

Analisis indeks kerentanan seismik berdasarkan sebaran nilai Vs30 di Pemalang, Jawa Tengah

Urip Nurwijayanto Prabowo*, Zaroh Irayani dan Sebah

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman
Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah

*email: urip.np@unsoed.ac.id

Abstrak – Pemalang merupakan salah satu kabupaten di Jawa Tengah yang terletak pada jalur sesar aktif yaitu Sesar Baribis – Kendeng di utara Jawa yang memanjang dari barat ke timur. Sesar tersebut masih aktif dan berpotensi menimbulkan kerusakan jika terjadi gempa bumi. Pada penelitian ini dilakukan analisis indeks kerentanan seismik sebagai salah satu upaya awal dalam mitigasi bencana gempa bumi. Indeks kerentanan seismik menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah mengalami deformasi akibat gempa bumi. Indeks kerentanan seismik pada penelitian ini dihitung berdasarkan nilai amplifikasi dan frekuensi yang diperoleh secara empiris dari nilai kecepatan gelombang geser di kedalaman 0-30 (Vs30). Nilai Vs30 di daerah pemalang berkisar antara 183,511 – 779,974 m/s yang termasuk dalam klasifikasi SC (tanah keras) dan SB (batuan). Hasil analisis mendapatkan nilai amplifikasi berkisar antara 0,780-2,742; nilai frekuensi berkisar antara 1,529 – 6,499 Hz; dan nilai indeks kerentanan seismik berkisar 0,068 – 4,912. Daerah paling rawan dengan nilai indeks kerentanan seismik tertinggi berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh sehingga diperlukan kajian lebih lanjut mengenai potensi kerusakan akibat gempa bumi.

Kata Kunci: Vs30, indeks kerentanan seismik, Pemalang

Abstract – Pemalang is a regency in Central Java, Indonesia, located along an active fault system known as the Baribis–Kendeng Fault, which extends west–east across northern Java. This fault remains active and poses a potential seismic hazard that may cause significant damage during earthquakes. This study presents an analysis of the seismic vulnerability index as an initial step toward earthquake disaster mitigation. The seismic vulnerability index represents the susceptibility of near-surface soil layers to deformation induced by seismic activity. In this study, the index is estimated based on amplification and dominant frequency values derived empirically from shear-wave velocity in the upper 30 meters (Vs30). The Vs30 values in the Pemalang area range from 183,511 – 779,974 m/s corresponding to the SC and SB classification. The results indicate that amplification values range from 0,780-2,742; dominant frequency ranges from 1,529 – 6,499 Hz, and the seismic vulnerability index ranges from 0,068 – 4,912. Areas with the highest seismic vulnerability index, indicating the greatest potential risk, are located in Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman and parts of Pemalang and Bodeh Sub-Districts., highlighting the need for further detailed assessment of earthquake-induced damage potential.

Key words: Vs30, seismic vulnerability index, Pemalang

PENDAHULUAN

Pemalang merupakan salah satu Kabupaten di Utara Jawa tengah yang termasuk ke dalam jalur Pantura (Pantai Utara Jawa). Di daerah Pemalang terdapat beberapa sesar lokal seperti sesar Logeni-Kali Rambut, sesar Kali Wuluh dan sesar sekunder Kali wuluh yang diperkirakan dapat menyebabkan gempa bumi [1]. Selain itu, Pemalang juga dilewati Sesar Baribis Kendeng yang diperkirakan masih aktif. Sesar Baribis-Kendeng merupakan sesar yang berada di utara Jawa dan membentang dari barat hingga timur dengan pergerakan 2,3

– 5 mm/tahun [2]. Hal ini membuat upaya mitigasi bencana gempa bumi penting di lakukan di daerah Pemalang. [3] memetakan nilai peak ground acceleration (PGA) di permukaan dan intensitas gempa bumi di Kec. Watukumpul, Kab. Pemalang dan memberikan hasil nilai PGA dalam kategori Medium I dan intensitas gempa bumi berkisar III-IV dengan kategori gempa bumi terasa. [4] melakukan pemetaan PGA di batuan dasar menggunakan persamaan Fukushima Tanaka dan menyimpulkan bahwa Pemalang termasuk dalam kategori nilai PGA rendah.

Selain dengan pemetaan PGA, pemetaan daerah rawan gempa bumi juga dapat didasarkan pada nilai indeks kerentanan seismik. Indeks kerentanan seismik menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah mengalami deformasi akibat gempa bumi. Indeks kerentanan seismik berkaitan dengan kondisi geologi lokal (*local site effect*) dimana lapisan permukaan yang lunak akan memiliki nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi dan potensi yang tinggi mengalami deformasi akibat getaran gempa bumi. Beberapa penelitian mengemukakan bahwa sebaran nilai indeks kerentanan seismik berkorelasi dengan peta kerusakan bangunan akibat gempa bumi (Gurler et al., 1990; Nakamura, Sato and Nishinaga, 2000; Daryono et al., 2009). Tiap wilayah memiliki nilai batas indeks kerentanan seismik tertentu yang menjadi batas terjadinya kerusakan jika gempa bumi terjadi [7].

Nilai indeks kerentanan seismik dihitung dari nilai amplifikasi dan frekuensi hasil pengukuran mikrotremor [8], [9]. Namun beberapa peneliti menyatakan bahwa amplifikasi hasil pengukuran mikrotremor tidak relevan dengan amplifikasi akibat getaran gempa bumi [10], [11]. Hasil pengukuran 5 titik mikrotremor di daerah utara Pemalang (pantai) menunjukkan nilai amplifikasi tinggi yang tidak sejalan dengan potensi deformasi lapisan tanah (*ground shear strain*), nilai PGA serta intensitas gempa bumi [12].

Indeks kerentanan seismik hasil pengukuran mikrotremor merupakan respon dari lapisan lunak permukaan sampai *engineering bedrock* dengan ketebalannya bervariasi di tiap lokasi pengukuran. Hasil pengukuran mikrotremor di utara Pemalang menunjukkan lapisan sedimen permukaan memiliki variasi nilai frekuensi antara 1,56 –

11,56 Hz dan ketebalan lapisan sedimen berkisar 4,49 – 33,70 m [13]. Pada penelitian ini dilakukan pemetaan indeks kerentanan seismik secara empiris sebagai respon dari lapisan tanah pada kedalaman 0-30 m pada seluruh titik lokasi perhitungan [14]. Respon lapisan tanah dari 0-30 m di dapatkan dari data kecepatan gelombang geser rata rata pada rentang kedalaman 30 m (V_{s30}). beberapa peneliti menggunakan persamaan empiris untuk memetakan indeks kerentanan seismik di wilayah Klaten [15], Cianjur [16].

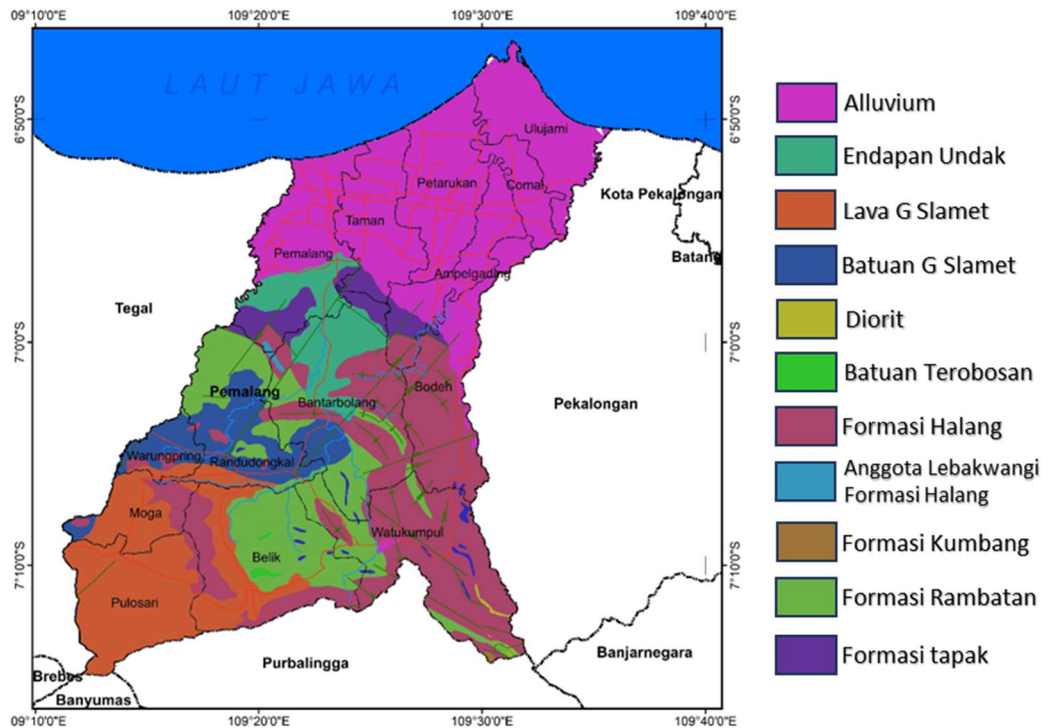
GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Peta geologi Pemalang (Gambar 1) menunjukkan bagian utara sampai ke tengah Pemalang termasuk dalam Formasi Alluvium meliputi Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh [17]. Bagian tengah ke selatan Pemalang geologinya tersusun atas batuan Gunung slamet dan Formasi berumur tersier antara lain Formasi Halang, Formasi Kumbang, Formasi Rambatan dan Formasi Tapak [17].

METODE PENELITIAN

Data VS 30

V_{s30} merupakan nilai kecepatan gelombang geser rata-rata lapisan tanah dari kedalaman 0-30 m. Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai V_{s30} dapat digunakan untuk mendeskripsikan litologi batuan/klasifikasi jenis tanah. Data V_{s30} Wilayah Pemalang didapatkan dari *United States Geological Survey* (USGS). Pada penelitian ini, data V_{s30} digunakan untuk perhitungan amplifikasi serta frekuensi dominan.



Gambar 1. Peta Geologi Kabupaten Pemalang [17][18]

Tabel 1 Klasifikasi Kelas Situs berdasarkan nilai Vs30 sesuai SNI 1726:2019 [19]

Kelas Situs	Vs30(m/s)	\bar{N}	\bar{S}_u (Kpa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 – 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	– 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 – 350	5 – 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut		
	Indeks plastisitas, $PI > 20$		
	Kadar air, $w \geq 40\%$		
	Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis situs yang mengikuti)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempabumi seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		

Analisis data

Tahapan analisis data dapat dilihat pada Gambar 2.

Tahap awal dilakukan perhitungan nilai amplifikasi berdasarkan data Vs30 menggunakan persamaan dari Fujimoto and Midorikawa (2006) [14] sebagai berikut

$$\log(A_0) = 2,367 - 0,852\log(Vs30) \quad (1)$$

dengan A_0 adalah nilai amplifikasi. Amplifikasi menggambarkan faktor perbesaran getaran gempabumi disebabkan oleh lapisan sedimen lunak di permukaan [8], [9]. Daerah dengan faktor amplifikasi yang lebih tinggi memiliki potensi getaran gempabumi yang semakin besar dan potensi kerusakan yang lebih tinggi.

Tahapan kedua adalah perhitungan nilai frekuensi dominan. Frekuensi dominan merupakan frekuensi natural dari tanah sehingga jika getaran gempabumi memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi dominan maka akan terjadi resonansi yang menyebabkan pembesaran (amplifikasi) getaran gempabumi. Perhitungan amplitude didasarkan pada nilai Vs30, sehingga asumsi yang digunakan pada perhitungan frekuensi dominan juga pada lapisan tanah permukaan ketebalan 0-30 m. Frekuensi dominan dihitung berdasarkan persamaan yang dikemukakan oleh [20] berikut

$$H = Vs/4f_0 \quad (2)$$

dengan H Adalah ketebalan lapisan sedimen permukaan (m), Vs adalah kecepatan gelombang geser (m/s) dan f_0 adalah frekuensi dominan (Hz).

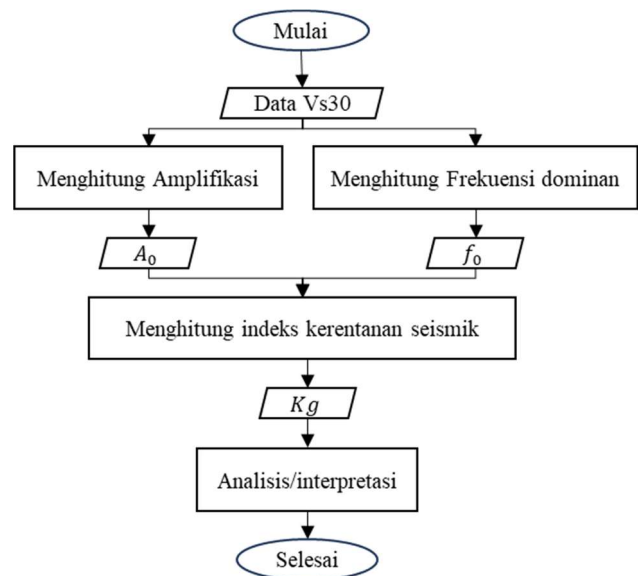
Pada penelitian ini, asumsi yang dipakai Adalah menggunakan Vs30 dan kedalaman 0-30 m, maka frekuensi dominan dihitung berdasarkan persamaan

$$f_0 = Vs30/120 \quad (3)$$

Tahap ketiga adalah perhitungan indeks kerentanan seismik. Indeks kerentanan seismik menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah mengalami deformasi akibat gempabumi. Indeks kerentanan seismik dihitung berdasarkan persamaan berikut [5], [6]

$$Kg = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (4)$$

dengan Kg Adalah nilai indeks kerentanan seismik, A_0 adalah nilai amplifikasi dan f_0 adalah frekuensi dominan (Hz).



Gambar 2. Tahapan Analisis Data

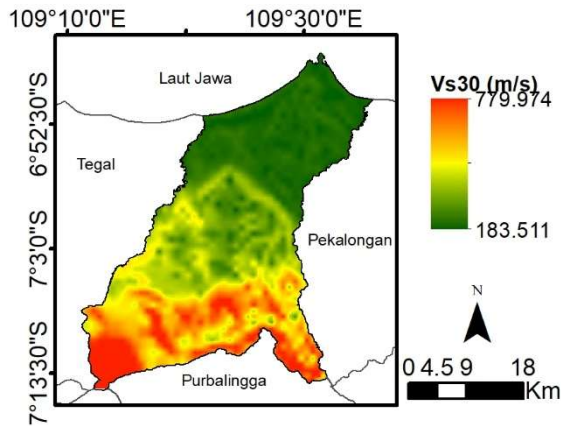
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebaran nilai Vs30

Vs30 merupakan salah satu parameter penting dalam studi efek geologi local terhadap getaran gempabumi. Nilai Vs30 digunakan untuk melakukan klasifikasi jenis tanah dan digunakan dalam studi perencanaan bangunan tahan gempa [16], [21]. Nilai Vs30 berkisar antara 183,511 – 779,974 m/s (Gambar 3).

Nilai Vs30 yang rendah bersesuaian dengan lokasi dataran rendah dekat pantai. Lokasi ini berada di Formasi Alluvium meliputi Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh. Formasi alluvium di dominasi oleh kerakal, kerikil, lanau dan lumpur. Nilai Vs30 tinggi tersebar pada daerah perbukitan yang tersusun atas batuan Gunung slamet dan Formasi berumur tersier yang lebih padat di Kecamatan Pulosari, Moga, Belik dan Watukumpul.

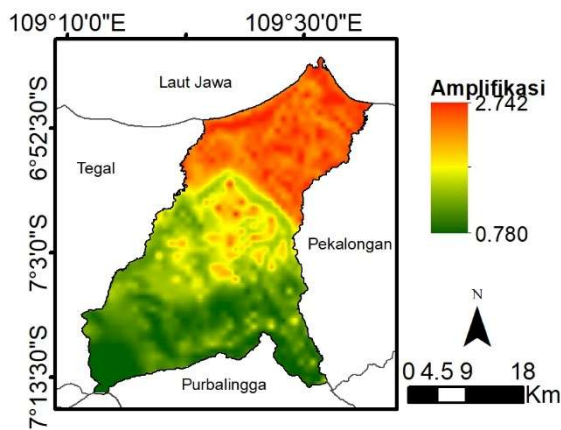
Klasifikasi jenis tanah berdasarkan nilai Vs30 dan SNI 726: 2019 di Pemalang (Gambar 2) menunjukkan hamper seluruh wilayah pemalang termasuk dalam klasifikasi SC (tanah keras) hanya sedikit dibagian perbukitan selatan Kecamatan Pulosari, Belik dan Watukumpul yang termasuk dan SB (batuan). Hal ini menunjukkan hampir diseluruh wilayah Pemalang memiliki sedimen permukaan sampai kedalaman 30 m berupa tanah.



Gambar 3. Sebaran Nilai Vs30

Amplifikasi dan frekuensi dominan

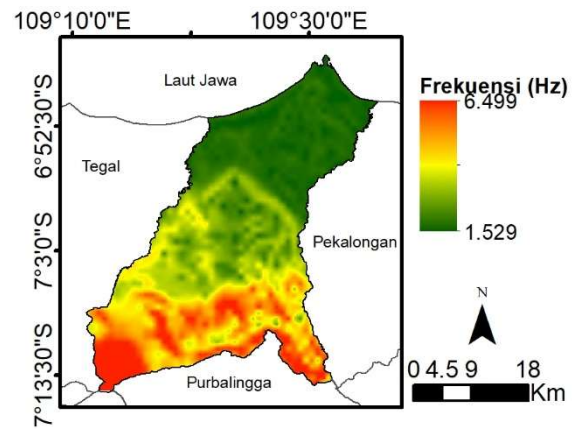
Gambar 4 menunjukkan sebaran nilai amplifikasi dari hasil perhitungan menggunakan persamaan dari Fujimoto and Midorikawa [14]. Nilai amplifikasi berkisar antara 0,780-2,742 dengan nilai tinggi berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh. Nilai amplifikasi menunjukkan kesesuaian dengan kondisi geologi dimana daerah dengan lapisan sedimen lunak berasosiasi dengan Formasi Alluvium berumur kuartar memiliki nilai amplifikasi yang tinggi.



Gambar 4. Sebaran Nilai Amplifikasi

Gambar 5 menunjukkan sebaran nilai frekuensi dominan dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (3). Nilai frekuensi dominan diukur dengan ketebalan yang sama di seluruh daerah penelitian yaitu 0-30 m sehingga nilai frekuensi dominan hasil perhitungan menggambarkan kondisi geologi lokal. Nilai frekuensi yang rendah menggambarkan kondisi geologi lokal merupakan tanah yang lebih keras/ batuan lebih padat. Nilai frekuensi dominan hasil perhitungan

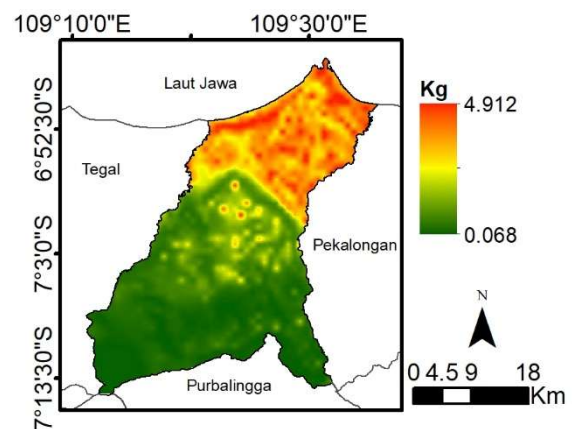
berkisar antara 1,529 – 6,499 Hz dengan nilai rendah berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh.



Gambar 5. Sebaran Nilai Frekuensi Dominan

Indeks kerentanan seismik

Nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi menunjukkan potensi deformasi pada lapisan sedimen permukaan saat terjadi gempa bumi. Sehingga daerah dengan nilai indeks kerentanan seismik tinggi merupakan daerah paling rawan mengalami kerusakan akibat gempa bumi. Gambar 6 menunjukkan sebaran nilai indeks kerentanan seismik dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (4). Nilai indeks kerentanan seismik berkisar antara 0,068 – 4,912 dengan nilai tinggi berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh sehingga merupakan daerah yang paling rawan mengalami kerusakan saat terjadinya gempa bumi.



Gambar 6. Sebaran Nilai Indeks Kerentanan Seismik

KESIMPULAN

Nilai V_{s30} di wilayah pemalang berkisar antara 183,511 – 779,974 m/s dengan klasifikasi jenis tanah termasuk klasifikasi SC (tanah keras) dan SB (batuan). Nilai amplifikasi di Pemalang berkisar antara 0,780-2,742; nilai frekuensi dominan berkisar antara 1,529 – 6,499 Hz; dan nilai indeks kerentanan seismik berkisar antara 0,068 – 4,912.

Berdasarkan sebaran nilai K_g yang tinggi, wilayah dengan karakteristik lapisan tanah permukaan sampai kedalaman 30 m paling lunak dan rawan mengalami kerusakan akibat gempa bumi berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh.

Pada daerah dengan nilai K_g yang tinggi dan rawan mengalami kerusakan saat terjadi gempa bumi maka perencanaan wilayah dan pengembangan bangunan perlu memperhatikan standar bangunan tahan gempa sesuai SNI 1726: 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan-Geologi, 'Laporan Badan Geologi Tahun 2009', Bandung, 2009.
- [2] A. Koulali *et al.*, 'The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: Implications for fault slip partitioning', *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 458, pp. 69–79, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.epsl.2016.10.039.
- [3] U. N. Prabowo, A. F. Amalia, and W. Budhi, 'Peak Ground Acceleration and Earthquake Intensity Microzonation in Watukumpul, Pemalang Regency', *Indonesian Journal of Science and Education*, vol. 3, no. 2, pp. 60–65, 2019, doi: 10.31002/ijose.v3i2.1169.
- [4] U. N. Prabowo and A. F. Amalia, 'Analisis Percepatan Getaran Tanah Maksimum Untuk Memetakan Resiko Bencana Gempa Bumi Di Kab Pemalang, Jawa Tengah', *Science Tech*, vol. 4, no. 12, pp. 80–84, 2018.
- [5] E. D. Gurler, Y. Nakamura, J. Saita, and T. Sato, 'Local site effect of Mexico City based on microtremor measurement', in *Proceeding of 6th International Conference of Seismic Zonation*, 1990.
- [6] Y. Nakamura, T. Sato, and M. Nishinaga, 'Local Site Effect Of Kobe Based On Microtremor', in *Proceeding of the Sixth International Conference on Seismic Zonation EERI, Palm Springs California*, 2000, pp. 3–8.
- [7] Daryono, Sutikno, J. Sartohadi, Dulbahri, and K. S. Brotopuspito, 'Efek Tapak Lokal (Local Site effect) di Graben Bantul Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor', in *International Conference Earth Science and Technology*, 2009, pp. 4–9.
- [8] Y. Nakamura, 'Seismic Vulnerability Indices For Ground And Structures Using Microtremor', in *World Congress on Railway Research, Florence, Florence*, 1997, pp. 1–7.
- [9] Y. Nakamura, 'Clear Identification of Fundamental Idea Of Nakamura'S', in *Proc XII World Conf. Earthquake Engineering, New Zealand*, 2000.
- [10] B. Hassani, H. Zafarani, J. Farjoodi, and A. Ansari, 'Estimation of site amplification , attenuation and source spectra of S-waves in the East-Central Iran', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, no. 10, pp. 1397–1413, 2011, doi: 10.1016/j.soildyn.2011.05.017.
- [11] R. Xu and L. Wang, 'The horizontal-to-vertical spectral ratio and its applications', *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2021, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s13634-021-00765-z.
- [12] U. N. Prabowo, S. Sehad, A. Ferdiyan, and S. Sismanto, 'Quaternary Deposit Response to Earthquakes in Pemalang City Based on Peak Ground Acceleration, Earthquake Intensity, and Microtremor Method', *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 10, no. 3, pp. 407–417, Nov. 2023, doi: 10.17014/ijog.10.3.407-417.
- [13] U. N. Prabowo, S. Sehad, and A. Ferdiyan, 'Estimasi ketebalan lapisan sedimen permukaan menggunakan pengukuran mikrotremor di Pemalang, Jawa Tengah', *Jurnal Teras Fisika*, vol. 4, no. 1, p. 187, Jul. 2021, doi: 10.20884/1.jtf.2021.4.1.3436.
- [14] K. Fujimoto and S. Midorikawa, 'Relationship between Average Shear-Wave Velocity and Site Amplification

- Inferred from Strong Motion Records at Nearby Station Pairs’, *Journal of JAEE*, vol. 6, no. 1, pp. 11–22, 2006, doi: 10.5610/jaee.6.11.
- [15] F. Fajarningrum and N. B. Wibowo, ‘Comparison of Seismic Vulnerability Index Microzonation Using Usgs Vs30 Data and Microtremor Signal Measurements in Prambanan and Gantiwarno Sub-Districts, Klaten Regency’, *Sunan Kalijaga Journal of Physics*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, May 2023, doi: 10.14421/physics.v6i1.5138.
- [16] D. Mutiara Jannah *et al.*, ‘Analisis Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Nilai Vs30 pada Zona Terdampak Gempa Bumi (Studi Kasus: Gempa Cianjur 21 November 2022)’, *KURVATEK*, vol. 9, no. 2, pp. 107–116, Nov. 2024, doi: 10.33579/krvtk.v9i2.4972.
- [17] P. J. T. Dinas ESDM, ‘Peta Geologi Kabupaten Pemalang’, 2022, diakses 10 April 2026.
- [18] M. Djuhri, H. Samodra, T. C. Amin, and S. Gafoer, ‘Peta Geologi Lembar Purwokerto dan Tegal, Jawa’, Bandung, 1996.
- [19] BSN, *SNI 1726:2019, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [20] M. I. Seht and J. Wohlenberg, ‘Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 89, no. 1, pp. 250–259, 1999.
- [21] M. Muzli *et al.*, ‘Pengukuran VS30 Menggunakan Metode MASW untuk Wilayah Yogyakarta’, *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 17, no. 1, pp. 25–32, 2016, [Online]. Available: <http://www.masw.com>