

Liquefaction Analysis Using Horizontal to Vertical Spectral Ratio in Arang Beach, Labuhan Ijuk, Sumbawa Area

Nurcahaya^{1*}, Suhayat Minardi¹, Teti Zubaidah¹

¹Magister Mitigasi Bencana, Pascasarjana, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia.

Article History

Received : April 24th, 2026

Revised : May 05th, 2026

Accepted : May 12th, 2026

*Corresponding Author:

Nurcahaya, Magister Mitigasi

Bencana, Pascasarjana,

Universitas Mataram;

Email:

cahayanursbw@gmail.com

Abstract: Indonesia's tectonic setting makes coastal areas highly vulnerable to seismic hazards, including liquefaction. This study aims to analyze the liquefaction potential in Arang Beach, Labuhan Ijuk, Sumbawa, using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) method. Microtremor data were collected at 70 measurement points and processed using Geopsy through windowing, filtering, and HVSr analysis to obtain dominant frequency (f_0) and amplification factor (A_0), followed by inversion to estimate shear wave velocity (V_s), sediment thickness (h), and Poisson's ratio (σ). The results show that f_0 ranges from 0.294–17.542 Hz and A_0 from 0.928–15.914, with low-frequency and high-amplification zones concentrated in the southern–western area, indicating thick, soft sediments. V_s values (63.486–712.48 m/s) further confirm the presence of very soft to hard subsurface layers, with high liquefaction susceptibility associated with low V_s , high σ , and thick sediments. These findings indicate that the southern–western part of the study area has the highest seismic vulnerability and liquefaction potential. This study concludes that HVSr is effective for identifying site effects and liquefaction-prone zones. The results provide a scientific basis for seismic microzonation, coastal spatial planning, and the development of earthquake-resistant infrastructure in vulnerable coastal regions.

Keywords: HVSr method; Liquefaction potential; Seismic microzonation.

Pendahuluan

Indonesia merupakan wilayah tektonik aktif yang terletak pada pertemuan tiga lempeng utama dunia, yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik (Verstappen, 2010). Interaksi antarlempeng tersebut membentuk zona subduksi yang memicu terbentuknya jalur busur kepulauan, aktivitas magmatik, patahan aktif, serta kejadian gempa bumi yang intens (Liu, 2025). Aktivitas seismik ini tidak hanya berdampak pada wilayah sumber gempa (Pezzo *et al.*, 2023), tetapi juga dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada daerah yang jauh akibat efek lokal tanah. Perbedaan tingkat kerusakan bangunan di berbagai lokasi menunjukkan bahwa karakteristik lapisan tanah memiliki peran penting dalam memodifikasi gelombang seismik (Hossain *et al.*, 2025). Lapisan tanah

lunak, khususnya, cenderung memperkuat amplitudo getaran melalui fenomena amplifikasi akibat kontras kekakuan antara batuan dasar dan sedimen permukaan (Ziar & Basari, 2026).

Salah satu pendekatan yang umum digunakan untuk mengkaji respons dinamis tanah terhadap gempa adalah metode mikrotremor dengan analisis *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) (Chen *et al.*, 2026). Metode ini memanfaatkan getaran alami tanah untuk menentukan parameter penting seperti frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), serta indeks kerentanan seismik (Wicaksana *et al.*, 2025). Parameter-parameter tersebut berkaitan erat dengan kondisi bawah permukaan (Prananda *et al.*, 2025), termasuk ketebalan sedimen dan kecepatan gelombang geser (V_s). Nilai V_s yang diperoleh dari analisis HVSr sering digunakan

untuk mengklasifikasikan kondisi tanah serta mengidentifikasi potensi penguatan gelombang seismik akibat efek lokal (Febrianti *et al.*, 2026). Oleh karena itu, metode HVSR menjadi salah satu teknik yang efektif dalam studi mikrozonasi seismik, terutama pada wilayah dengan lapisan sedimen tebal seperti daerah pesisir.

Provinsi Nusa Tenggara Barat, khususnya Pulau Sumbawa, merupakan wilayah dengan tingkat kerawanan gempa yang tinggi akibat keberadaan zona subduksi di bagian selatan dan sistem *back-arc thrust* di bagian utara (Minardi *et al.*, 2021). Kawasan pesisir seperti Pantai Arang di Desa Labuhan Ijuk memiliki karakteristik geologi berupa tanah berpasir, jenuh air, dan dekat dengan muka air tanah sehingga berpotensi mengalami likuifaksi saat terjadi gempa (Taftsoglou *et al.*, 2023). Likuifaksi merupakan fenomena hilangnya kekuatan tanah akibat peningkatan tekanan air pori yang menyebabkan tanah berperilaku seperti fluida (Wani *et al.*, 2025). Penelitian sebelumnya menunjukkan adanya lapisan bawah permukaan dengan resistivitas rendah yang mengindikasikan kondisi jenuh air dan kurang terkonsolidasi (Cicilia & Romansyah, 2025), namun belum mengkaji secara komprehensif tingkat kerentanan likuifaksi berdasarkan parameter dinamis tanah.

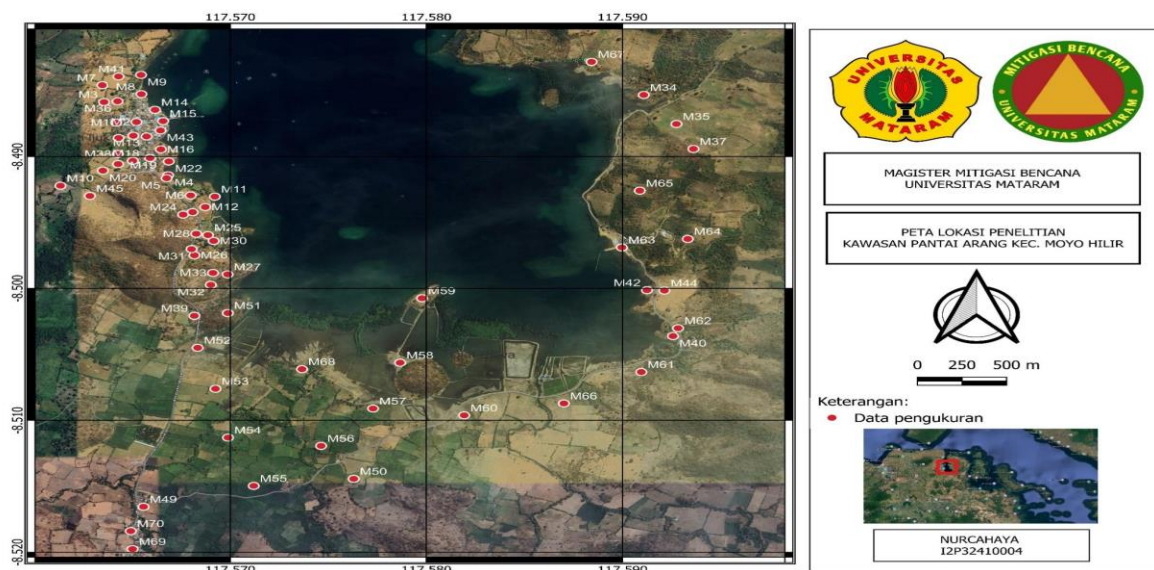
Penelitian ini penting dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih akurat

mengenai potensi likuifaksi di kawasan Pantai Arang. Penelitian ini menggunakan metode mikrotremor dengan pendekatan HVSR sebagai metode utama dalam menganalisis karakteristik dinamis tanah. Tujuan penelitian ini adalah memetakan distribusi nilai frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), kecepatan gelombang geser (V_s), ketebalan sedimen (h), serta rasio Poisson (σ) di kawasan Pantai Arang, Desa Labuhan Ijuk, Kecamatan Moyo Hilir. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah yang mendukung upaya mitigasi bencana dan perencanaan pembangunan berkelanjutan di wilayah pesisir yang rentan terhadap gempa bumi dan likuifaksi.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus hingga Desember 2025. Kegiatan pengolahan dan analisis data dilakukan di Studio Magister Mitigasi Bencana, Universitas Mataram. Sementara itu, pengambilan data lapangan dilakukan di kawasan Pantai Arang, Desa Labuhan Ijuk, Kecamatan Moyo Hilir, Kabupaten Sumbawa. Lokasi penelitian merupakan wilayah pesisir dengan karakteristik tanah berpasir dan jenuh air yang berpotensi mengalami amplifikasi gelombang seismik dan likuifaksi. Peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Desain penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksploratif-deskriptif Ahyani *et al.*, (2025), yang bertujuan untuk menganalisis karakteristik dinamis tanah berdasarkan data microtremor (Ramadhan *et al.*, 2025). Metode yang digunakan adalah Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) untuk memperoleh parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) (Shekhar *et al.*, 2026). Selanjutnya dilakukan analisis inversi kurva HVSr menggunakan pendekatan ellipticity curve untuk memperoleh parameter bawah permukaan seperti kecepatan gelombang geser (V_s), ketebalan sedimen (h), dan rasio Poisson (σ) (Farazi *et al.*, 2023). Hasil penelitian disajikan dalam bentuk peta distribusi parameter-parameter tersebut sebagai dasar analisis potensi likuifaksi di lokasi penelitian.

Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh wilayah kawasan Pantai Arang Desa Labuhan Ijuk yang memiliki karakteristik geologi pesisir. Sampel penelitian berupa titik-titik pengukuran mikrotremor yang tersebar di area penelitian dengan jumlah titik yang disesuaikan terhadap kondisi lapangan dan standar pengukuran microtremor (Louie *et al.*, 2022). Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling (Ayu *et al.*, 2025), yaitu penentuan titik pengukuran berdasarkan kondisi geologi, keterwakilan area, serta mengacu pada standar SESAME *European Research Project* (Koller *et al.*, n.d.). Variabel penelitian meliputi frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), kecepatan gelombang geser (V_s), ketebalan sedimen (h), dan rasio Poisson (σ). Data diperoleh melalui pengukuran mikrotremor menggunakan seismometer tiga komponen (UGL-3C), dilengkapi dengan GPS, antena GPS, aki sebagai sumber daya, serta perangkat lunak seperti Geopsy, ArcMap 10.8, QGIS, dan Microsoft Excel untuk pengolahan dan analisis data.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dimulai dengan tahap persiapan yang meliputi studi literatur, penentuan lokasi, dan penentuan titik pengukuran. Selanjutnya dilakukan akuisisi data mikrotremor di lapangan pada setiap titik

pengamatan dengan durasi perekaman selama 30 menit dan frekuensi sampling 100 Hz. Data yang direkam terdiri dari tiga komponen getaran, yaitu vertikal, horizontal utara-selatan, dan horizontal timur-barat. Tahap berikutnya adalah pengolahan data menggunakan software Geopsy, yang meliputi proses windowing untuk memisahkan sinyal stasioner dari noise, filtering menggunakan band-pass 0,5–15 Hz dengan filter Butterworth, serta smoothing menggunakan metode Konno-Omachi dengan koefisien bandwidth 40. Setelah itu dilakukan perhitungan spektrum H/V untuk memperoleh nilai f_0 dan A_0 . Selanjutnya dilakukan inversi kurva HVSr menggunakan modul Dinver untuk mendapatkan parameter V_s , ketebalan sedimen (h), dan rasio Poisson (σ). Tahap akhir adalah pembuatan peta distribusi parameter menggunakan ArcMap dan QGIS melalui proses interpolasi dan overlay.

Analisis Data Penelitian

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan pendekatan HVSr untuk memperoleh parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) dari kurva spektrum H/V (Zhu *et al.*, 2020). Indeks kerentanan seismik (K_g) dihitung menggunakan persamaan (Lantada *et al.*, 2009):

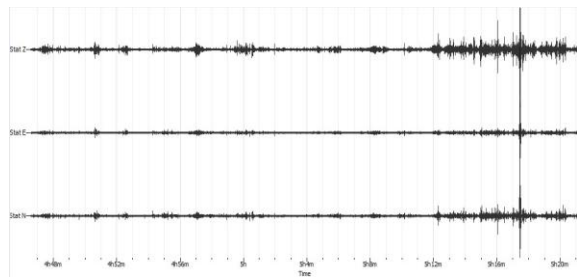
$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0}$$

Selanjutnya, kecepatan gelombang geser (V_s) dan ketebalan sedimen (h) diperoleh melalui proses inversi kurva HVSr menggunakan metode ellipticity curve dengan parameter input berupa kecepatan gelombang primer (V_p), rasio Poisson (σ), dan densitas tanah. Kriteria kecocokan model ditentukan berdasarkan nilai misfit < 3 (Zaenudin *et al.*, 2024). Data yang diperoleh kemudian diolah secara spasial menggunakan ArcMap 10.8 dan QGIS untuk menghasilkan peta distribusi f_0 , A_0 , V_s , h , dan σ . Peta-peta tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengidentifikasi zona dengan potensi likuifaksi tinggi berdasarkan kombinasi nilai frekuensi rendah, amplifikasi tinggi, dan kecepatan gelombang geser yang rendah.

Hasil dan Pembahasan

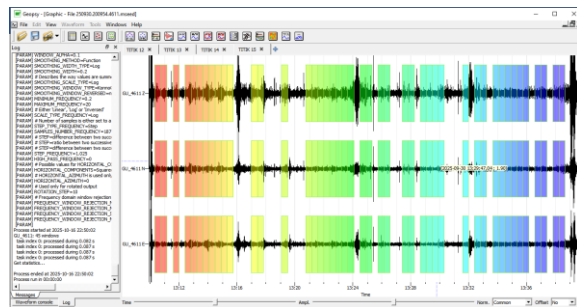
Pengolahan Data Mikrotremor

Pengolahan data mikrotremor dilakukan menggunakan metode HVSR untuk memperoleh parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) dari 70 titik pengukuran di Kawasan Pantai Arang. Setiap titik direkam selama ± 30 menit dengan tiga komponen sinyal, yaitu vertikal (Up-Down), horizontal utara-selatan (North-South), dan horizontal timur-barat (East-West). Contoh hasil rekaman mikrotremor ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rekaman mikrotremor tiga komponen Titik 15 (UD, EW dan NS).

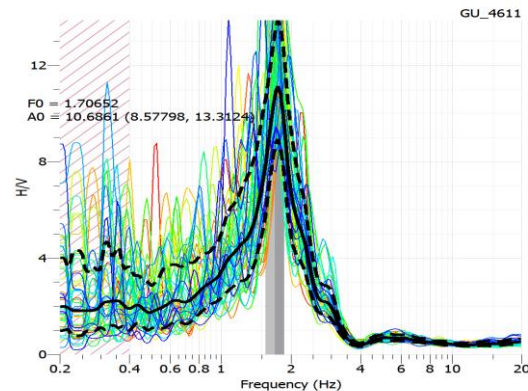
Tahapan awal pengolahan dilakukan melalui proses *windowing*, yaitu membagi sinyal menjadi beberapa segmen berdurasi 20 detik untuk memisahkan sinyal stabil dari noise. Proses ini menghasilkan sejumlah kurva HVSR dari tiap window, di mana semakin baik kualitas data maka semakin banyak window yang dapat digunakan. Contoh proses *windowing* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Windowing sinyal mikrotremor Titik 15.

Selanjutnya, kurva HVSR dihitung sebagai rasio spektrum horizontal terhadap vertikal. Kurva rata-rata HVSR ditunjukkan dengan garis hitam, sedangkan garis putus-putus

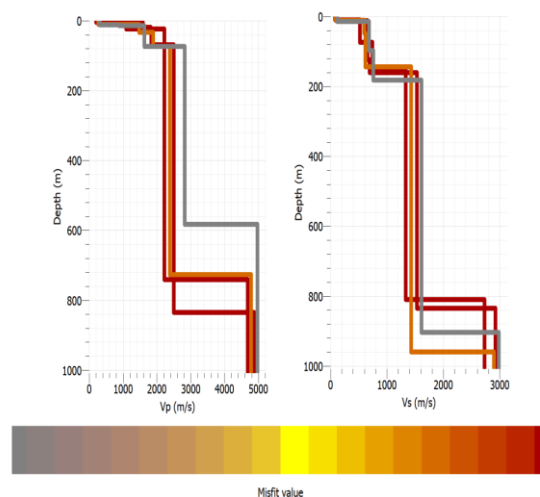
menunjukkan simpangan standar. Contoh kurva HVSR ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva HVSR titik pengukuran

Hasil analisis pada titik representatif (Man 15) menunjukkan frekuensi dominan (f_0) sebesar 1,70 Hz dan faktor amplifikasi (A_0) sebesar 10,69. Nilai frekuensi yang rendah mengindikasikan keberadaan sedimen tebal dan lunak, sedangkan nilai amplifikasi yang tinggi menunjukkan kemampuan tanah dalam memperkuat gelombang seismik. Kurva HVSR yang tajam dan konsisten juga menunjukkan adanya kontras impedansi yang kuat antara lapisan sedimen dan batuan dasar.

Proses inversi HVSR menggunakan perangkat lunak Dinver menghasilkan model bawah permukaan yang terdiri dari empat lapisan utama dengan variasi kecepatan gelombang geser. Hasil inversi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Inversi HVSR titik MAN 15

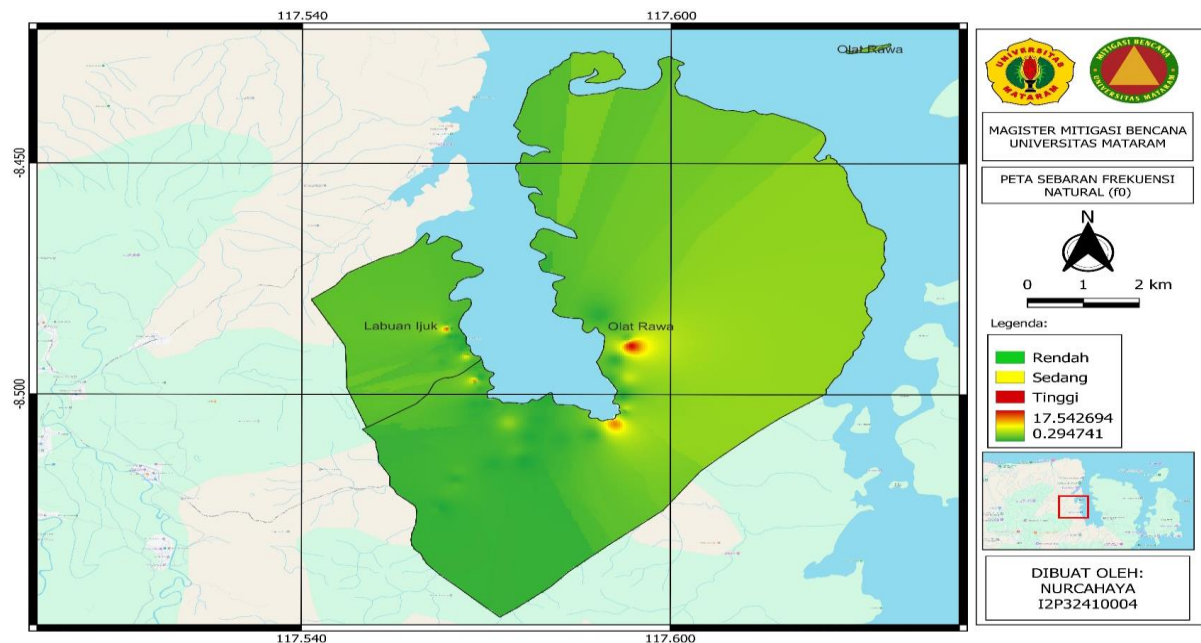
Interpretasi hasil inversi menunjukkan bahwa lapisan pertama memiliki nilai kecepatan

gelombang geser (V_s) sebesar 63,486 m/s yang mengindikasikan material sangat lunak, umumnya berupa tanah penutup atau sedimen aluvial yang belum terkonsolidasi. Lapisan kedua memiliki nilai (V_s) sebesar 214 m/s yang mencerminkan sedimen yang mulai terkompaksi, seperti pasir berlanau atau lempung yang mengalami peningkatan kepadatan. Lapisan ketiga menunjukkan nilai (V_s) sebesar 384,86 m/s yang dapat diinterpretasikan sebagai zona transisi menuju material yang lebih padat, kemungkinan berupa batuan sedimen lapuk. Sementara itu, lapisan keempat memiliki nilai (V_s) sebesar 712,48 m/s yang mengindikasikan keberadaan batuan dasar (*bedrock*) dengan

tingkat kekompakan tinggi. Secara keseluruhan, profil bawah permukaan ini memperlihatkan adanya peningkatan kekakuan material seiring bertambahnya kedalaman serta kontras impedansi yang signifikan antar lapisan, yang berperan dalam penguatan gelombang seismik di permukaan tanah (Muhammad *et al.*, 2019).

Mikrozonasi Frekuensi Dominan (f_0)

Hasil pengolahan data mikrotremor menunjukkan bahwa nilai frekuensi dominan (f_0) di wilayah penelitian berkisar antara 0,294 Hz hingga 17,542 Hz. Distribusi spasial nilai ini ditampilkan pada peta mikrozonasi frekuensi dominan pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta sebaran frekuensi dominan (f_0)

Peta tersebut menunjukkan pola distribusi yang jelas, di mana nilai frekuensi rendah mendominasi bagian selatan dan barat Desa Labuhan Ijuk, sedangkan nilai frekuensi tinggi terkonsentrasi di bagian timur, khususnya Desa Olat Rawa. Nilai frekuensi rendah (0,3–6 Hz) mengindikasikan keberadaan sedimen tebal dan lunak, yang berpotensi menghasilkan amplifikasi gelombang gempa yang tinggi. Sebaliknya, nilai frekuensi tinggi (hingga 17,5 Hz) menunjukkan kondisi tanah yang lebih keras dan sedimen yang relatif tipis.

Tabel 1, klasifikasi nilai frekuensi dominan (f_0) di Kawasan Pantai Arang menunjukkan variasi yang mencerminkan heterogenitas kondisi geologi bawah permukaan.

Nilai frekuensi dominan rendah pada rentang 1 – <2,5 Hz yang termasuk klasifikasi tanah tipe II–I tersebar pada titik M49, M52, M53, M54, M55, M56, M57, M68, M69, dan M70 yang dominan berada di bagian tengah hingga selatan Desa Labuhan Ijuk. Kondisi ini mengindikasikan keberadaan sedimen yang tebal dan bersifat lunak sehingga berpotensi tinggi terhadap amplifikasi gelombang gempa. Sementara itu, nilai frekuensi sedang pada rentang 2,5 – 6,7 Hz dengan klasifikasi tanah tipe III ditemukan pada titik M14, M15, M17, M19, M27, M33, M36, dan M41 yang berada pada zona transisi antara Labuhan Ijuk dan Olat Rawa, yang menunjukkan kondisi sedimen dengan tingkat kekompakan sedang.

Nilai frekuensi dominan tinggi pada rentang 6,7 – 17,68 Hz yang termasuk klasifikasi tanah tipe IV tersebar pada titik M34, M35, M37, M40, M60, M64, dan M67 yang dominan berada di wilayah timur laut, khususnya Desa Olat Rawa, yang mengindikasikan kondisi tanah yang lebih keras dengan ketebalan sedimen yang

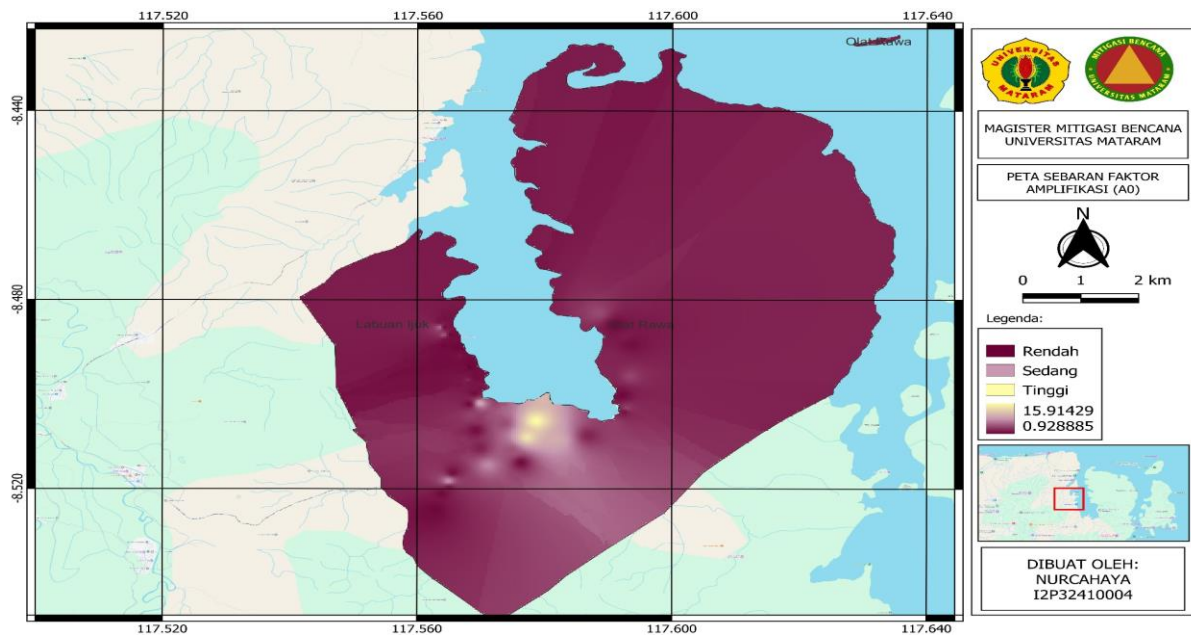
relatif tipis. Secara keseluruhan, distribusi nilai (f_0) ini menunjukkan adanya gradasi kondisi geoteknik dari zona sedimen lunak di bagian selatan menuju zona batuan yang lebih kompak di bagian timur. Implikasi langsung terhadap tingkat kerentanan wilayah terhadap penguatan gelombang seismik (Karapınar *et al.*, 2025).

Tabel 1. Klasifikasi Nilai Frekuensi Dominan (f_0)

Kategori	Rentang (Hz)	Klasifikasi Tanah	Titik Pengukuran	Sebaran Wilayah
Rendah	1 – <2,5	II–I	M49, M52, M53, M54, M55, M56, M57, M68, M69, M70	Tengah–selatan Labuhan Ijuk
Sedang	2,5 – 6,7	III	M14, M15, M17, M19, M27, M33, M36, M41	Zona transisi
Tinggi	6,7 – 17,68	IV	M34, M35, M37, M40, M60, M64, M67	Timur–laut (Olat Rawa)

Nilai faktor amplifikasi (A_0) di Kawasan Pantai Arang berkisar antara 0,928 hingga 15,914. Distribusi spasial nilai amplifikasi ditunjukkan pada Gambar 7. Peta tersebut menunjukkan bahwa nilai amplifikasi rendah mendominasi wilayah Desa Olat Rawa dan sebagian Labuhan Ijuk bagian utara, yang

mencerminkan kondisi tanah yang relatif padat. Sementara itu, nilai amplifikasi tinggi terkonsentrasi di bagian selatan Labuhan Ijuk, yang menunjukkan adanya sedimen lunak dengan potensi penguatan gelombang gempa yang besar.



Gambar 7. Peta sebaran faktor amplifikasi (A_0)

Klasifikasi nilai faktor amplifikasi (A_0) pada tabel tersebut, distribusi amplifikasi tanah di Kawasan Pantai Arang menunjukkan variasi yang mencerminkan perbedaan karakteristik material bawah permukaan. Nilai amplifikasi

rendah pada rentang 0,928 – 5,924 yang terdapat pada titik M10, M20, M41, M47, M48, dan M67 dominan tersebar di wilayah utara–barat Desa Labuhan Ijuk, yang mengindikasikan kondisi tanah yang relatif lebih padat dan memiliki

kontras impedansi yang kecil sehingga penguatan gelombang seismik cenderung rendah. Sementara itu, nilai amplifikasi sedang pada rentang 5,924 – 10,919 yang terdapat pada titik M26, M33, M51, M52, M54, dan M55 berada pada zona transisi antara Labuhan Ijuk dan Olat Rawa, yang menunjukkan keberadaan sedimen dengan tingkat kepadatan menengah serta potensi penguatan gelombang yang sedang.

Nilai amplifikasi tinggi pada rentang 10,919 – 15,914 yang terdapat pada titik M57, M58, dan M59 dominan berada di bagian selatan Desa Labuhan Ijuk, yang mengindikasikan keberadaan sedimen lunak dengan kontras impedansi yang besar terhadap batuan dasar. Sehingga berpotensi menghasilkan amplifikasi gelombang gempa yang signifikan (Hill *et al.*, 2024). Secara keseluruhan, pola distribusi ini menunjukkan bahwa wilayah selatan memiliki kerentanan seismik yang lebih tinggi dibandingkan wilayah utara barat. Karena nilai amplifikasi yang besar berkaitan langsung dengan peningkatan energi getaran di permukaan akibat efek resonansi dan perangkap gelombang pada lapisan sedimen lunak (Godin *et al.*, 2021).

Distribusi Kecepatan Gelombang Geser (V_s), Ketebalan Sedimen (h), dan Poisson's Ratio (σ)

Distribusi kecepatan gelombang geser (V_s), ketebalan sedimen (h), dan nilai Poisson's ratio (σ) diperoleh berdasarkan hasil inversi HVSR menggunakan perangkat lunak Dinver pada Geopsy. Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) di wilayah penelitian berkisar antara 63,486 m/s hingga 712,48 m/s yang menunjukkan kondisi bawah permukaan yang heterogen. Nilai V_s rendah (<180 m/s) mengindikasikan tanah sangat lunak yang dominan di bagian selatan dan barat Desa Labuhan Ijuk, sedangkan nilai V_s tinggi (>700 m/s) menunjukkan keberadaan batuan dasar yang lebih dominan di bagian timur, khususnya wilayah Desa Olat Rawa. Distribusi ini konsisten dengan hasil mikrozonasi frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0), di mana wilayah dengan V_s rendah cenderung memiliki frekuensi dominan rendah dan amplifikasi tinggi, sehingga berpotensi mengalami penguatan gelombang seismik yang lebih besar.

Ketebalan sedimen (h) dihitung berdasarkan hubungan antara frekuensi dominan (f_0) dan kecepatan gelombang geser (V_s). Hasil

analisis menunjukkan bahwa wilayah dengan frekuensi dominan rendah memiliki ketebalan sedimen yang lebih besar, sedangkan wilayah dengan frekuensi dominan tinggi memiliki sedimen yang relatif tipis. Secara spasial, bagian selatan dan barat Desa Labuhan Ijuk menunjukkan sedimen yang lebih tebal, sedangkan bagian timur memiliki sedimen yang lebih tipis, yang mengindikasikan adanya cekungan sedimen yang berpotensi memperkuat gelombang gempa.

Distribusi nilai Poisson's ratio (σ) juga menunjukkan variasi sifat elastis material bawah permukaan, di mana nilai σ yang tinggi di bagian selatan–barat mengindikasikan material lunak dan jenuh air, sedangkan nilai σ yang lebih rendah di bagian timur mencerminkan material yang lebih padat dan keras. Pola ini konsisten dengan parameter V_s , f_0 , dan A_0 , sehingga menunjukkan bahwa wilayah selatan–barat memiliki tingkat kerentanan seismik yang lebih tinggi dibandingkan wilayah timur.

Perencanaan Pembangunan Berkelanjutan di Wilayah Pesisir Rawan Gempa dan Likuifaksi

Perencanaan pembangunan berkelanjutan di wilayah pesisir Kawasan Pantai Arang perlu mempertimbangkan secara komprehensif kondisi geologi bawah permukaan yang telah dianalisis melalui metode mikrotremor HVSR. Berdasarkan hasil pengolahan data pada Gambar 2–5, karakteristik sinyal mikrotremor menunjukkan adanya kontras impedansi yang kuat antar lapisan, yang diperkuat oleh nilai frekuensi dominan rendah ($f_0 = 1,70$ Hz) dan faktor amplifikasi tinggi ($A_0 = 10,69$) pada titik representatif. Kondisi ini mengindikasikan keberadaan sedimen lunak yang tebal dan berpotensi memperkuat gelombang seismik secara signifikan. Sehingga menjadi faktor utama dalam peningkatan risiko kerusakan akibat gempa (Cvetković *et al.*, 2024).

Hasil mikrozonasi frekuensi dominan pada Gambar 6 dan klasifikasinya pada Tabel 1 menunjukkan bahwa wilayah selatan dan barat Desa Labuhan Ijuk didominasi oleh nilai frekuensi rendah ($1 - <2,5$ Hz), yang mencerminkan sedimen tebal dan lunak. Sebaliknya, wilayah timur (Desa Olat Rawa) memiliki frekuensi tinggi (6,7 – 17,68 Hz) yang menunjukkan kondisi tanah lebih keras dengan sedimen tipis. Distribusi ini penting dalam

perencanaan tata ruang, di mana zona dengan frekuensi rendah harus dibatasi untuk pembangunan infrastruktur berat karena memiliki potensi amplifikasi gempa yang tinggi dan kerentanan terhadap likuifaksi (Arab *et al.*, 2025).

Selanjutnya, distribusi faktor amplifikasi pada Gambar 7 memperkuat interpretasi tersebut, di mana nilai amplifikasi tinggi (10,919 – 15,914) terkonsentrasi di bagian selatan Labuhan Ijuk, sebagaimana ditunjukkan pada tabel klasifikasi amplifikasi. Nilai amplifikasi yang tinggi berkaitan langsung dengan keberadaan sedimen lunak yang mampu memperbesar energi gelombang gempa melalui mekanisme resonansi dan perangkap gelombang (Sreejaya *et al.*, 2025). Oleh karena itu, wilayah ini perlu diprioritaskan sebagai zona mitigasi tinggi dalam perencanaan pembangunan.

Integrasi parameter geoteknik lain seperti distribusi kecepatan gelombang geser (V_s), ketebalan sedimen (h), dan nilai Poisson's ratio (σ) juga menunjukkan pola yang konsisten. Nilai V_s rendah (<180 m/s) yang dominan di selatan–barat menunjukkan tanah sangat lunak, sedangkan V_s tinggi (>700 m/s) di wilayah timur menunjukkan keberadaan batuan dasar. Ketebalan sedimen yang besar pada zona frekuensi rendah memperkuat efek amplifikasi, sementara nilai σ yang tinggi mengindikasikan material jenuh air yang rentan terhadap likuifaksi. Kombinasi parameter ini menegaskan bahwa wilayah selatan–barat merupakan zona dengan tingkat kerentanan seismik tertinggi di kawasan penelitian.

Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, strategi pembangunan berkelanjutan di wilayah pesisir ini harus mencakup: (1) zonasi pembangunan berbasis mikrozonasi seismik dengan menghindari pembangunan padat di zona frekuensi rendah dan amplifikasi tinggi; (2) penerapan desain bangunan tahan gempa yang disesuaikan dengan frekuensi dominan lokal untuk menghindari resonansi struktur–tanah; (3) konservasi ekosistem pesisir seperti mangrove untuk meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi dampak likuifaksi; serta (4) penguatan sistem mitigasi bencana berbasis masyarakat. Dengan demikian, pemanfaatan data mikrotremor yang ditampilkan pada Gambar 2–7 dan Tabel 1 menjadi dasar ilmiah yang kuat dalam mendukung perencanaan pembangunan

pesisir yang berkelanjutan, adaptif, dan tangguh terhadap bahaya gempa bumi dan likuifaksi

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa kawasan Pantai Arang, Desa Labuhan Ijuk, memiliki tingkat kerentanan seismik dan potensi likuifaksi yang bervariasi berdasarkan karakteristik dinamis tanah hasil analisis HVSR. Nilai frekuensi dominan (f_0) yang rendah, faktor amplifikasi (A_0) yang tinggi, serta kecepatan gelombang geser (V_s) yang rendah di bagian selatan–barat mengindikasikan keberadaan sedimen tebal, lunak, dan jenuh air yang sangat rentan terhadap penguatan gelombang seismik dan likuifaksi. Sebaliknya, wilayah timur menunjukkan kondisi tanah yang lebih stabil dengan sedimen tipis dan batuan yang lebih kompak. Dengan demikian, metode HVSR terbukti efektif dalam mengidentifikasi zona rawan likuifaksi, serta dapat dijadikan dasar ilmiah dalam perencanaan tata ruang, mitigasi bencana, dan pembangunan infrastruktur tahan gempa di wilayah pesisir.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Magister Mitigasi Bencana, Pascasarjana Universitas Mataram atas fasilitas dan dukungan akademik yang diberikan selama proses penelitian. Apresiasi juga disampaikan kepada tim lapangan dan masyarakat Desa Labuhan Ijuk yang telah membantu dalam proses pengambilan data. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas kontribusi, dukungan, dan kerja sama yang sangat berarti dalam penyelesaian penelitian ini.

Referensi

Ahyani, D., Muhklis, A., Priyambodo, B., & History, A. (2025). Indonesian Journal of Tropical Biology Lombok Marine Aquaculture Development Centre. *IJTB*, 1(2).

- <https://journals.widhatulfaeha.id/index.php/ijtb>
- Arab, O., Mekouar, S., Mastere, M., Cabieces, R., & Collantes, D. R. (2025). Improved Liquefaction Hazard Assessment via Deep Feature Extraction and Stacked Ensemble Learning on Microtremor Data. *Applied Sciences*, 15(12), 6614. <https://doi.org/10.3390/app15126614>
- Ayu, H., Wardatullatifah S, I. S., Hidayat, S., & Jannah, M. (2025). Pineapple Waste Processing Design as Functional Food to Support Agrotourism in East Lombok, Indonesia. *Indonesian Journal of Tropical Biology*, 1(3), 122–130. <https://doi.org/10.65622/ijtb.v1i3.192>
- Chen, C.-T., Wen, Y.-Y., & Su, C.-M. (2026). HVSR-Based Assessment of Soil Nonlinear Behavior During Strong Ground Motions: Insights from the 3 April 2024 Hualien Earthquake Sequence and Regional Comparisons. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 116(1), 133–148. <https://doi.org/10.1785/0120250106>
- Cicilia, S., & Romansyah, E. (2025). Potential For Banana Agrotourism Development in Pakuan, Narmada, West Lombok, Indonesia. *Indonesian Journal of Tropical Biology*, 1(3), 108–115. <https://doi.org/10.65622/ijtb.v1i3.188>
- Cvetković, V. M., Renner, R., Aleksova, B., & Lukić, T. (2024). Geospatial and Temporal Patterns of Natural and Man-Made (Technological) Disasters (1900–2024): Insights from Different Socio-Economic and Demographic Perspectives. *Applied Sciences*, 14(18), 8129. <https://doi.org/10.3390/app14188129>
- Farazi, A. H., Hossain, Md. S., Ito, Y., Piña-Flores, J., Kamal, A. S. M. M., & Rahman, Md. Z. (2023). Shear wave velocity estimation in the Bengal Basin, Bangladesh by HVSR analysis: implications for engineering bedrock depth. *Journal of Applied Geophysics*, 211, 104967. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104967>
- Febrianti, W., Sumarti, N., Nasution, A. S., Fitriawati, A., Siregar, D. E. P., & S, Y. S. (2026). Optimizing ESG-Constrained Mean-Variance Portfolio using Spiral Optimization Algorithm. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, 6(2), 1146–1159. <https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.381>
- Godin, O. A., Deal, T. J., & Dong, H. (2021). Physics-based characterization of soft marine sediments using vector sensors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(1), 49–61. <https://doi.org/10.1121/10.0002975>
- Hill, E. M., McCaughey, J. W., Switzer, A. D., Lallemand, D., Wang, Y., & Sathikumar, S. (2024). Human amplification of secondary earthquake hazards through environmental modifications. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(6), 463–476. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00551-z>
- Hossain, A. S. M. F., Saeidi, A., Salsabili, M., Nastev, M., Suescun, J. R., & Bayati, Z. (2025). A Review of Parameters and Methods for Seismic Site Response. *Geosciences*, 15(4), 128. <https://doi.org/10.3390/geosciences15040128>
- Koller, M. G., Chatelain, J.-L., Guillier, B., Duval, A.-M., Atakan, K., Lacave, C., & Bard, P.-Y. (n.d.). *3th World Conference on Earthquake Engineering Practical User Guidelines And Software For The Implementation Of The H/V Ratio Technique: Measuring Conditions, Processing Method And Results Interpretation*.
- Lantada, N., Pujades, L. G., & Barbat, A. H. (2009). Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison. *Natural Hazards*, 51(3), 501–524. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9212-4>
- Liu, S. (2025). Transformational role in arc-shaped subduction orogenesis. *Science China Earth Sciences*, 68(12), 3950–3965. <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1531-5>
- Louie, J. N., Pancha, A., & Kissane, B. (2022). Guidelines and pitfalls of refraction microtremor surveys. *Journal of Seismology*, 26(4), 567–582.

- <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10020-5>
- Minardi, S., Mudyanto, A., & Hiden, H. (2021). Subsurface Structure Models Of Sumbawa Island And Flores Back Arc Thrust Based On Gravity Data. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 7(3), 414–421. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v7i3.826>
- Muhammad, Lim, C. W., & Reddy, J. N. (2019). Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium. *Engineering Structures*, 188, 440–451. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.046>
- Pezzo, G., Billi, A., Carminati, E., Conti, A., De Gori, P., Devoti, R., Lucente, F. P., Palano, M., Petracchini, L., Serpelloni, E., Tavani, S., & Chiarabba, C. (2023). Seismic source identification of the 9 November 2022 Mw 5.5 offshore Adriatic sea (Italy) earthquake from GNSS data and aftershock relocation. *Scientific Reports*, 13(1), 11474. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38150-5>
- Prananda, M., Mukhlis, A., & Alim, S. (2025). Effects of Light Spectrum Variation on Biomass Development of *Caulerpa lentillifera*. *Indonesian Journal of Tropical Biology*, 1(3), 156–162. <https://doi.org/10.65622/ijtb.v1i3.147>
- Ramadhan, Y. D., Situmeang, A. D., Saputra, M. R., Cholisin, S. N., Asyfiya, D. Z., Safrian, A. H., Fahmi, M. N., Madlazim, M., & Realita, A. (2025). Analysis Of Soil Dynamics And Ground Movement Vulnerability Using The Hvsr Method Based On Microtremor Measurements In The Sempu Area, Pasuruan. *Indonesian Physical Review*, 9(1), 79–93. <https://doi.org/10.29303/ipr.v9i1.561>
- Sanrı Karapınar, I., Özsoy Özbay, A. E., Kutlu, Z. N., Yazgan, A. U., & Kılıç, İ. E. (2025). Seismic vulnerability analysis incorporating local site amplification effects in shallow, varying bedrock depths. *Natural Hazards*, 121(13), 16013–16032. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07417-7>
- Shekhar, S., Tiwari, A., G.P, S., & J.L, G. (2026). Seismic hazard mapping in Gorakhpur, India: A multi parametric approach using predominant frequency, amplification and engineering bed rock depth. *The Journal of Indian Geophysical Union*, 30(1), 45–58. [https://doi.org/10.71122/JIGU.30\(1\)2026.005](https://doi.org/10.71122/JIGU.30(1)2026.005)
- Sreejaya, K. P., Behera, S. N., & Raghukanth, S. T. G. (2025). Effect of basin geometry in seismic wave amplification. *Journal of Earth System Science*, 134(3), 166. <https://doi.org/10.1007/s12040-025-02616-z>
- Taftoglou, M., Valkaniotis, S., Papatthanassiou, G., & Karantanellis, E. (2023). Satellite Imagery for Rapid Detection of Liquefaction Surface Manifestations: The Case Study of Türkiye–Syria 2023 Earthquakes. *Remote Sensing*, 15(17), 4190. <https://doi.org/10.3390/rs15174190>
- Verstappen, H. Th. (2010). Indonesian Landforms and Plate Tectonics. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(3), 197–207. <https://doi.org/10.17014/ijog.5.3.197-207>
- Wani, K. M. N. S., Ahmad, N., Kashani, S. N. F., Muzafar, Z., Gul, N., & Kumar, R. (2025). Advancements in Liquefaction Mitigation Techniques for Soil Improvement: A Comprehensive Review. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-025-00649-7>
- Wicaksana, D. S., Warnana, D. D., & Rochman, J. P. G. N. (2025). Identification of Seismic Vulnerability for Foundation Design at the 500 kV Bangil Substation Using the Microtremor Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1551(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1551/1/012045>
- Zaenudin, A., Farduwin, A., Boy Darmawan, G. I., & Karyanto. (2024). Shear wave velocity model using HVSR inversion beneath Bandar Lampung City. *Earthquake Science*, 37(4), 337–351. <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.04.004>
- Zhu, C., Pilz, M., & Cotton, F. (2020). Evaluation of a novel application of earthquake HVSR in site-specific amplification estimation. *Soil Dynamics*

and Earthquake Engineering, 139, 106301.

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106301>

Ziar, A., & Basari, E. (2026). Comprehensive assessment of ground motion amplification

in stratified soils with different layer configurations and types. *Scientific Reports*, 16(1), 5223. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-35581-8>