p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 2 Tahun 2026, hal 352-363

ANALISIS KERENTANAN TANAH LINGKUNGAN FMIPA UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA MENGGUNAKAN METODE MIKROTREMOR DENGAN ANALISIS *HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSR)*

[1)]Divana Zumrotul Asyfiya', [2)] Arie Realita, [3)] Muhammad Nurul Fahmi

[1)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: divanazumrotul.22019@mhs.unesa.ac.id
[2)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id
[3)] Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadfahmi@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik dinamika tanah di lingkungan FMIPA Universitas Negeri Surabaya menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (*HVSR*) berdasarkan data mikrotremor. Parameter yang dianalisis meliputi frekuensi natural (f_0), faktor amplifikasi (A_0), indeks kerentanan tanah (Kg), serta *ground shear-strain* (γ), serta digunakan untuk menyusun peta mikrozonasi kegempaan. Data diperoleh dari 12 titik pengukuran yang tersebar di wilayah penelitian. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai frekuensi natural berada pada rentang 0,928–1,131 Hz yang mengindikasikan dominasi tanah lunak hingga sedang. Nilai faktor amplifikasi berada pada rentang 1,936–3,653, sedangkan indeks kerentanan tanah (Kg) berada pada rentang 3,313–12,705. Nilai *ground shear-strain* (γ) berada pada orde 10^{-3} yang menunjukkan kondisi deformasi tanah pada tingkat menengah. Nilai parameter *HVSR* tertinggi ditemukan pada titik FMIPA 9 dan FMIPA 2 yang menunjukkan potensi kerentanan tinggi terhadap penguatan gelombang seismik, sedangkan nilai terendah terdapat pada titik FMIPA 1 dan FMIPA 10 yang mencerminkan kondisi tanah yang relatif lebih stabil. Hasil pemetaan mikrozonasi menunjukkan bahwa wilayah FMIPA UNESA didominasi oleh tingkat kerentanan sedang hingga tinggi. Zona kerentanan tinggi terdapat pada titik FMIPA 9 dan FMIPA 2, zona sedang pada titik FMIPA 5, 7, 8, dan 12, serta zona rendah pada titik FMIPA 3, 4, dan 6.

Kata Kunci: Amplifikasi, Frekuensi natural, *HVSR,* Indeks Kerentanan Tanah, *Ground Shear-strain*, Mikrotremor.

Abstract

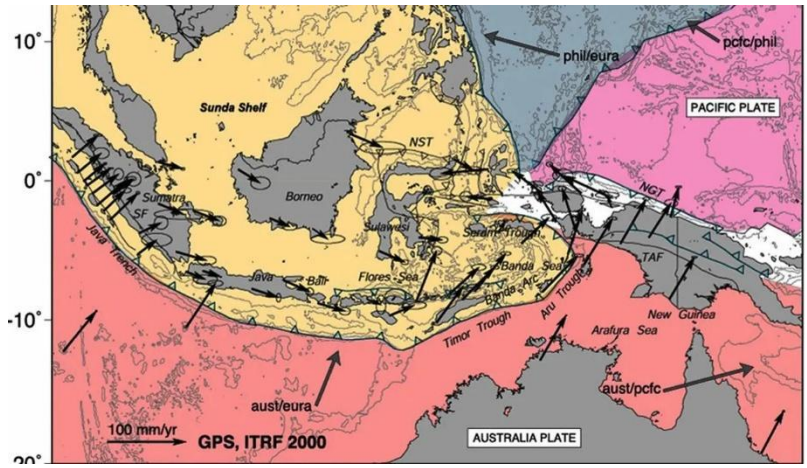
This study analyze the characteristics of soil dynamics in the FMIPA environment of the State University of Surabaya using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method based on microtremor data. The parameters analyzed included natural frequency (f_0), amplification factor (A_0), soil susceptibility index (Kg), and ground shear-strain (γ), and were used to compile seismic microzoning maps. Data were obtained from 12 measurement points spread across the research area. The results of the analysis showed that the natural frequency value was in the range of 0.928–1.131 Hz which indicated the dominance of soft to medium soils. The value of the amplification factor ranges from 1.99–3.65, while the soil vulnerability index (Kg) is in the range of 3.313–12.705. The value of the ground shear-strain (γ) is on the order of 10^{-3} which indicates soil deformation conditions at an intermediate level. The highest HVSR parameter values were found at FMIPA 9 and FMIPA 2 points which showed high potential vulnerability to seismic wave amplification, while the lowest values were found at FMIPA 1 and FMIPA 10 points which reflected relatively more stable soil conditions. The results of microzoning mapping showed that the FMIPA UNESA area was dominated by medium to high levels of vulnerability. The high vulnerability zone is found at FMIPA 9 and FMIPA 2, the medium zone at FMIPA 5, 7, 8, and 12, and the low zone at FMIPA points 3, 4, and 6.

Keywords: *Microtremors, HVSR, Natural Frequency, Amplification, Soil Vulnerability Index, Ground Shear-strain.*

p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

I. PENDAHULUAN

Indonesia berada di Lokasi pertemuan tiga lempeng aktif di dunia, menyebabkan negara ini berada di zona subduksi aktif yang ditandai dengan frekuensi tinggi gempa tektonik dan gempa vulkanik serta Indonesia termasuk dalam *ring of fire* (Tupper *et al*., 2004; Aulady *et al*., 2021; Riqullah, 2023). Jawa Timur terletak pada zona subduksi *Megathrust Jawa* segmen Jateng-Jatim (Erlangga, 2020; Ariyanto *et al*., 2021; Widada *et al*., 2022). Menurut PuSGeN (2017). Jawa Timur berada pada jalur Sesar Baribis-Kendeng segmen Cepu, Waru, dan Surabaya (Koulali *et al*., 2016; Koulali *et al*., 2017; Chairil *et al*., 2025) yang memicu adanya gempa berskala tinggi terjadi di Surabaya dan sekitarnya. Kondisi geologis Surabaya yang sebagian besar terdiri dari dataran aluvial dengan endapan tanah muda yang berpotensi memperkuat amplifikasi getaran seismik saat terjadi gempa (Tawakal *et al*., 2020; Ayani *et al*., 2021; Fahrizi & Saifuddin, 2023; Gustono *et al*., 2023). Kondisi ini diperkuat dengan adanya data USGS yang mencatat sumber gempa bumi yang pernah terjadi di Kota Surabaya memiliki magnitudo sebesar 4,3 *Mw* di darat dengan kedalaman 10 km pada tahun 2022 (USGS, 2022).



Gambar 1. Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik (Augesti, 2019).

Sebagai salah satu pusat pendidikan tinggi di Surabaya, Universitas Negeri Surabaya (UNESA) memiliki peran strategis. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) yang terletak di kawasan kampus Ketintang merupakan area dengan aktivitas akademik dan dan kepadatan infrastruktur yang sangat tinggi. Lokasi ini juga berada pada di atas tanah aluvial muda yang berpotensi meningkatkan amplifikasi gelombang seismik serta berada pada jalur sesar kendeng segmen Waru-Surabaya (Harnindra *et al*., 2017; Alam *et al*., 2018; Harsolumakso *et al*., 2019; Moechtar, 2021; Riastama *et al*., 2022). Oleh karena itu, penelitian mengenai karakteristik tanah di kawasan FMIPA UNESA menjadi penting untuk mendukung upaya mitigasi risiko bencana dan perencanaan infrastruktur yang lebih aman terhadap gempa bumi (Novtrisa *et al*., 2025; Maulana *et al*., 2024). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai kondisi respons tanah terhadap guncangan seismik serta dapat memberikan pengaruh terhadap peningkatan pemahaman dan kesadaran dalam upaya peningkatan mitigasi bencana serta mendukung terciptanya infrastruktur pendidikan yang aman sekaligus mengurangi potensi kerugian akibat bencana di wilayah Surabaya.

Karakteristik dinamis tanah terhadap getaran seismik dapat dianalisis melalui parameter dinamis tanah seperti frekuensi natural (f_0), faktor amplifikasi (A_0), indeks kerentanan tanah (K_g), serta *ground shear-strain* (γ), yang dapat diestimasikan dengan metode mikrotremor dengan analisis *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (*HVSR*) (Nakamura, 1989; Konno & Ohmachi, 1998; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006; Kumar & Mahajan, 2020). Parameter tersebut memberikan gambaran mengenai kemampuan tanah dalam memperkuat amplifikasi

getaran gelombang seismik serta tingkat deformasi tanah (Druwati, 2021; Wang *et al*., 2019; Liu *et al*., 2025). Berdasarkan penjabaran tersebut, permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana nilai frekuensi natural (f_0), faktor amplifikasi (A_0), indeks kerentanan tanah (Kg) dan *ground shear-strain* (γ) di wilayah FMIPA Universitas Negeri Surabaya, serta bagaimana pemetaan mikrozonasi kegempaan berdasarkan parameter *HVSR* di FMIPA Universitas Negeri Surabaya.

Sejumlah penelitian mengenai karakteristik tanah menggunakan metode mikrotremor sebelumnya telah dilakukan, penelitian yang dilaukan oleh Akbar *et al* (2024) masih bersifat makro dan Dewi *et al*. (2023) dengan titik pengukuran terbatas dengan jarak pengukuran relatif longgar (200-500 m), sehingga hasil yang diperoleh kurang representatif dan berpotensi tidak menangkap variasi spasial frekuensi natural, amplifikasi, dan indeks kerentanan tanah (SESAME, 2004). Penelitian ini difokuskan di lingkungan FMIPA Universitas Negeri Surabaya agar dapat menjadi model mikrozonasi untuk kawasan Pendidikan di kota besar lainnya. Dengan memahami interaksi antara karakteristik tanah, amplifikasi, dan risiko bangunan, penelitian ini mendukung mitigasi risiko gempa baik skala lokal maupun regional (Novtrisa *et al*., 2025; Maulana *et al*., 2024).

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan kuantitatif deskriptif dengan pendekatan komputasi geofisika. Pengambilan data dilakukan di lingkungan FMIPA UNESA dengan metode mikrotremor. Data yang digunakan berupa rekaman gelombang mikroseismik (*ambient noise*) lalu diolah menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Analisis HVSR dilakukan dengan membandingkan rasio komponen horizontal dan vertikal sinyal mikrotremor untuk mengidentifikasi karakteristik lapisan sedimen serta kondisi geoteknik wilayah penelitian (Nakamura, 1989; 2000; 2009). Prinsip dasar ini kemudian disempurnakan oleh penelitian SESAME (2004), yang menegaskan bahwa teknik *HVSR* efektif untuk pemetaan mikrozonasi seismik dengan tingkat akurasi tinggi.



Gambar 2. Lokasi Pengambilan data

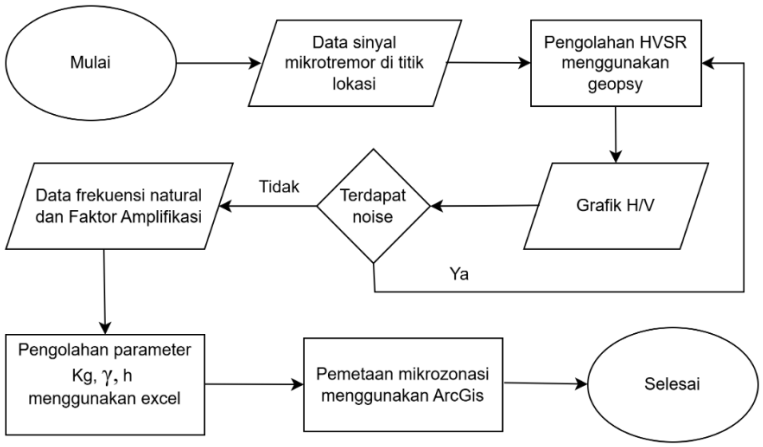
B. Variabel Operasional Penelitian

Dalam penelitian ini, variabel yang dimanipulasi adalah titik perekaman yang dipilih sebagai lokasi pengambilan data. Sementara itu, kondisi lingkungan, waktu pengambilan data, serta durasi perekaman dijaga sebagai variabel kontrol agar hasil yang diperoleh tetap konsisten dan dapat dibandingkan. Adapun variabel respon dalam penelitian ini berupa sinyal mikrotremor yang direkam pada tiga komponen utama, yaitu sumbu EW (timur–barat), NS (utara–selatan), dan Z (vertikal).

C. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini diawali dengan penyusunan desain pengambilan data yang meliputi jumlah dan distribusi titik pengukuran di lingkungan FMIPA UNESA. Titik pengukuran ditentukan dengan mempertimbangkan kondisi litologi setempat, luas area penelitian, serta tujuan penelitian yang berfokus pada karakterisasi mikrotremor di lingkungan FMIPA UNESA. Interval antar titik ditetapkan sekitar 50 m sehingga diperoleh 12 titik pengukuran yang tersebar merata pada area penelitian. Jumlah titik tersebut dipilih karena dinilai memadai untuk merepresentasikan kondisi tanah pada kawasan penelitian yang relatif terbatas dan memiliki kondisi geologi permukaan yang relatif homogen. Sesuai pedoman SESAME (2004), kepadatan titik pengukuran disesuaikan dengan karakteristik lokasi dan tujuan survei, bukan berdasarkan jumlah titik minimum tertentu. Namun demikian, hasil interpolasi spasial tetap memiliki keterbatasan karena nilai pada area di antara titik pengukuran merupakan hasil estimasi sehingga ketelitiannya dipengaruhi oleh distribusi dan kerapatan titik pengamatan. Pengambilan data dilakukan dengan interval sampling 1/1000 detik dengan durasi perekaman 20 menit pada setiap titik. Perekaman mikrotremor dilakukan dengan meletakkan seismograf pada permukaan tanah yang stabil serta dengan memperhatikan kondisi lingkungan untuk meminimalisir gangguan eksternal seperti aktivitas manusia, lalu lintas, angin, maupun sumber getaran non-seismik lainnya agar sinyal yang terekam dapat merepresentasikan kondisi tanah setempat.

D. Teknik Pengolahan Data



Gambar 3. Flowchart Penelitian

Pengolahan data dilakukan dengan mengumpulkan data sinyal mikrotremor pada setiap titik pengukurna, lalu diolah dengan *software Geopsy*. Proses pengolahan dilakukan dengan metode *Fast Fourier Transform* (*FFT*) untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi, selanjutnya dilakukan proses *smoothing* menggunakan bandwith 40 untuk menghaluskan kurva spektrum. Kurva H/V yang diperoleh selanjutnya dianalisis dengan metode HVSR dengan membandingkan rasio komponen horizontal dengan komponen vertikal (Nakamura, 1989; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006). Secara matematis dapat dituliskan sebagai:

$$HVSR(f) = \frac{\sqrt{H_{NS}^2 + H_{EW}^2}}{2V(f)} \quad (1)$$

Pada proses ini juga dilakukan windowing untuk membagi sinyal menjadi beberapa segmen waktu untuk memilih data yang stabil serta menghilangkan noise yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Dari kurva HVSR yang sudah di validasi dengan kriteria SESAME (2004) diperoleh dua parameter penting berupa frekuensi natural (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) (Nakamura, 1989; Konno & Ohmachi, 1998). Parameter tersebut kemudian digunakan untuk mengitung indeks kerentanan tanah (*Kg*), *ground shear-strain* (γ), serta estimasi ketebalan lapisan (h) dengan proses perhitungan menggunakan Microsoft excel. Hasil perhitungan

tersebut selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk peta mikrozonasi kerentanan tanah menggunakan ArcGis, sehingga distribusi tingkat kerentanan tanah di wilayah penelitian dapat ditampilkan secara spasial.

Data mikrotremor yang telah direkam selanjutnya diolah menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) untuk memperoleh nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). Berdasarkan kedua parameter tersebut kemudian dihitung indeks kerentanan seismik (K_g) menggunakan Persamaan (2).

$$Kg = \frac{A_0}{F_0} \tag{2}$$

Nilai *ground shear strain* (γ) dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$\gamma = \left(\frac{{A_g}^2}{F_g}\right) \times \left(\frac{a_b}{(\pi^2 C_b)}\right) \tag{3}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil

Analisis kerentanan tanah di lingkungan FMIPA UNESA dilakukan menggunakan analisis HVSR berdasarkan perekaman data mikrotremor untuk memahami karakteristik dinamis tanah terhadap gelombang seismik (Nakamura, 1989; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006). Wilayah surabaya didominasi oleh endapan aluvial muda yang berpotensi mengalami penguatan saat terjadi gempa akibat sifat tanah yang relatif lunak dan belum terkonsolidasi sempurna (Harnindra *et al*., 2017; Alam *et al*., 2018; Harsolumakso *et al*., 2019; Berghuis *et al*., 2022). Pengukuran dengan seismograf dilakukan pada 12 titik pengukuran untuk merekam getaran mikroseismik (*ambient noise*), yang kemudian dianalisis untuk memperoleh parameter frekuensi natural (f0), faktor amplifikasi (A0), indeks kerentanan tanah (Kg), serta *ground shear-strain* (γ) Konno & Ohmachi, 1998; SESAME, 2004; Demulawa & Druwati, 2021; Wang *et al*., 2019), seperti pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Pengolahan Data Mikrotremor Lingkungan FMIPA UNESA

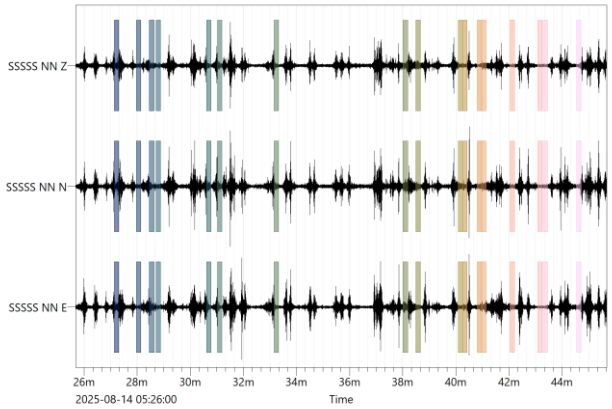
TITIK	f_0	A_0	Kg	Υ (10^{-3})	h (m)
FMIPA 1	1,131	1,936	3,313	1,884	68,472
FMIPA 2	0,951	3,223	10,917	6,210	48,888
FMIPA 3	1,025	2,764	7,458	4,242	52,926
FMIPA 4	1,103	2,174	4,284	2,437	62,484
FMIPA 5	1,025	2,850	7,926	4,508	51,340
FMIPA 6	1,050	2,592	6,397	3,639	55,069
FMIPA 7	1,025	2,557	6,380	3,629	57,222
FMIPA 8	1	2,371	5,624	3,199	63,246
FMIPA 9	1,050	3,653	12,705	7,227	39,077
FMIPA 10	0,928	1,997	4,298	2,444	80,856
FMIPA 11	0,975	2,328	5,558	3,161	66,024
FMIPA 12	1	2,722	7,412	4,216	55,096

Berdasarkan hasil pengolahan data mikrotremor menggunakan metode HVSR pada 12 titik pengukuran di kawasan FMIPA UNESA, diperoleh nilai frekuensi natural (f_0) pada rentang 0,928–1,131 Hz, yang menunjukkan dominasi kondisi tanah lunak hingga sedang (Nakamura, 1989; Pang *et al*., 2018; Zhou *et al*., 2025). Frekuensi terendah terdapat pada FMIPA 10 (0,928 Hz), sedangkan tertinggi pada FMIPA 1 (1,131 Hz), titik yang memiliki nilai frekuensi natural rendah seperti FMIPA 10 mencerminkan variasi ketebalan lapisan sedimen yang relative tebal dengan posisi batuan dasar yang dalam. Kondisi ini berpotensi meningkatkan amplifikasi gelombang seismik ketika gempa bumi terjadi, lapisan sedimen lunak cenderung memperkuat getaran tanah (Kanai, 1983; Jeon *et al*., 2025; Zhou *et al*., 2025). Sementara itu, titik yang memiliki nilai frekuensi alami yang cenderung tinggi, seperti FMIPA 1 menunjukkan karakteristik tanah yang relative lebih kaku atau lapisan sedimen yang lebih tipis, sehingga respons tanah terhadap gelombang seismik cenderung lebih kecil dibandingkan area dengan frekuensi rendah.

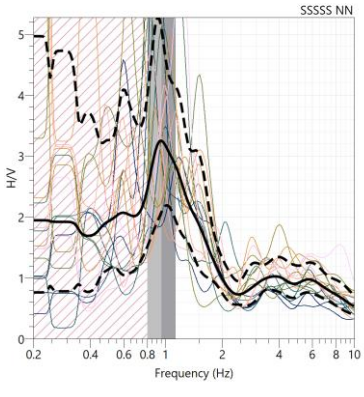
Selain itu, nilai faktor amplifikasi (A_0) dan indeks kerentanan tanah (Kg) yang tinggi pada beberapa titik pengukuran, seperti FMIPA 9 (A_0 = 3,653; Kg = 12,705) dan FMIPA 2 (A_0 = 3,223; Kg = 10,917), semakin memperkuat indikasi bahwa lokasi-lokasi tersebut memiliki potensi yang lebih besar dalam memperkuat gelombang seismik (Nakamura, 1989; Konno & Ohmachi, 1998). Nilai parameter regangan geser tanah (γ) yang relatif tinggi pada titik-titik tersebut juga menunjukkan bahwa lapisan tanah memiliki respons dinamis yang lebih besar terhadap getaran, sehingga berpotensi mengalami deformasi ketika menerima beban dinamis seperti gempa bumi (Wang *et al*., 2019; Liu *et al*., 2025; Panzera *et al*., 2020). Menurut beberapa penelitian, nilai Kg > 6 dapat dikategorikan sebagai daerah dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap fenomena resonansi dan amplifikasi gelombang seismik, sehingga memerlukan perhatian dalam perencanaan struktur bangunan dan upaya mitigasi bencana (Druwati, 2021).

Selain itu, estimasi ketebalan lapisan sedimen (h) yang diperoleh dari analisis HVSR menunjukkan adanya variasi antar titik pengukuran. Ketebalan sedimen terbesar diperoleh pada titik FMIPA 10 sebesar 80,856 m, sedangkan titik FMIPA 9 menunjukkan ketebalan sebesar 39,077 m. Perbedaan tersebut mengindikasikan adanya variasi kondisi bawah permukaan di kawasan penelitian yang kemungkinan dipengaruhi oleh perubahan ketebalan endapan sedimen maupun heterogenitas geologi lokal. Mengingat kawasan Surabaya secara umum tersusun oleh endapan aluvial Kuarter yang memiliki ketebalan bervariasi, variasi nilai ketebalan sedimen antar lokasi masih dapat dijelaskan secara geologis. Namun demikian, nilai ketebalan sedimen pada penelitian ini merupakan hasil estimasi berdasarkan metode HVSR sehingga masih memerlukan validasi menggunakan data bawah permukaan, seperti *borehole log*, MASW, atau survei geolistrik, untuk meningkatkan tingkat kepercayaannya. Hasil analisis ini diperoleh melalui pengolahan sinyal menggunakan metode HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) yang menghasilkan kurva spektral untuk menentukan nilai frekuensi natural dan amplifikasi pada setiap titik pengukuran (Nakamura, 1989; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006).

Penemuan ini konsisten dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa daerah dengan frekuensi natural rendah dan nilai amplifikasi yang tinggi cenderung memiliki potensi penguatan gelombang seismik yang lebih besar (Kanai, 1983; Zhou *et al*., 2025). Kondisi tersebut umumnya ditemukan pada wilayah dengan lapisan sedimen yang tebal dan tidak terkonsolidasi, yang secara geofisika memiliki kemampuan memperkuat respons getaran tanah (Mufida *et al*., 2013; Harnindra *et al*., 2017). Oleh karena itu, hasil penelitian ini memberikan informasi penting mengenai karakteristik dinamika tanah di kawasan FMIPA UNESA, yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam kajian mikrozonasi seismik serta perencanaan pembangunan yang lebih aman terhadap potensi bahaya gempa bumi (Nakamura, 2000; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006).



Gambar 4. Proses windowing pada titik FMIPA 2.



Gambar 5. Hasil Kurva HVSR Titik FMIPA 2.

Pemrosesan sinyal HVSR pada titik FMIPA 2 diawali dengan proses windowing seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pada tahap ini data sinyal mikrotremor dibagi menjadi 28 window dengan overlap sebesar 5% untuk memisahkan sinyal menjadi beberapa segmen waktu yang lebih kecil. Pola sinyal

pada ketiga komponen, yaitu vertikal (Z), utara–selatan (N), dan timur–barat (E), terlihat cukup stabil tanpa adanya lonjakan amplitudo yang signifikan. Setiap blok warna pada *window* menunjukkan segmen waktu yang dianalisis. Dalam proses ini hanya bagian sinyal yang relatif konstan dan memiliki noise rendah yang dipilih untuk dianalisis. Dalam proses ini hanya bagian sinyal yang relatif konstan dan memiliki tingkat noise rendah yang dipilih untuk dianalisis lebih lanjut. Segmen-segmen sinyal yang telah dipilih tersebut kemudian diolah menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengubah data dari domain waktu menjadi domain frekuensi, sehingga komponen frekuensi dominan dari sinyal mikrotremor dapat diidentifikasi dan digunakan dalam analisis HVSR (yons, 2001; Konno & Ohmachi, 1998).

Setelah melalui proses *windowing* dan *filtering*, sinyal kemudian dianalisis menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) untuk memperoleh kurva H/V (Nakamura, 1989; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006). Hasil kurva H/V pada titik FMIPA 2 yang ditunjukkan pada Gambar 5. memperlihatkan puncak spektrum yang cukup jelas dengan frekuensi natural (f_0) sebesar 0,951 Hz dan faktor amplifikasi (A_0) sebesar 3,223. Nilai frekuensi yang relatif rendah menunjukkan bahwa lapisan tanah di lokasi tersebut kemungkinan didominasi oleh sedimen yang cukup tebal dan relatif lunak, sehingga berpotensi memperkuat getaran seismik pada frekuensi tertentu. Berdasarkan nilai f_0 dan A_0 tersebut, diperoleh indeks kerentanan tanah (Kg) sebesar 10,917 serta nilai regangan geser tanah (γ) sebesar sekitar $3{,}7 \times 10^{-3}$, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai Kg yang relatif tinggi mengindikasikan bahwa titik FMIPA 2 memiliki tingkat kerentanan tanah yang cukup tinggi terhadap amplifikasi gelombang seismik (Druwati, 2021). Sementara itu, nilai γ yang berada pada orde 10^{-3} menunjukkan bahwa lapisan tanah di lokasi ini memiliki respons deformasi yang cukup sensitif terhadap getaran. Nilai A_0, Kg, dan γ tersebut menunjukkan bahwa tanah di titik FMIPA 2 memiliki potensi respons dinamis yang cukup signifikan, sehingga dapat meningkatkan intensitas getaran di permukaan apabila terjadi aktivitas seismik (Nakamura, 2000; Panzera *et al*., 2020).

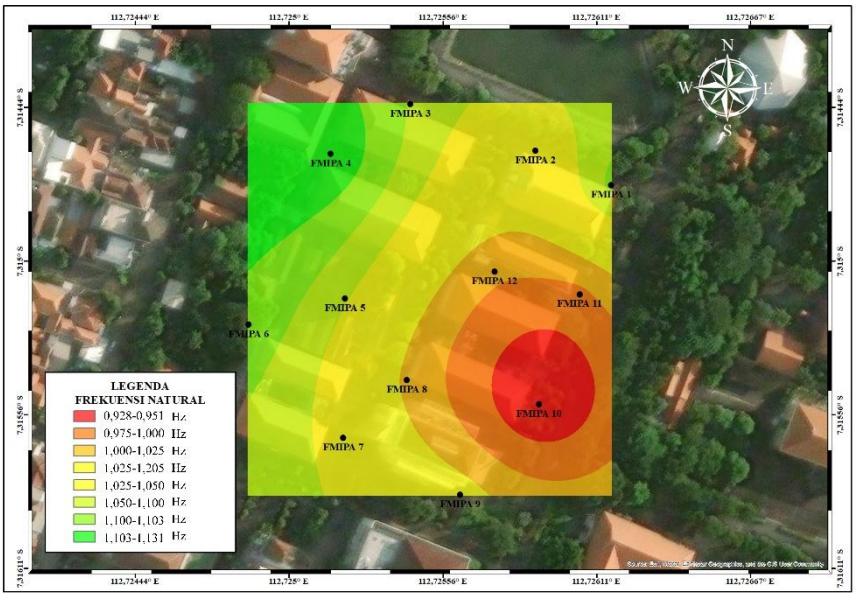
B. Pembahasan

1. Analisis Frekuensi Natural dan Faktor Amplifikasi

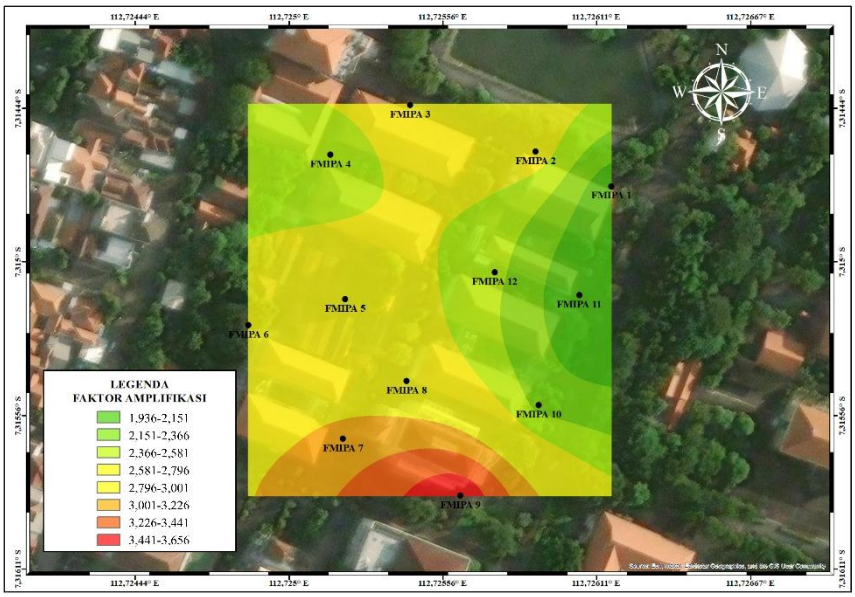
Puncak kurva HVSR yang cukup jelas pada rentang 0,9–1,1 Hz menjadi ciri respons seismik di beberapa titik di lingkungan FMIPA UNESA**.** Nilai frekuensi yang relatif rendah ini menunjukkan adanya resonansi tanah yang dipengaruhi oleh keberadaan lapisan sedimen yang cukup tebal dan relatif lunak di atas lapisan yang lebih padat (Nakamura, 1989; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006; Molnar *et al*., 2022). Kondisi ini dapat menyebabkan penguatan energi gelombang seismik, karena perbedaan sifat mekanik antara lapisan sedimen dan lapisan dasar yang lebih kaku (Kanai, 1983; Zhou *et al*., 2025). Kurva H/V yang dihasilkan dari analisis HVSR memperlihatkan puncak spektrum yang cukup jelas, yang menandakan adanya frekuensi dominan tanah pada setiap titik pengukuran (Konno & Ohmachi, 1998; SESAME, 2004).

Berdasarkan Gambar 6. frekuensi natural (f_0) di kawasan FMIPA UNESA berada pada rentang 0,928–1,131 Hz, yang menunjukkan dominasi tanah lunak hingga sedang dengan ketebalan sedimen yang relatif besar (Pang *et al*., 2018; Jeon *et al*., 2025). Kondisi ini sesuai dengan karakteristik geologi wilayah Surabaya yang didominasi endapan aluvial muda bertipe D–E, yang bersifat lunak, kurang kompak, dan memiliki kecepatan gelombang geser (Vs) rendah, sehingga berpotensi mengalami amplifikasi gelombang seismik (Harnindra *et al*., 2017; Alam *et al*., 2018; Harsolumakso *et al*., 2019). Riwayat kawasan Ketintang sebagai lahan persawahan juga memperkuat indikasi bahwa tanah didominasi material halus dan jenuh air, yang mendukung terbentuknya lapisan sedimen tebal.

Sebaliknya Variasi nilai frekuensi menunjukkan bahwa titik dengan f_0 rendah, seperti FMIPA 10 (0,928 Hz) dan FMIPA 2 (0,951 Hz), memiliki sedimen yang lebih tebal dan berpotensi memperkuat getaran seismik, sedangkan titik dengan f_0 lebih tinggi seperti FMIPA 1 (1,131 Hz) menunjukkan kondisi tanah yang lebih kaku dan sedimen yang lebih tipis (Molnar *et al*., 2022; Zhou *et al*., 2025). Secara umum, seluruh wilayah berada pada kisaran frekuensi rendah (0,9–1,1 Hz), yang mengindikasikan adanya lapisan sedimen tebal dengan kedalaman bedrock yang relatif dalam serta potensi penguatan gelombang gempa dengan periode menengah hingga panjang (Nogoshi & Igarashi, 1971; Nakamura, 2000).



Gambar 6. Peta Frekuensi Natural (f_0) FMIPA UNESA.



Gambar 7. Peta Faktor Amplifikasi (A_0) FMIPA UNESA

Variasi nilai frekuensi natural tersebut kemudian berhubungan erat dengan faktor amplifikasi (A_0) yang diperoleh dari kurva HVSR. Berdasarkan Gambar 7. nilai amplifikasi (A_0) di wilayah FMIPA UNESA berada pada rentang 1,99–3,65 yang termasuk kategori sedang hingga tinggi, menunjukkan adanya potensi penguatan gelombang seismik di permukaan (Kanai, 1983; Nakamura, 1989). Nilai tertinggi terdapat pada FMIPA 9 (3,653) dan FMIPA 2 (3,223), yang mengindikasikan adanya kontras impedansi yang besar antara lapisan sedimen dan batuan dasar sehingga gelombang seismik mengalami penguatan signifikan (Nakamura, 2000; Claudet *et al*., 2006).

Sebaliknya, titik seperti FMIPA 10 memiliki nilai amplifikasi rendah (1,997) meskipun memiliki sedimen paling tebal, yang menunjukkan bahwa faktor amplifikasi tidak hanya dipengaruhi ketebalan sedimen tetapi juga sifat material dan keseragaman impedansi lapisan (Bard, 1999; Fäh *et al*., 2001; Molnar *et al*., 2022). Titik lain seperti FMIPA 1, 4, dan 8 juga menunjukkan amplifikasi relatif rendah, yang mengindikasikan kondisi tanah lebih padat dan respons seismik yang lebih stabil. Secara umum, variasi amplifikasi di FMIPA UNESA dikontrol oleh perbedaan sifat fisik tanah dan kontras impedansi antar lapisan.

Area dengan kontras impedansi besar cenderung mengalami amplifikasi tinggi, sedangkan lapisan yang lebih homogen dan kaku menunjukkan amplifikasi yang lebih rendah (Nakamura, 2000; Lunedei, 2015).

2. Analisis indeks kerentanan tanah (Kg) dan *ground shear-strain* (γ)

Berdasarkan Tabel 1, indeks kerentanan tanah (K_g) di lingkungan FMIPA UNESA menunjukkan variasi tingkat kerentanan terhadap penguatan gelombang seismik pada setiap titik pengukuran. Nilai K_g tertinggi diperoleh pada titik FMIPA 9 (12,705) dan FMIPA 2 (10,917), sedangkan nilai terendah terdapat pada FMIPA 1 (3,313). Berdasarkan Persamaan (2), nilai K_g berbanding lurus dengan kuadrat faktor amplifikasi (A_0^2) dan berbanding terbalik dengan frekuensi dominan (f_0). Oleh karena itu, kombinasi faktor amplifikasi yang tinggi dan frekuensi dominan yang relatif rendah pada FMIPA 9 dan FMIPA 2 menghasilkan nilai K_g yang lebih besar dibandingkan titik lainnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kedua lokasi memiliki potensi penguatan gelombang seismik yang lebih tinggi sehingga lebih rentan terhadap peningkatan intensitas guncangan di permukaan tanah (Nakamura, 1989; SESAME, 2004; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006).

Sebaliknya, FMIPA 1, FMIPA 4, dan FMIPA 10 memiliki nilai K_g yang relatif rendah sehingga menunjukkan tingkat kerentanan yang lebih kecil terhadap penguatan gelombang seismik. Menariknya, FMIPA 10 memiliki estimasi ketebalan sedimen terbesar (80,856 m), namun faktor amplifikasinya hanya sebesar 1,997 sehingga nilai K_g yang dihasilkan tetap rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa besarnya amplifikasi tidak hanya dipengaruhi oleh ketebalan sedimen, tetapi juga oleh kontras impedansi antara lapisan sedimen dan batuan dasar, kekakuan material penyusun tanah, serta tingkat redaman gelombang seismik. Dengan demikian, sedimen yang lebih tebal tidak selalu menghasilkan amplifikasi yang lebih tinggi apabila lapisan sedimen relatif homogen atau memiliki kontras impedansi yang rendah terhadap batuan dasarnya (Nakamura, 1989; Bard, 1999; Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006; SESAME, 2004).

Selain K_g, parameter yang juga penting untuk memahami tingkat deformasi tanah adalah ground shear-strain (γ). Nilai γ pada seluruh titik berada pada orde 10^{-3}, yang menunjukkan bahwa tanah telah mengalami regangan pada tingkat menengah, namun belum mencapai kondisi kritis yang berpotensi menyebabkan likuifaksi. Menurut Ishihara (1978), regangan geser sebesar $\gamma > 10^{-4}$ mulai dapat menyebabkan deformasi lokal seperti retakan tanah atau penurunan permukaan, sedangkan $\gamma > 10^{-2}$ berkaitan dengan potensi terjadinya longsor atau likuifaksi. Oleh karena itu, nilai γ di kawasan FMIPA UNESA menunjukkan bahwa beberapa lokasi telah memiliki tingkat deformasi yang perlu diperhatikan apabila mengalami pembebanan dinamis akibat gempa dengan intensitas yang lebih besar (Nakamura, 1997; Ishihara, 1978).

Berdasarkan Tabel 1, FMIPA 9 memiliki nilai ground shear-strain tertinggi, diikuti oleh FMIPA 2 dan FMIPA 5. Kondisi ini konsisten dengan tingginya nilai K_g pada ketiga lokasi tersebut, sehingga menunjukkan bahwa tanah tidak hanya memiliki potensi penguatan gelombang seismik yang lebih besar, tetapi juga lebih mudah mengalami deformasi akibat regangan dinamis (Bonnefoy-Claudet *et al*., 2006; Molnar *et al*., 2022). Sebaliknya, FMIPA 1, FMIPA 4, dan FMIPA 10 menunjukkan nilai γ yang lebih rendah, sejalan dengan rendahnya nilai K_g, sehingga respons tanah terhadap guncangan relatif lebih stabil. Variasi tersebut diperkirakan dipengaruhi oleh karakteristik geologi Surabaya yang didominasi oleh endapan aluvial Kuarter dengan tingkat kekompakan dan kejenuhan air yang bervariasi sehingga menghasilkan respons dinamis yang berbeda pada setiap lokasi (Pusat Survei Geologi, 2023). Dari sudut pandang mitigasi bencana, zona dengan nilai K_g dan γ yang tinggi perlu menjadi perhatian dalam evaluasi bangunan eksisting maupun perencanaan pembangunan baru. Bangunan yang berdiri pada zona tersebut berpotensi mengalami penguatan guncangan yang lebih besar sehingga diperlukan investigasi geoteknik yang lebih rinci serta penerapan desain fondasi dan struktur yang sesuai untuk mengurangi risiko kerusakan akibat gempa.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan analisis HVSR pada 12 titik di lingkungan FMIPA UNESA, diperoleh nilai frekuensi natural (f_0) sebesar 0,928–1,131 Hz, faktor amplifikasi (A_0) sebesar 1,99–3,65, indeks kerentanan tanah (Kg) sebesar 3,313–12,705, serta ground shear-strain (γ) sebesar $1{,}605\times10^{-3}$ hingga $6{,}157\times10^{-3}$. Nilai parameter

tertinggi ditemukan pada titik FMIPA 9 dan FMIPA 2, yang menunjukkan kerentanan tanah lebih tinggi terhadap penguatan gelombang seismik, sedangkan FMIPA 1 dan FMIPA 10 menunjukkan kondisi tanah yang relatif lebih stabil. Hasil pemetaan mikrozonasi menunjukkan bahwa FMIPA 9 dan FMIPA 2 termasuk zona kerentanan tinggi yang berpotensi mengalami amplifikasi gempa lebih besar. FMIPA 5; FMIPA 7; FMIPA 8; dan FMIPA 12 berada pada kategori kerentanan sedang, sedangkan FMIPA 1; FMIPA 3; FMIPA 4; FMIPA 6; dan FMIPA 10 termasuk zona kerentanan rendah dengan kondisi tanah yang relatif lebih stabil terhadap pengaruh gelombang gempa.

B. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambah jumlah titik pengukuran mikrotremor agar distribusi data lebih detail sehingga hasil mikrozonasi kegempaan menjadi lebih akurat. Selain itu, analisis HVSR dapat dikombinasikan dengan metode geofisika lain seperti MASW atau seismik refraksi untuk memperoleh informasi yang lebih komprehensif mengenai karakteristik lapisan tanah. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi awal dalam perencanaan pembangunan infrastruktur dan upaya mitigasi gempa di lingkungan FMIPA Universitas Negeri Surabaya.

DAFTAR PUSTAKA

Akbar, D., Rosid, M. S., & Darmanto, A. N. (2024). Seismic Vulnerability Distribution in the Central Area of Surabaya City. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, *10*(3), 1167–1174. https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i3.6761

Alam, S., Yusup, Y., Khoirullah, N., & Lesmana, A. (2018). Stratified Soil Characterization Using 1D Resistivity Inversion along the Pasuruan Coastline, East Java. *Journal of Geological Sciences and Applied Geology*, *2*(5), 15–20.

Ariyanto, P., Sidiqa, M., Pranata, B., & Prayitno, B. S. (2021). Struktur Kerak Bumi Di Jawa Timur Berdasarkan Analisis Fungsi Penerima Teleseismik. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, *7*(3), 202–225. https://doi.org/10.23960/jge.v7i3.168

Augesti, A. (2019, Juli 29). *Gempa Banten dipicu aktivitas Lempeng Indo-Australia, apa itu?* Liputan6.com. Diakses dari https://www.liputan6.com/global/read/4024261/gempa-banten-dipicu-aktivitas-lempeng-indo-australia-apa-itu?page=3#google_vignette

Aulady, M. F. N., Nuciferani, F. T., Nurhayati, D. E., & Pratama, A. A. (2021). Analisis Ekonomi Pada Perkuatan Rumah Guna Pengurangan Dampak Gempa Bumi. *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, *4*(2), 276. https://doi.org/10.31602/jk.v4i2.6434

Ayani, R. H., Ching, K. E., Anjasmara, I. M., & Lin, Y. N. (2021). Crustal Deformation of the Kendeng Fault Branches Area from GNSS and InSAR Data in Surabaya City, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *936*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/936/1/012019

Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? In *Proceedings of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion* (pp. 1251–1279).

Berghuis, H. W. K., van Kolfschoten, T., Adhityatama, S., Troelstra, S. R., Noerwidi, S., Suriyanto, R. A., Wibowo, U. P., Pop, E., Kurniawan, I., Hilgen, S. L., Veldkamp, A., & Joordens, J. C. A. (2022). The eastern Kendeng Hills (Java, Indonesia) and the hominin-bearing beds of Mojokerto, a re-interpretation. *Quaternary Science Reviews*, *295*, 107692. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107692

Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P. Y. (2006). The nature of *noise* wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth-Science Reviews*, *79*(3–4), 205–227. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.07.004

Chairil, A., Ardhiansyah, F. E., Dzaki, A., Sajjad, A., Yusuf, A., & Aisy, A. R. (2025). Pemetaan Sebaran Lahan Terbangun di Zona Sempadan Sesar Pasuruan Menurut Peraturan Menteri PUPR Nomor 21 / PRT / M / 2007. *Indonesian Journal of Geography Information Science*, *1*, 33–45.

Druwati, I. (2021). Analisis Frekuensi Natural dan Potensi Amplifikasi Menggunakan Metode *HVSR*. *Edu Research*, *10*(1), 59–63.

Erlangga, W. (2020). Karakteristik Dan Parameter Subduksi Sumber Gempa Pulau Jawa. *Teknisia*, *XXV*(2), 30–40. https://doi.org/10.20885/teknisia.vol25.iss2.art4

Fäh, D., Kind, F., & Giardini, D. (2001). A theoretical investigation of average H/V ratios. *Geophysical Journal*

International, 145(2), 535–549.

Fahrizi, M. A., & Saifuddin, S. (2023). Pengaruh Kedalaman dan Kecepatan Gelombang Geser Batuan Dasar terhadap Respons Tanah Menggunakan Mikrotremor di ITS Surabaya. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, *12*(2).

Gustono, S. T., Sucipto, A., Permana, D., & Akbar, D. (2023). Subsurface identification in the Surabaya and Waru segment areas using the Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method. *E3S Web of Conferences*, *464*, 1–4. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346414005

Harnindra, V. A., Sunardi, B., & Santosa, B. J. (2017). Implikasi Sesar Kendeng Terhadap Bahaya Gempa dan Pemodelan Percepatan Tanah di Permukaan di Wilayah Surabaya. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, *6*(2). https://doi.org/10.12962/j23373520.v6i2.27603.

Ishihara, K. (1978). *Soil behavior in earthquake geotechnics*. Oxford University Press.

Jeon. (2025). *Impact of Annual Temperature Variations on the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio of Ambient Noise: A Case Study*. *41*(2), 27–40.

Kanai, K. (1983). Semi-empirical formula for seismic characteristics of the ground. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 309–325.

Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *88*(1), 228–241. https://doi.org/10.1785/bssA0880010228

Koulali, A., McClusky, S., Susilo, S., Leonard, Y., Cummins, P., Tregoning, P., Meilano, I., Efendi, J., & Wijanarto, A. B. (2017). The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: Implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, *458*, 69–79. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.039

Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Lister, G., Efendi, J., & Syafi'I, M. A. (2016). Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc. *Geophysical Research Letters*, *43*(5), 1943–1949. https://doi.org/10.1002/2016GL067941

Kumar, P., & Mahajan, A. K. (2020). *New Empirical Relationship Between Resonance Frequency and Thickness of Sediment Using Ambient Noise Measurements and Joint-Fit-Inversion of The Rayleigh Wave Dispersion Curve for Kangra Valley* (NW Himalaya), India. *Environmental Earth Sciences*, *79*(11). https://doi.org/10.1007/s12665-020-09000-8

Liu, W., Tan, J., Lv, W., Chen, C., & Qu, S. (2025). Characteristics and predictions of accumulative deformation of structured soft soil under long-term cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *189*. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109088

Lyons, R. G. (2001). *Understanding digital signal processing*. Prentice Hall.

Maulana, F., Putra, E., Sanjaya, A. N., Suhardarma, M. S., & Silvia, L. (2024). *Analisis Kerentanan Seismik dengan Metode HVSR pada Lingkungan Kampus ITS*.

Moechtar, R. A. T. (2021). Dinamika Proses Pengendapan Sedimen Holosen di Hilir Sungai Bengawan Solo serta Wilayah Pasang Surut di Gresik dan Sekitarnya, Jawa Timur. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, *22*(1), 9. https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v22i1.553

Molnar, S., Sirohey, A., Assaf, J., Bard, P. Y., Castellaro, S., Cornou, C., Cox, B., Guillier, B., Hassani, B., Kawase, H., Matsushima, S., Sánchez-Sesma, F. J., & Yong, A. (2022). A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (M*HVSR*) method. In *Journal of Seismology* (Vol. 26, Issue 4). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/s10950-021-10062-9

Mufida, A., Santosa, B. J., & Warnana, D. D. (2013). Profiling Kecepatan Gelombang Geser (Vs)Surabaya Berdasarkan Pengolahan DataMikrotremor. *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, *2*(2), 2337–3520.

Nakamura, Y., 2009. Basic structure of QTS (*HVSR*) and examples of applications. 14th World Conf. Earthq. Eng. 2008 Beijing China, Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data 33–51.

Nakamura, Y., 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12th World Conf. Earthq. Eng. 2000 Auckl. N. Z. 2656, 1–8.

Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. Q. Rep. Railw. Tech. Res. Institue 30, 25–33.

Novtrisa, I., Mase, L. Z., Refrizon, R., Misliniyati, R., Amri, K., Hadi, A. I., & Fadli, D. I. (2025). Studi Mikrozonasi Kerentanan Seismik dan Bangunan Bertingkat Menggunakan Metode *HVSR* (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) di Kabupaten Bengkulu Selatan. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, *21*(3), 241. https://doi.org/10.20527/flux.v21i3.19616

Nogoshi, M., & Igarashi, T. (1971). On the propagation characteristics of microtremor. *Journal of Seismological Society of Japan*, 24, 264–280.

Pang, R., Xu, B., Kong, X., Zou, D., & Zhou, Y. (2018). Seismic reliability assessment of earth-rockfill dam slopes considering strain-softening of rockfill based on generalized probability density evolution method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *107*, 96–107. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.020

Panzera, F., *et al*. (2020). Seismic site effects and soil deformation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *132*, 106066. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106066

PuSGeN. (2017). *Pusat Studi Gempa Nasional (Indonesia)Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman (Indonesia)*.

Riastama, C. N., Anjasmara, I. M., & Kurniawan, A. (2022). Pemanfaatan Data GPS Tahun 2017-2020 untuk Monitoring Aktivitas Sesar Kendeng di Kota Surabaya. *Geoid*, *17*(2), 208. https://doi.org/10.12962/j24423998.v17i2.7413

Rizqullah, R. R., Muslim, D., Rendra, P. P. R., & Rahdiana, R. N. (2023). Perbandingan Nilai Penurunan Muka Tanah Di Kelurahan Tambakwedi Dan Kelurahan Bulak, Surabaya. *Padjadjaran Geoscience Journal*, *7*(3), 1492–1507.

SESAME. (2004). *Guidelines for the implementation of the h/v spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. *European Commision - Research General Directorate*, *D23.12*(December), 62 pp.

Tawakal, M. I., Haris, A., & Martha, A. A. (2020). Estimating shear wave velocity (Vs30) of East Java, Indonesia, using ambient noise inversion of *horizontal to vertical spectral ratio* (HVSR). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *538*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/538/1/012012

Tupper, A., Carn, S., Davey, J., Kamada, Y., Potts, R., Prata, F., & Tokuno, M. (2004). An evaluation of volcanic cloud detection techniques during recent significant eruptions in the western "Ring of Fire." *Remote Sensing of Environment*, *91*(1), 27–46. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.004

Wang, X., Ye, A., Shafieezadeh, A., & Padgett, J. E. (2019). Fractional order optimal intensity measures for probabilistic seismic demand modeling of extended pile-shaft-supported bridges in liquefiable and laterally spreading ground. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *120*, 301–315. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.012

Widada, S., Darda, I. M., & Satriadi, A. (2022). Identifikasi Wilayah Terdampak Tsunami Berdasarkan Peta Ancaman Tsunami di Kabupaten Lumajang, Jawa Timur. *Buletin Oseanografi Marina*, *11*(3), 291–305. https://doi.org/10.14710/buloma.v11i3.44032

Zhou, X., Zhang, Y., Hao, S., Fei, X., Tong, P., & Chu, J. (2025). Near-surface site characterization at Bishan-AMK Park, Singapore, using first-arrival adjoint tomography via the joint inversion of absolute and differential traveltimes. *Geophysical Journal International*, *242*(3). https://doi.org/10.1093/gji/ggaf237