

Analisis Kerentanan Tanah di Selatan Zona Longsor Desa Kalongan, Kabupaten Semarang Menggunakan Metode HVSR

Soil Vulnerability Analysis in the Southern Landslide Zone of Kalongan Village, Semarang Regency Using HVSR Method

Wuri Handayani^{1*}, Nahda Helena Sekarsari²

¹Stasiun Geofisika Kelas I Sleman, Jl Wates Km. 8, Jitengan, Balecat, Gamping, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55284

²Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sunan Kalijaga, Jl. Laksda Adisucipto, Depok, Sleman, Yogyakarta, 55281

INFO ARTIKEL

Naskah masuk : 19 Juli 2024
Naskah diperbaiki : 2 September 2024
Naskah diterima : 15 Oktober 2024

Kata kunci:
frekuensi dominan
amplifikasi
indeks kerentanan seismik
metode HVSR.

Keywords:
Dominant frequency
Amplification
Seismic vulnerability index
HVSR method

*Email : wuri.handayani@bmgk.go.id

ABSTRAK

Kabupaten Semarang, meski jauh dari pusat subduksi di selatan Pulau Jawa, tetap menghadapi ancaman bencana tanah longsor. Salah satu wilayah rawan adalah Desa Kalongan, Kecamatan Ungaran Timur, yang pernah mengalami longsor signifikan pada tahun 2022. Potensi kerusakan yang tinggi di permukiman warga mendorong kebutuhan analisis kerentanan tanah berbasis parameter geofisika. Penelitian ini menggunakan metode mikrotremor dengan analisis Horizontal to Vertical Spectral Ratio untuk menentukan parameter frekuensi dominan, faktor amplifikasi, dan indeks kerentanan tanah. Data diolah menggunakan perangkat lunak Geopsy, menghasilkan peta kontur 2D dan 3D. Hasil menunjukkan bahwa frekuensi dominan di wilayah ini rendah ($<2,5$ Hz), mengindikasikan keberadaan lapisan tanah lunak dengan ketebalan sedimen >30 meter. Faktor amplifikasi sebagian besar berkisar antara 1–3,5, namun beberapa titik mencapai 6, menunjukkan potensi penguatan getaran tinggi. Indeks kerentanan seismik bervariasi dari 1 hingga 17, dengan nilai tertinggi berada di wilayah permukiman padat di sisi selatan zona penelitian. Wilayah Desa Kalongan memiliki tingkat kerentanan tanah yang tinggi, terutama pada area dengan nilai amplifikasi dan indeks kerentanan besar. Temuan ini dapat menjadi dasar untuk menyusun strategi mitigasi bencana tanah longsor, termasuk tata ruang yang lebih aman bagi masyarakat.

ABSTRACT

The Semarang Regency, despite being far from the subduction zone in the southern part of Java Island, still faces the threat of landslides. One of the vulnerable areas is Kalongan Village, East Ungaran Sub-district, which experienced a significant landslide in 2022. The high potential for damage in residential areas underscores the need for a soil vulnerability analysis based on geophysical parameters. This study employs the microtremor method with Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) analysis to determine dominant frequency, amplification factor, and seismic vulnerability index parameters. Data processing was conducted using Geopsy software, resulting in 2D and 3D contour maps. The results indicate that the dominant frequency in this area is low (<2.5 Hz), suggesting the presence of soft soil layers with sediment thickness exceeding 30 meters. The amplification factor mostly ranges between 1 and 3.5, with some points reaching 6, indicating a high potential for ground motion amplification. The seismic vulnerability index varies from 1 to 17, with the highest values in densely populated residential areas in the southern part of the study zone. Kalongan Village exhibits a high level of soil vulnerability, especially in areas with high amplification and seismic vulnerability index values. These findings can serve as a basis for developing landslide disaster mitigation strategies, including safer land use planning for the community.

© 2024 Jurnal Stasiun Geofisika Sleman

1. Pendahuluan

Aktivitas tektonik di Pulau Jawa didominasi oleh pergerakan lempeng pada area subduksi yaitu di selatan Pulau Jawa dan patahan-patahan yang tersebar di darat Pulau Jawa. Provinsi Semarang yang terletak di sebelah

utara Pulau Jawa sedikit lebih aman dari kerusakan akibat bencana gempa bumi akibat jarak terhadap pusat subduksi sangat jauh [1], namun hal tersebut tidak membuat Provinsi Semarang bebas bencana, khususnya wilayah Kabupaten Semarang. Berdasarkan data yang terangkum di Badan Penanggulangan Bencana Daerah

(BPBD) Kabupaten Semarang seringkali terjadi bencana seperti tanah longsor dan banjir. Setidaknya telah terjadi 87 bencana tanah longsor pada tahun 2016 dan meningkat di tahun 2017 yaitu sebanyak 158 kejadian. Wilayah yang mengalami peningkatan kejadian tanah longsor salah satunya adalah wilayah Kecamatan Ungaran Timur [2].

Desa Kalongan merupakan salah satu desa yang terletak di wilayah Kecamatan Ungaran Timur. Dilansir dari media daring yang tersebar pada tahun 2022, telah terjadi bencana tanah longsor dan memutus akses utama jalur Ungaran Timur – Mranggen, Demak dengan lebar 200 meter dan kedalaman lebih dari 50 meter. Pergerakan tanah yang belum cukup stabil hingga hari ini dikhawatirkan akan melebar hingga ke area permukiman warga setempat sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai tingkat kerentanan tanah di sekitar zona longsor.

Penelitian tingkat kerentanan tanah dapat dilakukan dengan analisa getaran tanah menggunakan metode pengukuran geofisika. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui sebaran nilai frekuensi dominan dan amplifikasi di sisi selatan zona longsor yang merupakan wilayah padat pemukiman, serta untuk mengetahui besaran skala indeks kerentanan tanah terhadap getaran tanah di wilayah tersebut berdasarkan nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi.

Metode Mikrotremor. Metode Mikrotremor merupakan salah satu metode geofisika yang mengukur getaran tanah akibat aktivitas alam maupun aktivitas manusia. Dalam metode mikrotremor dikenal metode analisis data yaitu metode HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) yaitu metode yang dapat digunakan di wilayah permukiman karena sangat terjangkau efektif, dan ramah lingkungan. Penggunaan metode HVSR akan menunjukkan nilai frekuensi dominan dan nilai faktor amplifikasi. Hubungan frekuensi dominan dan faktor amplifikasi mampu menyatakan nilai indeks kerentanan tanah. Menurut Nakamura (1989) metode analisa ini digunakan untuk mengetahui perambatan gelombang geser akibat gempa bumi dengan memperoleh nilai frekuensi natural dan ketebalan lapisan sedimen serta memberikan data frekuensi dominan dan nilai penguatan gelombang gempa.

Mikrotremor adalah getaran harmonik yang terjadi secara terus menerus terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi yang tetap, disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah dan kegiatan lainnya [3]. Terdapat banyak cara untuk melakukan analisis gelombang seismik yang merambat pada lapisan batuan, salah satunya adalah pengukuran mikrotremor. Pengukuran mikrotremor merupakan salah satu pengukuran geofisika yang meninjau efek karakteristik tanah dan karakteristik dinamika tanah dengan melakukan analisis kecepatan gelombang melalui pemanfaatan gelombang seismik lingkungan dari dua sumber yaitu gelombang alami dan aktivitas manusia atau ambient vibrations yang timbul di area seismometer.

Pendekatan mikrotremor berfokus pada variasi amplitudo, periode, serta frekuensi dominan yang diakibatkan oleh gempa bumi maupun sumber getaran tanah lainnya [4].

Analisis data pengukuran mikrotremor untuk penerapan respon tanah dilakukan dengan pendekatan metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR). metode HVSR merupakan metode yang sederhana dengan memberikan pandangan sifat dinamis tanah maupun struktur spectral ratio dari H/V dengan estimasi rasio antara spektrum amplitudo komponen horizontal dan vertikal dari suatu getaran. Spektrum H/V akan menyatakan frekuensi dominan (f_0) dan amplifikasi (A_0) sebagai nilai puncak HVSR [5]. Beberapa parameter yang digunakan dalam melakukan analisis menggunakan metode HVSR adalah frekuensi dominan, faktor amplifikasi, dan indeks kerentanan tanah.

Frekuensi Dominan. Frekuensi dominan atau Frekuensi Natural merupakan nilai frekuensi lapisan batuan di suatu wilayah yang menggambarkan karakteristik bawah permukaan dengan merepresentasikan frekuensi suatu gelombang yang sering muncul dalam satu rentang waktu [1]. Nilai frekuensi dominan suatu wilayah dipengaruhi oleh ketebalan lapisan lapuk (h) dan kecepatan bawah permukaan (v_s). Frekuensi dominan berbanding terbalik dengan ketebalan sedimen (bedrock) dan berbanding lurus dengan kecepatan rata-rata. Oleh karena frekuensi dominan berhubungan langsung oleh ketebalan lapisan sedimen, maka nilai frekuensi dominan penelitian dapat ditentukan berdasarkan klasifikasi oleh Kanai (1983) yang ditunjukkan pada Tabel 1 [6].

Faktor Amplifikasi. Faktor amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi karena adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan. Faktor amplifikasi dikontrol oleh adanya kontras impedansi antara lapisan lunak (sedimen) dengan bedrock. Artinya, jika gelombang seismik merambat pada suatu medium ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium awal yang dilaluinya, maka gelombang seismik akan mengalami perbesaran. Oleh karena itu, tanah yang lunak akan menimbulkan intensitas gempa yang lebih besar dari batuan keras pada jarak dan sumber gempa yang sama [7].

Faktor amplifikasi berbanding lurus dengan nilai perbandingan spektral horizontal dan vertikalnya (H/V). Secara umum, terdapat pembagian zona atau klasifikasi yang menentukan suatu wilayah terukur memiliki nilai amplifikasi yang tinggi. Tabel 2 menunjukkan klasifikasi tersebut yang diambil berdasarkan Setiawan (2009) [8].

Indeks Kerentanan Tanah. Indeks Kerentanan Tanah atau Indeks Kerentanan Seismik (k_g) merupakan parameter yang dapat mendeskripsikan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi saat terjadi getaran tanah. Indeks kerentanan tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor salah satunya adalah lapisan sedimen yang memiliki tingkat kepadatan yang

rendah sedangkan batuan yang lebih padat dan stabil cenderung tidak menimbulkan amplifikasi [7]. Nilai indeks kerentanan tanah dapat diketahui dengan persamaan 1.

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} = A_0 \cdot T_n \quad (1)$$

Dengan

kg = indeks kerentanan tanah
A0 = amplifikasi
f0 = frekuensi dominan (Hz)
Tn = periode dominan (s).

Nilai indeks kerentanan seismik dapat dikelompokkan menjadi beberapa zona dengan ketentuan nilai kg tertentu. Klasifikasi tersebut diambil berdasarkan Refrizon, dkk (2013) [9] yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 1. Klasifikasi nilai frekuensi dominan terhadap ketebalan lapisan sedimen oleh Kanai (1983)

Klasifikasi Tanah		Frekuensi Dominan (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi
Jenis	Tipe			
I	IV	6,667 - 20	Batuan tersier atau lebih tua yang terdiri dari batuan <i>hard sandy, gravel</i> , dan lainnya.	Ketebalan sedimen permukaan sangat tipis, didominasi oleh batuan keras
II	III	4 - 6,67	Batuan tersier atau lebih tua yang terdiri dari batuan <i>hard sandy, gravel</i> , dan lainnya	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori menengah yaitu 5 – 10 meter
III	II	2,5 - 4	Batuan aluvial dengan ketebalan lebih dari 5 meter yang terdiri dari <i>sandy gravel, sandy hard clay, loam</i> , dan lainnya	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10 – 30 meter
IV	I	< 2,5	Batuan aluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, <i>top soil</i> , lumpur, dan lainnya. Kedalaman lebih dari 30 meter	Ketebalan sedimen permukaan sangat tebal

Tabel 2. Klasifikasi nilai Faktor Amplifikasi berdasarkan Setiawan (2009)

Zona	Klasifikasi	Nilai Faktor Amplifikasi
1	Rendah	$A < 3$
2	Sedang	$3 < A < 6$
3	Tinggi	$6 < A < 9$
4	Sangat Tinggi	$A > 9$

Tabel 3. Klasifikasi nilai indeks kerentanan tanah

No	Zona	Nilai k_g
1	Rendah	< 3
2	Sedang	$3 - 6$
3	Tinggi	> 6

Secara umum, nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi menunjukkan tanah lunak dengan litologi batuan sedimen yang sangat rentan terhadap getaran tanah khususnya gempa bumi. Oleh karena itu, ketika terjadi gempa suatu wilayah akan mengalami kerusakan di permukaan dari rentang tingkat kerusakan tinggi hingga sangat tinggi akibat guncangan yang besar [10].

Pengolahan data HVSR pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak Geopsy. Geopsy merupakan perangkat lunak yang umum digunakan dalam pengolahan data seismik terutama dalam menentukan spektrum HVSR. Pada Geopsy, langkah-langkah dalam perhitungan HVSR secara garis besar yaitu input data sinyal, parameter setting, windowing, transformasi Fourier, smoothing, dan kurva H/V. Penentuan puncak kurva H/V mengikuti kriteria dari rekomendasi SESAME European Research Project [11]. Hasil pengolahan data sinyal berupa kurva

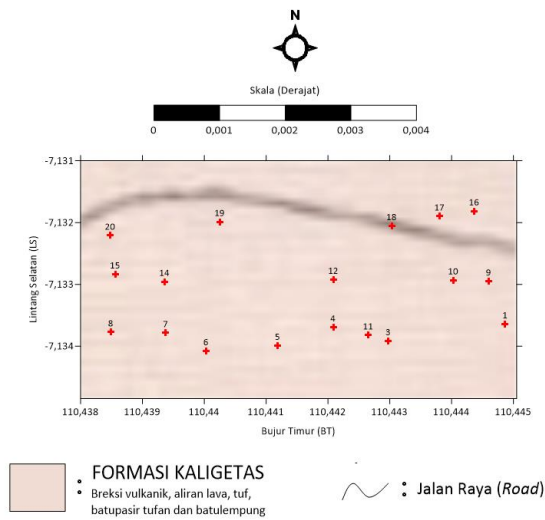
HVSR yang berisikan nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi dan digunakan untuk perhitungan indeks kerentanan tanah [12].

2. Metode Penelitian

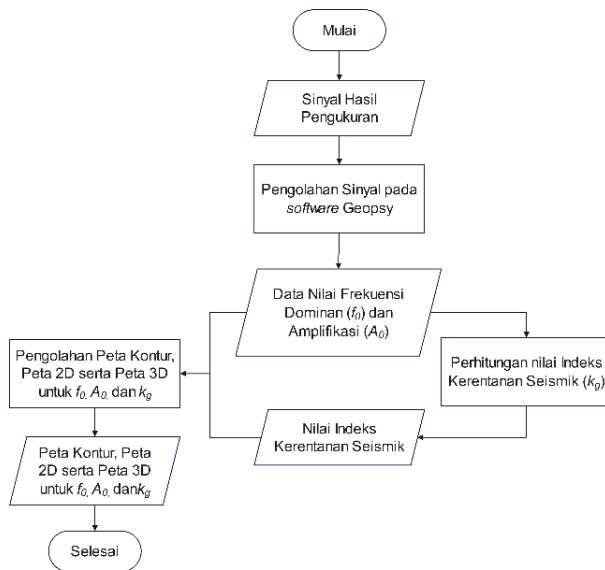
Penelitian ini menggunakan data sekunder pengukuran mikrotremor dari hasil akuisisi data di Jl. Arjuna, Dusun Bandungan, Desa Kalongan, Kabupaten Semarang yang dilakukan pada tanggal 2 Juni 2023 sampai dengan 5 Juni 2023. Data tersebut meliputi koordinat dan hasil rekaman mikrotremor pada seismometer dengan keseluruhan data terukur yaitu 52 titik tersebar dari wilayah permukiman hingga wilayah hutan dan perkebunan. Oleh karena penelitian ini berfokus pada wilayah permukiman warga, data yang digunakan pada penelitian ini sebanyak 18 titik khusus di wilayah permukiman seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Selanjutnya, dilakukan pengolahan data menggunakan software Geopsy untuk dilakukan analisis kurva H/V serta untuk mendapatkan nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi. Setelah didapatkan nilai f0 dan A0, nilai indeks kerentanan tanah dapat didapatkan dari akumulasi nilai f0 dan A0 menggunakan persamaan (1) dan diolah pada software Microsoft Excel. Kemudian, dilakukan pembuatan peta kontur 2D dan 3D untuk f0, A0, dan kg menggunakan software Surfer. Pembuatan peta kontur diawali dengan melakukan cropping pada peta geologi menggunakan software Global Mapper. Hasil cropping dimasukkan ke software Surfer dan selanjutnya dilakukan gridding data dari nilai f0, A0, dan

kg yang telah didapatkan. Terakhir, dilanjutkan dengan editing hingga menjadi interpretasi peta 2D dan 3D masing-masing parameter tersebut. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Desain survei wilayah penelitian berdasarkan informasi formasi batuan pada Peta Geologi Lembar Magelang – Semarang.



Gambar 1. Diagram alir penelitian tahap pengolahan data.

3. Hasil Dan Pembahasan

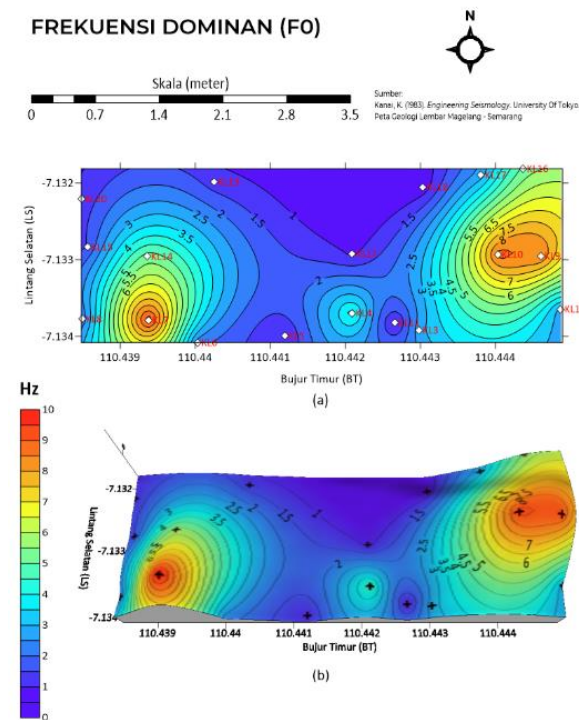
Analisis yang telah dilakukan pada software Geopsy ditunjukkan oleh Tabel 4. Tabel 4 menunjukkan hubungan frekuensi dominan dan amplifikasi sesuai titik pengukuran, didapatkan bahwa jika nilai frekuensi dominan lebih kecil daripada nilai amplifikasi maka akan mempengaruhi nilai indeks kerentanan tanah (k_g) yang bernilai besar, seperti pada titik KL11 dan KL18 yang menunjukkan perbedaan besar pada nilai indeks kerentanan tanah dibandingkan dengan titik lainnya.

Tabel 4. Hasil analisis spektrum H/V pada software Geopsy yang memuat data f_0 , A_0 , dan k_g .

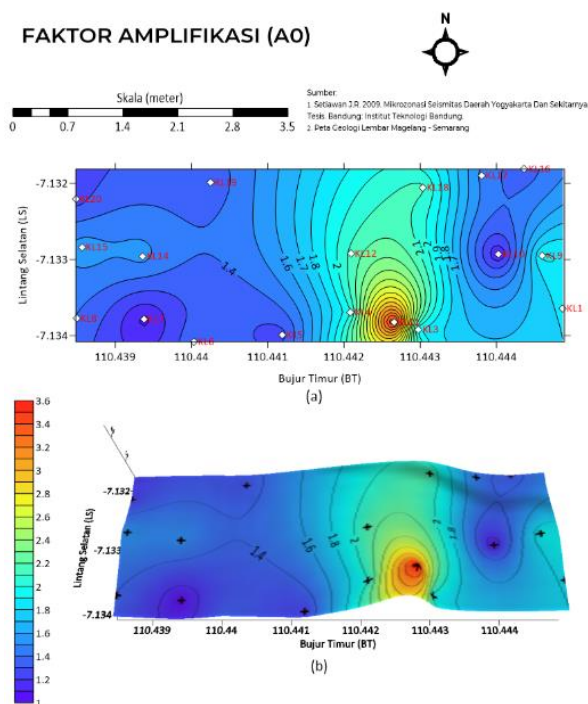
TITIK	f_0	A_0	k_g
KL1	2,76497	1,82173	1,200266257
KL3	2,80908	1,91477	1,305176126
KL4	4,27031	1,97421	0,912698405
KL5	0,990543	1,26146	1,606473754
KL6	2,17925	1,38023	0,874169945
KL7	9,42433	1,06777	0,120977594
KL8	2,12526	1,39625	0,917306147
KL9	8,51437	1,92436	0,434930759
KL10	8,68798	1,0941	0,137782869
KL11	0,776594	3,57588	1,46538317
KL12	0,891708	2,12959	5,085917776
KL14	5,23539	1,53772	0,451653611
KL15	1,53552	1,55208	1,568818593
KL16	5,12852	1,34464	0,352549416
KL17	2,74272	1,47194	0,789948432
KL18	0,655158	2,12312	6,880231233
KL19	1,23378	1,32867	1,430857988
KL20	1,18198	1,25505	1,332637187

Frekuensi Dominan (f_0). Gambar 3 menunjukkan peta kontur 2D dan 3D sebaran nilai frekuensi dominan pada sisi selatan zona longsor yang dihubungkan dengan klasifikasi nilai f_0 berdasarkan Kanai (1983) [13]. Wilayah penelitian didominasi oleh frekuensi dominan rendah atau tanah jenis IV diduga lapisan bawah permukaannya memiliki ketebalan sedimen yang sangat tebal hingga kedalaman 30 meter, sehingga bersifat lunak. Wilayah tersebut merupakan wilayah padat permukiman dan memiliki kemiringan hingga 29 derajat. Nilai f_0 tertinggi berada di titik KL7 dan KL10 dengan rentang nilai 8 hingga 9 Hz dan diduga memiliki ketebalan sedimen tipis yang didominasi oleh batuan keras. Nilai f_0 secara spesifik pada setiap titik dapat dilihat pada Tabel 4.

Faktor Amplifikasi (A_0). Pada metode Mikrotremor digunakan nilai amplifikasi (A_0) untuk menunjukkan korelasi antara getaran tanah pada kerusakan bangunan di atas permukaan. Peta di atas dihubungkan dengan klasifikasi nilai A_0 berdasarkan Setiawan (2009) [8] yang menunjukkan wilayah penelitian berkisar dari zona nilai relatif rendah sampai sedang dengan nilai A_0 rendah yaitu kurang dari 2 termasuk dalam kategori Zona I yang merupakan kawasan dengan risiko kerusakan yang rendah. Nilai A_0 tertinggi tercatat berada di titik KL11 yang merupakan zona nilai relatif sedang yaitu rentang 3,5 atau kategori Zona II memiliki risiko kerusakan bangunan tinggi akibat kecepatan getaran tanah yang tinggi. Oleh karena amplifikasi dipengaruhi oleh kecepatan gelombang maka kecepatan gelombang yang semakin kecil akan memperbesar amplifikasi. Pada dasarnya, nilai amplifikasi di wilayah penelitian tidak bersifat mengkhawatirkan akibat kategori Zona I dan Zona II tidak menimbulkan dampak yang cukup besar. Perbedaan warna di atas hanya menunjukkan tingkat dirasakannya getaran tanah seperti gempa bumi terhadap kondisi permukaan.



Gambar 2. Peta kontur 2D dan 3D sebaran nilai Frekuensi Dominan pada sisi Selatan zona longsor.

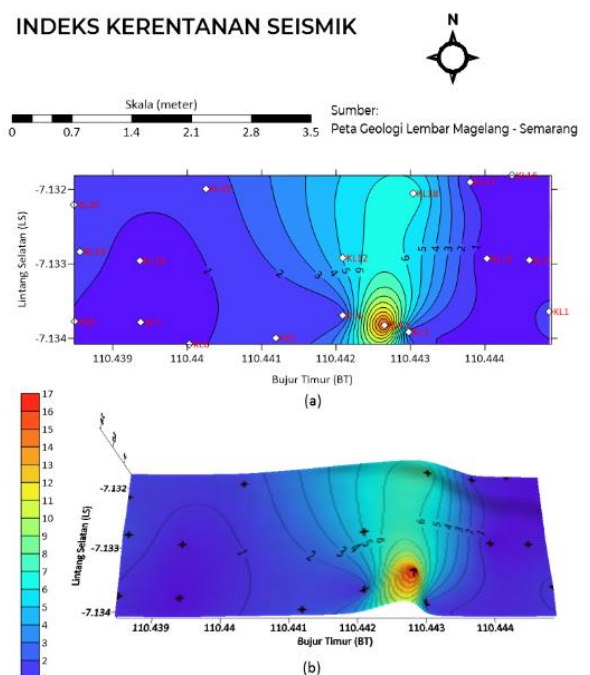


Gambar 3. Peta kontur 2D dan 3D sebaran nilai Faktor Amplifikasi.

Indeks Kerentanan Tanah (k_g). Hasil pemodelan kontur wilayah penelitian memiliki nilai indeks kerentanan seismik tertinggi di sisi selatan dengan rentang 13 - 17 atau Skala III. Jika dihubungkan dengan hasil pemodelan

amplifikasi, wilayah yang memiliki nilai indeks kerentanan tinggi merupakan wilayah yang sama dengan nilai amplifikasi tinggi, yaitu titik KL11. Hal ini menunjukkan bahwa keterkaitan antara nilai amplifikasi dan indeks kerentanan seismik ialah berbanding lurus dan dengan nilai frekuensi dominan ialah berbanding terbalik.

Nilai indeks kerentanan seismik tertinggi menunjukkan kemampuan dalam merespons getaran tanah akan lebih lemah dalam menahan getaran, sedangkan nilai indeks kerentanan seismik rendah memiliki kemampuan dalam merespons dan menahan getaran lebih kuat. Wilayah di titik KL18 dan KL 10 memiliki skala indeks kerentanan yaitu Skala II dengan nilai berkisar 7 – 12. Secara keseluruhan, wilayah penelitian memiliki tingkat kerentanan sedang dengan rata-rata indeks yaitu 3,5.



Gambar 4. Peta Kontur 2D dan 3D Sebaran Nilai Indeks Kerentanan Tanah.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa frekuensi dominan pada wilayah penelitian didominasi oleh nilai f_0 rendah atau Jenis IV dengan beberapa titik yang terukur memiliki nilai f_0 tinggi yaitu rentang nilai 8 – 9 Hz, sedangkan amplifikasi pada wilayah penelitian berkisar dari nilai relatif rendah hingga sedang yang berarti tidak terlalu berdampak pada kondisi di atas permukaan tanah. Indeks kerentanan seismik rata-rata wilayah penelitian yaitu 3,5 kg dengan nilai indeks terendah terukur dari rentang nilai 0 hingga 7. Nilai indeks tertinggi tercatat pada titik KL11 memiliki nilai terukur 16 kg dimana zona tersebut diduga memiliki jenis tanah yang rawan getaran tanah. Namun, jika diperhatikan dari nilai amplifikasi titik KL11 memiliki nilai yang relatif rendah

sehingga dugaan pengaruh kondisi di atas permukaan akibat getaran tanah relatif tidak menimbulkan dampak yang sangat parah. Meskipun demikian, hubungan antara faktor amplifikasi dan indeks kerentanan tanah di wilayah penelitian menunjukkan getaran tanah/aktivitas gempa yang dapat dirasakan oleh manusia diduga cukup besar.

Saran

Penelitian ini belum sepenuhnya akurat dalam pengukuran, sehingga disarankan beberapa langkah untuk penyempurnaan. Langkah-langkah tersebut meliputi pengukuran kemiringan lereng di setiap titik pengukuran, melanjutkan penelitian hingga penentuan jenis lapisan batuan berdasarkan kecepatan gelombang geser (V_s) dari permukaan hingga kedalaman 30–100 meter beserta pemodelannya untuk mengetahui stratigrafi wilayah, serta menggunakan parameter lain pemicu gerakan tanah, seperti data curah hujan atau faktor klimatologi lainnya. Selain itu, disarankan pula untuk menambah jumlah titik pengukuran agar informasi mengenai kerentanan tanah dapat diperoleh secara lebih detail.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih ditunjukkan kepada dosen pembimbing Bapak Andi, M.Sc., yang senantiasa membina penulis selama program kerja praktik. Tak lupa penulis ucapkan terima kasih kepada pihak BMKG Stasiun Geofisika Yogyakarta yang telah menaungi penulis pada program kerja praktik, serta rekan-rekan lainnya yang turut membantu dalam penyelesaian makalah ini.

Daftar Pustaka

- [1] Varecha, P. V., “Penentuan Klasifikasi Tanah di Kelurahan Sendangmulyo Kota Semarang Berdasarkan Metode HVSR Menggunakan SCILAB.” Skripsi, Fakultas Sains dan Teknologi: Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang, 2022.
- [2] Lestari, S., Nugraha, A. L. dan Firdaus, H. S., “Pemetaan Risiko Tanah Longsor Kabupaten Semarang Berbasis Sistem Informasi Geografis,” *Jurnal Geodesi Undip*, vol. 8, no. 1, pp. 160–169, 2019.
- [3] Rahmaningtyas, A. P., Purwanto, S., dan Widodo, A. “Identifikasi Percepatan Tanah Maksimum (PGA) dan Kerentanan Tanah Menggunakan Metode Mikrotremor di Jalur Sesar Kendeng,” *Jurnal Geosaintek*, vol. 3, no. 2, pp. 107–114, 2017.
- [4] Malik, D. P. L., L. Muh Said, dan Ayusari, “Penentuan Nilai Indeks Kerentanan Seismik Daerah Rawan Longsor Metode Mikrotremor Di Kecamatan Tombolopao Kabupatengowa,” *Jurnal Penelitian*, vol. 3, no. 1, pp. 14–23, 2021.
- [5] Nurhidayanti, “Estimasi Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Mikrotremor dengan Metode Horizontal To Vertical Spectral Ratio (HVSr) di Sekitar RSUD Prof. Dr. HM Anwar Makkatutu Banteng.” Skripsi. Fakultas Sains dan Teknologi: Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, 2019.
- [6] BMKG, “Sumberdaya Geologi,” *Buletin Meteorologi dan Geofisika No 4*, 1998. .
- [7] Wibowo, N. B., dan Huda, I. “Analisis Amplifikasi, Indeks Kerentanan Seismik dan Klasifikasi Tanah Berdasarkan Distribusi V_s30 D.I.Yogyakarta,” *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, vol. 1, no. 2, pp. 21–31, 2020.
- [8] Setiawan, J. H. “Mikrozonasi Seismisitas Daerah Yogyakarta dan Sekitarnya.” Tesis. Program Magister Teknik Geodesi dan Geomatika: Institut Teknologi Bandung, 2009.
- [9] Refrizon, Hadi, A. I., Lestari, K., dan Oktari, T. “Analisis Percepatan Tanah Maksimum dan Tingkat Kerentanan Seismik Daerah Ratu Agung Kota Bengkulu, Lampung,” *Prosding Seminar SEMIRATA FMIPA UNILA*, vol. 1, no. 1, 2013.
- [10] Tanjung, Nia A. F., Yuniarto, H., dan Widyawarman, D. “Analisis Amplifikasi dan Indeks Kerentanan Seismik di Kawasan FMIPA UGM Menggunakan Metode HVSR,” *Jurnal Geosaintek*, vol. 5, no. 2, pp. 60–67, 2019.
- [11] SESAME, “Guidlines for The Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations,” Europe: SESAME European Research Project, 2004.
- [12] Pratama, I Putu Dedy, dan Koten, Mario C. R. “Klasifikasi Kelas Tanah dan Indeks Kerentanan Seismik pada Lokasi Jaringan Sensor Seismik di Bali dan Nusa Tenggara,” *Wahana Fisika*, vol. 6, no. 2, pp. 90–101, 2021.
- [13] Kanai, K. *Seismology in Engineering*. Tokyo: Tokyo University, 1983.