

DISTRIBUSI VS30 SECARA MIKROZONASI BERDASARKAN DATA INVERSI SEISMIK PASIF DI SEPANJANG JALAN PROVINSI ALTERNATIF KABUPATEN BENGKULU TENGAH-KEPAHIANG

(*Vs30 Distribution in Microzonation Based on Passive Seismic Inversion Data Along The Alternative Provincial Road of Central Bengkulu-Kepahiang Regency*)

Muhammad Afif Nabhan¹, Arif Ismul Hadi¹, Darmawan Ikhlas Fadli¹, Budi Harlianto¹, Refrizon¹, Rama Ramdani²

¹ Program Studi Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu

² Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu
Jalan WR Supratman Kandang Limun Kota/Kabupaten Kec. Muara Bangkahulu Kota Bengkulu Prov. Bengkulu
E-mail: ismulhadi@unib.ac.id

Diterima: 12 Juni 2023; Direvisi: 9 November 2023; Disetujui untuk Dipublikasikan: 14 November 2023

ABSTRAK

Kabupaten Bengkulu Tengah, merupakan salah satu daerah rawan gempa di Pulau Sumatera yang mana lokasinya berdekatan dengan Patahan Sumatera segmen Musi. Penilaian bahaya diperlukan untuk membuat peta risiko gempa bumi di daerah tersebut. Model kecepatan gelombang S pada kedalaman 30 meter (Vs30) dapat digunakan untuk mengetahui jenis tanah sebagai tindakan preventif untuk bahaya gempabumi. Tujuan penelitian ini adalah mengestimasi profil VS 30 di bawah 19 stasiun mikroseismik di jalan lintas Provinsi Bengkulu Tengah dengan menggunakan inversi *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Stasiun pengukuran mikrotremor disebarkan merata di sepanjang jalan lintas Provinsi Bengkulu Tengah. Data mikrotremor diproses menggunakan perangkat lunak Geopsy untuk mendapatkan kurva H/V yang kemudian diinversikan menggunakan perangkat lunak HV-Inv. Hasil disajikan dalam bentuk peta distribusi spasial Vs30 dan klasifikasi situs pada area penelitian. Peta tersebut menunjukkan bahwa nilai Vs30 sebagian besar tinggi, dengan kisaran 364 – 1320 m/s. Klasifikasi situs berada pada tanah yang sangat padat atau batuan lunak (SC) hingga batuan (SB). Nilai Vs30 cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan data *United States Geological Survey* (USGS), yaitu klasifikasi situsnya adalah tanah sedang (SD) hingga batuan (SB). Sebaliknya Nilai Vs30 Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) cenderung memiliki kesamaan nilai. Perbedaan terletak pada sebaran wilayah nilai Vs30 dengan klasifikasi situs berupa batuan lunak hingga batuan. Hal tersebut menunjukkan bahwa kondisi lokal secara signifikan mempengaruhi nilai Vs30. Hasil dari studi ini dapat bermanfaat untuk mitigasi bencana dan menjadi dasar pengembangan wilayah berdasarkan pengurangan risiko gempabumi di jalan lintas Provinsi Bengkulu Tengah.

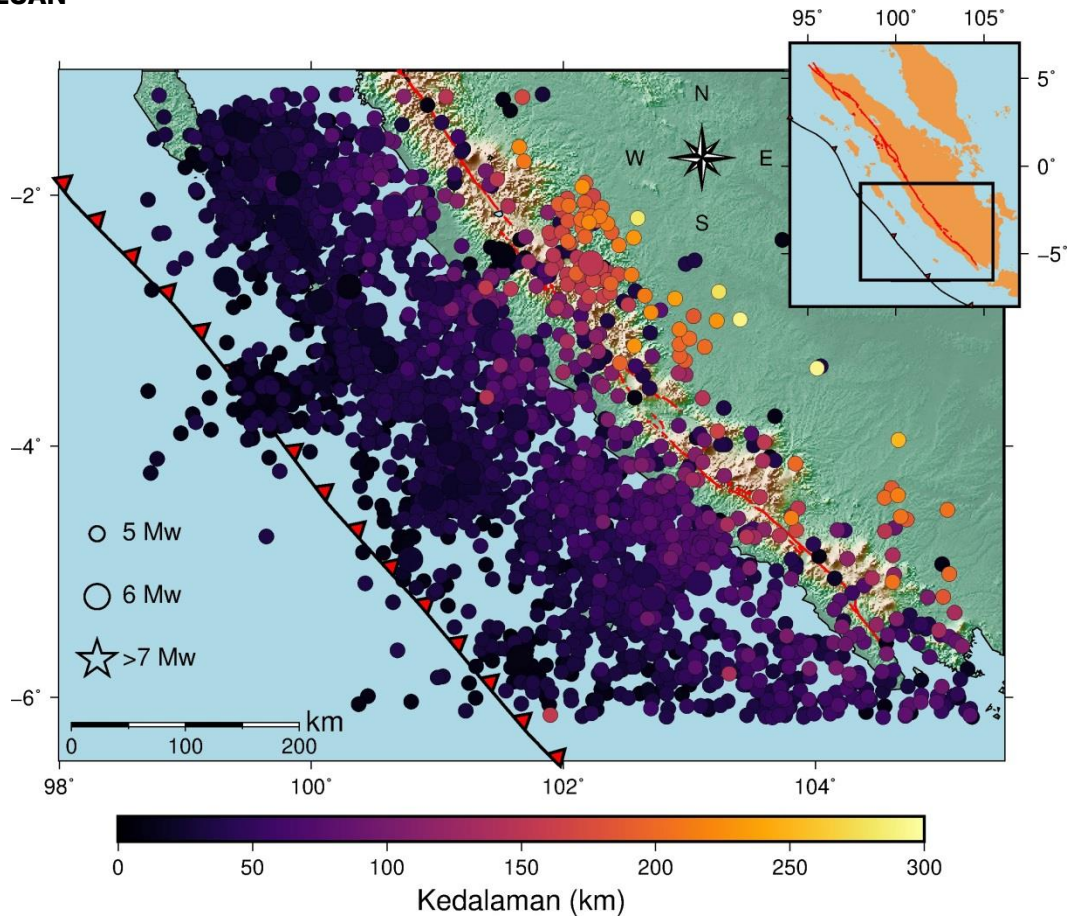
Kata kunci: *HVSr inversion*, kecepatan gelombang geser, Vs30

ABSTRACT

The Central Bengkulu Regency is one of the earthquake-prone areas on the island of Sumatra, which is located adjacent to the Musi segment of the Sumatra Fault. A hazard assessment is required to create an earthquake risk map for the area. The S-wave velocity model at a depth of 30 meters (Vs30) can be used to determine the type of soil as a preventive measure for earthquake hazards. The goal of this study is to use Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) inversion to figure out the VS30 profile under 19 microseismic stations on the Central Bengkulu Province causeway. Microtremor measurement stations were evenly distributed along the Central Bengkulu Province causeway. Microtremor data were processed using Geopsy software to obtain H/V curves, which were then inverted using HV-Inv software. The results are presented in the form of a Vs30 spatial distribution map and site classification in the study area. The map shows that the Vs30 values are mostly high, with a range of 364–1320 m/s. The site classification is from very dense soil or soft rock (SC) to rock (SB). Vs30 values tend to be higher than the United States Geological Survey (USGS) data, where the site classification is medium soil (SD) to rock (SB). Meanwhile, the Vs30 value of the Meteorology, Climatology, and Geophysics Agency (BMKG) tends to have similar values. The difference lies in the regional distribution of Vs30 values with site classifications of soft rock (SC) and rock (SB). This shows that local conditions significantly affect the Vs30 value. The results of this study can be useful for disaster mitigation and become the basis for regional development based on earthquake risk reduction on the Central Bengkulu Province road.

Keywords: *HVSr inversion*, shear wave velocity, Vs30

PENDAHULUAN



Sumber: USGS (2022)

Gambar 1. Peta seismisitas Bengkulu dan sekitarnya, periode tahun 2002- 2022.

Jalan alternatif Provinsi Bengkulu Tengah – Kepahiang terletak pada 40 km sebelah timur laut Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu, Indonesia. Pada bagian barat lokasi riset berdekatan dengan zona subduksi, dan dengan Patahan Sumatra segmen Musi di bagian timur. Berdasarkan peta seismisitas Bengkulu dan sekitarnya untuk tahun 2002-2022 menunjukkan bahwa aktivitas seismik di daerah tersebut sangat tinggi (USGS, 2022) (**Gambar 1**). Berdasarkan sejarah gempabumi Bengkulu, beberapa gempabumi yang merusak telah menyebabkan kerusakan dan korban jiwa.

Salah satu tujuan utama survei geofisika adalah untuk memperkirakan sifat fisik struktur bawah permukaan dari data pengukuran sinyal yang diukur dengan menggunakan berbagai metode geofisika. Salah satunya menggunakan metode mikrotremor (seismometer), yang didasarkan pada perekaman *ambient noise* seismik dengan menggunakan seismometer tiga komponen, merupakan sebuah teknik geofisika yang banyak diaplikasikan dalam beberapa tahun terakhir. Mikrotremor *single station* (Nakamura 1989), mikrotremor *two station* (Borcherdt, 1970) dan mikrotremor *array* (Okada & Suto, 2003) adalah teknik pengukuran utama yang digunakan untuk merekam *ambient noise* seismik. Teknik pengukuran mikrotremor *single station* adalah yang

paling praktis dan metode yang paling murah di antara teknik-teknik yang disebutkan dan telah umum digunakan dalam penilaian situs lokal akhir-akhir ini.

Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) merupakan salah satu pendekatan yang paling populer digunakan untuk menganalisis kebisingan ambien seismik dan didasarkan pada perhitungan rasio antara spektrum horisontal dan vertikal dari kebisingan ambien seismik (Nakamura, 2000; Acerra et al., 2004; Nakamura, 2008; Nakamura, 2009; Lunedei & Malischewsky, 2015). Amplitudo dan frekuensi puncak HVSr masing-masing terkait dengan faktor amplifikasi dan frekuensi resonansi lokasi setempat. Baru-baru ini, sejumlah sistem perangkat keras-perangkat lunak berbiaya rendah juga telah dikembangkan untuk memantau, merekam dan menganalisis sinyal seismik (Kafadar, 2020; Jornet-Monteverde et al., 2021).

Baru-baru ini, banyak penelitian menerapkan metode inversi linier dan nonlinier untuk memperkirakan profil kecepatan gelombang geser dari HVSr. Sebagai contoh Karagoz et al., (2015) menggunakan algoritma *simulated annealing* untuk mengestimasi gelombang geser struktur kecepatan. Garcia-Jerez et al., (2016) mengembangkan perangkat lunak HV-Inv untuk inversi dan

perhitungan maju dari HVSR di bawah asumsi medan difus. Bignardi et al., (2016) mengembangkan program komputer yang disebut OpenHVSR untuk untuk inversi dataset HVSR menggunakan metode Monte Carlo. Shi & Asimaki, (2017) mengembangkan perangkat lunak Seismosoil untuk analisis dan pemrosesan sinyal dari masalah respons lokasi 1D. Kemudian, Bignardi et al., (2018) memperkenalkan versi perbaikan dari OpenHVSR yang dikembangkan oleh Bignardi et al., (2016) untuk melakukan pemrosesan HVSR pada set data mikrotremor.

Selama ini belum ada ilmu sains yang dapat memprediksi gempa bumi secara tepat. Ketika upaya prediksi gempa bumi belum berhasil, maka mitigasi gempa bumi adalah upaya terbaik untuk mengantisipasi bencana gempa bumi. Langkah pertama dalam upaya mitigasi gempa bumi adalah mengembangkan peta risiko gempa bumi. Salah satu variabel untuk menyusun peta risiko gempa bumi adalah penilaian bahaya gempa. Penilaian bahaya gempa bumi dapat dilakukan dengan menganalisis intensitas guncangan permukaan tanah. Getaran permukaan tanah diperoleh dari intensitas guncangan batuan dasar dan faktor amplifikasi gerakan tanah. Potensi amplifikasi gerakan tanah dapat diestimasi dengan mengidentifikasi karakteristik *local site*. Nilai rata-rata kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter (V_{s30}) dapat digunakan untuk menentukan karakteristik klasifikasi situs lokal (Thamarux et al., 2019; Verdugo, 2019). V_{s30} adalah pengukur yang bagus untuk kekakuan dan kekuatan tanah (Park et al., 1999). Penggunaan V_{s30} sebagai variabel *site effect* telah banyak diperdebatkan (Alan et al., 2019), namun, telah disepakati dan diakui bahwa nilai V_{s30} akan terus digunakan di masa mendatang (Rahayu et al., 2019).

Pengukuran V_{s30} menggunakan metode pengeboran memberikan profil bawah permukaan yang baik, tetapi memakan waktu dan mahal. Untuk profil kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter (V_{s30}), metode geofisika telah sering digunakan (Sunardi, 2018). Penelitian ini menggunakan metode inversi mikrotremor yang cukup populer karena kemudahannya. Situs V_{s30} hasil survei mewakili lapisan bawah permukaan di bawah di bawah lokasi pengukuran. Nilai-nilai ini kemudian kemudian ditransformasikan ke dalam distribusi spasial V_{s30} .

Tujuan riset ini adalah untuk mengevaluasi distribusi spasial V_{s30} untuk area jalan alternatif Provinsi dengan menggunakan inversi pengukuran mikrotremor. Dalam penelitian ini, berfokus pada estimasi sifat fisik lapisan tanah dari metode HVSR, dan mendapatkan model kecepatan gelombang geser. Antarmuka grafis yang mudah digunakan yakni HV-Inv Beta (García-Jerez et al., 2016) digunakan dalam riset ini untuk mengestimasi sifat-

sifat fisik (kecepatan gelombang geser, ketebalan, dan densitas) lapisan tanah dari metode HVSR.

Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan karena masih terbatasnya literatur terkait V_{s30} . Selain itu, distribusi spasial V_{s30} dapat digunakan sebagai dasar pengembangan wilayah di Kabupaten Bengkulu Tengah terutama jalan alternatif provinsi yang berbasis pada pengurangan risiko gempa bumi dan sebagai bahan pertimbangan dalam perancangan awal infrastruktur tahan gempa bumi.

METODE

Penelitian ini Pengukuran pada 19 lokasi menggunakan metode mikrotremor dilakukan untuk mengestimasi nilai V_{s30} di jalan alternatif Provinsi, Bengkulu Tengah, Indonesia. Data tersebut berasal dari survei langsung di lapangan. Peta sebaran lokasi pengukuran disajikan pada **Gambar 2**. Pengambilan sampel frekuensi adalah 200 detik. Durasi perekaman berkisar antara 20 sampai 30 menit untuk setiap lokasi, sedangkan interval antar stasiun pengukuran berjarak 200 - 400 m. Kualitas data yang diperoleh diperiksa secara langsung selama pengukuran data di lapangan di setiap lokasi untuk memilih data berkualitas tinggi. Pedoman proyek SESAME (Acerra et al., 2004) menjadi panduan untuk memastikan kondisi eksperimental yang dapat diandalkan.

HVSR Inversion

Untuk memproses data mikrotremor, metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSR) digunakan. *Short period* Seismograf PASI Mod. GEMINI 2 s.n 14065 dengan tiga komponen, komponen horizontal (N dan E), dan vertikal (V), digunakan untuk merekam data mikrotremor. Sesuai dengan hasil yang diharapkan, waktu perekaman minimum adalah 30 menit untuk mendapatkan frekuensi fundamental terendah sebesar 0,5 Hz (Acerra et al., 2004). Spektrum amplitudo HVSR diperoleh dengan perangkat lunak Geopsy (Wathelet et al., 2020). Spektrum dihitung setiap 15 detik dari seluruh sinyal yang dibagi menjadi beberapa jendela. Data yang direkam dari urutan waktu diubah menjadi urutan frekuensi dengan proses *Fast Fourier Transform* (FFT). Proses ini mengubah sinyal yang direkam menjadi spektrum amplitudo. Selanjutnya, menggunakan algoritma *smoothing* Konno & Ohmachi (1998), dengan *smoothing* konstanta 40, diterapkan pada spektrum amplitudo Fourier. HVSR rata-rata di setiap jendela dapat ditentukan dengan **Persamaan 1** (Nakamura, 2000), sebagai berikut :

$$HVSR = \sqrt{[F_{NS}^2 + F_{EW}^2]/2F_V^2} \dots\dots\dots(1)$$

dengan F_{NS} , F_{EW} , dan F_V adalah amplitudo Fourier spektrum di utara-selatan, timur-barat, dan vertikal komponen.

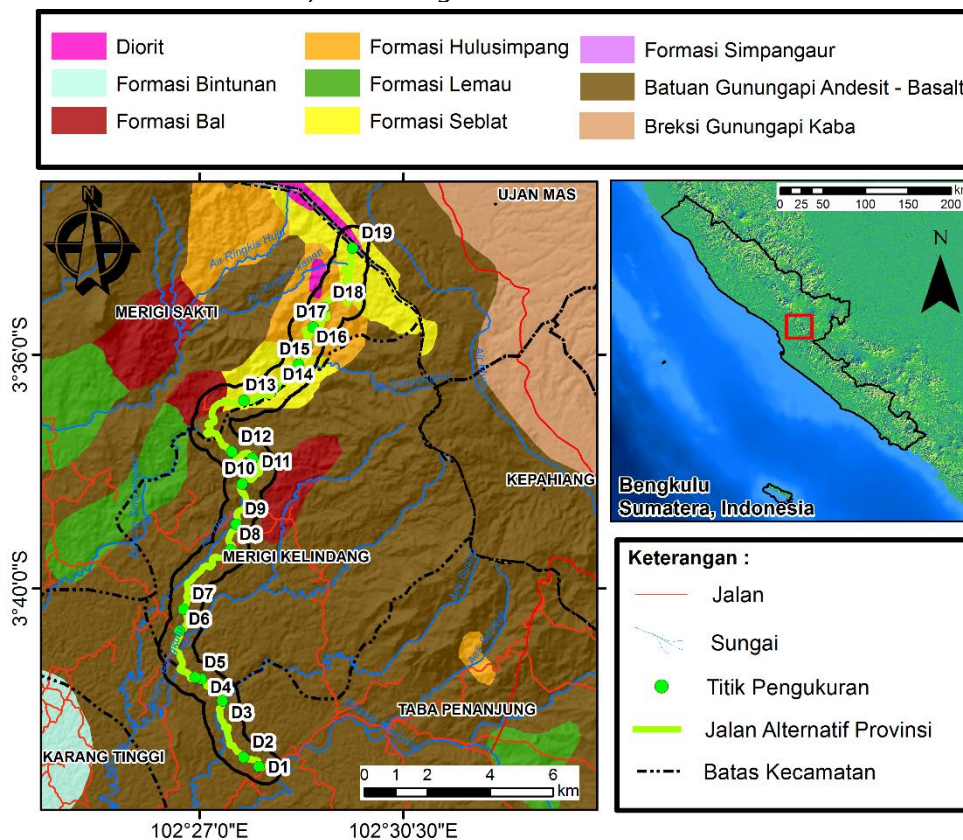
Perangkat lunak *HV-Inv* (García-Jerez et al., 2016) digunakan untuk inversi kurva HVSR eksperimen dan perhitungan *forward* dan prosedur inversi kurva HVSR dilakukan berdasarkan Teori *diffuse field assumption* (DFA). Kontribusi medan gelombang *noise* terhadap gelombang badan dan permukaan dihitung secara terpisah. Untuk inversi HVSR yang terbaik untuk mendapatkan struktur yang kompleks dan lebih dalam., Selain itu, asumsi Asumsi HVSR berdasarkan eliptisitas gelombang *Rayleigh* atau gelombang SH fungsi transfer cocok untuk inversi HVSR penuh, tetapi hanya di sekitar puncak yang dominan (Manea et al., 2020). Secara teoritis, lapisan viskoelastik yang menumpuk di atas setengah ruang dianggap sebagai lapisan bawah permukaan. Hal ini ditunjukkan dari faktor Ketebalan (H), densitas (ρ), dan kecepatan gelombang kompresi dan geser (V_p , V_s).

Model bawah permukaan 1D ditentukan untuk setiap lokasi. Berdasarkan kurva HVSR, *forwarding*

modeling (FWD) digunakan untuk menghitung spektrum amplifikasi gelombang badan dan gelombang permukaan. Untuk mendapatkan nilai V_s yang tepat, ada batasan yang diperlukan selama proses inversi kurva HVSR (Wijayanto et al., 2022).

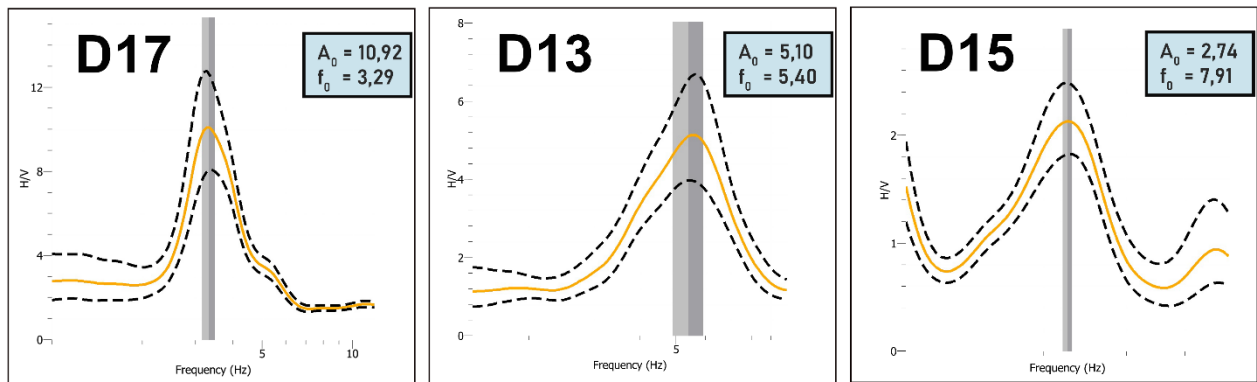
V_s dan Klasifikasi Situs

Nilai kecepatan gelombang geser mewakili sifat geser dari struktur tanah dan merupakan parameter penting untuk menentukan dinamika karakteristik tanah. Gelombang geser menganalisis dan mengevaluasi efek situs lokal, terutama pada sedimen lapisan di atas batuan dasar. *National Earthquake Hazard Reduction Provisions* (NEHRP, 1998) telah memasukkan kriteria untuk menentukan kondisi lokal berdasarkan V_s30 , sedangkan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) 1726:2019, Badan Standarisasi Nasional mengeluarkan aturan untuk memperkirakan nilai V_s30 dengan menghitung berdasarkan **Persamaan 2** (BSN, 2019).



Sumber: diadaptasi dari Gafoer et al. (2007)

Gambar 2. Geologi di daerah studi beserta titik pengukuran HVSR.



Gambar 3. Kurva HVSR pada titik pengukuran D17, D13, dan D15.

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \dots\dots\dots(1)$$

di mana:

d_i adalah ketebalan lapisan pada kedalaman 0 sampai 30 m. V_{si} adalah kecepatan gelombang geser lapisan ke- i (m/s).

Berdasarkan SNI 1726:2019, tentang tata cara perencanaan bangunan tahan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung, terdapat klasifikasi tanah kedalam lima jenis, yakni batuan keras, batuan, tanah keras, sangat padat atau batuan lunak, tanah sedang, dan tanah lunak. **Tabel 1** menunjukkan klasifikasi kelas situs berdasarkan SNI 1796:2019. (BSN, 2019).

Tabel 1. Klasifikasi situs berdasarkan data V_{s30} .

Situs Kelas	V_{s30} (m/s)
SA (batuan keras)	>1500
SB (batuan)	750 - 1500
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 – 750
SD (tanah sedang)	175 -350
SE (tanah lunak)	> 175

Sumber: (BSN, 2019)

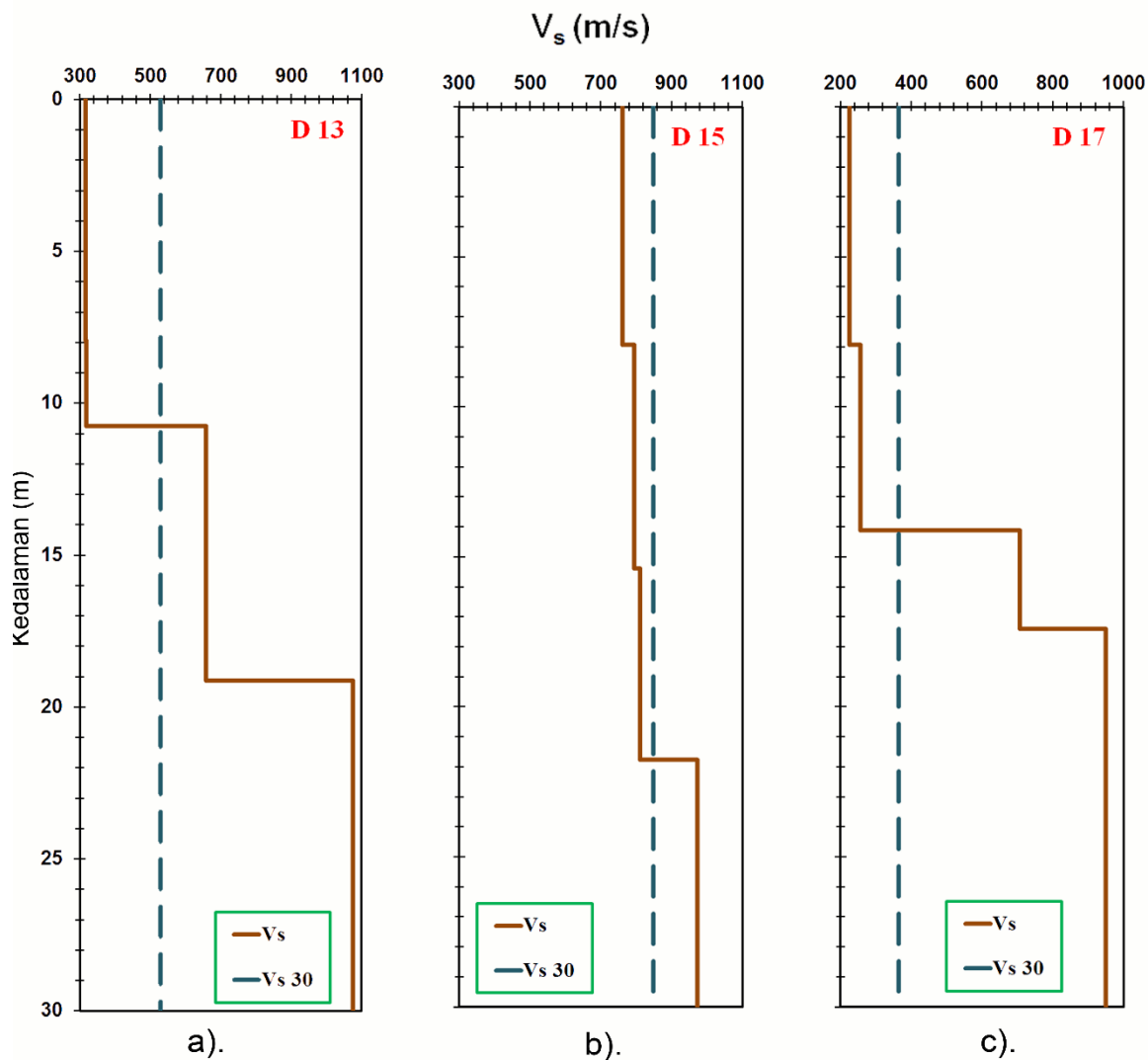
HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi spasial V_{s30} di daerah jalan alternatif Provinsi Kabupaten Bengkulu Tengah dilakukan setelah dilakukan inversi data mikrotremor. Hasil dari proses inversi berupa kurva 1D V_s yang berisi informasi kecepatan gelombang geser pada setiap kedalaman. **Gambar 3** menunjukkan hasil kurva HVSR di beberapa lokasi titik pengukuran mikrotremor. HasilHasil dari kurva HVsr ini kemudian diberlakukandilakukan proses inversi sehingga diperoleh kurva kecepatan gelombang

geser (V_s) secara 1D (lihat **Gambar 4**). Potensi estimasi V_{s30} diperiksa langsung dengan HVSR Inverison berdasarkan data lapangan. Sebaran 19 titik lokasi pengukuran mikrotremor ditampilkan dalam **Gambar 5**.

Persamaan 2 berdasarkan hasil pengolahan data di 19 lokasi pengukuran, menunjukkan bahwa nilai V_{s30} berada pada kisaran 426 - 2781 m/s. Secara umum, nilai V_{s30} di daerah penelitian relatif tinggi, dengan nilai rata-rata 1093,809 m/s. Mengacu pada klasifikasi situs SNI 1796:2019 pada **Tabel 1**, nilai kelas situs untuk daerah penelitian berada pada rentang SC (Tanah Keras, Sangat Padat, dan Batuan Lunak), (Batuan) SB, dan SA (Batuan Keras). Rincian dari 19 lokasi pengukuran menunjukkan bahwa 8 titik lokasi termasuk dalam kelas situs SC, 7 titik lokasi kelas situs SB dan 4 titik lokasi termasuk dalam kelas situs SA. Kelas situs SC memiliki nilai V_{s30} antara 350 -750 m/s, SB antara 750 -1500m/s, dan SA > 1500 m/s (BSN, 2019).

Secara umum, distribusi spasial V_{s30} yang kami usulkan memiliki nilai yang lebih tinggi daripada model USGS, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5a**. Nilai V_{s30} dari model USGS merupakan proksi dari model kemiringan topografi yang dikembangkan oleh Allen & Wald (2009). Terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara nilai V_{s30} hasil penelitian ini dengan nilai V_{s30} yang diprediksi dari proksi kemiringan lereng topografi, terutama pada daerah dataran tinggi yang memiliki kemiringan lereng landai. Nilai V_{s30} hasil penelitian ini berada pada kisaran 426 - 2781 m/s tergolong kedalam kelas situs SC, SB, dan SA (**Gambar 5a**) sedangkan model USGS memberikan nilai 279 – 892 m/s serta tergolong dalam kelas situs SD, SC, dan SB (**Gambar 5b**). Perbandingan hasil penelitian ini dengan model USGS menunjukkan bahwa nilai estimasi V_{s30} berdasarkan model USGS tidak sesuai untuk wilayah penelitian.



Gambar 4. Kurva model 1D dari V_s hasil inversi HVSR pada titik a) D13, b) D15, dan c) D17.

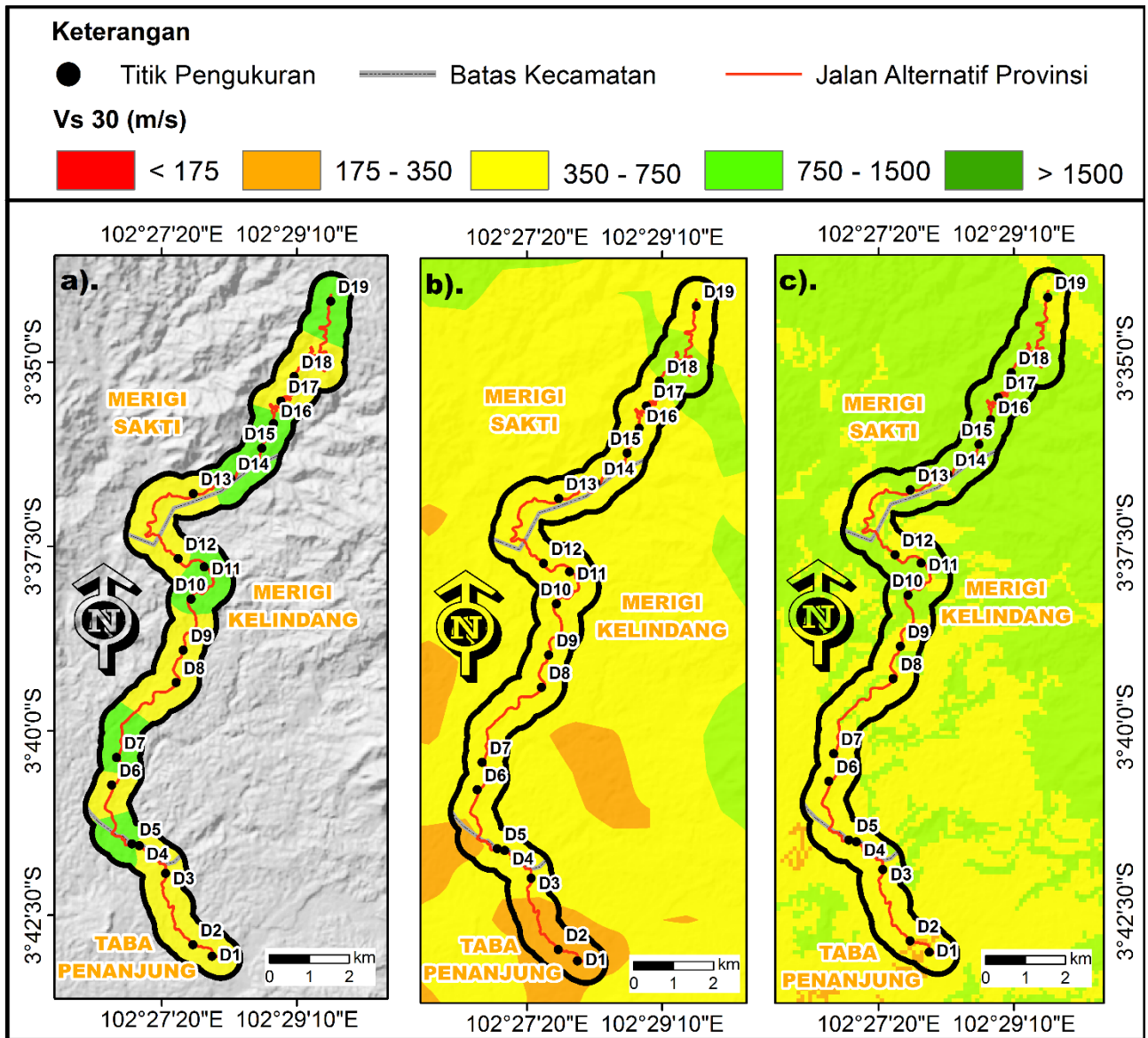
Distribusi spasial $V_s 30$ model BMKG memiliki nilai yang mendekati model yang diusulkan daripada model USGS, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5c**. Nilai $V_s 30$ dari model BMKG memiliki resolusi 30 m (InaRisk BNPB, 2023). Nilai $V_s 30$ dari model BMKG juga sudah dilakukan kalibrasi dan penyesuaian korelasi antara kelas topografi dan $V_s 30$ untuk wilayah Indonesia. Secara keseluruhan, terdapat 136 data $V_s 30$ dari pengukuran lapangan menggunakan metode *Standard Penetration Test* (SPT) yang dilakukan oleh BMKG yang tersebar di seluruh Indonesia (Irsyam et al., 2017).

Terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara nilai $V_s 30$ hasil penelitian ini dengan nilai $V_s 30$ yang diprediksi dari proksi kemiringan lereng topografi, terutama pada daerah dataran tinggi yang memiliki kemiringan lereng landai. Nilai $V_s 30$ BMKG ini berada pada kisaran 260 – 875 m/s termasuk kedalam kelas situs SD, SC, dan SB.

Wilayah penelitian dikenal sebagai daerah yang rawan longsor. Sairam et al., (2019) dan Pudi

et al., (2021) mengindikasikan bahwa daerah perbukitan yang lebih tinggi biasanya ditandai dengan V_s yang lebih tinggi, namun kondisi pelapukan dapat menjadi faktor yang sangat berpengaruh terhadap variasi V_s . Investigasi lebih lanjut dengan metode geofisika lain seperti *Multi Channel Surface Wave* (MASW) dan *array* mikroseismik dapat digunakan mengkonfirmasi hasil analisis. Hasil tersebut juga dapat divalidasi dengan menggunakan data lubang bor dari daerah penelitian.

Nilai $V_s 30$ yang diperoleh dalam penelitian ini memberikan penilaian yang berharga, terutama untuk daerah penelitian yang terkena dampak situs lokal. Distribusi spasial $V_s 30$ yang kami usulkan merupakan langkah penting dalam program mitigasi bencana dan menjadi dasar pengembangan wilayah berbasis pengurangan risiko gempa. Untuk perencanaan wilayah di masa mendatang, distribusi spasial $V_s 30$ harus dipertimbangkan dalam perencanaan awal infrastruktur tahan gempa.



Sumber : Allen & Wald (2009); InaRisk BNPB, (2023)
Gambar 5. Peta distribusi spasial Vs30 (a) Hasil inversi HVSR, (b) USGS (), dan (c) BMKG.

KESIMPULAN

Penilaian distribusi spasial Vs30 merupakan hal yang mendasar dalam memahami karakteristik lokasi lokal dan memperkirakan potensi amplifikasi gerakan tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai Vs30 secara umum tinggi, dengan kisaran 511-1422 m/s dan rata-rata 1004 m/s. Nilai Vs30 berada pada kelas situs Tanah Keras, Sangat Padat, dan Batuan Lunak (SC) hingga Batuan (SB).

Nilai Vs30 hasil inversi HVSR cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan data USGS yaitu klasifikasi situsnya adalah tanah sedang (SD). Nilai Vs30 Badan Meteorolgi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) cenderung memiliki kesamaan nilai, yang membedakan hanya sebaran wilayah nilai Vs 30nya. Klasifikasi situsnya adalah batuan lunak (SC) hingga batuan (SB).

Formasi geologi berkorelasi dengan nilai Vs30 dan kerentanan seismik. Formasi geologi Hulusimpang memiliki nilai Vs30 yang rendah

sebesar 511 m/s. Namun, formasi geologi Seblat dan Batuan Gununapi Andesit-Basal memiliki nilai Vs30 yang tinggi yaitu 1422 m/s. Perbedaan nilai ini mengindikasikan bahwa kondisi geologi lokal sangat mempengaruhi nilai Vs30 secara signifikan. Oleh karena itu, penilaian terhadap distribusi spasial Vs30 berdasarkan unit geologi lokal sangat diperlukan, guna keperluan mitigasi bencana alam seperti gempa bumi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Fisika FMIPA Universitas Bengkulu karena telah memberikan fasilitas dan peralatan yang kami butuhkan untuk melakukan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Predator Research Group (PRG) karena telah membantu mereka membuat makalah ini lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Acerra, C., Aguacil, G., Anastasiadis, A., Atakan, K., Azzara, R., Bard, P. Y., ... & Zacharopoulos, S. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. *European Commission–EVG1-CT-2000-00026 SESAME*.
- Alan, Y., Antony, M., & John, B. (2019). Precision of VS30 values derived from noninvasive surface wave methods at 31 sites in California. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 127*, 105802. Doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105802.
- Allen, T. I., & Wald, D. J. (2009). On the use of high-resolution topographic data as a proxy for seismic site conditions (VS 30). *Bulletin of the Seismological Society of America, 99*(2A), 935-943. Doi: 10.1785/0120080255.
- Bignardi, S., Mantovani, A., & Zeid, N. A. (2016). OpenHVSr: imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSr modeling and inversion. *Computers & Geosciences, 93*, 103-113. Doi: 10.1016/j.cageo.2016.05.009.
- Bignardi, S., Yezzi, A. J., Fiussello, S., & Comelli, A. (2018). OpenHVSr-Processing toolkit: Enhanced HVSr processing of distributed microtremor measurements and spatial variation of their informative content. *Computers & geosciences, 120*, 10-20. Doi: 10.1016/j.cageo.2018.07.006.
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America, 60*(1), 29-61. Doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0600010029>.
- BSN. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung. SNI 1726:2019. Indonesia.
- Gafoer, S., Amin, T. C., & R. Pardede. (1992). *Peta Geologi Lembar Bengkulu, Sumatra*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- García-Jerez, A., Piña-Flores, J., Sánchez-Sesma, F. J., Luzón, F., & Perton, M. (2016). A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption. *Computers & geosciences, 97*, 67-78. Doi: 10.1016/j.cageo.2016.06.016.
- InaRisk BNPB. (2023). Vs 30 BMKG. *InaRisk BNPB*. Retrieved February 10, 2023 (http://inarisk.bnpb.go.id:6080/arcgis/rest/services/TEMATIK/avs30_BMKG/ImageServer).
- Irsyam, M., Asrurifak, M., Mikhail, R., Wahdiny, I. I., & Rustiani, S. (2017). Development of Nationwide Vs30 Map and Calibrated Conversion Table for Indonesia using Automated Topographical Classification. *Journal of Engineering & Technological Sciences, 49*(4). Doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.4.3.
- Jornet-Monteverde, J. A., Galiana-Merino, J. J., & Soler-Llorens, J. L. (2021). Design and implementation of a wireless sensor network for seismic monitoring of buildings. *Sensors, 21*(11), 3875. Doi: 10.3390/s21113875.
- Kafadar, Ö. (2020). RaspMI: Raspberry pi assisted embedded system for monitoring and recording of seismic ambient noise. *IEEE Sensors Journal, 21*(5), 6306-6313. Doi: 10.1109/JSEN.2020.3043753.
- Karagoz, O., Chimoto, K., Citak, S., Ozel, O., Yamanaka, H., & Hatayama, K. (2015). Estimation of shallow S-wave velocity structure and site response characteristics by microtremor array measurements in Tekirdag region, NW Turkey. *Earth, Planets and Space, 67*, 1-17. Doi: 10.1186/s40623-015-0320-1.
- 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. Doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0880010228>.
- Lunedei, E., & Malischewsky, P. (2015). A review and some new issues on the theory of the H/V technique for ambient vibrations. *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology: Volume 2*, 371-394.
- Manea, E. F., Cioflan, C. O., Coman, A., Michel, C., Poggi, V., & Fäh, D. (2020). Estimating geophysical bedrock depth using single station analysis and geophysical data in the extra-Carpathian area of Romania. *Pure and Applied Geophysics, 177*, 4829-4844. Doi: 10.1007/s00024-020-02548-3.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30*(1).
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering* (Vol. 2656, pp. 1-8).
- Nakamura, Y. (2008). On The H/V Spectrum. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China, October 12-17, 2008.
- Nakamura, Y. (2009). Basic structure of QTS (HVSr) and examples of applications. In *Increasing seismic safety by combining engineering technologies and seismological data* (pp. 33-51). Springer Netherlands.
- NEHRP. (1998). *Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and Other Structures: Part 1-Provisions and Part 2-Commentary*. FEMA 302, Texas, USA.
- Okada, H., & Suto, K. (2003). *The microtremor survey method*. Society of Exploration Geophysicists.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics, 64*(3), 800-808. Doi: 10.1190/1.1444590.
- Pudi, R., Roy, P., Martha, T. R., & Kumar, K. V. (2021). Estimation of earthquake local site effects using microtremor observations for the Garhwal-Kumaun Himalaya, India. *Near Surface Geophysics, 19*(1), 73-93. Doi: 10.1002/nsg.12128.
- Rahayu, A., Prakoso, W. A., & Sadisun, I. A. (2019). Modeling Estimated V S30 Based on Topography and Geomorphology for Padang, Indonesia. *International Journal of Civil Engineering and Technology, 10*(06), 103-111.
- Sairam, B., Singh, A. P., Patel, V., Chopra, S., & Kumar, M. R. (2019). VS30 mapping and site characterization in the seismically active intraplate region of Western India: implications for risk mitigation. *Near Surface Geophysics, 17*(5), 533-546. Doi: 10.1002/nsg.12066.
- Shi, J., & Asimaki, D. (2017). From stiffness to strength: Formulation and validation of a hybrid hyperbolic nonlinear soil model for site-response analyses.

- Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1336-1355. Doi: 10.1785/0120150287.
- Sunardi, B. (2018). Vs30 mapping and soil classification in the southern part of Kulon Progo using Rayleigh wave ellipticity inversion. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, 1(2):58-64. Doi: 10.22146/jgise.39780.
- Thamarux, P., Matsuoka, M., Poovarodom, N., & Iwahashi, J. (2019). VS30 seismic microzoning based on a geomorphology map: Experimental case study of Chiang Mai, Chiang Rai, and Lamphun, Thailand. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(7), 309. Doi: 10.3390/ijgi8070309.
- USGS. (2022). United States Geological Survey, Historical Earthquakes in The World Since 1900. *United States Geological Survey*. Retrieved March 1, 2023.
- Verdugo, R. (2019). Seismic site classification. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 124, 317-329. Doi: 10.1016/j.soildyn.2018.04.045.
- Wathelet, M., Chatelain, J. L., Cornou, C., Giulio, G. D., Guillier, B., Ohrnberger, M., & 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.
- Wijayanto, W., Mardiatno, D., Nehren, U., Marfai, M. A., & Pramono, S. (2022). Spatial Distribution of Vs30 Based on Masw and HVSR Inversion In Gunungkidul, Yogyakarta. *Geomate Journal*, 22(94), 29-38. Doi: <https://doi.org/10.21660/2022.94.2463>.

Halaman ini sengaja kami kosongkan