

ANALISIS PENGARUH VARIABILITAS SPASIAL TANAH TERHADAP RESPONS SEISMİK DI KECAMATAN RATU AGUNG, KOTA BENGKULU

Surya Faadhilah¹, Lindung Zalbuin Mase^{1*}, Hardiansyah¹, Rena Misliniyati¹, Muharram Nur Fikri¹

Afiliasi : ¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Bengkulu
e-mail :lmase@unib.ac.id

Abstrak. Kecamatan Ratu Agung, Kota Bengkulu, merupakan wilayah perkotaan yang memiliki tingkat kepadatan penduduk yang tinggi serta keberadaan fasilitas strategis yang memerlukan penilaian respons seismik berdasarkan kondisi tanah setempat. Tanah di Kecamatan Ratu Agung umumnya didominasi oleh kelas situs C dan D. Oleh karena itu, diperlukan kajian mendalam untuk mengidentifikasi distribusi parameter kegempaan secara spasial. Penelitian ini merupakan kajian mikrozonasi seismik pada skala kecamatan yang mengintegrasikan model geologi tiga dimensi (3D) dengan analisis respons situs nonlinier 1D untuk mengevaluasi pengaruh variabilitas spasial tanah terhadap distribusi *Peak Ground Acceleration* (PGA), faktor amplifikasi (AF), serta percepatan spektral (SA) di Kecamatan Ratu Agung. Penelitian ini menggunakan 112 data sekunder untuk membangun model perlapisan tanah. Pendekatan nonlinier 1D (*non-linear one-dimensional site response analysis*) digunakan untuk menganalisis respons tanah menggunakan rekaman gelombang gempa Bengkulu-Mentawai 2007 (M_w 8,6) sebagai input gerakan pada batuan dasar. Parameter PGA, faktor amplifikasi, dan SA yang diperoleh kemudian dipetakan menggunakan metode interpolasi kriging untuk menghasilkan peta mikrozonasi. Hasil menunjukkan bahwa variabilitas spasial tanah menghasilkan perbedaan respons seismik permukaan yang signifikan, dengan nilai PGA mencapai 0,32g dan faktor amplifikasi hingga 2,1. Percepatan spektral maksimum terjadi pada periode sekitar 0,3 s yang mengindikasikan bahwa bangunan bertingkat rendah hingga menengah berpotensi mengalami respons yang lebih besar dibandingkan bangunan bertingkat tinggi. Variasi nilai yang didapat mencerminkan heterogenitas karakteristik dinamik tanah yang berpengaruh terhadap perbedaan tingkat respons struktur terhadap beban gempa. Peta mikrozonasi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai dasar pertimbangan teknis dalam perencanaan bangunan dan upaya mitigasi risiko gempa di wilayah penelitian.

Kata Kunci: amplifikasi; Bengkulu; gempa; percepatan spektral; respons seismik

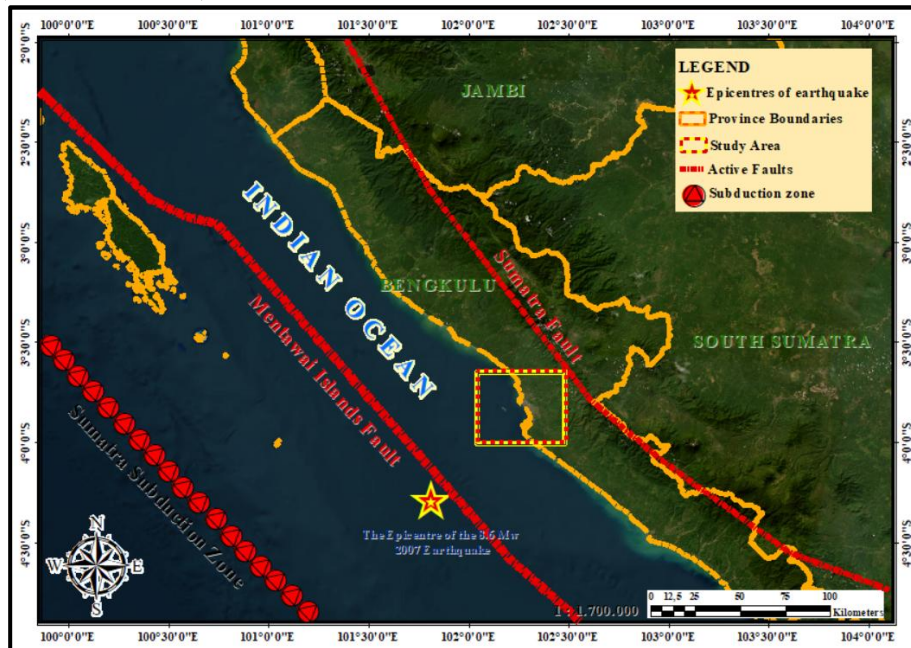
Abstract. The Ratu Agung subdistrict in Bengkulu City is an urban area characterised by high population density and the presence of strategic facilities, necessitating an assessment of seismic response based on local soil conditions. The soil in Ratu Agung sub-district is generally dominated by site classes C and D. Therefore, a comprehensive study is necessary to identify the spatial distribution of seismic parameters. This study presents a seismic microzonation assessment at the sub-district scale by integrating a three-dimensional (3D) geological model with one-dimensional (1D) nonlinear site response analysis to evaluate the influence of spatial soil variability on the distribution of Peak Ground Acceleration (PGA), Amplification Factor (AF), and Spectral Acceleration (SA) in Ratu Agung District. This study employs 112 secondary datasets to construct a soil stratification model. A one-dimensional nonlinear approach analysis was performed using the Bengkulu-Mentawai 2007 earthquake record (M_w 8.6) as input motion at the bedrock level. The resulting PGA, amplification factor, and SA values were spatially interpolated using the kriging method to generate microzonation maps. The results indicate that spatial soil variability produces significant differences in surface seismic response, with Peak Ground Acceleration (PGA) reaching up to 0.32g and Amplification Factors (AF) as high as 2.1. The maximum spectral acceleration occurs at a period of approximately 0.3 s, indicating that low- to mid-rise buildings are likely to experience greater seismic response than high-rise buildings. These variations reflect the heterogeneity of soil dynamic characteristics, which may influence structural response under seismic loading. The resulting microzonation maps provide technical information to support building design considerations and earthquake risk mitigation strategies in the study area.

Keywords: amplification; bengkulu; earthquake; spectral acceleration; seismic response

PENDAHULUAN

Provinsi Bengkulu terletak pada wilayah dengan intensitas seismik yang tinggi karena adanya pertemuan dari tiga zona tektonik utama. Seperti yang terlihat pada Gambar 1. Wilayah ini berada dekat dengan Zona Subduksi Sumatra yang merupakan zona pertemuan lempeng, Sesar Mentawai di lepas pantai, serta Sesar Sumatra yang membelah daratan. Wilayah-wilayah ini menjadi titik temu yang membatasi pergerakan

Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia (Mase dkk., 2021). Tingginya potensi bahaya gempa di Indonesia menempatkan Kota Bengkulu sebagai wilayah yang sering kali merasakan dampak dari aktivitas gempa bumi yang terjadi (Mase, 2020). Salah satu peristiwa besar yang pernah terjadi adalah gempa Bengkulu-Mentawai pada 12 September 2007 dengan kekuatan 8,6 M_w yang menyebabkan kerusakan luas pada bangunan dan infrastruktur (Farid dkk., 2024).



Gambar 1. Peta Seismotektonik Provinsi Bengkulu, Indonesia
(Sumber: Modifikasi dari Mase (2022))

Kota Bengkulu memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap dampak gempa bumi karena kepadatan penduduk yang relatif besar serta keberadaan berbagai infrastruktur vital, seperti fasilitas kesehatan, fasilitas pendidikan, pusat pemerintahan, kawasan perdagangan dan jasa, jaringan transportasi, serta permukiman yang tersebar di wilayah perkotaan. Dalam konteks tata ruang kota, Kecamatan Ratu Agung menjadi wilayah yang paling krusial untuk dikaji. Wilayah ini adalah pusat pertumbuhan perkotaan dengan kepadatan penduduk tinggi dan terletak di lingkungan yang dilengkapi berbagai fasilitas umum penting, seperti sekolah, rumah sakit, hotel, serta kawasan komersial. Studi pasca gempa 2007 mengidentifikasi bahwa Kecamatan Ratu Agung termasuk dalam kategori wilayah dengan tingkat kerusakan terparah akibat guncangan gempa (Mase, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa, selain faktor jarak dari sumber gempa, sifat tanah di daerah tersebut memainkan peran yang signifikan dalam mengubah kekuatan guncangan di permukaan.

Berbagai upaya pemetaan bahaya gempa di Kota Bengkulu telah dilakukan oleh peneliti terdahulu. Sebagian besar kajian awal masih bertumpu pada pendekatan makrozonasi yang mengandalkan peta sumber gempa nasional tanpa mempertimbangkan variasi propertis tanah lokal secara detail (Mase dkk., 2021). Perkembangan terakhir menunjukkan upaya untuk menggabungkan data geoteknik dengan evaluasi respons seismik. Mase dan Keawsawasvong (2022) telah melakukan evaluasi terhadap keandalan desain percepatan spektral di wilayah Kota Bengkulu. Namun, penelitian tersebut belum mencapai resolusi spasial pada tingkat kecamatan dan masih bersifat umum. Sementara itu, pemodelan geologi bawah permukaan terbaru oleh Fikri dkk. (2025) justru mengungkapkan bahwa subpermukaan Kecamatan Ratu Agung memiliki kompleksitas stratigrafi yang sangat tinggi, dengan variasi lapisan lempung lunak, pasir padat, hingga batuan keras yang membentuk profil kecepatan gelombang geser (V_s) tidak beraturan.

Kondisi di atas menunjukkan bahwa penyelidikan yang lebih mendalam diperlukan di Kecamatan Ratu Agung. Berbagai penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi penting dalam mengungkap karakteristik seismik Kota Bengkulu melalui pendekatan makrozonasi maupun analisis respons spektral pada skala regional. Penelitian sebelumnya sebagian besar dilakukan pada skala kota dan belum mempertimbangkan perbedaan

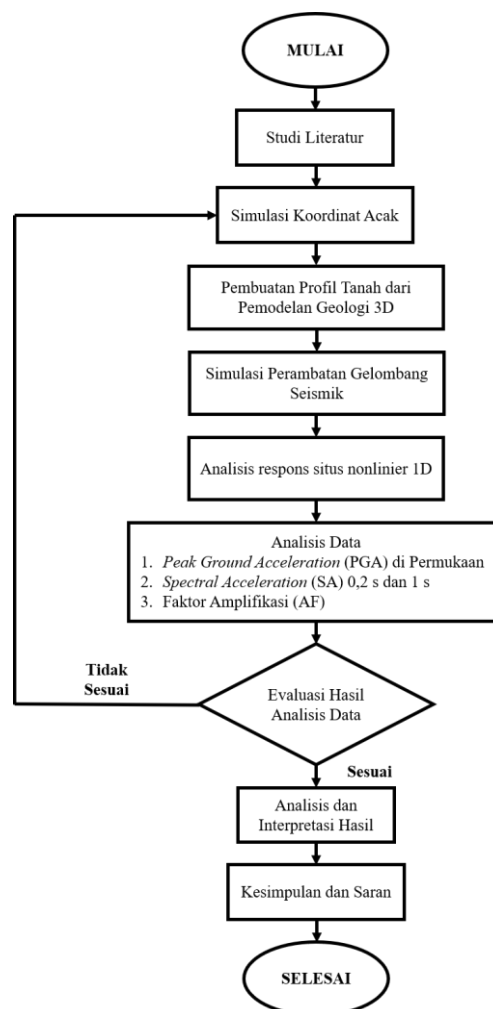
properti tanah lokal di tingkat kecamatan. Sementara itu, temuan terbaru mengenai kompleksitas stratigrafi bawah permukaan mengindikasikan bahwa karakteristik tanah setempat berpotensi mempengaruhi respons seismik permukaan secara signifikan (Likitlersuang dkk., 2020).

Penelitian ini mengintegrasikan model geologi tiga dimensi (3D) yang dikembangkan oleh Fikri dkk. (2025), analisis respons situs 1D nonlinier, serta interpolasi spasial untuk menghasilkan mikrozonasi respons seismik pada skala Kecamatan Ratu Agung. Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi pengaruh variabilitas spasial tanah terhadap distribusi *Peak Ground Acceleration* (PGA), faktor amplifikasi, dan percepatan spektral (SA) secara lebih rinci.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variabel spasial tanah terhadap respons seismik di Kecamatan Ratu Agung. Penelitian ini difokuskan untuk memodelkan profil tanah menggunakan data sekunder untuk memperoleh parameter dinamik tanah, menghitung nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) permukaan, faktor amplifikasi (AF), dan percepatan spektral (SA) pada periode 0,2 s dan 1 s menggunakan analisis respons situs 1D nonlinier, serta menyusun peta mikrozonasi seismik berdasarkan parameter tersebut. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi teknis yang lebih akurat untuk perencanaan infrastruktur tahan gempa dan upaya mitigasi bencana di kawasan perkotaan Ratu Agung.

METODOLOGI

Rancangan Penelitian



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

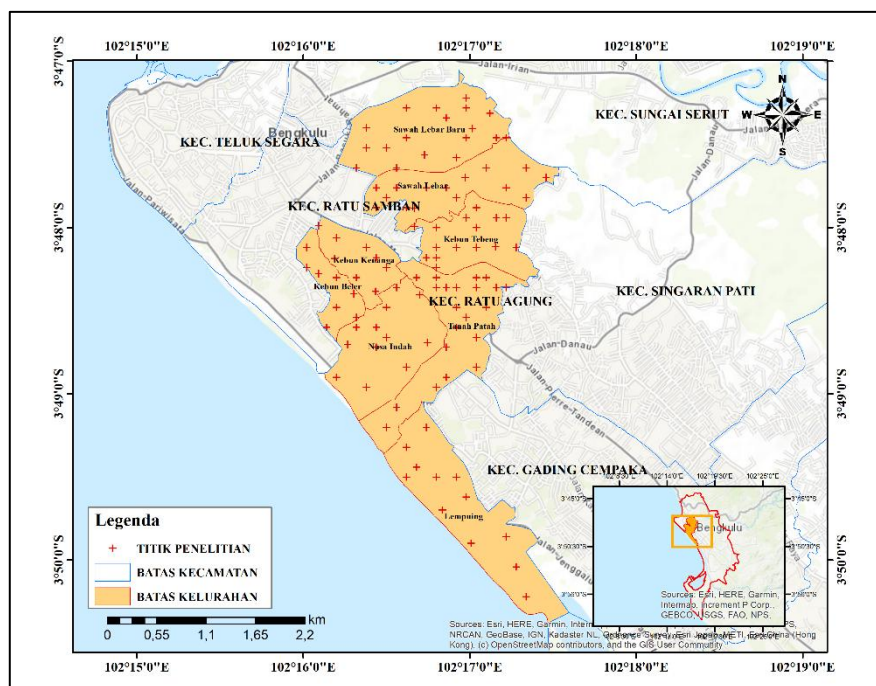
Penelitian ini dilaksanakan untuk mengidentifikasi pengaruh variabilitas spasial tanah terhadap respons seismik di Kecamatan Ratu Agung, Kota Bengkulu, dengan menggunakan input gempa Bengkulu-Mentawai

2007 (M_w 8,6). Berdasarkan alur penelitian pada Gambar 2. Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memperoleh pemahaman mengenai konsep dan metode yang digunakan dalam analisis respons seismik serta penyusunan mikrozonasi. Tahap berikutnya adalah pengumpulan data tanah dari hasil penyelidikan lapangan di wilayah studi, yang kemudian diolah melalui proses koreksi dan penentuan parameter tanah yang diperlukan. Parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai input dalam analisis respons seismik menggunakan pendekatan nonlinier satu dimensi (1D), sehingga dapat menggambarkan perilaku tanah terhadap perambatan gelombang gempa.

Hasil analisis kemudian digunakan untuk memperoleh parameter respons situs, seperti *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan percepatan spektral (SA), yang selanjutnya dievaluasi untuk memastikan konsistensi dan keandalan data. Apabila hasil yang diperoleh belum konsisten, maka dilakukan peninjauan kembali pada tahapan sebelumnya. Setelah hasil analisis dinilai konsisten, dilakukan penyusunan peta mikrozonasi berdasarkan distribusi nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan percepatan spektral (SA).

Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan 112 profil tanah yang diperoleh dari model geologi 3D Kota Bengkulu yang dikembangkan oleh Fikri dkk. (2025), seperti yang terlihat pada Gambar 3. Model tersebut disusun berdasarkan 216 titik investigasi geoteknik yang tersebar di seluruh wilayah Kota Bengkulu dan menyediakan informasi stratigrafi bawah permukaan beserta parameter geoteknik, seperti jenis lapisan tanah, ketebalan lapisan (z), berat volume tanah (γ), dan indeks plastisitas (PI). Dalam penelitian ini, model geologi 3D digunakan sebagai dasar untuk memperoleh profil tanah pada lokasi-lokasi analisis di Kecamatan Ratu Agung, sedangkan proses pengembangan model mengikuti prosedur yang dijelaskan oleh Fikri dkk. (2025). Sebanyak 112 profil tanah dipilih karena memberikan cakupan spasial yang memadai untuk merepresentasikan variasi kondisi bawah permukaan di seluruh wilayah Kecamatan Ratu Agung. Setiap profil merepresentasikan karakteristik geologi lokal pada titik analisis sehingga variasi respons seismik akibat perubahan kondisi tanah dapat dikaji secara lebih rinci pada skala kecamatan. Selanjutnya, parameter geoteknik tersebut digunakan untuk menentukan parameter dinamik tanah, yaitu kecepatan gelombang geser (V_s) dan modulus geser (G), sebagai data masukan dalam analisis respons situs satu dimensi.



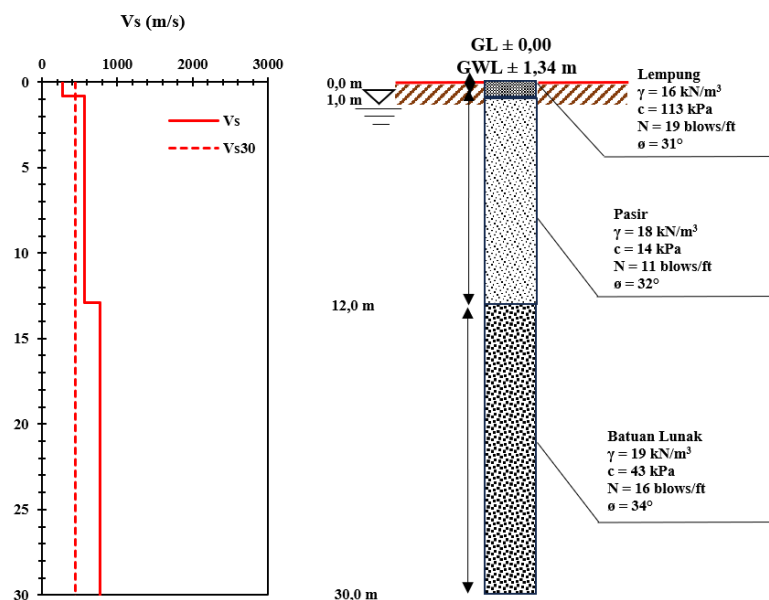
Gambar 3. Lokasi Penelitian

Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Teknik pengumpulan data dilaksanakan dengan pengumpulan data sekunder dari berbagai laporan penyelidikan tanah terdahulu di wilayah Kota Bengkulu. Seluruh data tersebut selanjutnya diintegrasikan dan dimodelkan ke dalam model geologi tiga dimensi (3D) yang dikembangkan oleh Fikri dkk. (2025), dengan menggunakan metode interpolasi geostatistik kriging untuk menghasilkan model geologi 3D yang representatif. Metode interpolasi kriging mengestimasi nilai parameter dengan pendekatan proses Gaussian, yang didasarkan pada struktur kovarians atau variogram yang telah ditetapkan sebelumnya. Keunggulan metode kriging terletak pada kemampuannya menghasilkan prediksi linier yang tidak bias untuk nilai-nilai antara (*intermediate values*), sehingga hasil interpolasinya menjadi lebih halus. Kriging sangat populer untuk data spasial karena mempertimbangkan autokorelasi spasial dan biasanya menghasilkan prediksi paling akurat, terutama untuk data di bidang geologi (Boumpoulis dkk., 2023; Sekulić dkk., 2020).

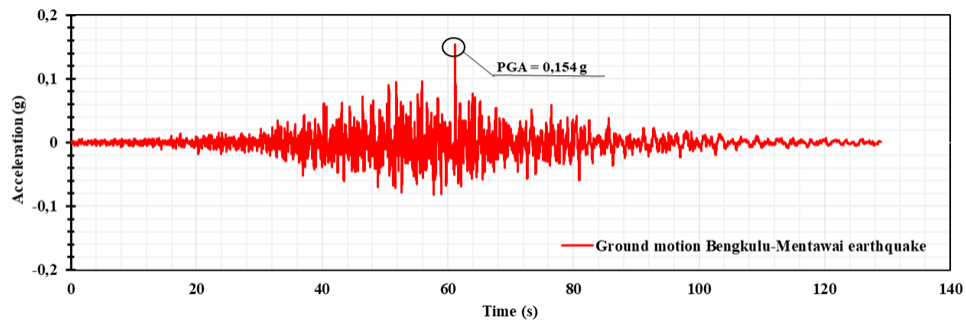
Penelitian ini menggunakan metode *Ordinary Kriging* pada modul *Spatial Analyst* ArcMap dengan model semivariogram Gaussian. Proses interpolasi menerapkan *variable search radius*, sedangkan parameter semivariogram, yaitu *major range*, *partial sill*, dan *nugget*, ditentukan secara otomatis oleh perangkat lunak berdasarkan karakteristik spasial data.

Parameter geoteknik yang diperoleh dari model geologi 3D dapat digunakan untuk menentukan parameter dinamik, seperti modulus geser (G) dan kecepatan gelombang geser (V_s). Untuk mengamati respons tanah permukaan di Kota Bengkulu, analisis 1D *Site Ground Response Analysis* (SGRA) dilakukan menggunakan metode analisis respons tanah nonlinear yang dikembangkan oleh Hashash (2016). Input gerakan tanah yang digunakan adalah rekaman percepatan gempa Bengkulu-Mentawai 12 September 2007 (M_w 8,6). Rekaman ini dipilih karena berasal dari salah satu gempa terbesar yang pernah memengaruhi Kota Bengkulu dalam tiga dekade terakhir serta mengakibatkan kerusakan yang signifikan pada bangunan dan infrastruktur. Rekaman gempa tersebut disajikan pada Gambar 5 dalam bentuk riwayat waktu percepatan (*accelerogram*).



Gambar 4. Contoh profil tanah berdasarkan model geologi tiga dimensi (3D)

Gambar 4 menyajikan salah satu contoh profil tanah yang digunakan dalam analisis respons situs. Profil tersebut memperlihatkan susunan lapisan tanah, distribusi kecepatan gelombang geser (V_s), serta nilai V_{s30} pada titik tersebut sebagai contoh karakteristik bawah permukaan hasil pemodelan geologi 3D. Profil yang ditampilkan dipilih karena memiliki nilai V_{s30} tertinggi di wilayah penelitian, sehingga merepresentasikan kondisi bawah permukaan dengan kekakuan tanah terbesar di antara seluruh profil yang dianalisis.



Gambar 5. Rekaman data riwayat waktu kejadian gempa Bengkulu-Mentawai 2007

Pemodelan perilaku nonlinier tanah menggunakan kurva modulus reduksi (G/G_{max}) dan kurva rasio redaman (ξ) yang bergantung pada jenis tanah, yaitu kurva dari Seed dan Idriss (1970) untuk tanah berpasir, serta kurva dari Vucetic dan Dobry (1991) untuk tanah berlempung dengan mempertimbangkan nilai indeks plastisitas (PI), sementara batuan dasar dimodelkan sebagai *elastic half-space* dengan rasio redaman 5% sebagai kondisi batas (*boundary condition*) pada analisis respons situs. Pendekatan ini digunakan untuk meminimalkan refleksi gelombang pada batas bawah model sehingga respons seismik yang dihitung terutama dipengaruhi oleh karakteristik lapisan tanah di atasnya. Klasifikasi jenis situs mengacu pada pedoman NEHRP (2020) yang menggunakan nilai kecepatan gelombang geser rata-rata pada 30 meter lapisan teratas (V_{s30}). Nilai V_{s30} dihitung menggunakan persamaan (1).

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (1)$$

Dengan:

d_i = ketebalan tiap lapisan (m),

V_{si} = kecepatan gelombang geser tiap lapisan (m/s),

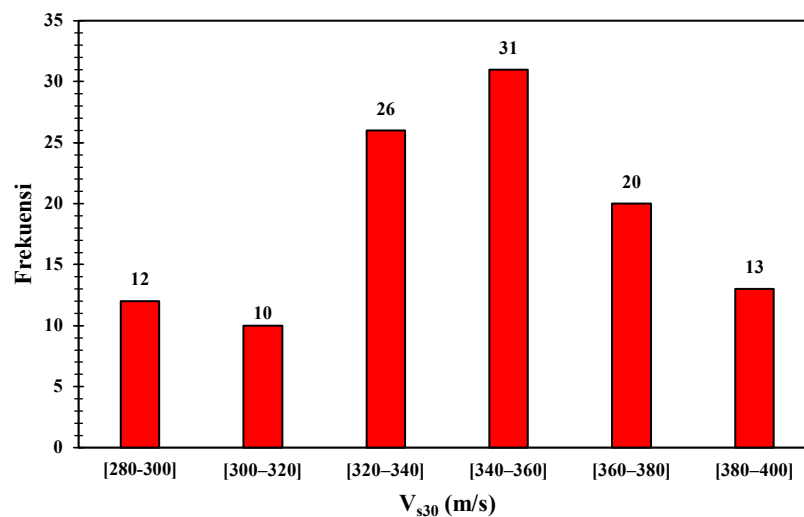
n = jumlah lapisan hingga kedalaman 30 m.

Perhitungan V_{s30} dilakukan pada seluruh 112 titik sampel dengan memanfaatkan data profil tanah yang telah diekstrak dari model geologi 3D. Hasil perhitungan ini kemudian digunakan untuk mengklasifikasikan setiap titik ke dalam kelas situs sesuai rentang nilai yang ditetapkan oleh NEHRP (2020). Klasifikasi situs berdasarkan rentang nilai V_{s30} disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi kelas situs berdasarkan NEHRP (2020)

Kelas Situs	Deskripsi	Rata-Rata V_{s30} (m/s)
A	Batuan keras	$V_{s30} > 1500$
B	Batuan	$760 \leq V_{s30} \leq 1500$
C	Tanah sangat padat dan batuan lunak	$360 \leq V_{s30} \leq 760$
D	Tanah kaku ($15 \leq N \leq 50$ atau $\text{kPa} \leq s_u \leq 100 \text{ kPa}$)	$180 \leq V_{s30} \leq 360$
E	Tanah atau profil tanah yang mengandung lapisan lempung lunak dengan ketebalan lebih dari 3 m, yang memiliki $PI > 20$, $w \geq 40\%$, dan $s_u < 25 \text{ kPa}$	$V_{s30} \leq 180$
F	Tanah dengan kondisi khusus yang memerlukan evaluasi respons situs secara spesifik	

N = SPT (blows/ft), s_u = kuat geser tak terdrainase, PI = indeks plastisitas, w = kadar air



Gambar 6. Histogram sebaran data V_{s30}

Pengaruh variabilitas spasial tanah terhadap respons seismik di Kecamatan Ratu Agung ketika gempa Bengkulu-Mentawai yang terjadi pada 2007 dievaluasi melalui analisis statistik untuk titik acak dan analisis respons situs 1D digunakan dalam studi ini. Parameter utama yang ditinjau dalam studi ini adalah Faktor Amplifikasi (AF), dan percepatan spektral (SA) untuk Periode 0.2 s dan 1 s.

$$AF = \frac{PGA_{surface}}{PGA_{input}} \quad (2)$$

Di mana $PGA_{surface}$ adalah PGA yang didapatkan dari analisis respons situs dan PGA_{input} adalah maksimum PGA yang dimasukkan ke dalam analisis respons situs. Selain faktor amplifikasi terhadap PGA, penelitian ini juga menghitung faktor amplifikasi spektral (*Spectral Amplification Factor*) untuk periode pendek (0,2 s) dan periode panjang (1 s).

Faktor amplifikasi spektral didefinisikan sebagai rasio antara nilai percepatan spektral (SA) di permukaan tanah terhadap nilai SA pada batuan dasar (*input*) pada periode yang sama, seperti ditunjukkan pada persamaan (3).

$$SAMP_T = \frac{SA_{T_{surface}}}{SA_{T_{input}}} \quad (3)$$

Di mana $SAMP_T$ adalah amplifikasi spektral pada periode yang diamati, dan $SA_{T_{surface}}$ serta $SA_{T_{input}}$ masing-masing adalah SA dari permukaan tanah dan getaran yang dimasukkan pada periode yang diamati.

Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar kontribusi lapisan tanah terhadap penguatan respons spektral struktur pada periode getar pendek (mewakili bangunan rendah hingga sedang) dan periode panjang (mewakili bangunan tinggi atau fleksibel).

Hasil simulasi berupa PGA, SA pada periode 0,2 s dan 1 s, serta faktor amplifikasi dianalisis secara statistik dan dipetakan dalam bentuk mikrozonasi berbasis V_{s30} dan parameter respons permukaan, yang selanjutnya menjadi dasar dalam penyusunan hasil, pembahasan, kesimpulan, dan saran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

V_{s30} , PGA, dan Faktor Amplifikasi (AF)

Sebaran nilai V_{s30} dari 112 titik penelitian disajikan dalam bentuk histogram pada Gambar 6. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa rentang nilai yang paling banyak muncul adalah 340-360 m/s. Hasil analisis statistik menunjukkan nilai median (Q_2) sebesar 345,16 m/s, dengan kuartil pertama (Q_1) 324,62 m/s dan kuartil ketiga (Q_3) 365 m/s. Peta sebaran pada Gambar 7a memperlihatkan nilai V_{s30} di wilayah penelitian

berkisar antara 280 hingga 400 m/s. Rentang ini menunjukkan bahwa kondisi tanah di Kecamatan Ratu Agung termasuk dalam kelas situs D (tanah kaku) hingga kelas situs C (tanah sangat padat dan batuan lunak) menurut kriteria NEHRP (2020). Temuan ini sejalan dengan laporan Mase dkk. (2021) yang menyebutkan bahwa Kota Bengkulu umumnya didominasi oleh kelas situs C dan D. Dari peta sebaran yang sama (Gambar 7a), bagian barat Kecamatan Ratu Agung cenderung didominasi oleh kelas situs C dengan nilai V_{s30} sekitar 360-400 m/s. Sedangkan sebagian besar wilayah lainnya di Kecamatan Ratu Agung didominasi oleh kelas situs D.

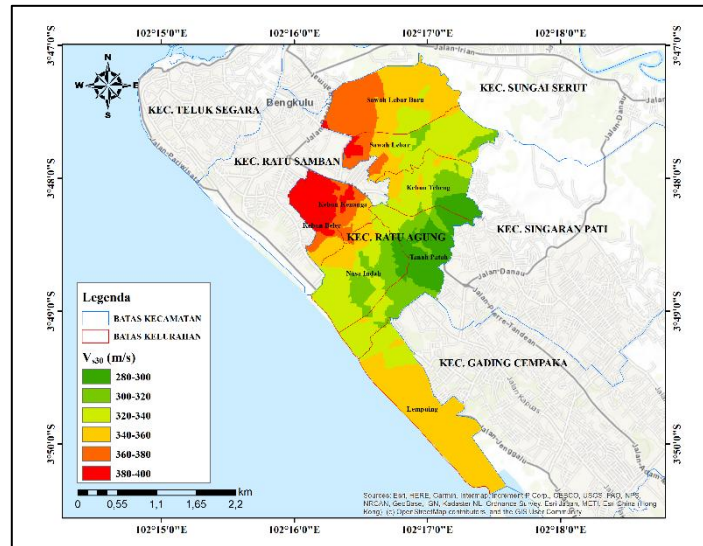
Variasi nilai V_{s30} menunjukkan adanya perubahan karakteristik lapisan tanah di seluruh wilayah penelitian. Lokasi dengan nilai V_{s30} yang lebih rendah mengindikasikan keberadaan tanah yang relatif lebih lunak, sedangkan nilai V_{s30} yang lebih tinggi mencerminkan lapisan tanah yang lebih padat atau lebih kaku. Perbedaan karakteristik tersebut berpengaruh terhadap kemampuan tanah dalam merambatkan gelombang geser dan menjadi dasar klasifikasi kondisi situs berdasarkan nilai V_{s30} (NEHRP, 2020). Pola distribusi ini juga sejalan dengan model geologi 3D Kota Bengkulu yang menunjukkan adanya variasi sifat keteknikan tanah secara spasial (Fikri dkk., 2025).

Hasil PGA yang diperoleh dari analisis respons situs satu dimensi (1D) nonlinier ditunjukkan pada Gambar 7b. Secara umum, simulasi menggunakan rekaman gelombang gempa 2007 Bengkulu-Mentawai sebagai input memperlihatkan bahwa nilai PGA di wilayah penelitian berkisar antara 0,18-0,32g. Sebaran data tersebut memperlihatkan bahwa nilai PGA tertinggi hanya muncul pada beberapa titik tertentu, sementara sebagian besar wilayah didominasi oleh kisaran 0,22-0,26g. Di bagian barat Kecamatan Ratu Agung, beberapa area menunjukkan nilai PGA yang relatif lebih tinggi, yaitu sekitar 0,26-0,28g. Sementara itu, wilayah yang berada di sepanjang pesisir pantai umumnya memiliki nilai PGA berkisar antara 0,22-0,24g. Pada bagian utara hingga tengah Kecamatan Ratu Agung, nilai PGA relatif seragam dan didominasi oleh kisaran 0,24-0,26g. Hasil ini juga menunjukkan adanya fenomena amplifikasi gerakan tanah di permukaan, yaitu peningkatan intensitas pergerakan tanah dibandingkan dengan gerakan input gempa yang digunakan dalam analisis.

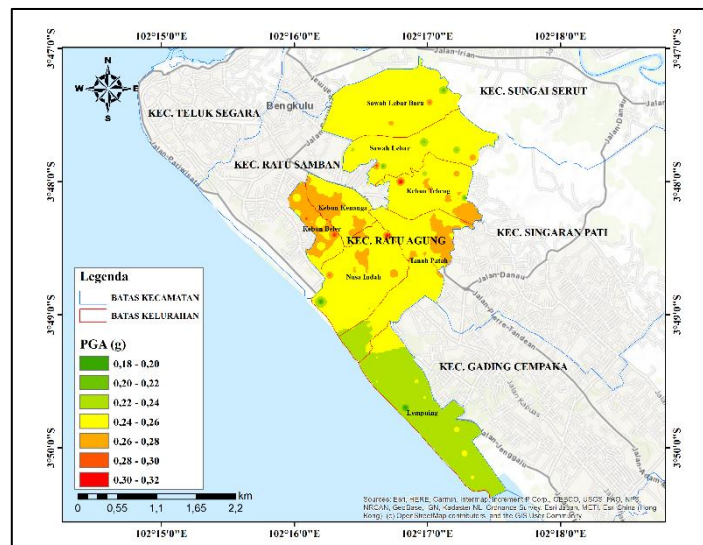
Distribusi PGA permukaan menunjukkan kecenderungan mengikuti variasi kondisi tanah yang direpresentasikan oleh nilai V_{s30} . Wilayah dengan tanah yang relatif lebih lunak cenderung mengalami peningkatan percepatan permukaan dibandingkan lokasi yang memiliki tanah lebih kaku. Hal ini terjadi karena karakteristik dinamis tanah memengaruhi proses propagasi gelombang sehingga respons permukaan menjadi berbeda pada setiap lokasi (Chang dkk., 2021). Hasil tersebut juga konsisten dengan penelitian Sari dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa kondisi tanah di Kota Bengkulu memberikan pengaruh nyata terhadap besarnya respons seismik permukaan.

Interpretasi nilai sebaran untuk faktor amplifikasi di wilayah penelitian ditunjukkan pada Gambar 7c. Berdasarkan hasil analisis, nilai faktor amplifikasi di area penelitian berkisar antara 1,2 hingga 2,1, dengan sebagian besar wilayah Kecamatan Ratu Agung didominasi oleh nilai amplifikasi pada kisaran 1,4-1,7. Beberapa area di bagian barat dan timur kecamatan tersebut menunjukkan nilai amplifikasi yang relatif lebih tinggi, yaitu sekitar 1,7-1,8. Kondisi ini diduga berkaitan dengan karakteristik geologi setempat, di mana lapisan tanah pada wilayah tersebut didominasi oleh formasi aluvium teras (Mase, 2020). Fenomena ini menunjukkan adanya peningkatan gerakan tanah di permukaan akibat proses propagasi gelombang seismik dari lapisan tanah yang lebih dalam menuju permukaan. Hal tersebut sejalan dengan temuan Mase (2022) yang menyatakan bahwa kondisi tanah kaku hingga tanah sangat padat berpotensi menghasilkan amplifikasi gempa yang cukup signifikan.

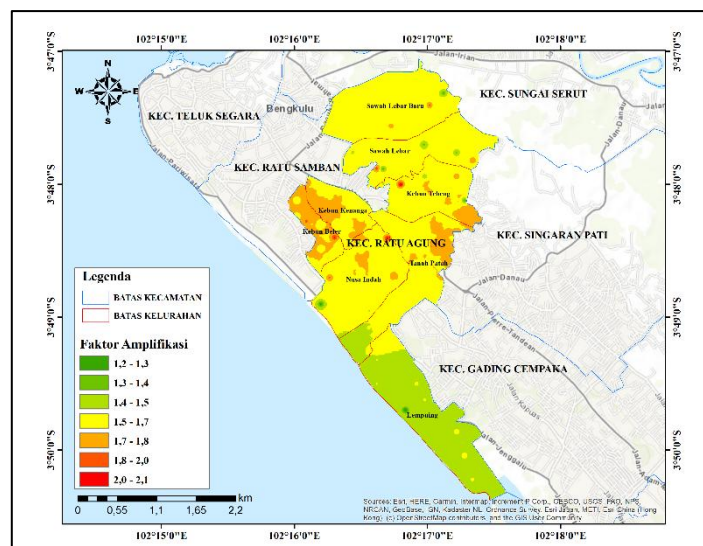
Pola distribusi faktor amplifikasi memperlihatkan kecenderungan yang berhubungan dengan perubahan karakteristik lapisan tanah. Lokasi yang didominasi tanah dengan kekakuan lebih rendah menghasilkan faktor amplifikasi yang lebih besar dibandingkan wilayah yang memiliki tanah lebih padat. Variasi tersebut menunjukkan bahwa perubahan sifat dinamis tanah mengontrol besarnya penguatan gelombang selama perambatan menuju permukaan (Hashash, 2016). Temuan ini sejalan dengan Likitlersuang dkk. (2020) yang menunjukkan bahwa variabilitas spasial kondisi tanah merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi variasi respons seismik pada suatu wilayah.



(a)



(b)



(c)

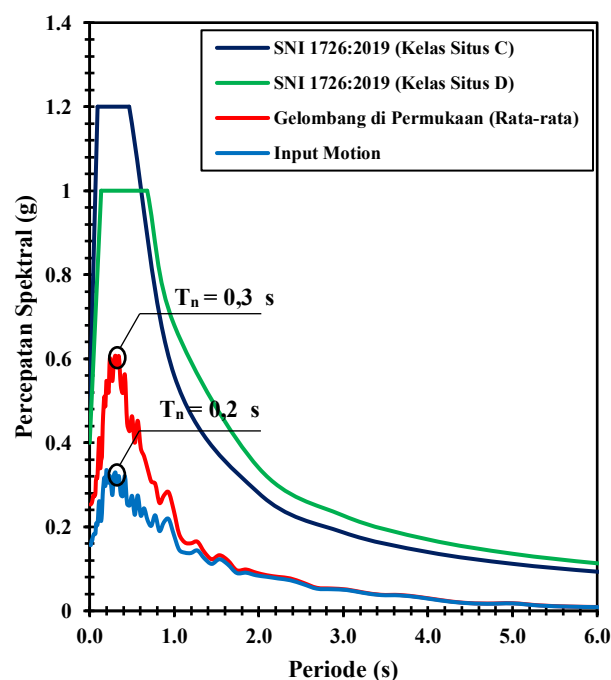
Gambar 7. Peta sebaran (a) V_{s30} , (b) *Peak Ground Acceleration*, (c) Faktor Amplifikasi

SA dan Amplifikasi

Interpretasi percepatan spektral (SA) akibat gempa 2007 Bengkulu-Mentawai di wilayah penelitian ditunjukkan pada Gambar 8. Hasil analisis menunjukkan bahwa puncak nilai SA di permukaan tanah terjadi pada periode sekitar 0,3 s ($T_n = 0,3$ s). Kondisi ini menunjukkan bahwa bangunan bertingkat rendah hingga menengah, terutama yang kurang dari enam lantai, cenderung mengalami respons yang lebih besar dibandingkan dengan bangunan bertingkat tinggi. Sementara itu, puncak SA dari gerakan input tercatat pada periode sekitar 0,2 s, yang menunjukkan bahwa rekaman gelombang gempa yang digunakan didominasi oleh komponen frekuensi tinggi (Likitlersuang dkk., 2020). Selama proses perambatan gelombang seismik dari lapisan bawah menuju permukaan, variasi kondisi tanah lokal dapat memperkuat gerakan tanah, sehingga periode puncak SA di permukaan mengalami pergeseran dibandingkan dengan periode puncak dari gerakan input.

Variasi percepatan spektral pada seluruh lokasi penelitian menunjukkan bahwa respons dinamis tanah dipengaruhi oleh karakteristik lapisan bawah permukaan. Lokasi dengan kondisi tanah yang lebih lunak cenderung menghasilkan percepatan spektral yang lebih tinggi dibandingkan lokasi dengan tanah yang lebih kaku. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi tanah berpengaruh terhadap respons spektral permukaan dan mendukung penggunaan analisis respons situs dalam evaluasi bahaya gempa (Hashash, 2016). Selain itu, kecenderungan tersebut masih menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik spektrum bahaya gempa yang digunakan dalam SNI 1726:2019 serta penelitian Mase dan Keawsawasvong (2022) pada skala Kota Bengkulu.

Gambar 8 juga menyajikan kurva percepatan spektral desain berdasarkan SNI 1726:2019 untuk kelas situs C dan D. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa nilai percepatan spektral hasil analisis akibat gempa Bengkulu-Mentawai 2007 masih berada di bawah kurva percepatan spektral desain, sehingga secara umum percepatan spektral desain dalam SNI 1726:2019 masih mampu menahan tingkat guncangan yang dihasilkan oleh gempa Bengkulu-Mentawai 2007.

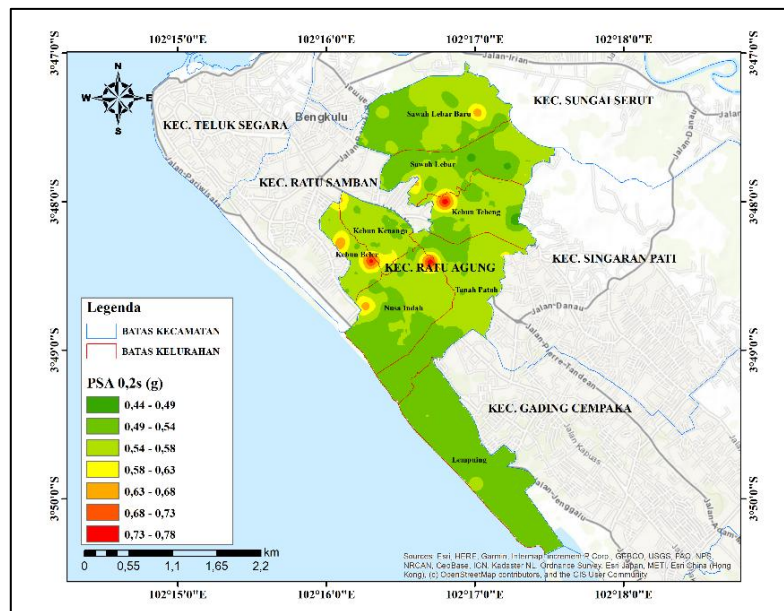


Gambar 8. Perbandingan Percepatan Spektral (SA) ketika gempa Bengkulu-Mentawai 2007

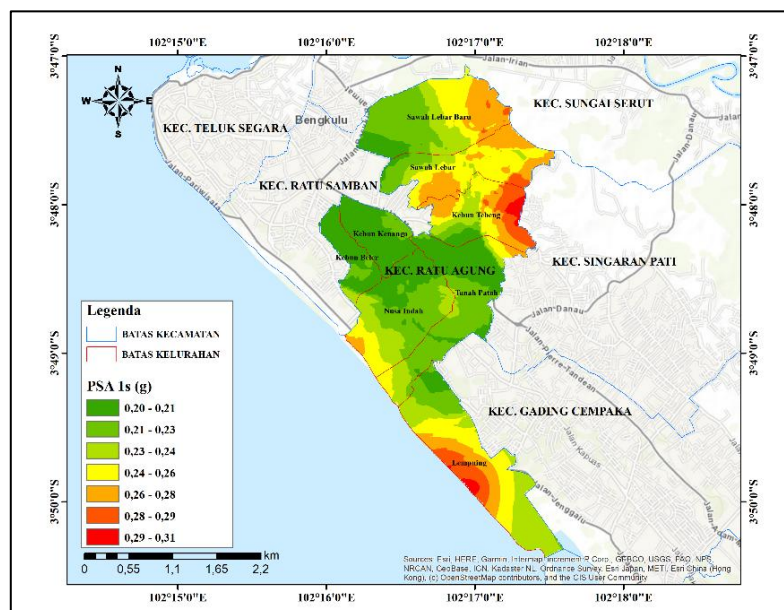
Berdasarkan nilai percepatan spektral (SA) di permukaan tanah, peta sebaran SA untuk periode 0,2 s dan 1 s ditunjukkan pada Gambar 9. Pada periode 0,2 s (Gambar 9a), nilai SA di wilayah penelitian berkisar antara 0,44 hingga 0,78g. Wilayah yang berada di sepanjang pesisir pantai umumnya menunjukkan nilai SA pada kisaran 0,49-0,54g. Sementara itu, hanya sebagian kecil area yang memiliki nilai percepatan spektral yang

lebih tinggi, yaitu sekitar 0,73-0,78g. Secara umum, distribusi SA pada periode 0,2 s didominasi oleh kisaran 0,49-0,58 g di sebagian besar wilayah penelitian.

Pada periode 1 s (Gambar 9b), hasil analisis menggunakan rekaman gelombang gempa Bengkulu-Mentawai 2007 menunjukkan bahwa nilai SA berada antara 0,20 hingga 0,31g. Beberapa titik yang berada di dekat wilayah pesisir pantai serta di bagian utara Kecamatan Ratu Agung menunjukkan nilai SA yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan area lainnya, dengan kisaran sekitar 0,24-0,31g. Sebaliknya, sebagian besar wilayah lainnya menunjukkan nilai SA yang relatif lebih rendah dalam rentang tersebut, sehingga sebaran percepatan spektral pada periode 1 s cenderung lebih rendah dibandingkan dengan periode yang lebih pendek.



(a)

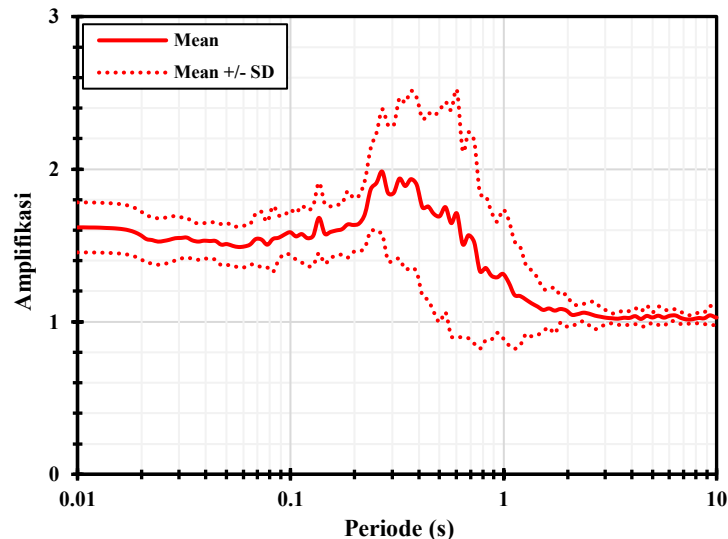


(b)

Gambar 9. Peta Sebaran Percepatan Spektral (SA) untuk periode (a) 0,2 s dan (b) 1 s ketika gempa Bengkulu-Mentawai 2007

Nilai SA yang diperoleh dari analisis respons situs 1D selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai amplifikasi percepatan spektral seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Hasil analisis menunjukkan bahwa

amplifikasi percepatan spektral meningkat pada periode menengah dan mencapai nilai puncak pada sekitar ($T = 0,3$ s), dengan kisaran amplifikasi antara 1,4 hingga 2,3. Kondisi ini mengindikasikan adanya penguatan gelombang seismik oleh lapisan tanah lokal pada periode tersebut (Han dkk., 2024). Setelah melewati periode menengah, nilai amplifikasi cenderung menurun secara bertahap. Pada periode yang lebih panjang ($T \geq 1$ s), nilai amplifikasi spektral relatif stabil dan berada di sekitar 1,0 hingga 1,1, yang menunjukkan bahwa pengaruh lapisan tanah terhadap penguatan gelombang gempa menjadi semakin kecil.



Gambar 10. Amplifikasi Spektral di permukaan ketika gempa Bengkulu-Mentawai 2007

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Penelitian ini menunjukkan bahwa variabilitas spasial tanah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap variasi respons seismik permukaan di Kecamatan Ratu Agung, Kota Bengkulu. Perbedaan karakteristik lapisan tanah yang direpresentasikan oleh variasi nilai V_{s30} menyebabkan perbedaan nilai PGA, faktor amplifikasi, dan percepatan spektral di setiap lokasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi tanah lokal merupakan faktor yang berperan penting dalam menentukan tingkat bahaya seismik pada skala kecamatan.

Kondisi tanah di Kecamatan Ratu Agung, berdasarkan nilai V_{s30} dari 112 titik penelitian, didominasi oleh rentang 280-400 m/s dengan median 345,16 m/s. Mengacu pada klasifikasi NEHRP, hal ini termasuk kelas situs C (tanah sangat padat dan batuan lunak) hingga D (tanah kaku), yang berarti tanah lokal cukup berpengaruh dalam memodifikasi pergerakan gelombang seismik dari batuan dasar ke lapisan permukaan.

Berdasarkan analisis respons situs 1D nonlinier menggunakan rekaman gempa Bengkulu-Mentawai 2007, diperoleh PGA permukaan berkisar antara 0,18- 0,32g dengan faktor amplifikasi berkisar antara 1,2-2,1 yang mana sebagian besar wilayahnya didominasi oleh nilai faktor amplifikasi antara 1,4-1,7. Nilai ini menunjukkan adanya variasi respons seismik antarlokasi akibat perbedaan lapisan tanah. Sementara itu, percepatan spektral (SA) pada periode 0,2 s berkisar 0,44-0,78g, dan pada periode 1 s berkisar 0,20-0,31g. Puncak amplifikasi terjadi pada periode 0,3 s, yang mengindikasikan bahwa bangunan bertingkat rendah hingga menengah menunjukkan respons yang lebih besar terhadap guncangan gempa.

Peta mikrozonasi yang dihasilkan memperlihatkan variasi spasial parameter kegempaan seperti PGA, faktor amplifikasi, dan SA. Variasi ini mencerminkan heterogenitas kondisi tanah di Kecamatan Ratu Agung, sehingga peta tersebut dapat digunakan sebagai dasar teknis dalam perencanaan bangunan dan mitigasi risiko gempa.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena menggunakan satu rekaman gempa Bengkulu-Mentawai 2007 sebagai *input motion* dan menerapkan analisis respons situs satu dimensi, sehingga pengaruh

variasi karakteristik sumber gempa maupun efek propagasi gelombang dua atau tiga dimensi belum dievaluasi. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan beberapa *input motion* yang mewakili karakteristik sumber gempa yang berbeda serta mengembangkan analisis respons situs dengan pendekatan yang lebih komprehensif untuk meningkatkan keandalan hasil mikrozonasi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Geoteknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Bengkulu atas dukungan fasilitas dan bantuan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada rekan-rekan di Laboratorium Geoteknik yang telah memberikan dukungan selama proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Boumpoulis, V., Michalopoulou, M. dan Depountis, N. (2023), "Comparison between different spatial interpolation methods for the development of sediment distribution maps in coastal areas", *Earth Science Informatics*, Vol.16, No.3, hal. 2069-2087. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01017-4>.
- Chang, Y.H., Tsai, C.C., Huang, C.C. dan Park, D. (2021), "Effect of intra-layer Vs fluctuation on linear seismic site response", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.25, No.10, hal. 3701-3713. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-2047-9>.
- Farid, M., Mase, L.Z. dan Fathani, T.F. (2024), "The investigation of subsurface beds using microtremor and geo-electric methods in a liquefied area in Bengkulu city after the Bengkulu-Mentawai earthquake", *Indonesian Journal of Geoscience*, Vol.11, No.3, hal. 377-390. <https://doi.org/10.17014/ijog.11.3.377-390>.
- FEMA P-2082-2 (2020), "NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures", *Building Seismic Safety Council*, Vol.II, hal. 1-388.
- Fikri, M.H., Kamal, T.M., Hanipa, R.A., Mase, L.Z., Misliniyati, R., Supriani, F. dan Refrizon (2025), "Geospatial modelling of soil engineering properties in Bengkulu City: A three-dimensional approach", *Transportation Infrastructure Geotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00517-0>.
- Han, Y., Zhao, Y.G. dan Zhang, H. (2024), "Theoretical relationship between the horizontal-to-vertical response and Fourier spectral ratios of ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.187, hal. 109010. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109010>.
- Hashash, Y.M. (2016), "Nonlinear and equivalent linear seismic site response of one-dimensional soil columns user manual", *Deepsoil Software User Manual*, hal. 1-137.
- Likitlersuang, S., Plengsiri, P., Mase, L.Z. dan Tanapalungkorn, W. (2020), "Influence of spatial variability of ground on seismic response analysis: A case study of Bangkok subsoils", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol.79, No.1, hal. 39-51. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01560-9>.
- Mase, L.Z. (2020), "Seismic hazard vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, based on deterministic seismic hazard analysis", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.38, No.5, hal. 5433-5455. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01375-6>.
- Mase, L.Z. (2022), "Local seismic hazard map based on the response spectra of stiff and very dense soils in Bengkulu City, Indonesia", *Geodesy and Geodynamics*, Vol.13, No.6, hal. 573-584. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.05.003>.
- Mase, L.Z. (2024), "A case study of liquefaction potential verification during a strong earthquake at Lempuing Subdistrict, Bengkulu City, Indonesia", *Transportation Infrastructure Geotechnology*, Vol.11, No.4, hal. 1547-1572. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00335-w>.
- Mase, L.Z. dan Keawsawavong, S. (2022), "Seismic hazard maps of Bengkulu City, Indonesia, considering probabilistic spectral response for medium and stiff soils", *The Open Civil Engineering Journal*, Vol.16, No.1, hal. 1-15. <https://doi.org/10.2174/18741495-v16-e221021-2022-49>.
- Mase, L.Z., Sugianto, N. dan Refrizon (2021), "Seismic hazard microzonation of Bengkulu City, Indonesia", *Geoenvironmental Disasters*, Vol.8, No.1. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00178-y>.

- Sari, E.Y., Mase, L.Z., Hardiansyah, Misliniyati, R., & Amri, K. (2024), "Implementasi metode linier ekuivalen dan nonlinier dalam memprediksi respons seismik area Kampung Melayu, Kota Bengkulu", *Jurnal Geosaintek*, Vol.10, No.2, hal. 159-172. <http://dx.doi.org/10.12962/j25023659.v10i2.1723>.
- Sekulić, A., Kilibarda, M., Heuvelink, G.B.M., Nikolić, M. dan Bajat, B. (2020), "Random forest spatial interpolation", *Remote Sensing*, Vol.12, No.10, hal. 1-29. <https://doi.org/10.3390/rs12101687>.
- SNI 1726:2019 (2019), "Persyaratan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung", *Badan Standardisasi Nasional*, hal. 1-254.