

## ESTIMASI Vs30 DAN PEMETAAN KLASIFIKASI TANAH BERBASIS HVSR DI WILAYAH SESAR LASEM, JAWA TENGAH

Bin Jali Wintoro<sup>1,2</sup>, Eko Teguh Paripurno<sup>2</sup>, Arif Riyanto Budi Nugroho<sup>2</sup>, Jaka Purwanta<sup>2</sup>, Yohana Noradika Maharani<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Stasiun Geofisika Kelas I Sleman, Jl. Wates Km. 8, Balekatun, Gamping, Sleman, Yogyakarta, Indonesia 55294

<sup>2</sup> Program Studi Magister Manajemen Bencana, UPN Veteran Yogyakarta, Jl. Babarsari 2 Yogyakarta, Indonesia 55281  
email: yohanam@upnyk.ac.id

### ABSTRAK

Wilayah Sesar Lasem di Jawa Tengah memiliki potensi seismik tinggi yang belum diimbangi dengan pemahaman mikrozonasi yang memadai. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi nilai Vs30 dan mengklasifikasikan jenis tanah di wilayah tersebut berdasarkan metode HVSR, serta menganalisis implikasi seismik dari klasifikasi tersebut. Sebanyak 60 titik pengukuran mikrotremor dikumpulkan dan dianalisis menggunakan perangkat lunak Geopsy dan OpenHVSR. Hasil inversi menunjukkan nilai Vs30 berkisar antara 208 hingga 556 m/s. Nilai rendah umumnya ditemukan di zona aluvial seperti Formasi Aluvium dan Lidah, sedangkan nilai tinggi tersebar di perbukitan dan formasi batuan padat seperti Lasem Volcanic dan Wonocolo. Berdasarkan klasifikasi SNI 1726:2019, mayoritas wilayah tergolong dalam kategori tanah sedang (SD) dan keras (SC). Zona tanah sedang (SD), mendominasi area di sekitar jalur aktif sesar, menunjukkan potensi amplifikasi gempa bumi yang signifikan dan perlu mendapat prioritas dalam perencanaan mitigasi. Nilai Vs30 dan klasifikasi jenis tanah dapat dimanfaatkan sebagai acuan dalam tata ruang dan strategi mitigasi bencana. Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi data geofisika dalam perencanaan wilayah dan penguatan kapasitas masyarakat terhadap risiko gempa bumi.

**Kata Kunci:** Sesar Lasem; Jenis tanah; Vs30; HVSR; Mitigasi gempa bumi

### ABSTRACT

*[Title: Estimation of Vs30 and HVSR-Based Soil Classification Mapping in the Lasem Fault Area, Central Java]. The Lasem Fault area in Central Java has high seismic potential that has not been balanced with adequate understanding of microzonation. This study aims to estimate the Vs30 value and classify soil types in the area based on the HVSR method, as well as analyze the seismic implications of the classification. A total of 60 microtremor measurement points were collected and analyzed using Geopsy and OpenHVSR software. The inversion results show Vs30 values ranging from 208 to 556 m/s. Low values are generally found in alluvial zones such as the Alluvium and Lidah Formations, while high values are spread across hills and solid rock formations such as Lasem Volcanic and Wonocolo. Based on the SNI 1726:2019 classification, the majority of areas are classified into the medium (SD) and hard (SC) soil categories. The medium soil zone (SD), dominating the area around the active fault line, shows significant earthquake amplification potential and needs to be prioritized in mitigation planning. The Vs30 value and soil type classification can be used as a reference in spatial planning and disaster mitigation strategies. This finding emphasizes the importance of integrating geophysical data in regional planning and strengthening community capacity against earthquake risks.*

**Keywords:** Lasem Fault; Soil type; Vs30; HVSR; Earthquake mitigation

### PENDAHULUAN

Wilayah Semenanjung Sesar Lasem yang meliputi Rembang, Blora, Grobogan, dan Pati memiliki sejarah seismisitas yang cukup aktif dan kompleksitas geologi tinggi. Sesar Lasem dikenal sebagai salah satu sesar aktif di Jawa Tengah dengan arah barat daya–timur laut dan merupakan sesar naik yang menunjukkan aktivitas deformasi akibat interaksi Lempeng Eurasia dan Indo-Australia

(Novianti & Heliani, 2020; Kadar & Sudijono, 1993). Aktivitas gempa bumi di kawasan ini telah tercatat sejak abad ke-19, seperti gempa besar di Jepara (1821), Kudus (1877), dan Semarang (1856, 1958, 1959, 1966), serta gempa besar tahun 1890 dengan magnitudo 6,8 (Eka dkk., 2010).

Kaitan antara aktivitas sesar dan karakteristik tanah menjadi faktor penting dalam memahami risiko gempa bumi di suatu wilayah. Sesar Lasem,

sebagai sumber utama seismisitas historis di Jawa Tengah, memiliki potensi untuk menghasilkan gempa bumi dengan magnitudo besar yang dapat mempengaruhi berbagai daerah di sekitarnya. Berdasarkan catatan seismik tersebut, wilayah sekitar Sesar Lasem memiliki potensi risiko gempa bumi yang tinggi. Namun demikian, pemahaman terhadap dampak gempa bumi di kawasan ini masih terbatas karena belum tersedianya peta mikrozonasi seismik yang memadai. Dampak gempa bumi tidak hanya dipengaruhi oleh magnitudo gempa, tetapi juga oleh karakteristik geoteknik lokal, terutama kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter ( $V_s30$ ). Tanah lunak dengan nilai  $V_s30$  rendah berisiko mengalami amplifikasi gelombang gempa bumi yang tinggi, sedangkan tanah keras dengan  $V_s30$  tinggi cenderung lebih stabil (Manzunzu dkk., 2025; Refrizon dkk., 2025; Prajapati dkk., 2024).

Salah satu metode yang efektif dan efisien untuk mengetahui karakteristik bawah permukaan adalah dengan metode mikrotremor menggunakan pendekatan *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Metode ini telah terbukti mampu mengidentifikasi frekuensi dominan lokal dan digunakan secara luas untuk estimasi nilai  $V_s30$  secara empiris (Nakamura, 1989; Durmus dkk., 2024; Yaghmaei-Sabegh, 2020; Wathlet dkk., 2004). Penerapan metode ini memungkinkan penyusunan peta mikrozonasi berbasis parameter  $V_s30$  yang sangat berguna dalam perencanaan dan mitigasi bencana gempa bumi.

Berbagai penelitian sebelumnya telah menerapkan metode HVSr di wilayah lain di Indonesia, seperti Yogyakarta dan kawasan rawan gempa bumi lainnya, dan berhasil mengidentifikasi klasifikasi jenis tanah serta zona amplifikasi gelombang (Sunardi dkk., 2025; Wijayanto dkk., 2022; Zega dkk., 2022; Obie, 2012). Studi lain juga telah mengonfirmasi pergerakan Sesar Pati dengan

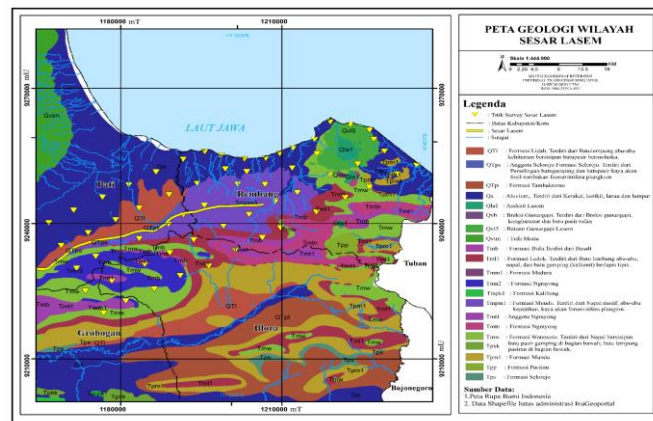
data GPS, yang mendukung keberadaan aktivitas tektonik di sepanjang Sesar Lasem (Sulaeman dkk., 2020). Namun, kajian serupa masih sangat terbatas di kawasan Lasem, padahal daerah ini memiliki sejarah gempa signifikan.

Hingga saat ini, belum tersedia kajian seismik mikrozonasi yang memetakan nilai  $V_s30$  di sepanjang Sesar Lasem secara komprehensif. Padahal, wilayah ini memiliki banyak permukiman dan infrastruktur penting yang berisiko jika terjadi gempa bumi. Ketiadaan data ini menjadi kesenjangan penting yang perlu dijawab, terutama sebagai dasar untuk kebijakan mitigasi di wilayah rawan gempa bumi.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai  $V_s30$  di wilayah studi, mengklasifikasikan jenis tanah di wilayah tersebut berdasarkan nilai  $V_s30$  sesuai dengan SNI 1726:2019 (BSN, 2019), dan menilai potensi kerusakan akibat gempa bumi berdasarkan klasifikasi tanah yang diperoleh. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran dalam perencanaan, pembangunan, dan pengembangan infrastruktur di wilayah kajian tersebut. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi langkah awal mitigasi bencana gempa bumi, khususnya bagi pemerintah daerah yang wilayahnya tergolong rawan terhadap kejadian gempa bumi.

**Geologi Regional**

Geologi regional memberikan informasi penting dalam memahami potensi gempa bumi di suatu wilayah. Kawasan Sesar Lasem memiliki keragaman formasi geologi yang mencerminkan sejarah geologi yang kompleks (Gambar 1). Formasi Lidah tersusun oleh batu lempung, sementara Formasi Selogiri merupakan perselingan antara batu lempung dan batu pasir yang kaya foraminifera planktonik. Formasi batuan gunung api terdiri atas breksi vulkanik dan andesit, yang menunjukkan adanya aktivitas vulkanisme masa lalu.



Gambar 1. Peta geologi di sekitar wilayah penelitian

Batuan karbonat mendominasi Formasi Gamping, termasuk Formasi Bulu, Bula, dan Ledok, yang berpotensi sebagai reservoir hidrokarbon. Formasi Kalibeng didominasi oleh batu lempung napalan yang kaya fosil, sedangkan Formasi Ngrayong terdiri atas batu pasir kuarsa, batu lempung, dan batu gamping. Formasi Mundu mengandung batu napal masif, napal gampingan, dan batupasir berfosil. Adapun Formasi Wonocolo terdiri dari batu napal dengan sisipan pasir gampingan dan batulempung (Astjario, 2006). Formasi Bulu dan Bula mencerminkan lingkungan karbonat, sedangkan Formasi Ledok tersusun atas batu pasir dan napal. Selain itu, keberadaan Andesit Lasem sebagai batuan beku menunjukkan aktivitas vulkanik yang turut membentuk kompleksitas struktur geologi di sepanjang Sesar Lasem.

**METODE**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pengukuran mikrotremor menggunakan teknik *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) untuk menganalisis mikrozonasi seismik berbasis parameter Vs30. Lokasi penelitian

berada di sepanjang jalur Sesar Lasem, Jawa Tengah, dengan cakupan koordinat geografis 6.30°–7.06° LS dan 111.00°–111.30° BT.

**Pengumpulan Data**

Pengumpulan data dilakukan melalui survei lapangan dengan metode pengukuran mikrotremor. Sebanyak 60 titik pengukuran dipilih secara sistematis dengan jarak antar titik sekitar 1 km, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Pada setiap titik, data mikrotremor direkam selama kurang lebih 30 menit dengan frekuensi sampling sebesar 100 Hz. Perekaman dilakukan menggunakan seismograf portabel Lunitek tiga komponen.

Untuk memastikan akurasi pengukuran, digunakan perangkat GPS guna menentukan koordinat titik, kompas untuk orientasi arah sensor, serta aki sebagai sumber daya. Data disimpan dalam laptop untuk selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak Geopsy (Wathelet dkk., 2020), dan OpenHVSr (Bignardi dkk., 2016). Perekaman mikrotremor dilakukan dengan mengikuti standar akuisisi dari SESAME European Research Project (2004), yang mensyaratkan lokasi bebas gangguan dan kondisi stabil.



**Gambar 2.** Peta titik survey mikrotremor di wilayah Sesar Lasem

**Pengolahan HVSr**

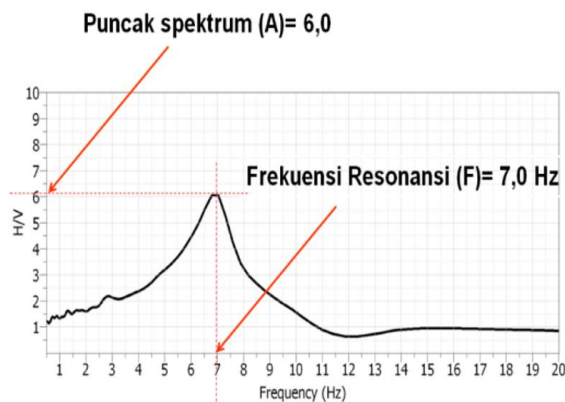
Metode HVSr didasarkan pada perbandingan spektrum amplitudo dari komponen horizontal terhadap vertikal dalam domain frekuensi. Rasio ini digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi dominan lokal ( $f_0$ ), yang berkaitan dengan resonansi tanah dan amplifikasi gelombang gempa bumi.

Rumus HVSr dinyatakan sebagai berikut (Nakamura, 1989):

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

di mana  $H_{NS}^2(f)$  dan  $H_{EW}^2(f)$  adalah spektrum amplitudo komponen horizontal arah utara–selatan

dan timur–barat,  $V(f)$  adalah spektrum amplitudo komponen vertikal pada frekuensi  $f$ . Puncak kurva HVSR ini merujuk pada nilai maksimum dari rasio HVSR terhadap frekuensi, yang menunjukkan frekuensi dominan lokal ( $f_0$ ) yang berkaitan dengan resonansi tanah, dan faktor amplifikasi relatif ( $A_0$ ) yang menunjukkan besarnya amplifikasi pada frekuensi dominan tersebut. Puncak HVSR ditentukan berdasarkan kurva rata-rata HVSR yang dihitung dari beberapa jendela data. Kurva ini memberikan gambaran umum tentang distribusi frekuensi dan amplitudo, membantu dalam mengidentifikasi puncak yang paling signifikan. Gambar 3 menunjukkan contoh kurva HVSR. Puncak dari kurva hasil pengolahan HVSR mengindikasikan frekuensi dominan lokal ( $f_0$ ) 7 Hz dan faktor amplifikasi ( $A_0$ ) sekitar 6.



**Gambar 3.** Contoh kurva hasil pengolahan metode HVSR

### Inversi HVSR

Kurva HVSR yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan Geopsy kemudian dianalisis lebih lanjut melalui proses inversi untuk mendapatkan model kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) terhadap kedalaman. Proses inversi dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenHVSR (Bignardi dkk., 2016), yang merupakan bagian dari paket pemrograman berbasis MATLAB.

Metode inversi yang digunakan dalam OpenHVSR mengikuti pendekatan *search-based optimization*, khususnya metode pencarian langsung (*direct search method*). Pendekatan ini bekerja dengan cara meminimalkan selisih antara kurva HVSR hasil observasi dan kurva HVSR teoritis (*model forward*) yang dihitung berdasarkan asumsi struktur bawah permukaan. Untuk setiap iterasi, algoritma mencoba berbagai kombinasi parameter kecepatan  $V_s$ , ketebalan lapisan, dan rasio densitas untuk menghasilkan kurva teoritis yang paling mendekati

data observasi. Proses ini mengandalkan fungsi misfit sebagai penentu kualitas pencocokan antara kurva teoritis dan kurva observasi:

$$Misfit = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \log \left( \frac{H/V_{obs}(f_i)}{H/V_{theo}(f_i)} \right) \right| \quad (2)$$

dengan  $H/V_{obs}(f_i)$  adalah nilai HVSR hasil observasi pada frekuensi  $f_i$ ,  $H/V_{theo}(f_i)$  adalah nilai HVSR teoritis hasil simulasi model pada frekuensi yang sama,  $N$  adalah jumlah titik data frekuensi yang digunakan dalam pencocokan. Proses inversi dilakukan dengan batasan dan parameter awal (*initial model*) yang diatur berdasarkan informasi geologi lokal, seperti litologi, ketebalan lapisan dangkal, dan kisaran nilai  $V_s$  yang umum untuk jenis batuan tertentu. Output dari proses ini adalah profil  $V_s$  terhadap kedalaman yang sesuai dengan data observasi.

### Estimasi Vs30 dan Validasi

Setelah model  $V_s$  diperoleh, selanjutnya dihitung nilai  $V_{s30}$ . Parameter ini sangat penting karena digunakan untuk menilai stabilitas tanah dan mengidentifikasi potensi risiko gempa bumi (Roser dan Gosar, 2010).  $V_{s30}$  juga merupakan dasar dalam penentuan indeks *site class*, yaitu klasifikasi kondisi tanah berdasarkan karakteristik kecepatan gelombang gesernya. Nilai ini dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Vs30 = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (3)$$

dengan  $d_i$  adalah ketebalan lapisan ke- $i$  dalam satuan meter,  $V_{si}$  adalah kecepatan gelombang geser pada lapisan ke- $i$  (m/s),  $n$  adalah jumlah total lapisan dari permukaan hingga kedalaman 30 meter. Nilai  $V_{s30}$  ini menjadi dasar dalam klasifikasi jenis tanah menurut SNI 1726:2019, dan merupakan parameter kunci dalam penilaian kerentanan seismik suatu wilayah.

Validasi hasil inversi dan  $V_{s30}$  dilakukan dengan mencocokkan hasil inversi dengan kondisi geologi lokal berdasarkan peta geologi, serta memastikan konsistensi antar titik pengamatan.

### Klasifikasi Jenis Tanah

Nilai  $V_{s30}$  digunakan untuk mengklasifikasikan jenis tanah berdasarkan standar SNI 1726:2019, yang membagi tanah ke dalam lima kategori utama, yaitu SA hingga SE. Klasifikasi ini didasarkan pada  $V_{s30}$ , dan berguna dalam penilaian risiko seismik untuk menentukan tingkat kerentanan suatu wilayah terhadap dampak gempa bumi. Tabel

1 menyajikan klasifikasi jenis tanah menurut SNI 1726:2019 (BSN, 2019).

Tabel 1. Klasifikasi jenis tanah (BSN, 2019)

Kelas Site	Deskripsi	Vs30 (m/s)
SA	Batu sangat keras dan padat	> 1500
SB	Batuan keras	750 – 1500
SC	Tanah sangat padat / batu lunak	350 – 750
SD	Tanah kaku	175 – 350
SE	Tanah lunak, endapan sangat muda)	< 175

Klasifikasi ini menjadi acuan penting dalam perencanaan bangunan tahan gempa bumi, karena setiap kelas tanah menunjukkan respons seismik yang berbeda terhadap getaran tanah akibat gempa bumi. Dengan mengetahui jenis tanah pada suatu lokasi, kita dapat menentukan strategi desain yang sesuai untuk meminimalkan risiko seismik.

### Pemetaan dan Analisis Spasial

Selain menganalisis risiko seismik, dilakukan pemetaan sebaran nilai Vs30 untuk menyusun peta mikrozonasi seismik. Nilai Vs30 dari setiap titik pengukuran digunakan untuk mengklasifikasikan jenis tanah berdasarkan standar SNI 1726:2019, yang menjadi dasar dalam penentuan zonasi. Proses pemetaan klasifikasi jenis tanah dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS dengan metode interpolasi kriging, yang mempertimbangkan hubungan spasial antar titik untuk memodelkan variasi permukaan secara lebih akurat. Metode kriging merupakan teknik geostatistik yang mengandalkan model variogram untuk memperkirakan nilai variabel pada lokasi yang belum teramati. Persamaan dasar kriging adalah sebagai berikut:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (4)$$

dengan  $Z(S_0)$  adalah estimasi nilai pada lokasi  $S_0$ ,  $Z(S_i)$  adalah nilai yang diobservasi pada Lokasi  $S_i$ , dan adalah bobot kriging yang dihitung berdasarkan model variogram yang menggambarkan hubungan spasial antar titik pengamatan,  $n$  adalah jumlah titik pengamatan yang digunakan dalam estimasi.

Peta hasil analisis ini berfungsi untuk mengidentifikasi wilayah yang lebih rentan terhadap dampak gempa bumi. Untuk mendukung interpretasi hasil, digunakan data tambahan seperti peta RBI dan DEMNAS dari Badan Informasi Geospasial (BIG) yang dapat diunduh di <https://tanahair.indonesia.go.id/portal->

web/unduh/demnas sebagai referensi terhadap kondisi topografi dan penggunaan lahan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Sebaran Titik Pengukuran

Daerah penelitian terletak di kawasan aktif secara tektonik yang dipengaruhi oleh keberadaan Sesar Lasem. Berdasarkan peta geologi dan informasi dari ESDM Rembang, wilayah ini terdiri dari beragam formasi geologi yang memiliki karakteristik litologi berbeda. Jumlah titik pengukuran mikrotremor yang tersebar di berbagai formasi geologi sebanyak 60 titik, dengan rincian seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Distribusi titik pengukuran ini mencerminkan keragaman litologi di wilayah penelitian. Formasi Aluvium menjadi formasi dengan titik pengamatan terbanyak (23 titik), yang didominasi oleh material lunak seperti lanau dan lumpur. Sementara itu, titik-titik pada Formasi Mundu, Ledok, dan Wonocolo menunjukkan litologi yang lebih padat seperti napal dan batu gamping.

Keberagaman karakteristik geologi ini penting karena sangat memengaruhi nilai Vs30 yang dihasilkan dari proses inversi HVSR. Penempatan titik pengukuran yang mencakup hampir semua jenis formasi dominan di wilayah ini memungkinkan analisis yang lebih representatif terhadap kondisi bawah permukaan dan variasi kerentanan seismik berdasarkan klasifikasi jenis tanah.

Selanjutnya, hasil perhitungan Vs30 dari masing-masing titik akan dianalisis untuk mengidentifikasi hubungan antara jenis formasi geologi, nilai Vs30, dan tingkat kerentanan terhadap gempa bumi. Analisis ini akan digunakan untuk menyusun peta mikrozonasi seismik yang menggambarkan distribusi jenis tanah yang bermanfaat dalam perencanaan mitigasi bencana dan pengembangan infrastruktur tahan gempa bumi.

### Karakteristik Kurva H/V

Karakteristik kurva HVSR yang diperoleh dari data mikrotremor di daerah penelitian menunjukkan variasi bentuk yang mencerminkan heterogenitas kondisi geologi bawah permukaan. Secara umum, kurva H/V yang dihasilkan dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe utama, yaitu tipe *clear peak*, yang menunjukkan puncak frekuensi dominan yang jelas, serta tipe *unclear peak*, yang memiliki puncak frekuensi dominan kurang tegas atau menyebar. Perbedaan ini mengindikasikan variasi ketebalan lapisan sedimen, kontrasan impedansi seismik, dan kemungkinan adanya batas antar lapisan yang tidak seragam di bawah

permukaan tanah. Interpretasi kurva HVSR ini sangat penting dalam memahami struktur geologi

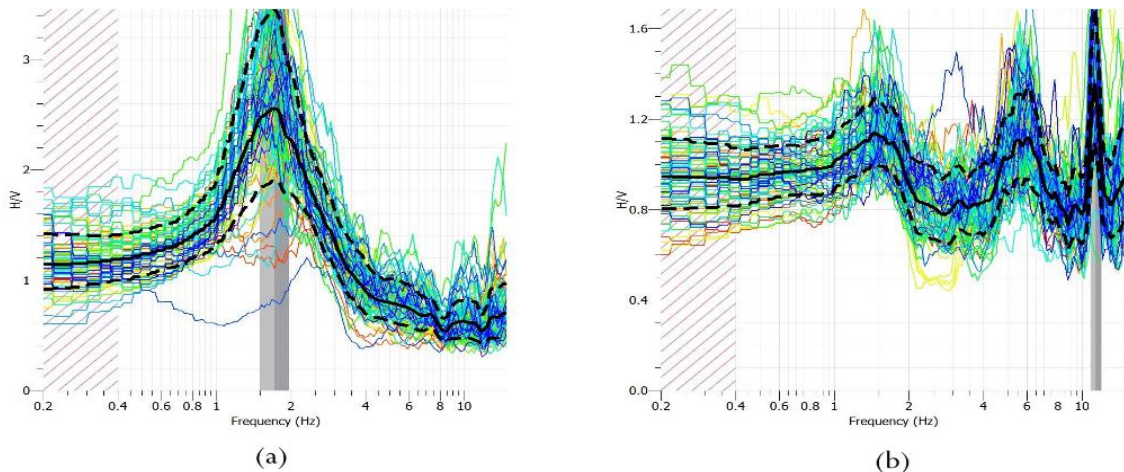
lokal dan menjadi dasar dalam kajian mikrozonasi seismik.

**Tabel 2.** Distribusi Titik Akuisisi Berdasarkan Formasi Geologi di Wilayah Penelitian (Sumber: ESDM)

Formasi	Jumlah	Titik Akuisisi	Litologi (ESDM Rembang)
Aluvium	23	T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T14, T15, T18, T19, T20, T21, T22, T23, T33, T36, T48	Kerakal, Kerikil, Lanau dan Lumpur
Lidah	3	T13, T16, T17	Batu lempung abu-abu kehitaman bersisipan batupasir bermoluska
Mundu	12	T27, T28, T29, T30, T31, T32, T42, T43, T44, T45, T59, T60	Napal masif, abu-abu keputihan, foraminifera plangton
Wonocolo	5	T34, T37, T46, T49, T51	Napal bersisipan batu pasir gamping di bagian bawah batu lempung pasiran bagian bawah.
Ledok	7	T40, T41, T53, T55, T56, T57, T58	Batu Lembang abu-abu, napal, dan batu gamping (Kalkenit)
Anggota Ngrayong	4	T38, T39, T50, T54	Batu pasir dominan, batu lanau, batu lempung, lignit, dan batu gamping
Lasem Volcanic	3	T24, T35, T47	Batuan gunung api lasem
Ngrayong	3	T25, T26, T52	Batu pasir karbonat sisipan batu gamping bioklastik

Tipe *clear peak* ditandai oleh puncak kurva yang tajam dan terdefinisi dengan baik pada frekuensi tertentu. Ciri ini mengindikasikan adanya kontras impedansi yang tinggi antara lapisan lunak di permukaan dengan lapisan keras di bawahnya. Kondisi ini memudahkan identifikasi frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan faktor amplifikasi ( $A_0$ ). Salah satu contoh kurva *clear peak* di titik 33 yang berada di Formasi Aluvium ditunjukkan pada Gambar 4(a). Sebaliknya, tipe *unclear peak* menunjukkan puncak yang tumpul atau tidak jelas. Kondisi ini mencerminkan bawah permukaan yang relatif homogen atau transisi antarlapisan yang tidak mencolok dari sisi impedansi seismik. Hal ini

menyulitkan identifikasi parameter  $f_0$  dan dapat meningkatkan ketidakpastian dalam proses inversi. Contoh kurva tipe *unclear peak* di titik 55 yang berada di Formasi Ledok ditunjukkan pada Gambar 4(b). Distribusi tipe kurva ini berkaitan erat dengan litologi formasi geologi yang menjadi dasar akuisisi. Formasi Aluvium umumnya menunjukkan kurva tipe *clear peak* karena adanya kontras signifikan antara endapan permukaan dan lapisan bawahnya yang lebih padat. Sebaliknya, formasi seperti Ledok dan beberapa titik pada Formasi Lidah menunjukkan kurva *unclear peak* akibat litologi yang lebih homogen atau bersifat transisional.

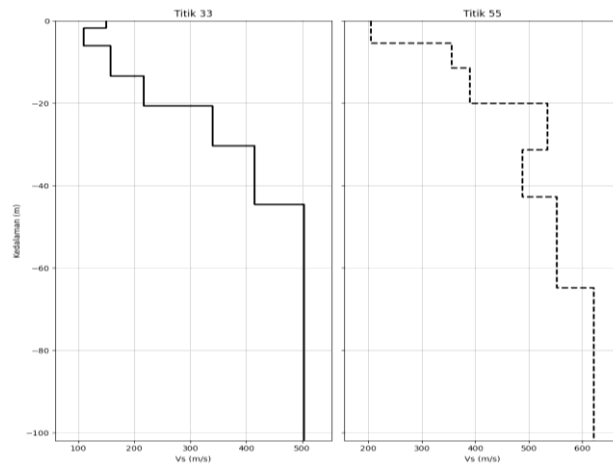


**Gambar 4.** Contoh tipe kurva HVSR *clear peak* di titik 33 (a), dan tipe *unclear peak* di titik 55 (b)

**Profil Vs Hasil Inversi HVSR**

Analisis profil Vs dari hasil inversi HVSR menunjukkan keterkaitan kuat antara bentuk kurva HVSR dan kondisi litologi bawah permukaan. Titik T33 (Formasi Aluvium) dengan kurva *clear peak* menunjukkan peningkatan Vs yang bertahap, mencerminkan lapisan lunak di permukaan di atas lapisan keras cocok dengan karakter litologi endapan lepas. Sebaliknya, titik T55 (Formasi Ledok) dengan kurva *unclear peak* menunjukkan lonjakan Vs yang

cepat, menandakan batuan keras dangkal seperti napal dan batu gamping, yang bersifat lebih homogen (Gambar 5). *Clear peak* mempermudah identifikasi frekuensi dominan dan faktor amplifikasi, sementara *unclear peak* menghasilkan ketidakpastian yang lebih tinggi dalam interpretasi. Variasi litologi sangat mempengaruhi bentuk kurva HVSR dan profil Vs. Integrasi keduanya penting digunakan untuk memperoleh gambaran yang akurat tentang struktur bawah permukaan.



**Gambar 5.** Profil Vs hasil inversi HVSR di titik 33, dan titik 55

**Distribusi Nilai Vs30**

Nilai Vs30 pada wilayah studi berkisar antara 208 hingga 556 m/s, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6. Variasi ini mencerminkan kondisi bawah permukaan yang heterogen, dipengaruhi oleh litologi dan morfologi regional. Nilai Vs30 yang lebih rendah dominan pada wilayah dataran rendah, khususnya di zona aluvial seperti lembah sungai dan sekitar pemukiman. Area ini sebagian besar berada di atas Formasi Aluvium dan Lidah, yang tersusun atas endapan lepas dengan kepadatan rendah. Nilai Vs30 di formasi ini berkisar antara 208–270 m/s, dengan variasi lokal akibat perbedaan tebal lapisan dan tingkat konsolidasi.

Sebaliknya, nilai Vs30 yang lebih tinggi tersebar dominan di wilayah perbukitan dan area dengan batuan padat, seperti yang terdapat pada Formasi Lasem Volcanic (418–556 m/s), Wonocolo (345–551 m/s), dan Ledok (316–468 m/s). Formasi-formasi ini didominasi oleh batuan keras seperti lava, napal, dan batugamping yang telah terkompaksi, mencerminkan kondisi bawah permukaan yang lebih stabil terhadap guncangan seismik.

Formasi Mundu dan Ngrayong menunjukkan variasi nilai Vs30 yang cukup luas (238–486 m/s), mengindikasikan heterogenitas litologi dari sedimen

lunak hingga batuan padat. Hal ini membuat formasi tersebut mencakup wilayah transisi antara zona dengan Vs30 rendah dan tinggi.

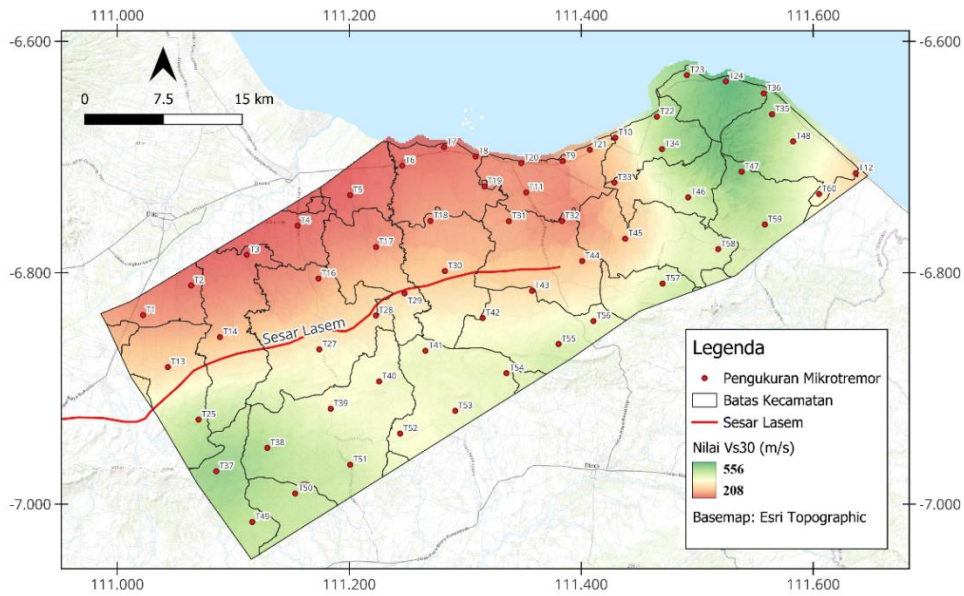
Secara keseluruhan, distribusi nilai Vs30 mengikuti pola geologi dan morfologi regional, di mana nilai rendah cenderung mendominasi wilayah dataran aluvial, sementara nilai tinggi umumnya ditemukan di zona perbukitan dan batuan dasar yang tersingkap dangkal. Pemahaman terhadap sebaran ini merupakan dasar penting dalam analisis klasifikasi jenis tanah dan zonasi mikroseismik pada tahap selanjutnya. Informasi ini dapat dimanfaatkan dalam perencanaan tata ruang serta perancangan struktur bangunan yang tahan terhadap gempa bumi. Integrasi data Vs30 dengan peta geologi, topografi, dan penggunaan lahan akan menjadi alat pendukung yang efektif dalam merumuskan strategi mitigasi bencana yang berbasis data dan kondisi aktual wilayah.

Untuk memastikan keakuratan hasil inversi dan Vs30, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil inversi dengan peta geologi lokal dan data Vs30 dari USGS, serta memeriksa konsistensi antar titik pengamatan. Pencocokan dengan peta geologi memastikan nilai Vs30 sesuai dengan formasi geologi, sementara data Vs30 USGS menjadi referensi eksternal. Hasil validasi

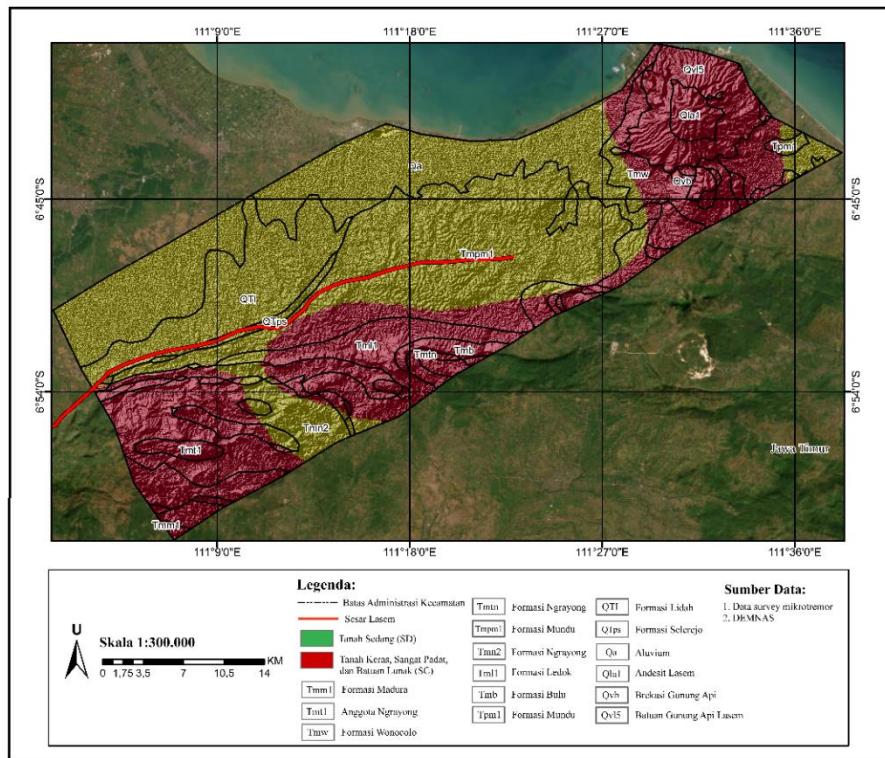
menunjukkan pola distribusi yang serupa antara hasil inversi dan data USGS, mengonfirmasi konsistensi antar sumber data. Validasi ini juga memastikan variasi Vs30 dapat dijelaskan oleh perbedaan geologi dan morfologi wilayah, mendukung analisis dan perencanaan berbasis data yang akurat.

**Klasifikasi Jenis Tanah**

Klasifikasi jenis tanah dalam studi ini didasarkan pada nilai Vs30 hasil inversi metode HVSR, ditunjukkan pada Gambar 7. Nilai-nilai Vs30 tersebut selanjutnya diklasifikasikan berdasarkan standar SNI 1726:2019 untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan tanah terhadap guncangan gempa bumi. Klasifikasi ini menjadi dasar penting dalam analisis bahaya seismik serta dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa bumi.



Gambar 6. Sebaran nilai Vs30 di wilayah penelitian



Gambar 7. Klasifikasi jenis tanah di wilayah penelitian

Klasifikasi jenis tanah berdasarkan nilai Vs30 dari 60 titik pengukuran menunjukkan dua kategori dominan sesuai SNI 1726:2019, yaitu Tanah Sedang (SD) dengan Vs30 antara 175–350 m/s dan Tanah Keras hingga Batuan Lunak (SC) dengan Vs30 antara 350–750 m/s. Sebaran peta klasifikasi menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah studi, khususnya di sekitar jalur aktif Sesar Lasem seperti Kecamatan Lasem, Tambakromo, Gabus, Winong, dan Pucakwangi, didominasi oleh tanah sedang (SD). Kondisi ini mengindikasikan potensi amplifikasi gelombang gempa bumi yang cukup besar, sehingga dikategorikan dalam tingkat kerentanan sedang hingga tinggi terhadap guncangan gempa bumi.

Sebaliknya, wilayah seperti Kaliori, Batangan, dan Jakenan yang berada relatif lebih jauh dari sesar aktif menunjukkan campuran klasifikasi SD dan SC, yang mencerminkan tingkat kerentanan sedang. Sementara itu, wilayah barat daya seperti Wirosari, Todanan, dan Ngaringan serta wilayah timur seperti Sluke, Kragan, Pancur, dan Sedan, umumnya didominasi oleh tanah keras (SC), dengan beberapa area yang menunjukkan kombinasi dengan tanah sedang. Daerah-daerah ini memiliki tingkat kerentanan rendah hingga sedang, meskipun pengaruh lokal seperti pelapisan geologi dan topografi dapat meningkatkan respons seismik di lokasi tertentu.

Distribusi jenis tanah yang diperoleh dari hasil klasifikasi Vs30 memiliki implikasi langsung terhadap potensi kerusakan akibat gempa bumi. Tanah sedang (SD) dengan nilai Vs30 rendah cenderung mengalami amplifikasi gelombang seismik, meningkatkan guncangan di permukaan dan berpotensi menimbulkan kerusakan struktural yang signifikan. Oleh karena itu, wilayah-wilayah yang didominasi oleh SD, terutama yang berdekatan dengan jalur sesar aktif, dikategorikan memiliki risiko kerusakan tinggi, khususnya apabila struktur bangunan tidak dirancang tahan gempa bumi.

Wilayah dengan kombinasi SD–SC, seperti Kaliori dan Batangan, berada dalam kategori risiko sedang, karena adanya variasi karakteristik tanah yang mempengaruhi tingkat amplifikasi gelombang. Adapun wilayah dengan dominasi tanah keras (SC), seperti di dataran tinggi dan perbukitan timur, memiliki risiko rendah hingga sedang. Namun demikian, kondisi geologi lokal, seperti lapisan batuan tidak seragam atau topografi kompleks, dapat menyebabkan amplifikasi lokal yang perlu diwaspadai. Dengan demikian, analisis potensi kerusakan ini menegaskan pentingnya integrasi data Vs30 dalam strategi mitigasi gempa bumi dan perencanaan pembangunan berbasis risiko.

Berdasarkan klasifikasi tanah dan potensi kerusakan gempa bumi, disarankan dilakukan studi mikrozonasi seismik yang lebih rinci, khususnya pada jenis tanah sedang (SD) dan zona transisi SD–SC, untuk memetakan area dengan amplifikasi tinggi. Penguatan bangunan yang sudah ada di wilayah tanah sedang (SD) perlu dilakukan agar memenuhi standar tahan gempa bumi sesuai SNI 1726:2019, dan bangunan baru harus dirancang sesuai ketentuan tersebut. Dalam perencanaan tata ruang, sebaiknya wilayah bertanah sedang (SD) mendapatkan perhatian khusus sebelum digunakan untuk bangunan vital atau permukiman padat, dengan dukungan kajian geoteknik dan seismik yang lebih mendalam. Selain itu, peningkatan edukasi dan pelatihan kesiapsiagaan gempa bagi masyarakat sangat penting untuk memperkuat pemahaman tentang risiko serta mempersiapkan respons yang tepat saat bencana terjadi.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengestimasi nilai Vs30 dan mengklasifikasikan jenis tanah berdasarkan data mikrotremor menggunakan metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) di sepanjang jalur Sesar Lasem, Jawa Tengah. Sebanyak 60 titik pengukuran dianalisis, dengan hasil nilai Vs30 yang berkisar antara 208 hingga 556 m/s. Rentang nilai tersebut mencerminkan kondisi bawah permukaan yang heterogen dan kompleks secara geologis.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah termasuk dalam klasifikasi jenis tanah sedang (SD) dan keras (SC) sesuai dengan SNI 1726:2019. Zona tanah sedang (SD), yang dominan di sepanjang jalur sesar aktif, memiliki potensi amplifikasi gelombang gempa bumi yang tinggi dan cenderung lebih rentan terhadap kerusakan struktural akibat guncangan seismik. Sebaliknya, zona dengan tanah keras (SC) menunjukkan tingkat kerentanan yang lebih rendah.

Wilayah dengan dominasi tanah sedang, khususnya yang berdekatan dengan jalur sesar aktif, dikategorikan memiliki potensi kerusakan yang tinggi apabila terjadi gempa bumi, terutama jika bangunan tidak dirancang sesuai standar ketahanan gempa. Sementara itu, wilayah dengan tanah keras dinilai relatif lebih stabil, meskipun tetap memerlukan kajian lebih lanjut terkait kondisi topografi dan pelapisan bawah permukaan.

Informasi mengenai Vs30 dan klasifikasi tanah ini menjadi dasar penting dalam penyusunan peta mikrozonasi seismik serta mendukung upaya mitigasi bencana gempa bumi di wilayah Sesar Lasem. Studi ini merekomendasikan penguatan struktur bangunan di zona tanah sedang, serta pelaksanaan kajian

mikrozonasi lanjutan yang lebih rinci guna menunjang perencanaan tata ruang berbasis risiko seismik.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) atas dukungan peralatan selama pengukuran lapangan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan yang turut membantu dalam akuisisi data di lapangan serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas kontribusinya dalam kelancaran penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Astjario, P. 2006. Indikasi Struktur Sesar dan Lipatan Bawah Permukaan Dasar Laut Perairan Tuban, Jawa Timur. *Geo-Dynamics*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan, Bandung
- Badan Informasi Geospasial. (2025). Data DEM Nasional (DEMNAS). Diakses pada 25 April 2025, dari <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/demnas>
- Badan Standardisasi Nasional. 2019. SNI 1726:2019: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional
- Bignardi, S., Mantovani, A., & Abu Zeid, N. 2016. OpenHVSr: Imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSr modeling and inversion. *Computers & Geosciences*, 93, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.009>
- Durmuş, H. 2024. Soil Characterization Using HVSr and MASW Techniques: A Case Study (Kütahya Dumlupınar University Campus). *Pure Appl. Geophys.*, 181, 1281–1302. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03452-w>
- Eka, S. 2010. Seismotektonik dan Potensi Bencana Gempabumi Lajur Transek Pacitan-Muria, Jawa Tengah. Pusat Survei Geologi, Bandung
- Kadar D. dan Sudijono. 1993. Peta Geologi Lembar Rembang Jawa Tengah, Skala 1: 100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung
- Manzunzu, B., Midzi, V., Zulu, B., Mulabisana, T., Pule, T., Sethobya, M., & Mankayi, N. 2025. Site response analysis for estimation of seismic site amplification in the city of Durban (South Africa). *Natural Hazards Research*, 5(1), 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.11.002>
- Nakamura, Y. 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of RTRI*, 30, 25-33
- Novianti, S. T., & Heliani, L. S. 2020. Analisis Deformasi di Wilayah Jawa Bagian Tengah Berdasarkan Data Pengamatan GNSS Kontinu untuk Identifikasi Sesar Aktif. *Skripsi. S1 Teknik Geodesi*
- Obie, M. 2012. Hubungan antara periode dominan (Tdom) dan kecepatan gelombang geser (Vs30) di wilayah Yogyakarta. *Skripsi. Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*
- Prajapati, R., Dhonju, S., Bijukchhen, S.M., Shigefuji, M., Takai, N. 2024. Estimation of Vs30 and site classification of Bhaktapur district, Nepal using microtremor array measurement. *Earth Planets Space*, 76, 135. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02077-6>
- Refrizon, Fadli, D.I., Sumanjaya, E., Maulidiyah, A., Hardianza, M., Hardiansyah, D. 2025. Seismic microzonation in Bengkulu City, Indonesia: insights for resilient planning after 2000 Mw 7.9 and 2007 Mw 8.4 earthquakes. *Bull Earthquake Eng.*, 23, 3085–3107. <https://doi.org/10.1007/s10518-025-02168-z>
- SESAME. 2004. Guidelines For the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations. Europe: SESAME European research project
- Sulaeman, C., Minarno, P. A., Priambodo, I., & Afif, H. 2020. Model Sesar Pati di Jawa Tengah Berdasarkan Data GPS (Pati Fault Model in Central Java Based on GPS Data). *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 21(1), 9–15
- Sunardi, B., Sismanto, Hartantyo, E., & Nukman, M. 2025. Seismic vulnerability in Yogyakarta Basin based on HVSr frequency domain window rejection algorithm. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 20(4), 813–823. <https://doi.org/10.18280/ij dne.200412>

- Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, B., Ohrnberger, M. and Savvaidis, A. 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878--1889, doi: 10.1785/0220190360
- Wathelet, M., Jongmans, D., & Ohrnberger, M. 2004. Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near Surface Geophysics*, 2(4), 211–221
- Wijayanto, Mardiatno, D., Daryono, Nehren, U., Marfai, M. A., & Pramono, S. 2022. Spatial distribution of Vs30 based on MASW and microtremor inversion in Gunungkidul, Yogyakarta, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 22(94), 29–38.
- Yaghmaei-Sabegh, S., & Rupakhety, R. 2020. A new method of seismic site classification using HVSR curves: A case study of the 12 November 2017 Mw 7.3 Ezgeleh earthquake in Iran. *Engineering Geology*, 272, 105574. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105574>
- Zega, B. N., Zulfakriza, Z., Rosalia, S., & Puspito, N. T. 2022. Seismic hazard potential in Yogyakarta based on HVSR curve estimation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1047(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1047/1/012028>