

ANALISIS KERENTANAN SEISMIK DAN KLASIFIKASI TANAH DI WILAYAH SEKITAR SESAR OPAK MENGGUNAKAN DATA MIKROTREMOR

Yubaidah Tri Wahyuni^{1*}, Djati Mardiatno², Guruh Samodra²

¹ Program Magister Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Jl. Kaliurang, Sekip Utara, Bulaksumur, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, 55281, Indonesia

² Departemen Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Jl. Kaliurang, Sekip Utara, Bulaksumur, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, 55281, Indonesia

* email: yubaidahtriwahyuni@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Wilayah di sekitar Sesar Opak memiliki kerentanan tinggi terhadap guncangan gempa bumi karena lokasinya dekat dengan sumber seismik. Gempa bumi Yogyakarta tahun 2006 merupakan salah satu peristiwa signifikan dan merusak yang dipicu oleh aktivitas Sesar Opak. Salah satu faktor yang mempengaruhi kerusakan adalah efek lokasi dan klasifikasi situs. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kerentanan seismik di sepanjang Sesar Opak menggunakan metode Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) untuk mengidentifikasi efek lokasi serta klasifikasi situs. Penelitian ini menggunakan data akuisisi mikrotremor sebanyak 205 titik di wilayah sekitar Sesar Opak. Hasil analisis menunjukkan bahwa Nilai Indeks Kerentanan Seismik berkisar antara 0,16 sampai 20,96. Nilai Indeks Kerentanan Seismik dapat digunakan untuk menilai potensi amplifikasi gelombang gempa. Nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi mengindikasikan area dengan material tidak terkonsolidasi, dan hal ini berasosiasi dengan V_s30 yang rendah. Nilai V_s30 hasil pengukuran mikrotremor berkisar antara 119 sampai 750 m/s, sedangkan Nilai V_s30 MASW menunjukkan nilai antara 159 sampai 925 m/s. Klasifikasi situs berdasarkan mikrotremor dan MASW yaitu batuan (SB), batuan lunak (SC), tanah sedang (SD) dan tanah lunak (SE). Nilai V_s30 N-SPT 241 sampai 254 m/s dengan klasifikasi situs berupa tanah sedang (SD). Daerah dengan nilai V_s30 rendah menunjukkan nilai K_g yang tinggi sehingga dikategorikan sebagai zona kerentanan seismik tinggi.

Kata Kunci: Mikrotremor; HVSR; Kecepatan Gelombang Geser; V_s30 ; Klasifikasi Situs

ABSTRACT

[Title: Seismic Vulnerability Analysis and Soil Classification in the area surrounding The Opak Fault using Microtremor Data] The area surrounding the Opak Fault is highly vulnerable to earthquake shaking due to its proximity to the seismic source. The 2006 Yogyakarta earthquake was one of the significant and destructive events triggered by the Opak Fault activity. One of the key factors influencing the extent of earthquake damage is the site effect and site classification. This study aims to analyze seismic vulnerability along the Opak Fault using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) method to identify location effects and site classification. This study used microtremor acquisition data from 205 points in the area around the Opak Fault. The analysis shows that the Seismic Vulnerability Index values range from 0.16 to 20.96. The Seismic Susceptibility Index value can be used to assess the potential amplification of earthquake waves. High seismic susceptibility index values indicate areas with unconsolidated materials, and this is associated with low V_s30 . The V_s30 values from microtremor measurements range from 119 to 750 m/s, while the MASW V_s30 values show values between 159 and 925 m/s. Site classification based on microtremor and MASW is rock (SB), soft rock (SC), medium soil (SD) and soft soil (SE). The V_s30 N-SPT values are 241 to 254 m/s with a site classification of medium soil (SD). Areas with low V_s30 values show high K_g values so they are categorized as high seismic vulnerability zones.

Keywords: Microtremor; HVSR; Shear Wave Velocity; V_s30 ; Site Classification

PENDAHULUAN

Gempa bumi yang terjadi di wilayah Yogyakarta pada 27 Mei 2006 (M_{6,3}), dipicu oleh aktivitas Sesar Opak dan menimbulkan guncangan selama kurang lebih 60 detik. Peristiwa ini mengakibatkan 6.234 meninggal dunia, 36.299 luka-luka, serta menyebabkan hilangnya tempat tinggal bagi sekitar 1,5 juta penduduk. Sebanyak 3.580 korban meninggal berasal dari Kabupaten

Bantul dan 1.668 dari Kabupaten Klaten. Kerusakan pada 616.458 unit bangunan permukiman tercatat tersebar di wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah akibat gempa bumi ini (Abidin dkk., 2009). Pola kerusakan yang terjadi tidak merata, dengan tingkat kerusakan paling parah ditemukan di daerah yang memiliki material kuarter yang tidak terkonsolidasi, seperti alluvium yaitu di sekitar wilayah Sesar Opak. Daerah tersebut memiliki nilai

gravitasi lokal rendah dan *basement* yang lebih dalam, serta pada area dengan sedimen tebal yang tersusun dari material tidak terkonsolidasi. Daerah tersebut umumnya berada pada bentang alam fluvial, laut, dan aeolian (Nurwihastuti dkk., 2014)

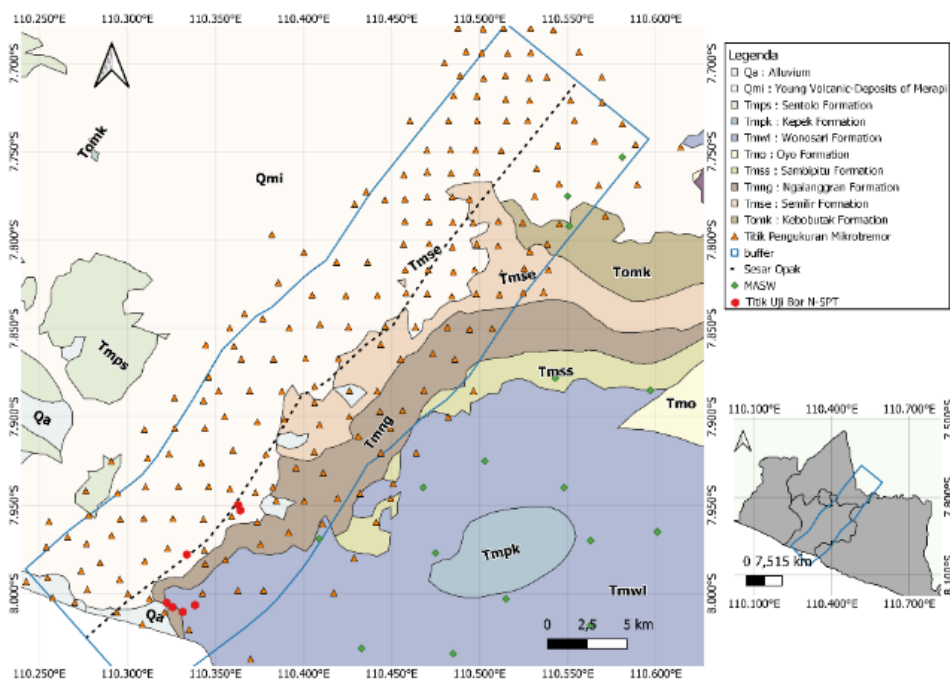
Aktivitas gempa mikro di sepanjang jalur Sesar Opak terdeteksi berdasarkan rekaman data seismik selama periode 2009-2018 dan jaringan seismik sementara dengan 86 *seismograph* yang dipasang pada tahun 2021 (Ekarsti dkk., 2023). Hasil penelitian menunjukkan bahwa gempa yang terkonsentrasi di tenggara Sesar Opak terdiri dari gempa mikro dan aktivitas seismik lainnya dengan magnitudo M0.7 hingga M4.8. Gempa-gempa ini merupakan bagian dari kluster *aftershock* gempa utama Yogyakarta tahun 2006. Aktivitas tersebut mengindikasikan mekanisme patahan *left-lateral oblique-slip*, deformasi pasca gempa, dan akumulasi regangan di sepanjang sesar, yang menunjukkan Sesar Opak sedang berada dalam periode interseismik dengan potensi akumulasi *strain* yang dapat memicu gempa besar di masa mendatang. Daerah penelitian terletak di wilayah sekitar Sesar Opak.

A. Kondisi Geologi

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Yogyakarta yang disusun oleh (Rahardjo dkk., 1995) kawasan sekitar Sesar Opak pada daerah penelitian tersusun atas formasi batuan yang beragam, mencerminkan sejarah geologi yang kompleks. Formasi batuan tersusun dari umur tua ke muda. Terbentuk pada

Oligosen sampai dengan Miosen Awal, Formasi Semilir (Tmse) tersusun atas breksi batuapung, breksi-tuff, dasit-tuff, andesite-tuff dan batu lempung tufan. Formasi Nglanggran (Tmn) tersusun atas batuan berumur Miosen Tengah, yaitu breksi vulkanik, breksi aliran, lava, tuff dan aglomerat. Kedua formasi ini terletak di Timur Laut Sesar Opak. Formasi Sambipitu (Tms) terbentuk di Miosen Tengah yang tersusun atas tuff, batupasir, Serpih, Batulanau dan Konglomerat. Formasi ini selaras di atas Formasi Nglanggran. Formasi Wonosari (Tmw1) diendapkan selaras diatas Formasi Sambipitu pada Miosen Tengah hingga Miosen Akhir, terletak di sebelah Selatan Sesar Opak yang memiliki susunan berupa kalkarenit, kalkarenit tufan dan batu gamping terumbu.

Formasi Kebo Butak (Tmok) dan Formasi Endapan Vulkanik Gunung Merapi Muda (Qmi) memiliki susunan lapisan batuan kuartar berumur Pleistosen. Formasi Kebo butak (Tmok) memiliki susunan Breksi andesit, tuff, tuff lapilli, aglomerat dan sisipan alien lava andesit. Sedangkan Formasi Endapan Vulkanik Gunung Merapi Muda (Qmi) tersusun atas tuff, abu, breksi, aglomerat dan leleran lava tak terpisahkan. Formasi ini mengcover penelitian hampir seluruh Yogyakarta-Bantul. Adapun tambahan Formasi Sentolo (Tmps) tersusun atas batu gamping dan batu pasir napalan. Formasi paling muda yaitu Formasi Endapan Alluvium (Qa) tersusun atas kerakal, pasir, lanau dan lempung (Budi Wibowo dkk., 2024).

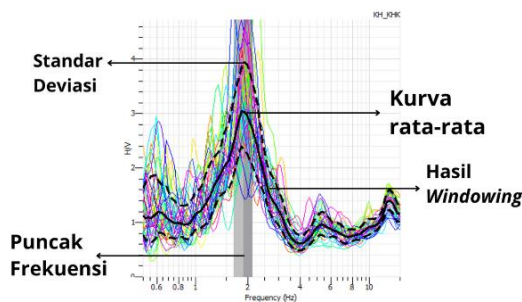


Gambar 1. Peta penelitian di wilayah sekitar Sesar Opak

Berdasarkan kondisi geologi penelitian, penelitian ini bertujuan untuk memetakan karakteristik tanah dengan menggunakan *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)* sehingga diperoleh nilai gelombang geser pada kedalaman hingga 30 m (V_{s30}) dan membandingkan hasil litologi berdasarkan analisis HVSr dengan data uji bor N-SPT dan MASW untuk mengetahui hubungan struktur tanah dan parameter seismik.

B. Mikrotremor HVSr

Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) merupakan teknik untuk menganalisis rasio spektral antara komponen horizontal dan vertikal dari getaran permukaan (Sitorus dkk., 2017). *Software Geopsy* digunakan untuk mengolah data mikrotremor dan menentukan rasio spektrum H/V berdasarkan rekaman tiga komponen sinyal (NS, EW, dan Vertikal). Proses awal meliputi *windowing* untuk menyaring data stasioner dan menghilangkan *noise* eksternal. Selanjutnya, data dikonversi ke domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)* dan *dsmoothing* dengan metode Konno-Ohmachi. Komponen horizontal dikombinasikan dengan prinsip Pythagoras untuk menghitung rasio spektrum H/V. Kurva H/V yang memenuhi kriteria (Ibs-von Seht, M. Wohlenberg, 1999) disimpan dalam format *.hv dan dianalisis lebih lanjut menggunakan metode inversi.



Gambar 2. Kurva H/V pada salah satu titik pengukuran, menunjukkan rasio spektrum horizontal terhadap vertikal (H/V) dengan analisis standar deviasi dan *windowing* Adapun persamaannya :

$$HVSr = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} = \frac{\sqrt{(S_{NS})^2 + (S_{EW})^2}}{S_V} \quad (1)$$

dimana :

S_{HS} = Spektrum horizontal pada permukaan

S_{NS} = Spektrum horizontal arah utara-selatan

S_{EW} = Spektrum horizontal horizontal timur-barat

S_{VS} = Spektrum vertikal pada permukaan

S_V = Spektrum vertikal

C. Faktor Amplifikasi (A_0)

Faktor Amplifikasi mengacu pada peningkatan intensitas gelombang saat merambat melalui media

dengan karakteristik (Wibowo & Huda, 2020). Besarnya amplifikasi ini dipengaruhi oleh perbedaan impedansi antara lapisan sedimen yang lebih lunak dan batuan dasar (*bedrock*). Selain itu, faktor amplifikasi yang disebabkan oleh kondisi geologi lokal, seperti topografi dan resonansi gerakan tanah, memiliki peran signifikan dalam memperluas dampak kerusakan akibat gempa bumi. Besarnya faktor amplifikasi dipengaruhi oleh perbedaan impedansi antar permukaan. Semakin besar perbedaan impedansi antar lapisan maka semakin tinggi nilainya (Nakamura, 2000).

Hubungan antara kontras impedansi dapat dinyatakan dalam perbandingan:

$$A_0 = \frac{C_b}{C_s} \quad (2)$$

Dimana :

C_b = Nilai V_s batuan dasar (m/s)

C_s = Nilai V_s batuan lunak (m/s)

Nilai A_0 mencerminkan seberapa besar gelombang seismik diperkuat oleh kondisi geologi setempat, terutama oleh lapisan sedimen di atas batuan dasar. Klasifikasi nilai faktor amplifikasi menurut Setiawan (2009) sebagai berikut

Tabel 1. Klasifikasi Nilai Faktor Amplifikasi A_0

Zona	Klasifikasi	Nilai Faktor Amplifikasi
1	Rendah	$A_0 < 3$
2	Sedang	$3 \leq A_0 < 6$
3	Tinggi	$6 \leq A_0 < 9$
4	Sangat Tinggi	$A_0 > 9$

D. Frekuensi Dominan (f_0)

Frekuensi dominan (f_0) memberikan informasi tentang jenis dan sifat batuan di lokasi tersebut diperoleh dari nilai frekuensi yang sering muncul sehingga dapat diidentifikasi sebagai karakteristik frekuensi suatu lapisan batuan (Ibs-von Seht, M. Wohlenberg, 1999). Lapisan tanah lunak cenderung memiliki nilai frekuensi rendah sehingga rentan mengalami gerakan tanah, berbeda dengan batuan keras cenderung memiliki nilai frekuensi yang tinggi sehingga cenderung lebih stabil terhadap gerakan tanah. Menurut (Kanai, 1983) klasifikasi nilai frekuensi dominan sebagai berikut

Tabel 2. Klasifikasi Nilai Frekuensi Dominan (f_0)

f_0 (Hz)	Klasifikasi Tanah	Deskripsi
< 2,5	IV	Delta aluvial, lumpur, tanah atas (<i>top soil</i>), sedimen sangat tebal (>30 m)
2,5 – 4,0	III	Aluvial, pasir-kerikil, lempung, sedimen tebal (10–30 m)

4,0 – 6,67	II	Aluvial, pasir-kerikil, lempung, sedimen menengah (5–10 m)
6,67– 20	I	Batuan tua, pasir keras, kerikil, sedimen tipis

E. Indeks Kerentanan Seismik (Kg)

Indeks Kerentanan Seismik (Kg) adalah nilai yang mengindikasikan seberapa rentan lapisan tanah terhadap deformasi saat gempa bumi. Nilai ini dipengaruhi oleh kekompakan suatu batuan. Batuan yang lebih padat dan stabil cenderung mengalami amplifikasi lebih kecil. Indeks Kerentanan Seismik diperoleh dari perhitungan sebagai berikut (Wibowo & Huda, 2020) :

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \tag{3}$$

dimana: Kg adalah indeks kerentanan seismik.

F. Kecepatan Gelombang Geser (Vs)

Gelombang geser merupakan salah satu jenis gelombang seismik yang merambat melalui tanah dan batuan dengan pola gerakan tegak lurus terhadap arah propagasinya. Kecepatan gelombang geser (Vs) digunakan sebagai parameter utama dalam menentukan karakteristik kekakuan tanah serta dalam analisis bahaya gempa untuk mengevaluasi efek lokasi atau *site effect* (Wijayanto dkk., 2022). Klasifikasi Situs berdasarkan Vs30 ditunjukkan pada Tabel 4

Tabel 3. Klasifikasi Site oleh Vs30 (Sumber: BSN, 2019)

Klasifikasi Site	Vs30 (m/s)
SA (Batuan Keras)	>1500
SB (Batuan)	>750 – 1500
SC (Tanah sangat padat dan Batuan Lunak)	>350 – 750
SD (Tanah Sedang)	175-350
SE (Tanah Lunak)	<175

Vs30 adalah parameter yang mengukur kecepatan gelombang geser rata-rata dari permukaan hingga kedalaman 30 meter (Borcherdt, 2012). Parameter ini dapat digunakan untuk mengkarakterisasi respons situs dalam berbagai aplikasi, termasuk desain bangunan tahan, pembuatan peta bahaya seismik, dan pembuatan ShakeMap. Persamaan Vs30 sebagai berikut :

$$Vs30 = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{V_{si}} \right)} \tag{4}$$

dimana :

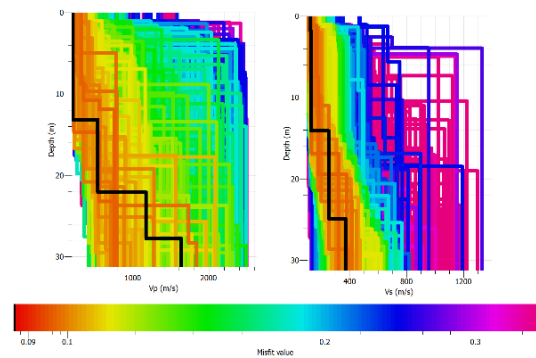
hi : Ketebalan lapisan ke i (m)

Vsi : Kecepatan gelombang geser lapisan ke i (m/s)

N : Jumlah lapisan

G. Metode Inversi

Inversi adalah kerangka matematis yang digunakan untuk mengubah data hasil pengukuran menjadi parameter model. Proses inversi kurva HVSR dilakukan untuk menentukan profil Vs bawah permukaan dengan menggunakan data HVSR. Dalam penelitian ini, penentuan kecepatan gelombang geser (Vs) dilakukan menggunakan pendekatan metode kurva eliptisitas (*ellipticity curve*) gelombang Rayleigh melalui inversi kurva HVSR. Proses inversi ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Dinver. Nilai tersebut di input dari file .hiv kemudian data sinyal diproses sehingga menghasilkan nilai misfit < 1. Data hasil pengolahan akan berupa *ground profile* seperti Gambar 3.



Gambar 3. Profil kecepatan gelombang geser (Vs) hasil inversi kurva eliptisitas, warna menunjukkan distribusi *misfit*, sedangkan garis hitam merepresentasikan model terbaik hasil inversi.

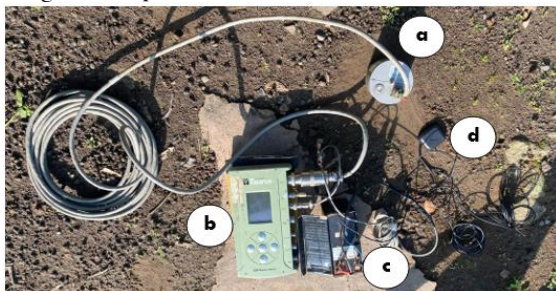
METODE

Wilayah penelitian merupakan wilayah di sekitar Sesar Opak berdasarkan zona *buffer* garis Sesar Opak. Penentuan wilayah kajian didasarkan pada lokasi situs dekat sesar, sesuai ketentuan SNI 1726:2019 (BSN, 2019). Panjang *buffer* merupakan proyeksi bidang sesar di permukaan dari kedalaman 0 sampai 10 km dari bidang sesar. Irsyam dkk. (2017) mendeskripsikan Sesar Opak memiliki kemiringan (*dip*) 60° ke arah timur dan panjang sekitar 45 km. Wilayah penelitian dibatasi oleh Sesar Opak dengan *buffer* sejauh 5,77 km di sebelah timur dan barat sesar tersebut.

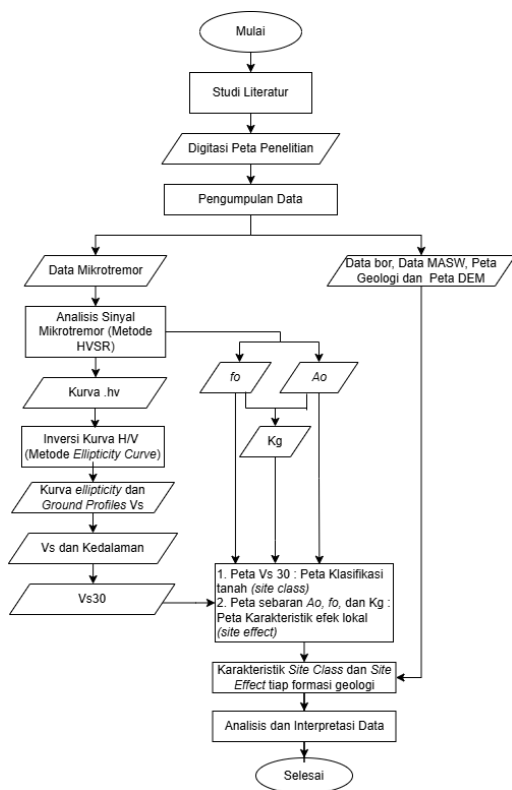
Penelitian ini menggunakan berbagai data untuk analisis karakteristik tanah dan struktur bawah permukaan di sekitar Sesar Opak. Data yang digunakan meliputi Peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), sumber : <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/>; Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS), sumber : <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/>; Peta Sesar Opak (Irsyam dkk., 2017); serta Peta Geologi Lembar Yogyakarta dan Jawa Tengah (Surono dkk., 1992) dan (Rahardjo dkk., 1995).

Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan data mikrotremor dan data bor untuk mendukung interpretasi geologi dan seismik. Akuisisi data mikrotremor dilakukan pada 132 titik, data sekunder terdiri dari 61 titik (Wibowo dkk., 2023) dan 12 titik (Ekarsti dkk., 2023). Jumlah data hasil pengukuran mikrotremor adalah sebanyak 205 titik.

Akuisisi data mikrotremor menggunakan seismometer *portable* periode pendek tipe 3D-LITE (3 komponen) (Gambar 4). Waktu pengukuran dilakukan kurang lebih antara 30 sampai 45 menit mengacu pada (SESAME, 2004). Pengambilan data dilakukan dengan metode *purposive sampling*, dengan jarak antar titik sekitar ± 2 km, menyesuaikan dengan luas wilayah penelitian di sekitar Sesar Opak. Diagram alir penelitian ditunjukkan Gambar 5.



Gambar 4. yang terdiri dari (a) sensor seismometer (b) digitizer Taurus Nanometrics, (c) aki sebagai sumber daya (d) GPS antena dan kabel konektor (Dokumentasi pribadi)



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebesar 80% area penelitian berada di Formasi Endapan Vulkanik Gunung Merapi Muda (Qmi) dan Formasi Endapan Alluvium (Qa). Sehingga penelitian juga mengacu pada data uji bor N-SPT yang mana tersebar di beberapa titik. Data uji bor N-SPT yang digunakan merupakan data dari penelitian sebelumnya. Data uji bor ini diambil dari penelitian (Amalina dkk., 2022) dan data dari Kementerian PUPR (2022) yang berjumlah 7 buah sebagai data konfirmasi.

Pengolahan data mikrotremor mengacu pada standar *SESAME European Research* (SESAME, 2004). Teknik *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) digunakan untuk menganalisis respons gelombang seismik guna mengetahui ketebalan sedimen. Metode ini menghasilkan nilai frekuensi dominan (f_0), nilai amplifikasi (A_0) dan indeks kerentanan seismik (K_g) untuk memahami karakteristik geologi bawah permukaan.

a. Analisis Nilai Amplifikasi (A_0)

Nilai Amplifikasi di kawasan Sungai Opak bervariasi dari 0,83 sampai 7,15 menggambarkan penguatan gelombang seismik yang ditunjukkan dengan peningkatan intensitas gelombang seismik melewati lapisan tanah yang bervariasi. Ketika melewati lapisan tanah yang bervariasi maka terjadi perbedaan impedansi antara sedimen lunak dengan batuan, hal ini berkaitan dengan umur geologi, litologi, serta ketebalan sedimen antar formasi.

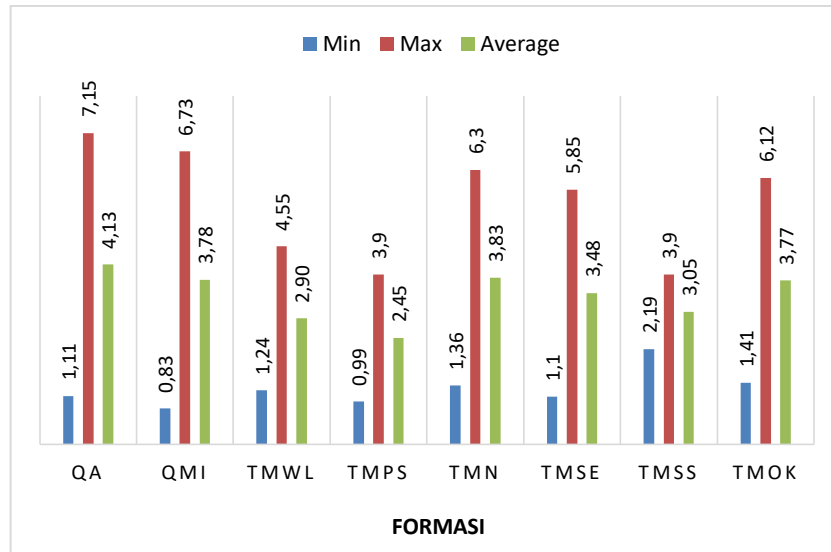
Nilai Amplifikasi di Formasi berumur Kuartar seperti Formasi Endapan Alluvium (Qa) dan Endapan Vulkanik Gunung Merapi Muda (Qmi) memiliki nilai amplifikasi tertinggi, masing-masing mencapai 7,15 dan 6,73, menunjukkan bahwa material sedimen lunak lebih rentan terhadap penguatan gelombang dibanding formasi berumur Tersier seperti Formasi Nglanggran (Tmn), Formasi Wonosari (Tmwl), Formasi Sentolo (Tmps), Formasi Kebo butak (Tmok), dan Formasi Semilir (Tmse). Formasi berumur Tersier cenderung memiliki A_0 lebih rendah yang umumnya memiliki nilai di bawah 5,85. Hal ini menunjukkan bahwa batuan dengan umur lebih tua terkonsolidasi dengan baik, lebih mampu menahan dan meredam penguatan gelombang seismik.

Tren berkesesuaian dengan penelitian sebelumnya, dimana batuan muda dengan kompaksi rendah lebih rentan mengalami amplifikasi dibanding batuan tua material kompak. Akan tetapi, terdapat anomali yang ditemukan di Formasi Nglanggran (Tmn) yang memiliki nilai amplifikasi tertinggi mencapai 6,30. Hal ini memungkinkan adanya zona

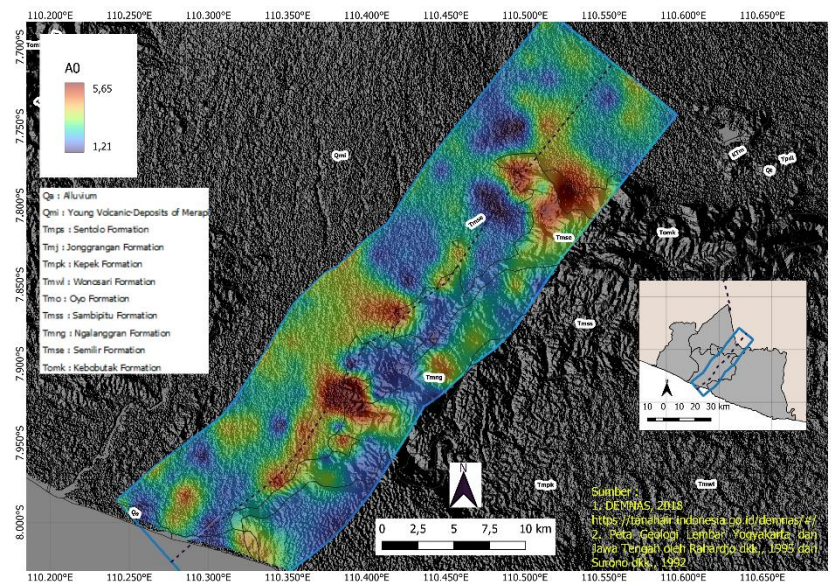
pelapukan, rekahan atau perbedaan litologi yang memungkinkan amplifikasi lebih besar. Selain itu di Formasi Qmi lebih rendah dibandingkan dengan yang lain. Hal ini menunjukkan adanya variasi dalam

tingkat konsolidasi material vulkanik yang berpengaruh pada amplifikasi gelombang seismik.

Nilai A_0 dan Peta persebarannya dapat dilihat dalam Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Diagram Nilai Amplifikasi (A_0)



Gambar 7. Peta Sebaran nilai amplifikasi (A_0) di Wilayah Sekitar Sesar Opak

b. Analisis Nilai Frekuensi Dominan (f_0)

Nilai frekuensi dominan (f_0) berkaitan langsung dengan ketebalan sedimen (h) di suatu wilayah. Semakin tebal lapisan sedimen maka nilai f_0 yang dihasilkan bernilai rendah, sedangkan semakin tipis lapisan sedimen maka nilai f_0 yang dihasilkan bernilai tinggi. Hal ini mencerminkan tingkat kerentanan terhadap fenomena alam seperti gempa bumi dan likuifaksi. Nilai f_0 juga dapat menginterpretasikan sebuah kondisi geologi bawah permukaan.

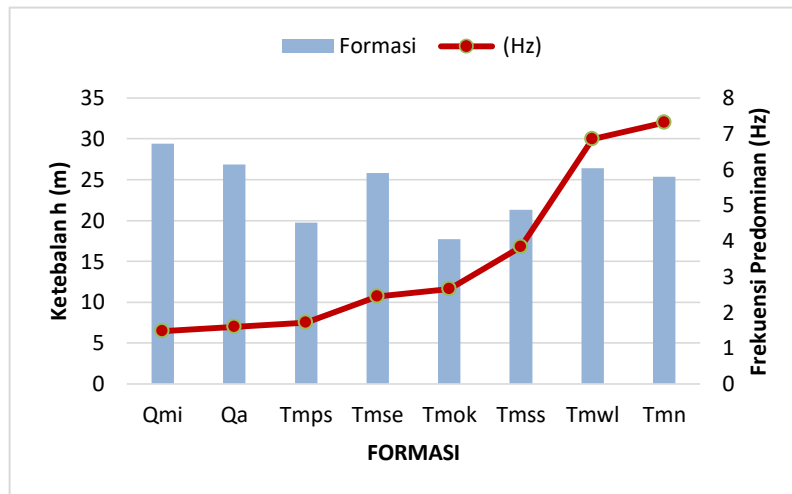
Persebaran nilai frekuensi dominan (f_0) yang diperoleh dari pengolahan data di kawasan Sungai Opak mencerminkan keragaman karakteristik bawah permukaan. Rentang nilai berkisar 0,63 sampai 12,85 Hz, menunjukkan bahwa ketebalan dan kekompakan lapisan batuan bervariasi tergantung pada lokasi formasi.

Formasi Kuartar seperti Qa dan Qmi memiliki nilai frekuensi dominan yang relatif rendah, yaitu rata-rata 1,47 Hz dan 1,59 Hz. Hal ini berkorelasi dengan sedimen yang tebal dan tidak

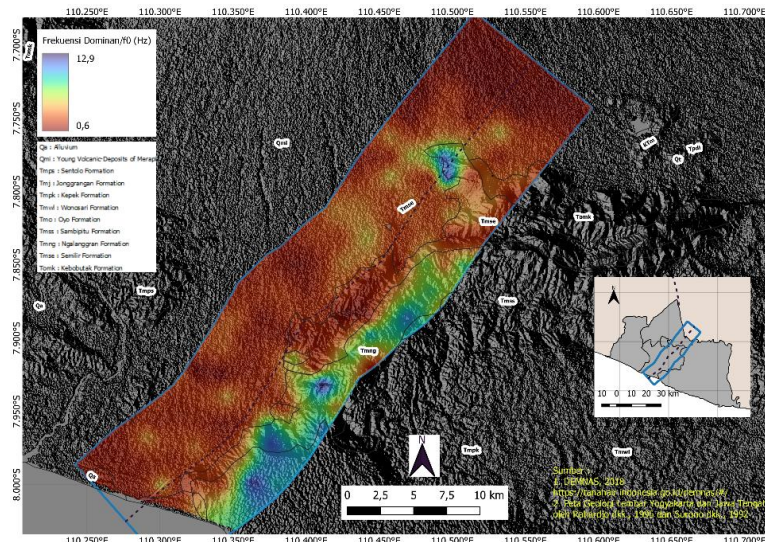
terkonsolidasi dengan baik. Ketebalan mencapai 26,87 m untuk Qa dan 29,42 m Qmi. Sehingga, karakteristik litologi keduanya rentan terhadap penguatan amplifikasi gelombang seismik. Berbeda dengan Formasi Tersier seperti Tmwl dan Tmn menunjukkan nilai frekuensi dominan yaitu 6,85 Hz dan 7,31 Hz lebih tinggi dari formasi sebelumnya, ketebalan sedimen relatif tipis namun signifikan sekitar 25 m sampai 26 m. Formasi ini menandakan batuan lebih keras dan kompak yang dapat meredam penguatan amplifikasi gelombang seismik. Akan tetapi zona ini tetap rawan dikarenakan berada di dekat zona patahan aktif Sesar Opak (Daryono, 2010). Sementara itu, Formasi Tmok, Tmps, Tmse dan Tmss menunjukkan nilai sedang yang berkisar 1,7 Hz sampai 4,0 Hz. Nilai ini cenderung berhubungan dengan batuan yang terkonsolidasi sedang. Ketebalan sedimen berkisar 17 m sampai 25 m.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, hubungan antara nilai frekuensi dominan dan ketebalan sedimen berbanding terbalik. Nilai frekuensi dominan yang rendah mengindikasikan lapisan sedimen yang tebal, sedangkan nilai yang tinggi menunjukkan lapisan sedimen yang lebih tipis. Namun, ada anomali pada data yang diperoleh, terdapat outlier di Formasi Tmn yang termasuk Formasi Tersier. Nilai ini memiliki rentang luas 1,25 Hz sampai 12,85 Hz, menunjukkan ketidakteraturan kondisi bawah permukaan dalam satu formasi. Perbedaan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Wibowo dkk. (2023) adalah wilayah penelitian yang lebih luas sehingga memiliki nilai yang bervariasi yang berpengaruh pada hasil pengolahan data.

Hubungan nilai f_0 dan ketebalan (h) dapat dilihat dalam Gambar 8. Peta persebaran nilai f_0 dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 8. Hubungan nilai f_0 dan ketebalan (h)

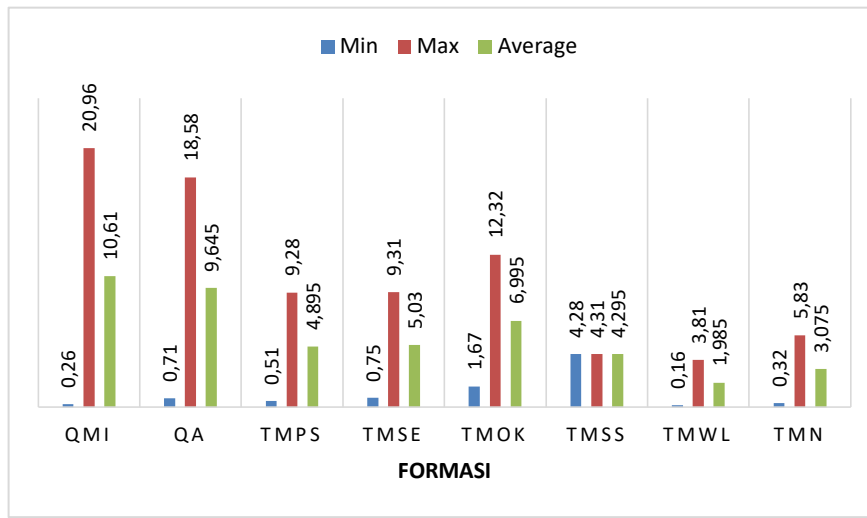


Gambar 9. Peta Sebaran Frekuensi Dominan f_0 di wilayah sekitar Sesar Opak

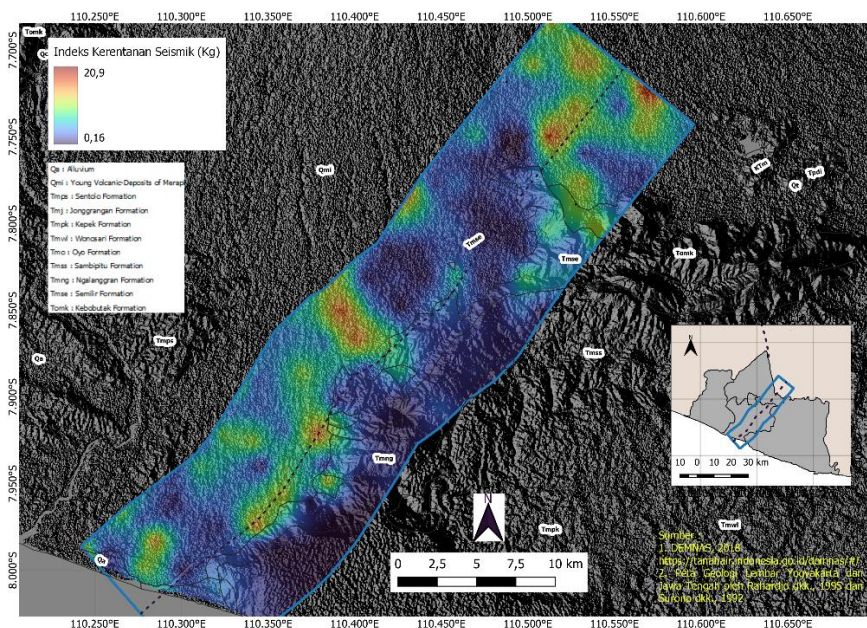
c. Indeks kerentanan Seismik (Kg).

Kerentanan seismik di suatu wilayah dipengaruhi oleh Nilai Indeks Kerentanan Seismik (Kg). Nilai ini mencerminkan stabilitas tanah terhadap guncangan gempa. Terutama pada daerah yang berkorelasi dengan sesar aktif seperti Sesar Opak. Berdasarkan Gambar 10 dan Gambar 11, nilai Indeks Kerentanan Seismik di wilayah Sesar Opak memiliki nilai antara 0,16 hingga 20,96. Nilai yang dominan tinggi berada di Formasi Endapan Vulkanik Gunungapi Merapi Muda (Qmi) dan Formasi

Endapan Alluvium (Qa). Formasi ini tersusun atas material lepas seperti tuff, pasir, lanau, lempung sehingga rentan terhadap likuifaksi saat terjadi gempa, khususnya pada daerah dengan kandungan air tanah yang tinggi. Indeks Kerentanan Seismik yang tinggi ditemukan di sepanjang jalur Sesar Opak terutama bagian Utara Selatan yang di dominasi oleh Formasi Qa dan Qmi Sebaliknya, Nilai Indeks Kerentanan Seismik yang rendah ditemukan di Formasi batuan berumur Tersier.



Gambar 10. Diagram Nilai Indeks Kerentanan Seismik (Kg)



Gambar 11. Peta Sebaran Indeks Kerentanan seismik di wilayah sekitar Sesar Opak

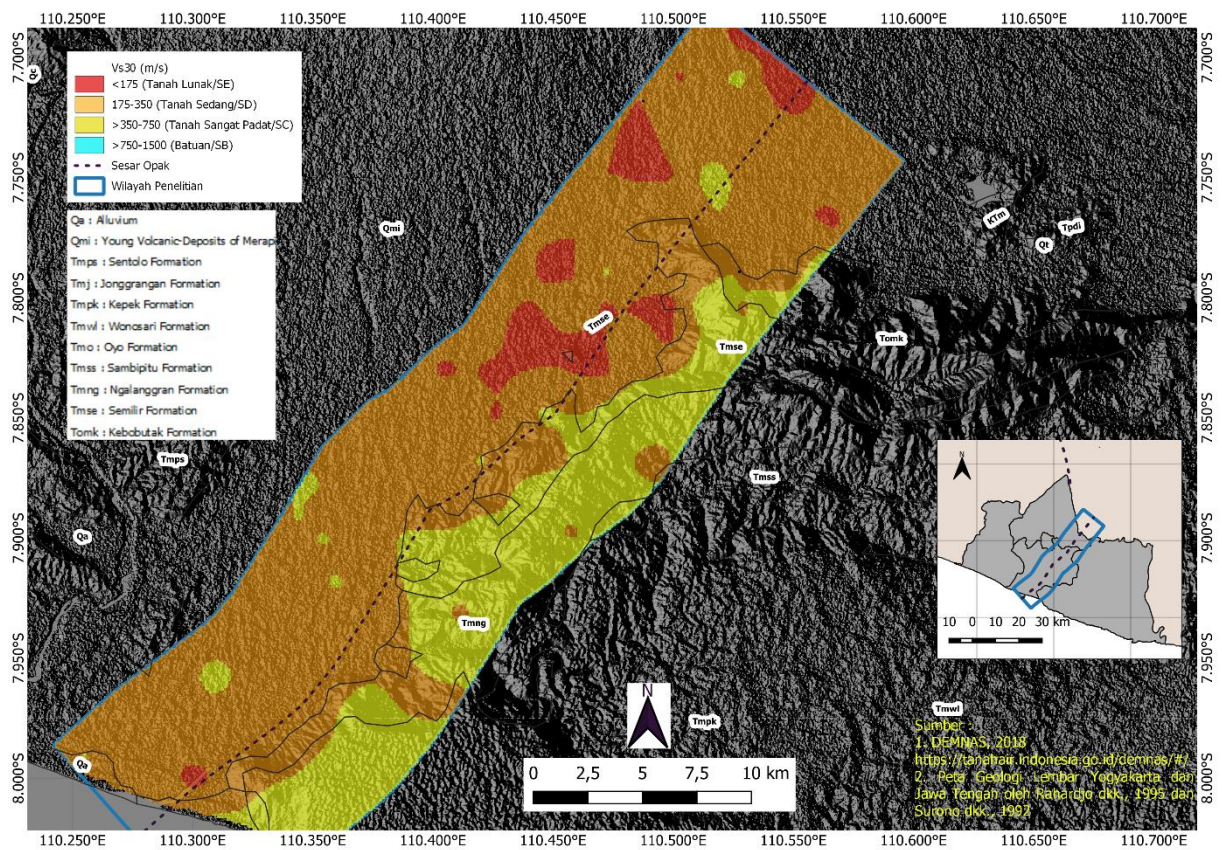
d. Komparasi nilai Vs30 data mikrotremor, data MASW dan data N-SPT untuk klasifikasi situs

Klasifikasi Situs diperoleh berdasarkan nilai Vs30, yaitu kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 meter. Berdasarkan tabel nilai Vs30 SNI 1726:2019,

klasifikasi situs di kelompokkan menjadi kelas batuan sangat keras (SA), kelas batuan keras (SB), kelas tanah sangat padat atau batuan lunak (SC), kelas tanah kaku (SD), dan kelas tanah lunak (SE).

Berdasarkan Gambar 12. data mikrotremor, nilai Vs30 memiliki nilai antara 119 m/s sampai 750 m/s. Formasi Endapan Gunung api Merapi Muda (Qmi) dan Formasi Endapan Alluvium (Qa) menunjukkan nilai Vs30 yang relatif rendah, berkisar 119-425 m/s dan 17-388 m/s. Kelas situs Formasi Qmi adalah kelas tanah sangat padat atau batuan lunak (SC), kelas tanah kaku (SD), dan kelas tanah lunak (SE). Sedangkan Formasi Qa kelas tanah sangat padat atau batuan lunak (SC) dan kelas tanah

kaku (SD). Kedua formasi ini tersusun atas batuan lunak dan tidak terkonsolidasi dengan baik, seperti pasir, lanau, lempung dan breksi. Formasi Qa berdominasi tanah keras tetapi memiliki risiko amplifikasi karena terdapat komposisi lempung dan pasir. Terdapat anomali atau outlier di Formasi Qmi, nilai Vs30 sangat rendah yaitu <175 m/s yang termasuk dalam kelas tanah lunak (SE), sedangkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Budi Wibowo dkk. (2024) termasuk dalam kelas tanah kaku (SD) sampai batuan lunak (SC), ada kemungkinan besar disebabkan oleh keberadaan lapisan pasir lepas atau lempung jenuh air di area tertentu.



Gambar 12. Peta Persebaran Nilai Vs30 di wilayah sekitar Sesar Opak

Peralihan dari batuan lunak ke batuan yang lebih kompak ditunjukkan dengan variasi nilai Vs30 Formasi Semilir (Tmse) dan Formasi Sentolo (Tmps) berkisar 123 Hz hingga 530 Hz. Kelas situsnya dari kelas tanah lunak (SE) sampai batuan lunak (SC). Nilai ini cukup tinggi, menunjukkan bahwa terdapat pemadatan sehingga mengurangi kerentanan seismik.

Formasi batuan berumur Tersier seperti Formasi Wonosari (Tmwl), Formasi Nglanggran (Tmn), Formasi Kebo butak (Tmok) memiliki nilai Vs30 mencapai 750 m/s, lebih tinggi dari Formasi

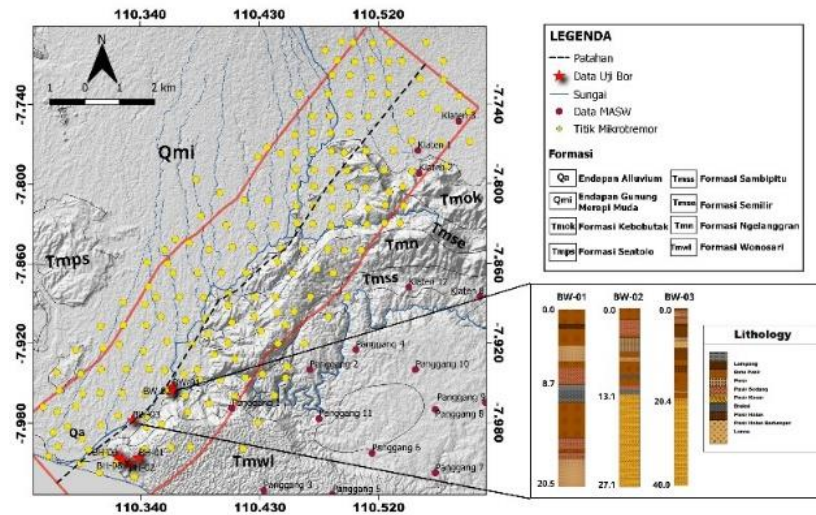
sebelumnya. Kelas situs kelas tanah kaku (SD) sampai kelas batuan keras (SB).

Nilai Vs30 berdasarkan data MASW yang digunakan untuk mengkonfirmasi di beberapa formasi memiliki rentang antara 187 sampai 646 m/s untuk formasi Qmi. Nilai ini berkorelasi dengan litologi batuan penyusunnya. Untuk nilai tinggi berkorelasi dengan keberadaan batuan breksi atau lapisan yang lebih padat sedangkan nilai <300 m/s berkorelasi dengan pasir dan lempung. Formasi Tmn menunjukkan nilai Vs30 tertinggi mencapai 829 m/s, hal ini berkaitan dengan nilai Kg yang

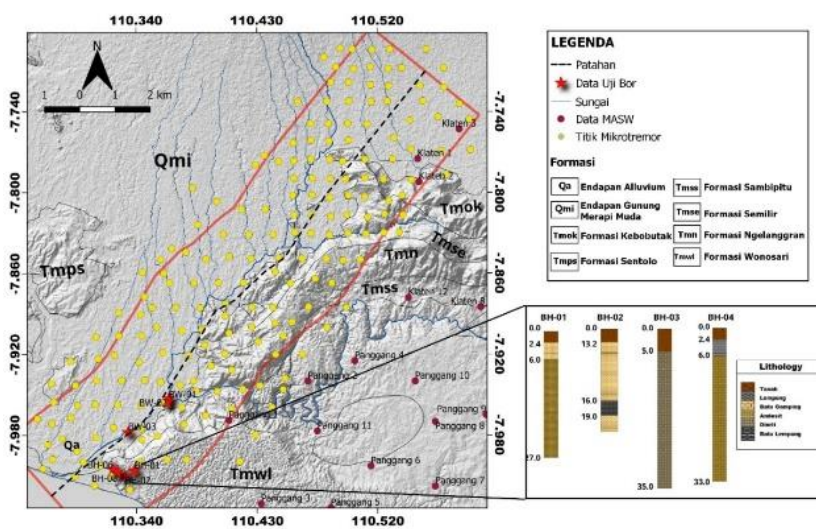
rendah. Batuan penyusun yang ditemukan berdasarkan data Uji Bor sangat kompak seperti andesit dan diorit. Sama halnya dengan Formasi Tmwl yang mengindikasikan litologi batugamping dan andesit yang kompak dengan nilai Vs30 173 sampai 925 m/s. Nilai Vs30 Tmss mencapai 779 m/s mengindikasikan bahwa nilai Vs30 yang tinggi memiliki litologi keras, mendukung klasifikasi situs bervariasi dengan rentang kelas batuan keras (SB) sampai dengan batuan lunak (SB).

Data uji bor N-SPT (Gambar13) yang digunakan terdapat pada Formasi Endapan Vulkanik Gunung Merapi Muda (Qmi) dan sebagian Formasi

Nglanggran (Tmn) dan Formasi Wonosari (Tmwl). Kedua N-SPT menunjukkan hubungan litologi dan kedalaman terhadap nilai Vs30. Formasi Qmi memiliki litologi berdominan berupa pasir, lempung dan lanau, diindikasikan dengan nilai Vs30 rendah dan dangkal. Sedangkan kedalaman yang semakin dalam ditemukan breksi yang mengindikasikan batuan lebih padat sesuai dengan nilai Vs30 yaitu >400 m/s. Berdasarkan data uji bor N-SPT dan JJLS Gambar 14. Formasi Tmn dan Tmwl menunjukkan dominasi batuan keras seperti diorit, batugamping dan andesit yang ditemukan pada kedalaman >20 m.



Gambar 13. Peta Litologi Data Uji Bor (Amalina dkk., 2022)



Gambar 14. Data Uji Bor JJLS (Kementerian PUPR, 2022)

Hubungan metode ketiganya pada Tabel 3. dengan kerentanan seismik yaitu memiliki tren yang sesuai dengan penelitian sebelumnya meskipun daerah wilayah lebih luas dan data lebih banyak. Tren antara litologi, kedalaman sedimen dan nilai Vs30 yang mengacu pada indeks kerentanan seismik

memiliki pola yang konsisten. Litologi dengan batuan lepas dan sedimen tidak terkonsolidasi ditemukan di Formasi Qmi dan Qa, memiliki nilai Kg yang tinggi sehingga nilai Vs30 rendah. Hal ini memperlihatkan potensi kerentanan seismik yang tinggi terhadap peningkatan amplifikasi gelombang

seismik. Sebaliknya, litologi dengan batuan yang keras dan kompak ditemukan di Formasi Tmwl, Tmn, Tmok, Tmps dan Tmss. Nilai Kg rendah sehingga Nilai Vs30 tinggi, kelas situs mendekati

batuan keras (SB), mengindikasikan jika kerentanan seismik lebih rendah terhadap peningkatan amplifikasi gelombang seismik.

Tabel 4. Hubungan Vs30 mikrotremor, Vs30 MASW dan Vs30 N-SPT

Formasi	Mikrotremor		MASW		N-SPT	
	Vs30 (m/s)	Kelas Situs	Vs30 (m/s)	Kelas Situs	Vs30 (m/s)	Kelas Situs
Qa	179-388	SD, SC	224-241	SD		
Qmi	119-425	SE, SD, SC	187-646	SD, SC	241	SD
					249	SD
					254	SD
Tmn	185-618	SD, SC,	340-829	SD, SC, SB		
Tmps	213-429	SD, SC	159-270	SE, SD		
Tmse	123-530	SE, SD, SC	-			
Tmss	372-433	SD, SC	-			
Tmwl	229-750	SD, SC, SB	173-925	SE, SD, SC, SB		
Tomk	286-593	SD, SC	-			

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis, korelasi antara nilai Vs30 metode mikrotremor, MASW dan N-SPT memperlihatkan bahwa formasi dengan nilai dominan rendah dan nilai amplifikasi tinggi menunjukkan nilai Vs30 yang relatif rendah, litologi penyusunnya tidak terkonsolidasi dengan baik dan berpotensi mengalami kerentanan tinggi. Contohnya di Formasi Qmi dan Qa. Pada Formasi Qmi didukung dengan litologi berupa pasir dan lempung yang mendominasi. Sebaliknya, Formasi Tmwl dan Tmn menunjukkan data dari hasil Nilai Vs30 tinggi. Hal ini mencerminkan bahwa litologi penyusunnya tergolong batuan keras didukung dengan data Vs30 MASW penyusunnya batugamping, andesit dan diorit yang memiliki kestabilan.

Perbandingan nilai Vs30 ketiganya menunjukkan bahwa situs kelas bervariasi. Formasi dengan nilai rendah di dominasi oleh kelas situs tanah lunak (SE) hingga kelas situs tanah kaku (SD) pada formasi seperti Qmi, Qa dan Tmse. Sementara itu formasi dengan batuan lebih padat seperti pada formasi Tmn, Tmwl dan Tmok termasuk dalam situs batuan lunak (SC) hingga batuan (SB).

Kajian mendalam terhadap metode akuisisi dan validasi data geofisika diperlukan untuk meningkatkan ketepatan pemetaan kerentanan seismik. Perluasan cakupan wilayah pengamatan juga mendukung upaya mitigasi bencana secara lebih efektif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya menyampaikan terima kasih kepada rekan-rekan di BMKG Stasiun Geofisika Sleman atas

dukungan motivasi serta saran yang bermanfaat dalam penyusunan publikasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H. Z., Andreas, H., GaMal, M., & Ci abdullaH, D. 2009. Deformasi Koseismik dan Pascaseismik Gempa Yogyakarta 2006 dari Hasil Survei GPS. *Jurnal Geologi Indonesia*, 4(4), 275–284. <https://doi.org/https://doi.org/10.17014/i jog.4.4.275-284>

Amalina, A., Fathani, T., & Wilopo, W. 2022. Comparison of SPT and Vs-based Liquefaction Assessment on Young Volcanic Sediment: A Case Study in Bantul District of Yogyakarta, Indonesia. *Civil and Environmental Science*, 005(02), 171–182. <https://doi.org/10.21776/ub.civense.2022.00502.6>

Borcherdt, R. D. 2012. VS30 – A Site-Characterization Parameter for Use in Paper Title Line 1 Building Codes, Simplified Earthquake Resistant Design, GMPEs, and ShakeMaps. *US Geological Survey, Menlo Park, CA*, 10(2010), 1–10.

BSN. 2019. *Badan Standarisasi Nasional*. Tata cara perencanaan ketahanan gempa dan struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 1726:2019).

Budi Wibowo, N., Faisal Fathani, T., Pramumijoyo, S., & Indah Marliyani, G. 2024. Comparison of the v s30 model and site class based on MASW, mikrotremor and N-SPT data in the Opak River Basin . *IOP Conference Series: Earth*

- and Environmental Science*, 1373(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1373/1/012002>
- Daryono. 2010. Aktivitas Gempabumi Tektonik di Yogyakarta Menjelang Erupsi Merapi 2010. *Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Gambar 1*, 1–8.
- Ekarsti, A. K., Pramumijoyo, S., Marliyani, G. I., Setianto, A., & DwikoritaKarnawati. 2023. Analyzing Recent Seismic Activity Of The Opak Fault System In Central Java, Indonesia, From 2009 To 2021. *International Journal of GEOMATE*, 25(110), 87–97. <https://doi.org/10.21660/2023.110.3959>
- Ibs-von Seht, M. Wohlenberg, J. 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 250–259.
- Irsyam, M., Widiyantoro, S., Natawidjaya, D. H., Meilano, I., Rudyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. R., Djarwadi, D., Faizal, L., & Sunarjito. 2017. *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Kanai, K. 1983. *Seismology in Engineering*. Tokyo University.
- Nakamura, Y. 2000. Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura ' S. *Spectrum*, 2656.
- Nurwihastuti, D. W., Sartohadi, J., Mardiatno, D., Nehren, U., & R. 2014. Understanding of Earthquake Damage Pattern through Geomorphological Approach: A Case Study of 2006 Earthquake in Bantul, Yogyakarta, Indonesia. *World Journal of Engineering and Technology*, 02(03), 61–70. <https://doi.org/10.4236/wjet.2014.23b010>
- Rahardjo, W., Sukandarrumidi, & Rosidi, H. M. 1995. *Peta Geologi Lembar Yogyakarta*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- SESAME. 2004. *Guidelines For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique On Ambient Vibrations Measurements, Processing And Interpretation SESAME European research project WP12-Deliverable D23.12*. <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>
- Setiawan, J. R. 2009. *Mikrozonasi Seismisitas Daerah Istimewa Yogyakarta dan Sekitarnya*. Institut Teknologi Bandung.
- Sitorus, N., Purwanto, S., & Utama, W. 2017. Analisis Nilai Frekuensi Natural dan Amplifikasi Desa Olak Alen Blitar Menggunakan Metode Mikrotremor HVSR. *Jurnal Geosaintek*, 3(2), 89. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v3i2.2962>
- Wibowo, N. B., Fathani, T. F., Pramumijoyo, S., & Marliyani, G. I. 2023. Microzonation of Seismic Parameters in Geological Formation Units Along the Opak River Using Microtremor Measurements. *International Journal of GEOMATE*, 25(110), 208–219. <https://doi.org/10.21660/2023.110.4017>
- Wibowo, N. B., & Huda, I. 2020. Analisis Amplifikasi, Indeks Kerentanan Seismik Dan Klasifikasi Tanah Berdasarkan Distribusi Vs30 D.I.Yogyakarta Analysis Of Amplification, Seismic Vulnerability Index And Soil Clasification Based On Vs30 In Yogyakarta. *Buletin Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika*, 1(2), 21–31.
- Wijayanto, Mardiatno, D., Daryono, Nehren, U., Marfai, M. A., & Pramono, S. 2022. Spatial Distribution of Vs30 Based on Masw and Microtremor Inversion in Gunungkidul, Yogyakarta, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 22(94), 29–38. <https://doi.org/10.21660/2022.94.2463>