

Analisis Seismisitas dan Percepatan Tanah Maksimum untuk Evaluasi Risiko Gempabumi di Pulau Bali Periode Tahun 1980 - 2023

^{1*}Adelia Wahyu Anjani, ²Winardi Tjahyo Baskoro, ³I Putu Dedy Pratama, ⁴I Nengah Artawan, ⁵Ni Luh Putu Trisnawati, ⁶I Wayan Supardi

^{1,2,4,5,6}Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Udayana, Bali, Indonesia.

³BMKG Stasiun Geofisika Kelas II Sanglah Denpasar, Bali, Indonesia.

Received: 27 October 2025

Revised: 02 February 2026

Accepted: 20 April 2026

Corresponding Author:

Adelia Wahyu Anjani

adeliananjani1701@gmail.com

© 2026 Kappa Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License



DOI:

<https://doi.org/10.29408/kpj.v10i1.32793>

Abstrak: Bali Island is located in an active tectonic zone due to the meeting of the Indo-Australian and Eurasian Plates, thus experiencing significant seismic activity. This study aims to analyze the seismicity characteristics, distribution, and magnitude of peak ground acceleration (PGA), and evaluate earthquake risk in Bali Island. Earthquake data for the period 1980–2023 were analyzed based on spatial and temporal distributions and the Gutenberg-Richter equation to assess the relationship between earthquake frequency and magnitude. The analysis results show that Bali's seismicity is dominated by shallow earthquakes (<60 km) with moderate magnitudes ($4.5 \leq M < 6.0$) to large magnitudes ($M \geq 6.0$). The highest earthquake density is in the Central and Eastern regions of Bali with an earthquake density reaching 0.02 events/km². PGA values range from low to exceed 0.4 g, especially in the Central and Southeast regions associated with active faults and the Southern subduction zone. These findings provide an important basis for spatial planning, earthquake-resistant building structure design, and earthquake risk mitigation strategies on the island of Bali.

Kata kunci: Seismicity; PGA; Gutenberg Richter; Earthquake; Bali

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerentanan seismik tertinggi di dunia karena posisinya yang strategis di pertemuan tiga lempeng tektonik utama: Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Kondisi ini menjadikan wilayah Indonesia, termasuk Pulau Bali, rentan terhadap aktivitas tektonik seperti gempabumi. Bali sebagai pulau yang berkembang pesat dengan nilai budaya dan ekonomi yang signifikan, menghadapi ancaman serius dari potensi gempabumi, terlebih lagi dengan meningkatnya populasi dan infrastruktur yang terus bertambah. Sejarah mencatat berbagai gempabumi besar yang pernah terjadi di Bali dan sekitarnya, seperti gempa Seririt (1976), Culik (1979), dan Karangasem (2004), serta gempa Lombok

(2018) yang memberikan dampak nyata terhadap masyarakat dan infrastruktur (Taroni & Akinci, 2021).

Secara geologis, Bali berada di antara zona subduksi lempeng Indo-Australia dengan Eurasia di selatan, serta patahan naik (back arc thrust) di utara. Kondisi ini memperkuat argumen bahwa analisis bahaya seismik dan evaluasi risiko merupakan hal yang sangat mendesak dilakukan di wilayah ini. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Azmiyati (2021) mengungkapkan pentingnya pendekatan probabilitas untuk memahami persebaran percepatan tanah maksimum dan tingkat kerawanan berdasarkan kondisi geologi regional. Meski demikian, studi mengenai seismisitas dan analisis percepatan tanah di Bali masih terbilang terbatas dan memerlukan pemutakhiran data serta pendekatan yang lebih komprehensif.

How to Cite:

Anjani, A. W., Baskoro, W. T., Pratama, I. P. D., Artawan, I. N., Trisnawati, N. L. P., & Supardi, I. W. (2026). Literasi Digital dalam Pembelajaran IPA: Analisis Kebutuhan Asesmen Berbasis Efikasi Diri Siswa. *Kappa Journal*, 10(1), 74-82. <https://doi.org/10.29408/kpj.v10i1.32793>

Penerapan metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) menjadi penting sebagai pendekatan kuantitatif dalam mengidentifikasi potensi percepatan tanah dan variasi tingkat bahaya seismik di berbagai wilayah Bali. Selain untuk tujuan ilmiah, hasil analisis ini juga relevan dalam konteks pembangunan berkelanjutan, di mana mitigasi bencana gempabumi menjadi landasan dalam perencanaan tata ruang, desain infrastruktur tahan gempa, serta pengembangan strategi evakuasi dan edukasi publik. Penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan pengetahuan yang ada, sekaligus memberikan kontribusi nyata dalam upaya perlindungan terhadap masyarakat dan peningkatan ketahanan wilayah Bali terhadap risiko gempabumi (Azmiyati, 2021).

Penelitian ini memiliki signifikansi yang tinggi dalam konteks ilmiah maupun praktis, terutama mengingat tingkat kerentanan seismik Indonesia yang sangat tinggi akibat posisinya di zona pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia. Bali sebagai wilayah dengan pertumbuhan ekonomi, budaya, dan infrastruktur yang pesat, menghadapi risiko gempabumi yang signifikan, sebagaimana dibuktikan oleh sejarah kejadian gempa besar yang telah melanda wilayah ini. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang seismisitas dan distribusi percepatan tanah maksimum menjadi sangat krusial.

Penelitian ini berkontribusi dalam mengisi kesenjangan informasi terkait peta bahaya seismik di Bali, terutama karena masih terbatasnya studi terbaru yang mengintegrasikan pendekatan probabilistik secara komprehensif. Dengan menerapkan metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), studi ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai potensi bahaya seismik yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan strategis (Uduweriya dkk, 2020).

Secara praktis, hasil penelitian ini berpotensi mendukung pemerintah dalam perencanaan tata ruang yang lebih adaptif terhadap bencana, pembangunan infrastruktur yang tahan gempa, serta perumusan strategi mitigasi yang berbasis risiko. Dalam konteks akademik, penelitian ini memperkaya khazanah keilmuan bidang fisika kebumihuman dan mitigasi bencana, serta dapat dijadikan referensi dalam penelitian lanjutan mengenai kerentanan seismik wilayah lainnya di Indonesia. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata dalam peningkatan kesiapsiagaan masyarakat dan ketahanan wilayah Bali terhadap risiko gempabumi.

Metode

Penelitian ini dilaksanakan pada periode Januari hingga April 2024. Pengambilan data dilakukan di Laboratorium BMKG, Stasiun Geofisika Kelas I Denpasar, sedangkan pengolahan data dan penyusunan

skripsi dilakukan di lingkungan Kampus Universitas Udayana. Penelitian ini menggunakan metode observasi terhadap data katalog gempa bumi yang mencakup informasi posisi episenter, kedalaman, magnitudo, dan waktu kejadian gempa di wilayah Bali. Data tersebut diproyeksikan ke dalam peta untuk dianalisis secara spasial. Evaluasi bahaya gempa bumi dilakukan menggunakan metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) yang menghasilkan parameter percepatan tanah maksimum (PGA) dan spectral acceleration (SA), yang selanjutnya dicocokkan dengan data spasial di lapangan.

Bahan dan data yang digunakan meliputi katalog gempa dari BMKG tahun 1980–2023, shapefile wilayah penelitian, dan peta geologi daerah setempat. Perangkat lunak yang digunakan mencakup Microsoft Office untuk pengelolaan data dan penulisan, Matlab dan Zmap untuk pemrosesan data gempa dan pemisahan kejadian gempa utama (mainshock), Notepad++ untuk penyusunan kode masukan, serta USGS-PSHA untuk analisis probabilistik bahaya seismik. Selain itu, perangkat lunak ArcGIS digunakan dalam tahap pemetaan dan analisis zonasi bahaya.

Penelitian ini memiliki tiga jenis variabel: variabel bebas seperti tingkat seismisitas, faktor geologi, serta faktor iklim dan cuaca; variabel terikat yaitu percepatan tanah; dan variabel terkontrol seperti lokasi pengukuran dan metode analisis. Hipotesis nol (H_0) menyatakan bahwa tidak terdapat hubungan signifikan antara seismisitas dan percepatan tanah, sedangkan hipotesis alternatif (H_1) menyatakan adanya hubungan signifikan antara keduanya serta perbedaan distribusi spasial yang mencolok.

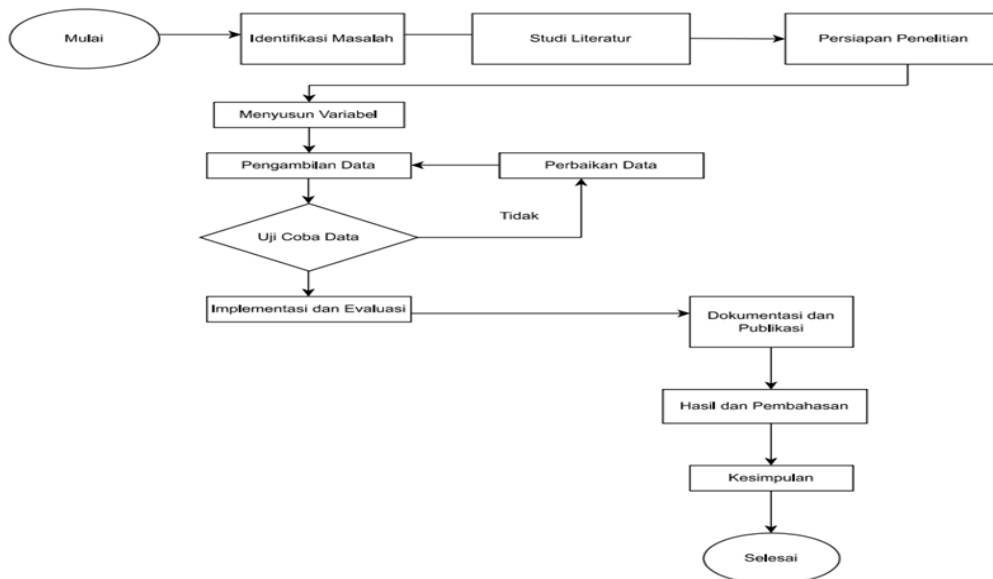
Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur dan pengumpulan data dari berbagai sumber yang kredibel seperti jurnal, skripsi, dan artikel ilmiah. Analisis dimulai dengan pemetaan episenter berdasarkan data katalog gempa dengan skala magnitudo M_w 2–9 dari tahun 1980 hingga 2023 yang mencakup sekitar 2622 peristiwa gempa. Kemudian dilakukan pemisahan gempa utama dan susulan menggunakan program Zmap. Selanjutnya ditentukan model sumber gempa yang terdiri dari sesar aktif dan gempa latar (background earthquake), yang dikelompokkan berdasarkan kedalaman (0–300 km). Nilai a-b (seismic source characterization) dianalisis menggunakan metode Gutenberg-Richter dengan perangkat lunak Zmap untuk setiap interval kedalaman.

Analisis probabilistik bahaya seismik dilakukan menggunakan software USGS-PSHA dengan memasukkan data dari model sumber gempa secara bertahap. Hasil dari tahap ini adalah nilai PGA dan respon spektra di batuan dasar pada probabilitas tertentu. Data tersebut kemudian dikombinasikan dengan data spasial dalam ArcGIS untuk membuat

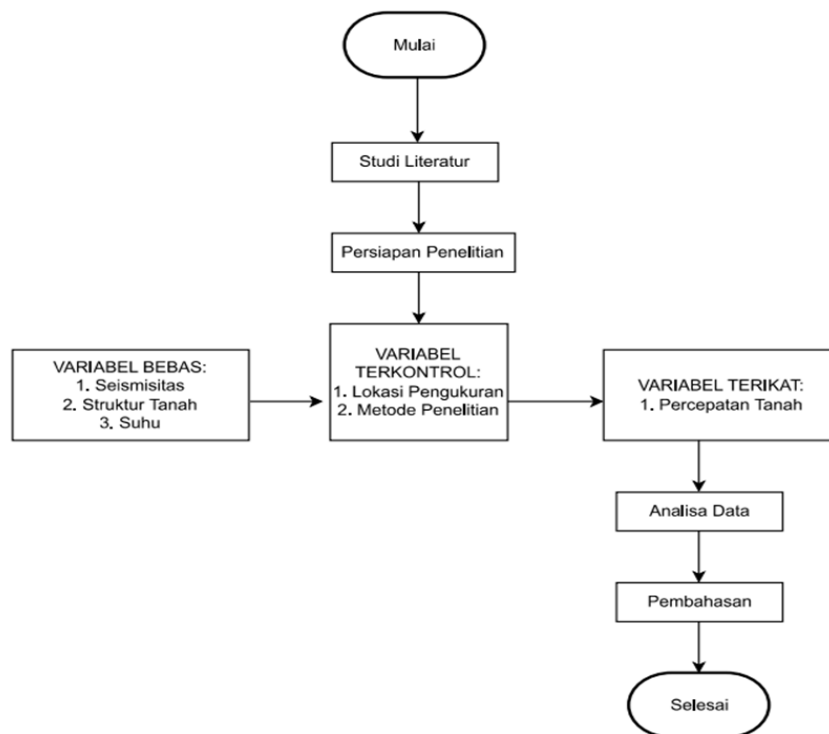
zonasi bahaya gempa yang mencakup daerah padat penduduk, area pemukiman, serta mempertimbangkan riwayat gempa terdahulu. Tahap akhir penelitian adalah interpretasi data yang telah dianalisis, dikaitkan dengan informasi tambahan seperti peta geologi, citra satelit, dan kepadatan pemukiman untuk menyimpulkan tingkat risiko gempa di wilayah Bali.

Diagram alir penelitian dan diagram pengolahan data digunakan untuk memvisualisasikan alur proses

dari pengumpulan data hingga interpretasi hasil. Selain itu, dibuat juga tabel pengamatan yang berisi hubungan antara skala seismik dengan nilai percepatan tanah untuk mendukung analisis kuantitatif dalam penelitian ini. Dengan demikian, metode yang digunakan bersifat komprehensif dan mampu memberikan gambaran yang utuh mengenai bahaya seismik di wilayah penelitian berdasarkan pendekatan probabilistik dan spasial.

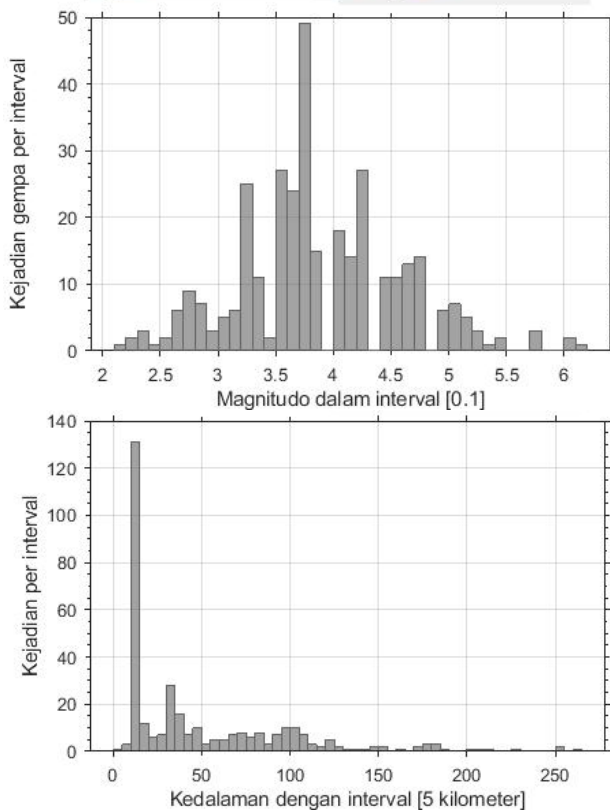


Gambar 1. Diagram alir penelitian



Gambar 2. Diagram pengolahan data

Hasil dan Pembahasan

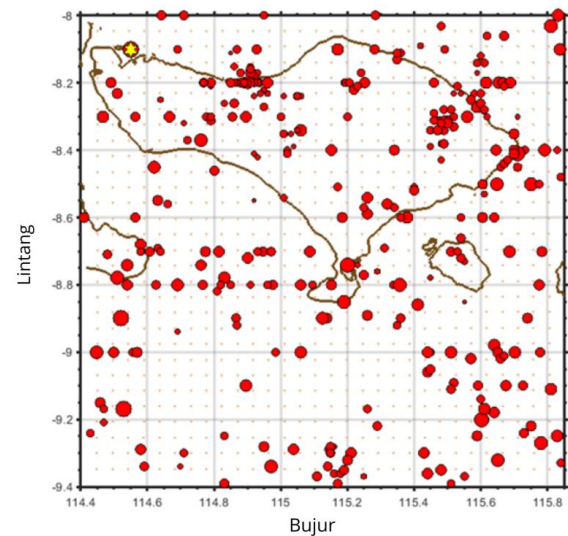


Gambar 3. Kedalaman gempabumi

Berdasarkan analisis zona seismik di wilayah Bali, Karakteristik gempabumi di Pulau Bali selama periode 1980–2023 menunjukkan dominasi gempa lemah hingga menengah dengan magnitudo antara 3,5 hingga 4,5 Mw, dimana puncak distribusi berada pada sekitar 3,8 Mw. Distribusi magnitudo menyerupai kurva normal, yang mengindikasikan bahwa gempa besar (>6 Mw) jarang terjadi, tercatat hanya pada 4 Mei 1985, 14 Juli 2019, dan 16 Agustus 2020. Frekuensi gempa kecil meningkat terutama setelah tahun 2010, yang kemungkinan dipengaruhi oleh peningkatan sensitivitas dan kepadatan stasiun seismik sehingga lebih banyak gempa bermagnitudo rendah berhasil direkam. Dari sisi kedalaman, sebagian besar gempa berada pada kedalaman dangkal (<50 km), dengan puncak distribusi pada kedalaman 5–10 km yang mencatat lebih dari 120–130 kejadian. Gempa menengah (50–150 km) dan dalam (>150 km) terjadi secara sporadis, menunjukkan kontribusi minor dari zona subduksi selatan Bali. Dominasi gempa dangkal memiliki implikasi signifikan terhadap risiko seismik karena intensitas getaran lebih besar di permukaan, sehingga meskipun magnitudo tidak terlalu tinggi, potensi kerusakan tetap ada, terutama jika terjadi di kawasan padat penduduk (Dewi & Prastowo, 2021). Kombinasi antara distribusi magnitudo dan kedalaman ini menunjukkan bahwa akumulasi gempa kecil hingga

menengah di kedalaman dangkal dapat menyebabkan dampak yang cukup signifikan. Temuan ini penting untuk evaluasi bahaya seismik, terutama dalam menentukan parameter Peak Ground Acceleration (PGA) dan Spectral Acceleration (SA), serta untuk perencanaan mitigasi risiko bencana di wilayah Bali. Secara keseluruhan, pola seismik ini konsisten dengan karakteristik daerah tektonik aktif, yaitu dominasi gempa dangkal dengan magnitudo kecil hingga menengah, dan kejadian gempa besar yang jarang namun tetap berpotensi menimbulkan risiko signifikan (Lubis dkk, 2022).

Distribusi Epiosenter Gempa Bumi Berdasarkan Katalog Seismik di Pulau Bali (1980–2023)

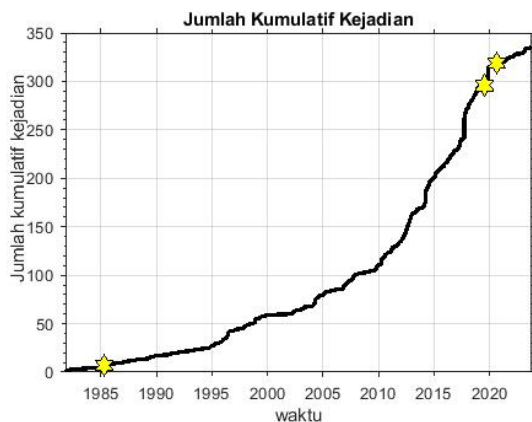


Gambar 4. Peta sebaran episenter gempabumi pulau bali

Zona *Deep Background* ketiga yang berada pada kedalaman 100–150 km juga menunjukkan nilai *a-b value* yang tergolong sedang hingga tinggi, dengan *a-value* sebesar 6,62 dan *b-value* sebesar 1,17. Nilai-nilai ini menandakan aktivitas seismik yang masih tergolong aktif dengan frekuensi kejadian gempa mencapai 38 peristiwa. Pelepasan energi yang terjadi secara terus-menerus mengakibatkan rendahnya tingkat stress batuan dan magnitudo gempa yang terjadi pun cenderung kecil. Sesuai dengan kajian Wibowo et al. (2024), *b-value* yang tinggi berhubungan dengan tingkat stress yang rendah, dan hal tersebut diperlihatkan secara konsisten pada zona ini (Pratama, 2020).

Penerapan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) dalam penelitian ini menghasilkan peta distribusi *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan *Spectral Acceleration* (SA) di batuan dasar dengan kecepatan gelombang geser $V_s = 760$ m/s. Nilai PGA dihitung untuk probabilitas terlampaui sebesar 10% dalam kurun waktu 50 tahun. Hasilnya menunjukkan bahwa Pulau Bali berada dalam zona dengan nilai PGA yang tergolong sedang hingga tinggi, yaitu dalam kisaran 1000 hingga 2000 gal. Nilai tertinggi mencapai 0,9 g dan

ditemukan pada jalur segmentasi sesar, yang ditunjukkan pada kontur berwarna merah muda pada peta proyeksi. Sedangkan daerah dengan nilai PGA lebih rendah, yaitu sekitar 1000 gal, ditunjukkan oleh kontur berwarna hijau muda (Baker, 2008).



Gambar 5. Cummulative Rate Gempabumi di Pulau Bali

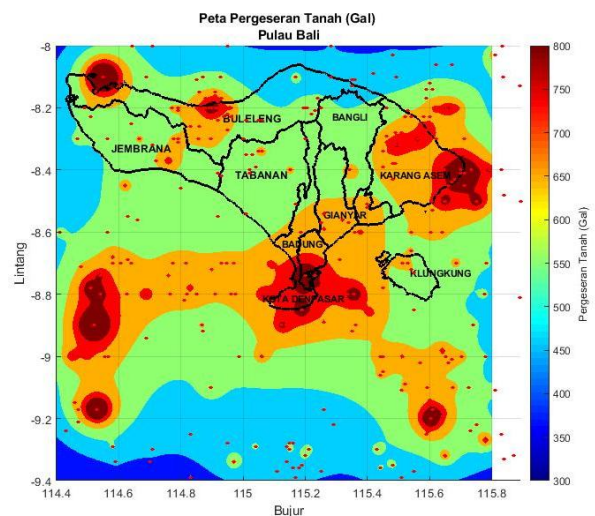
Pulau Bali berada di zona tektonik aktif yang dipengaruhi oleh pertemuan Lempeng Indo-Australia dan Eurasia, dengan dua sumber gempa utama: zona subduksi di selatan dan sesar aktif di daratan. Pola distribusi spasial menunjukkan tingginya aktivitas seismik, sedangkan analisis temporal mengindikasikan tren peningkatan jumlah gempa dari tahun ke tahun, terutama setelah tahun 2000. Data cumulative rate menunjukkan lonjakan signifikan pada periode 2016–2021, yang kemungkinan terkait akumulasi energi tektonik dan peningkatan sensitivitas pencatatan gempa. Pelepasan momen kumulatif juga menunjukkan lonjakan energi pada periode 2019–2022, menandakan beberapa gempa besar dalam waktu singkat.

Berdasarkan histogram magnitudo dan kedalaman, mayoritas gempa di Bali memiliki magnitudo 3,5–4,5 Mw dan kedalaman dangkal (<50 km), dengan puncak frekuensi pada 0–10 km. Gempa besar (>6 Mw) jarang terjadi, misalnya pada 1985, 2019, dan 2020. Gempa dangkal berpotensi menimbulkan kerusakan signifikan meski magnitudonya sedang, sedangkan gempa menengah (60–300 km) lebih sporadis dan dampaknya di permukaan lebih ringan.

Analisis temporal menunjukkan dominasi gempa tektonik dengan total 336 mainshock dari 2.622 kejadian katalog. Distribusi magnitudo terhadap waktu memperlihatkan dominasi gempa ringan hingga sedang, sementara gempa besar (>6 Mw) muncul sporadis, terutama pasca 2018. Declustering dilakukan untuk memisahkan mainshock dari aftershock/foreshock, menghasilkan 336 mainshock, dengan distribusi merata di seluruh Bali, konsentrasi tinggi di utara (Buleleng) dan selatan (pesisir). Sumber gempa utama adalah: megathrust selatan Bali, sesar aktif daratan, dan seismisitas latar.

Analisis Gutenberg-Richter menghasilkan a-value 4,104–4,320, b-value 0,53–0,61, dan Magnitude of Completeness (M_c) 3,5. Peta a-value menunjukkan aktivitas tinggi di selatan dan tenggara Bali, sedangkan b-value rendah di selatan dan barat daya menandakan potensi gempa besar relatif lebih tinggi. Zona dangkal menunjukkan aktivitas seismik lebih intens dibanding zona menengah, meski keduanya berpotensi menghasilkan gempa besar.

Selanjutnya, peta seismisitas yang ditampilkan pada 10 menggambarkan distribusi spasial frekuensi gempa bumi di wilayah Bali. Peta ini memberikan pemahaman lebih lanjut tentang konsentrasi aktivitas seismik di wilayah rawan gempa, terutama di sepanjang zona subduksi dan jalur patahan aktif. Hampir seluruh kabupaten di Pulau Bali berada dalam kawasan dengan nilai PGA yang cukup signifikan, sehingga risiko bencana gempa bumi di wilayah ini tergolong tinggi. Informasi ini sangat penting sebagai dasar dalam penilaian risiko dan perencanaan pembangunan infrastruktur tahan gempa di wilayah Bali.



Gambar 6. Peta PGA Pulau Bali

Peta distribusi kejadian gempa bumi di Pulau Bali yang disajikan dalam kajian ini menyajikan informasi visual yang sangat penting untuk memahami karakteristik seismik wilayah. Peta tersebut berhasil memadukan data kegempaan dengan informasi geologi dan geografi secara komprehensif. Lingkaran berwarna yang menunjukkan variasi magnitudo gempa (dari M_2 hingga > $M_6</math>), serta garis-garis sesar aktif berwarna merah dan biru, memberikan gambaran kuat tentang hubungan spasial antara sumber kegempaan dan struktur geologi yang ada. Skala peta sebesar 1:500.000 memberikan ruang analisis distribusi gempa yang cukup luas dengan cakupan koordinat yang mencerminkan keseluruhan wilayah Pulau Bali (Vipin dkk, 2009).$

Analisis distribusi spasial gempa menunjukkan bahwa wilayah utara dan tengah Bali merupakan zona dengan aktivitas seismik yang paling intensif. Hal ini tercermin dari konsentrasi kejadian gempa, terutama dengan magnitudo $\geq M5$, yang berada dekat dengan sesar aktif. Fenomena ini memperkuat korelasi antara aktivitas sesar dan frekuensi kejadian. Peta sebaran percepatan tanah maksimum (PGA) hasil pemodelan probabilistik bahaya gempabumi di Pulau Bali menunjukkan konsentrasi nilai tertinggi di gempa. Sebaliknya, wilayah selatan Bali relatif lebih stabil secara seismik, dengan intensitas dan frekuensi gempa yang lebih rendah. Distribusi gempa kecil ($M \leq 3$) yang tersebar merata namun tetap terkonsentrasi di utara dan tengah juga menunjukkan dinamika tektonik yang aktif di wilayah tersebut. Informasi ini sangat relevan dalam konteks mitigasi bencana, karena menunjukkan area dengan risiko gempa yang lebih tinggi (Kijko, 2011).

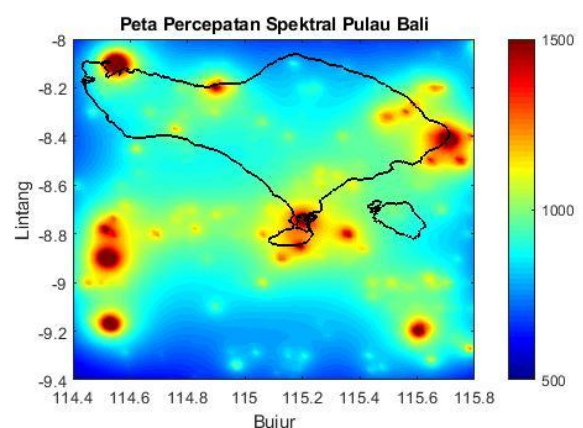
Keberadaan sesar aktif yang didominasi oleh orientasi barat-timur dan barat laut-tenggara menjadi perhatian utama. Sesar-sesar ini, bersama keberadaan gunung berapi aktif seperti Gunung Agung dan Gunung Batur, diduga berkontribusi terhadap peningkatan aktivitas seismik. Kombinasi antara tektonik dan aktivitas vulkanik ini menjadikan sebagian wilayah utara Bali sebagai kawasan dengan tingkat kerentanan gempa yang signifikan. Kota-kota yang terletak di sekitar jalur sesar aktif, seperti Singaraja, secara geografis dan struktural berada dalam zona bahaya yang memerlukan perhatian lebih dalam perencanaan dan penguatan infrastruktur (Ghione dkk, 2021).

Wilayah selatan Bali, khususnya Kota Denpasar, Kabupaten Badung, dan sebagian Gianyar, yang ditandai dengan warna merah tua dengan nilai PGA >700 gal. Tingginya percepatan tanah ini diduga terkait dengan kedekatan wilayah tersebut terhadap zona subduksi Lempeng Indo-Australia dan segmen megathrust selatan Bali yang aktif secara tektonik, serta pengaruh aktivitas sesar lokal di wilayah timur laut seperti Karangasem. Wilayah lain seperti Kabupaten Tabanan, Bangli, dan Jembrana memiliki nilai PGA sedang hingga rendah (500–600 gal), sedangkan daerah pesisir utara dan kawasan laut umumnya memiliki PGA terendah (<400 gal), ditandai dengan warna biru kehijauan. Distribusi PGA ini memberikan dasar bagi identifikasi zonasi bahaya seismik di setiap kabupaten/kota, di mana wilayah dengan nilai PGA tinggi memerlukan perhatian khusus untuk mitigasi risiko, terutama karena sebagian besar merupakan pusat aktivitas ekonomi, kepadatan penduduk tinggi, dan memiliki infrastruktur penting. Hasil ini penting untuk perencanaan pembangunan berbasis risiko, termasuk pengembangan tata ruang, penerapan standar bangunan tahan gempa, dan strategi pengurangan

risiko bencana yang adaptif terhadap karakteristik lokal (Ghione dkk, 2021).

Selain itu, analisis percepatan spektral (Spectral Acceleration, SA) memberikan informasi mengenai respons percepatan maksimum struktur bangunan akibat gempabumi pada periode getar tertentu. Peta sebaran SA, baik dalam bentuk Grid SA maupun SA untuk periode getar $T = 0,1$ s, menunjukkan nilai tertinggi (>1400 cm/s²) juga terkonsentrasi di wilayah selatan dan timur Bali, terutama Denpasar, Badung, dan Karangasem. Tingginya nilai SA ini mencerminkan potensi risiko seismik yang signifikan bagi struktur bangunan, dipengaruhi oleh aktivitas subduksi di selatan dan keberadaan sesar lokal di timur Bali. Distribusi SA ini menjadi acuan penting dalam desain struktur tahan gempa dan perencanaan mitigasi risiko bencana di kawasan dengan kepadatan penduduk dan aktivitas ekonomi tinggi (Sudrajad, 2022).

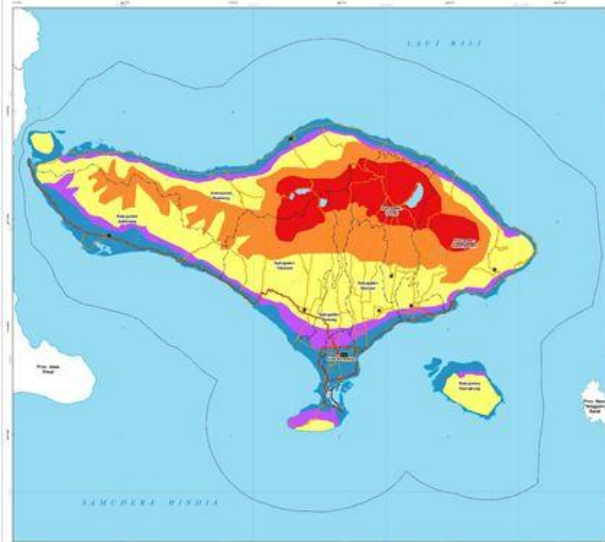
Selanjutnya, analisis nilai Peak Ground Acceleration (PGA) dan Spectral Acceleration (SA) melalui pendekatan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) memberikan nilai tambah dalam memahami zonasi kerawanan gempa. Informasi PGA dan SA sangat bermanfaat dalam mengidentifikasi wilayah dengan potensi kerusakan tertinggi akibat gempa, terutama di daerah dengan kepadatan infrastruktur tinggi. Kajian ini menyoroti pentingnya overlay data PGA dan SA dengan data spasial permukiman untuk mendeteksi potensi risiko secara lebih akurat. Wilayah seperti Kabupaten Badung yang mencakup Kuta, Seminyak, dan Nusa Dua, serta wilayah Gianyar (Ubud) dan Kota Denpasar, merupakan contoh lokasi dengan kombinasi kepadatan penduduk, kegiatan ekonomi, dan tingkat kerentanan seismik yang tinggi (Fulop dkk, 2023).



Gambar 7. Peta Percepatan Spektral (SA) Pulau Bali

Penting dicatat bahwa pada tahun 1995 telah terjadi gempa besar yang menimbulkan kerusakan signifikan di wilayah dengan pemukiman padat. Hal ini menjadi dasar bahwa analisis historis juga perlu menjadi bagian dalam model zonasi risiko. Oleh karena itu,

penilaian risiko gempa tidak hanya mengandalkan pada potensi seismik (PGA/SA), tetapi juga mempertimbangkan eksposur dan kerentanan infrastruktur. Data zonasi yang didasarkan pada PSHA harus dijadikan dasar untuk menetapkan prioritas penanggulangan bencana dan penguatan struktur bangunan pada wilayah-wilayah tersebut (Convertito dkk, 2021).



Gambar 8. Peta Topografi



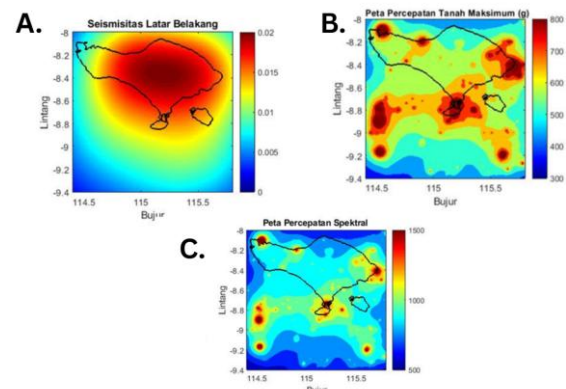
Gambar 9. Peta Geologi

Berdasarkan peta topografi Gambar 6 dan peta geologi Gambar 7 Provinsi Bali memberikan gambaran visual mengenai karakteristik fisik wilayah melalui variasi warna yang menunjukkan perbedaan ketinggian dan jenis tanah. Peta topografi mempermudah identifikasi area dengan ketinggian yang berbeda, seperti dataran rendah, lereng, dan puncak pegunungan, yang relevan untuk menilai kerentanan terhadap fenomena seperti longsor atau erosi yang dapat diperparah oleh aktivitas seismik. Sementara itu, peta geologi menampilkan berbagai jenis tanah yang

mengungkap karakteristik substrat wilayah; hal ini penting karena jenis tanah memengaruhi amplifikasi gelombang seismik selama gempa, di mana tanah lempung cenderung memperkuat getaran dibandingkan batuan keras. Kompas yang terletak di sudut kanan bawah peta memberikan panduan arah, memudahkan orientasi geografis dan kaitannya dengan fitur geologi maupun topografi, sehingga informasi ini dapat digunakan dalam perencanaan mitigasi risiko bencana dan evaluasi kerentanan wilayah.

Peta topografi dan geologi turut memperkuat kajian ini dengan memberikan gambaran kondisi fisik dan komposisi tanah di Bali. Peta topografi membantu mengidentifikasi perbedaan ketinggian yang relevan terhadap risiko bencana ikutan seperti longsor, sementara peta geologi membantu memahami karakter substrat tanah yang memengaruhi amplifikasi gelombang seismik. Tanah lempung, misalnya, diketahui memiliki kemampuan memperkuat getaran, yang berarti bahwa wilayah dengan jenis tanah ini lebih rentan terhadap kerusakan struktural saat gempa terjadi (Yu dkk, 2024).

Pelengkap penting lainnya adalah peta 3D PGA yang memberikan visualisasi tiga dimensi mengenai pola distribusi akselerasi tanah akibat gempa. Representasi ini tidak hanya membantu identifikasi zona rawan secara vertikal dan horizontal, tetapi juga memungkinkan perencanaan yang lebih presisi dalam penguatan infrastruktur. Profil penampang seperti "A" dan "A'" serta penggunaan simbol bintang untuk menandai episenter memberikan informasi lokal yang detail dan krusial dalam pemetaan risiko. Distribusi titik-titik akselerasi yang dikombinasikan dengan kontur tanah memperlihatkan gradasi risiko secara lebih akurat dibandingkan dengan peta 2D tradisional (Sulastri & Sunardi, 2016).



Gambar 10. Peta Hasil Analisis Bahaya Gempa di Wilayah Bali

Hasil analisis distribusi spasial setelah proses declustering menunjukkan bahwa densitas kejadian gempa utama terpusat di bagian tengah hingga timur

Pulau Bali, menandakan bahwa wilayah ini relatif lebih aktif secara seismik. Analisis Peak Ground Acceleration (PGA) memperlihatkan bahwa intensitas maksimum guncangan permukaan juga terkonsentrasi di bagian tengah dan tenggara Bali, menegaskan bahwa wilayah dengan konsentrasi gempa utama tinggi cenderung mengalami guncangan yang lebih kuat. Selaras dengan hal tersebut, analisis percepatan respons spektral (Spectral Acceleration/SA) menunjukkan nilai respons struktur terhadap gempa pada periode tertentu dapat mencapai lebih dari 1500 gal, tersebar pada area yang sama dengan konsentrasi PGA tinggi, sehingga meningkatkan risiko kerusakan struktur bangunan. Ketiga peta ini secara umum menunjukkan pola bahaya gempa yang konsisten, meskipun terdapat ketidaksesuaian spasial kecil antara seismisitas latar belakang dengan nilai PGA dan SA, yang menegaskan bahwa percepatan tanah dipengaruhi tidak hanya oleh frekuensi gempa, tetapi juga oleh karakteristik sumber, kedalaman, dan kondisi geoteknik setempat.

Informasi ini memperkuat pentingnya integrasi data SA dalam perencanaan tata ruang, perumahan, dan pembangunan infrastruktur publik di Bali. Nilai PGA dan SA dari metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) sangat berguna untuk memetakan zonasi kerawanan gempa, terutama untuk mengidentifikasi daerah dengan risiko kerusakan infrastruktur akibat gempa, yang terkait dengan kepadatan pemukiman, fasilitas umum, dan perkantoran. Berdasarkan sejarah kegempaan, misalnya gempa tektonik tahun 1995 yang menimbulkan kerusakan di pemukiman rapat, wilayah dengan kepadatan tinggi seperti Kabupaten Badung—yang mencakup Kuta, Seminyak, dan Nusa Dua—menjadi prioritas mitigasi, mengingat banyaknya hotel, pusat perbelanjaan, dan Bandara Internasional Ngurah Rai. Wilayah lain seperti Ubud di Kabupaten Gianyar dan Kota Denpasar juga memiliki pemukiman dan infrastruktur padat, sehingga jika berada dalam zona dengan PGA dan SA tinggi, potensi kerusakannya signifikan.

Selain itu, peta topografi dan geologi Provinsi Bali memberikan konteks fisik yang relevan untuk analisis kerentanan bencana. Peta topografi mempermudah identifikasi dataran rendah, lereng, dan puncak pegunungan, yang relevan terhadap risiko fenomena seperti longsor atau erosi yang dapat diperparah oleh gempa. Peta geologi menggambarkan jenis tanah yang memengaruhi amplifikasi gelombang seismik, di mana tanah lempung cenderung memperkuat getaran dibandingkan batuan keras. Kompas yang terletak pada sudut peta memberikan orientasi geografis, memudahkan pengaitan fitur geologi dan topografi dengan distribusi PGA dan SA. Keseluruhan analisis ini menunjukkan bahwa integrasi

data spasial seismik, topografi, dan geologi sangat penting untuk perencanaan mitigasi risiko bencana gempa di Bali, khususnya di wilayah dengan kepadatan infrastruktur tinggi (Rubaiyn dkk, 2023).

Secara keseluruhan, integrasi antara data spasial gempa, struktur geologi, informasi PGA/SA, serta data geoteknik dalam bentuk peta topografi dan 3D PGA, memberikan landasan kuat untuk perencanaan mitigasi bencana berbasis bukti. Zonasi risiko berbasis PGA dan SA, bila diterapkan dengan baik, mampu mengarahkan kebijakan pembangunan dan penguatan infrastruktur pada wilayah yang memang memiliki risiko tinggi. Dengan kata lain, kajian ini sangat mendukung upaya pembangunan yang berkelanjutan dan tangguh terhadap gempa bumi di Pulau Bali, khususnya dalam konteks urbanisasi dan pengembangan wilayah yang kian intensif.

Kesimpulan

Kajian terhadap peta distribusi gempa bumi di Pulau Bali menunjukkan bahwa wilayah utara dan tengah Bali merupakan zona dengan aktivitas seismik tertinggi, yang dipengaruhi oleh keberadaan sesar aktif dan gunung berapi. Analisis spasial yang memanfaatkan peta magnitudo gempa, sesar aktif, serta peta geologi dan topografi memberikan pemahaman yang mendalam mengenai hubungan antara struktur geologi dan kejadian gempa. Pendekatan Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) yang menghasilkan nilai PGA dan SA memperkuat identifikasi wilayah dengan potensi risiko kerusakan tinggi, khususnya pada area permukiman padat seperti Denpasar, Badung, dan Gianyar. Integrasi berbagai jenis data dalam bentuk visualisasi dua dan tiga dimensi memperlihatkan distribusi risiko secara lebih akurat dan aplikatif dalam konteks mitigasi bencana. Oleh karena itu, hasil kajian ini dapat dijadikan sebagai dasar penting dalam perencanaan tata ruang, penguatan bangunan, dan kebijakan pengurangan risiko bencana di Pulau Bali, sehingga mendukung terwujudnya wilayah yang lebih aman, tangguh, dan berkelanjutan terhadap ancaman gempa bumi.

Referensi

- Ayundita, A. A., Lubis, L. H., Wardono, W., & Sari, N. 2022. Aktivitas Seismisitas di Wilayah Sumatera Bagian Utara Menggunakan Arc-GIS Periode 2020-2021. *Jurnal Ilmiah Ilmu Terapan Universitas Jambi*, 6(2), 154-163.
- Azmiyati, U. 2021. Analisis Percepatan Getaran Tanah Maksimum Akibat Gempabumi di Wilayah Nusa Tenggara dengan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). *Jurnal Ilmu Sosial dan Pendidikan*, 5(1), 331 - 339.

- Baker, J. W. 2008. *Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Convertito, V., Ebrahimian, H., Amoroso, O., Jalayer, F., Matteis, R. D., & Capuano, P. 2021. Time-Dependent Seismic Hazard Analysis for Induced Seismicity: The Case of St Gallen (Switzerland), Geothermal Field. *Energies* 2021, 14(10).
- Dewi, E. A., & Prastowo, T. 2021. Studi Seismisitas Melalui Penentuan Parameter a-Value dan b-Value di Wilayah Sumatera Barat. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, 10(02), 48 - 58.
- Ghione, F., Poggi, V., & Lindholm, C. 2021. A Hybrid Probabilistic Seismic Hazard Model for Northeast India and Bhutan Combining Distributed Seismicity and Finite Faults. *Physics and Chemistry of the Earth*, 123.
- Fulop, L., Mantyniemi, P., Malm, M., Toro, G., Crespo M. J., Schmitt, T., Burck, S., & Valikangas, P. 2023. Probabilistic Seismic Hazard Analysis in Low-Seismicity Regions: An Investigation of Sensitivity with A Focus on Finland. *Natural Hazards*, 116(1), 111 - 132.
- Hudayat, N. 2021. Rancang Bangun Aplikasi Meteorologi dan Geofisika dengan Menggunakan Bahasa Pemrograman Matlab dan GMT. *Megasains*, 12(1), 17-25.
- Kijko, A. 2011. *Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. South Africa: University of Pretoria.
- Pratama, I. P. D. 2020. Pemetaan dan Analisis Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Radius 500 KM dari Denpasar. *Jurnal Geografi Gea*, 20(1), 54 - 62.
- Rubaiyn, A., Safani, J., & Anwar, K. 2023. Analisis Tingkat Seismisitas dan Percepatan Tanah Maksimum (PGA) Wilayah Sulawesi Tenggara Berdasarkan Data Gempabumi Periode 1973 - 2022. *Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia*, 5(2), 70 - 81.
- Sudrajad, B. 2022. Delineasi Struktur Patahan di Wilayah Kabupaten Nabire Papua Menggunakan Analisis Horizontal Derivatif Orde Pertama (FHD) dan Orde Kedua (SHD) Berdasarkan Data Anomali Gravitasi. *Jurnal Fisika Papua*, 1(2): 37 - 45.
- Sulastris, S., & Sunardi, B. 2016. Pendekatan Probabilistik untuk Penilaian Bahaya Gempabumi Kawasan Universitas Padjajaran Jatinangor. *Seminar Nasional Geofisika* (pp 82 - 95). Semarang, Indonesia.
- Taroni, M., & Akinci, A. 2021. Good Practices in PSHA: Declustering, b-value Estimation, Foreshocks and Aftershocks Inclusion; A Case Study in Italy. *Geophysical Journal International*, 224(2), 1174 - 1187.
- Uduweriya, S. B., Wijesundara, K. K., Dissanayake, P. B. R., Susantha, K. A. S., & Seneviratne, H. N. 2020. Seismic Response of Sri Lanka Using PSHA Technique. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 53(2), 39 -45.
- Vipin, K. S., Anbazhagan, P., & Sitharam, T. G. 2009. Estimation of Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration for South India with Local Site Effects: Probabilistic Approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(3), 865 -878.
- Yu, X. H., Zhou, Z., Lu, D. G., & Ji, K. 2023. A Practical Approach of Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Vector IMs Regarding Mainshock with Potentially Largest. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(3), 637 - 658.