

KLASIFIKASI JENIS TANAH DI KOTA BENGKULU BERDASARKAN METODE *HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRA RATIO*

Istofiyah¹, Supriyadi², M. Aryono Adhi³, Aditya Setyo Rahman⁴, Sigit Pramono⁵,
Oriza Sativa⁶, Ardian Yudhi Octantyo⁷, Nur Fani Habibah⁸
Universitas Negeri Semarang (UNNES)^{1,2,3}
National Central University (NCU) Taiwan⁴
Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Jakarta^{4,5,6,7,8}
istofiyah03@gmail.com¹

ABSTRAK

Kota Bengkulu merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap gempa bumi. Untuk memahami karakteristik seismik tanah di wilayah ini, penelitian ini menerapkan metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) berbasis data mikrotremor guna mengidentifikasi frekuensi dominan (F_0) dan faktor amplifikasi (A_0) yang berperan penting dalam analisis mikrozona seismik. Penelitian ini mengumpulkan 143 titik pengukuran mikrotremor yang tersebar di Kota Bengkulu. Data dianalisis menggunakan perangkat lunak Geopsy untuk memperoleh nilai periode dominan (T_{dom}) serta melakukan klasifikasi tipe tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai periode dominan di Kota Bengkulu berkisar antara 0,09213 s hingga 0,722799 s, yang mencerminkan variasi karakteristik tanah di wilayah tersebut. Secara umum, Kota Bengkulu didominasi oleh tanah sedang hingga tanah keras, dengan sebagian besar wilayah seperti Pondok Kelapa, Muara Bangka Hulu, bagian selatan Sungai Serut, Selebar, dan Kampung Melayu tergolong sebagai tanah sedang. Sementara itu, klasifikasi tanah keras hingga batuan dasar ditemukan pada wilayah Teluk Segara, Ratu Samban, Ratu Agung, Singaran Pati, serta bagian tenggara Muara Bangka Hulu, yang didominasi oleh Formasi Aluvium dan Aluvium Teras. Selain itu, zona tanah lunak berada di bagian tengah Sungai Serut, yang dipengaruhi oleh kedekatannya dengan tubuh air seperti danau dan rawa. Temuan ini mengonfirmasi bahwa daerah dengan tanah lunak memiliki potensi amplifikasi seismik yang lebih tinggi sehingga lebih rentan terhadap guncangan gempa. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam upaya mitigasi bencana, khususnya untuk perencanaan dan pembangunan infrastruktur tahan gempa di Kota Bengkulu.

Kata Kunci: HVSr, Periode Dominan, Amplifikasi

ABSTRACT

Bengkulu City is one of the regions in Indonesia with a high level of earthquake susceptibility. To understand the seismic characteristics of the soil in this area, this study employs the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) method based on microtremor data to identify the dominant frequency (F_0) and amplification factor (A_0),

which play a crucial role in seismic microzonation analysis. This study collected 143 microtremor measurement points distributed across Bengkulu City, which were analyzed using Geopsy software to obtain dominant period (T_{dom}) values and classify soil types. The analysis results indicate that the dominant period values in Bengkulu City range from 0.09213 s to 0.722799 s, reflecting variations in soil characteristics across the region. Overall, Bengkulu City is predominantly composed of medium to hard soil, with most areas such as Pondok Kelapa, Muara Bangka Hulu, the southern part of Sungai Serut, Selebar, and Kampung Melayu classified as medium soil. Meanwhile, hard soil to bedrock classifications are found in Teluk Segara, Ratu Samban, Ratu Agung, Singaran Pati, and the southeastern part of Muara Bangka Hulu, which are dominated by the Alluvium and Terrace Alluvium formations. Additionally, soft soil areas are located in the central part of Sungai Serut, influenced by their proximity to water bodies such as lakes and swamps. These findings confirm that areas with soft soil have a higher potential for seismic amplification, making them more vulnerable to earthquake shaking. Therefore, the results of this study are expected to serve as a reference for disaster mitigation, particularly in earthquake-resistant infrastructure planning and construction in Bengkulu City.

Keywords: *HVSR, Dominant period, Amplification*

PENDAHULUAN

Kota Bengkulu merupakan salah satu kawasan strategis di pesisir barat Sumatera yang memiliki tingkat kerentanan seismik sangat tinggi, hal ini disebabkan oleh interaksi kompleks antara aktivitas penunjaman lempeng (subduksi) Indo-Australia di bawah lempeng Eurasia dan aktivitas Sesar Besar Sumatera (Sesar Semangko) di daratan. Dinamika tektonik ini menempatkan wilayah Bengkulu dalam zona *Megathrust* Mentawai-Pagai yang menyimpan potensi pelepasan energi gempa bumi destruktif di masa depan (Mukti et al., 2021). Sejarah mencatat rentetan peristiwa kegempaan signifikan, di mana data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dari tahun 1979 hingga 2017 merekam setidaknya 12 kejadian gempa merusak, termasuk gempa besar M 7,9 pada 12 September 2007 yang melumpuhkan

infrastruktur vital, serta gempa M 5,8 pada tahun 2016 yang merusak puluhan bangunan di Kecamatan Pekan Sabtu. Risiko ini semakin diperparah oleh kondisi geologi permukaan yang didominasi oleh endapan Kuartar lunak yang rentan terhadap amplifikasi gelombang seismik (Putra & Nurdiyan, 2022). Studi terbaru menunjukkan bahwa lapisan sedimen tebal di wilayah pesisir memiliki kecenderungan memperkuat getaran tanah secara signifikan saat terjadi gempa, fenomena ini dikenal sebagai *site effect* yang menjadi faktor utama tingginya tingkat kerusakan bangunan (Simanjuntak et al., 2020).

Kerentanan seismik tersebut sangat dipengaruhi oleh karakteristik geologi lokal Kota Bengkulu yang tersusun atas enam formasi utama yang heterogen, yaitu Aluvium (Qa), Batu Gamping Terumbu (Ql), Endapan Rawa (Qs), Aluvium Teras (Qat), Andesit (Tpan),

dan Formasi Bintunan (QTb). Dominasi formasi Aluvium dan Endapan Rawa di wilayah barat hingga utara kota, yang terdiri dari material lepasan seperti kerikil, pasir, lanau, dan sisa organik, mengindikasikan tingkat konsolidasi tanah yang rendah dan potensi likuifaksi yang tinggi (Mase, 2020).

Sementara itu, keberadaan Formasi Andesit di bagian tengah dan Batu Gamping Terumbu di sekitar PLTU menambah kompleksitas respons tanah terhadap gelombang seismik. Variasi litologi ini menuntut pemahaman mendalam mengenai karakteristik dinamis tanah, yang dapat dianalisis menggunakan metode mikrotremor dengan teknik *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Metode HVSr yang diperkenalkan oleh Nakamura telah terbukti andal, hemat biaya, dan non-invasif untuk mengestimasi frekuensi resonansi fundamental (f_0) dan faktor amplifikasi tanah (Nakamura, 2021; Yuliyanto et al., 2021). Parameter f_0 sangat krusial karena berkorelasi langsung dengan ketebalan sedimen dan periode dominan (T_{dom}), yang menjadi indikator utama dalam klasifikasi jenis tanah untuk keperluan mitigasi bencana (Hakam et al., 2023).

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk memetakan kerentanan seismik di wilayah Sumatera dan sekitarnya. Refrizon et al. (2020) telah melakukan analisis mikrotremor di wilayah pesisir Bengkulu dengan fokus utama pada pemetaan Indeks Kerentanan Seismik (K_g) untuk mitigasi bencana tsunami dan gempa, namun penelitian tersebut lebih menitikberatkan pada parameter amplifikasi tanpa klasifikasi

jenis tanah yang mendetail berdasarkan periode dominan.

Selanjutnya, penelitian oleh Lestari et al. (2021) di wilayah Kota Padang menggunakan metode serupa untuk mengestimasi kedalaman batuan dasar (*engineering bedrock*), namun belum mengintegrasikan secara spesifik korelasi antara formasi geologi permukaan yang beragam dengan distribusi spasial periode dominan. Di sisi lain, studi Pertiwi dan Utama (2022) melakukan mikrozonasi di wilayah yang lebih sempit menggunakan data mikrotremor, namun keterbatasan jumlah titik ukur menyebabkan interpolasi data kurang representatif untuk skala kota yang memiliki kompleksitas geologi seperti Bengkulu.

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah memberikan kontribusi signifikan, masih terdapat kesenjangan (*gap*) berupa belum adanya pemetaan komprehensif yang secara spesifik mengklasifikasikan jenis tanah di seluruh wilayah administrasi Kota Bengkulu berdasarkan parameter periode dominan (T_{dom}) yang divalidasi dengan enam formasi geologi spesifik yang ada.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini hadir dengan menawarkan kebaruan (*novelty*) berupa integrasi analisis mikrotremor metode HVSr dengan tinjauan geologi mendalam pada enam formasi batuan (Qa, Ql, Qs, Qat, Tpan, QTb) untuk menghasilkan peta klasifikasi jenis tanah yang lebih presisi di Kota Bengkulu. Berbeda dengan penelitian Refrizon et al. (2020) yang berfokus pada indeks kerentanan, dan Lestari et al. (2021) yang berfokus pada kedalaman batuan dasar, penelitian ini secara spesifik menonjolkan analisis Periode Dominan (T_{dom}) sebagai

parameter utama untuk mengidentifikasi karakteristik fisik tanah (keras, sedang, lunak, hingga sangat lunak) sesuai standar SNI 1726:2019.

Keunggulan lain dari penelitian ini adalah penggunaan distribusi titik ukur yang lebih rapat yang mencakup variasi litologi yang belum terpetakan secara detail pada studi sebelumnya. Tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis nilai frekuensi natural (f_0) untuk menentukan periode dominan (T_{dom}) dan menyusun peta mikrozonasi klasifikasi tanah di Kota Bengkulu. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pemerintah daerah dan perencana tata kota sebagai landasan ilmiah dalam penyusunan kebijakan tata ruang berbasis mitigasi bencana (RTRW) serta acuan dalam standar pendirian bangunan tahan gempa, guna meminimalisir risiko kerugian jiwa dan materi di masa mendatang (Arifin et al., 2023; Saputra et al., 2024).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan data mikrotremor primer yang dikumpulkan dari titik-titik pengukuran yang telah ditentukan dan tersebar di seluruh wilayah Kota Bengkulu. Proses akuisisi data dilakukan dengan pengukuran satu stasiun (single-station) menggunakan seismometer portabel untuk merekam getaran tanah ambien. Di setiap lokasi, instrumen merekam sinyal dalam tiga komponen ortogonal: dua komponen horizontal (Utara–Selatan dan Barat–Timur) serta satu komponen vertikal. Perekaman dilakukan selama durasi tertentu untuk memastikan kualitas data

yang memadai, sehingga sinyal yang terekam merepresentasikan kebisingan ambien alami di lokasi tersebut, bukan gangguan buatan yang bersifat sementara.

Setelah pengumpulan data, analisis dilakukan menggunakan metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) untuk mengolah sinyal yang direkam. Data mentah terlebih dahulu melalui tahap prapemrosesan, yang mencakup koreksi baseline dan pemilihan jendela waktu yang stabil untuk menghilangkan lonjakan noise. Sinyal pada domain waktu yang telah dipilih kemudian diubah ke domain frekuensi menggunakan Fast Fourier Transform (FFT). Untuk menghitung rasio spektral, dua komponen spektrum horizontal digabungkan, biasanya menggunakan rata-rata geometrik, lalu dibagi dengan komponen spektrum vertikal. Perhitungan ini menghasilkan kurva rasio spektral H/V untuk setiap titik pengukuran.

Terakhir, tahap interpretasi berfokus pada identifikasi parameter dinamis tanah berdasarkan kurva H/V yang dihasilkan. Puncak kurva rasio spektral diidentifikasi untuk menentukan frekuensi fundamental (f_0) pada lokasi tersebut. Dari frekuensi ini, periode dominan (T_0) dihitung. Nilai periode dominan ini kemudian digunakan sebagai variabel utama untuk mengelompokkan dan memetakan jenis tanah di seluruh wilayah studi, sehingga memungkinkan klasifikasi efek tapak lokal (*local site effects*) berdasarkan karakteristik geologi spesifik Kota Bengkulu.

Pengumpulan Data

Data mikrotremor diperoleh melalui pengukuran lapangan menggunakan seismograf, antena GPS, dan laptop yang dilengkapi perangkat lunak Geopsy. Akuisisi data dilakukan pada lokasi dengan permukaan tanah yang relatif datar dan keras/padat. Jika permukaan yang keras/padat tidak tersedia, sensor ditempatkan di atas pelat non-logam (seperti batu atau keramik) yang permukaannya rata. Survei dilaksanakan pada lingkungan yang relatif tenang, bebas dari getaran akibat lalu lintas atau aktivitas industri. Pengukuran dilakukan dengan durasi minimal 30 menit, serta menghindari lokasi yang dekat dengan pohon besar, bangunan tinggi, dan infrastruktur yang dapat menimbulkan getaran, seperti generator dan unit pendingin udara (AC). Pengukuran dihentikan apabila terjadi hujan. Total sebanyak 143 titik pengukuran mikrotremor tersebar di seluruh Kota Bengkulu.

Pengolahan data

Analisis data survei mikrotremor untuk memperoleh periode dominan (T_{dom}) dilakukan menggunakan perangkat lunak Geopsy. Periode dominan tanah ditentukan melalui analisis *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr), yang pertama kali diperkenalkan oleh Nogoshi dan Igarashi pada tahun 1971 dan kemudian dikembangkan oleh Nakamura pada tahun 1989. Dalam analisis tersebut, proses *windowing*, *filtering*, dan *smoothing* dilakukan berdasarkan kriteria yang disesuaikan dengan rekaman mikrotremor. Selanjutnya, hasil pembacaan periode dominan yang

diperoleh dibandingkan dengan nilai V_{s30} menggunakan persamaan empiris (Zhao, 2006) untuk menentukan jenis tanah. Persamaan empiris serta hubungan antara periode dominan dan nilai V_{s30} disajikan pada Tabel 1.

Hasil pengukuran titik-titik Periode Dominan (T_{dom}) di wilayah Kota Bengkulu, Bengkulu, menghasilkan data nilai Amplifikasi (A) dan Periode (T). Selanjutnya, dilakukan interpolasi untuk menghasilkan peta kontur nilai Periode Dominan (T_{dom}) pada area survei. Kontur dibentuk berdasarkan hubungan kedekatan antar titik pengukuran.

HASIL PENELITIAN

Pengolahan data mikrotremor menggunakan metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) menghasilkan rentang nilai Periode Dominan (T_{dom}) yang luas. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa nilai T_{dom} di wilayah studi berkisar dari minimum 0,09213 s hingga maksimum 0,722799 s.

Pengolahan data melibatkan teknik *windowing* untuk membagi sinyal dan menghilangkan noise sementara (transien), sehingga menjaga kestabilan kurva H/V. Kurva hasil pengolahan menghasilkan dua parameter utama; 1) Frekuensi Dominan (F_0): Pada area dengan tanah keras (misalnya BKL 57), nilai F_0 teramati pada rentang menengah hingga tinggi (> 1 Hz). Sebaliknya, pada area tanah lunak (misalnya BKL 24), puncak spektrum bergeser ke frekuensi yang lebih rendah (< 1 Hz); 2) Amplifikasi (A_0): Amplitudo puncak kurva H/V bervariasi secara signifikan, yang mencerminkan kontras impedansi lokal.

Berdasarkan analisis spasial, wilayah studi dapat dikategorikan menjadi tiga zona spesifik berdasarkan rentang T_{dom} ; 1) Zona 1 (Periode Rendah: 0,2 s – 0,4 s): Zona ini secara visual ditunjukkan oleh warna hijau hingga kuning muda. Zona ini mencakup sebagian besar wilayah pesisir barat, khususnya Kecamatan Teluk Segara, Ratu Samban, Ratu Agung, Singaran Pati, dan Muara Bangka Hulu. Nilai T_{dom} di zona ini secara konsisten berada di bawah 0,4 detik; 2) Zona 2 (Periode Tinggi: > 0,6 s): Zona ini tampak sebagai area

merah yang jelas dan terkonsentrasi di Kecamatan Sungai Serut. Nilai T_{dom} di zona ini melebihi 0,6 detik, merupakan periode tertinggi yang tercatat di kota, dengan puncak tertentu mendekati nilai maksimum 0,722799 s; 3) Zona 3 (Periode Bervariasi): Wilayah timur dan utara, serta bagian ujung selatan dekat PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), menunjukkan variasi sedang hingga rendah. Secara khusus, area di sekitar PLTU menunjukkan nilai periode yang lebih rendah dibandingkan zona rawa di bagian tengah

Tabel 1.
Ringkasan Nilai Periode Dominan (T_{dom}) Berdasarkan Formasi Geologi

Lokasi	Formasi Geologi Dominan	Rentang T_{dom} Terukur (s)	Klasifikasi
Teluk Segara, Ratu Samban	Aluvium (Qa) & Teras (Qat)	0.20 – 0.40	Tanah Keras
Sungai Serut	Endapan Gambut (Qs)	0.60 – 0.72	Tanah Lunak
Padangulaktanjung	Andesit (Tpan)	< 0.20	Batuan Keras
Are PLTU	Batugamping Terumbu (Ql)	0.15 – 0.30	Tanah Sedang–Keras

PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menunjukkan korelasi yang kuat antara Periode Dominan (T_{dom}) dan formasi geologi setempat, sehingga menegaskan bahwa T_{dom} merupakan proxy yang andal untuk memperkirakan ketebalan sedimen dan kekakuan tanah (Refrizon et al., 2013). Studi-studi terbaru menekankan bahwa variasi rasio spektral H/V dikendalikan secara langsung oleh profil kecepatan gelombang geser (V_s) serta kedalaman batuan dasar (*bedrock*) (Farid et al., 2022).

Di wilayah barat (Teluk Segara, Ratu Samban), nilai T_{dom} yang rendah

(0,2–0,4 s) berkorelasi dengan formasi Aluvium (Qa) dan Teras Aluvial (Qat). Walaupun termasuk endapan sedimen, komposisi material berupa pasir, lanau, dan kerikil di area ini tampak cukup kompak dengan ketebalan sedimen penutup yang relatif tipis (Mallo et al., 2019). Berdasarkan penilaian geoteknik terbaru, lapisan sedimen dangkal yang lebih kaku menghasilkan frekuensi resonansi yang tinggi, sehingga periode dominan menjadi lebih rendah; kondisi ini umumnya mengindikasikan respons yang lebih stabil terhadap beban gempa (Suhendra et al., 2020).

Sebaliknya, nilai T_{dom} yang tinggi ($>0,6$ s) di Sungai Serut memberikan bukti penting adanya endapan sedimen lunak yang tebal (Refrizon et al., 2021). Area ini berada di atas Formasi Endapan Gambut (Qs), yang dicirikan oleh kandungan organik tinggi dan kejenuhan air yang besar. Kandungan organik yang tinggi pada tanah gambut secara signifikan menurunkan modulus geser tanah, menyebabkan penurunan drastis kecepatan gelombang geser (Vs) dan meningkatkan periode fundamental (Hadi et al., 2018). Temuan ini sejalan dengan teori bahwa lokasi bertanah lunak dengan impedansi rendah dapat bertindak sebagai “*waveguide*”, yang menjebak energi seismik dan memperpanjang durasi guncangan.

Bahaya utama yang teridentifikasi dalam penelitian ini adalah potensi terjadinya resonansi tanah–struktur. Resonansi terjadi ketika frekuensi alami bangunan sama dengan frekuensi dominan tanah (f_0). Berdasarkan aturan empiris (rule of thumb) bahwa periode alami bangunan kira-kira $0.1N$ (dengan N adalah jumlah lantai), maka tanah di Sungai Serut ($T_{dom} \approx 0,6-0,7$ s) menimbulkan ancaman spesifik bagi bangunan bertingkat menengah sekitar 6–7 lantai (Gosar, 2017).

Faktor amplifikasi (A_0) yang diturunkan dari kontras impedansi memperburuk risiko ini. Kontras yang tajam antara lapisan gambut yang lunak dan batuan dasar di Sungai Serut menunjukkan potensi amplifikasi yang tinggi. Simulasi terbaru pada kondisi geologi serupa mengindikasikan bahwa lapisan gambut dapat mengamplifikasi percepatan gerakan tanah sekitar 2 hingga

3 kali dibandingkan lokasi batuan dasar, sehingga meningkatkan tuntutan seismik pada elemen struktur secara signifikan (Lestari et al., 2021).

Variabilitas T_{dom} menuntut pendekatan perencanaan kota berbasis mikrozona di Kota Bengkulu.

Strategi Rekayasa Struktur

Untuk zona berperiode tinggi di Sungai Serut, pondasi dangkal standar kemungkinan tidak memadai karena risiko penurunan (*settlement*) dan amplifikasi. Mitigasi perlu melibatkan penggunaan pondasi tiang dalam yang menembus lapisan gambut lunak hingga mencapai lapisan yang lebih kaku (Muntohar, 2012). Selain itu, disarankan penerapan sistem isolasi seismik dan perangkat peredam eksternal untuk “memisahkan” superstruktur dari gerakan tanah yang teramplifikasi.

Kebijakan Tata Guna Lahan

Zona stabil di wilayah barat (formasi Qa dan Qat) serta area batu gamping di sekitar PLTU (formasi Ql) lebih sesuai untuk infrastruktur kritis dan pembangunan berkepadatan tinggi. Formasi Batugamping Terumbu (*Reef Limestone*) khususnya memiliki kekakuan tinggi yang mendekati batuan dasar, sehingga efektif meredam energi seismik (Mallo et al., 2019).

Penggunaan teknik *windowing* dalam penelitian ini sangat penting untuk menghilangkan *noise* transien dari aktivitas antropogenik, yang merupakan tantangan umum di lingkungan perkotaan. Perkembangan terbaru dalam pemrosesan sinyal menegaskan bahwa *windowing* yang ketat serta *smoothing* statistik pada kurva H/V secara signifikan

meningkatkan keandalan estimasi f_0 , sehingga survei mikrotremor non-invasif menjadi standar yang hemat biaya untuk penilaian risiko seismik skala kota (Molnar et al., 2022).

SIMPULAN

Analisis periode dominan (T_{dom}) di Kota Bengkulu berhasil mengkarakterisasi perilaku tanah dan kerentanan seismik wilayah tersebut, sehingga memenuhi tujuan penelitian. Hasilnya menunjukkan adanya korelasi langsung antara formasi geologi setempat dan respons lokasi; area yang tersusun oleh endapan aluvial dan endapan teras yang lebih kaku umumnya memiliki periode dominan lebih rendah yang menunjukkan kestabilan, sedangkan zona yang didominasi formasi gambut lunak memperlihatkan nilai periode dominan lebih tinggi yang rentan terhadap penguatan gelombang seismik dan resonansi yang signifikan. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa pemetaan periode dominan merupakan metode penting untuk mengidentifikasi zona berisiko tinggi, serta menyediakan landasan ilmiah yang diperlukan bagi perencanaan tata ruang dan penerapan strategi mitigasi yang terarah untuk meminimalkan dampak potensial gempa bumi terhadap infrastruktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada rekan-rekan kami di Divisi Seismologi Teknik, Direktorat Seismologi Teknik, Deputi Bidang Geofisika, BMKG, atas dukungan penuh dan kontribusi berharga dalam penelitian ini. Kami menyampaikan

apresiasi setinggi-tingginya atas bantuan dalam penyediaan data seismik, fasilitas pengolahan data, serta keterlibatan dalam diskusi ilmiah yang konstruktif. Dukungan teknis dan ilmiah dari tim Seismologi Teknik BMKG telah berperan penting dalam kelancaran pelaksanaan penelitian ini, khususnya pada analisis mikrotremor dan pemetaan mikrozona seismik. Kami berharap kolaborasi ini dapat terus berlanjut dan berkontribusi pada pengembangan ilmu kebencanaan serta mitigasi risiko gempa bumi di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, S. S., Mulyatno, B. S., & Marjiyono. (2023). Seismic Microzonation Based on Microtremor Data using Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) Method in Palu City, Indonesia. *Jurnal Geofisika*, 20(1), 15-26. <https://doi.org/10.36435/jgf.v20i1.543>
- Farid, M., Mase, L. Z., & Pujianto, P. (2022). Seismic Hazard Mitigation for Bengkulu City, Indonesia, Based on Shear Wave Velocity (V_s) Analysis. *Geoenvironmental Disasters*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00213-3>
- Gosar, A. (2017). Study of Resonance Effect Between Soil and Building in the Case of Small Basin and Large Velocity Contrast. *Engineering Geology*, 221, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.02.023>
- Hadi, A. I., Brotospito, K. S., Subardjo, & Sismanto. (2018). The Potential of Ground Amplification in

- Assessment of Seismic Risk in the City of Bengkulu. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.24246/ijpna.v3i1.1-10>
- Hakam, A., Istijono, B., & Jufri, R. (2023). Correlation of Shear Wave Velocity and Standard Penetration Test Based on Microtremor measurement for Padang City. *International Journal of GEOMATE*, 24(103), 11-18. <https://doi.org/10.21660/2023.103.3765>
- Lestari, D., Harmoko, U., & Widada, S. (2021). Determination of Engineering Bedrock Depth Based on Microtremor Array Measurements in Padang City. *Journal of Physics: Conference Series*, 1918(2), 022015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1918/2/022015>
- Lestari, D., Mase, L. Z., & Refrizon, R. (2021). Local Site Effect Analysis in Bengkulu City, Indonesia Based on Microtremor Data Measurements. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 4403–4418. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01772-z>
- Mallo, I. S., Warrick, J. A., & Natawidjaja, D. H. (2019). Geological Constraints on Seismic Hazard Mitigation in Bengkulu City, Sumatra, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 6(1), 1-18. <https://doi.org/10.17014/ijog.6.1.1-18>
- Mase, L. Z. (2020). Liquefaction Potential Analysis in Coastal Area of Bengkulu City based on CPT and SPT Data. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 52(4), 520-536. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.4.6>
- Molnar, S., et al. (2022). A Review of the Microtremor *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (MHVSR) Method. *Journal of Seismology*, 26, 653–685. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10062-9>
- Mukti, M. M., Singh, S. C., Hananto, N. D., & Permana, H. (2021). Structure and kinematics of the Sumatran Fault System in the Sunda Strait: Implications for the 2018 tsunami. *Tectonophysics*, 799, 228704. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228704>
- Muntohar, A. S. (2012). Utilization of Microtremor to Identify the Soil Dynamic Properties for Liquefaction Analysis. *International Journal of GEOMATE*, 3(2), 364-369. <https://doi.org/10.21660/2012.6.2e>
- Nakamura, Y. (2021). On the H/V Spectrum. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 21(1), 1-13. https://doi.org/10.5610/jaee.21.1_1
- Pertiwi, D., & Utama, W. (2022). Analisis Percepatan Tanah Maksimum dan Indeks Kerentanan Seismik Menggunakan Metode HVSR di Daerah Rawan Gempa. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 5(2), 98-106. <https://doi.org/10.14710/jgt.5.2.2022.98-106>
- Putra, R. R., & Nurdian, S. (2022). Identifikasi Struktur Lapisan Bawah Permukaan Menggunakan

- Metode Mikrotremor di Wilayah Pesisir Bengkulu. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 12(1), 45-53.
<https://doi.org/10.13057/ijap.v12i1.56789>
- Refrizon, R., et al. (2013). Determination of Seismic Vulnerability Index (\$K_g\$) at Assessment of Seismic Risk in the City of Bengkulu, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 5(2), 724-729.
<https://doi.org/10.21660/2013.10.3f>
- Refrizon, R., Suhendra, S., & Lestari, K. (2020). Seismic Vulnerability Index Analysis (\$K_g\$) Based on Microtremor Data in Bengkulu City. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 10(1), 34-45.
<https://doi.org/10.26740/jpfa.v10n1.p34-45>
- Saputra, A., Nugraha, A. D., & Puspito, N. T. (2024). Earthquake Hazard Mitigation Strategy for Sumatran Fault Zone: A Review of Recent Seismological Studies. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 210-235.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2291234>
- Simanjuntak, A. V. H., Mulyatno, B. S., & Setianegara, R. (2020). Analysis of Sediment Thickness and Seismic Vulnerability Index in Bandar Lampung City Using HVSr Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 538(1), 012045.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/538/1/012045>
- Suhendra, S., et al. (2020). Estimation of Shear Wave Velocity (\$V_s\$) using Microtremor Array Measurements in Bengkulu City. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 10(1), 46-56.
<https://doi.org/10.26740/jpfa.v10n1.p46-56>
- Sukmono, A., & Hendriatiningsih, S. (2020). Monitoring of Land Subsidence in Semarang City Using PSI-SAR Method and Its Correlation with Soil Characteristics. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 7(1), 35-46.
<https://doi.org/10.14710/geoplanning.7.1.35-46>
- Wang, J., Guo, Z., & Liu, J. (2021). Assessment of Site Effects Using HVSr Method and Its Correlation with Geological Conditions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140, 106456.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106456>
- Yuliyanto, G., Harmoko, U., & Widada, S. (2021). Delineasi Zona Rawan Guncangan Tanah Berdasarkan Nilai Periode Dominan di Kota Semarang. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 17(2), 67-74.
<https://doi.org/10.12962/j24604682.v17i2.10234>
- Zulfakriza, Z., Nugraha, A. D., & Widiyantoro, S. (2020). Tomographic Imaging of the Crustal Structure Beneath the Sumatran Fault System. *Geophysical Journal International*, 223(2), 1123-1135.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggaa345>