



Analisis Bahaya Gempa Bumi Menggunakan Metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)*: Studi Kasus Provinsi Bengkulu

Muhammad Abdul Aziz¹, Muzli Muzli^{1*}, Oriza Sativa¹, Aditya Setyo Rahman¹

¹ Program Studi Sarjana Terapan Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG), Tangerang, Indonesia.

² Divisi Seismologi Teknik, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Angkasa 1 No.2, RT.1/RW.10, Gn. Sahari Sel., Kec. Kemayoran, Kota Jakarta Pusat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta, 10610, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3106>

Article Info:

Received : 25 Juli 2026
Revised : 16 Agustus 2026
Accepted : 23 Agustus 2026
Published : 26 September 2026

Correspondence:

Muzli Muzli

Phone:

Abstract: Bengkulu Province is located in an active tectonic zone along the western coast of Sumatra, influenced by the Sumatra Megathrust subduction zone and the Great Sumatra Fault, making it highly susceptible to damaging earthquakes. Earthquake hazard in Bengkulu Province has not been assessed province-wide, as previous studies covered only Bengkulu City and the national hazard map presents bedrock values. The M 6.0 earthquake of 23 May 2025, which damaged dozens of houses in Bengkulu City, underscores the need for a surface-level assessment. This study aims to analyze the seismic hazard level in Bengkulu Province using the Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) method and deaggregation analysis to identify dominant earthquake sources. The data used include earthquake catalogs from 1906–2024 provided by USGS and BMKG within a 500 km radius of the study area, as well as Vs30 data to account for local site effects. PSHA calculations were conducted for two exceedance probability scenarios: 10% in 50 years (return period of 475 years) and 2% in 50 years (return period of 2,475 years). The results show that surface Peak Ground Acceleration (PGA) values range from 0.39–1.45 g for the 475-year return period and 0.60–1.94 g for the 2,475-year return period, with the highest values concentrated along the Musi-Ketaun segment of the Great Sumatra Fault. Deaggregation results indicate that short return-period hazards have a dominant contribution from nearby active faults (≈15 km, Mw 6.6), while long return-period PGA contributions shift to distant megathrust sources (≈65 km, Mw 8.6). These findings provide crucial information for earthquake-resistant building design and disaster mitigation planning in Bengkulu Province.

Keywords: Bengkulu Province; Deaggregation; Peak Ground Acceleration; PSHA; Sumatra Fault.

Citation: Aziz, M. A., Muzli, M., Sativa, O., & Rahman, A. S. (2026). Analisis Bahaya Gempa Bumi Menggunakan Metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA): Studi Kasus Provinsi Bengkulu. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 5836–5845. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3106>

Pendahuluan

Indonesia memiliki tingkat risiko gempa bumi tertinggi di dunia akibat posisinya di titik pertemuan lempeng tektonik aktif. Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara menunjam Lempeng Eurasia sehingga membentuk zona subduksi aktif di kawasan barat Pulau Sumatra di sepanjang Busur Sunda. (McCaffrey, 2009). Zona subduksi Sumatra Megathrust berkembang di sepanjang lepas pantai barat Sumatra, sedangkan sistem

Sesar Besar Sumatra terbentuk di daratannya. Kedua struktur geologi ini menjadi pemicu utama terjadinya gempa bumi besar dan merusak di wilayah tersebut. (McCaffrey, 2009; PuSGeN, 2024; Sieh & Natawidjaja, 2000).

Provinsi Bengkulu menempati zona tektonik yang sangat aktif karena berhadapan langsung dengan Sumatra Megathrust serta dilintasi beberapa segmen Sesar Besar Sumatra. Posisi geologi ini menyebabkan

wilayah tersebut rentan terhadap gempa bumi bermagnitudo besar maupun gempa dangkal akibat pergerakan sesar darat. (Konca et al., 2008; PuSGeN, 2024; Sieh & Natawidjaja, 2000). Segmen Sesar Besar Sumatra yang melintasi dan berpengaruh langsung terhadap Bengkulu adalah Ketaun, Musi, dan Manna (Mmaks 7,2–7,3 Mw; laju geser 12–13 mm/tahun), dengan tambahan pengaruh dari segmen Kumering di bagian selatan (Mmaks 7,6 Mw). Dari sisi subduksi, segmen Megathrust Mentawai–Pagai dan Enggano (Mmaks 8,9 Mw) berhadapan langsung dengan pesisir barat provinsi (PuSGeN, 2024).

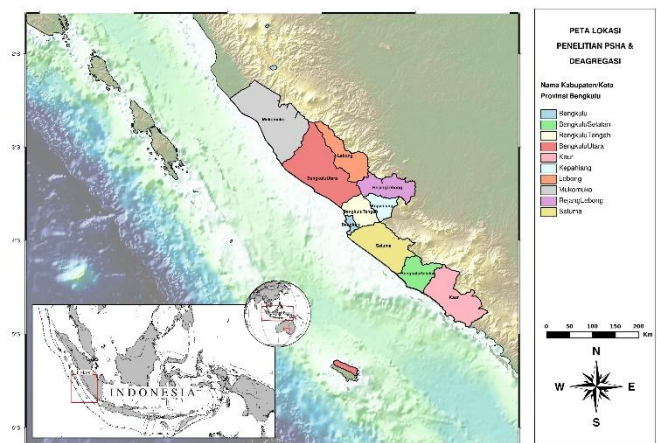
Sejarah kegempaan mencatat beberapa gempa besar dan merusak di wilayah ini, termasuk rangkaian gempa tahun 2007 yang berkaitan dengan pelepasan energi zona Megathrust Sumatra (Konca et al., 2008), serta gempa bermagnitudo M 6,0 pada 23 Mei 2025 yang berpusat di Pantai Barat Daya Kota Bengkulu dengan intensitas mencapai skala V MMI, menimbulkan kerusakan pada sekitar 50–140 rumah dan beberapa fasilitas umum, dengan beberapa orang dilaporkan mengalami luka-luka (BMKG, 2025). Kajian bahaya seismik di Bengkulu sebelumnya telah dilakukan melalui pendekatan mikrozonasi (Mase & Sugianto, 2021) dan analisis probabilitas bahaya kegempaan (Litman et al., 2021), namun keduanya terbatas pada Kota Bengkulu. Kajian mikrozonasi berfokus pada klasifikasi kelas situs tanpa perhitungan bahaya probabilistik, sedangkan (Litman et al., 2021) melaporkan PGA batuan dasar sebesar 0,686–0,708 g untuk periode ulang 475 tahun hanya pada wilayah kota. Di sisi lain, Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (PuSGeN, 2024) menyajikan bahaya pada skala nasional dalam kondisi batuan dasar, sementara data Vs30 hasil mikrozonasi BMKG baru tersedia untuk Kota Bengkulu. Dengan demikian, belum ada analisis PSHA yang mencakup seluruh Provinsi Bengkulu hingga level permukaan tanah dan dilengkapi identifikasi sumber gempa dominan melalui deagregasi.

Kondisi tersebut menegaskan perlunya pendekatan kuantitatif dan komprehensif dalam mitigasi risiko gempa bumi. Salah satu metode yang umum digunakan adalah Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), yaitu metode untuk mengestimasi besaran pergerakan tanah akibat gempa bumi pada suatu lokasi dan periode waktu tertentu dengan mempertimbangkan seluruh sumber gempa serta ketidakpastian yang menyertainya (McGuire, 2004). Untuk memahami kontribusi dominan sumber gempa terhadap bahaya seismik total, analisis PSHA dilengkapi dengan analisis deagregasi, yaitu proses penguraian kontribusi hazard dari berbagai sumber gempa sehingga dapat diidentifikasi sumber gempa yang memiliki kontribusi dominan terhadap Provinsi Bengkulu. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyajian peta

bahaya gempa bumi permukaan (PGA, SA 0,2 detik, dan SA 1,0 detik) untuk seluruh Provinsi Bengkulu pada periode ulang 475 dan 2.475 tahun yang telah memperhitungkan efek tapak lokal berdasarkan SNI 1726:2019, disertai analisis deagregasi untuk mengidentifikasi sumber gempa dominan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sumber-sumber gempa bumi yang memberikan kontribusi dominan, mendapatkan peta sebaran nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan *Spectral Acceleration* (SA), serta menghasilkan plot deagregasi bahaya gempa bumi di wilayah Provinsi Bengkulu, sebagai dasar mitigasi bencana dan perencanaan bangunan tahan gempa yang lebih spesifik terhadap karakteristik sumber seismik di wilayah tersebut.

Metode

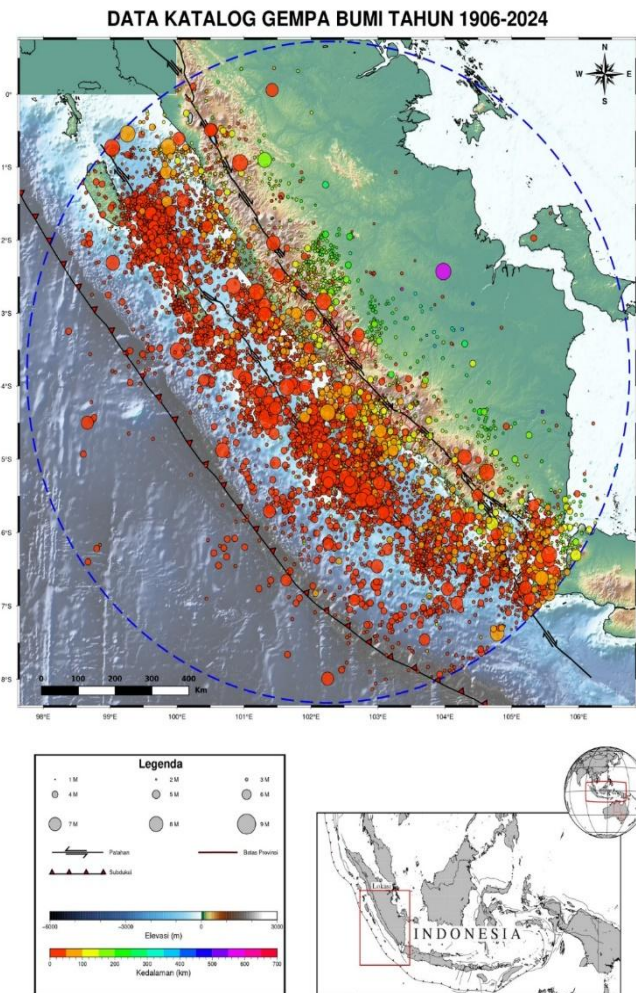
Penelitian ini menerapkan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) beserta analisis deagregasi untuk mengkaji bahaya gempa bumi di wilayah Provinsi Bengkulu, yang terletak pada koordinat 2,27°–5,52° Lintang Selatan dan 101,02°–103,68° Bujur Timur, meliputi Kabupaten Bengkulu Selatan, Bengkulu Tengah, Bengkulu Utara, Kaur, Kepahiang, Lebong, Mukomuko, Rejang Lebong, Seluma, dan Kota Bengkulu (Gambar 1).



Gambar 1. Peta lokasi penelitian Provinsi Bengkulu

Data yang digunakan meliputi katalog gempa bumi periode 1906–2024 dalam radius 500 km dari wilayah kajian, yang diperoleh dari USGS untuk periode 1906–2009 dan BMKG untuk periode 2010–2024 (Gambar 2), parameter sumber gempa bumi (sesar aktif, subduksi, dan background), serta data kecepatan gelombang geser (Vs30) dari BMKG dan USGS untuk memperhitungkan efek tapak lokal (*local site effect*). Prosedur penelitian dilaksanakan melalui tiga tahap utama. Tahap pertama adalah pengumpulan data katalog gempa bumi dan data Vs30. Tahap kedua adalah pengolahan data katalog gempa bumi, yang meliputi

konversi skala magnitudo ke momen magnitudo, declustering, perhitungan parameter seismisitas, pemodelan sumber gempa, pemilihan fungsi Ground Motion Prediction Equation (GMPE), dan penyusunan skema logic tree.



Gambar 2. Peta seismisitas wilayah penelitian periode 1906–2024 (Sumber: USGS dan BMKG)

Seluruh data magnitudo pada katalog gabungan USGS dan BMKG memiliki skala yang beragam (mb, Ms, dan Mw) sehingga terlebih dahulu dikonversi ke dalam momen magnitudo (Mw) menggunakan persamaan empiris yang direkomendasikan oleh Scordilis (2006) agar diperoleh keseragaman parameter magnitudo. Persamaan konversi magnitudo ditunjukkan pada Tabel 1.

Tahapan berikutnya adalah proses *declustering* menggunakan metode Gardner dan Knopoff (1974) untuk memisahkan kejadian gempa utama (*mainshock*) dari gempa pendahulu (*foreshock*) maupun gempa susulan (*aftershock*), menggunakan kriteria jendela ruang dan waktu (*space-time window*) sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

Tabel 1. Metode konversi magnitudo momen (Scordilis, 2006)

Rumus Konversi	Nilai Magnitudo
$M_w = 1,0107 \text{ mb} + 0,0801$	$3,7 \leq \text{mb} \leq 8,2$
$M_w = 0,6016 \text{ Ms} + 2,476$	$2,8 \leq \text{Ms} \leq 6,1$
$M_w = 0,9239 \text{ Ms} + 0,5671$	$6,2 \leq \text{Ms} \leq 8,7$

$$d = 10^{(0.1238M + 0.983)} \text{ [km]}$$

$$t = 10^{(0.032M + 2.7389)}, \text{ jika } M \geq 6.5$$

$$t = 10^{(0.5409M - 0.547)}, \text{ jika } M < 6.5$$

Gambar 3. Persamaan jendela ruang dan waktu declustering Gardner dan Knopoff (1974)

dengan d adalah jarak gempa bumi maksimum dalam kilometer dan t adalah cakupan periode waktu maksimum dalam hari.

Selanjutnya dilakukan analisis karakteristik seismisitas melalui perhitungan parameter Gutenberg-Richter untuk memperoleh nilai a-value dan b-value yang digunakan sebagai parameter frekuensi kejadian gempa pada setiap model sumber. Perhitungan dilakukan menggunakan pendekatan Maximum Likelihood Estimation (Aki, 1965) sebagaimana diimplementasikan dalam perangkat lunak ZMAP (Wiemer, 2001), dengan magnitude of completeness (Mc) sebesar 4,8, mengikuti persamaan berikut.

$$b = \frac{1}{(\bar{M} - M_{min}) \ln(10)}$$

$$a = \log N + b M_{min}$$

Gambar 4. Persamaan Maximum Likelihood Estimation untuk nilai a dan b (Aki, 1965)

dengan $\bar{M}$ adalah magnitudo rata-rata, M_{min} adalah magnitudo minimum (magnitude of completeness), N adalah jumlah gempa bumi dengan magnitudo lebih besar dari M_{min} , a adalah konstanta keaktifan seismik, dan b adalah konstanta kerapuhan batuan.

Model sumber gempa yang digunakan mengacu pada Model Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2024 (PuSGeN, 2024), yang terdiri atas sumber sesar aktif kerak dangkal (24 segmen Sesar Besar Sumatra dan Mentawai), sumber subduksi (*interface* dan *intraslab*), serta sumber *background* pada lima lapisan

kedalaman. Parameter kegempaan tiap sumber diturunkan menggunakan pendekatan moment-rate balancing berdasarkan model truncated Gutenberg-Richter. Seluruh model sumber kemudian dipadukan menggunakan pendekatan *logic tree* untuk mengakomodasi ketidakpastian parameter sumber maupun Ground Motion Prediction Equation (GMPE).

Persamaan GMPE yang digunakan merujuk pada rekomendasi PuSGeN (2024) untuk masing-masing tipe sumber gempa, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pembobotan GMPE yang digunakan dalam penelitian ini

Sumber Gempa Bumi	Bobot	GMPE
Shallow Crustal (sesar aktif dan background dangkal)	0,33	Boore et al. (2014) NGA-West-2
	0,34	Campbell-Bozorgnia (2014) NGA-West-2
	0,33	Chiou-Youngs (2014) NGA-West-2
Intraslab (Benioff)	0,33	Abrahamson & Gulerce (2020) Intraslab NGA-Sub
	0,33	Kuehn et al. (2020) Intraslab NGA-Sub
	0,34	Zhao et al. (2006)
Interface (Megathrust)	0,33	Abrahamson & Gulerce (2020) Interface NGA-Sub
	0,34	Kuehn et al. (2020) Interface NGA-Sub
	0,33	Zhao et al. (2006)

Tahap ketiga adalah perhitungan PSHA menggunakan perangkat lunak *OpenQuake* untuk mengestimasi nilai PGA dan SA pada probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun (periode ulang 475 tahun) dan 2% dalam 50 tahun (periode ulang 2.475 tahun), dilanjutkan dengan analisis deagregasi untuk mengidentifikasi kontribusi dominan magnitudo dan jarak sumber gempa.

Nilai bahaya gempa bumi hasil perhitungan *OpenQuake* merepresentasikan kondisi batuan dasar (*bedrock*) sehingga perlu dikonversi menjadi nilai bahaya pada permukaan tanah dengan memperhitungkan efek amplifikasi tapak lokal (*local site effect*). Konversi dilakukan dengan mengalikan nilai PGA dan SA batuan

dasar pada setiap titik grid dengan faktor amplifikasi situs yang mengacu pada SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Klasifikasi kelas situs pada setiap titik grid ditentukan berdasarkan nilai Vs30 hasil interpolasi data USGS dan BMKG, mengikuti kriteria pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi kelas situs berdasarkan Vs30 (SNI 1726:2019)

Kelas Situs	Deskripsi	Vs30 (m/s)
SA	Batuan Keras	Vs30 > 1500
SB	Batuan	750 < Vs30 ≤ 1500
SC	Tanah Keras	350 < Vs30 ≤ 750
SD	Tanah Sedang	175 < Vs30 ≤ 350
SE	Tanah Lunak	Vs30 ≤ 175
SF	Tanah Khusus	memerlukan investigasi geoteknik spesifik

Berdasarkan kelas situs yang diperoleh, nilai PGA dan SA batuan dasar dikalikan dengan faktor amplifikasi periode pendek (F_a) untuk SA 0,2 detik, faktor amplifikasi periode 1 detik (F_v) untuk SA 1,0 detik, dan faktor amplifikasi PGA (F_{pea}) untuk PGA, yang besarnya ditentukan berdasarkan kelas situs dan intensitas guncangan batuan dasar sesuai SNI 1726:2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019), mengikuti persamaan berikut.

$$PGA_M = F_{PGA} \times PGA$$

$$S_{S(0.2)M} = F_a \times S_{S(0.2)}$$

$$S_{I(1.0)M} = F_v \times S_{I(1.0)}$$

Gambar 5. Persamaan konversi nilai bahaya gempa bumi batuan dasar menjadi nilai bahaya permukaan (SNI 1726:2019)

dengan PGA_m , $S_s(0,2)_m$, dan $S_i(1,0)_m$ berturut-turut adalah nilai PGA, SA periode 0,2 detik, dan SA periode 1,0 detik pada permukaan tanah, sedangkan PGA, $S_s(0,2)$, dan $S_i(1,0)$ adalah nilai pada kondisi batuan dasar hasil perhitungan *OpenQuake*.

Proses klasifikasi kelas situs, penentuan faktor amplifikasi, serta perkalian nilai bahaya batuan dasar dengan faktor amplifikasi dilakukan menggunakan *Python* dan *Microsoft Excel* untuk seluruh titik grid penelitian, sehingga diperoleh peta bahaya gempa bumi

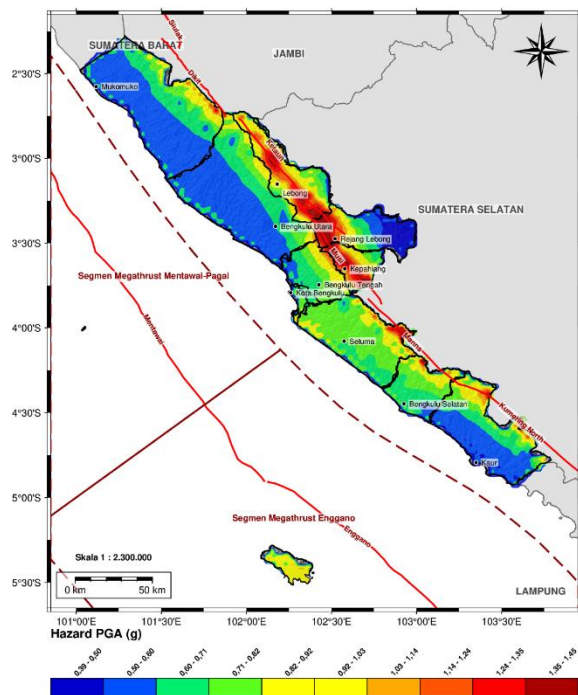
permukaan yang telah memperhitungkan kondisi tanah lokal. Visualisasi dan pemetaan hasil dilakukan menggunakan QGIS dan Python, sedangkan pengolahan data numerik menggunakan Microsoft Excel.

Hasil dan Diskusi

Perhitungan PSHA menghasilkan peta bahaya gempa bumi permukaan berupa Peta Percepatan Tanah Maksimum (PGA) dan Peta Spektra Percepatan pada periode getar $T = 0,2$ detik dan $T = 1,0$ detik, untuk dua skenario probabilitas terlampaui, yaitu 10% dalam 50 tahun (periode ulang 475 tahun) dan 2% dalam 50 tahun (periode ulang 2.475 tahun).

Pada periode ulang 475 tahun, nilai PGA di Provinsi Bengkulu berkisar 0,39–1,45 g (Gambar 6). Nilai tertinggi (1,24–1,45 g) terkonsentrasi di jalur pegunungan tengah yang dilintasi Sesar Besar Sumatra segmen Musi-Ketaun, meliputi Kabupaten Lebong, Rejang Lebong, dan Kepahiang, akibat dominannya efek sesar dekat (*near-fault effect*) dari gempa kerak dangkal. Nilai terendah (0,39–0,60 g) dijumpai di Mukomuko dan Kaur yang berjarak jauh dari sumber sesar maupun megathrust, sementara kawasan pesisir seperti Kota Bengkulu berada pada kisaran menengah (0,71–0,92 g) akibat kontribusi megathrust Mentawai-Enggano dan amplifikasi tanah lunak aluvial.

Peta Hazard PGA - Periode Ulang 475 Tahun (PoE 10% / 50 Tahun) - Provinsi Bengkulu

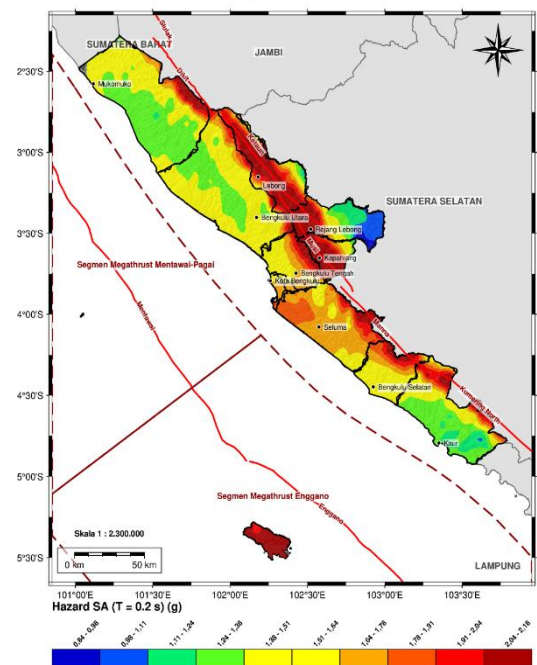


Gambar 6. Peta distribusi nilai PGA, probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun (periode ulang 475 tahun)

Nilai Spectral Acceleration (SA) 0,2 detik untuk periode ulang 475 tahun berkisar 0,84–2,18 g (Gambar 7).

Nilai tertinggi (1,91–2,18 g) terkonsentrasi di kawasan dataran tinggi bagian tengah provinsi, meliputi Kepahiang, Rejang Lebong, dan bagian timur Lebong, yang dilintasi langsung oleh Sesar Besar Sumatra segmen Ketaun dan Musi, akibat kedekatan jarak terhadap sumber gempa aktif (*near-source effect*). Kota Bengkulu menunjukkan nilai moderat hingga cukup tinggi (sekitar 1,51–1,78 g) akibat karakteristik tanah permukaan yang lunak di wilayah pesisir, yang memicu amplifikasi gelombang gempa pada frekuensi tinggi dan berpotensi membahayakan bangunan berlantai rendah. Wilayah pesisir selatan seperti Seluma dan Bengkulu Selatan menunjukkan nilai relatif lebih moderat (sekitar 1,24–1,64 g) karena jaraknya yang lebih jauh dari jalur sesar Sumatra, meskipun peningkatan nilai kembali terlihat di dekat perbatasan Bengkulu Selatan-Kaur yang berimpit dengan segmen Manna.

Peta Hazard SA ($T = 0.2$ s) - Periode Ulang 475 Tahun (PoE 10% / 50 Tahun) - Provinsi Bengkulu

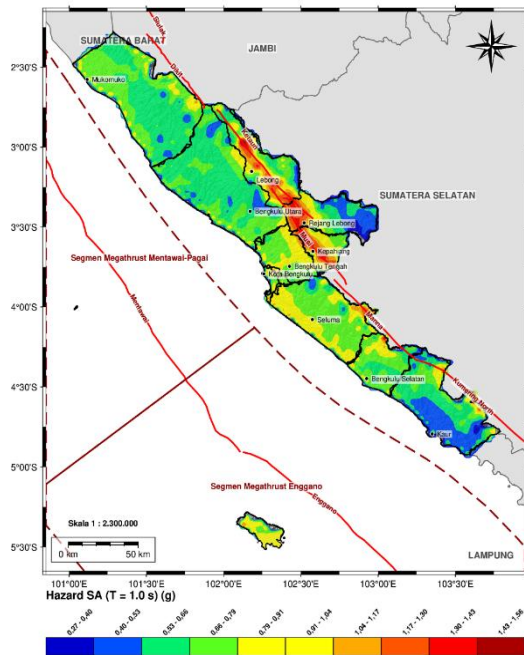


Gambar 7. Peta distribusi nilai SA 0,2 detik, probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun (periode ulang 475 tahun)

Nilai SA 1,0 detik untuk periode ulang 475 tahun berkisar 0,27–1,56 g (Gambar 8), yang merepresentasikan tingkat kerentanan bangunan tinggi. Nilai tertinggi (1,30–1,56 g) terpusat di Kepahiang dan sebagian Rejang Lebong akibat kedekatan geografis dengan Sesar Besar Sumatra segmen Ketaun dan Musi, sejalan dengan karakteristik SA periode panjang yang lebih dipengaruhi oleh magnitudo sumber gempa. Nilai relatif tinggi juga teridentifikasi di perbatasan Seluma-Bengkulu Selatan akibat lintasan segmen Manna, sedangkan sebagian besar Kabupaten Kaur menunjukkan nilai relatif rendah (0,27–0,66 g) karena

jaraknya yang jauh dari sesar darat maupun zona subduksi.

Peta Hazard SA ($T = 1.0$ s) - Periode Ulang 475 Tahun (PoE 10% / 50 Tahun) - Provinsi Bengkulu



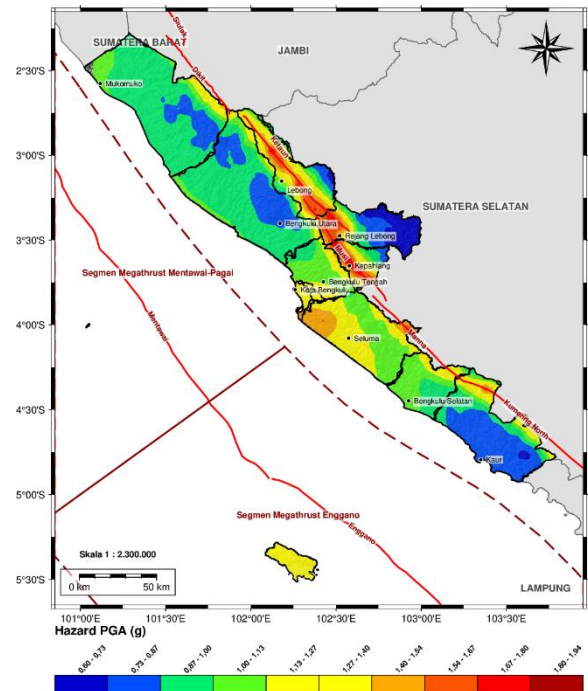
Gambar 8. Peta distribusi nilai SA 1,0 detik, probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun (periode ulang 475 tahun)

Untuk periode ulang 2.475 tahun, nilai PGA berkisar 0,60–1,94 g (Gambar 9), dengan pola sebaran yang serupa namun rentang lebih tinggi. Nilai tertinggi (1,67–1,94 g) tetap terdistribusi di jalur Sesar Besar Sumatra pada Kabupaten Lebong, Rejang Lebong, dan Kepahiang akibat dominannya efek sesar dekat, sementara kawasan pesisir barat (Kota Bengkulu, Bengkulu Tengah, Seluma) menunjukkan nilai menengah-tinggi (1,13–1,54 g) akibat kombinasi kontribusi megathrust Mentawai–Enggano dan amplifikasi tanah lunak aluvial. Nilai terendah (0,60–1,00 g) tetap dijumpai di Mukomuko dan Kaur akibat efek atenuasi jarak.

Nilai SA 0,2 detik untuk periode ulang 2.475 tahun berkisar 1,29–2,59 g (Gambar 10). Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan skenario periode ulang 475 tahun, sebagaimana wajar terjadi mengingat probabilitas kejadiannya yang lebih kecil sehingga merepresentasikan skenario gempa yang jauh lebih ekstrem. Dari segi sebaran spasialnya, wilayah dengan nilai SA 0,2 detik tinggi masih konsisten berada di dua tipe kawasan, yaitu wilayah pesisir seperti Kota Bengkulu, Bengkulu Tengah, dan Seluma, serta wilayah dataran tinggi di Kabupaten Kepahiang dan sebagian Lebong. Tingginya nilai di kawasan pesisir berkaitan dengan kondisi tanah permukaan yang umumnya lunak karena tersusun oleh endapan aluvial, sehingga

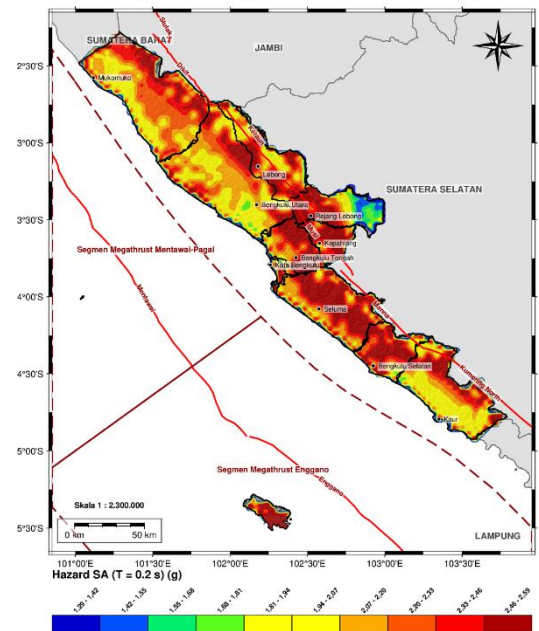
memperkuat (mengamplifikasi) gelombang gempa terutama pada frekuensi tinggi.

Peta Hazard PGA - Periode Ulang 2475 Tahun (PoE 2% / 50 Tahun) - Provinsi Bengkulu



Gambar 9. Peta distribusi nilai PGA, probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang 2.475 tahun)

Peta Hazard SA ($T = 0.2$ s) - Periode Ulang 2475 Tahun (PoE 2% / 50 Tahun) - Provinsi Bengkulu

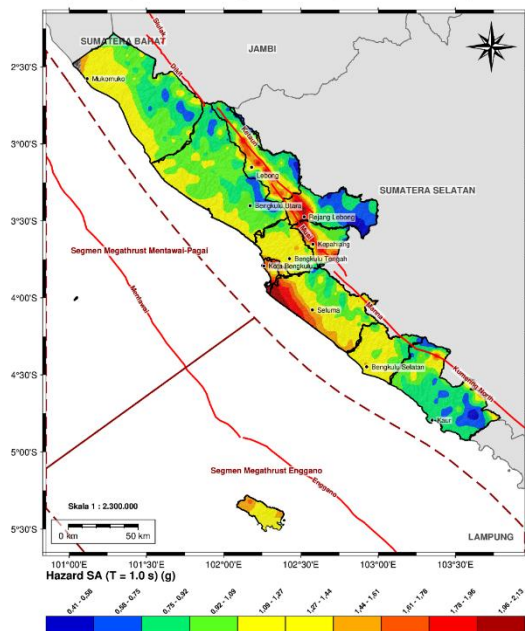


Gambar 10. Peta distribusi nilai SA 0,2 detik, probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang 2.475 tahun)

Sementara itu, tingginya nilai ancaman di Kabupaten Kepahiang tidak disebabkan oleh faktor

tanah, melainkan oleh kedekatan dengan sumber gempa itu sendiri (*near-source effect*), akibat posisinya yang berada tepat di jalur Sesar Sumatra segmen Musi, meskipun kondisi batuan di wilayah ini relatif lebih kompak dan keras dibandingkan wilayah pesisir. Nilai SA 1,0 detik untuk periode ulang 2.475 tahun berkisar 0,41–2,13 g (Gambar 11). Nilai tertinggi teridentifikasi pada dua tipe kawasan, yaitu jalur Sesar Sumatra segmen Musi-Ketaun (Kepahiang dan Rejang Lebong) serta kawasan pesisir dari Kota Bengkulu hingga Seluma, yang nilainya tampak lebih dominan dibandingkan skenario 475 tahun akibat efek amplifikasi gelombang periode panjang oleh tanah lunak aluvial yang semakin nyata pada skenario gempa ekstrem. Nilai signifikan juga teridentifikasi di timur laut Bengkulu Utara–Lebong serta perbatasan Bengkulu Selatan–Kaur, berkaitan dengan lintasan segmen Manna.

Peta Hazard SA (T = 1.0 s) - Periode Ulang 2475 Tahun (PoE 2% / 50 Tahun) - Provinsi Bengkulu

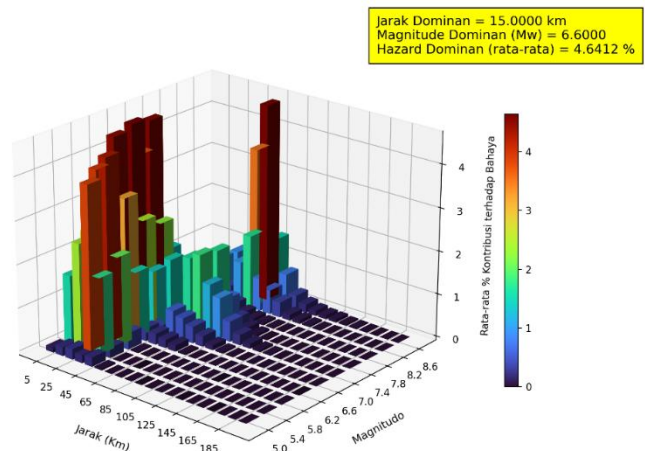


Gambar 11. Peta distribusi nilai SA 1,0 detik, probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang 2.475 tahun)

Hasil deagregasi PGA untuk periode ulang 475 tahun (Gambar 12) menunjukkan kontribusi bahaya terbesar berasal dari jarak sangat dekat (≈ 15 km) dengan magnitudo dominan Mw 6,6, yang mengindikasikan dominasi sesar aktif kerak dangkal segmen Ketaun, Musi, dan Manna. Kontribusi tambahan juga terlihat dari jarak lebih jauh (45–65 km) dengan magnitudo lebih besar, mengindikasikan adanya kontribusi megathrust Mentawai–Enggano meski tidak sebesar sumber sesar lokal. Deagregasi SA 0,2 detik pada periode ulang 475 tahun (Gambar 13) juga menunjukkan kontribusi terbesar dari jarak sekitar 15 km dengan magnitudo dominan Mw 6,6, menegaskan bahwa sesar aktif kerak

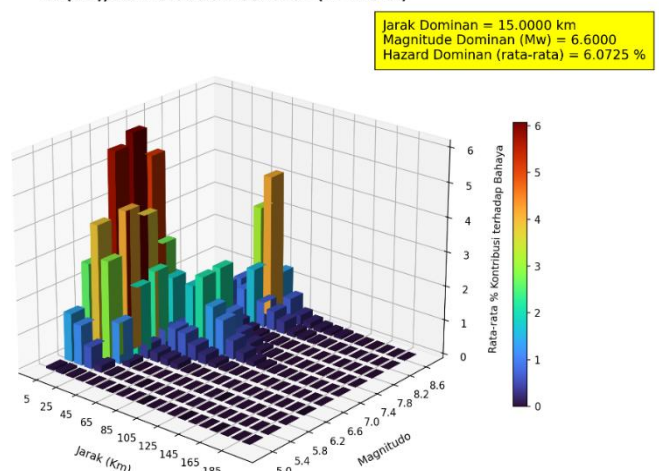
dangkal setempat menjadi pengendali utama bahaya untuk parameter periode pendek ini, dengan kontribusi tambahan dari magnitudo besar pada jarak lebih jauh yang mengindikasikan peran megathrust.

Deagregasi Bahaya Gempa Provinsi Bengkulu
PGA, PoE 10% dalam 50 Tahun ($T_r=475$ th)



Gambar 12. Grafik deagregasi nilai PGA, probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun (periode ulang 475 tahun)

Deagregasi Bahaya Gempa Provinsi Bengkulu
SA(0.2), PoE 10% dalam 50 Tahun ($T_r=475$ th)



Gambar 13. Grafik deagregasi nilai SA 0,2 detik, probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun (periode ulang 475 tahun)

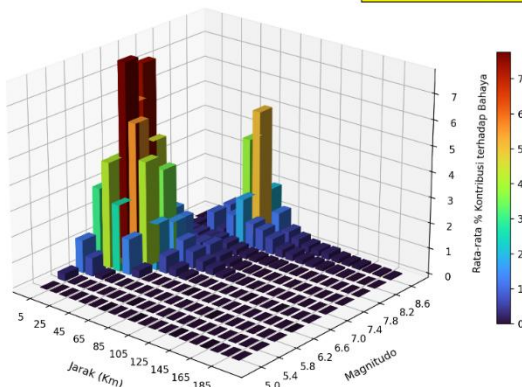
Deagregasi SA 1,0 detik pada periode ulang 475 tahun (Gambar 14) menunjukkan pola yang serupa, dengan kontribusi terbesar dari jarak ≈ 15 km dan magnitudo dominan Mw 6,6, yang berasal dari sesar aktif segmen Ketaun, Musi, dan Manna yang mampu menghasilkan percepatan spektral periode panjang signifikan meskipun pada kelas magnitudo moderat.

Pada periode ulang 2.475 tahun, deagregasi PGA (Gambar 15) menunjukkan pergeseran kontribusi dominan ke jarak sekitar 65 km dengan magnitudo Mw

8,6, disertai kontribusi cukup besar dari magnitudo Mw 7,0–7,8 pada jarak 25–45 km. Pola ini menunjukkan bahwa bahaya PGA pada periode ulang panjang didominasi oleh sumber megathrust Mentawai–Pagai dan Enggano, dengan tambahan kontribusi dari sesar aktif darat.

Deagregasi Bahaya Gempa Provinsi Bengkulu
SA(1.0), PoE 10% dalam 50 Tahun (Tr=475 th)

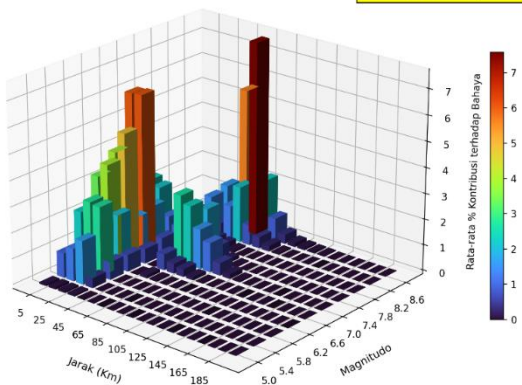
Jarak Dominan = 15.0000 km
Magnitude Dominan (Mw) = 6.6000
Hazard Dominan (rata-rata) = 7.7572 %



Gambar 14. Grafik deagregasi nilai SA 1,0 detik, probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun (periode ulang 475 tahun)

Deagregasi Bahaya Gempa Provinsi Bengkulu
PGA, PoE 2% dalam 50 Tahun (Tr=2475 th)

Jarak Dominan = 65.0000 km
Magnitude Dominan (Mw) = 8.6000
Hazard Dominan (rata-rata) = 7.5733 %

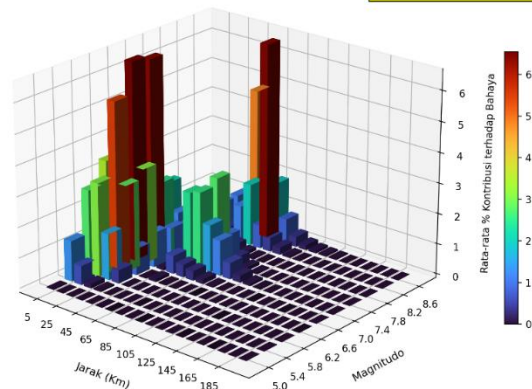


Gambar 15. Grafik deagregasi nilai PGA, probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang 2.475 tahun)

Deagregasi SA 0,2 detik pada periode ulang 2.475 tahun (Gambar 16) tetap menunjukkan kontribusi terbesar dari jarak ≈ 15 km dengan magnitudo dominan Mw 6,6, dengan tambahan kontribusi dari jarak lebih jauh (45–85 km) bermagnitudo besar yang mengindikasikan peran megathrust. Dominasi bahaya SA 0,2 detik tetap dikendalikan oleh sesar aktif kerak dangkal setempat, sejalan dengan karakteristik periode pendek yang lebih sensitif terhadap gelombang frekuensi tinggi.

Deagregasi Bahaya Gempa Provinsi Bengkulu
SA(0.2), PoE 2% dalam 50 Tahun (Tr=2475 th)

Jarak Dominan = 15.0000 km
Magnitude Dominan (Mw) = 6.6000
Hazard Dominan (rata-rata) = 6.5447 %

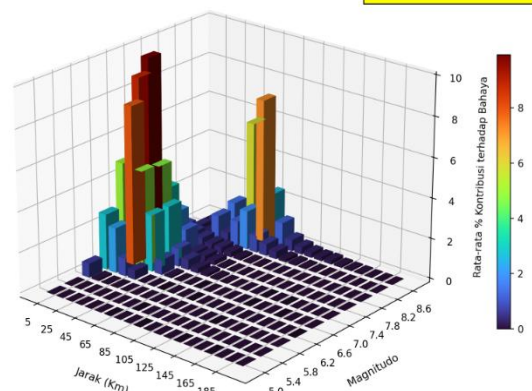


Gambar 16. Grafik deagregasi nilai SA 0,2 detik, probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang 2.475 tahun)

Deagregasi SA 1,0 detik pada periode ulang 2.475 tahun (Gambar 17) menunjukkan kontribusi terbesar dari jarak ≈ 15 km dengan magnitudo dominan Mw 7,0, mengindikasikan peran segmen Sesar Sumatra seperti Kumering (Mmax 7,6). Kontribusi tambahan dari jarak jauh bermagnitudo besar turut teridentifikasi, mengindikasikan peran megathrust Mentawai–Enggano, sejalan dengan karakteristik SA periode panjang yang lebih efektif dibangkitkan oleh gempa bermagnitudo besar.

Deagregasi Bahaya Gempa Provinsi Bengkulu
SA(1.0), PoE 2% dalam 50 Tahun (Tr=2475 th)

Jarak Dominan = 15.0000 km
Magnitude Dominan (Mw) = 7.0000
Hazard Dominan (rata-rata) = 9.9212 %



Gambar 17. Grafik deagregasi nilai SA 1,0 detik, probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun (periode ulang 2.475 tahun)

Secara keseluruhan, hasil deagregasi pada keenam kombinasi parameter memperlihatkan karakter dualisme sumber bahaya: pada probabilitas kejadian yang lebih sering (periode ulang 475 tahun), guncangan dikendalikan oleh sesar aktif jarak dekat bermagnitudo

moderat, sedangkan pada probabilitas kejadian yang lebih jarang (periode ulang 2.475 tahun) kontribusi PGA bergeser ke sumber megathrust jarak jauh bermagnitudo

besar, sementara SA periode pendek dan panjang tetap didominasi sesar aktif setempat dengan magnitudo dominan yang meningkat.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil PSHA dan Deagregasi Provinsi Bengkulu

Periode Ulang	Probabilitas	Parameter	Rentang Nilai (g)	Jarak Dominan	Mag. Dominan
475 tahun	10% / 50 thn	PGA	0,39–1,45	~15 km	Mw 6,6
475 tahun	10% / 50 thn	SA 0,2 dtk	0,84–2,18	~15 km	Mw 6,6
475 tahun	10% / 50 thn	SA 1,0 dtk	0,27–1,55	~15 km	Mw 6,6
2.475 tahun	2% / 50 thn	PGA	0,60–1,94	~65 km	Mw 8,6
2.475 tahun	2% / 50 thn	SA 0,2 dtk	1,29–2,59	~15 km	Mw 6,6
2.475 tahun	2% / 50 thn	SA 1,0 dtk	0,41–2,13	~15 km	Mw 7,0

Hasil penelitian ini kemudian dibandingkan dengan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia PuSGeN (2024) sebagai acuan nasional, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5. Secara umum, rentang nilai percepatan tanah hasil penelitian ini lebih tinggi dan memiliki sebaran yang lebih lebar dibandingkan nilai referensi PuSGeN (2024). Pada periode ulang 475 tahun, rentang nilai PGA hasil penelitian (0,39–1,45 g) dan SA 0,2 detik (0,84–2,18 g) melampaui rentang nilai PuSGeN (2024) yang masing-masing berada pada 0,30–1,20 g dan 0,80–2,00 g. Kondisi serupa juga konsisten terlihat pada periode ulang 2.475 tahun, di mana batas atas PGA (1,94 g), SA 0,2 detik (2,59 g), dan SA 1,0 detik (2,13 g) hasil penelitian ini melampaui batas atas nilai referensi PuSGeN (2024) pada seluruh parameter yang dibandingkan. Perbedaan tersebut disebabkan oleh penggunaan resolusi spasial yang lebih tinggi serta

pemodelan karakteristik sumber gempa yang difokuskan secara lebih mendetail khusus untuk wilayah Provinsi Bengkulu, mencakup deagregasi jarak ($R \approx 15\text{--}65$ km) dan magnitudo dominan (Mw 6,6–8,6). Selain itu, nilai percepatan yang dihitung dalam penelitian ini merepresentasikan respons percepatan pada permukaan tanah (surface PGA) setelah memperhitungkan faktor amplifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019, berbeda dengan peta makrozonasi PuSGeN (2024) yang umumnya disajikan pada kondisi batuan dasar (*bedrock*). Nilai permukaan cenderung lebih tinggi karena adanya amplifikasi gelombang seismik akibat kondisi tanah lunak (*site effect*) di sebagian wilayah studi, yang menjelaskan mengapa nilai maksimum PGA maupun percepatan spektra (SA 0,2 detik dan SA 1,0 detik) pada penelitian ini secara konsisten melampaui nilai referensi PuSGeN (2024).

Tabel 5. Perbandingan hasil penelitian ini dengan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia PuSGeN (2024)

Periode Ulang	Parameter	Rentang Nilai Penelitian (g)	Rentang Nilai PuSGeN 2024 (g)
475 Tahun	PGA	0,39 – 1,45	0,30 – 1,20
475 Tahun	SA 0,2 detik	0,84 – 2,18	0,80 – 2,00
475 Tahun	SA 1,0 detik	0,27 – 1,56	0,30 – 1,20
2.475 Tahun	PGA	0,60 – 1,94	0,50 – 1,50
2.475 Tahun	SA 0,2 detik	1,29 – 2,59	1,00 – 2,50
2.475 Tahun	SA 1,0 detik	0,41 – 2,13	0,50 – 2,00

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa bahaya gempa bumi di Provinsi Bengkulu pada periode ulang 475 tahun dikontrol oleh sumber gempa kerak dangkal jarak dekat (≈ 15 km), yaitu Sesar Besar Sumatra segmen Musi–Ketaun dan Manna, dengan magnitudo dominan Mw 6,6, dengan nilai PGA berkisar 0,39–1,45 g, SA 0,2 detik 0,84–2,18 g, dan SA 1,0 detik

0,27–1,56 g. Pada periode ulang 2.475 tahun, kontribusi PGA bergeser ke sumber megathrust Mentawai–Pagai dan Enggano pada jarak jauh (≈ 65 km) dengan magnitudo besar (Mw 8,6), sedangkan SA 0,2 dan SA 1,0 detik tetap didominasi sesar aktif setempat dengan magnitudo Mw 6,6–7,0, dengan nilai berkisar 0,60–1,94 g, 1,29–2,59 g, dan 0,41–2,13 g. Nilai bahaya tertinggi konsisten terkonsentrasi di jalur pegunungan tengah

dan kawasan pesisir barat Provinsi Bengkulu. Hasil deagregasi menegaskan karakter dualisme sumber bahaya: sumber jarak dekat bermagnitudo moderat pada probabilitas tinggi, dan sumber megathrust jarak jauh bermagnitudo besar pada probabilitas rendah, sehingga menjadi acuan penting dalam penentuan skenario gempa desain bangunan tahan gempa di Provinsi Bengkulu.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan apresiasi kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang telah memfasilitasi penelitian ini melalui penyediaan data. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada Muzli, Oriza Sativa, dan Bapak Aditya Setyo Rahman selaku dosen pembimbing atas arahan, diskusi, dan bimbingannya. Semoga karya ilmiah ini dapat memberikan sumbangsih nyata pada pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya terkait kebencanaan dan mitigasi gempa bumi.

Referensi

- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 43, 237-239.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1726:2019: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. <https://www.bsn.go.id>
- BMKG. (2025). Ulasan guncangan tanah akibat gempa Bengkulu 23 Mei 2025. <https://www.bmkg.go.id/gempabumi/ulasan-guncangan-tanah/ulasan-guncangan-tanah-akibat-gempa-bengkulu-23-mei-2025>
- 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>
- Konca, A. O., Avouac, J. P., Sladen, A., Meltzner, A. J., Sieh, K., Fang, P., Li, Z., Galetzka, J., Genrich, J., Chlieh, M., Natawidjaja, D. H., Bock, Y., Fielding, E. J., Ji, C., & Helmberger, D. V. (2008). Partial rupture of a locked patch of the Sumatra megathrust during the 2007 earthquake sequence. *Nature*, 456(7222), 631-635. <https://doi.org/10.1038/nature07572>
- Litman, Yuwana, & Caniago, Z. B. (2021). Analisis probabilitas bahaya kegempaan untuk pengelolaan daerah dalam mitigasi bencana gempa bumi di Kota Bengkulu. *Naturalis – Jurnal Penelitian Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 10(1), 143-155. <https://doi.org/10.31186/naturalis.10.1.18161>
- Mase, L. Z., Sugianto, N., & Refrizon. (2021). Seismic hazard microzonation of Bengkulu City, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00178-y>
- McCaffrey, R. (2009). The Tectonic Framework of the Sumatran Subduction Zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 345-366. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100212>
- McGuire, R. K. (2004). Seismic hazard and risk analysis. Earthquake Engineering Research Institute.
- PuSGeN. (2024). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2024.
- Scordilis, E. M. (2006). Empirical global relations converting M_S and m_b to moment magnitude. *Journal of Seismology*, 10(2), 225-236. <https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4>
- Sieh, K., & Natawidjaja, D. (2000). Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28295-28326. <https://doi.org/10.1029/2000jb900120>
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373-382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>