

Mikrozonasi Kerentanan Seismik Berbasis Metode HVSR di Kapanewon Prambanan, Kabupaten Sleman

Seismic Vulnerability Microzonation Based on the HVSR Method in Kapanewon Prambanan, Sleman Regency

Riski Dwiantoro^{1*}, Zaroh Irayani¹, Bambang Sunardi²

¹ Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. Dr. Seoparno No. 61 Purwokerto 53122

² Stasiun Geofisika Kelas I Sleman, Jl. Wates Km. 8, Jitengen, Balecatur, Gamping, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55295

INFO ARTIKEL

Naskah masuk : 30 Juli 2025

Naskah diperbaiki : 5 September 2025

Naskah diterima : 5 Oktober 2025

Kata kunci:
faktor amplifikasi
frekuensi dominan
HVSR
kerentanan seismik,
 V_{s30}

Keywords:
amplification factor
dominant frequency
HVSR
seismic vulnerability
 V_{s30}

*Email: dwiantororiski04@gmail.com

ABSTRAK

Kapanewon Prambanan, Kabupaten Sleman, terletak di Cekungan Yogyakarta yang memiliki kondisi geologi kompleks dengan ketebalan sedimen yang signifikan, sehingga berpotensi meningkatkan dampak guncangan gempa bumi. Pada peristiwa Gempa Bumi Yogyakarta tahun 2006, wilayah ini mengalami kerusakan berat dengan intensitas mencapai VII MMI. Oleh karena itu, diperlukan kajian mikrozonasi kerentanan seismik sebagai dasar mitigasi bencana gempa bumi. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan indeks kerentanan seismik di Kapanewon Prambanan menggunakan metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) berbasis data mikrotremor. Metode HVSR digunakan untuk memperoleh parameter frekuensi dominan, faktor amplifikasi, dan indeks kerentanan seismik. Selain itu, kurva H/V diinterpretasikan melalui inversi untuk mendapatkan parameter kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 m (V_{s30}). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai frekuensi dominan berkisar antara 0,98–17,13 Hz, faktor amplifikasi antara 1,06–11,69, nilai V_{s30} antara 114–726 m/s, dan indeks kerentanan seismik antara 0,18–18,88. Daerah dengan indeks kerentanan seismik rendah umumnya berada pada wilayah yang tersusun oleh Formasi Semilir dan Formasi Kebobutak, sedangkan wilayah dengan kerentanan sedang hingga tinggi didominasi oleh endapan Formasi Merapi Muda. Peta mikrozonasi yang dihasilkan diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan tata ruang, pembangunan infrastruktur, dan upaya mitigasi gempa bumi di Kapanewon Prambanan.

ABSTRACT

Kapanewon Prambanan, Sleman Regency, is situated within the Yogyakarta Basin, characterized by complex geological conditions and thick sedimentary layers that can significantly amplify seismic ground motion. During the 2006 Yogyakarta Earthquake, this area experienced severe damage with an intensity reaching VII on the Modified Mercalli Intensity (MMI) scale. Therefore, seismic vulnerability microzonation is crucial in supporting effective earthquake mitigation strategies. This study aims to map the seismic vulnerability index in Kapanewon Prambanan using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) method based on microtremor measurements. The HVSR method was applied to obtain the dominant frequency, amplification factor, and seismic vulnerability index. Furthermore, inversion of the H/V curves was performed to estimate the shear-wave velocity profile, particularly the V_{s30} parameter. The results indicate that the dominant frequencies range from 0.98 to 17.13 Hz, amplification factors range from 1.06 to 11.69, V_{s30} values range from 114 to 726 m/s, and seismic vulnerability index values range from 0.18 to 7.46. Areas with low seismic vulnerability are generally associated with the Semilir and Kebobutak Formations, while moderate to high vulnerability zones are predominantly distributed within the deposits of the Young Merapi Formation. The resulting seismic microzonation map is expected to serve as a valuable reference for spatial planning, infrastructure development, and earthquake risk mitigation in the Prambanan area.

© 2025 Jurnal Stasiun Geofisika Sleman

1. Pendahuluan

Gempa bumi merupakan fenomena seismik yang terjadi akibat pelepasan energi dari dalam bumi yang dipicu oleh

pergerakan kerak bumi. Pulau Jawa termasuk wilayah dengan tingkat aktivitas seismik tinggi karena dipengaruhi oleh interaksi dua lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia di bagian utara dan Lempeng

Indo-Australia di bagian selatan. Interaksi kedua lempeng tersebut menyebabkan wilayah-wilayah di Pulau Jawa, termasuk Kapanewon Prambanan, Kabupaten Sleman, rentan terhadap guncangan gempa bumi [1].

Kapanewon Prambanan terletak di Cekungan Yogyakarta yang dicirikan oleh kondisi geologi kompleks dengan lapisan sedimen yang relatif tebal. Keberadaan sedimen tebal berperan penting dalam memperkuat efek tapak lokal (*site effects*), yang dapat meningkatkan amplitudo getaran tanah akibat gempa bumi [2]. Kondisi tersebut tercermin pada peristiwa Gempa Bumi Yogyakarta tanggal 27 Mei 2006, di mana wilayah Prambanan dan sekitarnya mengalami intensitas guncangan hingga VII MMI dan kerusakan yang signifikan, yang dipengaruhi oleh jarak episenter yang relatif dekat serta kondisi bawah permukaan setempat [3].

Berdasarkan kondisi tersebut, kajian kerentanan seismik di wilayah Kapanewon Prambanan menjadi penting sebagai bagian dari upaya mitigasi risiko gempa bumi. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam studi mikrozonasi seismik adalah metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) dengan memanfaatkan data mikrotremor. Metode HVSR mampu mengidentifikasi frekuensi dominan tanah (F_0) dan faktor amplifikasi (A_0), yang berkaitan erat dengan ketebalan serta karakteristik lapisan bawah permukaan [4]. Parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menyusun indeks kerentanan seismik (Kg) guna mengidentifikasi zona-zona yang berpotensi mengalami dampak guncangan gempa lebih besar [5].

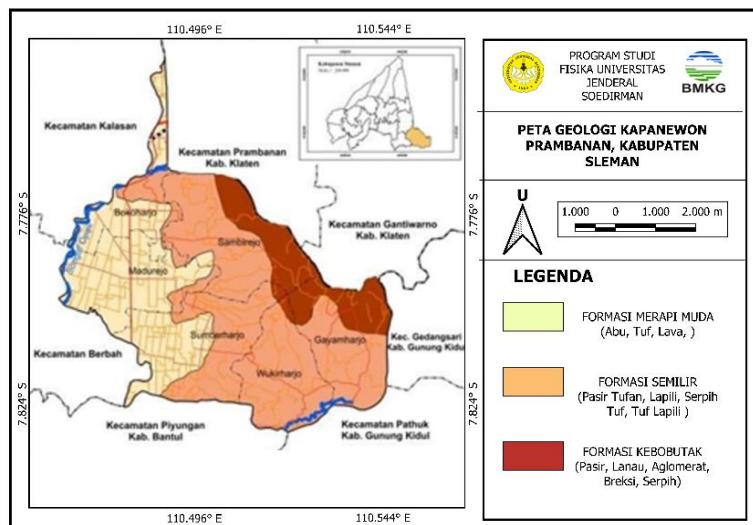
Dalam lima tahun terakhir, penerapan metode HVSR untuk mikrozonasi seismik semakin berkembang di berbagai wilayah di Indonesia. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa integrasi parameter HVSR dengan indeks kerentanan seismik mampu menggambarkan variasi tingkat kerentanan seismik secara spasial dengan baik [5], [6], [7]. Selain itu, interpretasi lanjutan melalui

inversi kurva HVSR juga semakin banyak digunakan untuk memperoleh profil kecepatan gelombang geser bawah permukaan, khususnya parameter Vs30, yang berperan penting dalam klasifikasi kondisi tapak seismik dan analisis bahaya gempa [8].

Penelitian ini menjadi penting mengingat Kapanewon Prambanan merupakan kawasan dengan nilai sejarah, budaya, dan ekonomi yang tinggi, termasuk keberadaan Candi Prambanan sebagai warisan budaya dunia, serta kawasan permukiman dengan kepadatan penduduk yang relatif tinggi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi zona-zona kerentanan seismik di Kapanewon Prambanan berdasarkan parameter HVSR. Hasil mikrozonasi yang diperoleh diharapkan dapat menjadi dasar pendukung perencanaan tata ruang, pembangunan infrastruktur yang lebih aman, serta upaya mitigasi bencana gempa bumi di masa mendatang.

Geologi Daerah Penelitian. Secara administratif, Kapanewon Prambanan terdiri atas enam desa dengan luas wilayah sekitar 41,32 km². Wilayah ini berbatasan dengan Kapanewon Kalasan di sebelah utara, Kecamatan Prambanan Kabupaten Klaten di sebelah timur, Kapanewon Piyungan di sebelah selatan, dan Kapanewon Berbah di sebelah barat. Beberapa sungai utama yang mengalir di wilayah ini antara lain Sungai Gawe di Desa Sumberharjo serta Sungai Opak yang melintasi Desa Madurejo dan Desa Bokoharjo.

Secara geologi, litologi penyusun daerah penelitian terdiri atas Formasi Merapi Muda, Formasi Kebobutak, dan Formasi Semilir. Formasi Merapi Muda tersusun oleh endapan material vulkanik berupa abu vulkanik, tuf, aglomerat, breksi, dan lava. Formasi Kebobutak didominasi oleh batuan keras seperti batupasir, batulanau, batulempung, tuf, aglomerat, breksi, dan serpih. Sementara itu, Formasi Semilir tersusun oleh campuran batuan keras dan lunak berupa breksi batu apung, pasir tufan, serpih tuf, dan tuf lapili [9].



Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian.

2. Metode Penelitian

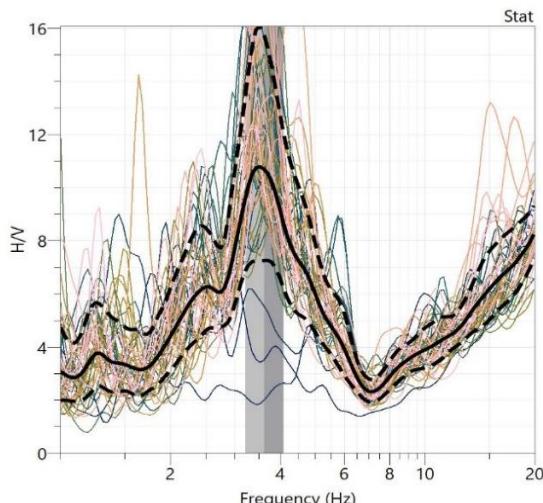
Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa data mikrotremor yang merekam getaran tanah ambien di wilayah Kapanewon Prambanan, Kabupaten Sleman. Data mikrotremor terdiri atas tiga komponen sinyal, yaitu dua komponen horizontal (arah timur–barat dan utara–selatan) serta satu komponen vertikal. Data direkam dalam format MSEED yang memuat informasi koordinat titik pengukuran, amplitudo sinyal, dan waktu perekaman. Selain itu, digunakan data log bor sebagai data pendukung untuk interpretasi kondisi bawah permukaan.

Pengolahan data mikrotremor dilakukan dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Tahapan awal pengolahan meliputi transformasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan Transformasi Fourier. Transformasi Fourier bertujuan untuk menguraikan sinyal seismik menjadi komponen-komponen frekuensi penyusunnya sehingga karakteristik spektral sinyal dapat dianalisis [10]. Secara matematis, transformasi Fourier dinyatakan sebagai:

$$x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

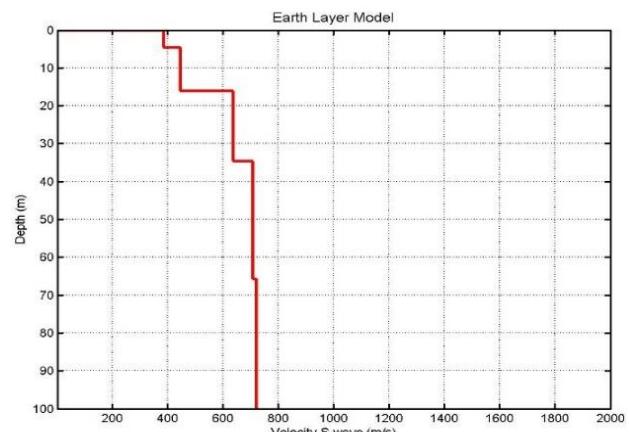
Dengan $x(t)$ = fungsi sinyal dalam domain waktu, $e^{-i\omega t}$ = fungsi Kernel, dan $x(\omega)$ = fungsi sinyal dalam domain frekuensi.

Hasil transformasi Fourier digunakan untuk menyusun spektrum frekuensi dari masing-masing komponen sinyal. Kurva HVSR diperoleh dengan membandingkan spektrum rata-rata komponen horizontal terhadap komponen vertikal, sehingga diperoleh nilai frekuensi dominan (F_0) dan faktor amplifikasi (A_0) pada setiap titik pengukuran [4], [5]. Contoh kurva HVSR hasil pengolahan data ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Contoh kurva H/V di titik penelitian.

Untuk memperoleh informasi parameter kecepatan gelombang geser bawah permukaan, dilakukan inversi kurva HVSR menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO). Metode PSO merupakan algoritma optimasi berbasis populasi yang mengadaptasi perilaku sosial partikel dalam mencari solusi terbaik [11]. Dalam inversi HVSR, parameter model yang dipertimbangkan meliputi ketebalan lapisan dan kecepatan gelombang geser (V_s). Parameter penting dalam proses PSO, seperti jumlah partikel (*swarm size*) dan jumlah iterasi maksimum, ditentukan untuk mengoptimalkan konvergensi solusi. Contoh hasil inversi kurva HVSR menggunakan metode PSO ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Contoh hasil inversi HVSR.

Hasil inversi berupa profil kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman (Vs-depth), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai Vs30. Parameter Vs30 kemudian dianalisis bersama parameter HVSR untuk menyusun peta mikrozonasi indeks kerentanan seismik di wilayah penelitian.

3. Hasil Dan Pembahasan

Gambar 4 menunjukkan peta distribusi nilai frekuensi dominan di Kapanewon Prambanan, Kabupaten Sleman. Frekuensi dominan (F_0) merupakan parameter utama hasil metode HVSR yang berkaitan dengan ketebalan sedimen dan karakteristik lapisan bawah permukaan. Nilai frekuensi dominan yang rendah umumnya mengindikasikan keberadaan lapisan sedimen tebal dan material yang relatif lunak, sedangkan nilai frekuensi dominan yang tinggi mencerminkan kondisi batuan yang lebih keras dan sedimen yang lebih tipis.

Berdasarkan hasil analisis, nilai frekuensi dominan rendah berkisar antara 0,98–4,02 Hz dan dominan berada pada wilayah yang tersusun oleh Formasi Merapi Muda. Formasi ini tersusun atas material vulkanik lepas hasil aktivitas Gunung Merapi, seperti abu vulkanik, tuf, dan breksi, yang mengindikasikan kondisi tanah lunak dengan ketebalan sedimen yang relatif besar. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang

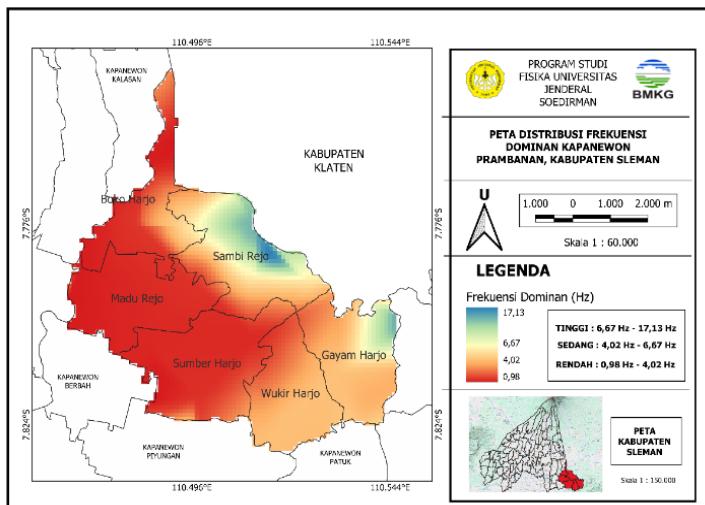
menyatakan bahwa frekuensi dominan rendah berkorelasi dengan sedimen tebal dan material lunak [12].

Nilai frekuensi dominan sedang berkisar antara 4,02–6,67 Hz, yang umumnya ditemukan di Desa Gayamharjo dan Wukirharjo yang secara geologi berada pada Formasi Semilir. Formasi ini memiliki karakteristik batuan campuran antara material lunak dan keras, sehingga daya dukung dan stabilitas tanahnya lebih baik dibandingkan Formasi Merapi Muda.

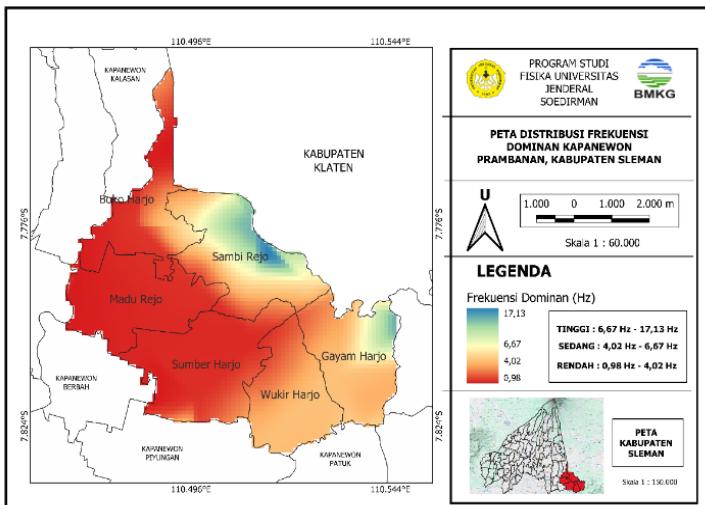
Sementara itu, nilai frekuensi dominan tinggi berkisar antara 6,67–17,13 Hz teridentifikasi di Desa Sambirejo

yang berada pada Formasi Kebobotak. Formasi Kebobotak didominasi oleh batuan keras dan relatif tua, seperti breksi, agglomerat, dan batupasir, yang mencerminkan kondisi sedimen tipis dan batuan yang lebih kompak.

Overlay antara peta frekuensi dominan dan elevasi (Gambar 5) menunjukkan bahwa wilayah dengan frekuensi dominan rendah umumnya berada pada dataran rendah, sedangkan frekuensi dominan tinggi berada pada daerah perbukitan. Hal ini menunjukkan pengaruh topografi dan struktur geologi terhadap respon seismik lokal, di mana daerah perbukitan cenderung lebih stabil dibandingkan dataran rendah dengan sedimen tebal [13].



Gambar 4. Peta frekuensi dominan di Kapanewon Prambanan.



Gambar 5. Overlay frekuensi dominan dan elevasi di Kapanewon Prambanan.

Distribusi nilai faktor amplifikasi di Kapanewon Prambanan ditunjukkan pada Gambar 6. Faktor amplifikasi diperoleh dari puncak kurva HVSR dan menggambarkan kemampuan lapisan tanah dalam memperkuat amplitudo gelombang seismik. Nilai amplifikasi yang tinggi umumnya berkaitan dengan material lunak dan tingkat pelapukan yang tinggi [14].

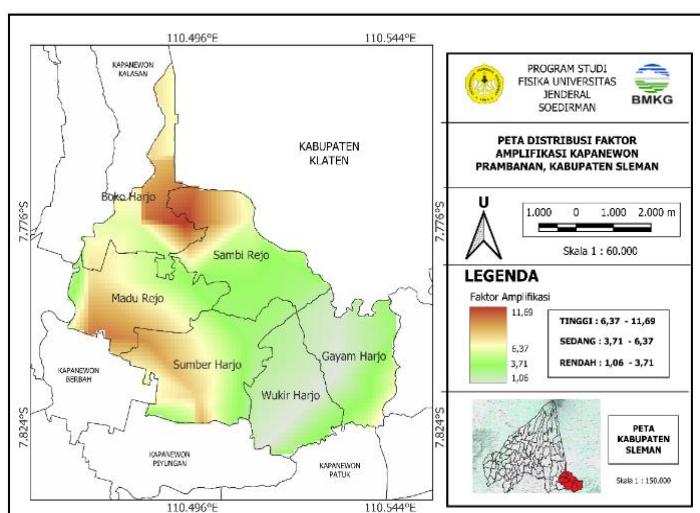
Sebagian besar wilayah Kapanewon Prambanan memiliki nilai amplifikasi sedang dengan kisaran 3,71–6,37, yang tersebar di Desa Sambirejo, Gayamharjo, dan Wukirharjo pada Formasi Semilir dan Formasi Kebobotak. Karakteristik batuan pada formasi tersebut relatif lebih padat dan tidak terlalu lunak, sehingga menghasilkan amplifikasi gelombang seismik pada tingkat sedang.

Nilai amplifikasi rendah dengan kisaran 1,06–3,71 ditemukan di beberapa titik di Desa Wukirharjo dan Gayamharjo, yang mencerminkan kondisi tanah yang relatif lebih stabil sehingga gelombang seismik tidak mengalami resonansi yang signifikan.

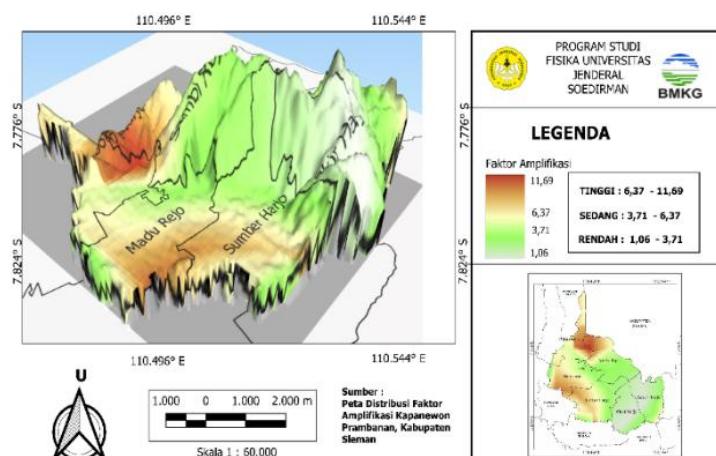
Sebaliknya, nilai amplifikasi tinggi berkisar antara 6,37–11,69 teridentifikasi di Desa Bokoharjo, Madurejo, dan Sumberharjo yang berada pada Formasi Merapi Muda. Meskipun berada dalam satu formasi geologi yang sama, variasi nilai amplifikasi antarwilayah menunjukkan

adanya pengaruh tingkat pelapukan dan heterogenitas lokal pada lapisan bawah permukaan [15].

Overlay faktor amplifikasi dengan elevasi (Gambar 7) menunjukkan hubungan berbanding terbalik, di mana nilai amplifikasi cenderung tinggi pada wilayah dengan elevasi rendah. Hal ini disebabkan oleh keberadaan cekungan sedimen dengan ketebalan besar yang memungkinkan terjadinya resonansi gelombang seismik akibat kontras impedansi antar lapisan [16].



Gambar 6. Peta faktor amplifikasi di Kapanewon Prambanan.

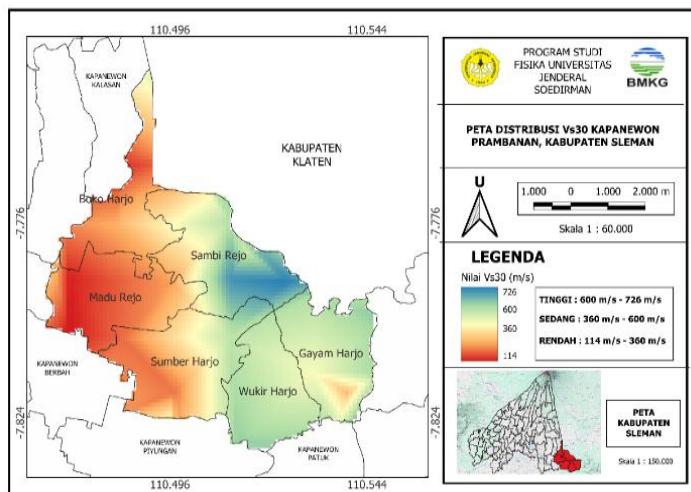


Gambar 7. Overlay faktor amplifikasi dan elevasi di Kapanewon Prambanan.

Peta distribusi nilai Vs30 hasil inversi HVSR ditunjukkan pada Gambar 8. Inversi kurva HVSR menghasilkan profil kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman yang dihitung hingga kedalaman 30 m dengan mengacu pada data log bor. Kecepatan gelombang geser berkorelasi dengan densitas dan tingkat kekompakan batuan [17].

Nilai Vs30 rendah dengan kisaran 114–360 m/s dominan berada di Desa Sumberharjo, Madurejo, dan Bokoharjo yang tersusun oleh Formasi Merapi Muda. Batuan pada formasi ini bersifat tidak terkonsolidasi dengan baik, sehingga rambatan gelombang geser menjadi lebih lambat

dan batuan lebih mudah terdeformasi saat terjadi guncangan gempa. Nilai Vs30 sedang berkisar antara 360–600 m/s ditemukan di Desa Gayamharjo dan Wukirharjo pada Formasi Semilir, yang memiliki densitas lebih tinggi dibandingkan batuan lunak namun masih lebih rendah dibandingkan batuan keras. Sementara itu, nilai Vs30 tinggi (>600 m/s) teridentifikasi di Desa Sambirejo pada Formasi Kebobutak, yang tersusun oleh batuan keras dan kompak sehingga memungkinkan rambatan gelombang geser yang lebih cepat.



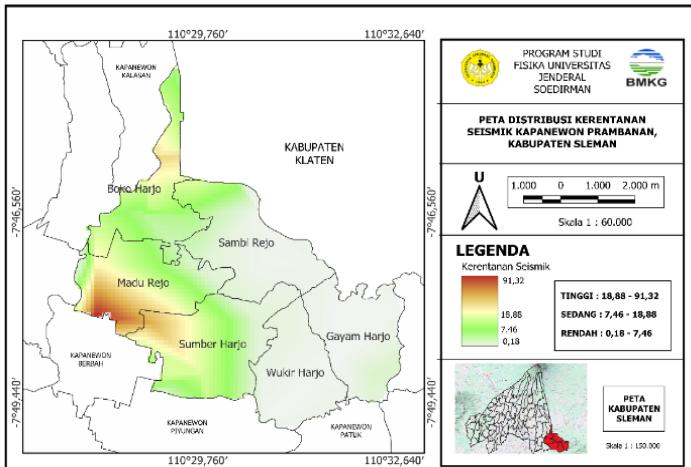
Gambar 8. Peta Vs30 hasil inversi HVSR di Kapanewon Prambanan.

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil Vs30 inversi dengan data Vs30 USGS. Pola distribusi Vs30 USGS menunjukkan kesesuaian spasial dengan hasil inversi, meskipun terdapat perbedaan kisaran nilai absolut. Perbedaan tersebut masih berada dalam klasifikasi jenis batuan yang sama, sehingga hasil inversi dapat dianggap representatif. Overlay Vs30 dan elevasi menunjukkan bahwa daerah perbukitan memiliki nilai Vs30 lebih tinggi dibandingkan dataran rendah yang tersusun oleh sedimen tebal. Informasi Vs30 ini penting sebagai dasar perencanaan tata ruang berbasis kebencanaan sesuai SNI 1726:2019, di mana wilayah dengan Vs30 tinggi relatif lebih aman untuk pengembangan permukiman dan kawasan wisata [18].

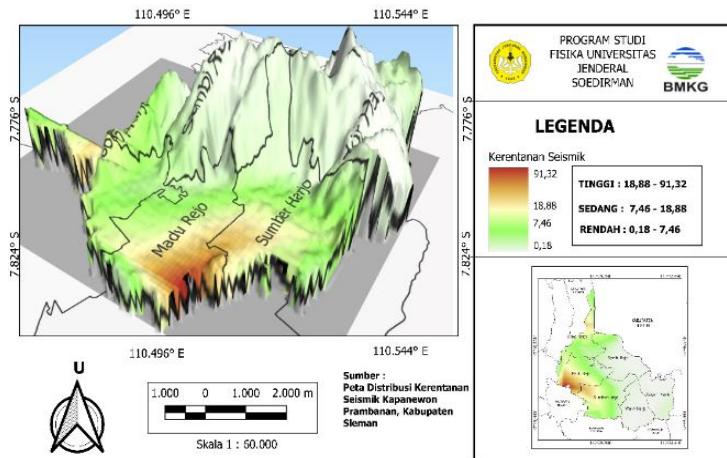
Distribusi nilai indeks kerentanan seismik (Kg) ditunjukkan pada Gambar 9. Indeks kerentanan seismik digunakan untuk menggambarkan potensi tingkat kerusakan akibat penguatan gelombang seismik di suatu wilayah.

Nilai Kg rendah berkisar antara 0,18–7,46 dominan berada di Desa Sambirejo, Gayamharjo, dan Wukirharjo pada Formasi Semilir dan Kebobotak, yang dicirikan oleh batuan relatif keras dan sedimen tipis. Nilai Kg sedang dengan kisaran 7,46–18,88 tersebar pada sebagian wilayah Formasi Semilir. Wilayah dengan nilai Kg tinggi terkonsentrasi di Desa Madurejo, Sumberharjo, dan Bokoharjo yang berada pada Formasi Merapi Muda. Kondisi geologi berupa sedimen tebal dan material lunak di wilayah ini menyebabkan peningkatan amplifikasi gelombang seismik, sehingga meningkatkan tingkat kerentanan seismik.

Overlay Kg dengan elevasi (Gambar 10) menunjukkan bahwa wilayah dataran rendah memiliki tingkat kerentanan seismik yang lebih tinggi dibandingkan daerah perbukitan. Oleh karena itu, strategi mitigasi bencana, perencanaan infrastruktur tahan gempa, dan sistem monitoring kebencanaan perlu diprioritaskan di wilayah dataran rendah Kapanewon Prambanan, khususnya di Desa Madurejo, Sumberharjo, dan Bokoharjo.



Gambar 9. Peta indeks kerentanan seismik (Kg) di Kapanewon Prambanan.



Gambar 10. Overlay Kg dan elevasi di Kapanewon Prambanan.

Hasil penelitian ini konsisten dengan studi HVSR di Kota Jambi yang menunjukkan bahwa frekuensi dominan rendah berkaitan dengan sedimen tebal dan tanah lunak [19]. Penelitian di wilayah Bandung juga melaporkan nilai amplifikasi tinggi pada batuan hasil endapan vulkanik yang telah mengalami pelapukan [20].

Elaborasi dengan penelitian di Kapanewon Galur, Kabupaten Kulon Progo, menunjukkan bahwa wilayah dengan sedimen tebal memiliki nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi, dengan kisaran 4,8–87,85 [21]. Hal ini memperkuat hasil penelitian di Kapanewon Prambanan.

Validasi lebih lanjut dilakukan menggunakan data kerusakan Gempa Bumi Yogyakarta tahun 2006. Wilayah pada Formasi Merapi Muda, seperti Desa Sumberharjo, mengalami fenomena likuifaksi yang ditandai dengan keluarnya lumpur dan pasir serta kerusakan infrastruktur [22]. Desa Madurejo juga mengalami kerusakan bangunan berat akibat kehilangan daya dukung tanah [12]. Selain itu, kerusakan pada kompleks Candi Prambanan di Desa Bokoharjo berupa retakan dan runtuhnya ornamen bangunan menunjukkan pengaruh kondisi tanah lunak dan sedimen tebal terhadap tingkat kerusakan struktur [1].

4. Kesimpulan

Hasil analisis mikrotremor di Kapanewon Prambanan, Kabupaten Sleman menunjukkan nilai frekuensi dominan berkisar antara 0,98 - 17 Hz. Faktor amplifikasi berkisar 1,06 – 11,61. Nilai Vs30 berkisar antara 114 m/s – 726 m/s serta nilai indeks kerentanan seismik berkisar 0,18–18,88. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa wilayah Formasi Merapi Muda memiliki potensi bahaya seismik yang lebih tinggi dan memerlukan perhatian khusus dalam mitigasi risiko bencana gempa dan pembangunan infrastruktur tahan bencana.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengombinasikan metode HVSR dengan metode geofisika aktif seperti

MASW atau data geoteknik (SPT/N-SPT) guna meningkatkan akurasi karakterisasi bawah permukaan. Selain itu, penggunaan data gempa kuat (*strong motion*) dan analisis respons spektra dapat dilakukan untuk memperkuat validasi hasil mikrozonasi seismik sebagai dasar perencanaan tata ruang dan mitigasi bencana gempa bumi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama proses penelitian. Terima kasih kepada Stasiun Geofisika Kelas 1 Sleman atas izin penelitian dan dukungan data yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] Supartoyo, O. Abdurahman, dan A. Kurnia, “Gempa Yogyakarta,” Geomagz, vol. 6, no. 2, pp. 18–23, 2016.
- [2] Surono, “Litostratigrafi dan sedimentasi Formasi Kebo dan Formasi Butak di Pegunungan Baturagung, Jawa Tengah Bagian Selatan,” Indonesian Journal on Geoscience, vol. 3, no. 4, pp. 183–193, 2008.
- [3] United States Geological Survey (USGS), Earthquake Hazards of Java, USGS Earthquake Catalog, 2006.
- [4] Y. Nakamura, “Seismic vulnerability indices for ground and structures,” in Proceedings of the World Congress on Railway Research, Florence, Italy, pp. 1–7, 1997.
- [5] M. Demulawa dan I. Daruwati, “Analisis frekuensi natural dan potensi amplifikasi menggunakan metode HVSR,” Edu Research, vol. 10, no. 1, pp. 59–63, 2021.
- [6] N. Sitorus, S. Purwanto, dan W. Utama, “Analisis nilai frekuensi natural dan amplifikasi Desa Olak Alen Blitar menggunakan metode mikrotremor HVSR,” Jurnal Geosaintek, vol. 3, no. 2, pp. 89–96, 2017.
- [7] A. Satria, N. Larasati, L. Winda, dan I. K. Dewi, “Analisis mikrotremor berdasarkan metode horizontal

- to vertical spectral ratio (HVSR) untuk mengetahui indeks kerentanan seismik Kota Jambi," *Unnes Physics Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 2–7, 2020.
- [8] A. Zaenudin, I. G. B. Darmawan, A. Farduwin, dan R. C. Wibowo, "Shear wave velocity estimation based on the particle swarm optimization method of HVSR curve inversion in Bakauheni District, Indonesia," *Turkish Journal of Earth Sciences*, vol. 31, no. 5, pp. 480–493, 2022.
- [9] W. A. D. Kristanto dan I. I. G. Budi, "Karakteristik geologi teknik daerah Prambanan dan sekitarnya, Kabupaten Sleman," *Kurvatek*, vol. 3, no. 2, pp. 21–29, 2018.
- [10] D. T. Kusuma, "Fast Fourier Transform (FFT) dalam transformasi sinyal frekuensi suara sebagai upaya perolehan average energy musik," *Jurnal Ilmiah*, vol. 14, no. 1, pp. 28–35, 2021.
- [11] J. Kennedy dan R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, pp. 1942–1948, 1995.
- [12] M. R. Aditama, A. G. Saadi, dan B. E. Nurcahya, "Investigasi kerentanan tanah berpotensi likuefaksi menggunakan metode mikroseismik di wilayah Prambanan, Yogyakarta," *Jurnal Geofisika*, vol. 16, no. 2, pp. 105–115, 2020.
- [13] G. H. Januarta, T. Yudistira, A. Tohari, dan E. I. Fattah, "Mikrozonasi seismik wilayah Padalarang, Kabupaten Bandung Barat menggunakan metode HVSR," *Riset Geologi dan Pertambangan*, vol. 30, no. 2, pp. 143–154, 2020.
- [14] S. Bonnefoy-Claudet, F. Cotton, dan P. Y. Bard, "The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review," *Earth-Science Reviews*, vol. 79, no. 3–4, pp. 205–227, 2006.
- [15] Rudin dan J. Safani, "Interpretation of microtremor data through horizontal to vertical spectral ratio (HVSR) for seismic microzonation in Baubau City," *Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia*, vol. 6, no. 2, pp. 147–162, 2024.
- [16] SESAME European Research Project, Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique, European Commission, 2004.
- [17] M. A. Nadhowi, H. Hiden, dan S. Minardi, "Analysis of liquefaction potential using MASW method in Kayangan District, North Lombok," in *Proceedings*, pp. 1–14, 2018.
- [18] D. M. Jannah, S. Khoirunnisa, H. Rosyida, dan F. E. Christalianingsih, "Analysis of seismic vulnerability index based on Vs30 values in earthquake-affected zones," *Indonesian Physical Review*, vol. 9, no. 2, pp. 107–116, 2024.
- [19] F. Munawaroh, Y. Masdya, M. A. Baqiyah, dan T. Triwikantoro, "Microtremor analysis for site response characterization," *Indonesian Physical Review*, vol. 7, no. 2, pp. 250–258, 2024.
- [20] Building Seismic Safety Council (BSSC), NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures, FEMA P-1050, Washington, DC, USA, 2015.
- [21] A. Mita, B. Sunardi, dan Mardiyanto, "Mikrozonasi indeks kerentanan seismik menggunakan metode HVSR di Kapanewon Galur, Kabupaten Kulon Progo," *Jurnal*, vol. 1, no. 2, pp. 12–18, 2023.
- [22] H. B. Seed dan I. M. Idriss, "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses," EERC Report, University of California, Berkeley, 1970.