

Mikrozonasi Resistensi Tanah Berdasarkan Variasi Kecepatan Gelombang Geser di Kawasan Pesisir Kota Bengkulu

Sulastri Febiana^(1,a), Lindung Zalbuin Mase^(1,b*), Fepy Supriani^(1,c), Rena Misliniyati^(1,d), dan Khairul Amri^(1,e)

⁽¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia, 38371

Email : ^(a)g1b021007.sulastriefebiana@mhs.unib.ac.id, ^(b*)lmase@unib.ac.id, ^(c)fsupriani@unib.ac.id,

^(d)rena_misliniyati@unib.ac.id, ^(e)kamri@unib.ac.id

Diterima (03 Maret 2025), Direvisi (02 Mei 2025)

Abstract. The coastal area of Bengkulu City is strategically located at the confluence of the Indo-Australian and Eurasian plates, making it an area with a high risk of earthquake activity. This research aims to create a microzonation map as a visual representation of the results of soil resistance analysis based on the value of shear wave velocity (V_s). The methodology includes secondary data collection in soil layer data and shear wave velocity values, calculation of V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , and V_{s50} values, and classification of soil types. The process resulted in soil layer profiles, shear wave velocity variation profiles, and V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} distribution maps, soil site class distribution maps, and Ground Amplification Factor (GAF) distribution maps. The results show that the coastal area of Bengkulu City has relatively low soil resistance due to the dominance of soil site classes, namely C (hard soil, very dense, and soft rock) and D (medium soil). The results of soil resistance microzonation can be concretely integrated into spatial policy by establishing earthquake-prone zones that are used as a reference in determining the type of land use, building height, and construction technical standards. This research is not just an academic exercise, but a practical tool for disaster mitigation efforts and a basis for spatial planning, regional development, and safer infrastructure development in the coastal areas of Bengkulu City. In addition, further studies are needed to analyze building conditions in more depth to identify specific risks to existing infrastructure so that appropriate structural strengthening strategies can be designed.

Keywords: Microzonation, Soil Resistance, Amplification, Shear Wave Velocity (V_s), Site Class

Abstrak. Kawasan pesisir Kota Bengkulu berada di lokasi strategis, tepatnya di pertemuan lempeng Indo-Australia dan Eurasia, sehingga menjadi daerah dengan risiko tinggi terhadap aktivitas gempa bumi. Penelitian ini bertujuan untuk membuat peta mikrozonasi sebagai representasi visual hasil analisis resistensi tanah berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser (V_s). Metodologi yang digunakan meliputi pengumpulan data sekunder berupa data perlapisan tanah dan nilai kecepatan gelombang geser, perhitungan nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , dan V_{s50} , serta klasifikasi jenis tanah. Proses tersebut menghasilkan profil perlapisan tanah dan profil variasi kecepatan gelombang geser, peta sebaran V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , peta sebaran Kelas Situs tanah, dan peta sebaran *Ground Amplification Factor* (GAF). Hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah pesisir Kota Bengkulu memiliki resistensi tanah yang relatif sedang dikarenakan dominasi Kelas Situs tanah yaitu C (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak) dan D (tanah sedang). Hasil mikrozonasi resistensi tanah dapat secara konkret diintegrasikan ke dalam perancangan tata ruang melalui penetapan zona rawan gempa yang dijadikan acuan dalam penentuan jenis tata guna lahan, desain bangunan, dan standar teknis konstruksi. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam upaya mitigasi bencana serta menjadi dasar perencanaan tata ruang, pengembangan wilayah, dan pembangunan infrastruktur yang lebih aman di kawasan pesisir Kota Bengkulu. Selain itu, diperlukan studi lanjutan untuk menganalisis kondisi bangunan secara lebih mendalam guna mengidentifikasi risiko spesifik terhadap prasarana yang ada, sehingga dapat dirancang strategi penguatan struktur yang tepat.

Kata kunci: Mikrozonasi, Resistensi Tanah, Amplifikasi, Kecepatan Gelombang Geser (V_s), Kelas Situs

PENDAHULUAN

Kota Bengkulu merupakan ibu kota Provinsi Bengkulu, terletak di sisi barat Pulau Sumatera, dan berbatasan langsung dengan Samudera Hindia. Wilayah Bengkulu terletak tepat di atas zona subduksi antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia, dengan pergerakan lempeng yang cukup signifikan, yaitu antara 4 hingga 6 cm per tahun, yang dipengaruhi oleh kondisi geologisnya [1]. Pergerakan yang dihasilkan oleh kedua lempeng ini dapat mengakibatkan terbentuknya patahan, termasuk dua zona patahan utama yang berada dekat dengan Provinsi Bengkulu, yaitu patahan Sumatera dan Patahan Mentawai yang dikenal sebagai sistem patahan paling berbahaya di Pulau Sumatera, Indonesia [2]. Patahan ini menjadikan kawasan Provinsi Bengkulu sangat rentan terhadap ancaman gempa bumi. Peristiwa gempa bumi yang terjadi di wilayah yang dekat dengan patahan biasanya mengakibatkan kerusakan yang cukup parah [3]. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa lokasi geologis yang berdekatan dengan patahan memiliki risiko tinggi terhadap dampak destruktif dari aktivitas seismik.

Frekuensi bencana alam di Kota Bengkulu terus meningkat setiap tahunnya, terutama gempa bumi [4]. Selain dua gempa besar yang tercatat pada 4 Juni 2000 (magnitudo 7,9 M_w) dan 12 September 2007 (magnitudo 8,6 M_w) [5], Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mencatat bahwa Provinsi Bengkulu secara konsisten mengalami puluhan kejadian gempa bumi setiap tahun, dengan intensitas yang bervariasi. Dalam sepuluh tahun terakhir, wilayah ini juga beberapa kali diguncang gempa bumi berkekuatan menengah hingga besar, diantaranya adalah gempa pada 30 Desember 2018 (magnitudo

5,7 M_w) [6] dan 19 Agustus 2020 (magnitudo 6,9 M_w) [7]. Aktivitas seismik ini telah menyebabkan kerusakan yang serius, termasuk runtuhnya bangunan-bangunan strategis. Sebagian besar bangunan tersebut diperkirakan berdiri di atas area dengan regangan geser tanah yang besar (terutama di sepanjang wilayah pesisir Kota Bengkulu) [4].

Wilayah pesisir Kota Bengkulu merupakan kawasan dengan aktivitas sosial dan ekonomi yang cukup tinggi. Beberapa kecamatan yang berada di wilayah pesisir antara lain Kecamatan Ratu Agung, Ratu Samban, dan Gading Cempaka. Bangunan dan infrastruktur penting seperti Rumah Kediaman Bung Karno saat menjalani pengasingan pada zaman penjajahan Belanda, Universitas Dehasen, Masjid Jamik Bengkulu, Politeknik Kesehatan Kemenkes Bengkulu, dan Rumah Sakit Umum Daerah Dr. M. Yunus berdiri di kecamatan-kecamatan tersebut. Tempat-tempat tersebut merupakan beberapa ikon bersejarah dan berpengaruh di Kota Bengkulu. Keberadaan fasilitas-fasilitas tersebut menjadikan wilayah pesisir Kota Bengkulu memiliki peranan strategis dalam berbagai aspek, termasuk mobilitas, pendidikan, pariwisata, dan perekonomian.

Penelitian sebelumnya telah memberikan gambaran awal tentang dampak gempa bumi terhadap kondisi tanah di Kota Bengkulu. Mase *et al* [8] melakukan penelitian mengenai mikrozonasi bahaya seismik berdasarkan respons tanah dan mengusulkan desain seismik lokal untuk wilayah tersebut. Selanjutnya, Mase [9] meneliti karakteristik gerakan tanah akibat Gempa Bumi Bengkulu-Mentawai dan dampaknya di bagian utara Provinsi Bengkulu, termasuk potensi likuefaksi. Studi-studi tersebut berfokus pada aspek dinamika tanah secara umum dan bahaya

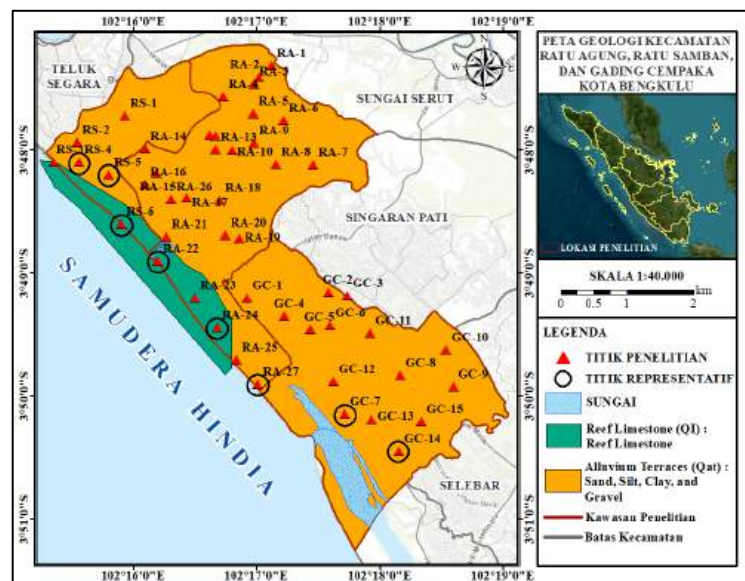
seismik secara makro. Penelitian ini melengkapi studi terdahulu dengan menitikberatkan pada resistensi tanah terhadap guncangan gempa secara spesifik di kawasan pesisir Kota Bengkulu.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis resistensi tanah dan bahaya seismik berdasarkan variasi kecepatan gelombang geser (V_s). Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) memiliki peran penting dalam pemodelan gempa bumi dan analisis risiko seismik. Nilai V_{s10} dan V_{s20} dinilai cukup merepresentasikan kondisi tanah pada skala kecil, seperti perencanaan bangunan ringan atau wilayah dengan lapisan tanah dangkal. Nilai V_{s30} hingga V_{s50} memiliki urgensi tinggi dalam studi seismik berskala besar, khususnya untuk perencanaan dan desain infrastruktur penting seperti jembatan, bendungan, serta fasilitas strategis lainnya. Fokus pada resistensi tanah memungkinkan pemetaan zonasi kerentanan lokal yang lebih detail dan aplikatif untuk kebutuhan perencanaan tata ruang dan perancangan struktur bangunan di kawasan pesisir. Hasil penelitian ini berupa peta sebaran V_{s10} , V_{s20} ,

V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , peta sebaran Kelas Situs, serta peta *Ground Amplification Factor* (GAF). Menurut pendapat Castelli *et al* [10], pemetaan aktivitas seismik di daerah perkotaan dapat memberikan informasi yang akurat mengenai potensi risiko gempa bumi.

Kondisi Geologi dan Lokasi Penelitian

Kota Bengkulu secara keseluruhan terdiri dari berbagai formasi geologi. Formasi Undak Alluvium (Qat) merupakan yang paling dominan, biasanya terletak di daerah pesisir kota dan terdiri dari campuran pasir, lanau, lempung, serta kerikil. Formasi batu gamping terumbu karang (QI) juga ditemukan di sepanjang garis pantai Kota Bengkulu dalam jumlah yang relatif kecil [4]. **Gambar 1** menunjukkan peta kondisi geologi wilayah pesisir sekaligus menggambarkan lokasi penelitian. Penelitian ini dilakukan di 3 Kecamatan, yaitu Kecamatan Ratu Agung (RA), Ratu Samban (RS), dan Gading Cempaka (GC) yang termasuk wilayah pesisir di Kota Bengkulu dengan formasi geologi Qat dan QI.



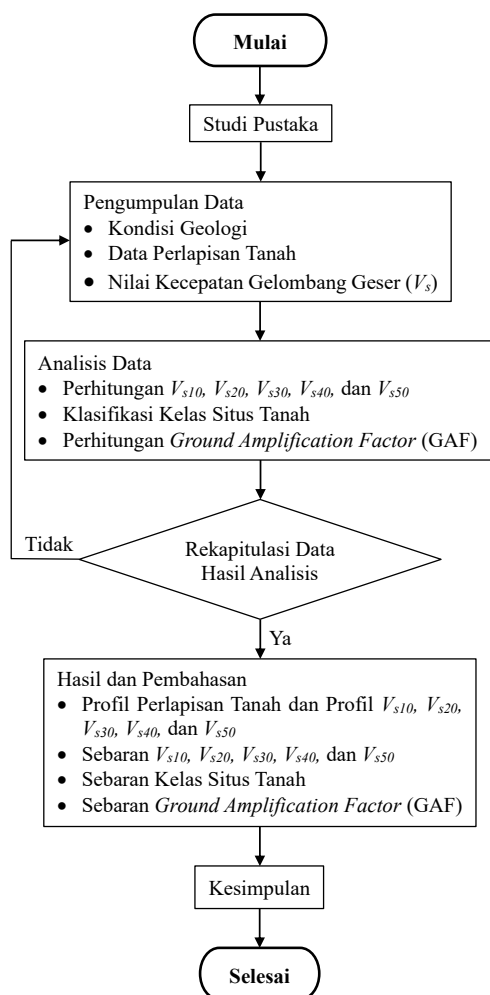
Gambar 1. Peta Kondisi Geologi dan Peta Lokasi Wilayah Pesisir Kota Bengkulu
(Sumber : Modifikasi dari Mase [11])

METODE PENELITIAN

Gambar 2 menyajikan alur penelitian. Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan data mengenai kondisi geologi

wilayah penelitian, data perlapisan tanah, dan nilai kecepatan gelombang geser. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan persamaan teknis untuk memastikan ketepatan hasil perhitungan. Hasil analisis selanjutnya diinterpretasikan dalam bentuk profil perlapisan tanah dan profil V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , serta peta sebaran V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , Kelas Situs, dan *Ground Amplification Factor* (GAF).

Pemetaan dilakukan dengan menggunakan metode interpolasi IDW (*Inverse Distance Weighted*).



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Pengumpulan Data

Pengumpulan data mengenai perlapisan tanah dan nilai gelombang geser berasal dari

data sekunder yang dihasilkan dari investigasi geoteknik. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, data diperoleh dari pengukuran mikrotremor melalui proses inversi di lokasi penelitian yang telah ditentukan. Data perlapisan tanah yang diperoleh mencakup beberapa parameter, seperti ketebalan masing-masing lapisan tanah (h), berat isi tanah (γ), dan kecepatan gelombang geser rata-rata (V_s).

Gambar 1 menunjukkan jumlah titik penelitian yang terdiri dari 48 titik. Dari jumlah tersebut, dilakukan pemilihan titik di lokasi yang lebih dekat dengan pesisir pantai untuk mendukung pemetaan zona yang diperkirakan rentan terhadap bahaya seismik. Titik-titik terpilih yaitu RS-4, RS-5, RS-6, RA-22, RA-24, RA-27, GC-7, dan GC-14. Titik-titik tersebut digunakan sebagai representasi untuk menampilkan profil perlapisan tanah dan profil kecepatan gelombang geser (V_s) pada kedalaman 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, dan 50 m.

Analisis Data

1. Kecepatan Gelombang Geser

Kecepatan gelombang geser (V_s) digunakan untuk menilai kekakuan tanah dan batuan, serta untuk memprediksi respon tanah terhadap gempa [12]. Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) diperlukan untuk menganalisis dan mengevaluasi pengaruh kondisi lokasi terhadap perilaku tanah di atas lapisan batuan dasar, yang menjadi faktor penting dalam memahami potensi dampaknya terhadap respon seismik [13]. Analisis struktur nilai V_s mengacu pada tabel *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP) [14], yang menjelaskan hubungan antara nilai V_s , Kelas Situs, serta perkiraan struktur lapisan batuan (tingkat kekerasan batuan) dan karakteristiknya [15].

Tabel 1. Kategori Kelas Situs dalam ketentuan *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP) menjadi lima kelas

berdasarkan proksi V_{s30} dan amplifikasi yang sesuai (NEHRP, 2003).

Klasifikasi	Deskripsi	V_{s30} (m/s)
A	Batuan Keras	1500 <
B	Batuan Sedang	760–1500
C	Tanah keras, sangat padat, dan Batuan Lunak	360–760
D	Tanah Sedang	180–360
E	Tanah Lunak	<180

Nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , dan V_{s50} digunakan untuk menganalisis dan membandingkan perubahan kecepatan gelombang geser (V_s) seiring dengan bertambahnya kedalaman. Nilai V_s pada kedalaman 10 m hingga 20 m digunakan untuk mengidentifikasi potensi bahaya geoteknik, seperti likuefaksi. Likuefaksi adalah kondisi ketika tanah kehilangan kekuatan dan stabilitas akibat tekanan, yang umumnya terjadi pada kedalaman maksimum 20 meter. Nilai V_{s30} berfungsi untuk menentukan Kelas Situs, yang menggambarkan karakteristik tanah di suatu lokasi dan potensi bahaya yang mungkin terjadi. Informasi ini sangat berguna untuk menilai risiko dan merancang langkah mitigasi yang tepat. Nilai V_s pada kedalaman 40 m hingga 50 m digunakan dalam desain bangunan tinggi. Analisis pada rentang ini membantu memastikan bahwa fondasi bangunan dirancang dengan memper-timbangkan sifat tanah, beban struktur, tekanan tanah, dan kemungkinan pergerakan tanah sehingga bangunan dapat berdiri dengan aman dan stabil. Pada **Tabel 1** dapat dilihat bahwa nilai V_{s30} memiliki peranan penting terhadap klasifikasi Kelas Situs tanah dan faktor amplifikasi. Nilai V_{s30} dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi Kelas Situs dengan mengklasifikasikan jenis tanah dan lapisan geologi. Nilai V_{s30} juga digunakan untuk mendapatkan nilai faktor amplifikasi yang nantinya dapat digunakan dalam mikrozonasi. Perhitungan V_s rata-rata dapat dihitung menggunakan persamaan berikut berdasarkan *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP) [16]:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i}{v_{si}} \right)} \quad (1)$$

dengan : d_i = ketebalan lapisan (m), v_{si} = kecepatan gelombang geser (m/s), N = jumlah lapisan.

2. Klasifikasi Kelas Situs Tanah

Klasifikasi situs atau jenis tanah dapat dilakukan dengan menggunakan data V_{s30} , yang kemudian dibandingkan dengan kategori yang tercantum dalam tabel NEHRP (**Tabel 1**). Berdasarkan tabel tersebut, jenis tanah dikelompokkan ke dalam beberapa kategori. Tanah dengan nilai $V_s < 180$ m/s termasuk dalam kategori tanah lunak (E), tanah dengan nilai V_s antara 180-360 m/s dikategorikan sebagai tanah sedang (D), tanah dengan nilai V_s antara 360-760 m/s digolongkan ke dalam situs tanah keras (C). Selanjutnya, batuan dengan nilai V_s antara 760-1500 m/s termasuk dalam kategori batuan sedang (B), dan batuan dengan nilai $V_s > 1500$ m/s digolongkan sebagai batuan keras (A).

3. Ground Amplification Factor (GAF)

GAF memberikan ilustrasi mengenai tingkat perubahan atau peningkatan percepatan gerakan tanah seiring dengan perambatannya dari lapisan batuan dasar hingga mencapai permukaan. Gelombang tanah akan mengalami amplifikasi saat berpindah dari satu medium ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium awal yang dilaluinya. Semakin signifikan perbedaan antara kedua medium tersebut, semakin besar pula amplifikasi yang dialami oleh gelombang [17]. Nilai GAF sangat berkaitan dengan perbandingan kontras impedansi antara lapisan permukaan dan lapisan di bawahnya [18]. Nilai GAF juga dapat dipengaruhi oleh nilai kecepatan gelombang geser (V_s), dimana semakin tinggi nilai kecepatan gelombang geser yang dimiliki suatu material, maka semakin kecil

nilai amplifikasi yang dihasilkan [19]. Persamaan yang digunakan untuk menghitung GAF merujuk pada pendekatan Midorikawa [20], yaitu:

$$\text{Log}(GAF) = 1.35 - 0.47 \text{Log}(V_{s30}) \pm 0.18 \quad (2)$$

dengan : V_{s30} = kecepatan gelombang geser di kedalaman 30 m (m/s).

HASIL DAN PEMBAHASAN

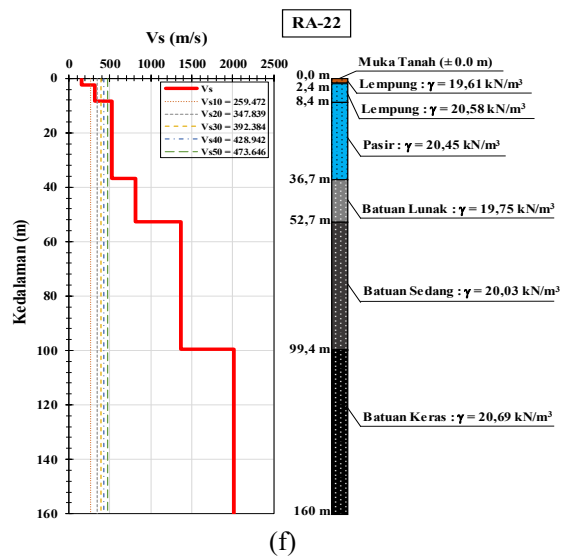
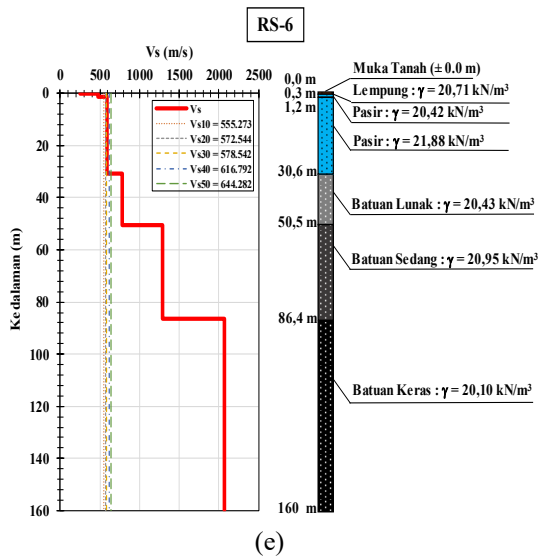
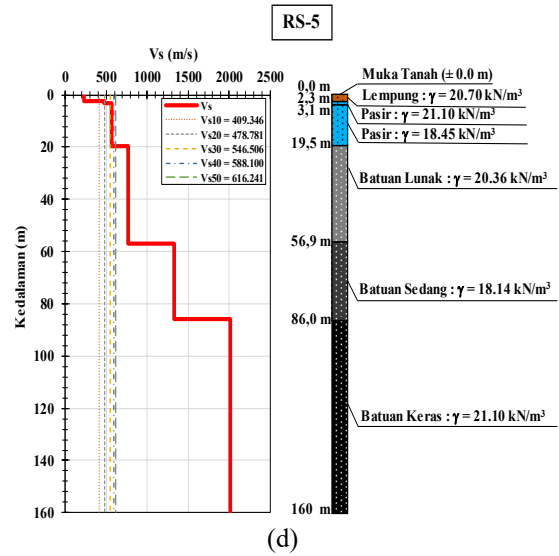
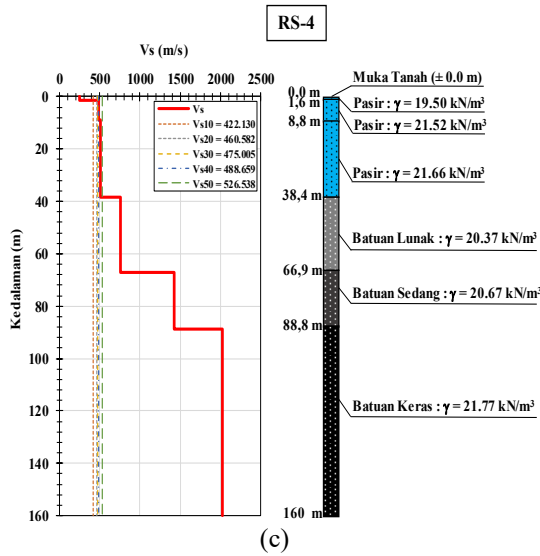
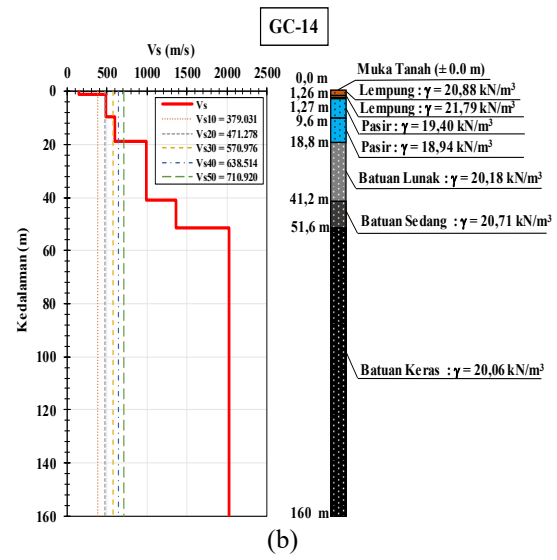
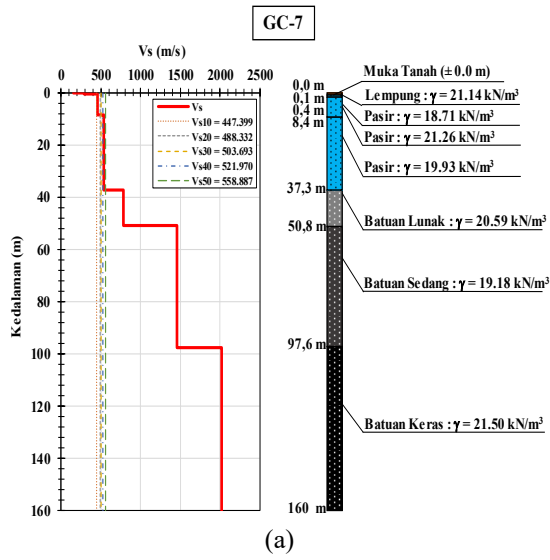
Penelitian ini menghasilkan profil perlapisan tanah dan profil nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , peta sebaran V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , peta sebaran Kelas Situs, dan peta sebaran *ground amplification factor* (GAF).

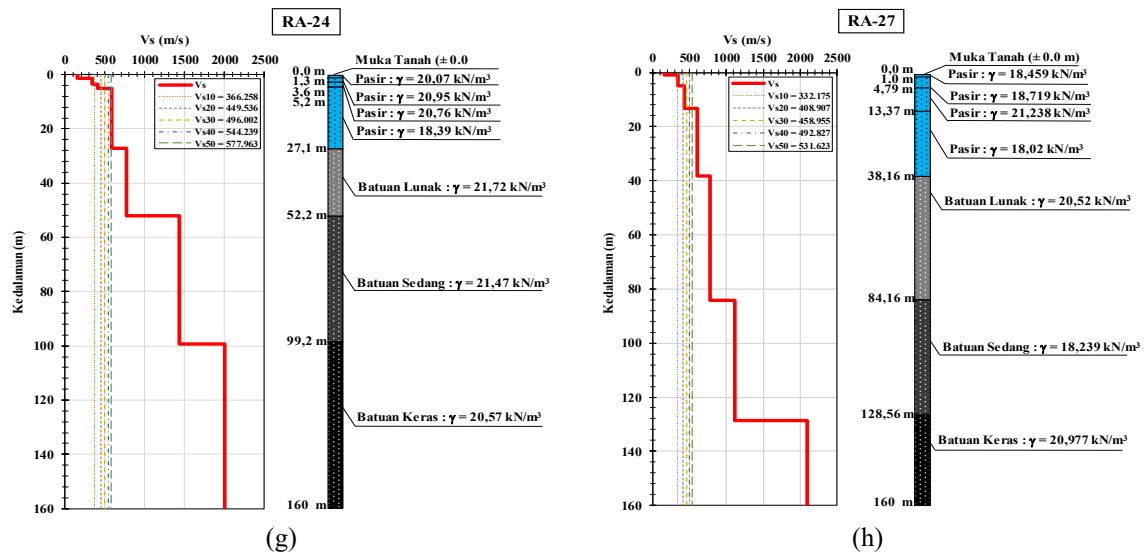
Profil Perlapisan Tanah dan Profil Kecepatan Gelombang Geser (V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50})

Gambar 3 menunjukkan profil perlapisan tanah dan distribusi kecepatan gelombang geser pada titik pengukuran yang telah dipilih secara representatif. Titik pengukuran tersebut mencakup RS-4, RS-5, RS-6, RA-22, RA-24, RA-27, GC-7, dan GC-14. Titik-titik ini berada lebih dekat ke area pesisir untuk mendukung pemetaan wilayah yang diperkirakan rentan terhadap bahaya seismik. Titik-titik ini berperan sebagai representasi visual yang menyajikan deskripsi mendetail mengenai karakteristik tanah di wilayah penelitian. Secara spesifik, titik-titik tersebut menggambarkan variasi kecepatan gelombang geser (V_s) yang terukur di setiap lokasi. Profil kecepatan gelombang geser (V_s) menunjukkan adanya

peningkatan nilai V_s seiring dengan bertambahnya kedalaman.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada beberapa kedalaman tertentu, diperoleh kisaran nilai V_s yang bervariasi. Pada kedalaman 10 meter, nilai V_s berkisar antara 259,47 m/s hingga 555,27 m/s. Peningkatan nilai V_s secara konsisten terlihat pada lapisan tanah yang lebih dalam. Pada kedalaman 20 meter, nilai V_s berada pada rentang 347,84 m/s hingga 572,54 m/s. Pada kedalaman 30 meter, nilai V_s tercatat antara 392,38 m/s hingga 578,54 m/s, dan terus bertambah pada kedalaman 40 meter, yaitu antara 428,94 m/s hingga 638,51 m/s. Peningkatan tersebut berlanjut hingga kedalaman 50 meter, dengan nilai V_s tertinggi berada dalam kisaran 473,65 m/s hingga 710,92 m/s. Secara umum, lapisan tanah di kawasan ini didominasi oleh pasir yang bersifat tidak padat, sehingga memiliki kemampuan meredam gelombang gempa. Dalam kondisi tertentu, terutama ketika terdapat lapisan pasir yang tebal di atas lapisan tanah yang lebih keras, gelombang gempa cenderung mengalami amplifikasi dan menjadi lebih kuat saat mencapai permukaan [21]. Menurut Pryambodo dan Sudirman [22], keberadaan tanah berpasir yang jenuh air sebagai jenis tanah yang dominan dapat meningkatkan kerentanan terhadap likuefaksi di kawasan pesisir. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Mase [5], yang mengungkapkan bahwa tingkat likuefaksi yang tinggi cenderung terjadi pada tanah berpasir dan lempung dengan resistensi rendah, sehingga memperbesar potensi terjadinya gangguan stabilitas tanah.



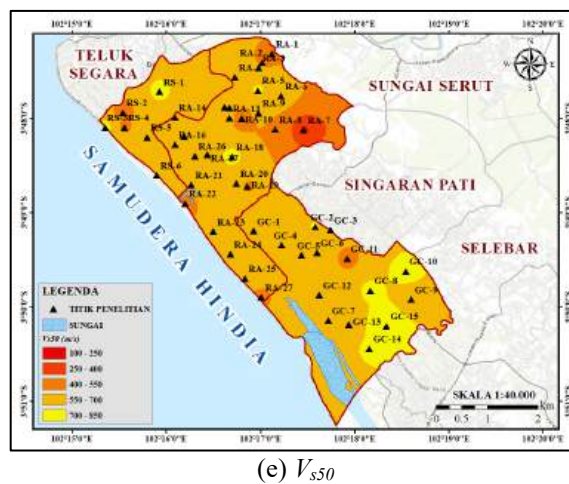
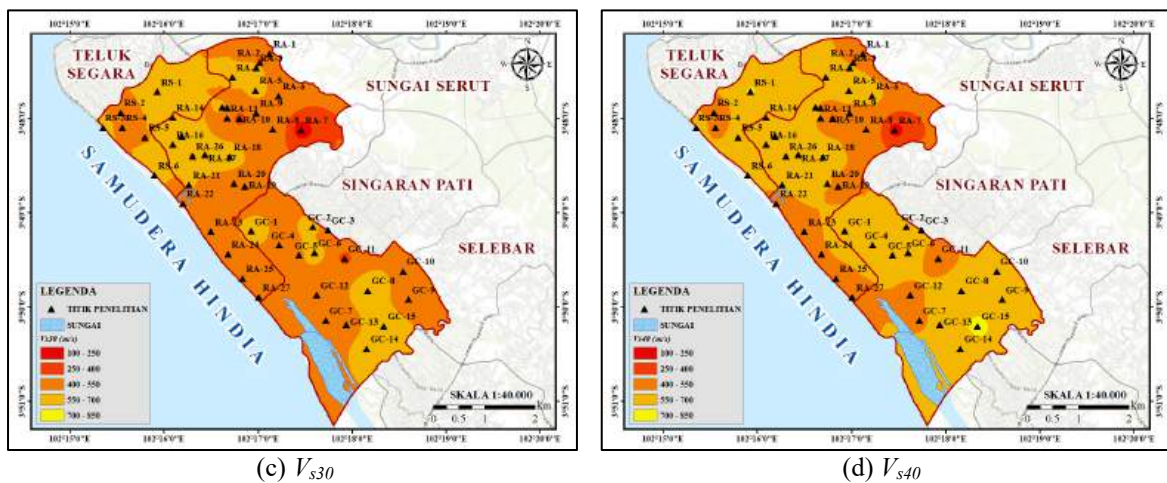
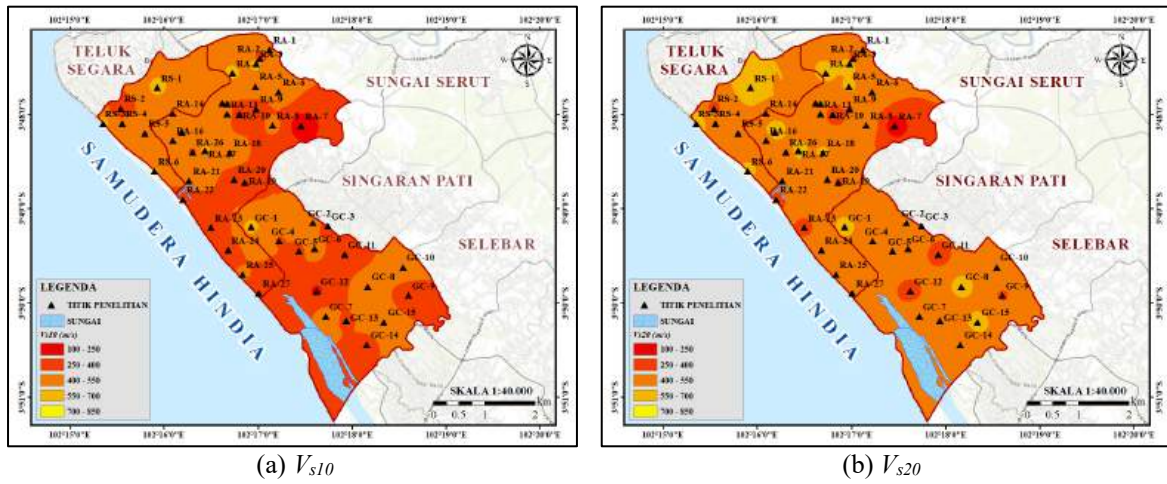


Gambar 3. Profil perlapisan tanah dan profil V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} pada titik (a) GC-7, (b) GC-14, (c) RS-4, (d) RS-5, (e) RS-6, (f) RA-22, (g) RA-24, dan (h) RA-10.

Sebaran V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50}

Peta sebaran kecepatan gelombang geser dibuat untuk mengetahui resistensi tanah berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser pada kedalaman 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, dan 50 m. Sebaran peta ditampilkan pada **Gambar 4**. Peta dengan kedalaman kurang dari 30 m digunakan untuk mengidentifikasi resistensi tanah pada lapisan dangkal, sementara peta dengan kedalaman lebih dari 30 untuk lapisan yang lebih dalam. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai kecepatan gelombang geser pada kedalaman 10 m (V_{s10}) berkisar antara 139,54 m/s hingga 657,30 m/s. Pada kedalaman 20 m (V_{s20}), kisaran nilai meningkat menjadi 165,53 m/s hingga 707,97 m/s. Pada kedalaman 30 m (V_{s30}), kecepatan gelombang geser berada dalam rentang 182,13 m/s hingga 726,64 m/s. Nilai kecepatan gelombang geser terus meningkat pada kedalaman 40 m (V_{s40}), yaitu antara 205,73 m/s hingga 742,79 m/s. Peningkatan

tertinggi tercatat pada kedalaman 50 m (V_{s50}), dengan kisaran nilai antara 233,32 m/s hingga 833,40 m/s. Nilai rata-rata kecepatan gelombang geser dari semua titik pada kedalaman 10 m (V_{s10}) adalah 418,59 m/s, pada kedalaman 20 m (V_{s20}) sebesar 479,77 m/s, pada kedalaman 30 m (V_{s30}) sebesar 523,39 m/s, pada kedalaman 40 m (V_{s40}) sebesar 569,68 m/s, dan pada kedalaman 50 meter (V_{s50}) sebesar 614,54 m/s. Pada **Gambar 4**, terlihat bahwa area dengan warna yang lebih terang yaitu warna kuning hingga warna oranye muda memiliki nilai V_s lebih besar, mengindikasikan bahwa tanah di kawasan tersebut lebih keras. Area yang ditandai dengan warna lebih gelap, yaitu warna oranye tua hingga warna merah, cenderung memiliki nilai V_s yang lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanah di kawasan tersebut bersifat lebih lunak, sehingga resistensinya menjadi lebih rendah. Struktur dan bangunan di daerah tersebut perlu dirancang lebih kuat agar tetap stabil.



Gambar 4. Peta Sebaran (a) V_{s10} , (b) V_{s20} , (c) V_{s30} , (d) V_{s40} , (e) V_{s50}

Sebaran Kelas Situs

Klasifikasi kelas situs dapat dilakukan berdasarkan data V_{s30} dengan mengacu pada ketentuan *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP) sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1**. Berdasarkan hasil analisis seperti yang ditampilkan pada **Gambar 5**, daerah penelitian terbagi menjadi dua kelas situs utama, yaitu kelas C dan kelas D. Kelas Situs C merupakan kategori yang paling dominan di wilayah ini dan ditampilkan dengan warna oranye. Wilayah dengan Kelas Situs C memiliki rentang nilai V_{s30} antara 360 m/s - 760 m/s, yang menggambarkan bahwa tanah di area tersebut termasuk dalam kategori tanah keras, sangat padat, atau batuan lunak. Sementara itu, Kelas Situs D yang ditandai dengan warna merah, hanya ditemukan di tiga lokasi tertentu, yaitu titik RA-2, RA-7, dan RA-10. Wilayah ini memiliki nilai V_{s30} yang lebih rendah, yaitu dalam rentang 180 m/s - 360 m/s, yang mengindikasikan bahwa tanah di area ini termasuk dalam kategori tanah sedang. Perbandingan karakteristik tanah antara kedua Kelas Situs tersebut dapat dilihat berdasarkan tabel NEHRP. Tanah dengan Kelas Situs C cenderung lebih stabil karena terdiri dari material tanah atau batuan yang lebih padat, sehingga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap getaran seismik. Tanah dengan Kelas Situs D memiliki karakteristik yang kurang padat, cenderung lebih rentan terhadap amplifikasi getaran seismik. Kondisi ini menyebabkan potensi guncangan yang lebih kuat dan meningkatkan bahaya seismik yang lebih besar di wilayah tersebut. Temuan ini sejalan dengan pendapat Wills *et al* [23] dan Hollender *et al* [24], yang menyatakan bahwa wilayah dengan nilai V_{s30} yang lebih rendah berpotensi mengalami dampak seismik yang lebih besar akibat kepadatan tanah yang relatif lebih rendah. Secara keseluruhan, hasil klasifikasi situs berdasarkan nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s40} , dan V_{s50}

juga menunjukkan bahwa mayoritas titik dalam area penelitian termasuk dalam Kelas Situs C dan D. Kelas Situs B (batuan sedang) hanya teridentifikasi pada klasifikasi berdasarkan nilai V_{s50} , sedangkan Kelas Situs E (tanah lunak) ditemukan pada titik RA-7 berdasarkan hasil klasifikasi nilai V_{s10} dan V_{s20} .

Peta Kelas Situs memiliki peran penting dalam merepresentasikan desain ketahanan tanah suatu wilayah. Dengan adanya peta ini, karakteristik tanah dapat diidentifikasi secara lebih akurat, sehingga memungkinkan perencanaan dan pembangunan infrastruktur yang lebih aman dan sesuai dengan kondisi tanah setempat. Informasi yang disajikan dalam peta Kelas Situs membantu perencana dalam menentukan strategi mitigasi risiko gempa, seperti pemilihan jenis fondasi yang tepat, perancangan struktur tahan gempa, serta penyesuaian desain bangunan.

Temuan pada penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Zahara *et al* [21], yang menyatakan bahwa sebagian besar wilayah pesisir Kota Bengkulu dikategorikan ke dalam Kelas Situs C (keras) dan D (sedang). Pemilihan jenis fondasi untuk Kelas Situs C dan D dapat dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik tanah dan risiko seismik sesuai dengan SNI 1726:2019 [25]. Fondasi dangkal seperti telapak atau plat beton bertulang direkomendasikan untuk kondisi tanah permukaan yang tergolong dalam Kelas Situs C, dengan ketebalan dan luas yang disesuaikan terhadap kapasitas dukung tanah. Sementara fondasi dalam seperti tiang pancang atau bor direkomendasikan untuk kondisi tanah permukaan dengan klasifikasi Kelas Situs D, yang memiliki kecepatan gelombang geser rendah dan potensi amplifikasi guncangan lebih tinggi. Penerapan sistem struktur tahan gempa, seperti dinding geser atau isolator getaran seismik, juga disarankan pada

bangunan penting yang bertumpu pada tanah dengan Kelas Situs D.



Gambar 5. Peta Sebaran Klasifikasi Kelas Situs

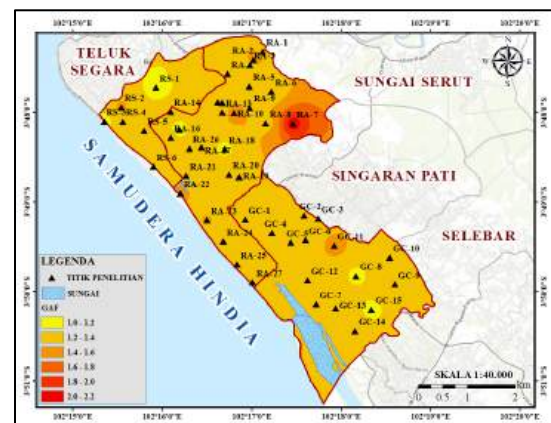
Sebaran *Ground Amplification Factor* (GAF)

Nilai GAF yang diamati di wilayah penelitian memiliki variasi dalam rentang 1,1 hingga 2,1. Distribusi atau persebaran nilai GAF di wilayah tersebut dapat dilihat secara visual pada Gambar 6. Sebaran nilai GAF terbagi dalam tiga kategori, yaitu rendah (1,0 – 1,2) ditunjukkan dengan warna kuning, sedang (1,2 – 1,8) ditunjukkan dengan warna oranye, dan tinggi (1,8 – 2,2) ditunjukkan dengan warna merah. Sebagian besar wilayah penelitian didominasi oleh nilai GAF sedang. Puncak amplifikasi terbesar ditemukan pada titik RA-7, dengan nilai GAF mencapai 2,1, sedangkan nilai GAF terendah ditemukan pada titik RA-3 dengan nilai GAF sebesar 1,1.

Perbedaan nilai GAF dipengaruhi oleh beberapa faktor geoteknik, terutama kecepatan gelombang geser (V_{s30}), ketebalan lapisan tanah lunak, serta kadar air dan jenis material penyusun tanah. Titik RA-7 memiliki nilai V_{s30} yang rendah ($V_s < 180$ m/s) dan didominasi oleh endapan tanah lepas dengan ketebalan lapisan lunak yang cukup besar, yang cenderung memperbesar respon amplifikasi saat terjadi gempa. Kandungan air tanah yang tinggi juga

berkontribusi terhadap penurunan kekakuan tanah, sehingga memperkuat efek amplifikasi. Titik RA-3 menunjukkan karakteristik tanah yang lebih padat dengan V_{s30} lebih tinggi, serta lapisan keras yang relatif dangkal, sehingga mereduksi efek amplifikasi.

Peta distribusi GAF menyajikan informasi untuk memahami bagaimana sifat tanah di lokasi tertentu dapat memperkuat atau mengurangi getaran akibat pembesaran gelombang. Berdasarkan hasil analisis, daerah dengan faktor amplifikasi tanah tinggi memiliki nilai V_{s30} rendah, yang menandakan tanah pada daerah tersebut lebih lunak. Kondisi ini berpotensi lebih tinggi mengalami kerusakan. Temuan ini sejalan dengan Bustari dan Wibowo [26], yang menyatakan bahwa wilayah dengan amplifikasi tinggi cenderung mengalami peningkatan amplitudo gempa dan dampak yang lebih besar.



Gambar 6. Peta Sebaran GAF

KESIMPULAN

Penelitian ini menyajikan profil perlapisan tanah dan profil V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , peta sebaran variasi kecepatan gelombang geser (V_s), peta Kelas Situs, serta peta *Ground Amplification Factor* (GAF). Peta sebaran menyajikan data mengenai resistensi tanah serta potensi bahaya seismik di kawasan pesisir Kota Bengkulu.

Berdasarkan peta yang telah dihasilkan, dapat disimpulkan bahwa daerah pesisir Kota Bengkulu memiliki tingkat resistensi tanah yang relatif sedang. Kondisi resistensi tanah yang sedang di kawasan tersebut disebabkan oleh dominasi Kelas Situs C dan D, yang dapat mengakibatkan implikasi potensi kerentanan terhadap stabilitas dan keamanan struktur bangunan di kawasan pesisir. Integrasi hasil mikrozonasi dengan analisis kerentanan bangunan merupakan salah satu langkah penting dalam merancang solusi yang lebih spesifik dan adaptif. Integrasi ini dapat dilakukan dengan cara memetakan distribusi kondisi tanah (berdasarkan Kelas Situs dan nilai V_s) ke dalam model kerentanan bangunan, yang mempertimbangkan potensi kerusakan berdasarkan jenis fondasi, usia bangunan, dan material yang digunakan. Peta mikrozonasi dapat membantu perencana untuk menentukan jenis konstruksi yang paling tepat untuk masing-masing zona berdasarkan karakteristik tanah setempat.

Untuk mendukung implementasi praktis dari hasil penelitian ini, diperlukan kolaborasi dengan lembaga terkait, seperti Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (Bappeda), Dinas Pekerjaan Umum, dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), yang memiliki peran strategis dalam perencanaan tata ruang serta mitigasi bencana. Kolaborasi tersebut dapat diwujudkan melalui penyusunan pedoman teknis yang mengacu pada hasil mikrozonasi dalam proses desain dan perencanaan infrastruktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. S. Akbar, B. A. Vira, L. R. Doni, H. E. Putra, and A. Efriyanti, "Aplikasi Metode Weighted Overlay untuk Pemetaan Zona Keterpaparan Permukiman Akibat Tsunami (Studi Kasus: Kota Bengkulu dan Kabupaten Bengkulu Tengah)," *J. Geosains dan Remote Sens.*, vol. 1, no. 1, pp. 43–51, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.23960/jgrs.2020.v1i1.17>
- [2] G. Kencoro, M. Farid, A. I. Hadi, D. I. Fadli, and A. Sedayu, "Analisis Zona Rawan Gempa Bumi Di Kabupaten Bengkulu Selatan Berdasarkan Percepatan Tanah Puncak Menggunakan Formula Kanai," *J. Kumparan Fis.*, vol. 6, no. 2, pp. 75–82, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.33369/jkf.6.2.75-82>
- [3] M. Adampira, H. Alielahi, M. Panji, and H. Koohsari, "Comparison of equivalent linear and nonlinear methods in seismic analysis of liquefiable site response due to near-fault incident waves: a case study," *Arab. J. Geosci.*, vol. 8, no. 5, pp. 3103–3118, 2015, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1399-6>
- [4] M. Farid and L. Z. Mase, "Implementation of seismic hazard mitigation based on ground shear strain indicator for spatial plan of Bengkulu city, Indonesia," *Int. J. Geomate*, vol. 18, no. 69, pp. 199–207, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.21660/2020.69.24759>
- [5] L. Z. Mase, "Liquefaction potential analysis along coastal area of Bengkulu province due to the 2007 Mw 8.6 Bengkulu earthquake," *J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 49, no. 6, pp. 721–736, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.2>
- [6] Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral, "Gempa Bumi Berkekuatan 5,7 Magnitudo Guncang Bengkulu," Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/gempa-bumi-berkekuatan-57-magnitudo-gunca>

- ng-bengkulu
- [7] Kementerian Kesehatan RI, “Gempa-Bumi di Kota-Bengkulu, Bengkulu, 19-08-2020,” Kementerian Kesehatan RI. [Online]. Available: <https://pusatkrisis.kemkes.go.id/GempaBumi-di-Kota-Bengkulu-Bengkulu-1908-2020-17>
- [8] L. Z. Mase, S. Agustina, and P. W. Anggraini, “Seismic hazard microzonation of ground response parameters in Bengkulu City, Indonesia,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 528, no. 1, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/528/1/012051>
- [9] L. Z. Mase, “A note on ground motion interpretation and site response analysis during the 2007 Bengkulu–Mentawai earthquakes, Indonesia,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 14, no. 2, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06344-0>
- [10] F. Castelli, V. Lentini, and S. Grasso, “Recent developments for the seismic risk assessment,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 15, no. 12, pp. 5093–5117, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0163-1>
- [11] L. Z. Mase, “Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis,” *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 38, no. 5, pp. 5433–5455, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01375-6>
- [12] E. Y. Sari, L. Z. Mase, H. Hardiansyah, R. Misliniyati, and K. Amri, “Implementasi Metode Linier Ekuivalen Dan Nonlinier Dalam Memprediksi Respons Seismik Area Kampung Melayu, Kota Bengkulu,” *J. Geosaintek*, vol. 10, no. 2, pp. 159–172, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.12962/j25023659.v10i2.1723>
- [13] A. Arifudin, “Kecepatan Gelombang Geser (V_s) Dan Ketebalan Sedimen (H) Di Kabupaten Klaten Dari Data Mikrotremor,” *Teknisia*, vol. XXVI, no. 1, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol26.iss1.art6>
- [14] B. S. S. C. NEHRP, “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures,” vol. part 1, no. Provisions, FEMA, 450, 2003.
- [15] N. Sugianto and R. Refrizon, “Struktur Kecepatan Gelombang Geser (V_s) di Daerah Rawan Gerakan Tanah (Longsor) Jalan Lintas Kabupaten Bengkulu Tengah-Kepahiang,” *Indones. J. Appl. Phys.*, vol. 11, no. 2, p. 134, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.13057/ijap.v11i2.41699>
- [16] FEMA, “NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures,” *Build. Seism. Saf. Counc.*, vol. II, no. September, p. 388, 2020, [Online]. Available: http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1730-25045-1580/femap_750.pdf
- [17] A. P. R, M. S. Purwanto, and A. Widodo, “Identifikasi Percepatan Tanah Maksimum (PGA) dan Kerentanan Tanah Menggunakan Metode Mikrotremor Jalur Sesar Kendeng,” *J. Geosaintek*, vol. 3, no. 2, p. 107, 2017, [Online]. Available: <https://doi.org/10.12962/j25023659.v3i2.2966>
- [18] L. Lantu, S. Aswad, F. Fitriani, and M. Marjiyono, “Pemetaan Wilayah Rawan Bencana Gempa bumi Berdasarkan Data Mikrotremor Dan Data Bor,” *J. Geocelbes*, vol. 2, no. 1, p. 20, 2018, [Online]. Available: <https://doi.org/10.20956/geocelbes.v2i1.3721>

- [19] L. Z. Mase, M. Irsyam, D. Gustiparani, A. N. Noptapia, A. J. Syahbana, and E. Soebowo, "Identification of bedrock depth along a downstream segment of Muara Bangkahulu River, Bengkulu City, Indonesia," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 83, no. 4, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03591-3>
- [20] S. Midorikawa, "Site effects on strong-motion records observed during the 1987. Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake," 1994.
- [21] A. Zahara, L. Z. Mase, F. Supriani, R. Misliniyati, and K. Amri, "Studi Perbandingan Linier Ekuivalen dan Nonlinier pada Respon Seismik di Daerah Pesisir," *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 10, no. 2, pp. 160–176, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.31849/siklus.v10i2.20670>
- [22] D. G. Pryambodo and N. Sudirman, "Identifikasi Likuifaksi Di Kawasan Pesisir Kota Padang Dengan Metoda Geolistrik 2D," *J. Segara*, vol. 15, no. 3, pp. 159–168, 2019, [Online]. Available: <https://doi.org/10.15578/segara.v15i3.7732>
- [23] C. J. Wills, C. I. Gutierrez, F. G. Perez, and D. M. Branum, "A next generation V_{s30} map for California based on geology and topography," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 105, no. 6, pp. 3083–3091, 2015, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1785/0120150105>
- [24] F. Hollender *et al.*, "Characterization of site conditions (soil class, V_{s30} , velocity profiles) for 33 stations from the French permanent accelerometric network (RAP) using surface-wave methods," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 16, no. 6, pp. 2337–2365, 2018, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0135-5>
- [25] "SNI 1726-2019. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung," Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [26] A. A. Bustari and N. B. Wibowo, "Pemetaan sebaran nilai V_{s30} , faktor amplifikasi tanah, dan peak ground acceleration wilayah Bantul timur," *Cakrawala J. Ilm. Bid. Sains*, vol. 1, no. 2, pp. 73–80, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.28989/cakrawala.v1i2.1436>