



## Analisis Bahaya Gempa Bumi Berdasarkan Nilai *Peak Ground Acceleration (PGA)* Menggunakan Metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)* di Wilayah Bali dan Nusa Tenggara

Muhammad Hafeezul<sup>1</sup>, Yudha Styawan<sup>1</sup>, Rizki Wulandari<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i1.1621>

### Article Info:

Received : 02 Desember 2025  
Revised : 12 Desember 2025  
Accepted : 21 Januari 2026  
Published : 19 Januari 2026

Correspondence:  
Rizki Wulandari

Phone : +6283146486448

**Abstract:** The Bali, West Nusa Tenggara (NTB), and East Nusa Tenggara (NTT) regions are located within an active tectonic zone influenced by the transition subduction of the Sunda–Banda arc and the presence of surrounding active faults, resulting in a high potential for earthquake hazards. This study was conducted to evaluate seismic hazard through the estimation of Peak Ground Acceleration (PGA) using the Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) method. The analysis is based on an earthquake catalog covering the period 1964–2024 and considers various seismic sources, including shallow background, deep background, active faults, and megathrust sources. Earthquake occurrence models for fault and subduction sources were represented using a truncated exponential model. Ground motion predictions were calculated using several Ground Motion Prediction Equations (GMPEs), which were combined through a logic tree approach. The calculations were performed at bedrock conditions with a  $V_{s30}$  value of 760 m/s, for exceedance probabilities of 10% and 2% within a 50-year period. The results indicate that PGA values for a 10% probability of exceedance range from 0.36 to 1.18  $g$ , while those for a 2% probability of exceedance range from 0.62 to 1.75  $g$ . High PGA values are distributed in the southern and eastern regions, which are adjacent to megathrust segments and active faults with high slip rates, whereas the northern regions exhibit lower PGA values. These results are important for public awareness in earthquake disaster mitigation efforts and for earthquake-resistant building planning.

**Keywords:** Seismic hazard; PSHA; Peak Ground Acceleration; Sunda–Banda subduction; Bali; Nusa Tenggara

**Citation:** Hafeezul, M., Styawan, Y., & Wulandari, R. (2026). Analisis Bahaya Gempa Bumi Berdasarkan Nilai Peak Ground Acceleration (PGA) Menggunakan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) di Wilayah Bali dan Nusa Tenggara. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(1), 23–33. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i1.1621>

### Pendahuluan

Secara tektonik, Indonesia termasuk salah satu wilayah dengan tingkat kegempaan yang tinggi, yang menjadikannya rentan terhadap kejadian gempa bumi merusak (Prasetyo, Effendi, & Miharja, 2023). Hal tersebut terjadi karena Indonesia terletak di pertemuan 4 lempeng, yaitu Eurasia, Australia, Pasifik, dan Laut Filipina (Hall & Spakman, 2015). Setiap lempeng bergerak satu sama lain, dengan lempeng samudra yang tersubduksi ke bawah lempeng benua (Zheng & Chen,

2016). Pergerakan tersebut membuat aktivitas seismik yang tinggi di sepanjang batas lempeng. Selain di zona subduksi gempa bumi juga dapat terjadi di atasnya yaitu pada zona sesar aktif (Hutchings & Mooney, 2021). Efek dan dampak gempa bumi dapat dirasakan di wilayah yang jauh dari sumbernya, sebab tergantung pada kondisi geologi wilayah tersebut (Wibowo dkk., 2024).

Provinsi Bali, Nusa Tenggara Barat (NTB), dan Nusa Tenggara Timur (NTT) secara geografis termasuk

Email: rizki.wulandari@tg.itera.ac.id

wilayah Kepulauan Sunda Kecil, yang merupakan sekelompok pulau kecil yang terletak di antara timur Jawa dan Kepulauan Banda (Sulaeman, Hidayati, Omang, & Priambodo, 2018). Wilayah ini terletak di pertemuan lempeng Eurasia dengan Australia, atau berada di zona transisi busur Sunda-Banda yang menjadi sumber aktivitas seismik utama (Diaz, Suarbawa, & Mursitanyo, 2018; Hasanah, Supendi, Nugraha, Widiyantoro, & Syaifuddin, 2024; Supendi dkk., 2022). Selain itu, aktivitas seismik di wilayah ini bersumber dari patahan *Flores Back-Arc Thrust* (FBT) yang merupakan busur belakang akibat dari subduksi (Felix dkk., 2022).

Berdasarkan data historis, wilayah Bali, NTB, dan NTT memiliki aktivitas seismik gempa yang tinggi dan banyak akan kejadian gempa besar (Al-fakhiroh & Prastowo, 2023; Faiza & Ariyanto, 2024). Wilayah NTB pernah terjadi rangkaian gempa merusak dalam 1 dekade terakhir, dengan gempa utama terjadi di Lombok pada 9 Agustus 2018 dengan magnitudo 6,9  $M_w$  (Priyono dkk., 2021). Gempa ini terjadi karena aktivitas seismik yang tersebar di sepanjang patahan FBT (Sasmi, Nugraha, Muzli, Widiyantoro, & Zulfakriza, 2020), yang mengakibatkan korban 436 meninggal dunia, 1.353 terluka, dan 352.793 orang mengungsi, dengan total kerugian lebih dari 5,04 triliun rupiah (BNPb, 2018). Gempa bumi bermagnitudo 4,3  $M_w$  terjadi di Bali (Karangasem) pada 16 Oktober 2021, gempa bumi ini mengakibatkan 3 orang meninggal, 83 orang terluka, dan 1.131 bangunan mengalami kerusakan (BPBD-Bali, 2021). Lalu di NTT, tepatnya di Kupang terjadi gempa bumi dengan magnitudo 6,6  $M_w$  pada 2 November 2023 yang bersumber dari sesar aktif dan mengakibatkan kerusakan pada 192 bangunan (Wijaya dkk., 2025).

Analisis bahaya seismik perlu dilakukan untuk memperkirakan guncangan tanah akibat gempa bumi di masa depan (Gerstenberger dkk., 2020). Dalam analisis bahaya seismik, nilai PGA digunakan untuk mengukur intensitas getaran tanah akibat gempa. Kemudian dalam penentuan nilai PGA digunakan metode PSHA karena mempertimbangkan semua kemungkinan kejadian gempa dan gerakan tanah yang dihasilkannya, untuk menemukan tingkat intensitas gerakan tanah yang terlampaui (Baker, Bradley, & Stafford, 2021). Penelitian menggunakan metode PSHA di wilayah ini pernah dilakukan oleh Azmiyati (2021), namun hasil akhirnya tidak berupa penggabungan semua sumber gempa. Kemudian, di wilayah Bali pernah dilakukan oleh Pratama (2020) dan Kurniawan, Budiono, Lukito, & Sumarwoto (2023), serta di wilayah NTB dilakukan oleh Ananda & Pujiastuti (2024). Selain itu, Tim PuSGeN (2017) telah melakukan penelitian mengenai PSHA di seluruh wilayah Indonesia, kemudian penelitian ini dilanjutkan Tim PuSGeN (2022) dengan hasil nilai PGA mengalami peningkatan dibanding sebelumnya.

Namun, penelitian Tim PuSGeN (2017) dan Tim PuSGeN (2022) tidak menghitung *annual-rate* pada sumber patahan dan *megathrust*, sedangkan penelitian ini menghitung *annual-rate* tersebut menggunakan pendekatan *truncated exponential model*, selain itu penelitian ini menggunakan data katalog gempa yang lebih baru dengan periode waktu 1964–2024.

Pada penelitian ini dilakukan analisis PSHA di batuan dasar dengan  $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ . Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sebaran nilai PGA pada batuan dasar di Provinsi Bali, NTT, dan NTB dengan metode PSHA untuk probabilitas terlampaui (*Probability of Exceedance*, PoE) 2% dan 10% pada periode 50 tahun masa bangunan (Tim PuSGeN, 2017). Kemudian, mengidentifikasi tingkat bahaya gempa bumi di Provinsi Bali, NTT, dan NTB berdasarkan nilai PGA batuan dasar. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi bahaya seismik kepada untuk mendukung mitigasi bencana gempa bumi, serta menjadi referensi dalam perencanaan pembangunan tahan gempa di kawasan ini.

## Metode

### Aktivitas Seismik

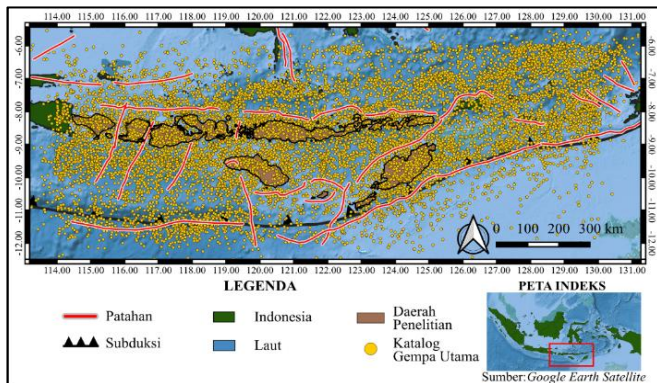
Data gempa yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari katalog *International Seismological Centre* (ISC, <https://www.isc.ac.uk/iscgem/download.php>, terakhir diakses 12 Januari 2025). yang mencakup periode waktu 1964–2024. Katalog tersebut memuat informasi waktu kejadian, koordinat episentrum, kedalaman, serta magnitudo gempa bumi. Area pengumpulan data dibatasi di sekitar lokasi penelitian dengan batasan daerah  $113^{\circ}20' - 129^{\circ}48' \text{ BT}$  dan  $5^{\circ}36' - 13^{\circ}6' \text{ LS}$ . Didapatkan 57.658 katalog gempa dengan rentang magnitudo 1,7–7,3  $M_w$  pada kedalaman 0–740 km. Kemudian, dilakukan penyamaan jenis magnitudo ke magnitudo *moment* ( $M_w$ ), katalog dari magnitudo lokal ( $M_L$ ), magnitudo *surface* ( $M_S$ ), dan magnitudo *body* ( $M_b$ ), dikonversi menggunakan persamaan yang diusulkan Irsyam dkk. (2020). Dalam analisis dari risiko bahaya gempa perlu dilakukan proses *declustering* untuk mendapatkan katalog gempa utama. Proses ini dilakukan menggunakan persamaan Gardner & Knopoff (1974) yang akan menghapus *foreshock* dan *aftershock*, sehingga menyisakan *mainshock* berdasarkan rentang jarak dan waktu pada serangkaian kejadian gempa tertentu, yang dinyatakan sebagai:

$$T(M) = 10^{0.031M+2.7389}, \quad M \geq 6.5$$

$$T(M) = 10^{0.540M-0.547}, \quad M < 6.5$$

$$L(M) = 10^{0.1238M+0.983}$$

*L* menyatakan jarak maksimum gempa dalam satuan kilometer, *T* menunjukkan batas waktu maksimum dalam hari, sedangkan *M* adalah magnitudo gempa utama. Setelah dilakukan proses *declustering* didapatkan sebanyak 12.335 katalog gempa utama yang dapat dilihat pada **Gambar 1**, data ini yang digunakan pada pengolahan selanjutnya.

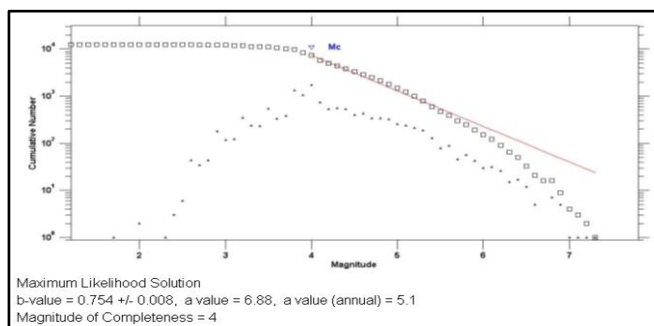


**Gambar 1.** Persebaran katalog ISC gempa utama periode 1964–2024 setelah dihilangkan *foreshock* dan *aftershock*, dengan sumber patahan dan subduksi dari Tim PuSGeN (2017)

Untuk memastikan bahwa data katalog yang digunakan mencakup data gempa yang lengkap, perlu dilakukan penentuan *magnitude of completeness* ( $M_c$ ). Nilai  $M_c$  ditentukan berdasarkan hubungan antara magnitudo dengan jumlah kejadiannya dengan parameter *a-value* dan *b-value* melalui *Magnitude-Frequency Distribution* (MFD) dengan hukum Gutenberg & Richter (1944), yang dinyatakan sebagai:

$$\log N(M) = a - bM$$

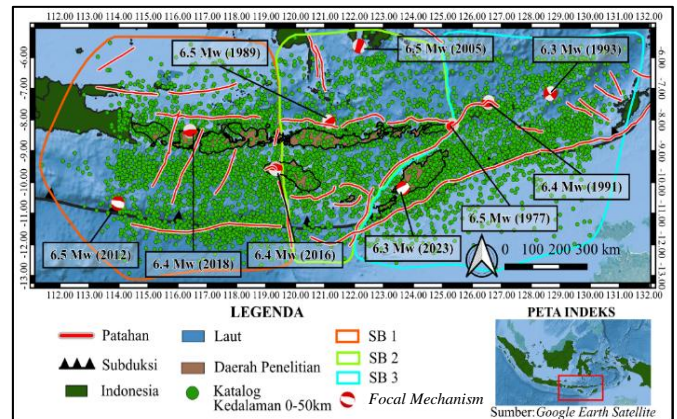
*N* adalah jumlah kejadian gempa dengan magnitudo lebih besar dari *M*, sedangkan *a* dan *b* merupakan parameter seismisitas. Penentuan  $M_c$  penting untuk menghindari bias akibat ketidaklengkapan data pada magnitudo kecil. Berdasarkan kelengkapan data katalog tersebut, ditentukan nilai  $M_c = 4$  yang akan digunakan untuk seluruh wilayah penelitian, seperti yang ditampilkan **Gambar 2**.



**Gambar 2.** MFD dari katalog ISC gempa utama dengan  $M_c = 4$  dalam periode tahun 1964–2024

### Karakterisasi Model Sumber Gempa

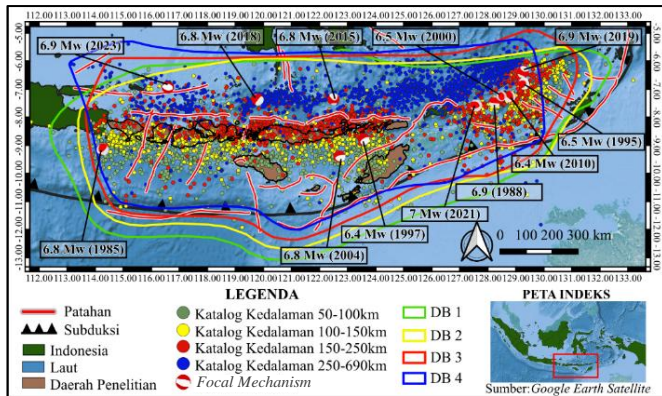
Data kejadian gempa bumi tidak dapat langsung digunakan dalam analisis bahaya tanpa pemodelan sumber gempa, karena model tersebut menjadi dasar dalam mengaitkan informasi kegempaan dengan estimasi bahaya seismik. Sumber gempa merupakan area atau bidang geografi tempat terjadinya aktivitas seismik. Sumber gempa dalam penelitian ini dibagi menjadi 4, yaitu sumber area dangkal (*shallow background*), sumber area dalam (*deep background*), sumber patahan (*fault*), dan sumber *megathrust* (Tim PuSGeN, 2022).



**Gambar 3.** Pembagian 3 area sumber *shallow background* untuk katalog utama ISC periode 1964–2024, dengan SB-1 di sebelah barat (jingga), SB-3 di sebelah timur (biru muda), dan SB-2 berada di tengahnya (hijau muda), dengan sumber patahan dan subduksi dari Tim PuSGeN (2017)

Sumber *shallow background* merupakan zona terjadi berbagai gempa dangkal di kerak bumi (*crustal seismicity*) dengan kedalaman di kurang dari 50 km (Asrurifak, 2010). Pada penelitian ini, sumber *shallow background* memiliki magnitudo maksimum <6,5 yang merupakan sifat gempa *background*, sedangkan magnitudo >6,5 dianggap dari sumber patahan. Pada wilayah penelitian ini *shallow background* dibagi menjadi 3 zona berdasarkan kondisi geologi, tektonik, dan aktivitas seismiknya, seperti **Gambar 3**. SB-1 berada di wilayah subduksi lempeng samudera di bagian selatannya, SB-1 didominasi oleh *strike-slip fault* yang mempengaruhi aktivitas seismik di wilayah ini. SB-2 dibatasi oleh *Sumba SS Fault* di bagian barat dan *Semau Fault* di bagian timur, serta area subduksi di wilayah ini merupakan transisi lempeng Australia dari samudera ke benua, namun tingkat aktivitas seismiknya lebih sedikit dibanding wilayah lain. SB-3 berada di bagian timur daerah penelitian yang menunjukkan perbedaan geologi dibandingkan wilayah barat akibat subduksi lempeng Australia yang merupakan kerak benua, sehingga mempengaruhi aktivitas seismik di area ini.

Sumber *deep background* merupakan tempat terjadinya gempa pada *intraslab* subduksi di bawah kerak bumi pada kedalaman lebih dari 50 km (Asrurifak, 2010). Zona ini terdistribusi gempa sedang hingga besar, sehingga mempengaruhi penilaian bahaya seismik untuk periode yang panjang. Pada penelitian ini *deep background* dibagi berdasarkan kedalamannya seperti **Gambar 4**, area DB-1 dengan kedalaman 50–100 km, DB-2 dengan kedalaman 100–150 km, DB-3 dengan kedalaman 150–250 km, dan DB-4 dengan kedalaman 250–690 km.



**Gambar 4.** Pembagian 4 area sumber *deep background* berdasarkan kedalamannya untuk katalog utama ISC periode 1964–2024, DB-1 pada 50–100 km (hijau), DB-2 pada 100–150 km (kuning), DB-3 pada 150–250 km (merah), dan DB-4 pada 250–690 km (biru), dengan sumber patahan dan subduksi dari Tim PuSGeN (2017)

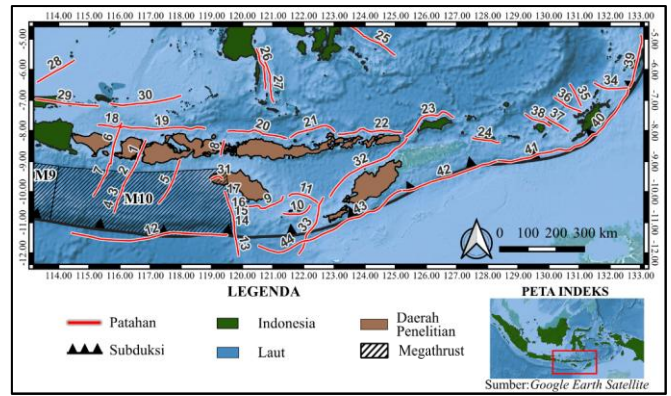
Sumber *shallow background* dan *deep background* tidak dikaitkan dengan geometri struktur patahan maupun subduksi, karena sumber ini dinilai sebagai tempat distribusi gempa. Pemodelan pada sumber ini menggunakan *seismic rate* berdasarkan tingkat aktivitas seismiknya. Sehingga meningkatkan akurasi tingkat aktivitas seismik pada masing-masing area. Berdasarkan hal tersebut, hukum Gutenberg & Richter (1944) digunakan untuk menghitung *a-value* dan *b-value* sebagai parameter setiap pembagian area yang disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Parameter seismik untuk sumber *shallow background* dan *deep background*

Area	$M_c$	<i>a-value</i>	<i>b-value</i>
SB-1	4	6,45	0,819 (±0,02)
SB-2	4	6,35	0,858 (±0,03)
SB-3	4	7,33	1,04 (±0,03)
DB-1	4	5,69	0,715 (±0,02)
DB-2	4	5,68	0,726 (±0,03)
DB-3	4	5,94	0,766 (±0,02)
DB-4	4	5,97	0,738 (±0,02)

Sumber patahan (*fault*) merupakan patahan aktif di kerak bumi dengan kedalaman patahan di wilayah

penelitian ini kurang dari 20 km (Tim PuSGeN, 2017). Gempa yang terjadi di sumber ini merupakan gempa dangkal yang mampu menimbulkan efek guncangan yang kuat di sekitar zona patahan. Pemodelan sumber patahan memerlukan informasi geometri patahan berupa *strike*, *dip*, *rake*, koordinat panjang segmen, kedalaman, *slip-rate*, dan magnitudo maksimum, informasi ini telah disediakan oleh Tim PuSGeN (2017). Pada wilayah penelitian ini terdapat 20 patahan utama dengan total 44 segmen berbeda, seperti yang ditampilkan pada **Gambar 5**.



**Gambar 5.** Sebaran patahan dengan segmen sebanyak 44 (Tim PuSGeN, 2017), dan zona *megathrust* dengan 2 segmen (M9 dan M10) di wilayah penelitian (Tim PuSGeN, 2022)

Penentuan jenis patahan seperti *strike-slip fault*, *reverse fault*, dan *normal fault* penting dilakukan untuk memahami pola deformasi regional dan kontribusi setiap patahan terhadap bahaya seismik. *Strike-slip fault* seperti patahan *Sumbawa Strait SS Fault* (1–4), *Lombok Strait SS Fault* (6–7), *Sumba SS* (13–17), *Teluk Panas Fault* (5), *Sape SS* (8), *Kendari Fault* (25), *Bawean Fault* (28), dan *Tanimbar Fault* (34–38) memiliki *slip-rate* yang rendah sekitar 0,5 mm/tahun, sedangkan patahan *RMKS Fault* (29–30) memiliki *slip-rate* 1,5 mm/tahun dan *Semau Fault* (32–33) dengan 5,5 mm/tahun. Yang termasuk *reverse fault* yaitu patahan *Flores Back-Arc Thrust* (FBT) (18–23) dengan *slip-rate* 5,6–18,3 mm/tahun, *Sumba Ridge Thrust* (9), *Savu Ridge Thrust* (10), dan *Savu Thrust* (11) dengan *slip-rate* 17,5 mm/tahun, kemudian *Leti Thrust* (24), *Tanimbar-kai FTB* (39–41), dan *Timor FTB* (42–44) memiliki *slip-rate* yang rendah dengan 0,5 mm/tahun. Jenis *normal Fault* terdapat patahan *Nusa Tenggara Oceanic Normal Fault* (12), *Bondowatu Fault* (31), dan *Selayar Fault* (26–27) dengan *slip-rate* 0,5 mm/tahun (Tim PuSGeN, 2017).

Sumber gempa *megathrust* berasal dari aktivitas seismik pada bidang kontak lempeng samudra–benua di zona subduksi. Sumber gempa *megathrust* berada di zona *interface* dengan kedalaman mencapai 50 km (Asrurifak, 2010). Pemodelan sumber *megathrust* menggunakan informasi geometri bidang subduksi

berupa *strike, dip, rake*, koordinat panjang subduksi, kedalaman sumber, *slip-rate*, dan magnitudo maksimum. Informasi *megathrust* terbaru dapat dilihat di buku yang dibuat oleh Tim PuSGeN (2022). Untuk wilayah penelitian ini digunakan sumber *megathrust* dengan segmen Jawa Timur (M9) dan Sumba (M10) dengan *slip-rate* 40 mm/tahun (Tim PuSGeN, 2022), dapat dilihat pada **Gambar 5**.

**Truncated Exponential Model**

*Truncated exponential model* digunakan untuk menentukan *seismic rate* berbagai magnitudo untuk sumber patahan dan *megathrust* berdasarkan nilai *slip-rate*. Model ini merupakan bentuk terbatas dari hukum Gutenberg & Richter (1944), dengan *seismic rate* dinyatakan sebagai fungsi eksponensial menurun terhadap magnitudo yang memiliki batas atas dan bawah magnitudo. Persamaan dasar yang digunakan pada pemodelan ini adalah Cosentino (1977), yang menyatakan:

$$\dot{N}(M) = \dot{N}(M_0) \cdot 10^{-b(M-M_0)}, M_0 \leq M \leq M_{max}$$

$\dot{N}(M)$  adalah *annual-rate* untuk magnitudo ( $M$ ),  $b$  merupakan nilai yang sama dengan  $b$  pada hukum G-R,  $M_0$  adalah magnitudo minimum yang dianggap sebesar  $6,5 M_w$ ,  $M_{max}$  adalah magnitudo maksimum sesuai karakterisasi model patahan dan *megathrust* sebelumnya. Untuk memperoleh *annual-rate* yang sesungguhnya pada setiap magnitudo, model ini mempertimbangkan *slip-rate* geologis ( $\dot{S}$ ) agar memperoleh *annual-rate* yang aktual pada setiap interval magnitudo, melalui hukum *scaling* oleh Wells & Coppersmith (1994), dinyatakan sebagai:

$$\sum_{M=M_0}^{M_{max}} \dot{N}(M) \cdot S(M) = \dot{S}$$

$S(M)$  adalah *slip* untuk magnitudo ( $M$ ). Pendekatan ini memungkinkan estimasi *annual-rate* yang realistis dan konsisten.

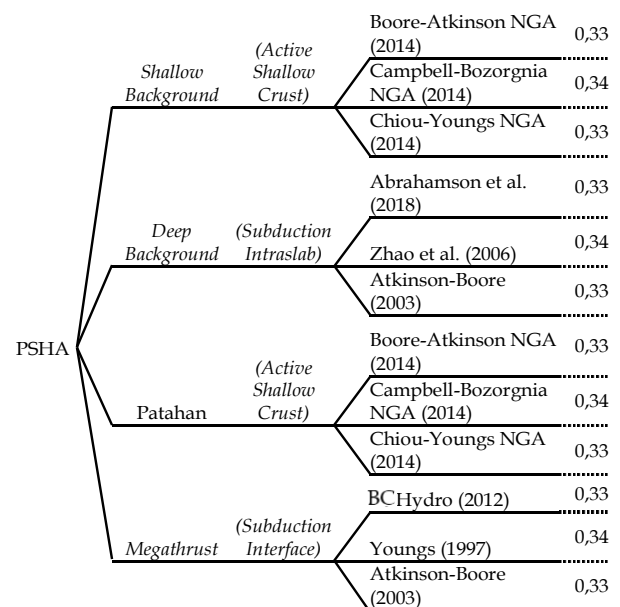
**Ground Motion Model dan Logic Tree**

Dalam pemodelan gerakan tanah digunakan fungsi atenuasi atau *Ground Motion Prediction Equations* (GMPEs) untuk memperkirakan intensitas guncangan gempa berdasarkan jarak sumber dan kondisi tanah (Mountainshia, Pramono Rahardjo, & Damara Aditramulyadi, 2023). Persamaan ini menunjukkan hubungan antara parameter gerakan tanah seperti percepatan, kecepatan, simpangan, intensitas, dan magnitudo, berdasarkan jarak episentrum dan hiposentrum sumber gempa ke *site*. GMPEs dipengaruhi oleh mekanisme sumber gempa, jarak, kondisi kerak

bumi, dan kondisi tanah setempat. GMPEs dikembangkan berdasarkan data rekaman gempa lokal yang lengkap. Namun, GMPEs yang dibuat khusus untuk wilayah Indonesia belum tersedia karena keterbatasan data rekaman lokal, maka digunakan GMPEs yang dikembangkan pada wilayah lain dengan karakter tektonik mirip dengan Indonesia.

Pada penelitian ini, GMPEs yang digunakan sesuai dengan GMPEs terbaru yang digunakan oleh Tim PuSGeN (2022). Untuk sumber *active shallow crust* (*shallow background* dan patahan) digunakan fungsi Boore-Atkinson NGA (2014), Campbell-Bozorgnia NGA (2014), dan Chiou-Youngs NGA (2014). Kemudian untuk *intraslab* (*deep background*) digunakan fungsi Abrahamson dkk., (2018), (Zhao dkk., 2006), dan Atkinson-Boore (2003) *BC Rock Data Global*. Untuk sumber *interface* (*megathrust*) digunakan fungsi BC Hydro (2012), Youngs (1997), dan Atkinson-Boore (2003).

*Logic tree* digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastian epistemik yang timbul dari berbagai pilihan model dan parameter dalam analisis bahaya gempa. *Logic tree* akan menyusun model sumber gempa, parameter seismisitas, dan GMPEs ke dalam cabang (*branches*) yang diberi bobot sesuai tingkat kepercayaan terhadap setiap cabang. Pada tahap perhitungan gerakan tanah, *logic tree* menggunakan beberapa GMPEs yang telah dipilih dan diberi bobot yang sama terhadap 3 GMPEs pada setiap sumber gempa seperti **Gambar 6**. Hasil bahaya seismik dihitung untuk setiap kombinasi cabang yang digabungkan berdasarkan bobotnya, sehingga estimasi *hazard* yang diperoleh lebih realistis terhadap ketidakpastian pemodelan.



**Gambar 6.** Logic tree pada GMPEs yang digunakan dalam pengolahan setiap sumber gempa mengikuti Tim PuSGeN (2022)

### Perhitungan PSHA

Metode PSHA mengintegrasikan ketidakpastian pada sumber gempa, ukuran gempa, lokasi kejadian, dan prediksi gerakan tanah, sehingga merepresentasikan karakteristik bahaya gempa secara probabilistik. Perhitungan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) bertujuan untuk menghitung laju tahunan terlampaui (*annual-rate of exceedance*) dari tingkat intensitas gempa di lokasi kajian berdasarkan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA). Berdasarkan persamaan Cornell (1968), *annual-rate of exceedance* dari suatu intensitas gerakan tanah akan dihitung dengan integral terhadap distribusi magnitudo dan jarak sumber gempa, dinyatakan sebagai:

$$\lambda(IM > x) = \sum_{i=1}^{n_{sources}} \lambda(M > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P(IM > x | m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm$$

$\lambda(IM > x)$  merupakan *annual-rate of exceedance* dari suatu intensitas gempa ( $IM$ ) melebihi nilai  $x$ . Kemudian,  $\lambda(M > m_{min})$  adalah *annual-rate* dari gempa bumi yang lebih besar dari  $m_{min}$ .  $P(IM > x | m, r)$  merupakan probabilitas  $IM$  melebihi  $x$  untuk gempa dengan magnitudo dan jarak tertentu, sementara  $f_M(m)$  dan  $f_R(r)$  adalah fungsi distribusi magnitudo dan jarak. Untuk interpretasi PSHA, *annual-rate of exceedance* digunakan untuk mencari PoE dalam periode waktu tertentu dengan mengasumsikan proses kejadian gempa mengikuti distribusi *Poisson*, yang dinyatakan sebagai:

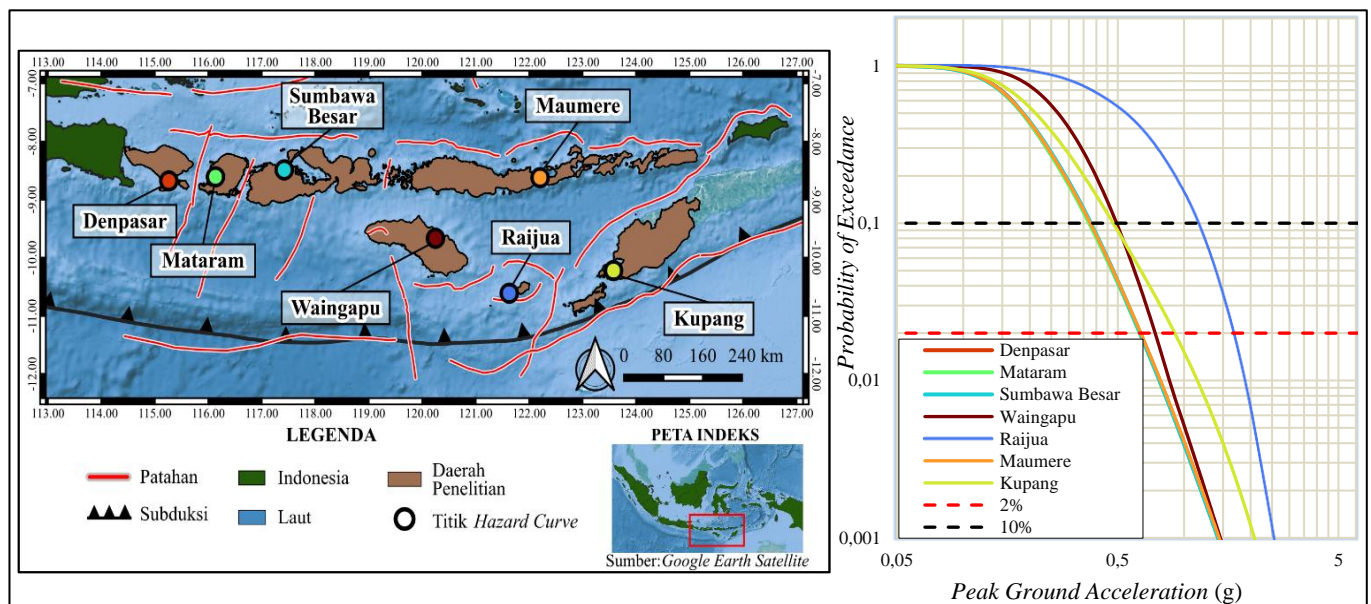
$$P(T) = 1 - e^{-\lambda T}$$

$P$  merupakan *Probability of Exceedance* (PoE),  $\lambda$  adalah *annual-rate of exceedance* PGA, dan  $T$  adalah periode investigasi, penelitian ini menggunakan  $T = 50$  tahun. Untuk pengolahan PSHA, *Global Earthquake Model* (GEM) menyediakan perangkat lunak *OpenQuake* sebagai alat untuk menghitung bahaya seismik. Perhitungan dilakukan untuk dua tingkat probabilitas terlampaui, yaitu PoE 10% dan PoE 2% dalam periode 50 tahun masa bangunan pada batuan dasar dengan  $V_{s30} = 760$  m/s. Kemudian PGA terhadap PoE tertentu akan disajikan dalam bentuk *hazard curve* pada suatu *site*. Lalu dihitung untuk seluruh wilayah penelitian sehingga berupa *hazard maps* yang menampilkan sebaran PGA pada PoE tersebut.

### Hasil dan Diskusi

#### Hazard Curve

*Hazard curve* yang dihasilkan dari analisis PSHA menggambarkan hubungan antara PGA dengan PoE. *Hazard curve* menunjukkan bagaimana kemungkinan terjadinya guncangan dengan intensitas tertentu berubah seiring meningkatnya nilai PGA. *Hazard curve* memungkinkan penilaian bahaya gempa secara kuantitatif pada berbagai tingkat intensitas, sehingga tidak terbatas pada satu skenario gempa tertentu. Analisis *hazard curve* dilakukan di Denpasar, Mataram, Sumbawa Besar, Maumere, Waingapu, Raijua, dan Kupang, dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Hazard curve pada beberapa titik di wilayah penelitian, dengan patahan dan subduksi dari Tim PuSGeN (2017)

Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada aktivitas penduduk dan infrastruktur utama pada wilayah penelitian. Pada wilayah penelitian, bentuk *hazard curve* memperlihatkan penurunan PoE secara eksponensial ketika nilai PGA meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa guncangan kecil hingga sedang memiliki peluang kejadian yang relatif lebih tinggi, sedangkan guncangan besar memiliki peluang lebih rendah. Berdasarkan nilai pada *hazard curve* tersebut diambil nilai PGA pada PoE 10% dan 2% di setiap titik *hazard curve* sebagaimana tercantum pada Tabel 2.

**Tabel 2.** PGA di setiap titik *hazard curve* pada PoE 10% dan 2%, serta dibandingkan dengan nilai PGA berdasarkan peta dari Tim PuSGeN (2017) dan Tim PuSGeN (2022)

Lokasi	PGA (g)				
	Hasil Penelitian		Tim PuSGeN (2017)		Tim PuSGeN (2022)
	PoE 10 %	PoE 2%	PoE 10%	PoE 2%	PoE 2%
Denpasar	0,38	0,63	0,25-0,3	0,4-0,5	0,4-0,5
Mataram	0,37	0,63	0,25-0,3	0,4-0,5	0,4-0,5
Sumbawa Besar	0,39	0,64	0,25-0,3	0,4-0,5	0,5-0,6
Maumere	0,39	0,64	0,25-0,3	0,4-0,5	0,4-0,5
Waingapu	0,5	0,75	0,25-0,3	0,4-0,5	0,4-0,5
Raijua	1,16	1,72	>0,8	1,5-2,0	1,0-1,2
Kupang	0,5	0,9	0,25-0,3	0,5-0,6	0,5-0,6

Nilai PGA di seluruh titik *hazard curve* pada wilayah penelitian termasuk sedang hingga tinggi dengan 0,38-1,6 g pada PoE 10% dan 0,63-1,72 g pada PoE 2%. Pengaruh *megathrust* dan patahan dengan mekanisme *reverse* menjadi sumber utama aktivitas seismik di wilayah ini. Perlu memberikan edukasi kepada masyarakat sebagai upaya mitigasi dan perencanaan bangunan tahan gempa yang sesuai standar di Denpasar, Mataram, Sumbawa Besar, Maumere, Waingapu, Raijua, dan Kupang, agar dapat menghindari kerugian yang besar akibat dari dampak gempa bumi.

Nilai PGA di titik *hazard curve* pada hasil penelitian menunjukkan perbedaan nilai dibanding hasil pada Tim PuSGeN (2017) dan Tim PuSGeN (2022), dapat dilihat pada Tabel 2. Pada PoE 10% di Denpasar, Mataram, Sumbawa Besar, dan Maumere mengalami kenaikan sebesar 0,07-0,09 g, sedangkan di Waingapu dan Kupang menunjukkan nilai yang sama, kemudian di Raijua menunjukkan >0,8 g. Lalu, pada PoE 2% di Denpasar, Mataram, Sumbawa Besar, dan Maumere mengalami kenaikan sebesar 0,04-0,14 g, lalu Waingapu dan Kupang mengalami kenaikan 0,25-0,3 g, namun di

Raijua menunjukkan kenaikan yang signifikan sebesar 0,5 g terhadap Tim PuSGeN (2022).

Secara umum hasil penelitian ini menunjukkan kenaikan nilai PGA yang kecil terhadap hasil Tim PuSGeN (2017) dan Tim PuSGeN (2022) karena menggunakan katalog gempa yang lebih baru, namun di wilayah yang dekat dengan patahan seperti Raijua mengalami kenaikan nilai PGA yang signifikan karena pendekatan *truncated exponential model*.

### Hazard Maps

PSHA yang telah dilakukan untuk lokasi penelitian Provinsi Bali, NTB, dan NTT diperoleh hasil berupa persebaran nilai PGA dalam satuan g untuk PoE 2% dan 10% dalam waktu 50 tahun. Analisis ini menghasilkan peta bahaya seismik berdasarkan penggabungan 4 sumber gempa, yaitu *deep background*, *shallow background*, patahan aktif, dan *megathrust*. Nilai PGA disimbolkan dalam skala warna pada peta, PGA yang paling rendah disimbolkan warna biru dan PGA paling tinggi disimbolkan warna merah. Untuk memudahkan melihat dampak kerusakan dari nilai PGA, perlu dikonversikan ke dalam skala MMI (*Modified Mercally Intensity*), seperti yang ditampilkan Tabel 3.

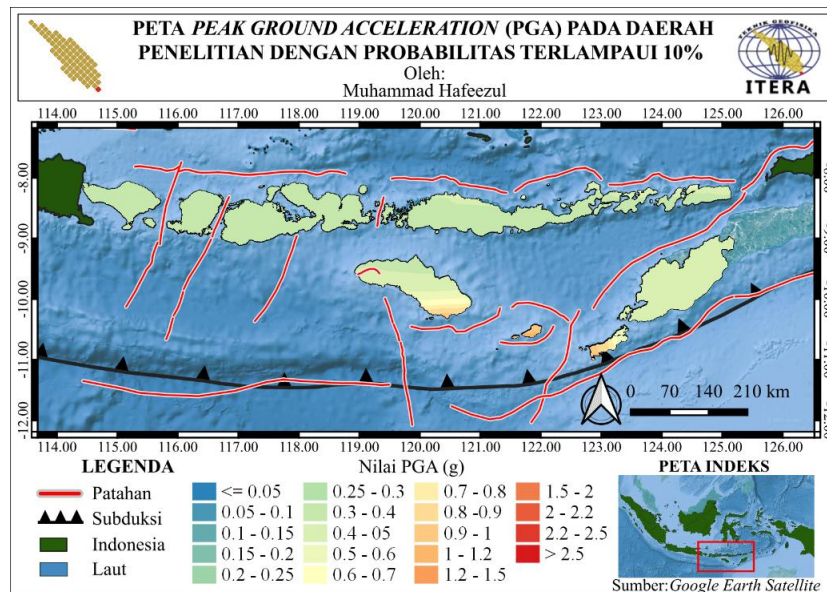
**Tabel 3.** Dampak pada skala MMI berdasarkan nilai PGA (Worden dkk., 2010)

Getaran Dirasakan	Kemampuan Merusak	PGA (g)	MMI
Tidak dirasakan	Tidak	<0,003	I
Lemah	Tidak	0,003	II-III
Ringan	Tidak	0,028	IV
Sedang	Sangat ringan	0,062	V
Kuat	Ringan	0,115	VI
Sangat Kuat	Sedang	0,215	VII
Keras	Sedang/berat	0,401	VIII
Sangat Keras	Berat	0,747	IX
Bahaya	Sangat Berat	>1,39	X+

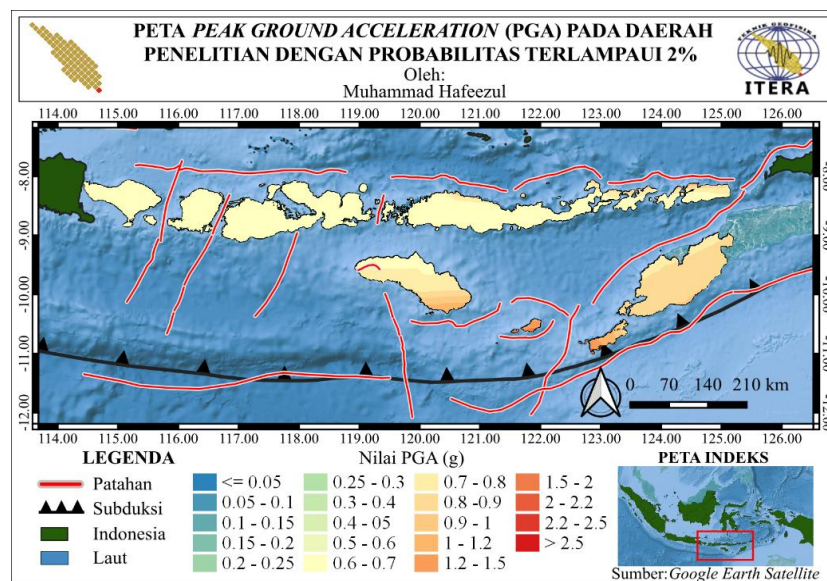
Distribusi nilai PGA pada PoE 10% di Bali, NTB, dan NTT seperti **Gambar 8** menunjukkan PGA 0,36-1,18 g, dengan skala MMI VII-IX dengan kemampuan merusak sedang hingga berat. Bagian selatan wilayah penelitian memiliki nilai PGA yang lebih tinggi daripada bagian utara, karena dekat dengan sumber gempa *megathrust*. Di selatan, nilai PGA yang tinggi pada rentang nilai 0,8-1,18 g dengan MMI IX dengan kemampuan merusak berat, karena berada di dekat patahan *Sumba Ridge Thrust*, *Savu Ridge Thrust*, dan *Savu Thrust* dan zona *megathrust* Sumba. Sedangkan di utara tepatnya di Bali, Lombok, Sumbawa dan Flores memiliki nilai PGA 0,36-0,5 g dengan MMI VII-VIII dengan kemampuan merusak sedang hingga sedang/berat, karena dipengaruhi oleh sumber patahan FBT.

Kemudian di sebelah timur tepatnya di Pulau Timor, menunjukkan PGA 0,5-0,6 *g* dengan MMI VIII dengan kemampuan merusak sedang/berat, dipengaruhi oleh *Semau Fault* dan Timor FTB. Selain dari

sumber gempa patahan dan subduksi, *a-value* dan *b-value* dari gempa *background* juga mempengaruhi besar kecilnya nilai PGA untuk probabilitas 10%.



**Gambar 8.** Peta PGA pada daerah penelitian dengan probabilitas terlampaui 10%, dengan patahan dan subduksi dari Tim PuSGeN (2017)



**Gambar 9.** Peta PGA pada daerah penelitian dengan probabilitas terlampaui 2%, dengan patahan dan subduksi dari Tim PuSGeN (2017)

Untuk distribusi nilai PGA pada PoE 2% di Bali, NTB, dan NTT seperti **Gambar 9** menunjukkan PGA 0,62-1,75 *g* dengan skala MMI dari VIII-X+ dengan kemampuan merusak sedang/berat hingga sangat berat. Hasil pada peta PoE 2% menunjukkan kenaikan nilai PGA dari peta PoE 10%, karena pada intensitas tinggi kemungkinan terjadinya lebih kecil, sedangkan intensitas yang lebih rendah kemungkinan terjadinya lebih besar.

Pada selatan wilayah penelitian memiliki nilai PGA yang lebih tinggi daripada bagian utara, karena dekat dengan sumber gempa *megathrust*. Di selatan dan timur, nilai PGA yang tinggi dengan rentang nilai 0,7-1,75 *g* dengan MMI IX-X+ dengan kemampuan merusak berat hingga sangat berat, karena berada di dekat patahan *Sumba Ridge Thrust*, *Savu Ridge Thrust*, *Savu Thrust*, *Semau Fault*, dan Timor FTB, serta zona *megathrust* Sumba. Sedangkan di utara tepatnya di Bali,

Lombok, Sumbawa dan Flores memiliki nilai PGA 0,6–0,8 *g* dengan MMI VIII–IX dengan kemampuan merusak sedang/berat hingga berat, dipengaruhi oleh sumber patahan FBT. Selain dari sumber gempa patahan dan subduksi, *a-value* dan *b-value* dari gempa *background* juga mempengaruhi besar kecilnya nilai PGA untuk probabilitas 2%.

**Tabel 4.** Perbandingan hasil PGA pada PoE 10% dan 2% dengan penelitian Tim PuSGeN (2017) dan Tim PuSGeN (2022) di wilayah Bali, NTT, dan NTB

PoE	Nilai PGA ( <i>g</i> )		Hasil Penelitian
	Tim PuSGeN (2017)	Tim PuSGeN (2022)	
10%	0,25->0,8	-	0,36-1,18
2%	0,4-2,0	0,4-1,2	0,62-1,75

Jika dibandingkan dengan penelitian Tim PuSGeN (2017) dan Tim PuSGeN (2022) pada wilayah Bali, NTB, dan NTT terdapat perbedaan hasil PGA, seperti yang disajikan Tabel 4. Untuk PoE 10% nilai minimum PGA di wilayah ini mengalami kenaikan sebesar 0,11 *g*, sedangkan nilai maksimum PGA sesuai dengan >0,8 *g*, namun tidak tersedia hasil untuk PoE 10% pada Tim PuSGeN (2022). Kemudian, untuk PoE 2% nilai minimum PGA juga mengalami kenaikan sebesar 0,22 *g*, sedangkan PGA maksimum mengalami penurunan sebesar 0,25 *g* pada Tim PuSGeN (2017) dan mengalami kenaikan terhadap Tim PuSGeN (2022) sebesar 0,55 *g*. Perbedaan hasil ini disebabkan oleh penggunaan pendekatan *truncated exponential model* pada patahan dan *megathrust*, serta terdapat data katalog gempa yang lebih baru.

## Kesimpulan

Hasil analisis pada batuan dasar menunjukkan bahwa nilai PGA untuk probabilitas terlampaui 10% dalam periode 50 tahun pada rentang 0,36–1,18 *g*, sedangkan untuk probabilitas terlampaui 2% meningkat menjadi 0,62–1,75 *g*. Secara keseluruhan, nilai PGA di sebelah selatan daerah penelitian mengalami kenaikan karena di dekat zona *megathrust*, dibandingkan di utara yang hanya bersumber dari patahan busur belakang.

Wilayah bagian selatan penelitian menghasilkan getaran dirasakan sangat keras hingga bahaya dengan kemampuan merusak berat hingga sangat berat, seperti Pulau Raijua, Sawu, Rote, dan bagian selatan Pulau Sumba. Kemudian semakin ke utara mengalami penurunan yang menghasilkan getaran dirasakan sangat kuat hingga sangat keras dengan kemampuan merusak sedang hingga berat, seperti Bali, Lombok, Flores, dan bagian utara Sumba. Bagian timur yaitu Pulau Timor menghasilkan getaran dirasakan keras hingga sangat keras dengan kemampuan merusak sedang/berat hingga berat.

Penelitian ini memberikan gambaran mengenai distribusi bahaya seismik di Bali, NTB, dan NTT yang dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan infrastruktur dan bangunan tahan gempa, serta sebagai edukasi kepada masyarakat sebagai bentuk upaya mitigasi bencana gempa bumi agar mengurangi kerusakan dan korban jiwa. Kemudian, untuk penelitian lebih lanjut, perlu mempertimbangkan *site effect* berupa data  $V_{s30}$  pengukuran lapangan agar hasil lebih sesuai dengan keadaan setempat, lalu perlu dilakukan pembuatan peta MMI agar menggambarkan secara jelas bagaimana risiko dan dampak dari gempa tersebut.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada para staf akademik dari Program Studi Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera, dan semua pihak yang telah membantu dan mendukung selama penelitian ini berlangsung.

## Daftar Pustaka

- Abrahamson, N., Kuehn, N., Gulerce, Z., Gregor, N., Bozognia, Y., Parker, G., ... Youngs, R. (2018). Update of the BCHydro Subduction Ground-Motion Model Using the NGA-Subduction Dataset, PEER Report 2018-02. In *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. Berkeley. Diambil dari <https://peer.berkeley.edu/publications/peer-reports>
- Al-fakhriroh, Z., & Prastowo, T. (2023). Analisis Potensi Bahaya Bencana Seismik dan Kerentanan Wilayah NTB dan NTT. *Inovasi Fisika Indonesia*, 12, 75–87. Diambil dari <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia/article/view/51991?articlesBySameAuthorPage=3>
- Ananda, N. R., & Pujiastuti, D. (2024). Studi Bahaya Seismik dengan Metode PSHA ( Probabilistic Seismic Hazard Analysis ) di Nusa Tenggara Barat Menggunakan Data Gempa Tahun 1900 - 2003. *Jurnal Fisika Unand*, 13(5), 665–670. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.5.665-670.2024>
- Asrurifak, M. (2010). Peta Respon Spektra Indonesia untuk Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa Berdasarkan Model Sumber Gempa Tiga Dimensi dalam Analisis Probabilitas (Vol. 35005003). Diambil dari [https://www.researchgate.net/publication/326825469\\_Peta\\_Respon\\_Spektra\\_Indonesia\\_untuk\\_Perencanaan\\_Struktur\\_Bangunan\\_Tahan\\_Gempa\\_Berdasarkan\\_Model\\_Sumber\\_Gempa\\_Tiga\\_Dimensi\\_dalam\\_Analisis\\_Probabilitas](https://www.researchgate.net/publication/326825469_Peta_Respon_Spektra_Indonesia_untuk_Perencanaan_Struktur_Bangunan_Tahan_Gempa_Berdasarkan_Model_Sumber_Gempa_Tiga_Dimensi_dalam_Analisis_Probabilitas)
- Atkinson, G. M., & Boore, D. M. (2003). Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone

- Earthquakes and Their Application to Cascadia and Other Regions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703–1729. <https://doi.org/10.1785/0120020156>
- Azmiyati, U. (2021). Analisis Percepatan Getaran Tanah Maksimum Akibat Gempabumi Di Wilayah Nusa Tenggara dengan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). *JISIP (Jurnal Ilmu Sosial dan Pendidikan)*, 5(1), 331–339. <https://doi.org/10.58258/jisip.v5i1.1709>
- Baker, J., Bradley, B., & Stafford, P. (2021). *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108425056>
- BC Hydro. (2012). Dam Safety Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Model. In *BC Hydro Engineering Reports E658* (Vol. 1). Diambil dari <https://www.bchydro.com/content/dam/BCHydro/customer-portal/documents/corporate/safety/probabilistic-seismic-hazard-analysis-volume-1.pdf>
- BNPB. (2018). Dampak Gempa Lombok: 436 Orang Meninggal dan Kerugian Ekonomi Lebih Dari 5.04 Trilyun Rupiah. In *BNPB*. Diambil dari [https://bnpb.go.id/berita/dampak-gempa-lombok-436-orang?utm\\_source=chatgpt.com](https://bnpb.go.id/berita/dampak-gempa-lombok-436-orang?utm_source=chatgpt.com)
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Atkinson, G. M., & Eeri, M. (2014). NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5 % Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057–1085. <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- BPBD-Bali. (2021). Update Data Dampak Gempa Bumi 4,8M Kab. Karangasem-Bali. Diambil 22 Oktober 2025, dari BPBD Provinsi Bali website: [https://bpbd.baliprov.go.id/article/2550/update-data-dampak-gempa-bumi-48m-kab-karangasem-bali?utm\\_source=chatgpt.com](https://bpbd.baliprov.go.id/article/2550/update-data-dampak-gempa-bumi-48m-kab-karangasem-bali?utm_source=chatgpt.com)
- Campbell, K. W., & Bozorgnia, Y. (2014). NGA-West2 Ground Motion Model for the Average Horizontal Components of PGA, PGV, and 5 % Damped Linear Acceleration Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1087–1115. <https://doi.org/10.1193/062913EQS175M>
- Chiou, B. S.-J., & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117–1153. <https://doi.org/10.1193/072813EQS219M>
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5), 1583–1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>
- Cosentino, P., Ficarra, V., & Luzio, D. (1977). Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(6), 1615–1623. <https://doi.org/10.1785/BSSA0670061615>
- Diaz, N., Suarabawa, K. N., & Mursitanyo, A. (2018). Relokasi Gempabumi di Pulau Bali Bagian Utara Tahun 2015- 2017 dengan menggunakan Metode Double Difference (DD) Earthquake Relocation in Northern Bali Island in 2015-2017 using Double Difference Method (DD). *Buletin Fisika*, 9(2), 64–72. Diambil dari <https://ojs.unud.ac.id/index.php/buletinfisika/article/view/43518>
- Faiza, N. N., & Ariyanto, P. (2024). Kegempaan Tektonik Berdasarkan Nilai Variasi Spasio-Temporal Wilayah Bali dan Nusa Tenggara Analysis Level Of Seismicity And Tectonic Earthquake Risk Based on The Value of Spatio- Temporal Variation in Bali and Nusa Tenggara. *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, 5(2), 18–25. Diambil dari [https://www.balai2bmkkg.id/index.php/buletin\\_mkg/article/view/75](https://www.balai2bmkkg.id/index.php/buletin_mkg/article/view/75)
- Felix, R. P., Hubbard, J. A., Bradley, K. E., Lythgoe, K. H., Li, L., & Switzer, A. D. (2022). Tsunami hazard in Lombok and Bali, Indonesia, due to the Flores back-arc thrust. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5), 1665–1682. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1665-2022>
- Gardner, J. K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367. <https://doi.org/10.1785/BSSA0640051363>
- Gerstenberger, M. C., Marzocchi, W., Allen, T., Pagani, M., Adams, J., & Danciu, L. (2020). Probabilistic Seismic Hazard Analysis at Regional and National Scales: State of the Art and Future Challenges. *AGU*, 1–49. <https://doi.org/10.1029/2019RG000653>
- Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California\*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185–188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- Hall, R., & Spakman, W. (2015). Tectonophysics Mantle structure and tectonic history of SE Asia. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.003>
- Hasanah, M. U., Supendi, P., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., & Syaifuddin, F. (2024). The new insight of tectonic setting in Sunda-Banda transition zone using tomography seismic. Case study: 7.1 M deep earthquake 29 August 2023. *Open Geosciences*, 16(1). <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0710>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications.

- Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9), 1–42. <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>
- Irsyam, M., Cummins, P. R., Asrurifak, M., Faizal, L., Natawidjaja, D. H., Widiyantoro, S., ... Syahbana, A. J. (2020). Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia. *Earthquake Spectra*, 36(1\_suppl), 112–136. <https://doi.org/10.1177/8755293020951206>
- Kurniawan, R., Budiono, C. S., Lukito, I., & Sumarwoto, W. (2023). *Mapping of Earthquake Risk Areas Based on the Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Method from Earthquake Sources on the Island of Bali*. Atlantis Press International BV. [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-358-0\\_6](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-358-0_6)
- Mountainshia, R., Pramono Rahardjo, P., & Damara Aditramulyadi, D. (2023). Analisis Probabilitas Bahaya Gempa di Ibu Kota Baru Indonesia. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 28(2), 284–291. <https://doi.org/10.14710/mkts.v28i2.44682>
- Prasetyo, A., Effendi, M. M., & Miharja, M. N. D. (2023). Analisis Gempa Bumi Di Indonesia Dengan Metode Clustering. *Bulletin of Information Technology (BIT)*, 4(2), 338–343. <https://doi.org/10.47065/bit.v4i3.820>
- Pratama, I. P. D. (2020). Pemetaan dan Analisis Probabilistic Seismic Hazard. *Jurnal Geografi Gea*, 20(April), 54–62. <https://doi.org/10.17509/gea.v20i1.23299>
- Priyono, A., Nugraha, A. D., Muzli, M., Ardianto, A., Sasmi, A. T., Afif, H., ... Wei, S. (2021). *Seismic Attenuation Tomography From 2018 Lombok Earthquakes , Indonesia*. 9(March), 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.639692>
- Sasmi, A. T., Nugraha, A. D., Muzli, M., Widiyantoro, S., & Zulfakriza, Z. (2020). Hypocenter and Magnitude Analysis of Aftershocks of the 2018 Lombok , Indonesia , Earthquakes Using Local Seismographic Networks. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220190348>
- Sulaeman, C., Hidayati, S., Omang, A., & Priambodo, I. C. (2018). Tectonic Model of Bali Island Inferred from GPS Data. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(1), 81–91. <https://doi.org/10.17014/ijog.5.1.81-91>
- Supendi, P., Rawlinson, N., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., Abdullah, C. I., Daryono, ... Karnawati, D. (2022). Focal Mechanism Analysis of the Earthquakes Beneath the Sunda-Banda Arc Transition, Indonesia, Using the BMKG Data. *IOPscience*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1031/1/012012>
- Tim PuSGeN. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 (Map of Indonesia Earthquake Sources and Hazards in 2017)* (M. Irsyam, S. Widiyantoro, D. H. Natawidjaja, I. Meilano, A. Rudyanto, S. Hidayati, ... L. F. Sunarjito, Ed.). Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Diambil dari <https://perpustakaan.bmkg.go.id/buku/peta-sumber-dan-bahaya-gempa-indonesia-tahun-2017>
- Tim PuSGeN. (2022). *Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia Untuk Perencanaan dan Evaluasi Infrastruktur Tahan Gempa (S. Widiyantoro, M. Irsyam, L. Faizal, W. A. Prakoso, I. Imran, R. Nazir, ... A. Rudyanto, Ed.)*. Jakarta Selatan: Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, dan Direktorat Jenderal Cipta Karya. Diambil dari <https://sitaba.pu.go.id/publikasi/3ccf239f-d7a0-4869-9579-bb5304fe35ee>
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- Wibowo, N. B., Pedana, Y. H., Prayoedhie, S., Wibowo, H. S., Budiarta, Fauzi, A., ... Muqoddas, M. M. (2024). Macroseismic and Microseismic Analysis of M4.4 Batang Earthquake, July 7, 2024. *KURVATEK*, 9(2), 135–142. <https://doi.org/10.33579/krvtk.v9i2.5056>
- Wijaya, P. H., Sumardi, Supartoyo, Kristianto, Heriwaseso, A., Iskandar, ... Suratman, H. S. (2025). *Album Mitigasi Bencana Geologi 2025 (S. D. Andreastuti, S. Hidayati, H. Triastuty, M. N. Kartadinata, D. K. Syahbana, Sumaryono, ... Ratdomopurbo, Ed.)*. Jawa Barat: Badan Geologi. Diambil dari <https://geologi.esdm.go.id/publikasi/laporan-dan-buku/album-mitigasi-bencana-geologi-2025>
- Youngs, R. R., Chiou, S.-J., Silva, W. J., & Humphrey, J. R. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58>
- Zhao, J. X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Asano, A., ... Ogawa, H. (2006). An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motion Stations in Japan Using h/v Response Spectral Ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 3(96), 914–925. <https://doi.org/10.1785/0120050124>
- Zheng, Y. F., & Chen, Y. X. (2016). Continental versus oceanic subduction zones. *National Science Review*, 3(4), 495–519. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww049>