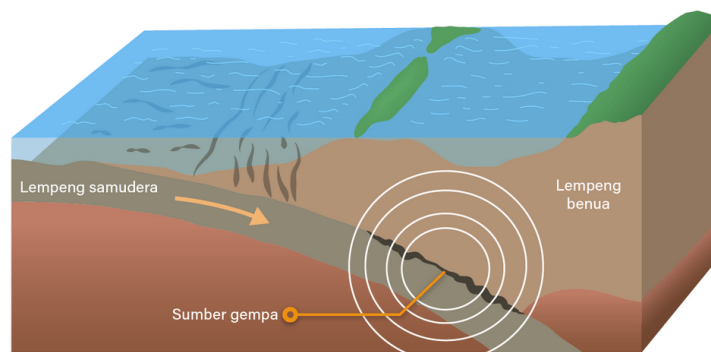
Artinya: *“Dan Kami ciptakan untuk mereka dari yang semisalnya apa yang akan mereka kendarai”* (Q.S Yasin (23) : 42).

Apa yang belum kamu ketahui saat ini, suatu saat akan kamu pahami dan manfaatkan jika kamu mau menggunakan akal dan potensi yang Allah berikan. Di samping itu, Allah juga menciptakan hal-hal yang benar-benar di luar jangkauan pengetahuanmu saat ini, dan baru akan kamu sadari setelah ia muncul dan dapat kamu lihat sendiri. Pernyataan ini telah terbukti di zaman sekarang dan akan terus terbukti di masa depan (Shihab, 2002). Gempa bumi dianggap sebagai misteri atau hukuman ilahi, karena tak ada pengetahuan tentang lempeng tektonik, sesar aktif, atau struktur dalam bumi. Namun kini, kita mengetahui penyebab fisiknya berkat ilmu geofisika dan tektonik. Teknologi seperti seismograf, GPS, dan AI kini

digunakan untuk mendeteksi aktivitas seismik secara *real-time*, menganalisis pergerakan lempeng secara presisi, memprediksi kemungkinan gempa berdasarkan pola data, dan mengembangkan sistem peringatan dini yang dapat menyelamatkan ribuan nyawa.

2.2 Mekanisme Gempa Bumi Tektonik

Gempa tektonik disebabkan oleh pergerakan lempeng-lempeng tektonik di bawah permukaan bumi. Lempeng tektonik merupakan bagian dari kerak bumi yang tersusun atas batuan dan mineral, dan bergerak secara perlahan di atas lapisan mantel. Ketika dua lempeng saling bersentuhan dan mengalami pergerakan relatif, interaksi di sepanjang batas lempeng tersebut dapat memicu terjadinya gempa.



Gambar 2.2 Tumbukan Kedua Lempeng dan Sumber Gempa (Nur, 2022).

Ketika dua lempeng bertemu, terjadi akumulasi tegangan akibat gesekan di antara lempeng. Jika gesekan terlalu besar, pergerakan lempeng terhambat, dan energi terus menumpuk (Stein and Wysession, 2003). Jika pergerakan lempeng terus berlangsung, energi akan terakumulasi di perbatasan lempeng dalam jangka waktu yang lama. Ketika energi yang tersimpan tersebut dilepaskan, ia merambat dalam bentuk gelombang hingga mencapai permukaan bumi, menyebabkan getaran tanah yang dapat dirasakan.

Peristiwa ini terjadi karena batuan di sekitar batas lempeng tidak mampu menahan tekanan yang ditimbulkan oleh pergerakan relatif antar lempeng dalam kondisi tertentu. Akibatnya, terbentuklah gelombang yang dikenal sebagai gelombang seismik (Ismail, 1989). Gelombang ini merambat melalui lapisan kerak bumi, menimbulkan guncangan yang dapat dirasakan oleh manusia serta berpotensi merusak infrastruktur. Gempa tektonik bisa terjadi di daratan maupun di laut, dan jika pusatnya berada dekat dengan permukaan bumi, dampaknya bisa sangat merusak (Lay and Wallace, 1995).

2.3 Klasifikasi Gempa Bumi

Gempa bumi dibagi berdasarkan pada skala kekuatan gempa merusak (magnitudo), kedalaman, sumber gempa dan parameter yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda.

a. Menurut Adsyah (2024), klasifikasi gempa bumi berdasarkan tingkat kekuatannya (magnitudo) adalah sebagai berikut:

1. Magnitudo < 2.0 : Umumnya tidak dirasakan oleh manusia, namun bisa terdeteksi oleh seismograf.
2. Magnitudo 2.0 – 3.9: Dapat dirasakan oleh manusia, tetapi biasanya tidak menimbulkan kerusakan.
3. Magnitudo 4.0 – 4.9: Berpotensi menyebabkan kerusakan ringan pada bangunan.
4. Magnitudo 5.0 – 5.9: Dapat menimbulkan kerusakan sedang, terutama pada bangunan yang konstruksinya lemah.
5. Magnitudo 6.0 – 6.9: Mampu menimbulkan kerusakan besar pada wilayah yang luas.

6. Magnitudo 7.0 – 7.9: Dapat mengakibatkan kerusakan yang parah dan menyebar luas.
 7. Magnitudo ≥ 8.0 : Berpotensi menimbulkan kehancuran besar di area yang sangat luas.
- b. Gempa bumi yang didasarkan pada kedalaman hiposenter dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yakni (Sanjaya, 2008):

1. Gempa bumi dalam

Gempa bumi dalam cenderung tidak terlalu berisiko karena titik hiposentrumnya berada lebih dari 300 km di bawah permukaan bumi. Jenis gempa ini biasanya terjadi di wilayah bawah laut seperti Flores, Sulawesi, dan Jawa

2. Gempa bumi menengah

Gempa bumi menengah merupakan gempa yang memiliki hiposenter pada kedalaman antara 60 hingga 300 km di bawah permukaan bumi. Gempa ini dapat menimbulkan getaran yang terasa hingga ke permukaan dan berpotensi menyebabkan keruntuhan. Wilayah-wilayah yang pernah terdampak gempa menengah antara lain bagian selatan Pulau Jawa, barat Sumatra, Laut Maluku, wilayah sekitar Teluk Tomini, serta Nusa Tenggara.

3. Gempa bumi dangkal

Gempa bumi dangkal merupakan jenis gempa yang memiliki hiposenter kurang dari 60 km dari permukaan bumi. Karena kedalamannya yang relatif dekat, gempa ini cenderung menimbulkan kerusakan yang lebih parah dibandingkan jenis gempa lainnya. Di Indonesia, gempa dangkal umumnya terjadi di sepanjang sesar dan patahan aktif. Tingkat kehancuran yang

ditimbulkan cukup tinggi, karena semakin dekat pusat gempa dengan permukaan, semakin besar pula dampaknya. Beberapa daerah seperti Pulau Flores, Bali, dan Yogyakarta pernah mengalami dampak dari gempa dangkal ini.

c. Adapun gempa bumi dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam gempa berdasarkan sumbernya, yakni (Wells and Coppersmith, 1994):

1. Zona Subduksi (*Interface Event*)

Zona gempa subduksi merupakan representasi model yang diperoleh dari data seismotektonik. Zona ini umumnya terletak di sekitar perbatasan antara lempeng benua dan lempeng samudra, di mana lempeng samudra yang memiliki massa jenis lebih besar akan menekuk ke bawah lempeng benua.

2. Zona *Fault* (*Shallow Crustal*)

Zona patahan atau *fault* merupakan model gempa yang berasal dari aktivitas patahan dangkal, dengan mekanisme yang dapat berupa *reverse*, normal, atau *strike-slip*. Gempa ini terjadi pada patahan yang telah teridentifikasi secara jelas, baik dari segi lokasi, mekanisme, kecepatan pergeseran (*slip-rate*), sudut kemiringan (*dip*), maupun panjang patahannya. Model sumber gempa akibat patahan ditentukan berdasarkan bentuk geometris dari patahan tersebut. Zona gempa patahan dangkal biasanya dimodelkan pada kedalaman kurang dari 20 km.

3. Zona *Background* (*Intraslab Event*)

Zona *background* merupakan area yang menjadi sumber gempa meskipun penyebab pasti gempa di wilayah tersebut belum diketahui secara jelas. Meskipun demikian, beberapa tempat di zona ini telah tercatat

mengalami kejadian gempa. Sumber gempa dalam zona *background* dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu *shallow background*, yang mencakup kedalaman hingga 50 km, dan *deep background*, yang terjadi pada kedalaman 50 km hingga 300 km.

d. Berdasarkan parameter kegempaan berupa waktu tiba gelombang gempa (*origin time*), lokasi pusat gempabumi (episenter), sumber asal (hiposenter), kedalaman pusat gempa bumi (*depth*), dan kekuatan gempabumi (magnitudo) (Rahman dan Santosa, 2013).

1. Waktu terjadinya gempa (*origin time*)

Waktu terjadinya gempa bumi, yang dikenal sebagai *origin time*, merujuk pada momen pertama kali energi dilepaskan akibat tekanan pada lempeng tektonik yang disebabkan oleh tumbukan atau gesekan. Waktu ini dicatat dalam format hari, tanggal, bulan, tahun, serta jam, menit, dan detik berdasarkan UTC (*Universal Time Coordinated*), contohnya 18-07-2024 12:30:45 UTC.

2. Episenter

Episenter merupakan titik di permukaan bumi yang berada tepat di atas pusat c). Berbeda dengan hiposenter, episenter dinyatakan dalam sistem koordinat geografis atau koordinat kartesian bola bumi, menggunakan nilai lintang dan bujur untuk menentukan posisinya secara akurat (Sunarjo dkk, 2010). Koordinat geografis (lintang dan bujur) tempat di mana pusat atau episenter gempa bumi berada di permukaan bumi. Biasanya dinyatakan dalam format derajat desimal. Contoh: 7.50°LS, 105.90°BT. Menghitung

jarak episenter ke masing - masing koordinat dengan persamaan berikut (Afnimar, 2009):

$$\Delta = \cos^{-1}[\cos\theta_E \cos\theta_S + \sin\theta_E \sin\theta_S \cos(\phi_S - \phi_E)] \quad (2.1)$$

dimana :

Δ = Jarak episenter (derajat)

θ_E = Lintang lokasi gempa (derajat)

θ_S = Lintang titik pengamatan (derajat)

ϕ_E = Bujur lokasi gempa (derajat)

ϕ_S = Bujur titik pengamatan (derajat)

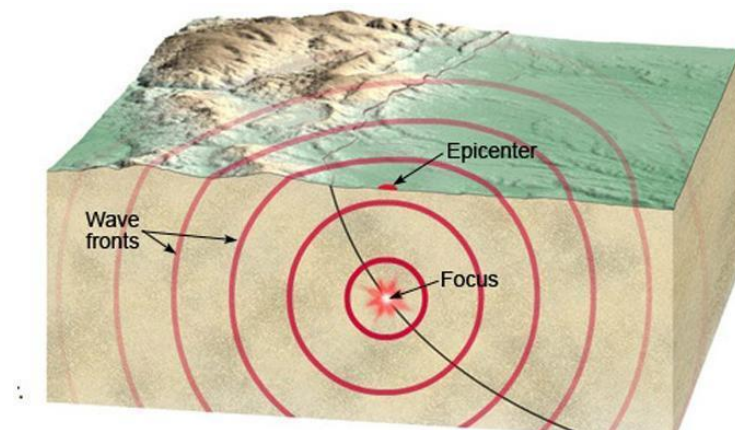
3. Hiposenter

Hiposenter, yang dapat diidentifikasi melalui gelombang seismik seperti gelombang primer dan sekunder, adalah pusat atau fokus gempa yang terletak di dalam bumi. Tekanan dari dalam bumi dapat menyebabkan lapisan bumi bergetar (Bulo dkk., 2020). Menurut Kurniawan dan Saputri (2019), penentuan hiposenter merupakan salah satu faktor penting dalam mengidentifikasi gempa bumi. Ketelitian sangat diperlukan dalam menentukan parameter gempa bumi untuk memastikan kualitas data yang baik dan memberikan informasi yang akurat kepada masyarakat.

Hiposenter, atau pusat gempa adalah titik atau garis di dalam litosfer tempat gempa terjadi. Dari titik ini, gelombang seismik merambat ke permukaan bumi dalam bentuk gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S). Ketika mencapai permukaan, gelombang ini berlanjut sebagai gelombang permukaan, yang memiliki potensi merusak daerah yang dilaluinya.

4. Kedalaman pusat gempabumi (*Depth*)

Jarak vertikal dari permukaan bumi ke titik di mana gempa bumi terjadi. Kedalaman ini dapat bervariasi dari beberapa kilometer hingga ratusan kilometer di bawah permukaan. Biasanya dinyatakan dalam kilometer. Contoh: kedalaman 50 km.



Gambar 2.3 Kedalaman dan Episenter (Agustina, 2016).

5. Magnitudo

Magnitudo gempa merupakan ukuran yang menunjukkan jumlah energi seismik yang dilepaskan dari sumber gempa. Salah satu skala yang umum digunakan untuk mengukur magnitudo adalah Skala Richter. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Charles F. Richter pada tahun 1935. Macam-macam magnitudo sebagai berikut (Edwiza, 2008) :

a. Magnitudo Lokal (*MI*)

Magnitudo lokal pertama kali dikembangkan oleh Charles F. Richter pada tahun 1935 untuk mengukur gempa bumi di California Selatan yang tercatat oleh seismograf Wood-Anderson. Konsep ini didasarkan pada hubungan antara jarak episenter ke seismograf dengan amplitudo maksimum dari sinyal yang terekam. Dengan mengetahui kedua

parameter tersebut, besarnya gempa dapat diestimasi. Secara umum, magnitudo lokal dihitung menggunakan rumus berikut:

$$MI = \log A + 3 \log \Delta - 2.92 \quad (2.2)$$

yang melibatkan magnitudo lokal (MI), amplitudo maksimum getaran tanah (A) dalam mikrometer (μm), serta jarak antara episenter dan stasiun pengamat (Δ).

b. Magnitudo Badan (M_b)

Magnitudo badan dihitung berdasarkan amplitudo gelombang P yang merambat melalui inti bumi. Jenis magnitudo ini digunakan untuk mengukur kekuatan gempa dalam menggunakan rumus tertentu:

$$M_b = \log \left(\frac{A}{T} \right) + f(\Delta, h) + c \quad (2.3)$$

yaitu magnitudo bodi (M_b), amplitudo gelombang P (A) dalam mikrometer (μm), periode gelombang (T) dalam sekon, serta fungsi jarak dan kedalaman yang dinyatakan sebagai $f(\Delta, h)$. Selain itu, faktor koreksi stasiun (c) juga turut diperhitungkan dalam menentukan nilai akhirnya.

c. Magnitudo Permukaan (M_s)

Magnitudo permukaan dihitung berdasarkan amplitudo gelombang permukaan dan digunakan untuk menentukan kekuatan gempa yang berjarak lebih dari 600 km, dengan periode 20 detik, serta gempa dangkal yang kedalamannya kurang dari 60 km. Nilai amplitudo gelombang permukaan dipengaruhi oleh jarak episenter (Δ) dan kedalaman sumber gempa (h). Karena gempa dalam tidak menghasilkan gelombang

permukaan, persamaan M_s tidak memerlukan penyesuaian kedalaman. Secara matematis, M_s dirumuskan:

$$M_s = \log A + \alpha \log \Delta + \beta \quad (2.4)$$

dengan mempertimbangkan amplitudo maksimum (A) dalam mikrometer (μm), jarak episenter (Δ) dalam kilometer, serta konstanta α dan β .

Korelasi M_s dan M_b dapat dinyatakan dalam persamaan (2.5) dan persamaan (2.6) sebagai berikut:

$$M_b = 2.5 + 0.63 M_s \quad (2.5)$$

atau

$$M_s = 1.59 M_b - 3.97 \quad (2.6)$$

d. Magnitudo Momen (M_w)

Magnitudo momen merupakan magnitudo berdasarkan harga momen seismik. Momen seismik adalah dimensi pergeseran bidang sesar atau dari analisis gelombang gempabumi yang direkam di stasiun pencatat khususnya pada *broadband* seismograf. Secara empiris interaksi antara magnitude permukaan dan momen seismik dapat terlihat pada persamaan:

$$\log M_o = 1,5 M_s + 16,1 \quad (2.7)$$

Dimana : M_s = Magnitudo Permukaan

Magnitudo yang terkait dengan kejadian seismik namun tidak bergantung pada nilai magnitudo permukaan, dapat dilihat dalam persamaan berikut.:

$$M_w = (\text{Log } M_o) / 1,5 - 10.73 \quad (2.8)$$

e. Magnitudo Durasi (Md)

Magnitudo durasi adalah jenis magnitudo yang dihitung berdasarkan durasi getaran gempa. Jenis magnitudo ini sangat berguna dalam kondisi di mana amplitudo getaran terlalu besar sehingga melebihi batas skala pengukuran (*off scale*). Perhitungan magnitudo durasi dilakukan dengan mempertimbangkan waktu yang dibutuhkan hingga getaran gempa mereda, sehingga dapat memberikan estimasi yang lebih akurat terhadap kekuatan gempa secara keseluruhan.

$$Md = \alpha \log t + b \Delta + c \quad (2.9)$$

Perhitungan Md menggunakan rumus yang melibatkan beberapa variabel, yaitu t sebagai lamanya getaran dalam satuan sekon, Δ sebagai jarak hiposenter dalam kilometer, serta konstanta a , b , dan c .

2.4 Gelombang Seismik

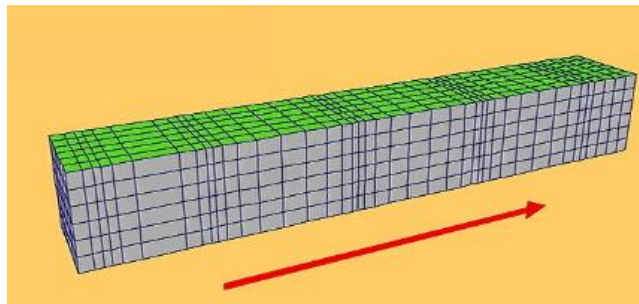
Gelombang seismik adalah gelombang yang merambat melalui bumi akibat perubahan struktur, tekanan, atau tarikan yang disebabkan oleh sifat elastisitas kerak bumi. Energi yang dihasilkan oleh gelombang ini menyebar ke berbagai arah dan dapat terekam oleh alat seismograf (Siswowidjoyo, 1996). Terdapat beberapa jenis gelombang seismik, di antaranya gelombang Love dan Rayleigh yang termasuk dalam gelombang kombinasi, serta gelombang P dan S yang bergerak merambat melalui medium tertentu (Palupi dan Raharjo, 2020).

2.4.1 Gelombang Badan (*Body Wave*)

Terdapat dua macam gelombang badan yaitu gelombang primer dan sekunder:

a. Gelombang Primer (P)

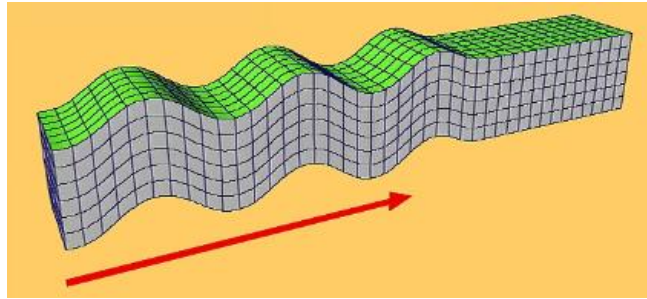
Gelombang primer, atau gelombang kompresi, adalah jenis gelombang badan yang memiliki kecepatan lebih tinggi dibandingkan gelombang S. Gelombang ini bergerak secara longitudinal, di mana partikel-partikel medium bergetar maju-mundur sejajar dengan arah perambatan gelombang. Kecepatan gelombang P (VP) bervariasi tergantung pada jenis mediumnya, yaitu sekitar 5–7 km/s di kerak bumi, 8 km/s di mantel dan inti bumi, 1,5 km/s di air, dan sekitar 0,3 km/s di udara.



Gambar 2.4 Ilustrasi Gerak Gelombang Primer (Hidayat, 2020).

b. Gelombang Sekunder (S)

Gelombang S, atau dikenal sebagai gelombang transversal, termasuk dalam kategori gelombang badan (*body wave*) yang bergerak dengan arah getaran partikel tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Gelombang ini muncul setelah gelombang P dan memiliki ciri khas tidak mampu merambat melalui fluida, sehingga tidak dapat terdeteksi di inti dalam bumi. Kecepatan gelombang S bergantung pada medium yang dilaluinya, yaitu sekitar 3–4 km/s di kerak bumi, lebih dari 4,5 km/s di mantel, dan sekitar 2,5–3,0 km/s di inti bumi (Hidayati, 2010).



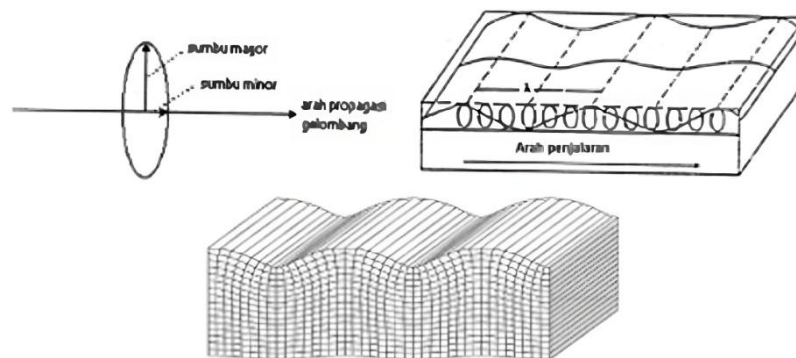
Gambar 2.5 Ilustrasi Gerak Gelombang Sekunder (Hidayat, 2020).

2.4.2 Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Adapun gelombang permukaan terdiri dari Gelombang Reyleigh dan Gelombang Love yakni sebagai berikut (Hidayati, 2010).

a. Gelombang Reyleigh

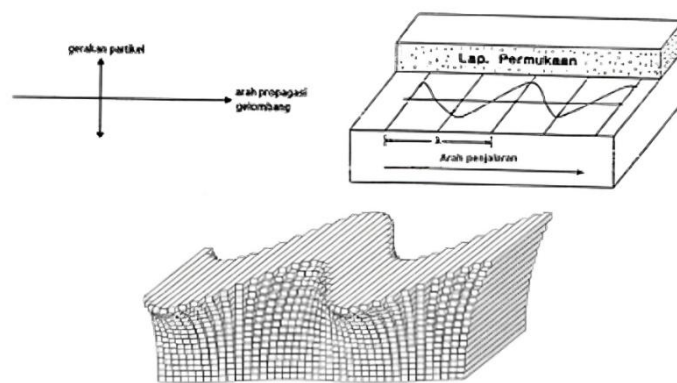
Gelombang permukaan, seperti gelombang Reyleigh, memiliki kecepatan (VR) antara $\pm 2,0$ dan $4,2$ km/s di bumi. Dia bergerak searah bidang datar dan tegak lurus terhadap arah rambat.



Gambar 2.6 Ilustrasi Gerak Gelombang Reyleigh (Hidayati, 2010).

b. Gelombang Love

Gelombang Love adalah salah satu tipe gelombang permukaan yang merambat dengan pola getaran partikel yang bergerak secara horizontal tegak lurus terhadap arah gelombang. Kecepatan gelombang ini bervariasi di sepanjang permukaan bumi, yakni antara $2,0$ hingga $4,4$ km/s, tergantung pada sifat medium yang dilaluinya.



Gambar 2.7 Ilustrasi Gerak Gelombang Love (Hidayati, 2010).

2.5 Fungsi Atenuasi

Fungsi atenuasi merupakan suatu hubungan matematis yang menjelaskan bagaimana gerakan tanah akibat gempa, seperti percepatan, kecepatan, atau simpangan, akan berkurang seiring dengan meningkatnya jarak dari pusat gempa. Fungsi ini digunakan untuk memperkirakan tingkat guncangan tanah di lokasi tertentu berdasarkan berbagai faktor, termasuk magnitudo gempa, jarak terhadap sumber gempa, serta kondisi geologi dan karakteristik sumbernya. Atenuasi berperan penting dalam memperkirakan dampak gempa terhadap suatu wilayah, yang sangat berguna dalam perencanaan mitigasi bencana dan desain struktur bangunan tahan gempa. Persamaan yang digunakan untuk menghitung besar guncangan tanah akibat gempa berdasarkan magnitudo, jarak ke lokasi pengamatan, dan kondisi sumber gempa dikenal sebagai fungsi atenuasi atau *Ground Motion Prediction Equations* (GMPE) (PuSGeN, 2017).

Berikut merupakan beberapa penjelasan mengenai fungsi atenuasi yang digunakan dalam penelitian ini:

2.5.1 Zhao et al (2006)

Dalam penelitian ini, formulasi empiris PGA dilakukan dengan mengembangkan formulasi empiris Zhao et al (2006). Nilai *Peak Ground*

Acceleration (PGA) dalam rumus ini ditentukan berdasarkan parameter jarak, kedalaman, dan magnitudo gempa. Berikut adalah persamaan dari fungsi atenuasi ini (Douglas, 2019):

$$\log(y) = aM_w + bx - \log(r) + e(h - h_c)\delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \log(x) + C_K \quad (2.10)$$

$$r = x + c \exp(dM_w) \quad (2.11)$$

dengan :

$$a = 1.101$$

$$b = -0.05064$$

$$c = 0.0055$$

$$d = 1.080$$

$$e = 0.01412$$

$$F_R = 0.251$$

$$S_I = 0.000$$

$$S_S = 2.607$$

$$S_{SL} = -0.528$$

dimana:

y = Percepatan getaran tanah (PGA) (cm/s^2)

M_w = Momen *magnitudo*

x = Jarak dari sumber gempa ke lokasi (km)

r = Jarak hiposenter (km)

h = Kedalaman sumber gempa dimana kedalaman 10 – 50 km untuk kejadian *interface* dan 50 – 162 km untuk kejadian *intraslab*. Untuk gempa bumi dengan $h > 125$ km, maka gunakan $h = 125$ km.

h_c = Konstanta kedalaman yang bernilai 15 km.

F_R = Parameter *reserve-fault* hanya digunakan untuk *shallow crustal event* (*reserve-faulting*), selain itu nilainya 0.

S_I = Parameter sumber tektonik digunakan hanya untuk *interface event*, selain itu nilainya 0.

S_S = Parameter sumber tektonik digunakan hanya untuk *intraslab event*, selain itu nilainya 0.

S_{SL} = *Magnitudo-independent* pada *intraslab event* untuk menghitung penjalaran gelombang seismik yang kompleks pada intraslab event.

δ_h = 1 jika $h \geq h_c$, dan 0 jika $h \leq h_c$

C_k = Konstanta *siteclass* atau varibale yang digunakan berdasarkan nilai V_{s30} sesuai aturan NEHRP pada daerah tersebut, seperti dibawah ini:

c_H = 0.293 untuk NEHRP *type soil A (Hard Rock)* ($V_{s30} > 1100$ m/s).

c_1 = 1.111 untuk NEHRP *type soil A+B (Rock)* ($600 < V_{s30} \leq 1100$ m/s).

c_2 = 1.344 untuk NEHRP *type soil C (Hard Soil)* ($300 < V_{s30} \leq 600$ m/s).

c_3 = 1.355 untuk NEHRP *type soil D (Medium Soil)* ($200 < V_{s30} \leq 300$ m/s).

c_4 = 1.420 untuk NEHRP *type soil E+F (Soft Soil)* ($V_{s30} \leq 200$ m/s).

2.5.2 Modifikasi Zhao

Dalam penelitian ini dilakukan perbandingan antara rumus yang dikembangkan oleh Zhao et al (2006) dengan parameter magnitudo dan jarak untuk mengevaluasi keakuratan prediksi gerakan tanah di wilayah Bali. Pendekatan ini dipilih karena wilayah Bali memiliki kemiripan geologi yang signifikan dan terletak di zona subduksi aktif, yang mirip dengan kondisi

geologi yang digunakan sebagai dasar rumus Zhao et al (2006). Perbandingan ini penting untuk menilai apakah rumus yang dirancang untuk daerah subduksi dapat diterapkan secara efektif di Bali, atau apakah diperlukan penyesuaian khusus untuk mencerminkan kondisi setempat.

Fungsi atenuasi Zhao et al (2006) memiliki keterbatasan jika diterapkan langsung tanpa modifikasi di wilayah Bali . Untuk itu, diperlukan modifikasi tertentu agar model ini dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan relevan. Penggunaan fungsi atenuasi Zhao et al (2006) yang telah dimodifikasi memungkinkan prediksi intensitas gempa yang lebih sesuai dengan karakteristik wilayah Bali. Modifikasi ini memperhitungkan faktor-faktor lokal seperti kondisi geologis, struktur batuan, dan distribusi sesar aktif di sekitar Bali.

Pengolahan data untuk rumus modifikasi ini menggunakan regresi nonlinier dan menginputkan beberapa parameter gempa bumi seperti jarak, kedalaman, dan magnitudo sehingga diperoleh nilai koefisien a, b, c, d , dan e . Serta beberapa koefisien yang disesuaikan dengan gempa di Bali pada periode tertentu (F_R, S_I, S_S dan S_{SL}). Koefisien ini berdasarkan pada sumber gempa, jadi dapat dimungkinkan tidak semua koefisien tersebut diperoleh karena disesuaikan dengan data yang gempa bumi yang digunakan. Koefisien tersebut bergantung pada jenis gempa yang terjadi, yaitu *shallow crustal event*, *intraslab event* atau, *interface event*. Jika koefisien telah didapatkan, kemudian nilai PGA dihitung seperti pada persamaan (2.10), dengan nilai koefisien sesuai modifikasi.

2.6 Kecepatan Gelombang Geser (V_{s30})

Gelombang V_{s30} (*Velocity of Shear Wave at 30 meters depth*) mengacu pada kecepatan gelombang geser yang diukur hingga kedalaman 30 meter dalam tanah. Parameter ini umum digunakan dalam bidang geoteknik dan seismologi untuk menggambarkan karakteristik tanah yang memengaruhi penyebaran gelombang seismik, serta untuk menilai tingkat risiko gempa di suatu daerah. Nilai V_{s30} juga berfungsi sebagai dasar klasifikasi jenis batuan terhadap pengaruh gempa lokal, sehingga menjadi acuan penting dalam perencanaan bangunan tahan gempa (Roser dan Gosar, 2010).

Sebagai indikator kekakuan tanah, V_{s30} memengaruhi respons tanah terhadap guncangan gempa. Nilai ini diperoleh dari pengukuran kecepatan gelombang geser (V_s) pada kedalaman bertingkat hingga mencapai 30 meter. Semakin besar nilai V_{s30} , menunjukkan bahwa tanah lebih keras dan stabil sebaliknya, nilai V_{s30} yang rendah menunjukkan tanah yang lebih lunak dan lebih rentan memperkuat gelombang gempa.

2.7 Percepatan Tanah Maksimum

Percepatan tanah maksimum atau PGA (*Peak Ground Acceleration*) adalah salah satu parameter kunci dalam seismologi yang digunakan untuk menilai potensi dampak gempa bumi. Nilai percepatan tanah ini mencerminkan tingkat risiko yang ditimbulkan oleh gempa bumi, yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan bangunan tahan gempa. Semakin besar nilai percepatan tanah, semakin tinggi pula risiko yang perlu diperhatikan dalam desain struktur bangunan agar dapat mengurangi potensi kerusakan akibat guncangan gempa.

Setiap kejadian yang terjadi menghasilkan percepatan tanah tertentu pada lokasi yang terkena gempa (*site*). Pertimbangan yang paling penting dalam pembangunan bangunan tahan gempa adalah nilai percepatan tanah. Salah satu aspek terpenting dalam penelitian seismologi adalah memahami pengaruh gravitasi bumi terhadap struktur bangunan di setiap lokasi. Pengetahuan ini diperlukan untuk memitigasi bencana dengan menyelaraskan desain bangunan dengan kondisi wilayah tersebut. Bangunan yang didesain dengan kemampuan tahan gempa yang baik dapat mengurangi jumlah korban jiwa dan kerusakan struktur. Banyak faktor yang mempengaruhi kerusakan bangunan akibat gempa, termasuk parameter konstruksi itu sendiri, seperti karakteristik material dan struktur, serta parameter pergerakan tanah, yang dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, dan mekanisme gempa, serta kondisi tanah setempat (Irsyam dkk, 2010).

Percepatan getaran tanah adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan percepatan gelombang seismik saat bergerak menuju permukaan bumi. Ketika gempa bumi terjadi, percepatan ini merupakan indikator penting yang harus diperhatikan. Percepatan ini digunakan untuk menghitung *Peak Ground Acceleration* (PGA), atau percepatan getaran tanah tertinggi, yang terjadi di seluruh area yang terkena gempa. Tujuan dari metode ini adalah untuk memetakan wilayah yang akan menghasilkan data tentang kerusakan yang paling parah. Tingkat guncangan seismik di suatu wilayah atau titik pengamatan dapat ditentukan dengan menggunakan skema percepatan tanah maksimum ini, yang berfungsi sebagai dasar untuk menciptakan strategi mitigasi bencana yang lebih efisien.

2.8 Intensitas Gempa Bumi

Intensitas gempa bumi menunjukkan sejauh mana kerusakan atau dampak bahaya yang ditimbulkan oleh gempa di suatu lokasi, yang dinilai berdasarkan tingkat getaran yang dirasakan. Besarnya intensitas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain magnitudo gempa, jarak ke sumber gempa, kondisi geologi lokal, serta karakteristik bangunan di wilayah terdampak. Umumnya, wilayah yang lebih dekat dengan pusat gempa akan merasakan intensitas yang lebih besar dibandingkan wilayah yang lebih jauh (Irjan dkk, 2022). Untuk menilai tingkat kerusakan akibat gempa, digunakan skala intensitas, yang di Indonesia dikenal sebagai skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI) atau skala intensitas *Mercalli*

Skala intensitas berbeda dengan skala magnitudo dalam hal perhitungannya. Magnitudo dihitung berdasarkan data yang diperoleh dari alat pencatat gempa, sedangkan intensitas didasarkan pada dampak langsung dari getaran gempa terhadap lingkungan sekitar. Magnitudo gempa memiliki nilai tetap untuk setiap kejadian gempa, sedangkan intensitas dapat berbeda-beda tergantung pada kondisi lokasi tempat gempa dirasakan. Intensitas cenderung lebih tinggi pada wilayah dengan tanah lunak atau gembur dibandingkan dengan area yang memiliki tanah padat atau berupa batuan dasar (*bedrock*). Skala intensitas dapat ditentukan berdasarkan nilai percepatan tanah maksimum (PGA), namun untuk mendapatkan hasil yang lebih tepat, nilai PGA perlu dikonversi ke dalam skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI). Magnitudo gempa memiliki nilai yang tetap untuk setiap peristiwa gempa, sementara intensitas dapat bervariasi tergantung pada kondisi lokasi kejadian gempa. Intensitas yang lebih tinggi umumnya terjadi di tanah yang lunak atau gembur, dibandingkan dengan tanah yang padat atau *bedrock*. Skala intensitas

dapat dihitung dengan mengacu pada nilai percepatan tanah maksimum (PGA), namun untuk memperoleh hasil yang akurat, diperlukan konversi dari nilai PGA ke dalam skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI). Adapun konversi nilai PGA ke Intensitas dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Konversi nilai PGA ke Intensitas (Rahman dkk, 2015).

Intensitas	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+
PGA	<1,7	1,7- 14	14- 39	39- 92	92- 180	180- 340	340- 650	650- 1240	>1240

Tabel berikut ini memberikan deskripsi mengenai skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI), yang juga dikenal sebagai intensitas *Mercalli*. Skala MMI ini terdiri dari 12 tingkatan yang menggambarkan dampak atau akibat dari gempa bumi pada suatu wilayah. Setiap tingkatan pada skala ini mencerminkan tingkat kerusakan yang ditimbulkan, serta efek yang dirasakan oleh manusia dan struktur bangunan akibat getaran gempa. Deskripsi lebih lanjut mengenai skala MMI dapat dilihat pada penjelasan berikut.

Tabel 2.2 Skala MMI (Allan,1982).

Dekripsi Rinci	Skala MMI
Tak dirasakan	I
Getaran ini dapat dirasakan di dalam rumah, terutama pada lantai atas bangunan atau di tempat-tempat yang lebih tinggi. Sensasi yang ditimbulkan mirip dengan getaran yang muncul saat sebuah truk kecil melintas di sekitar area tersebut.	II

Getaran ini dapat dirasakan pada ruangan, ditandai dengan ayunan benda-benda yang menggantung. Sensasi getaran yang muncul menyerupai getaran yang dihasilkan oleh truk yang sedang melintas.	III
Getaran ini terasa di dalam rumah, dengan pintu dan jendela yang berayun serta gelas-gelas yang berdenting. Benturan barang-barang pecah belah juga terjadi akibat getaran tersebut. Sensasi yang dirasakan mirip dengan melewati truk-truk besar atau seperti suara peluru yang menghantam dinding.	IV
Getaran ini terasa di luar ruangan, cukup kuat untuk membangunkan orang yang sedang tidur. Beberapa cairan dalam wadah tumpah sebagian, dan benda-benda kecil yang tidak stabil terlempar atau rusak. Pintu berayun, pigura-pigura di dinding bergerak, sementara jam pendulum berhenti atau mulai mengalami perubahan kecepatan.	V
Getaran ini dirasakan oleh semua orang, baik di luar ruangan maupun di dalam ruangan. Banyak orang yang ketakutan dan segera keluar dari bangunan. Piring, kaca jendela, dan gelas pecah akibat getaran tersebut, sementara dinding-dinding mulai menunjukkan retakan.	VI
Para pejalan kaki kesulitan untuk melangkah dengan stabil akibat getaran yang sangat kuat. Benda-benda yang menggantung bergetar hebat, sementara furnitur rusak. Lonceng besar terdengar berdering dengan keras. Retakan	VII

besar muncul di dinding, dan tembok-tembok yang tidak cukup kuat mulai pecah. Plester tembok serta batu-batu yang tidak terikat dengan kuat jatuh berhamburan.	
Pengemudi mobil merasakan dampak getaran yang mempengaruhi kestabilan kendaraan. Meskipun bangunan-bangunan tersebut kuat, beberapa bagian runtuh akibat getaran hebat. Kerusakan juga terjadi pada tembok-tembok yang didesain tahan terhadap getaran horizontal, di mana beberapa bagian tembok runtuh. Dinding-dinding mobil mengalami kerusakan sebagian, sementara pasangan bata juga mengalami keretakan. Ranting pohon besar patah, dan tanah serta lereng yang curam terbelah akibat dampak getaran tersebut.	VIII
Bangunan yang tidak cukup kuat mengalami kehancuran total akibat getaran tersebut. Kepanikan melanda masyarakat, sementara kerusakan parah terjadi pada pondasi bangunan. Tanah menunjukkan retakan besar yang mencolok, dan pipa bawah tanah retak. Di daerah aluviasi, pasir dan lumpur muncul ke permukaan tanah, menambah dampak kerusakan yang meluas.	IX
Kebanyakan pasangan bata dan struktur rangka hancur bersama pondasinya akibat getaran yang sangat kuat. Beberapa bangunan kayu yang awalnya tampak kokoh juga hancur total, sementara jembatan-jembatan runtuh. Kerusakan serius terjadi di area bendungan dan tanggul, menyebabkan ancaman lebih	X

lanjut. Terjadi longsor besar di beberapa daerah, dan pasir serta lumpur bergeser secara horizontal di pantai dan daerah tanah datar, memperburuk kondisi.	
Rel kereta mengalami bengkokan akibat getaran yang sangat kuat, mengganggu jalur transportasi. Sementara itu, jaringan pipa bawah tanah rusak parah dan tidak berfungsi sama sekali, menyebabkan gangguan besar dalam distribusi air dan sistem pembuangan.	XI
Kerusakan yang terjadi hampir total, dengan batuan besar berpindah tempat akibat kekuatan getaran. Benda-benda yang ada terlempar ke udara, menciptakan kehancuran lebih lanjut dan membahayakan lingkungan sekitar.	XII

2.9 Tingkat Risiko Bencana Gempa Bumi

Mitigasi bencana bukan bertujuan untuk mencegah atau menghentikan bencana, melainkan untuk meminimalkan dampaknya, baik terhadap infrastruktur maupun keselamatan manusia. Langkah-langkah mitigasi dapat dilakukan melalui pemetaan daerah rawan bencana serta peningkatan kapasitas masyarakat dengan menumbuhkan kesadaran dan kesiapsiagaan dalam menghadapi ancaman bencana (Basid dan Munir, 2021). Perkiraan dampak negatif dilakukan berdasarkan tingkat kerawanan dan daya tampung suatu wilayah. Sebagai upaya mitigasi yang lebih terarah, BNPB telah menyusun Pedoman Perencanaan Mitigasi Risiko Bencana yang dituangkan dalam Peraturan Kepala BNPB Nomor 4 Tahun 2008 (Muhaimin dkk, 2016):

$$Risk = Hazard \frac{Vulnerability}{Capacity} \quad (2.11)$$

Dimana : R = *Disaster Risk* (Risiko Bencana)

H = *Hazard* (Ancaman)

V = *Vulnerability* (Kerentanan)

C = *Capacity* (Kapasitas)

Setelah itu, setiap parameter dibagi menjadi tiga kelas: rendah (kelas 1), sedang (kelas 2), dan tinggi (kelas 3). Setiap parameter diberi skor dengan mengalikan bobot dan nilai kelas yang telah dihasilkan untuk mencerminkan klasifikasi kerentanan kabupaten/kota. Tingkat risiko bencana di kabupaten/kota dikategorikan dengan menggunakan sistem pemeringkatan sebagai berikut (BNPB, 2018):

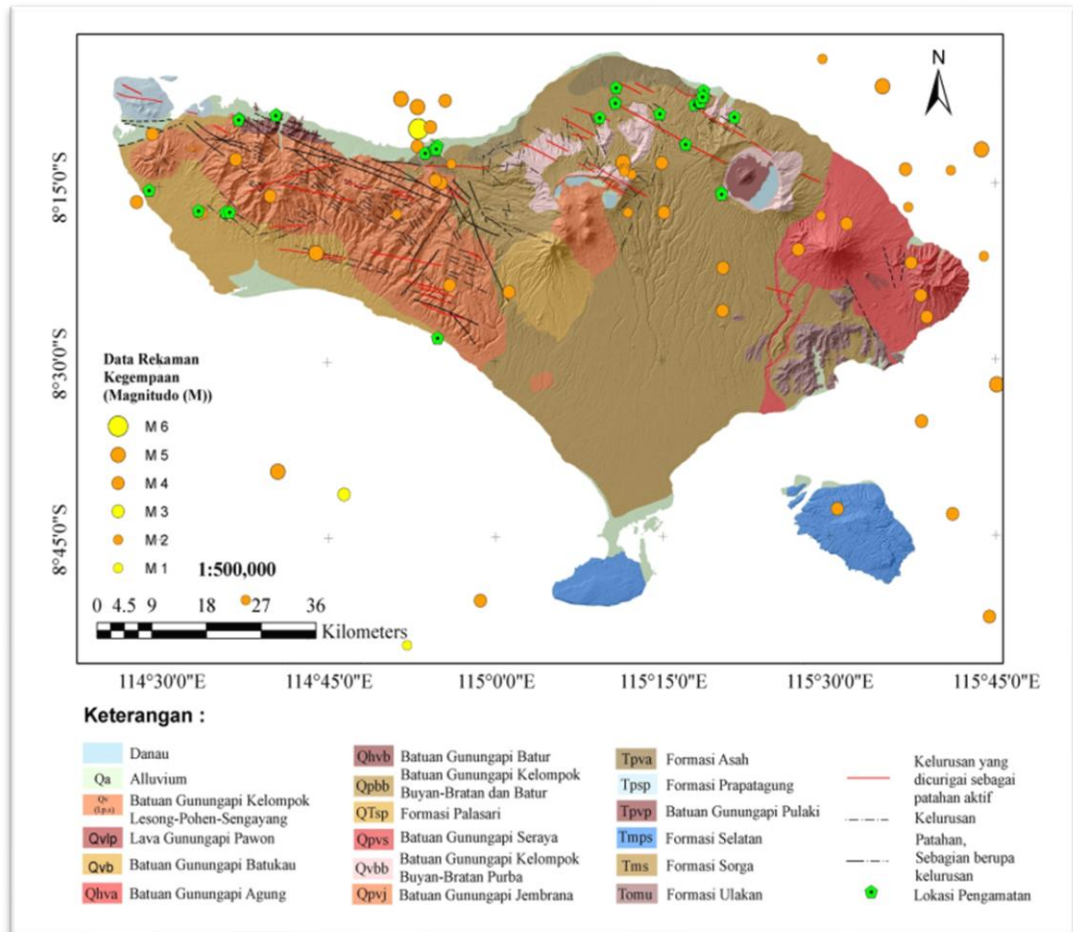
Tabel 2.3 Skoring Komponen Penyusun Risiko Gempabumi (BNPB, 2018).

Jenis Komponen	Kelas	Nilai	Skor
PGA	1 (Rendah)	100%	4
	2 (Sedang)	100%	8
	3 (Tinggi)	100%	12
Kepadatan Penduduk	1 (Rendah)	<500	0,4
	2 (Sedang)	500-1000	0,8
	3 (Tinggi)	>1000	1,2
Indeks Pembangunan Manusia	1 (Rendah)	<55	1
	2 (Sedang)	55-85	2
	3 (Tinggi)	>85	3

2.10 Tinjauan Geologi Daerah Bali

Pulau Bali, yang merupakan bagian dari Kepulauan Indonesia, memiliki kondisi geologi yang beragam dan kompleks. Keanekaragaman geologi di wilayah ini dipengaruhi oleh aktivitas tektonik, vulkanik, serta proses erosi dan

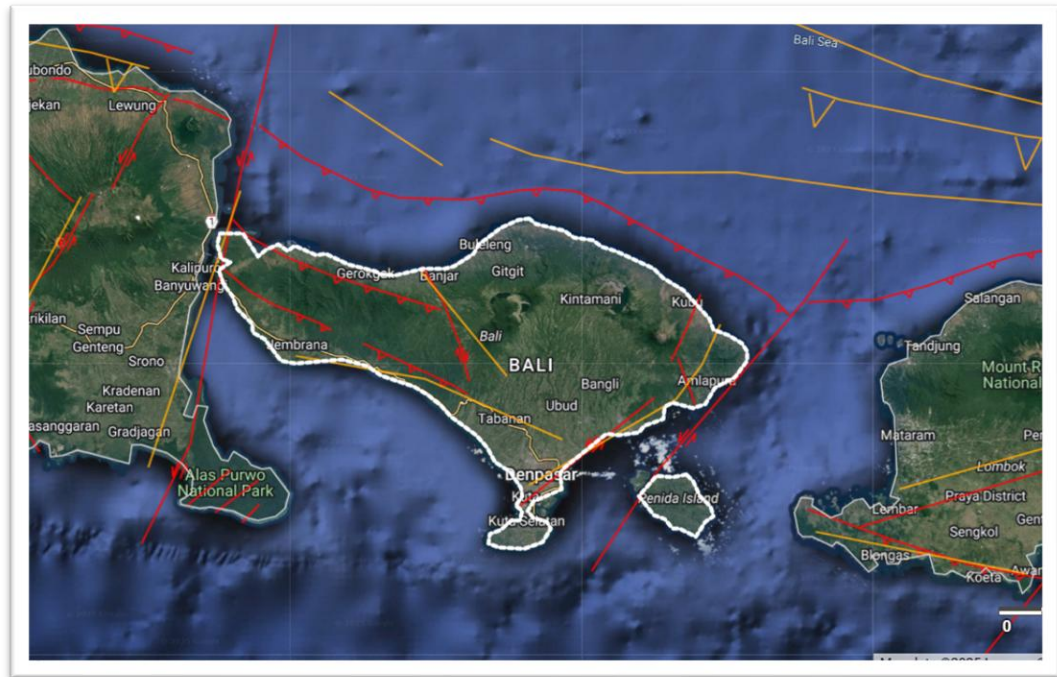
sedimentasi. Secara geografis, Bali terletak di bagian barat Kepulauan Sunda Kecil, dari perspektif geologi Bali berada di zona pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia, sehingga wilayah ini mengalami aktivitas seismik dan vulkanik yang cukup tinggi.



Gambar 2.8 Peta Geologi Regional Pulau Bali (Helmi dkk, 2021).

Interaksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia di zona subduksi tidak hanya membentuk busur kepulauan Sunda Kecil, tetapi juga memicu berbagai aktivitas tektonik, termasuk gempa bumi dan deformasi kerak bumi. Akibat proses ini, terbentuklah sesar-sesar aktif serta zona patahan yang memengaruhi morfologi dan stabilitas wilayah Bali, Sumbawa, dan Nusa Tenggara. Selain itu, aktivitas subduksi ini juga berperan dalam pembentukan serta perkembangan gunung berapi di sepanjang busur kepulauan, yang menjadikan

wilayah ini sebagai salah satu daerah dengan tingkat aktivitas seismik dan vulkanik yang tinggi. Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dan menunjam ke bawah Lempeng Eurasia dengan laju sekitar ± 70 mm per tahun (DeMets et al., 1994). Interaksi antara kedua lempeng utama ini turut membentuk pola orientasi dan persebaran struktur geologi di Pulau Bali serta kawasan sekitarnya.



Gambar 2.9 Sesar di Pulau Bali dan Sekitarnya (ESDM, 2025).

Sesar naik di depan zona subduksi dan sesar-sesar lokal berskala kecil di daratan merupakan struktur utama yang terbentuk (Daryono, 2011). Selain itu, survei geofisika menunjukkan adanya struktur *back arc thrust* di belakang busur kepulauan (McCaffrey & Nabelek, 1987). Yasid (1999), yang melakukan studi tomografi, dan Yadnya dkk. (2012), yang merelokasi data seismisitas dari jaringan seismik lokal. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Yadnya dkk, (2012) berhasil mengidentifikasi sesar naik di lepas pantai sebelah utara Bali yang merupakan lanjutan dari Sesar Naik Flores. Upaya sebelumnya dalam mengidentifikasi sesar

naik juga telah dilakukan oleh Masturyono (1994) melalui analisis sebaran seismisitas gempa dangkal di wilayah Bali dan sekitarnya (Masturyono, 1994).

Sesar-sesar ini mencerminkan aktivitas tektonik di kawasan tersebut, yang dipengaruhi oleh pertemuan antara lempeng Indo-Australia dan Eurasia. Beberapa sesar di daratan Bali berorientasi sejajar atau miring terhadap garis pantai, menandakan adanya aktivitas tektonik lokal yang dapat memicu gempa bumi dengan berbagai mekanisme pergerakan, seperti sesar geser (*strike-slip*) dan sesar naik (*reverse fault*). Selain itu, keberadaan sesar di laut, terutama di selatan Bali, menunjukkan potensi sumber gempa dari zona subduksi, di mana lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah lempeng Eurasia. Dengan adanya jaringan sesar aktif ini, wilayah Bali memiliki potensi terjadinya gempa bumi yang perlu diwaspadai, terutama dalam perencanaan mitigasi bencana dan penguatan struktur bangunan di daerah rawan gempa.

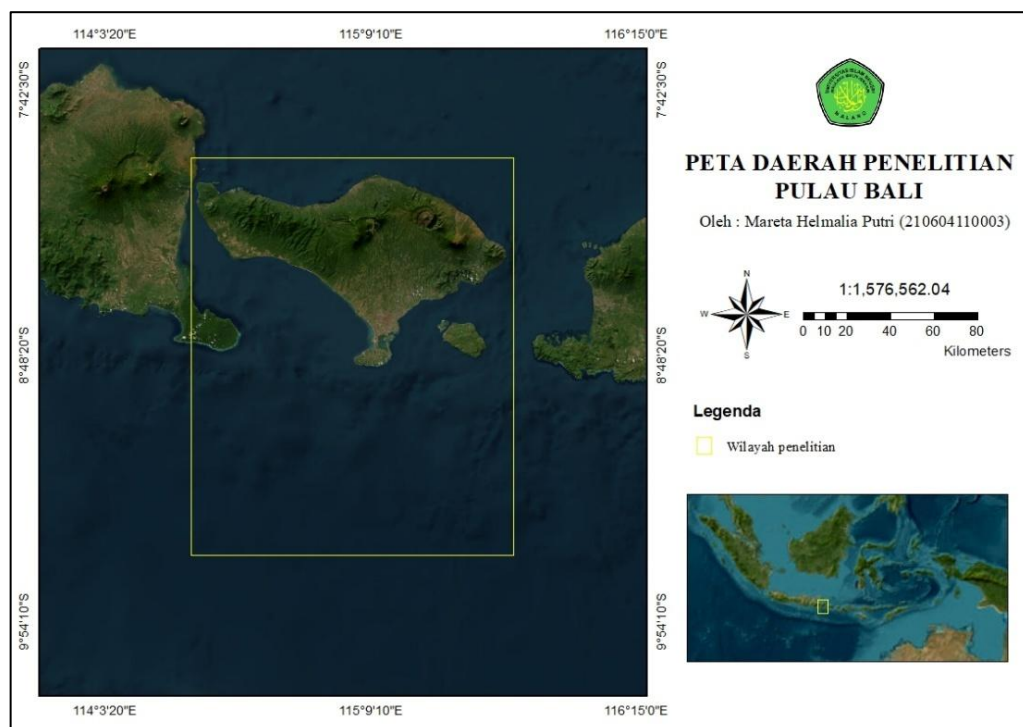
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian yang berjudul Identifikasi Risiko Gempa Merusak di Bali dengan Menggunakan Fungsi Atenuasi Zhao *et al* (2006) dan Modifikasi Zhao dilaksanakan pada bulan Januari – Maret 2025 secara *online* melalui kediaman pada *website* USGS (*United States Geological Survey*).

Lokasi penelitian berada di wilayah Bali dengan data gempa yang diambil adalah yang tergambar pada peta berikut:



Gambar 3.1 Peta Daerah Penelitian Pulau Bali.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perangkat Keras (*hardware*)

Perangkat keras yang digunakan berupa laptop.

2. Perangkat Lunak (*software*) antara lain:

- a. Microsoft Word 2021
- b. Microsoft Excel 2021
- c. Visual Studio Code
- d. Matlab R2024a
- e. ArcMap 10.8
- f. Google Earth Pro

3.3 Jenis Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data gempa bumi tahun 2011-2024 wilayah pulau Bali dan data Vs30 sesuai titik grid pengamatan. Kemudian data kepadatan penduduk dan data kapasitas penduduk (Indeks Pembangunan Manusia).

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Metode Pengambilan Data

Proses pengambilan data dilakukan secara *online* melalui website USGS (*United States Geological Survey*) untuk data gempa bumi dan data Vs30. Untuk data gempa bumi wilayah Bali pada tahun 2011-2024 yang memiliki koordinat 8.00°LS – 9.50°LS dan 114.43°BT – 115.73°BT pada halaman <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. Kemudian data gempa difilter dengan magnitudo ≥ 4 M dan kedalaman 0 – 60 km. Data selanjutnya adalah data Vs30 yang diperoleh dari <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>. Selain itu juga

dibutuhkan data kepadatan penduduk, dan data kapasitas penduduk (Indeks Pembangunan Manusia) yang diambil pada <https://www.bps.go.id/>.

3.4.2 Menentukan Rumus Atenuasi Modifikasi Zhao

Setelah data gempa bumi diperoleh selanjutnya disimpan dalam bentuk csv pada Microsoft Excel 2021. Kemudian dibuat *script* untuk pengolahan data menggunakan regresi nonlinier dengan metode kuadrat terkecil. Dengan menginputkan beberapa parameter seperti kedalaman, jarak hiposenter, magnitudo, titik penelitian, jenis gempa, dan nilai PGA dengan fungsi Zhao secara umum yang disimpan dalam bentuk (.xlsx) lalu kemudian data tersebut dibaca dalam perintah *script*.

Script yang sudah dibuat kemudian di proses pada Matlab R2024a untuk menghasilkan *output* berupa nilai koefisien a,b,c,d dan e sesuai persamaan umum Zhao *et al* (2006) untuk wilayah Bali. Serta beberapa koefisien yang disesuaikan dengan parameter kegempaan di Bali pada periode tertentu (F_R , S_I , S_S dan S_{SL}). Koefisien ini berdasarkan pada sumber gempa, jadi dapat dimungkinkan tidak semua koefisien tersebut diperoleh karena disesuaikan dengan data yang gempa bumi yang digunakan. Koefisien tersebut bergantung pada jenis gempa yang terjadi, yaitu *shallow crustal event*, *intralab event* atau, *interface event*.

3.4.3 Perhitungan Peak Ground Acceleration (PGA)

Untuk menentukan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dapat digunakan langkah-langkah berikut:

1. Membuat grid dengan ukuran $0,0527^\circ \times 0,0527^\circ$ atau setara dengan 5,8482 km x 5,8482 km menggunakan ArcMap 10.8, yang mencakup seluruh Provinsi Bali.

2. Mengonversi magnitudo gempa menjadi nilai Magnitudo Momen (Mw).
3. Menghitung jarak episenter dan hiposenter pada titik gempa terhadap titik pengamatan.
4. Menghitung data grid pengamatan menggunakan persamaan rumus atenuasi Zhao *et al.* (2006), baik secara umum maupun yang telah dimodifikasi.
5. Mencari nilai maksimum percepatan getaran tanah pada setiap grid kejadian gempa berdasarkan hasil perhitungan untuk menentukan dampak getaran di setiap lokasi.
6. Menyusun data hasil pengamatan yang telah dihitung pada setiap titik grid dan menentukan nilai percepatan tanah maksimum untuk setiap metode.
7. Membuat peta percepatan getaran tanah maksimum dengan menggunakan perangkat lunak ArcMap 10.8.

3.4.4 Pemetaan Berdasarkan Nilai *Peak Ground Acceleration* PGA dan Peta Risiko Bencana

Perhitungan percepatan getaran tanah maksimum (PGA) kemudian dibuat pola pemetaan PGA dan pola pemetaan risiko bencana menggunakan *software* ArcMap 10.8 dengan langkah - langkah berikut:

1. Mengkonversi nilai percepatan getaran tanah maksimum ke dalam nilai skala intensitas maksimum atau *Modified Mercalli Intensity* (MMI).
2. Menghitung nilai kepadatan penduduk dengan data yang diperoleh dari BPS (Badan Pusat Statistik):

$$\text{Kepadatan Penduduk} = \frac{\text{Jumlah Penduduk (jiwa)}}{\text{Luas Wilayah (km)}} \quad (3.3)$$

3. Mensortir data kapasitas penduduk (Indeks Pembangunan Manusia) yang didapatkan dalam laman BPS (Badan Pusat Statistik).
4. Menscoring nilai intensitas maksimum, kepadatan penduduk, dan data kapasitas penduduk, kemudian menghitung nilai dari resiko bencana dengan persamaan berikut:

$$Risk = Hazard \frac{Vulnerability}{Capacity} \quad (3.4)$$

Dimana : R = *Disaster Risk* (Risiko Bencana)

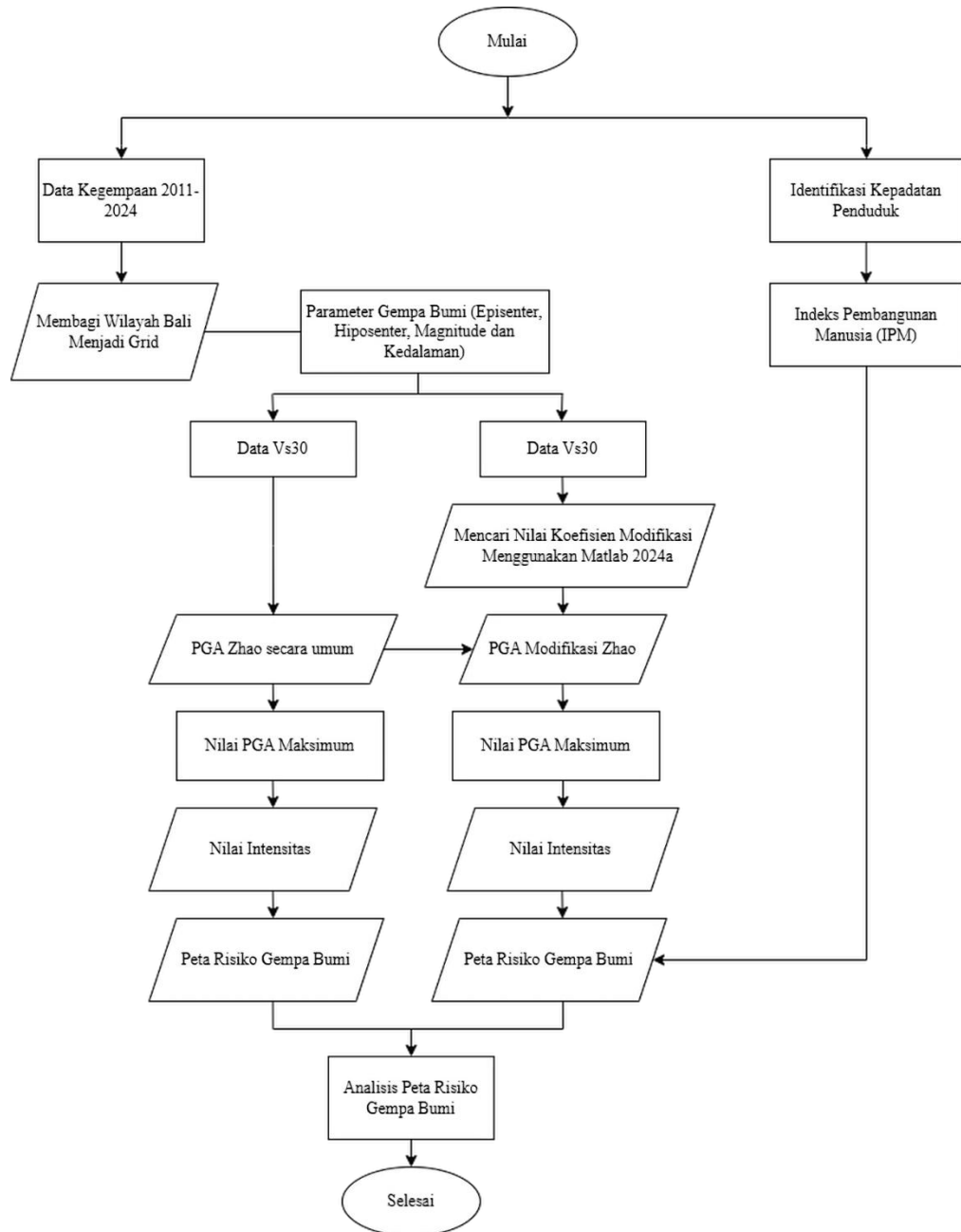
H = *Hazard* (Ancaman)

V = *Vulnerability* (Kerentanan)

C = *Capacity* (Kapasitas)

5. Membuat pemetaan risiko gempa bumi dengan menggunakan software ArcMap 10.8.

3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA) merupakan salah satu parameter utama dalam analisis kegempaan, karena dapat merepresentasikan seberapa parah dampak goncangan gempa terhadap suatu wilayah. Nilai PGA ditentukan oleh beberapa faktor, seperti besar magnitudo, kedalaman pusat gempa (hiposenter), serta jarak antara lokasi kejadian gempa dengan titik pengamatan (episenter). Wilayah yang berada lebih dekat dengan pusat gempa umumnya akan menerima nilai percepatan tanah yang lebih tinggi, dan hal ini berkaitan langsung dengan tingginya intensitas gempa yang dirasakan di lokasi tersebut. Oleh sebab itu, pengukuran dan analisis PGA sangat penting untuk mendukung upaya mitigasi di daerah rawan gempa seperti Indonesia khususnya wilayah Bali.

Dalam perhitungan nilai PGA, digunakan fungsi atau persamaan atenuasi yang menghubungkan parameter sumber gempa seperti magnitudo dan jarak ke lokasi pengamatan dengan nilai percepatan gerakan tanah. Pada penelitian ini menggunakan data historis gempa pada rentang tahun (2011-2024). Data tersebut dihitung dengan persamaan atau fungsi atenuasi Zhao dan modifikasi Zhao. Fungsi atenuasi ini memungkinkan perbandingan antara wilayah dengan karakteristik geologi yang berbeda untuk mengetahui sejauh mana getaran tanah melemah seiring dengan bertambahnya jarak dari pusat gempa. Wilayah dengan material tanah yang lunak, akan mengalami percepatan getaran yang lebih tinggi meskipun jaraknya sama dengan wilayah berbatuan keras.

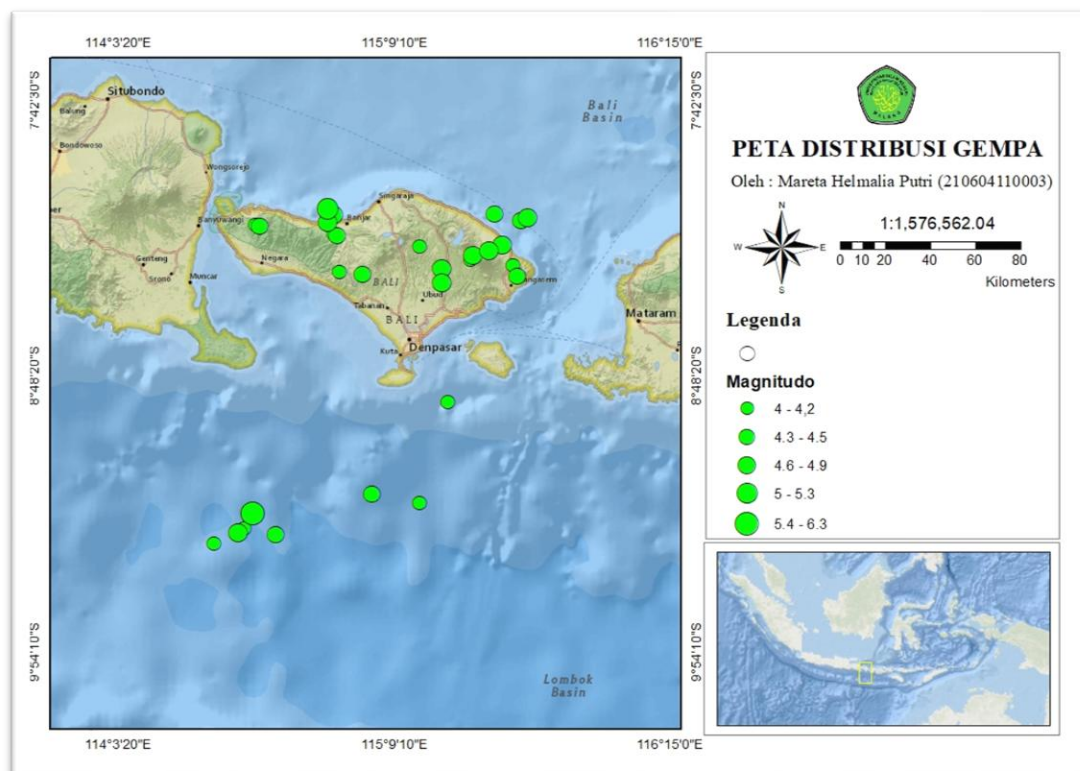
Fungsi atenuasi yang sudah ada seringkali kurang spesifik dan akurasi hasilnya dapat dipengaruhi oleh kondisi geografis serta karakteristik kegempaan yang unik di setiap daerah. Oleh karena itu, modifikasi fungsi atenuasi menjadi langkah penting untuk meningkatkan ketepatan prediksi nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA) yang sesuai dengan parameter lokal. Dengan demikian, fungsi atenuasi Zhao yang dimodifikasi dapat memberikan hasil yang lebih spesifik, terutama untuk kawasan rawan gempa seperti Indonesia, yang memiliki karakteristik seismik yang sangat beragam.

Informasi nilai PGA dan penerapan fungsi atenuasi berperan penting dalam proses pemetaan risiko gempa, khususnya untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan suatu wilayah terhadap dampak gempa. Dalam penelitian ini, hasil perhitungan PGA dan intensitas gempa divisualisasikan dalam bentuk peta bahaya. Peta ini menjadi acuan penting dalam perencanaan tata ruang, desain bangunan tahan gempa, serta strategi mitigasi bencana yang lebih tepat sasaran. Dengan demikian, pengolahan data gempa yang terintegrasi dengan fungsi atenuasi dan pemetaan risiko menjadi komponen penting dalam pembangunan yang tangguh terhadap bencana.

4.1 Analisis Tahapan Pengolahan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data gempa wilayah Bali yang diperoleh melalui laman USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. Kemudian data V_s30 yang dapat diakses pada halaman <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/> dan data penduduk di wilayah Bali yang diakses dari website BPS <https://www.bps.go.id/>.

Setelah data diperoleh, langkah-langkah yang dilakukan untuk penentuan risiko gempa bumi berdasarkan pola Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA) berdasarkan metode Zhao dan modifikasi Zhao yang pertama yaitu mensortir data gempa bumi sesuai dengan batasan masalah penelitian. Untuk daerah penelitian yaitu wilayah Bali dengan koordinat $8.00^{\circ}\text{LS} - 9.50^{\circ}\text{LS}$ dan $114.43^{\circ}\text{BT} - 115.73^{\circ}\text{BT}$, magnitudo yang digunakan adalah $(M) \geq 4$ SR dengan kedalaman 0-60 km, serta data gempa bumi yang digunakan adalah rentang tahun 2011-2024. Adapun data gempa bumi yang sudah di filter adalah pada gambar berikut.



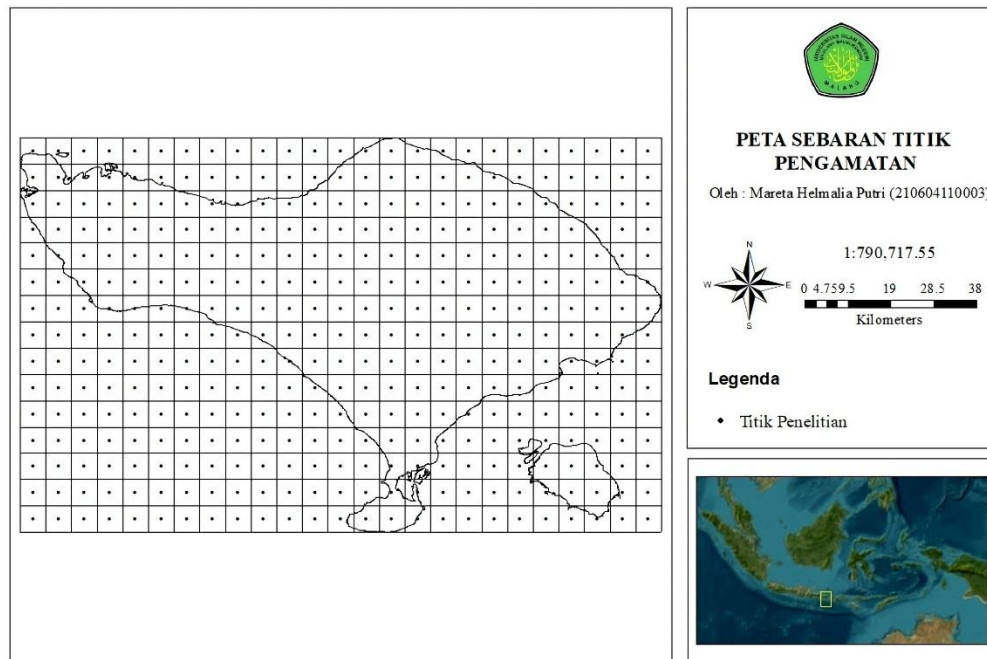
Gambar 4.1 Titik Gempa Bumi Wilayah Penelitian.

Data kedua yang digunakan dalam penelitian ini adalah data Vs30, yaitu nilai kecepatan gelombang geser rata-rata pada lapisan tanah hingga kedalaman 30 meter dari permukaan. Vs30 merupakan parameter penting dalam kajian seismik karena mencerminkan kekakuan dan kondisi geoteknik tanah di suatu lokasi. Nilai ini berperan besar dalam menentukan respons tanah terhadap guncangan gempa dan

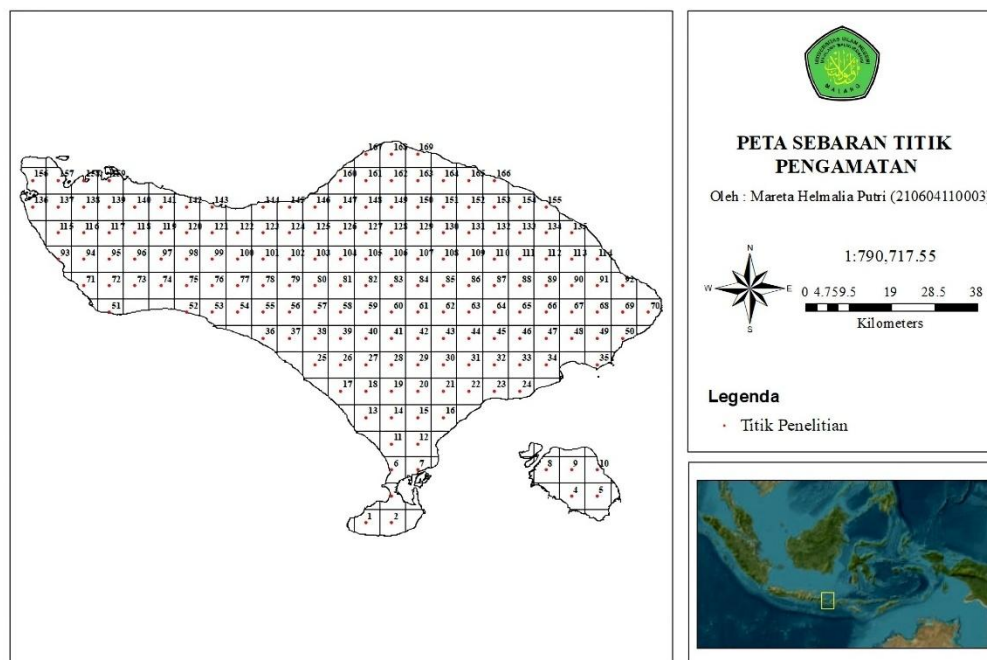
sangat krusial dalam pemodelan bahaya seismik. Dalam berbagai studi, termasuk perhitungan *Ground Motion Prediction Equations* (GMPEs), Vs30 digunakan sebagai variabel utama untuk memperkirakan tingkat percepatan tanah akibat gempa bumi. Pada penelitian ini, nilai Vs30 diperoleh dari situs resmi USGS, di mana setiap lokasi penelitian memiliki nilai Vs30 tersendiri.

Setelah data gempa bumi diperoleh berdasarkan parameter dari metode Zhao *et al.* (2006), yang menggunakan parameter magnitudo momen (Mw), dan data Vs30 telah dikumpulkan, maka data terakhir yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data jumlah penduduk di wilayah Bali. Data ini diakses melalui situs <https://www.bps.go.id/>. dengan data terbaru yang digunakan merupakan data kependudukan tahun 2017.

Tahap kedua dalam penelitian ini adalah penentuan grid (titik pengamatan) di wilayah Bali. Grid tersebut digunakan untuk menghitung jarak antara episenter gempa dengan titik-titik lokasi dalam area studi. Ukuran grid yang digunakan dalam penelitian ini adalah $5,8482 \text{ km}^2 \times 5,8482 \text{ km}^2$ atau $0,0527^\circ \times 0,0527^\circ$ menggunakan *software* Arc Map 10.8. Titik grid ini dipilih berdasarkan luas salah satu desa di pulau Bali yaitu desa Tulikup, kecamatan Gianyar dengan luas $5,8 \text{ km}^2$. Dengan penyesuaian luasan tersebut, grid yang dibuat lebih presisi dan menyeluruh untuk daerah Bali. Dari hasil grid yang diolah menggunakan *software* ArcMap 10.8 dan didapatkan hasil grid penelitian sebanyak 169 titik pengamatan. Hasil grid penelitian ditunjukkan pada gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Grid atau Titik Pengukuran Wilayah Bali dengan Ukuran $0,0527^\circ \times 0,0527^\circ$ atau $5,8482 \text{ km}^2 \times 5,8482 \text{ km}^2$.



Gambar 4.3 Grid atau Titik Pengukuran Wilayah Bali di Darat.

Titik grid dipilih yang berada di darat karena dalam perhitungan percepatan getaran tanah (PGA) nanti hanya menghitung grid atau titik pengukuran yang berada di darat saja.

Selanjutnya, tahap ketiga dalam penelitian ini adalah melakukan perhitungan untuk menentukan nilai percepatan getaran tanah maksimum (*Peak Ground Acceleration*) dengan memanfaatkan perangkat lunak Microsoft Excel 2021. Pada tahap ini, terdapat beberapa langkah lanjutan dalam proses perhitungan data yaitu:

1. Mengubah satuan parameter magnitudo permukaan (M_s) ke magnitudo momen (M_w) dengan persamaan berikut:

$$\log M_o = 1,5 M_s + 16,1 \quad (4.1)$$

dimana : M_s = Magnitudo Permukaan

$$M_w = (\log M_o) / 1,5 - 10.73 \quad (4.2)$$

2. Menghitung jarak antara episenter dan hiposenter terhadap setiap titik grid pada wilayah penelitian. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk mengetahui seberapa jauh masing-masing titik penelitian dari sumber gempa, baik secara horizontal (episenter) maupun kedalaman (hiposenter). Perhitungan jarak tersebut dilakukan dengan menggunakan rumus tertentu yang telah disesuaikan dengan kebutuhan analisis.

- a. Menghitung Jarak Episenter

$$\Delta = \cos^{-1}[\cos\theta_E \cos\theta_S + \sin\theta_E \sin\theta_S \cos(\phi_S - \phi_E)] \quad (4.1)$$

dimana :

Δ = Jarak episenter (derajat)

θ_E = Lintang lokasi gempa (derajat)

θ_S = Lintang titik pengamatan (derajat)

$\emptyset_E$ = Bujur lokasi gempa (derajat)

$\emptyset_S$ = Bujur titik pengamatan (derajat)

- b. Menghitung Jarak Hiposenter sesuai dengan persamaan Zhao

$$r = x + c \exp(dM_w)$$

dengan:

$$c = 0.0055$$

$$d = 1.080$$

x = Jarak episenter ke titik pengamatan (km)

M_w = Magnitudo momen

3. Setelah mendapatkan jarak episenter dan hiposenter kemudian menghitung nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA) dari setiap peristiwa gempa bumi dengan menghitung menggunakan fungsi atenuasi Zhao dan modifikasi Zhao.
4. Adapun proses modifikasi menggunakan *software* Visual Studio Code dan Matlab R2024a dengan langkah-langkah sebagai berikut:
 - a. Membuat *script* di *software* Visual Studio Code dan memastikan setiap penulisan *script* benar agar dapat dibaca saat proses runing.
 - b. Menginputkan *script* sesuai dengan output yang dibutuhkan. Disini digunakan *script* untuk memodifikasi koefisien menggunakan metode regresi nonlinier berdasarkan persamaan Zhao dengan parameter gempa seperti jarak episenter, magnitudo (M_w), kedalaman, jenis *fault*, dan parameter tambahan yaitu nilai PGA yang sudah dihitung sesuai dengan persamaan asli untuk keakurasian modifikasi. Data pada parameter-

parameter tersebut jadikan satu file Excel (csv), kemudian diperintahkan pada *script* untuk membacanya.

- c. Adapun *script* yang sudah pada *software* Visual Studio Code terdiri dari empat step dengan perintah yang berbeda tiap stepnya dengan step pertama dalam *script* yang dibuat untuk memodifikasi ini adalah membaca data gempa dari file (.csv) menggunakan *readtable* dengan variabel yang diambil:

- M_w = Magnitudo gempa
- R = Jarak sumber ke stasiun
- H = Kedalaman sumber gempa
- $\log PGA$ = Nilai PGA sesuai persamaan asli
- F_R = Parameter *reserve-fault* hanya digunakan untuk *shallow crustal event (reserve-faulting)*, selain itu nilainya 0.
- S_I = Parameter sumber tektonik digunakan hanya untuk *interface event*, selain itu nilainya 0.

Untuk step kedua merupakan proses pemodelan hubungan antara parameter gempa dan PGA melalui regresi nonlinier berbasis metode kuadrat terkecil. Model yang dibangun menggunakan struktur yang serupa dengan formulasi Zhao (2006), di mana PGA dipengaruhi oleh magnitudo (M_w), jarak (r), kedalaman (h), serta dua variabel *dummy* (F_R dan S_I). Metode regresi nonlinier kuadrat terkecil diterapkan dengan cara meminimalkan kesalahan kuadrat rata-rata berbobot antara nilai PGA observasi dan prediksi. Selain itu, ada penambahan bobot dan penalti untuk regularisasi. Dalam upaya meningkatkan sensitivitas model terhadap

kondisi tertentu, *script* menambahkan bobot pada data gempa kerak dangkal dan gempa dengan jarak kurang dari 20 km. Strategi pembobotan ini merupakan teknik penting dalam regresi kuadrat terkecil berbobot (*Weighted Least Squares*), yang mengatur agar model lebih mewakili tujuan prediksi. Selain itu, fungsi objektif juga ditambahkan penalti terhadap parameter untuk membatasi kompleksitas model (regularisasi). Ini mengurangi risiko *overfitting* terhadap data latih dan memastikan model yang dihasilkan tetap general dan stabil.

Setelah optimasi selesai, langkah ketiga *script* melakukan pengecekan apakah optimasi berhasil konvergen. Jika tidak, muncul peringatan, tapi jika berhasil maka hasil kalibrasi koefisien Zhao (2006) untuk PGA ditampilkan dengan format yang rapi. Parameter yang ditampilkan mencakup koefisien untuk magnitudo, jarak, kedalaman, serta koefisien khusus untuk tipe gempa dangkal dan subduksi

Langkah keempat, *script* menampilkan visualisasi perbandingan antara koefisien asli Zhao dan hasil modifikasi dari optimasi tadi. Ini dilakukan dengan diagram batang yang mengelompokkan masing-masing koefisien supaya kita gampang lihat mana yang berubah signifikan. Label koefisien jelas ditampilkan di sumbu X dan grafiknya juga diberi judul serta legenda supaya mudah dimengerti. Visualisasi ini penting supaya pengguna tahu dampak kalibrasi terhadap model awal.

5. Menghitung nilai percepatan tanah maksimum (PGA) untuk setiap kejadian gempa bumi pada masing-masing titik grid menggunakan fungsi atenuasi Zhao dan modifikasi Zhao (persamaan 2.10).

6. Membuat peta percepatan getaran tanah (PGA) maksimum yang sesuai dengan nilai percepatan getaran tanah (PGA) maksimum yang telah dicari pada setiap kejadian gempabumi dan grid yang digunakan.
7. Menghitung nilai kepadatan penduduk wilayah Bali dengan menggunakan rumus :

$$\text{Kepadatan Penduduk} = \frac{\text{Jumlah Penduduk (jiwa)}}{\text{Luas Wilayah (km}^2\text{)}}$$

8. Melakukan *scoring* dari data yang telah diperoleh berdasarkan tabel 2.3 dan membuat peta risiko bahaya akibat gempa bumi di wilayah Bali dengan menggunakan (persamaan 2.11).

4.2 Analisis Data dan Pembahasan

Pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia di bagian selatan Indonesia menghasilkan interaksi tektonik yang sangat kompleks, yang turut memengaruhi geologi Pulau Bali. Proses subduksi antara kedua lempeng tersebut menyebabkan terbentuknya zona seismotektonik yang sangat aktif di kawasan selatan Bali.

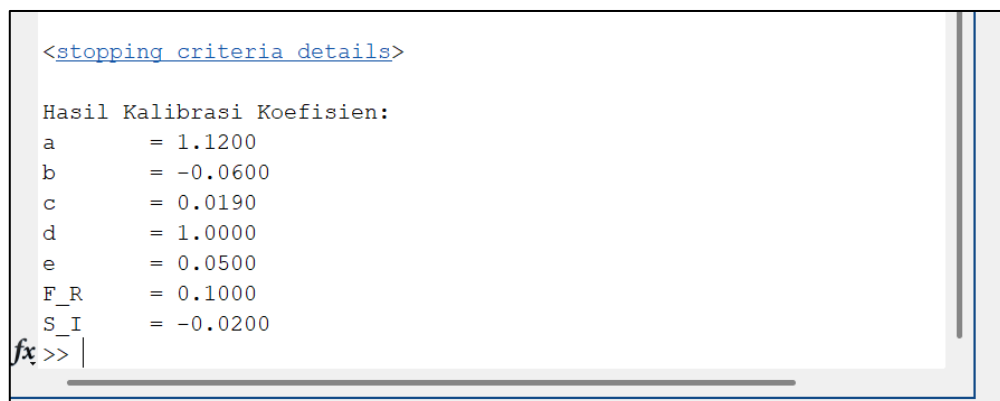
Di bagian selatan Pulau Bali, terjadi proses subduksi antara Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara dan menunjam ke bawah Lempeng Eurasia. Proses subduksi ini menghasilkan tektonik yang sangat aktif, yang dapat memicu gempa bumi dengan kedalaman dangkal hingga menengah. Gempa-gempa tersebut sering kali terasa hingga ke permukaan dan dapat memiliki dampak yang cukup besar di wilayah Bali, terutama di kawasan pesisir selatan. Selain itu, aktivitas subduksi ini juga meningkatkan potensi tsunami, yang memperburuk risiko bencana bagi masyarakat yang tinggal di sepanjang pantai selatan Bali. Wilayah yang dekat

dengan zona subduksi ini cenderung lebih rawan terhadap gempa bumi besar, yang bisa berpotensi merusak infrastruktur dan menyebabkan korban jiwa (Pusgen, 2017).

Selain subduksi, wilayah ini juga dipengaruhi oleh sesar-sesar aktif yang melintang di daratan Bali, seperti Sesar Naik Flores (*Flores Back Arc Thrust*) yaitu salah satu sesar utama di Bali, yang membentang dari Laut Utara Flores hingga Laut Utara Bali. Sesar ini telah memicu beberapa gempa besar di masa lalu, seperti gempa M7.0 pada tahun 1815 dan M6.5 pada tahun 1976. Selain itu, terdapat sesar-sesar lokal lain di daratan Bali, seperti Sesar Negara di barat daya Bali, Sesar Seririt di utara Bali, serta Sesar Culik dan Sesar Tejakula di timur laut Bali, yang berpotensi menyebabkan gempa lokal. Kompleksitas tektonik ini menjadikan Bali sebagai daerah yang rawan bencana geologi, dengan risiko yang dapat menimbulkan kerusakan besar bagi infrastruktur dan keselamatan masyarakat (Daryono, 2017).

4.2.1 Analisis Hasil Modifikasi

Dari hasil script yang telah dibuat, dengan lima tahap bagian kemudian script dirunning menggunakan software Matlab R2024a. Adapun hasil outputnya adalah sebagai berikut:



```

<stopping criteria details>

Hasil Kalibrasi Koefisien:
a      = 1.1200
b      = -0.0600
c      = 0.0190
d      = 1.0000
e      = 0.0500
F_R    = 0.1000
S_I    = -0.0200
fx >> |
  
```

Gambar 4.4 Hasil Modifikasi pada *Command Window* Matlab R2024a.

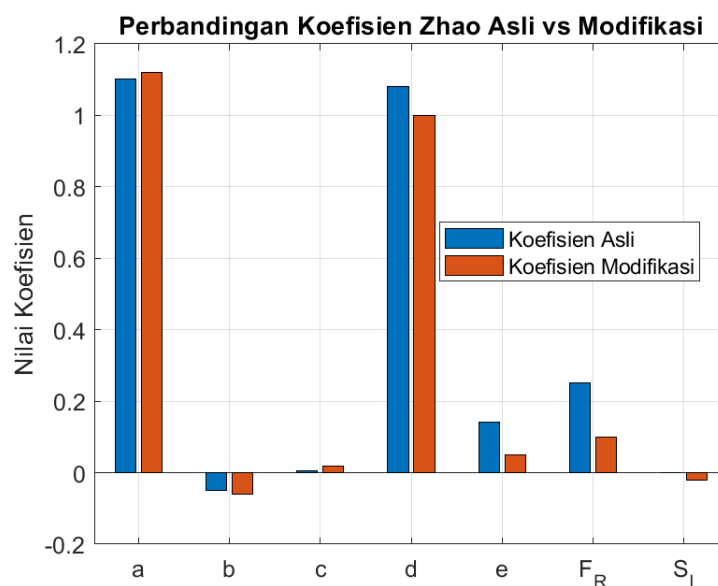
Pada bagian script ketiga telah dijelaskan bahwa program melakukan pengecekan, apakah optimasi berhasil konvergen atau tidak. Jika tidak, akan muncul peringatan, tapi jika berhasil maka hasil kalibrasi koefisien Zhao (2006) untuk PGA ditampilkan. Pada gambar 4.4 adalah hasil running yang berhasil menghasilkan output berupa modifikasi koefisien.

Pada modifikasi ini didapatkan hasil koefisien a, b, c, d, e, F_R dan S_I . Berikut adalah perbandingan dari koefisien asli dan modifikasi.

Tabel 4.1 Perbedaan Koefisien Zhao *et al* (2006) dan Hasil Modifikasi.

Koefisien Zhao	Koefisien Modifikasi
$a = 1.101$	$a = 1.1200$
$b = -0.05064$	$b = -0.0600$
$c = 0.0055$	$c = 0.0190$
$d = 1.080$	$d = 1.000$
$e = 0.01412$	$e = 0.0500$
$F_R = 0.251$	$F_R = 0.1000$
$S_I = 0.000$	$S_I = -0.0200$

Pada saat dilakukan running, output koefisien bukan hanya muncul pada Command Window, tetapi juga dalam bentuk grafik. Berikut adalah hasil perbandingan koefisien dalam bentuk grafik pada Matlab R2024a.



Gambar 4.5 Perbandingan Koefisien Zhao *et al* (2006) dan Modifikasi.

Gambar tersebut merupakan grafik batang (*bar chart*) yang membandingkan nilai koefisien model prediksi PGA (*Peak Ground Acceleration*) berdasarkan model Zhao asli dan versi yang telah dimodifikasi. Sumbu horizontal (x) menunjukkan nama-nama koefisien model, seperti a, b, c, d, e, serta dua kategori penting F_R (gempa *shallow crustal*) dan S_I (gempa subduksi *interface*). Sementara itu, sumbu vertikal (y) menunjukkan nilai dari masing-masing koefisien.

Berdasarkan hasil perbandingan nilai koefisien asli dan modifikasi dari model prediksi PGA Zhao *et al.* (2006), terlihat adanya penyesuaian signifikan yang mencerminkan karakteristik data gempa yang digunakan dalam proses kalibrasi. Nilai koefisien a mengalami sedikit peningkatan dalam model modifikasi. Hal ini mencerminkan bahwa data gempa yang digunakan didominasi oleh kejadian dengan magnitudo relatif besar, sehingga model memberikan bobot yang lebih tinggi terhadap kontribusi magnitudo terhadap percepatan tanah. Sebaliknya, nilai koefisien b, yang berkaitan dengan logaritma jarak episenter terhadap lokasi pengamatan, sedikit menurun nilainya. Penurunan ini menunjukkan bahwa jarak dalam data tidak terlalu jauh, sehingga pengaruh peluruhan logaritmik jarak terhadap PGA menjadi lebih ringan.

Nilai c, yang mengatur sensitivitas terhadap jarak hiposenter, justru mengalami peningkatan meskipun nilainya tetap kecil. Peningkatan ini menunjukkan bahwa sebagian besar data memiliki sumber gempa yang cukup dekat secara vertikal, sehingga model perlu mengurangi nilai jarak (r) dalam rumus perhitungan. Di sisi lain, nilai d, yang juga berhubungan dengan jarak secara linier, menurun dalam model modifikasi. Penurunan ini bertujuan agar

efek penurunan PGA akibat bertambahnya jarak tidak terlalu tajam, khususnya pada gempa-gempa dengan hiposenter yang dalam namun memiliki magnitudo besar—sehingga kontribusi magnitudo tidak dikompensasi secara berlebihan oleh jarak.

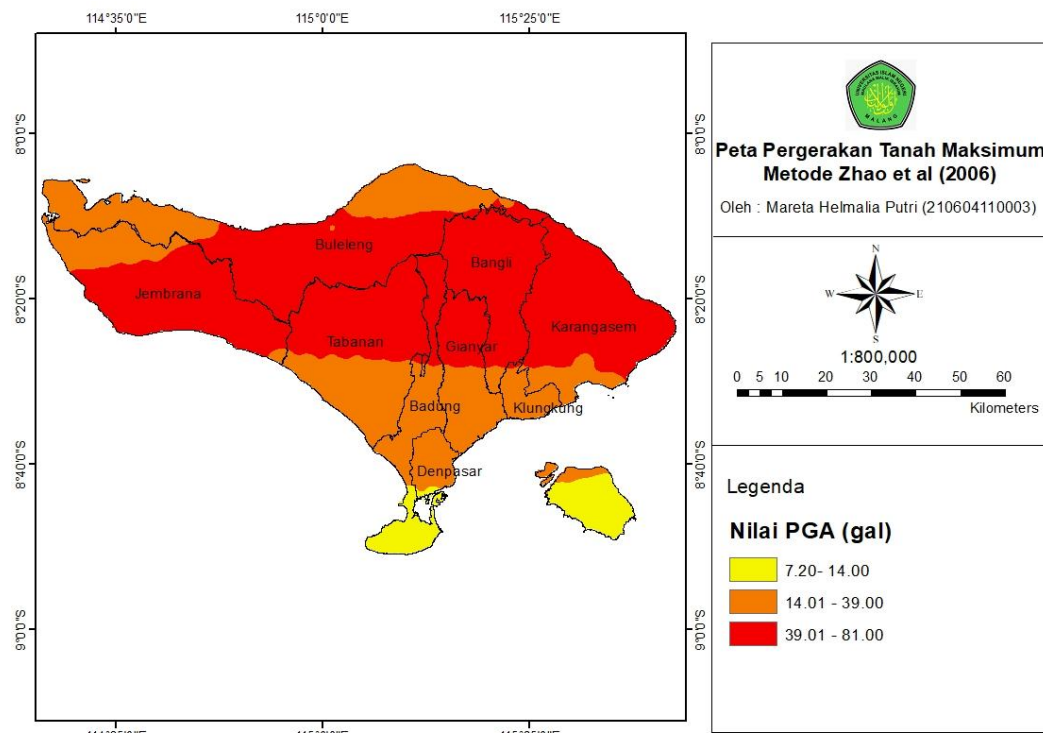
Koefisien e , yang terkait dengan efek lokal kedalaman, mengalami sedikit penurunan. Hal ini berkaitan dengan kondisi kedalaman sumber gempa dalam data yang relatif dangkal atau seragam, sehingga pengaruh amplifikasi lokal dalam model tidak terlalu diperbesar.

Dalam dataset yang digunakan, hanya terdapat 8 gempa *interface* dibandingkan dengan 22 gempa *shallow*. Ketidakseimbangan ini membuat model lebih “percaya” pada pola dari gempa shallow dan menjadikan kontribusi gempa interface sebagai minoritas. Namun, secara keseluruhan, grafik dan tabel diatas menggambarkan bahwa model modifikasi dilakukan dengan menyesuaikan bobot atau sensitivitas terhadap beberapa parameter, terutama dalam membedakan pengaruh antara tipe gempa, yang mungkin bertujuan untuk memberikan prediksi PGA yang lebih sesuai dengan data gempa terkini atau spesifik di suatu wilayah.

4.2.2 Analisis Peta Percepatan Tanah Maksimum

Nilai percepatan getaran tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) didapatkan dari hasil perhitungan rumus empiris atau fungsi atenuasi menggunakan metode Zhao *et al* (2006) dan modifikasi koefisien Zhao. Data kegempaan yang digunakan adalah dengan titik PGA tertinggi yaitu gempa yang terjadi pada tahun 8 November 2017 di Karangasem, Bali. Adapun hasil dari

perhitungan pada persamaan 2.10 dan 2.11 menghasilkan nilai PGA yang mana disajikan dalam gambar peta berikut.



Gambar 4.6 Peta Pergerakan Tanah Maksimum Metode Zhao *et al* (2006).

Berdasarkan peta percepatan getaran tanah maksimum (PGA) yang menggunakan metode Zhao *et al* (2006) di Pulau Bali, distribusi nilai PGA menunjukkan tingkat kerawanan gempa yang bervariasi di berbagai wilayah. Wilayah dengan nilai PGA antara 7,20 hingga 14,00 gal yang ditunjukkan dengan warna kuning. Di wilayah ini, getaran gempa terasa lemah, hanya dirasakan oleh sebagian kecil masyarakat dan tidak menyebabkan kerusakan bangunan, seperti yang terlihat di wilayah sebagian selatan Bali. Selanjutnya, daerah yang memiliki nilai PGA berkisar antara 14,01 hingga 39,00 gal ditandai dengan warna oranye. Nilai ini mengindikasikan intensitas gempa sekitar IV MMI, di mana getaran mulai terasa oleh banyak orang dan dapat menyebabkan kerusakan ringan seperti retakan kecil pada dinding. Wilayah yang termasuk

dalam kategori ini antara lain Klungkung, Denpasar, Gianyar selatan, Tabanan selatan dan Badung tengah. Adapun daerah dengan warna merah memiliki nilai PGA tertinggi, yakni antara 39,01 hingga 81,00 gal, yang mencerminkan intensitas gempa V MMI. Pada intensitas ini, getaran dirasakan kuat oleh hampir seluruh penduduk, serta berpotensi menyebabkan kerusakan struktural seperti retak besar, pergeseran elemen bangunan, hingga jatuhnya benda berat. Wilayah yang tergolong dalam zona risiko tinggi ini mencakup bagian utara dan timur Bali seperti Karangasem, Buleleng, Bangli, Badung utara Gianyar utara, dan sebagian besar Tabanan dan Jembrana.

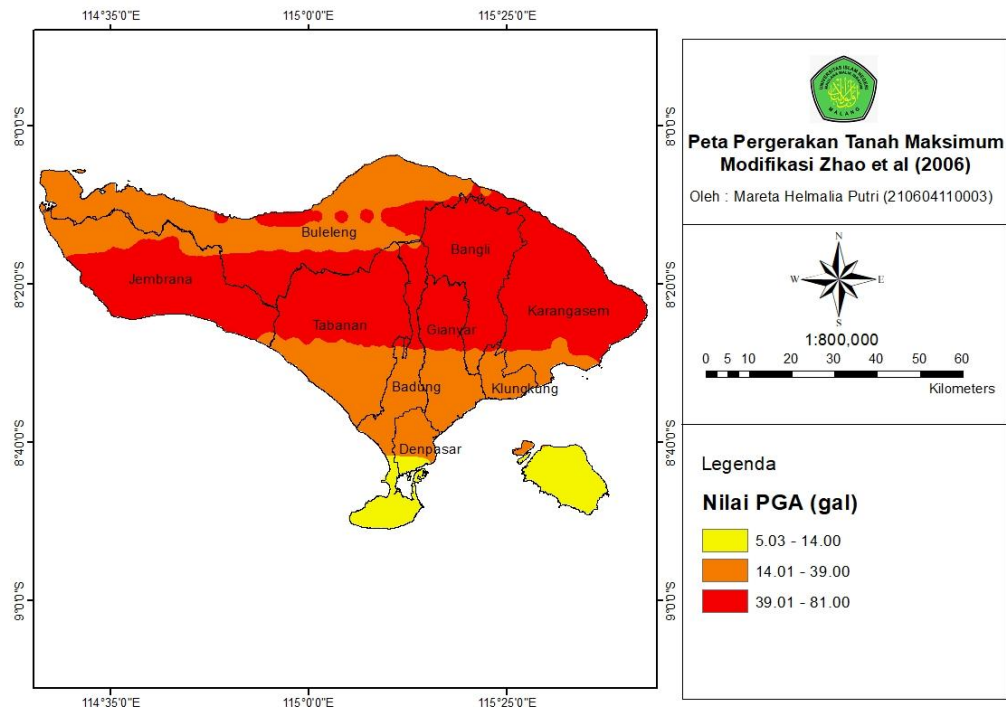
Hasil nilai PGA (Percepatan Tanah Maksimum) sesuai dengan peta pada gambar 4.6 kemudian di konversi ke skala MMI yang ditunjukkan pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Klasifikasi Getaran Tanah Maksimum Wilayah Bali dengan Metode Zhao *et al* (2006).

No.	Wilayah (Kab/Kota)	PGA (gal)	Intensitas (MMI)
1.	Badung, Klungkung, Denpasar	14.01 – 39.0	IV
2.	Karangasem, Bangli, Buleleng, Jembrana, Gianyar, Tabanan	39.01 – 81.0	V

Untuk wilayah Kabupaten Badung, Klungkung dan Kota Denpasar memiliki PGA 14.02 – 39.0 gal yang mana masuk ke dalam intensitas IV MMI. Sedangkan Kabupaten Karangasem, Bangli, Buleleng, Jembrana, Gianyar dan Tabanan dengan nilai PGA sebesar 39.01 – 81.0 masuk ke dalam skala intensitas

V MMI. Berikutnya adalah peta pergerakan tanah maksimum sesuai dengan koefisien modifikasi yang telah diperoleh dari proses running.



Gambar 4.7 Peta Pergerakan Tanah Maksimum Modifikasi Zhao *et al* (2006).

Berdasarkan peta percepatan getaran tanah maksimum (PGA) di pulau Bali dengan modifikasi Zhao *et al* (2006), menunjukkan adanya perubahan dalam tingkat kerawanan gempa dibandingkan dengan metode aslinya. Zona pertama adalah wilayah dengan nilai PGA rendah, berkisar antara 5,03 hingga 14,00 gal yang ditunjukkan dengan warna kuning. Zona ini memiliki intensitas gempa sekitar II–III MMI, getaran dapat dirasakan di dalam rumah, sensasi getaran seperti ada truk yang sedang melintas, serta tidak menimbulkan kerusakan bangunan. Wilayah ini meliputi Sebagian kecil selatan Bali, seperti Kota Denpasar bagian selatan, Nusa Dua, dan sebagian Badung selatan, yang secara geologis didominasi oleh batuan keras dan relatif stabil.

Zona kedua adalah wilayah dengan nilai PGA sedang, yaitu antara 14,01 hingga 39,00 gal dan ditandai dengan warna oranye. Zona ini

diperkirakan memiliki intensitas sekitar IV MMI, di mana getaran mulai terasa jelas dan dapat menyebabkan gangguan ringan seperti goyangan benda ringan serta retakan kecil pada bangunan yang tidak tahan gempa. Wilayah yang masuk dalam kategori ini meliputi sebagian besar daerah utara dan tengah ke selatan seperti Gianyar, Tabanan, Klungkung, Buleleng dan Denpasar bagian utara, serta sebagian Jembrana dan Badung.

Sementara itu, zona ketiga adalah wilayah dengan nilai PGA tinggi, antara 39,01 hingga 81,00 gal dan digambarkan dengan warna merah. Zona ini menunjukkan intensitas gempa berkisar V, di mana getaran terasa kuat dan berpotensi menimbulkan kerusakan sedang hingga serius, terutama pada bangunan yang tidak dirancang tahan gempa. Wilayah ini meliputi bagian tengah Bali, seperti Karangasem, Bangli, sebagian besar Tabanan, Gianyar, Jembrana, serta sebagian kecil wilayah Buleleng.

Hasil nilai PGA (Percepatan Tanah Maksimum) sesuai dengan peta pada gambar 4.7 kemudian di konversi ke skala MMI yang ditunjukkan pada tabel 4.3.

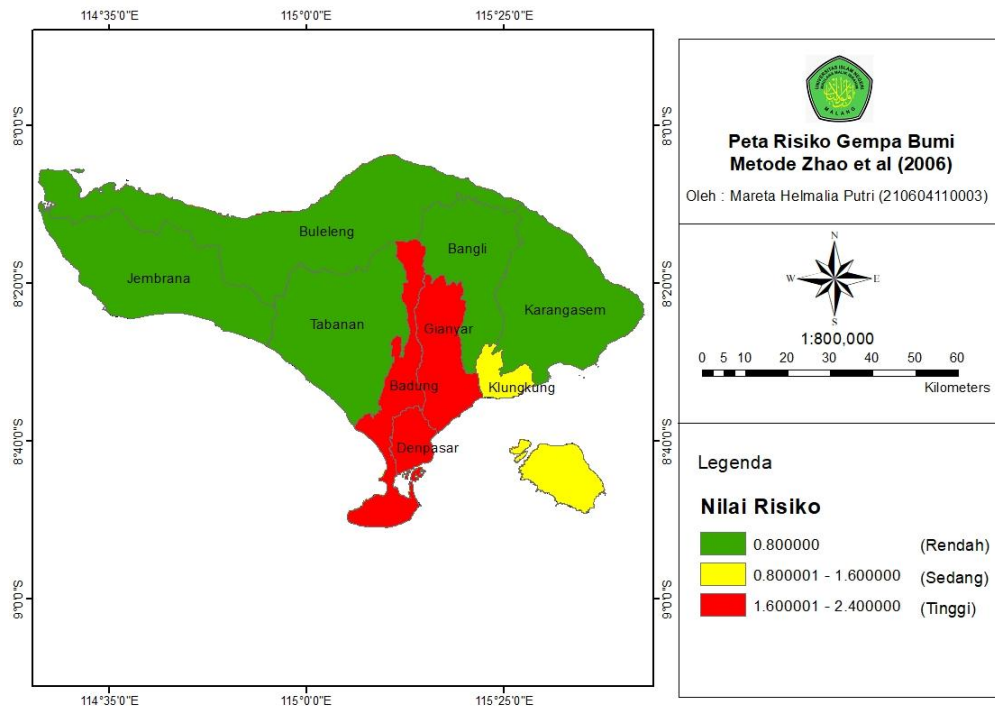
Tabel 4.3 Klasifikasi Getaran Tanah Maksimum Wilayah Bali dengan Metode Modifikasi Zhao *et al* (2006).

No.	Wilayah (Kab/Kota)	PGA (gal)	Intensitas (MMI)
1.	Badung, Klungkung, Denpasar, Buleleng, Gianyar, Tabanan	14.01 – 39.0	IV
2.	Karangasem, Bangli, Jembrana	39.01 – 81.0	V

4.2.3 Analisis Peta Risiko Bencana Gempa Bumi

Penentuan indikator tingkat risiko bencana gempabumi yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan 3 (tiga) faktor, yaitu faktor bahaya (*hazard*), faktor kerentanan (*vulnerability*), dan faktor ketahanan/kapasitas (*capacity*) yang kemudian diklasifikasikan menjadi 3 kelas yakni tinggi, sedang dan rendah. Menurut BNPB (2018), klasifikasi tingkat risiko bencana dapat dilakukan dengan skoring yang dapat dilihat pada tabel 2.3.

Faktor bahaya (*hazard*) menggunakan indikator nilai PGA maksimum. Nilai PGA maksimum bernilai rendah menggunakan skor 4, sedangkan nilai PGA maksimum bernilai sedang menggunakan skor 8, dan nilai PGA maksimum tinggi menggunakan skor 12. Faktor kerentanan (*vulnerability*) menggunakan indikator nilai kepadatan penduduk tahun 2017 dimana rentang nilai <500 jiwa yang berisiko/km² memiliki skor 0,4, nilai 500-1000 jiwa yang berisiko/km² memiliki skor 0,8, dan nilai >1000 jiwa yang berisiko/km² memiliki skor 12. Kemudian untuk faktor ketahanan/kapasitas (*capacity*) menggunakan faktor IPM (Indeks Pembangunan Manusia) tahun 2017 yang didapatkan dari BPS, dimana nilai <55 kapasitas memiliki skor 1, nilai pada rentang 55-85 memiliki skor 2 dan nilai >85 memiliki skor 3. Peta resiko akibat bencana gempabumi di wilayah Bali menggunakan metode Zhao *et al* (2006) dan modifikasi Zhao dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.8 Peta Risiko Gempa Bumi Metode Zhao *et al* (2006).

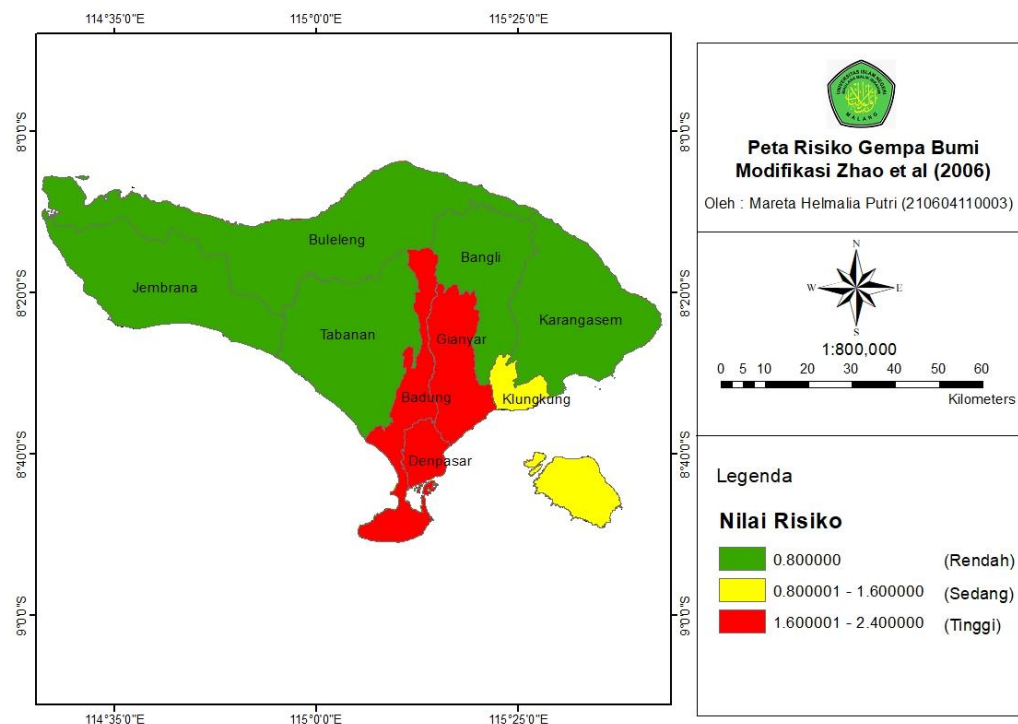
Berdasarkan hasil pemetaan risiko gempa bumi di Pulau Bali dengan pendekatan modifikasi model Zhao *et al.* (2006), wilayah Bali diklasifikasikan ke dalam tiga tingkat risiko gempa, yaitu rendah, sedang, dan tinggi, yang masing-masing direpresentasikan oleh warna hijau, kuning, dan merah pada peta. Klasifikasi ini ditentukan berdasarkan nilai risiko yang diperoleh dari kombinasi percepatan tanah maksimum (PGA) dengan faktor-faktor kerentanan lainnya, seperti kedalaman, jarak sumber gempa, dan karakteristik lokal.

Zona risiko rendah (warna hijau), dengan nilai risiko antara 0,800000 ke bawah, meliputi sebagian besar wilayah barat dan utara Bali, seperti Jembrana, Tabanan, Buleleng, Karangasem, dan Bangli. Wilayah ini umumnya memiliki kondisi geologi yang lebih stabil, berada jauh dari sumber gempa utama, serta memiliki kepadatan penduduk yang relatif rendah. Faktor-faktor tersebut menyebabkan risiko relatif kecil terhadap dampak gempa, baik dari sisi infrastruktur maupun jumlah penduduk terdampak.

Zona risiko sedang (warna kuning), dengan nilai risiko antara 0,800001 hingga 1,600000, meliputi sebagian wilayah Klungkung dan Nusa Penida. Meskipun tidak sebesar wilayah risiko tinggi, daerah ini tetap memiliki potensi dampak kerusakan, terutama jika pembangunan tidak mengikuti standar tahan gempa atau jika terdapat lapisan tanah lunak yang dapat memperkuat getaran.

Sementara itu, zona risiko tinggi (warna merah), dengan nilai risiko antara 1,600001 hingga 2,400000, mencakup sebagian besar wilayah tengah dan selatan Bali, seperti Kota Denpasar, Badung, Gianyar, dan sebagian Klungkung. Daerah-daerah ini tidak hanya berada dekat dengan sumber gempa seperti zona subduksi selatan Bali, tetapi juga memiliki tingkat kerentanan yang tinggi akibat padatnya penduduk, infrastruktur penting, dan aktivitas ekonomi yang terkonsentrasi di wilayah ini.

Selanjutnya yaitu peta risiko gempa berdasarkan perhitungan PGA dengan modifikasi Zhao *et al* (2006) sebagai berikut:



Gambar 4.9 Peta Risiko Gempa Bumi Modifikasi Zhao *et al* (2006).

Hasil pemodelan risiko gempa bumi menggunakan metode Zhao *et al.* (2006) dan versi yang telah dimodifikasi menunjukkan skor risiko yang serupa, yakni berada pada skor input sebesar 4. Kesamaan ini disebabkan oleh nilai percepatan tanah maksimum (PGA) yang dihasilkan oleh kedua model berada dalam kisaran yang sama dan tergolong rendah. Berdasarkan klasifikasi kelas bahaya gempa dalam Tabel 2.1 (Oktariadi, 2009 dengan modifikasi oleh Hidayat, 2014), nilai PGA yang dihasilkan dari kedua model berada pada rentang $< 0,15$ g atau < 170 gal, yang setara dengan intensitas MMI II hingga V dan dikategorikan dalam kelas bahaya kecil. Dengan demikian, walaupun terdapat perbedaan parameter dalam pemodelan Zhao dan versi modifikasinya, klasifikasi PGA menurut standar intensitas dan percepatan yang digunakan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan skor risiko akhir, karena nilai-nilai tersebut masih dalam ambang batas kelas bahaya yang sama.

Tabel 4.4 Tabel Kelas Indikator Bahaya Gempabumi (Oktariadi, 2009 dengan modifikasi Hidayat 2014).

No.	Kelas Bahaya	Intensitas (MMI)	Nilai Percepatan (gal) (cm/s ²)
1.	Kecil	<VI	<170
2.	Sedang	VI - VII	171 – 256
3	Tinggi	>VII	>257

Berdasarkan klasifikasi kelas indikator bahaya gempabumi menurut Oktariadi (2009) dengan modifikasi oleh Hidayat (2014), diketahui bahwa nilai percepatan tanah (PGA) dapat dikategorikan ke dalam tiga kelas bahaya, yaitu kecil (<170 gal), sedang (171–256 gal), dan besar (>257 gal). Hasil perhitungan

PGA baik dengan menggunakan metode Zhao *et al.* (2006) maupun versi modifikasinya menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah di Bali tergolong dalam kategori bahaya rendah, karena nilai PGA yang dihasilkan masih berada pada rentang <170 gal. Hal ini menyebabkan pada peta risiko gempa, wilayah yang memiliki kepadatan penduduk rendah seperti Jembrana, Buleleng, Bangli, Karangasem dan Tabanan diklasifikasikan dalam zona hijau (risiko rendah). Sementara itu, daerah dengan kepadatan penduduk sedang seperti Klungkung ditandai dengan warna kuning (risiko sedang), dan wilayah dengan konsentrasi penduduk tinggi seperti Denpasar, Badung, dan Gianyar ditampilkan dalam warna merah (risiko tinggi). Ini menunjukkan bahwa nilai risiko gempa tidak hanya dipengaruhi oleh percepatan tanah semata, tetapi juga oleh faktor sosial ekonomi seperti kepadatan penduduk yang menjadi komponen dalam penghitungan risiko secara keseluruhan.

Risiko gempa tinggi di Badung, Gianyar, dan Denpasar mengindikasikan kebutuhan mendesak untuk memperkuat bangunan dan infrastruktur di wilayah ini, mengingat kepadatan penduduk dan kegiatan ekonomi yang tinggi. Penguatan standar bangunan tahan gempa dan sistem mitigasi bencana sangat diperlukan di wilayah ini. Wilayah yang memiliki risiko sedang, tetap memerlukan perhatian dalam hal mitigasi, karena gempa dengan intensitas sedang pun dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan yang tidak tahan gempa. Wilayah yang memiliki risiko lebih rendah, namun upaya mitigasi tetap penting untuk mengurangi dampak jika terjadi gempa, meskipun peluangnya lebih kecil.

Berdasarkan analisis terhadap peta risiko gempa bumi menggunakan metode Zhao *et al.* (2006), baik versi asli maupun modifikasi, tampak bahwa wilayah selatan Bali seperti Denpasar, Badung, dan Gianyar tergolong ke dalam zona dengan tingkat risiko gempa yang tinggi. Representasi ini dapat dianggap valid dan relevan mengingat secara geologis wilayah selatan Bali berada dekat dengan zona subduksi Sunda, di mana lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah lempeng Eurasia. Zona ini dikenal sebagai salah satu sumber utama gempa besar di Indonesia (PVMBG, 2017). Selain itu, wilayah selatan Bali umumnya tersusun oleh tanah aluvium muda dan endapan kuartar yang bersifat lunak, sehingga cenderung mengalami amplifikasi gelombang gempa yang menyebabkan percepatan tanah (PGA) lebih tinggi dibandingkan wilayah utara yang relatif tersusun atas batuan keras (Daryono dan BMKG, 2020). Ditambah lagi, data historis menunjukkan bahwa sebagian besar gempa signifikan yang terjadi di Bali berasal dari zona selatan, seperti gempa pada tahun 2011 dan 20224 yang berdampak kuat di wilayah Denpasar dan sekitarnya (USGS, 2025). Dengan mempertimbangkan faktor-faktor geologi, litologi, dan sejarah kegempaan tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa peta risiko gempa ini cukup representatif dalam menunjukkan bahwa wilayah selatan Bali memang lebih berisiko terhadap gempa bumi dibandingkan wilayah utara.

Salah satu indikator penting dalam menganalisis risiko bencana, termasuk gempa bumi adalah *capacity* yang dapat diperoleh dari data Indeks Pembangunan Manusia. IPM menggambarkan tingkat kesejahteraan masyarakat dari aspek pendidikan, kesehatan, dan ekonomi yang secara tidak langsung mencerminkan kapasitas suatu wilayah dalam menghadapi bencana. Wilayah

dengan IPM rendah umumnya lebih rentan terhadap dampak bencana karena keterbatasan akses terhadap informasi, layanan kesehatan, dan infrastruktur yang memadai. Meskipun demikian, IPM yang tinggi tidak serta-merta menjamin minimnya korban saat terjadi bencana. Jika suatu daerah dengan IPM tinggi berada di zona bahaya gempa yang tinggi dan memiliki kepadatan penduduk yang besar serta bangunan yang tidak tahan gempa, maka potensi korban tetap ada. Daerah dengan IPM tinggi memiliki kapasitas sosial dan ekonomi yang lebih baik untuk mitigasi dan tanggap bencana, sehingga risiko dampak (korban/kegagalan fungsi sosial) bisa lebih rendah dalam skala relatif. Namun, bahaya gempa yang tinggi tetap dominan dalam menentukan jumlah korban, IPM hanya memoderasi, bukan menghentikan sepenuhnya kemungkinan korban.

Oleh karena itu, meskipun daerah tertentu memiliki IPM tinggi, bila berada di zona gempa kuat dan memiliki bangunan tidak tahan gempa atau densitas penduduk tinggi, potensi korban tidak bisa diabaikan. Karena risiko bencana tidak hanya dipengaruhi oleh aspek sosial seperti IPM, tetapi juga oleh kekuatan bahaya (*hazard*) dan kerentanan fisik wilayah tersebut. Dengan demikian, IPM dapat digunakan sebagai salah satu komponen dalam menilai kerentanan sosial masyarakat, namun tetap perlu dipadukan dengan analisis bahaya dan kapasitas untuk memperoleh gambaran risiko secara menyeluruh.

Dengan peta risiko ini diharapkan dapat memberikan dasar yang lebih baik bagi pemerintah dan *stakeholder* dalam perencanaan tata ruang, pembangunan infrastruktur tahan gempa, dan pengalokasian anggaran mitigasi bencana. Risiko rendah di daerah seperti Tabanan dan Jembrana misalnya, tidak berarti tanpa

potensi bahaya, tetapi menunjukkan bahwa prioritas intervensi bisa diarahkan terlebih dahulu ke wilayah dengan kombinasi hazard dan kerentanan yang lebih ekstrem. Berikut adalah data historis gempa bumi merusak yang pernah terjadi di wilayah Bali:

1. Gempa berkekuatan M 4,9 mengguncang Gianyar dan sekitarnya pada 7 September 2024, menyebabkan lima bangunan mengalami kerusakan ringan, termasuk Balai Banjar Bukit Sari, SDN 3 Sidan, dan kantor Dinas Pariwisata Gianyar. Kerusakan juga dilaporkan di Denpasar dan Badung, berupa retakan tembok dan genteng jatuh.
2. Gempa Gianyar, 21 September 2024 (M 4,8), menyebabkan kerusakan pada 26 bangunan, termasuk rumah warga, sekolah, dan pura. Kerusakan paling banyak terjadi di Kabupaten Badung dan Gianyar, dengan dampak seperti atap sekolah jatuh dan tembok pembatas roboh.
3. Gempa Badung, 16 Juli 2019 (M 5,8), menyebabkan kerusakan di 23 titik di Kabupaten Badung, terutama di wilayah Kuta Selatan. Kerusakan meliputi runtuhnya genteng dan retaknya tembok bangunan, termasuk sekolah dan rumah warga.
4. Gempa Bali, 21 Januari 1917 (M 6,6), dikenal sebagai "Gejer Bali", gempa ini menyebabkan sekitar 1.500 orang meninggal dunia, merusak 64.000 rumah, dan memicu tsunami setinggi dua meter di Klungkung dan Benoa.

Gempa bumi merupakan salah satu bentuk bencana alam yang tidak dapat diprediksi secara pasti oleh manusia. Guncangan yang terjadi secara tiba-tiba ini dapat menimbulkan kerusakan besar, memakan korban jiwa, serta mengubah kondisi geografis dan sosial suatu wilayah dalam sekejap.

Ketidakmampuan manusia untuk mengetahui kapan dan di mana gempa akan terjadi menunjukkan keterbatasan ilmu pengetahuan dibandingkan dengan kekuasaan Allah. Meskipun ilmu pengetahuan telah berkembang, hingga saat ini tidak ada teknologi yang mampu memastikan kapan dan di mana gempa akan terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa ada batas pada kemampuan manusia, dan bahwa kejadian-kejadian seperti ini adalah bagian dari ketetapan Allah SWT sebagai bentuk ujian bagi hamba-Nya. Dalam Al-Qur'an, Allah telah mengingatkan bahwa musibah merupakan bagian dari ujian hidup. Sebagaimana firman-Nya dalam Surah Al-Baqarah (2): 155-157:

وَلَنَبْلُوَنَّكُمْ بِشَيْءٍ مِّنَ الْخَوْفِ وَالْجُوعِ وَنَقْصٍ مِّنَ الْأَمْوَالِ وَالْأَنْفُسِ وَالثَّمَرَاتِ ۗ
 الَّذِينَ إِذَا أَصَابَتْهُمُ مُّصِيبَةٌ قَالُوا إِنَّا لِلَّهِ وَإِنَّا إِلَيْهِ وَبَشِّرِ الصَّابِرِينَ ﴿١٥٥﴾
 الَّذِينَ إِذَا أَصَابَتْهُمُ مُّصِيبَةٌ قَالُوا إِنَّا لِلَّهِ وَإِنَّا إِلَيْهِ وَبَشِّرِ الصَّابِرِينَ ﴿١٥٦﴾
 الَّذِينَ إِذَا أَصَابَتْهُمُ مُّصِيبَةٌ قَالُوا إِنَّا لِلَّهِ وَإِنَّا إِلَيْهِ وَبَشِّرِ الصَّابِرِينَ ﴿١٥٧﴾

Artinya; “Kami pasti akan mengujimu dengan sedikit ketakutan dan kelaparan, kekurangan harta, jiwa, dan buah-buahan. Sampaikanlah (wahai Nabi Muhammad,) kabar gembira kepada orang-orang sabar (155). (yaitu) orang-orang yang apabila ditimpa musibah, mereka mengucapkan “Innā lillāhi wa innā ilaihi rāji‘ūn” (sesungguhnya kami adalah milik Allah dan sesungguhnya hanya kepada-Nya kami akan kembali) (156). Mereka itulah yang memperoleh ampunan dan rahmat dari Tuhannya dan mereka itulah orang-orang yang mendapat petunjuk (157). (Q.S al-Baqarah (2): 155-157).

Kehidupan manusia tidak lepas dari berbagai ujian yang menjadi bagian dari kehendak Allah untuk menguji keteguhan dan kualitas iman hamba-Nya. Dalam Al-Qur'an (Q.S. Al-Baqarah: 155), disebutkan bahwa ujian itu bisa berupa rasa takut, kelaparan, serta kehilangan harta, nyawa, dan hasil panen. Dalam menghadapi semua itu, Allah memerintahkan kesabaran dan menyampaikan kabar gembira kepada mereka yang mampu bertahan dengan tegar. Menurut Tafsir Kementerian Agama RI (2004), orang-orang yang sabar itu adalah mereka yang ketika ditimpa musibah langsung mengingat asal-usul

kehidupan mereka dengan mengucapkan, "Innā lillāhi wa innā ilaihi rāji‘ūn", sebagai bentuk kepasrahan dan kesadaran bahwa segala sesuatu adalah milik Allah.

Salah satu bentuk nyata dari ujian tersebut adalah bencana gempa bumi. Musibah ini tidak hanya mengguncang fisik, tetapi juga menguji mental dan spiritual manusia. Dalam situasi seperti ini, keimanan seseorang diuji melalui sikapnya dalam menerima kehilangan dan kesulitan. Mereka yang mampu merespons dengan sabar, tawakal, dan tetap berpegang pada keyakinan bahwa semua akan kembali kepada Allah, dijanjikan rahmat, ampunan, serta petunjuk hidup sebagaimana termaktub dalam ayat 157. Dengan demikian, bencana alam bukan sekadar peristiwa yang merusak, melainkan juga menjadi sarana untuk memperkuat hubungan dengan Sang Pencipta dan kesempatan untuk meraih derajat yang lebih tinggi di sisi-Nya.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Perhitungan percepatan getaran tanah maksimum (PGA) di wilayah Bali menggunakan metode Zhao *et al.* (2006) menunjukkan bahwa wilayah dengan nilai PGA berkisar antara 14.01 – 39.0 gal dan tergolong dalam intensitas IV MMI mencakup Kabupaten/Kota Badung, Klungkung, Denpasar. Sedangkan pada modifikasi Zhao mencakup daerah Badung, Klungkung, Denpasar, Buleleng, Gianyar, Tabanan. Kemudian wilayah dengan nilai PGA lebih tinggi yaitu 39.01 – 81.0 gal dan termasuk dalam intensitas V MMI menggunakan metode Zhao *et al.* (2006) meliputi Karangasem, Bangli, Buleleng, Jembrana, Gianyar, dan Tabanan. Untuk modifikasi Zhao mencakup daerah Karangasem, Bangli dan Jembrana.
2. Pada metode Zhao dan modifikasi diperoleh hasil risiko yang menunjukkan daerah dengan risiko terbesar akibat gempa adalah sebelah selatan Bali yang mencakup Badung, Gianyar, dan Denpasar. Untuk risiko sedang yaitu pada Kabupaten Klungkung, serta dengan potensi rendah adalah daerah sebelah utara Bali yaitu Jembrana, Buleleng, Bangli, Karangasem dan Tabanan.
3. Peta risiko gempa bumi berdasarkan modifikasi Zhao *et al.* (2006) ini dinilai relevan untuk menggambarkan potensi bahaya gempa di wilayah Bali dalam rentang waktu 5 hingga 15 tahun ke depan. Hal ini karena peta didasarkan pada parameter gempa yang bersifat jangka panjang serta kerentanan sosial yang cenderung berubah perlahan. Namun demikian, pembaruan peta tetap perlu

dilakukan secara berkala untuk menyesuaikan dengan perubahan kondisi sosial, fisik, maupun aktivitas seismik terbaru.

5.2 Saran

Pada penelitian yang telah dilakukan data gempa yang digunakan berjumlah 30 dengan dua jenis sumber gempa saja, oleh karena itu pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data gempa bumi yang lebih luas dan lebih variatif agar mendapatkan hasil yang lebih baik dan perlu dilakukan pemrosesan modifikasi yang kompleks supaya diperoleh hasil yang presisi. Selain itu, pada pembuatan peta PGA ini digunakan sesuai titik gempa tertinggi dengan tahun 2017, serta data kependudukan pada peta risiko yang disesuaikan dengan gempa, karena itu diperlukan penyesuaian lebih lanjut pada penelitian selanjutnya agar hasil yang diperoleh dapat relevan dan bermanfaat terutama untuk khalayak umum serta dapat digunakan acuan untuk risiko gempa hingga beberapa tahun ke depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adsyah, Reza. 2024. <https://einsteinproject.com/magnitudo-gempa-adalah/#:~:text=Magnitudo%205.0%20%E2%80%93%205.9%3A%20Bisa%20menyebabkan,total%20pada%20area%20yang%20luas>. Diakses pada 15 Februari 2025.
- Afnimar. 2009. *Seismologi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Agustina, Dewi. 2016. <https://www.tribunnews.com/regional/2016/06/08/gempa-bumi-di-laut-maluku-akibat-tumbukan-lempeng>. Diakses pada 25 Desember 2024.
- Allan, Ludman. 1982. *Physical Geology*. United States of America : McGraw-Hill, Inc.
- Arimuko, A., Yoga, D. P., & Hendri, S. 2019. *Model Kecepatan 1-D Gelombang P dan Gelombang S Dari Data Hasil Relokasi Hiposenter Di Wilayah Gunung Sinabung*. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*. 5(3).
- Artanti, W., Spahn, H., Sudiartha, G., & Magfiroh, E. 2011. *Gempa 6,8 SR Mengguncang Pulau Bali - 13 Oktober 2011: Reaksi Terhadap Gempabumi dan Sistem Peringatan Dini Tsunami di Bali*. Capacity Development in Local Communities, PROTECTS Project, GIZ-International Services, Jakarta, Indonesia.
- Badan Geologi. 2016. *10 Tahun Gempa Yogyakarta*. Geomagz Majalah Geologi Populer. 6 (2). ISSN: 2088-7906
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). 2024. <https://bbmkg3.bmkg.go.id/tentang-gempa>. Diakses pada 12 November 2024.
- Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Provinsi Bali. 2021. *Update Data Dampak Gempa Bumi 4,8M Kab. Karangasem-Bali*. Diakses dari <https://bpbd.baliprov.go.id/article/2550/update-data-dampak-gempa-bumi-48m-kab-karangasem-bali> pada 25 Januari 2025 pukul 16.08 WIB.
- Basid A., dan Munir B. 2021. *Analysis of Fault Patters Based on Erarthquake Data on The Land of Sumatera Island*. *Journal of Physics: Conference Series*. 2126 012003.
- Basid, A., Rusli, & Purwandari. 2021. *Mapping The Risk Level of Earthquake Damage in Central Java Based on Data From PGA, PD and HDI*. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Keilmuan (JPFK)*. 7 (2).

- Bird, P. 2003. *An Updated Digital Model of Plate Boundaries*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, V.4, No.3 Article No. 1027.
- BNPB. 2018. *Risiko Bencana Indonesia*. Jakarta : BNPB Tim Penyusun Kajian Risiko Bencana.
- Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S. S. O., & Calais, E. 2003. *Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System measurements*. Journal of Geophysical Research. 108.
- Boore, D.M. 2003. *Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method*. Pure and Applied Geophysics. Vol.160.
- Bulo, D., Djayus, Supriyanto, & Hendrawanto, B. 2020. *Penentuan Titik Epicenter dan Hypocenter Serta Parameter Magnitudo Gempabumi Berdasarkan Data Seismogram*. Jurnal Geosains Kutai Basin. 3(1).
- Daryono, M. R. 2011. *Identifikasi Sesar Naik Belakang Busur (Back Arc Thrust) Daerah Bali Berdasarkan Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar*. Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Daryono. 2020. *Karakteristik Tanah dan Risiko Gempabumi di Bali*. Webinar Nasional Mitigasi Bencana, BMKG.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. 1994. *Effect Of Recent Revisions To The Geomagnetic Reversal Time Scale On Estimates Of Current Plate Motions*. Geophysical Research Letters. 21 (20).
- Douglas, John. 2019. *Ground Motion Prediction Equations 1964-2018*. United Kingdom: Department of Civil and Environmental Engineering University of Strathclyde.
- Edwiza, Daz. 2008. *Analisis Terhadap Intensitas dan Percepatan Tanah Maksimum Gempa SUMBAR*. Jurnal Geofisika. 1 (29).
- Fatma, D. 2017. <https://ilmugeografi.com/Bencana-Alam/Jenis-Jenis-Gempa-Bumi>. Diakses Tanggal 4 Desember 2024.
- Ghofur, M. A., Sukarasa, I. K., & Darsono, R. 2022. *Pemetaan Tingkat Bahaya Bencana Gempabumi Di Wilayah Banyuwangi Berdasarkan Percepatan Tanah Maksimum*. Buletin Fisika. 23 (1).
- Hamilton, W. 1979. *Tectonics of Indonesian Region*. U.S. Government Printing Office.

- Helmi, H., Marliyani, G. I., & Nur'aini, S. 2021. *Identifikasi Sesar Aktif di Pulau Bali dengan Menggunakan Data Pemetaan Geologi Permukaan dan Morfologi Tektonik*. Majalah Geografi Indonesia. 35 (1).
- Hidayat, Andi. 2020. <https://bloggeografi.id/2020/03/27/gelombang-gempa-bumi/>. Diakses pada 24 Desember 21:39 WIB.
- Hidayati, S. 2010. *Pengenalan Seismologi Gunungapi, Diklat Pelaksana Pemula Pengamat Gunungapi Baru*. Bandung : Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Hidayat, S. 2014. *Analisis Zona Bahaya Gempabumi dengan Pendekatan Probabilitas PGA dan Geomorfologi Kabupaten Bantul, DIY*. Universitas Gadjah Mada.
- Irjan, I., Luthfin, A., Hidayati, S, N. 2022. *Analisis Kerentanan Bahaya Gempa Bumi Tektonik Merusak Berdasarkan Fungsi Atenuasi Zhao Di Nusa Tenggara Timur*. Indonesian Journal of Applied Physics (IJAP), 242-250.
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Hilman, D., Kertapati, E., Meilano, I., Asrurifak, M., & Ridwan, M. (n.d.). 2010. *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010*. Bandung : Tim Revisi Peta Gempa Indonesia.
- Ismail, Sulaiman. 1989. *Pendahuluan Seismologi Jilid ii A, Balai Diklat Meteorologi Dan Geofisika*. Jakarta: Departemen perhubungan. Jakarta : Badan Geologi (Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral).
- Kementerian Agama Republik Indonesia. (2004). *Al-Qur'an dan Terjemahannya Jilid 1*. Jakarta: Departemen Agama RI.
- Kurniawan, S. E., dan Saputri, F. 2019. *Relokasi Hiposenter Gempabumi Donggala Tahun 2018 Menggunakan Metode Hyporelocate*. Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. 6 (1).
- Lay, T., and Wallace, T. C. 1995. *Modern Global Seismology*. Academic Press.
- Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an. 2011. *Al-Qur'an dan Tafsirnya Jilid 9 (Juz 25 s.d 37)*. Jakarta : Kementerian Agama RI.
- Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an. 2011. *Al-Qur'an dan Tafsirnya Jilid 10 (Juz 28 s.d 30)*. Jakarta : Kementerian Agama RI.
- Masturyono. 1994. *Identifikasi Sesar Naik di Lepas Pantai Utara Bali Berdasarkan Sebaran Seismisitas Gempa Dangkal*. Buletin Geologi. 26 (3).

- McCaffrey, R., dan Nabelek, J. 1987. *Earthquakes, Gravity, And The Origin Of The Bali Basin: An Example Of A Nascent Continental Fold-And-Thrust Belt*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 92 (B1).
- Muhaimin, M., Tjahjono, B., & Darmawan, D. 2016. *Analisis Risiko Gempabumi Di Cilacap Provinsi Jawa Tengah*. Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan. 18 (1).
- Murtianto, Hendro. 2010. *Potensi Kerusakan Gempa Bumi Akibat Pergerakan Patahan Sumatera di Sumatera Barat dan Sekitarnya*. Jurnal Geografi 10 (1).
- Nugraha, J., Pasau, G., Sunardi, B., & Widiyantoro, S. 2014. *Analisis Hazard Gempa Dan Isoleismal Untuk Wilayah Jawa-Bali-Ntb*. Jurnal Meteorologi Dan Geofisika. 15 (1).
- Nur, S. 2022. <https://roboguru.ruangguru.com/forum/jelaskan-bagaimana-proses-dari-gempa-bumi-tekonik-beserta-gambar-FRM-QZMO70AA>. Diakses Tanggal 6 Februari 2025.
- Oktariadi, O. 2009. *Penentuan Peringkat Bahaya Tsunami dengan Metode AHP (Studi Kasus: Kabupaten Sukabumi)*. Jurnal Geologi Indonesia. 4 (2).
- Palupi, I.R., dan Raharjo, W. 2020. *Studi Automatic Picking Waktu Tiba Gelombang P dan S dengan menggunakan Spektogram pada Obspy Python*. Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika. 9 (1).
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG). 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia*. Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. 2024. <https://vsi.esdm.go.id/kajian-kejadian/analisis-geologi-kejadian-gempa-bumi-merusak-di-kabupaten-gianyar-provinsi-bali-tanggal-21-september-2024>. Diakses pada 25 Januari 2025.
- PuSGeN. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung : Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
- PuSGeN. 2017. *Peta dan Analisis Aktivitas Seismik di Indonesia: Pusat Penelitian Geoteknologi*. Jakarta: Pusat Penelitian Geoteknologi.
- Rahman, Y., Kamus, Z., & Billyanto, R. 2015. *Analisis Sistem Instrumen Intensity Meter P-Alert Dan Data Hasil Pengukurannya*. In Pillar Of Physics (Vol. 5).

- Rahman, Y.Y. dan Santosa, B.J. 2013. *Relokasi Hiposenter Gempa Bumidi Sumatera Selatan dengan Menggunakan Hypo71*. Jurnal Sains dan Seni Pomits. 2 (2).
- Rini, L. S., Pratiwi, H., & Wiyono, S. B. 2019. *Penerapan Model Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) Pada Data Gempa Bumi Di Sumatra Dan Jawa*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Roser, J. dan Gosar. A. 2010. *Determination of Vs30 for Seismic Ground Classification in the Ljubljana Area*. Acta Geotechnica Slovenia.
- Sanjaya, Winna. (2008). *Strategi Pembelajaran Berorientasi Standar Proses Pendidikan*. Jakarta: Kencana Prenada Media Group.
- Sari, A.,W., Jasrudin R., dan Ihsan. 2012. *Analisis Rekahan Gempa Bumi Dan Gempa Bumi Susulan Dengan Menggunakan Metode Omori*. Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika (JSPF). 8 (3).
- Shihab, M., Quraish. 2002. *Tafsir al-Misbah Pesan Kesan Dan Keserasian Al-Qur'an Volume 11*. Jakarta: Lentera Hati.
- Shihab, M., Quraish. 2002. *Tafsir al-Misbah Pesan Kesan Dan Keserasian Al-Qur'an Volume 13*. Jakarta: Lentera Hati.
- Siswowidjoyo. 1996. *The Treat of Hazard in the Semeru Volcano Region in East Java, Indonesia*. Journal of Asian Earth Sciences. Vol.15.
- Stein, S., and Wyssession, M. 2003. *An Introduction To Seismology, Earthquakes, And Earth Structure*. Blackwell Publishing.
- Subardjo. 2008. *Parameter Gempabumi*. Jakarta: Pusat Pendidikan dan Latihan – BMG.
- Sunarjo, Gunawan, M.T., dan Pribadi, S. 2010. *Gempa Bumi Edisi Populler*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Sunarjo, Gunawan, M.T., dan Pribadi, S. 2012. *Gempa Bumi Edisi Populler (2 nd ed)*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- United States Geological Survey (USGS). (n.d.). 2025. *Significant earthquake archive – Indonesia region*. <https://www.earthquake.usgs.gov>.
- Walker, P., and Wood, E. 2008. *Hands-On General Science Activities with Real Life Applications*. San Francisco : Jossey-Bass.
- Wells, D.L., and Coppersmith, K.J., 1994. *New Empirical Relationships among Magnitudo, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*. Bulletin of the Seismological Society of Ameica. 84 (4).

- Yadnya, I. M., Widiyantoro, S., & Nugraha, A. D. 2012. *Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Di Wilayah Bali Menggunakan Data Seismik Lokal*. Jurnal Geofisika Eksplorasi. 1 (1).
- Yasid, M. 1999. *Studi Tomografi Tiga Dimensi Struktur Kecepatan Gelombang P Di Daerah Bali*. Jurnal Matematika dan Sains. 4 (2).
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H. K., Somerville, P. G., Fukushima, Y., & Fukushima, Y. (2006). *Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period*. Bulletin of the Seismological Society of America. 96 (3).

LAMPIRAN

Lampiran 1
Data Gempa Bumi Tahun 2011-2024

No.	Tanggal	Latitude (Derajat)	Longitude (Derajat)	Depth (km)	Magnitudo (SR)	Lokasi
1.	2024-09-20	-8.3784	115.3408	10	4.6	Barat laut Banjar Wangsian
2.	2024-09-07	-8.4371	115.3374	10	4.9	Timur laut Ubud
3.	2024-02-17	-8.2021	114.6	9.018	4.4	Utara Negara
4.	2022-12-14	-8.2852	115.5792	9.992	4.6	Utara Amlapura
5.	2022-12-14	-8.1887	115.6524	9.826	4.3	Utara Amlapura
6.	2022-12-13	-8.256	115.6356	10	5.2	Utara Amlapura
7.	2022-12-13	-8.1765	115.6821	10	4.9	Bali region, Indonesia
8.	2022-07-29	-8.1625	115.5482	10	4.4	Utara Bedugul
9.	2021-10-15	-8.3283	115.4645	10	4.7	Utara timur laut Banjar Wangsian
10.	2020-05-27	-8.2467	114.9212	10	4.3	Selatan barat daya Seririt
11.	2020-05-11	-9.4698	114.4352	38.63	4.2	Barat Daya Jimbaran
12.	2020-04-02	-9.4385	114.6801	50.18	4.3	Barat Daya Jimbaran
13.	2019-11-14	-8.1672	114.9059	10	4.6	Barat laut Seririt
14.	2019-11-14	-8.1384	114.8864	10	5	Barat Laut Seriri
15.	2019-11-14	-8.1944	114.8863	10	4.6	Barat Seririt
16.	2019-11-14	-8.2426	114.913	10	4.2	Selatan Barat Daya Seririt
17.	2017-11-08	-8.3071	115.5272	22.71	4.9	Utara barat laut Bedugul
18.	2017-09-26	-8.3437	115.4547	7.77	4	Utara timur laut Banjar Wangsian

19.	2016-08-09	-8.4091	115.6386	18.51	4.3	Utara timur laut Amlapura
20.	2016-02-08	-8.363	115.6241	17.69	4.1	Utara Amlapura
21.	2015-12-08	-8.2904	115.2539	6.91	4.1	Timur Munduk
22.	2015-10-09	-8.3921	114.9334	10	4.2	Barat daya Munduk
23.	2015-03-26	-8.2116	114.6149	31.73	4.3	Utara Negara
24.	2014-12-20	-8.9101	115.3671	49.63	4	Tenggara Nusa Dua
25.	2014-08-23	-9.4123	114.5547	50.46	4.1	Barat daya Jimbaran
26.	2014-03-09	-9.3083	115.2523	40.93	4.2	Selatan Nusa Dua
27.	2013-01-11	-9.275	115.063	59.1	4.3	Selatan Barat Daya Jimbaran
28.	2011-10-13	-9.43	114.527	35	4.9	Barat daya Jimbaran
29.	2011-10-13	-9.35	114.587	39	6.1	Barat daya Jimbaran
30.	2011-03-20	-8.402	115.022	24.4	4.3	Selatan Barat Daya Munduk

Lampiran 2
Hasil Nilai Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA) Metode Zhao *et al*
(2006)

Lattitude	Longitude	PGA (gal)
-8.83141	115.1215	7.195894
-8.83032	115.1715	7.281609
-8.78029	115.172	9.858685
-8.77723	115.5272	10.09612
-8.77954	115.5785	9.964638
-8.72376	115.1731	13.23992
-8.72508	115.2237	13.21073
-8.72433	115.4769	13.30559
-8.72567	115.5273	13.22166
-8.7263	115.5783	10.98182
-8.66961	115.1716	17.08489
-8.66921	115.2239	17.19558
-8.61775	115.1216	21.13065
-8.6182	115.1718	21.35145
-8.61662	115.2223	21.59808
-8.61679	115.274	21.53027
-8.5629	115.0696	26.17896
-8.56488	115.1215	26.16843
-8.56449	115.1726	26.53752
-8.56467	115.2231	26.66376
-8.56367	115.2741	26.7325
-8.56265	115.3229	26.94038
-8.56103	115.3747	27.19875
-8.56411	115.4254	26.92497
-8.51163	115.019	31.48757
-8.51447	115.0703	31.63425
-8.51334	115.121	31.85364
-8.5132	115.1734	32.11711
-8.51159	115.2239	32.52322
-8.51293	115.2736	32.53573
-8.51124	115.324	32.89586
-8.51374	115.3732	32.6969
-8.51063	115.4261	33.17802
-8.51141	115.4767	29.37149
-8.51121	115.5792	33.15497
-8.45666	114.9169	33.20555
-8.45813	114.9687	37.7735
-8.45815	115.0193	38.06098
-8.45943	115.0696	38.34131
-8.4581	115.1219	38.95487

-8.46113	115.1715	38.89833
-8.46017	115.2229	39.37062
-8.45688	115.2743	40.15006
-8.45925	115.3243	40.03471
-8.45884	115.3756	40.2898
-8.45933	115.4266	40.35227
-8.45738	115.4775	40.73806
-8.45913	115.529	36.27105
-8.45792	115.5791	40.65073
-8.45837	115.6305	40.494
-8.4011	114.6125	39.06263
-8.40088	114.7639	41.56321
-8.40377	114.8145	42.13536
-8.40538	114.8653	42.81549
-8.4032	114.9167	43.94616
-8.4049	114.9674	44.5608
-8.40514	115.0199	45.35591
-8.405	115.0701	46.13671
-8.40607	115.1205	46.69092
-8.40558	115.1717	47.44939
-8.40602	115.2235	47.99728
-8.40521	115.2738	48.67793
-8.40344	115.3233	49.46889
-8.40318	115.3749	49.9091
-8.40399	115.4258	45.25772
-8.40453	115.4765	45.31597
-8.40326	115.5277	45.61519
-8.40578	115.5779	49.83779
-8.40377	115.6297	45.29583
-8.40488	115.6807	44.82134
-8.35033	114.5609	41.56925
-8.35126	114.612	42.44976
-8.3522	114.6631	43.55946
-8.35117	114.7149	44.83037
-8.35136	114.7626	45.96363
-8.35179	114.814	47.1932
-8.35119	114.8651	43.84013
-8.35048	114.9149	49.88123
-8.3494	114.9683	51.4129
-8.34968	115.0191	52.78043
-8.35225	115.07	53.87636
-8.35079	115.1217	50.44808
-8.35148	115.1714	56.80351
-8.35359	115.2227	57.81585

-8.35097	115.2738	59.68973
-8.35255	115.3234	60.5464
-8.35274	115.3753	61.59523
-8.3529	115.4259	62.38974
-8.35458	115.4762	56.98235
-8.35229	115.5272	57.84869
-8.35421	115.578	57.09184
-8.35157	115.6289	62.78203
-8.29412	114.5109	41.23601
-8.29845	114.5602	42.4235
-8.2983	114.6131	43.68906
-8.29891	114.6626	44.92308
-8.29962	114.7132	41.67218
-8.2988	114.7629	42.91524
-8.2993	114.8144	44.27145
-8.30011	114.8658	50.48551
-8.29799	114.9169	51.99884
-8.29676	114.9675	53.57744
-8.29784	115.019	50.27507
-8.29778	115.0695	51.97528
-8.29844	115.1209	53.84715
-8.29625	115.171	55.67676
-8.29666	115.2229	63.32389
-8.29749	115.2741	65.85219
-8.29574	115.3243	62.58343
-8.29987	115.3732	71.84121
-8.30069	115.4256	69.72091
-8.29869	115.4762	72.73059
-8.29875	115.5276	81.10023
-8.29999	115.5789	79.57428
-8.24565	114.5106	35.31023
-8.24598	114.5613	36.29106
-8.24599	114.6135	37.30744
-8.24763	114.6638	38.41163
-8.24697	114.7145	39.39623
-8.24687	114.764	44.89463
-8.24796	114.814	46.10523
-8.24526	114.866	47.01994
-8.24635	114.9174	48.29891
-8.24684	114.9679	49.51346
-8.24807	115.0197	50.8689
-8.24676	115.0701	46.98101
-8.24629	115.1204	47.98547
-8.247	115.1729	49.18845

-8.24671	115.2231	55.18266
-8.24706	115.2742	56.24714
-8.24545	115.3222	51.58773
-8.24565	115.3745	52.33788
-8.24544	115.4246	57.99555
-8.24556	115.4759	58.3746
-8.24548	115.5269	58.47071
-8.18983	114.4595	34.63066
-8.19235	114.5103	31.6927
-8.1925	114.5604	36.39558
-8.19114	114.6119	37.06091
-8.19006	114.6628	33.67565
-8.19008	114.7139	34.39616
-8.18934	114.7643	35.02096
-8.19224	114.8149	40.22641
-8.19071	114.916	41.48342
-8.19291	114.9679	42.47804
-8.19201	115.0187	38.65026
-8.19235	115.0692	39.28649
-8.18924	115.1209	39.40594
-8.19235	115.1719	40.36685
-8.19211	115.2219	45.28889
-8.19118	115.2737	45.56582
-8.19081	115.3227	41.30724
-8.19036	115.3745	41.504
-8.19021	115.4256	41.67244
-8.19121	115.4775	46.53887
-8.13578	114.4585	30.05544
-8.13738	114.5097	30.76897
-8.13762	114.5602	31.34962
-8.13721	114.6108	32.04122
-8.14033	115.0704	36.50891
-8.13799	115.121	36.55137
-8.1376	115.1715	36.80989
-8.13605	115.2232	36.87717
-8.13853	115.274	33.4204
-8.13683	115.3228	37.40568
-8.13869	115.3737	37.8263
-8.084	115.121	29.94794
-8.08556	115.1716	30.32719
-8.08504	115.2235	26.87068

Lampiran 3
Hasil Nilai Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA) Metode Modifikasi
Zhao *et al* (2006)

Latitude	Longitude	PGA (gal)
-8.83141	115.1215	5.025833
-8.83032	115.1715	5.106988
-8.78029	115.172	7.608321
-8.77723	115.5272	7.858428
-8.77954	115.5785	7.726713
-8.72376	115.1731	11.06113
-8.72508	115.2237	11.03075
-8.72433	115.4769	11.14454
-8.72567	115.5273	11.05712
-8.7263	115.5783	9.035583
-8.66961	115.1716	15.12563
-8.66921	115.2239	15.24425
-8.61775	115.1216	19.52313
-8.6182	115.1718	19.74492
-8.61662	115.2223	20.01448
-8.61679	115.274	19.95984
-8.5629	115.0696	25.07765
-8.56488	115.1215	25.066
-8.56449	115.1726	25.45354
-8.56467	115.2231	25.59336
-8.56367	115.2741	25.69069
-8.56265	115.3229	25.92106
-8.56103	115.3747	26.2075
-8.56411	115.4254	25.90398
-8.51163	115.019	30.97549
-8.51447	115.0703	31.1169
-8.51334	115.121	31.38323
-8.5132	115.1734	31.67674
-8.51159	115.2239	32.1292
-8.51293	115.2736	32.14314
-8.51124	115.324	32.54441
-8.51374	115.3732	32.32271
-8.51063	115.4261	32.85881
-8.51141	115.4767	29.06819
-8.51121	115.5792	32.83313
-8.45666	114.9169	33.33864
-8.45813	114.9687	37.95537
-8.45815	115.0193	38.29672
-8.45943	115.0696	38.6084
-8.4581	115.1219	39.29025

-8.46113	115.1715	39.22744
-8.46017	115.2229	39.75199
-8.45688	115.2743	40.617
-8.45925	115.3243	40.48905
-8.45884	115.3756	40.77198
-8.45933	115.4266	40.84124
-8.45738	115.4775	41.26889
-8.45913	115.529	36.74497
-8.45792	115.5791	41.17212
-8.45837	115.6305	40.99839
-8.4011	114.6125	39.3886
-8.40088	114.7639	42.18268
-8.40377	114.8145	42.81549
-8.40538	114.8653	43.56682
-8.4032	114.9167	44.81342
-8.4049	114.9674	45.4897
-8.40514	115.0199	46.36294
-8.405	115.0701	47.21858
-8.40607	115.1205	47.8247
-8.40558	115.1717	48.65248
-8.40602	115.2235	49.24913
-8.40521	115.2738	49.98871
-8.40344	115.3233	50.84576
-8.40318	115.3749	51.32157
-8.40399	115.4258	46.60184
-8.40453	115.4765	46.66475
-8.40326	115.5277	46.98764
-8.40578	115.5779	51.24455
-8.40377	115.6297	46.64301
-8.40488	115.6807	46.13005
-8.35033	114.5609	42.1688
-8.35126	114.612	43.16293
-8.3522	114.6631	44.38744
-8.35117	114.7149	45.78596
-8.35136	114.7626	47.02908
-8.35179	114.814	48.37311
-8.35119	114.8651	45.06604
-8.35048	114.9149	51.29147
-8.3494	114.9683	52.94018
-8.34968	115.0191	54.40217
-8.35225	115.07	55.56628
-8.35079	115.1217	52.13311
-8.35148	115.1714	58.63829
-8.35359	115.2227	59.68665

-8.35097	115.2738	61.60562
-8.35255	115.3234	62.47284
-8.35274	115.3753	63.52531
-8.3529	115.4259	64.31543
-8.35458	115.4762	58.81204
-8.35229	115.5272	59.66645
-8.35421	115.578	58.92049
-8.35157	115.6289	64.70318
-8.29412	114.5109	41.82048
-8.29845	114.5602	43.13392
-8.2983	114.6131	44.53025
-8.29891	114.6626	45.88781
-8.29962	114.7132	42.70105
-8.2988	114.7629	44.05933
-8.2993	114.8144	45.53429
-8.30011	114.8658	51.94326
-8.29799	114.9169	53.56781
-8.29676	114.9675	55.24946
-8.29784	115.019	51.95147
-8.29778	115.0695	53.7269
-8.29844	115.1209	55.65497
-8.29625	115.171	57.50921
-8.29666	115.2229	65.23611
-8.29749	115.2741	67.67927
-8.29574	115.3243	64.17346
-8.29987	115.3732	73.13333
-8.30069	115.4256	70.32423
-8.29869	115.4762	72.63473
-8.29875	115.5276	80.38298
-8.29999	115.5789	79.30229
-8.24565	114.5106	35.67868
-8.24598	114.5613	36.76716
-8.24599	114.6135	37.89331
-8.24763	114.6638	39.11432
-8.24697	114.7145	40.20062
-8.24687	114.764	27.87886
-8.24796	114.814	32.63652
-8.24526	114.866	27.87886
-8.24635	114.9174	32.63652
-8.24684	114.9679	27.87886
-8.24807	115.0197	32.63652
-8.24676	115.0701	27.87886
-8.24629	115.1204	32.63652
-8.247	115.1729	27.87886

-8.24671	115.2231	32.63652
-8.24706	115.2742	58.05888
-8.24545	115.3222	53.32414
-8.24565	115.3745	54.10268
-8.24544	115.4246	59.87191
-8.24556	115.4759	60.26187
-8.24548	115.5269	60.36056
-8.18983	114.4595	34.47753
-8.19235	114.5103	31.65415
-8.1925	114.5604	36.4435
-8.19114	114.6119	37.18416
-8.19006	114.6628	33.86173
-8.19008	114.7139	34.66303
-8.18934	114.7643	35.35738
-8.19224	114.8149	40.70168
-8.19071	114.916	42.09437
-8.19291	114.9679	43.19418
-8.19201	115.0187	39.37783
-8.19235	115.0692	40.07967
-8.18924	115.1209	40.21133
-8.19235	115.1719	41.26892
-8.19211	115.2219	46.28941
-8.19118	115.2737	46.59315
-8.19081	115.3227	42.30122
-8.19036	115.3745	42.51684
-8.19021	115.4256	42.70132
-8.19121	115.4775	47.65852
-8.13578	114.4585	29.38117
-8.13738	114.5097	30.17532
-8.13762	114.5602	30.82186
-8.13721	114.6108	31.57021
-8.14033	115.0704	36.56968
-8.13799	115.121	36.61696
-8.1376	115.1715	36.90476
-8.13605	115.2232	36.97964
-8.13853	115.274	33.57773
-8.13683	115.3228	37.56781
-8.13869	115.3737	38.03574
-8.084	115.121	29.26157
-8.08556	115.1716	29.68357
-8.08504	115.2235	26.28406

Lampiran 4
Hasil Skoring Peta Resiko Bencana Metode Zhao *et al* (2006)

Kab/Kota	Ancaman	Kerentanan	Kapasitas	Indeks Resiko Bencana
Kab. Jembrana	4	0.4	2	2.4
Kab. Tabanan	4	0.4	2	2.4
Kab. Badung	4	1.2	2	4.8
Kab. Gianyar	4	1.2	2	7.2
Kab. Klungkung	4	0.8	2	3.2
Kab. Bangli	4	0.4	2	2.4
Kab. Karangasem	4	0.4	2	2.4
Kab. Buleleng	4	0.4	2	2.4
Kota Denpasar	4	1.2	2	4.8

Lampiran 5
Hasil Skoring Peta Resiko Bencana Metode Modifikasi Zhao *et al* (2006)

Kab/Kota	Ancaman	Kerentanan	Kapasitas	Indeks Resiko Bencana
Kab. Jembrana	4	0.4	2	1.6
Kab. Tabanan	4	0.4	2	1.6
Kab. Badung	4	1.2	2	4.8
Kab. Gianyar	4	1.2	2	4.8
Kab. Klungkung	4	0.8	2	3.2
Kab. Bangli	4	0.4	2	2.4
Kab. Karangasem	4	0.4	2	2.4
Kab. Buleleng	4	0.4	2	1.6
Kota Denpasar	4	1.2	2	2.4



JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 210604110003
Nama : MARETA HELMALIA PUTRI
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Jurusan : FISIKA
Dosen Pembimbing 1 : AHMAD LUTHFIN,M.Si
Dosen Pembimbing 2 : AHMAD ABTOKHI,M.Pd
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : Identifikasi Risiko Gempa Merusak Di Bali Dengan Menggunakan Fungsi Atenuasi Zhao dan Modifikasi Zhao

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	31 Oktober 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Pengajuan Judul	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
2	29 November 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi BAB I, II dan III	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
3	25 Desember 2024	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi BAB I, II III dan ACC	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
4	10 April 2025	AHMAD ABTOKHI,M.Pd	Konsultasi Integrasi BAB I dan II	Genap 2025/2026	Sudah Dikoreksi
5	15 Mei 2025	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi Data Hasil Penelitian	Ganjil 2024/2025	Sudah Dikoreksi
6	26 Mei 2025	AHMAD LUTHFIN,M.Si	Konsultasi BAB IV dan V	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
7	27 Mei 2025	AHMAD ABTOKHI,M.Pd	Konsultasi Integrasi Bab I,II dan IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

AHMAD ABTOKHI,M.Pd

Malang, 20 Juni 2025

Dosen Pembimbing 1

AHMAD LUTHFIN,M.Si

