

RESEARCH ARTICLE

Seismic Vulnerability Index Study of Lasem Fault Zone Using HVSR Method Based on Microtremor Data

(Studi Indeks Kerentanan Seismik Zona Sesar Lasem Menggunakan Metode HVSR Berbasis Data Mikrotremor)

Nana Nawangsari^{1,2}, Yohana Noradika Maharani^{2*}, Sorja Koesuma³

¹Stasiun Geofisika Kelas I Sleman, Jl. Jl. Wates Km. 8, Jitengan, Balekatun, Gamping, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55295, Indonesia

²Program Studi Magister Manajemen Bencana, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta,
Jl. Babarsari 2 Yogyakarta, 55281, Indonesia

³Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Sebelas Maret, Kentingan, Kota Surakarta, Jawa Tengah 57126, Indonesia

ABSTRACT

The Lasem Fault Zone is one of the tectonically active areas in Central Java that has the potential to trigger damaging earthquakes. To identify seismic vulnerability in this area, a microzonation approach based on soil dynamic parameters is required to represent the local response to shaking. This study aims to analyze the distribution of dominant frequency (f_0) and amplification factor (A_0) values, as well as to calculate and map the seismic vulnerability index (K_g) in the Lasem Fault zone using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method based on microtremor data. Data were collected at 60 observation points spread across Pati and Rembang regencies. The results of data processing show that the dominant frequency (f_0) value varies between 0.59 to 20.76 Hz, while amplification factor (A_0) is in the range of 1.01 to 5.05. The distribution of dominant frequency (f_0) and amplification factor (A_0) values is strongly influenced by the surface geological conditions, where soft and thick sediments tend to produce low f_0 and high amplification factor (A_0). The seismic vulnerability index (K_g) values calculated from these parameters range from 0.076 to 10.322. The resulting zoning maps show that some areas have a high level of vulnerability to earthquake shaking, especially in areas with alluvial lithology and low-lying morphology.

Zona Sesar Lasem merupakan salah satu kawasan aktif tektonik di Jawa Tengah yang berpotensi memicu gempa bumi merusak. Untuk mengidentifikasi kerentanan seismik di wilayah ini, diperlukan pendekatan mikrozonasi berbasis parameter dinamik tanah yang mampu merepresentasikan respons lokal terhadap guncangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis persebaran nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0), serta menghitung dan memetakan indeks kerentanan seismik (K_g) pada zona Sesar Lasem menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) berbasis data mikrotremor. Pengambilan data dilakukan di 60 titik pengamatan yang tersebar di Kabupaten Pati dan Rembang. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa nilai frekuensi dominan (f_0) bervariasi antara 0,59 hingga 20,76 Hz, sedangkan faktor amplifikasi (A_0) berada pada kisaran 1,01 hingga 5,05. Persebaran nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi permukaan, di mana sedimen lunak dan tebal cenderung menghasilkan frekuensi dominan (f_0) rendah dan faktor amplifikasi (A_0) tinggi. Nilai indeks kerentanan seismik (K_g) yang dihitung dari parameter tersebut memiliki rentang antara 0,076 hingga 10,322. Peta zonasi yang dihasilkan menunjukkan bahwa beberapa wilayah memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap guncangan gempa, terutama di area dengan litologi aluvial dan morfologi dataran rendah.

Keywords: HVSR, Microtremor, Dominant frequency, Lasem Fault, Seismic vulnerability index.

*Corresponding author:
Yohana Noradika Maharani
E-mail: yohanam@upnyk.ac.id

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana gempa bumi karena berada pada pertemuan tiga lempeng utama dunia: Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia,

dan Lempeng Pasifik. Di samping subduksi lempeng yang aktif, terdapat juga ratusan sesar lokal aktif di wilayah daratan yang menjadi sumber gempa potensial. Salah satu sesar aktif yang cukup penting di wilayah utara Jawa Tengah adalah Sesar Lasem. Meskipun tidak seterkenal Sesar Lembang atau Sesar

Opak, Sesar Lasem tercatat sebagai sumber gempa potensial berdasarkan peta gempa nasional [1] dan memiliki intensitas guncangan yang diperkirakan dapat mencapai VIII MMI [2]. Sesar Lasem merupakan struktur tektonik aktif di Jawa bagian utara dengan mekanisme sesar mendatar (strike-slip), ditandai zona depresi hingga kedalaman ± 15 km dan kontras densitas batuan 2,1-2,8 gr/cm³. Kondisi ini menunjukkan potensi akumulasi tegangan tektonik yang tinggi sehingga meningkatkan kerentanan seismik [3][4]. Namun demikian, studi ilmiah mengenai karakteristik lokal seismik di sepanjang zona sesar ini masih sangat terbatas.

Salah satu pendekatan yang digunakan dalam mengevaluasi bahaya seismik lokal adalah mikrozonasi, yaitu pemetaan karakteristik tanah dalam menanggapi guncangan gempa berdasarkan parameter fisik dan dinamik. Dalam konteks mikrozonasi, dua parameter penting yang umum digunakan adalah frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). Frekuensi dominan (f_0) merefleksikan kondisi geologi bawah permukaan, di mana nilai rendah mengindikasikan sedimen tebal dan nilai tinggi mencerminkan tanah keras atau batuan dangkal. Untuk menafsirkan variasi frekuensi dominan (f_0), penelitian ini mengacu pada klasifikasi Kanai dan Tanaka (1961) [5] yang membagi tanah ke dalam empat kelas utama, dari tanah lunak hingga batuan keras.

Tabel 1. Klasifikasi tanah Kanai dan Tanaka (1961)

Klasifikasi Tanah Jenis	Frekuensi Dominan (Hz)	Klasifikasi Tanah Kanai
I	6.67-20	Batuan tersier atau lebih tua, terdiri dari batuan pasir berkerikil keras (<i>hard sandy gravel</i>)
II	4-6,67	Aluvium dengan ketebalan 5 m. Terdiri dari pasir berkerikil (<i>sandy gravel</i>), lempung keras berpasir (<i>sandy hard clay</i>), tanah liat, lempung (<i>loam</i>) dan sebagainya
III	2,5-4	Batuan alluvial yang hampir sama dengan tanah tipe II, hanya dibedakan oleh adanya formasi yang belum diketahui (<i>buff formation</i>)
IV	<2,5	Batuan alluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, <i>top soil</i> , lumpur, tanah lunak, humus, endapan delta atau endapan lumpur dan sebagainya, yang tergolong kedalam tanah lembek, dengan kedalaman 30 m.

Klasifikasi ini banyak digunakan dalam mikrozonasi seismik karena mampu menghubungkan respon seismik lokal dengan litologi penyusun serta potensi amplifikasi gempabumi. Sedangkan faktor amplifikasi (A_0) menunjukkan sejauh mana penguatan gelombang seismik akibat kondisi lapisan tanah di permukaan [6].

Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) berbasis mikrotremor menjadi salah satu teknik yang paling banyak digunakan dalam kajian mikrozonasi karena bersifat *non-destruktif*, ekonomis, serta mampu memberikan informasi parameter frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) dengan tingkat keakuratan yang cukup tinggi [7]. Metode ini telah diaplikasikan di berbagai wilayah di Indonesia, seperti Yogyakarta [8], Blitar [9], Plampang Nusa Tenggara Barat [10] Padalarang Bandung [11] Sesar Lembang Wilayah Cihideung [12]. Keduanya menunjukkan bahwa distribusi frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) sangat ditentukan oleh litologi permukaan, ketebalan tanah penutup, serta kondisi topografi.

Dalam konteks mitigasi bencana gempa bumi, informasi frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) kemudian dapat dikembangkan menjadi indeks kerentanan seismik (K_g), yang secara kuantitatif menggambarkan potensi suatu lokasi untuk mengalami kerusakan akibat guncangan. Rumus $K_g = A_0^2 / f_0$ pertama kali dikembangkan Nakamura [13] dan sejak itu menjadi acuan dalam banyak studi mikrozonasi global. Semakin tinggi nilai indeks K_g , semakin besar kemungkinan suatu lokasi mengalami kerusakan serius ketika terjadi gempa.

Namun demikian, penggunaan indeks kerentanan seismik (K_g) dalam konteks mikrozonasi di Indonesia masih relatif terbatas dan belum menjadi bagian dari standar penyusunan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW). Padahal, banyak studi menunjukkan bahwa parameter ini sangat membantu dalam mengidentifikasi zona-zona kritis, terutama di wilayah yang sudah berkembang secara spasial. Penelitian mikrozonasi di Kecamatan Kasihan dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) 2018–2038, dengan menekankan keterkaitan antara tingkat kerawanan gempa dan pola ruang yang dirancang guna mengurangi risiko bencana [14]. Studi di Yogyakarta menunjukkan bahwa analisis indeks kerentanan seismik dan Vs30 dapat membantu mengidentifikasi potensi guncangan lokal untuk

mendukung mitigasi bencana dan perencanaan ruang [15]. Penggabungan data mikroseismik dengan dokumen perencanaan ruang menjadi langkah penting untuk mendorong kebijakan pembangunan berbasis mitigasi risiko.

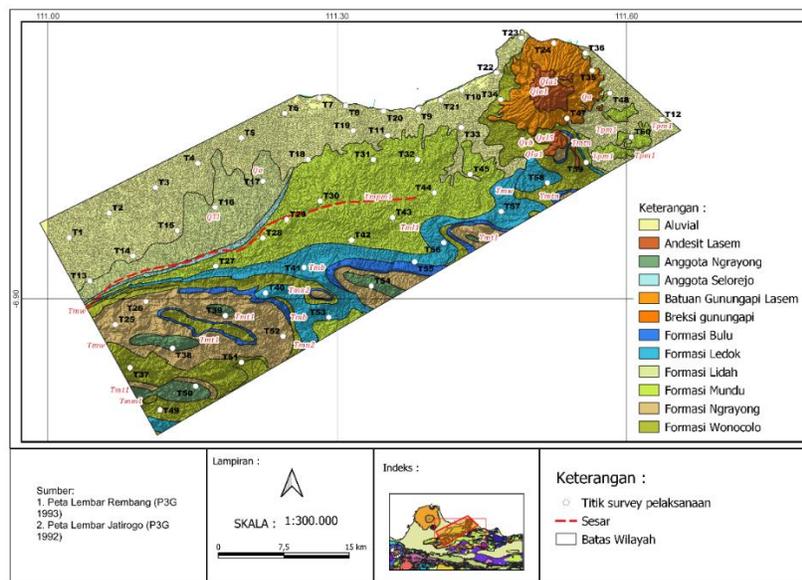
Wilayah studi dalam penelitian ini adalah zona Sesar Lasem yang membentang melintasi sebagian wilayah Kabupaten Pati dan Rembang. Kedua wilayah ini memiliki populasi yang cukup padat dengan aktivitas ekonomi yang terus berkembang, terutama pada sektor perdagangan, industri, dan permukiman. Secara morfologi, wilayah ini terdiri atas kombinasi dataran rendah, pesisir, dan perbukitan, dengan litologi yang didominasi oleh sedimen Kuartar serta Formasi Kalibeng. Data demografi dan perkembangan sektor ekonomi tersebut diperoleh dari publikasi resmi Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Pati dan Kabupaten Rembang [16][17]. Berdasarkan karakteristik tersebut, wilayah ini sangat ideal untuk dikaji secara mikrozonasi.

Penelitian ini tidak berfokus pada penyusunan peta risiko secara komprehensif, melainkan bertujuan untuk menjawab dua pertanyaan utama terkait kondisi seismik di zona Sesar Lasem. Pertama, bagaimana pola persebaran nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi tanah (A_0) yang mencerminkan respons dinamik tanah di wilayah tersebut. Kedua, bagaimana distribusi nilai indeks kerentanan seismik (K_g) yang memberikan gambaran tingkat kerentanan lokal terhadap guncangan gempa.

Geologi Wilayah Penelitian

Kedua pertanyaan tersebut dijawab melalui pengambilan data mikrotremor di 60 titik pengamatan, yang kemudian diolah menggunakan metode HVSR untuk mendapatkan parameter frekuensi dominan (f_0) dan amplifikasi tanah (A_0). Selanjutnya, nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dihitung menggunakan rumus standar dan divisualisasikan ke dalam peta zonasi untuk mengetahui distribusi spasialnya. Analisis ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengisi kekosongan data mikrozonasi di zona Sesar Lasem dan menjadi referensi awal dalam perencanaan pembangunan serta mitigasi bencana berbasis data empiris.

Melalui pendekatan kuantitatif berbasis parameter frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), dan indeks kerentanan seismik (K_g), penelitian ini berupaya menjembatani kebutuhan data teknis kebencanaan dengan aspek perencanaan spasial. Integrasi data tersebut ke dalam dokumen RTRW akan memungkinkan strategi pembangunan yang tidak hanya bertumpu pada asumsi makro atau persepsi risiko, tetapi benar-benar berlandaskan kondisi aktual bawah permukaan. Oleh karena itu, kajian ini memiliki nilai penting, baik dari sisi akademik maupun dari segi implementasi praktis, terutama karena wilayah zona Sesar Lasem hingga kini belum pernah dipetakan secara rinci dalam konteks mikrozonasi berbasis indeks kerentanan seismik, menjadikannya sebagai salah satu studi awal di kawasan ini.



Gambar 1. Peta Geologi Wikayah Penelitian

Kondisi geologi Wilayah penelitian pada berupa wilayah perbukitan dan dataran rendah, wilayah perbukitan disusun oleh batuan sedimen klasik, sedimen gunung api dan intrusi batuan andesit seperti pada Gambar. 1. Sedangkan wilayah dataran rendah berupa *alluvium* yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir lanau dan lempung. Berdasarkan fisiografinya, wilayah penelitian termasuk dalam Zona Rembang, merupakan bagian dari cekungan sedimentasi Jawa Timur bagian Utara (*East Java Geosyncline*). Dalam rangka mendukung pemahaman terhadap keberadaan dan konfigurasi sesar aktif di wilayah Cekungan Jawa Timur Utara, [18] memanfaatkan data sekunder berupa hasil interpretasi anomali *Bouguer* lengkap. Analisis dilakukan dengan menerapkan metode *Total Horizontal Derivative* (THD), yang efektif untuk menyoroti perubahan gradien medan gravitasi secara lateral. Teknik ini memungkinkan identifikasi batas-batas kontras densitas batuan bawah permukaan yang berasosiasi dengan keberadaan struktur geologi seperti sesar atau patahan. Hasil interpretasi ini memperkuat

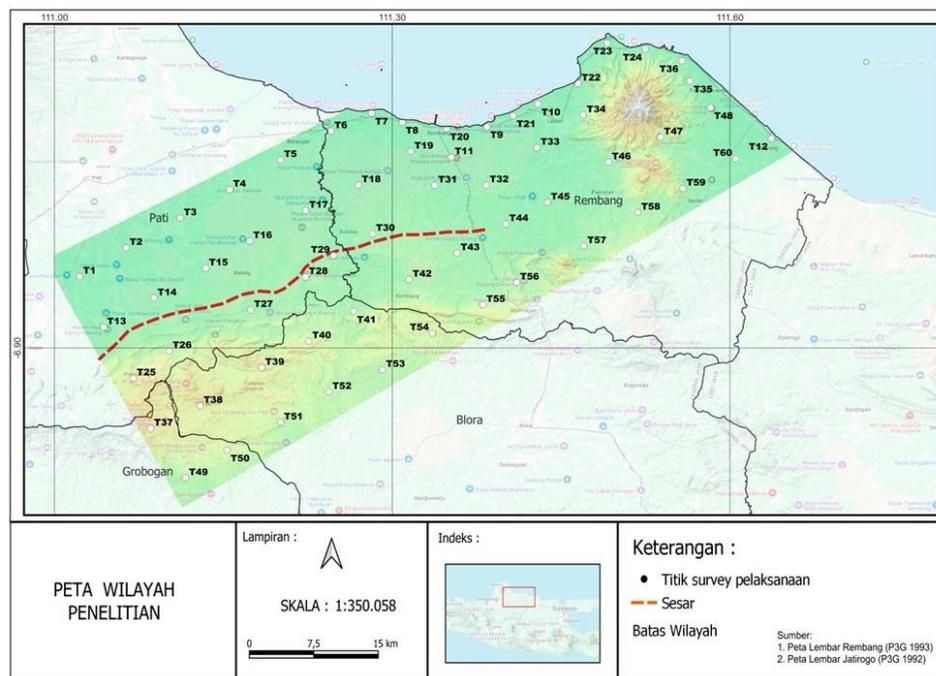
dugaan keberadaan struktur aktif seperti Sesar Lasem di wilayah penelitian.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini berlandaskan pada berbagai literatur yang relevan sebagai dasar teori. Proses penelitian dirancang secara sistematis dan bertahap, dimulai dari studi pustaka untuk memperoleh landasan konseptual. Selanjutnya, dilakukan survei lapangan guna menentukan lokasi penelitian yang sesuai. Data mikrotremor kemudian dikumpulkan untuk dianalisis, dengan fokus pada penentuan frekuensi dominan (f_0), amplifikasi tanah (A_0), serta indeks kerentanan seismik (K_g).

Lokasi Penelitian

Wilayah penelitian secara administratif mencakup sebagian Kabupaten Pati dan Kabupaten Rembang Provinsi Jawa Tengah yang dibatasi pada titik koordinat 6,60 LS - 7,10 LS dan 111,02 BT - 111,60 BT, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta area penelitian

Data Penelitian

Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan alat utama berupa seismometer tipe Lunitex Triton 1S yang memiliki sensitivitas tinggi dalam merekam gelombang mikrotremor pada tiga komponen (vertikal, utara-selatan, dan timur-barat).

Untuk penentuan posisi geografis tiap titik pengukuran digunakan GPS, sedangkan kompas analog digunakan untuk memastikan orientasi alat mengarah ke utara sejati. Data hasil pengukuran direkam dan disimpan menggunakan laptop yang juga

berfungsi sebagai media untuk real-time monitoring kualitas sinyal.

Data sekunder yang digunakan Peta geologi regional yang diterbitkan oleh Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, digunakan sebagai acuan dalam mengidentifikasi formasi batuan serta kondisi geologi di wilayah penelitian [19][20], Data peta topografi dan elevasi diperoleh dari DEMNAS yang diterbitkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) [21].

Instrumen

Data mikrotremor yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak Geopsy versi 2.10 yang tersedia secara bebas di laman www.geopsy.org. Tahapan pengolahan data diawali dengan *pre-processing* berupa seleksi dan pemotongan sinyal (*windowing*) dengan durasi stabil sekitar 25-30 detik. Setelah itu dilakukan proses *filtering* menggunakan *band-pass filter* pada rentang frekuensi 0,5-25 Hz untuk menghilangkan gangguan sinyal di luar jangkauan analisis. Langkah terakhir adalah *smoothing* dengan metode Konno & Ohmachi menggunakan *bandwidth* 40, sehingga diperoleh kurva HVSR yang lebih halus dan representatif.

Dari hasil kurva HVSR, dua parameter utama diperoleh yaitu frekuensi dominan (f_0) dan amplifikasi tanah (A_0). Selanjutnya dihitung nilai indeks kerentanan seismik (K_g) menggunakan rumus empiris dari $K_g = A_0^2 / f_0$ (Persamaan 1)

Langkah-langkah kerja dalam penelitian ini terbagi menjadi tiga tahap utama: pra-survei, akuisisi data, dan pengolahan data.

1. Pra-Survei dan Penentuan Titik

Penentuan 60 titik pengamatan (Gambar 2) dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi litologi, aksesibilitas lokasi, dan keterwakilan morfologi wilayah. Titik-titik dipilih agar mencakup berbagai kondisi geologi mulai dari dataran, perbukitan, hingga pesisir.

2. Pengambilan Data Mikrotremor

Setiap titik dilakukan perekaman selama 30-45 menit dengan seismometer LUNITEK Triton 1S. Orientasi instrumen diperiksa dengan kompas agar tepat mengarah ke utara. Rekaman dilakukan di waktu kondisi lingkungan tenang (pagi-siang hari) untuk meminimalisasi *noise antropogenik*.

3. Pengolahan Data HVSR

Data mentah diproses dengan perangkat lunak Geopsy. Dipilih segmen sinyal paling stabil (*windowing*) untuk dianalisis. Dilakukan filter dan smoothing kurva HVSR, lalu ditentukan nilai f_0 dan amplifikasi tanah (A_0). Nilai indeks kerentanan (K_g) dihitung, dan hasilnya dipetakan menggunakan QGIS untuk visualisasi spasial.

4. Analisis Data

Dari total 60 titik pengukuran, sebanyak 45 titik dinyatakan valid untuk dianalisis lebih lanjut, sedangkan 15 titik dieliminasi karena tidak memenuhi kriteria validasi *SESAME* [7] (puncak HVSR tidak jelas, ketidakstabilan kurva antar jendela waktu, atau adanya gangguan sinyal). Seleksi ini memastikan bahwa hanya data representatif terhadap kondisi lapisan tanah yang digunakan dalam analisis distribusi frekuensi dominan dan pemodelan karakteristik seismik lokal. Tahapan analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan menyusun dan memetakan hasil olahan parameter seismik, klasifikasi frekuensi dominan dibagi ke dalam empat kelas berdasarkan sebaran nilai frekuensi dominan (f_0) pada masing-masing satuan litologi. Klasifikasi ini mengacu pada rentang nilai frekuensi dominan yang dikembangkan oleh Kanai dan Tanaka (1961) [5], yang mempertimbangkan keterkaitan antara nilai frekuensi dominan (f_0) dan ketebalan lapisan tanah. Sementara itu, zonasi indeks kerentanan seismik (K_g) disusun berdasarkan variasi nilai K_g pada setiap satuan litologi, sehingga menggambarkan tingkat kerentanan wilayah terhadap pengaruh getaran tanah akibat aktivitas seismik

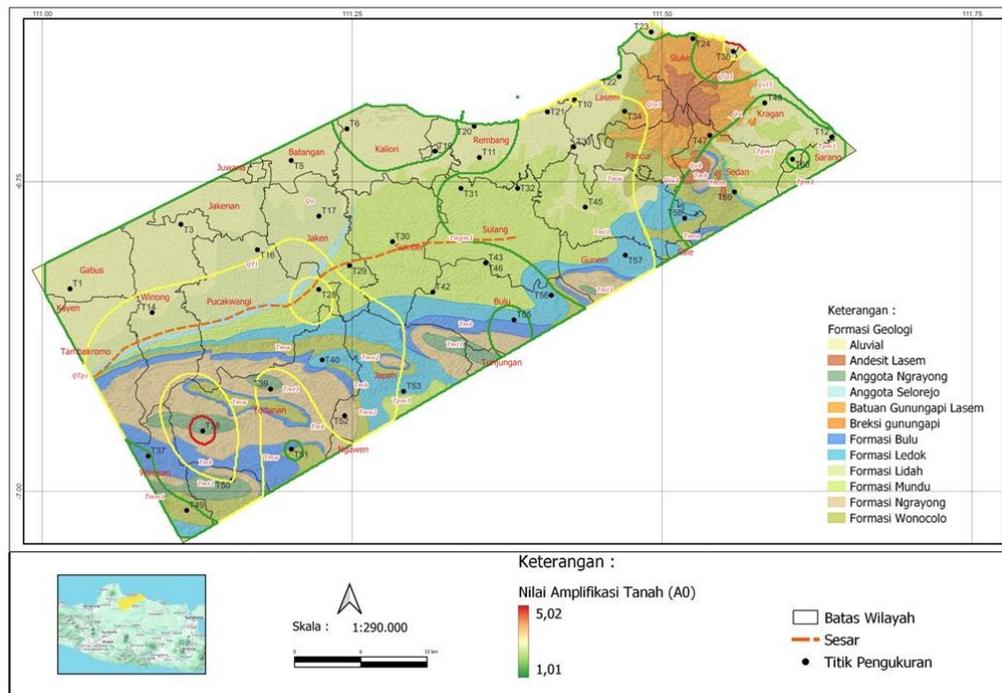
HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai Faktor Amplifikasi

Nilai amplifikasi tanah (A_0) tercatat berada dalam kisaran 1,01 hingga 5,05, dengan nilai tertinggi ditemukan pada titik T38, yang terletak di bagian barat daya. Titik-titik lain dengan amplifikasi tinggi, seperti T28, T36, dan T57, juga menunjukkan kecenderungan serupa dan berlokasi di daerah aluvial yang dekat dengan jalur Sesar Lasem. Kawasan ini didominasi oleh batuan muda yang tersusun atas endapan vulkanik dan sedimen lepas, yang umumnya memiliki karakteristik fisik berupa densitas rendah dan porositas tinggi. Kondisi geologi tersebut secara signifikan meningkatkan kemampuan material tanah

dalam memperkuat gelombang seismik, seperti pada Gambar. 3. Variasi amplifikasi tanah (A_0) yang diperoleh dari analisis mikrotremor menggunakan

metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) menunjukkan adanya perbedaan respon seismik yang mencolok di wilayah penelitian.

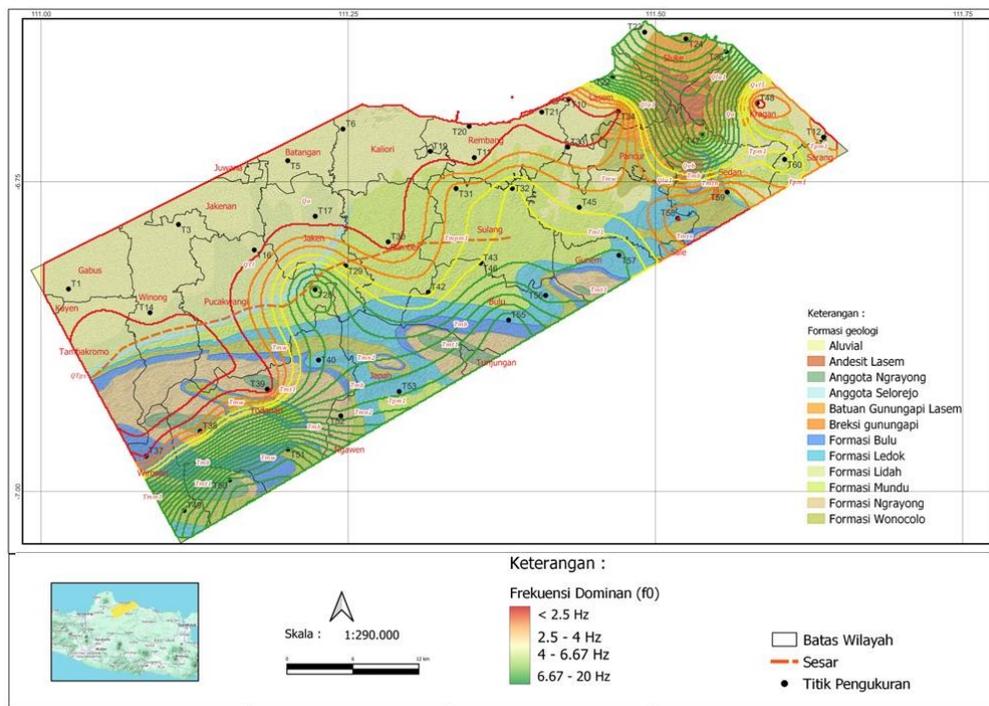


Gambar 3. Peta sebaran nilai faktor amplifikasi (A_0)

Hubungan antara nilai faktor amplifikasi (A_0) dan karakteristik geologi setempat menunjukkan bahwa jenis dan sifat litologi memainkan peran krusial dalam menentukan respons dinamis tanah terhadap gelombang seismik. Litologi yang tersusun dari material lepas dan kurang terkonsolidasi cenderung menghasilkan amplifikasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan batuan yang lebih kompak dan stabil. Selain itu, keberadaan struktur tektonik aktif seperti Sesar Lasem berkontribusi terhadap peningkatan kerentanan seismik melalui proses pelapukan intensif dan pembentukan zona lemah yang sarat dengan sedimen. Kondisi ini secara kumulatif memperbesar potensi penguatan getaran seismik di sekitar zona sesar. Hasil ini mendukung temuan sebelumnya [6], yang menekankan pentingnya pengaruh struktur geologi dan variasi litologi terhadap perilaku amplifikasi lokal.

Frekuensi Dominan

Analisis data mikrotremor dengan metode HVSr mengungkapkan variasi frekuensi dominan (f_0) yang cukup lebar di wilayah studi, dengan nilai berkisar antara 0,29 Hz hingga 20,76 Hz. Perbedaan ini mencerminkan heterogenitas kondisi bawah permukaan, terutama terkait ketebalan sedimen dan jenis batuan. Nilai frekuensi dominan rendah (<2,5 Hz) yang teridentifikasi pada titik-titik T17 (0,292 Hz), T39 (0,593 Hz), T1 (0,724 Hz), dan T20 (0,716 Hz) mengindikasikan adanya lapisan sedimen yang tebal atau keberadaan batuan dasar pada kedalaman signifikan seperti pada zona aluvial. Sebaliknya, nilai frekuensi dominan tinggi (>6,67 Hz) teramati pada beberapa titik, di antaranya T50 (20,761 Hz), T23 (19,144 Hz), T24 (19,796 Hz), dan T51 (19,911 Hz). Kondisi ini umumnya mencerminkan keberadaan lapisan tanah yang relatif tipis atau batuan dasar yang dangkal, sehingga menghasilkan respon seismik dengan frekuensi lebih tinggi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar. 4.



Gambar 4. Peta sebaran frekuensi dominan (f_0)

Perbandingan antara peta frekuensi dominan, kondisi geologi wilayah, dan klasifikasi tanah menurut Kanai-Tanaka (1961) (Tabel. 1) menunjukkan hubungan yang konsisten antara jenis litologi dan nilai frekuensi dominan (f_0). Dalam penelitian ini, klasifikasi tanah menurut Kanai dan Tanaka (1961) digunakan sebagai acuan untuk menafsirkan nilai frekuensi dominan (f_0) hasil analisis mikrotremor. Klasifikasi tersebut dipilih karena menyediakan kerangka yang sistematis dalam menghubungkan rentang nilai frekuensi dominan dengan kondisi geologi bawah permukaan, mulai dari batuan keras hingga tanah lunak. Pendekatan ini banyak digunakan dalam studi seismik mikrozonasi karena mampu menjelaskan potensi amplifikasi gelombang seismik yang dipengaruhi oleh karakteristik litologi. Berdasarkan klasifikasi Kanai dan Tanaka (1961) [5], wilayah penelitian terbagi menjadi empat kelas tanah. Bagian barat laut hingga tengah didominasi Kelas IV ($f_0 < 2,5$ Hz), terutama pada Formasi Aluvial dan sebagian Formasi Ledok yang terdiri atas pasir lepas, lanau, dan lempung kuarter tak terkonsolidasi. Kondisi ini mencerminkan sedimen tebal yang berpotensi memperbesar amplifikasi seismik. Sebaliknya, wilayah tenggara dan sebagian timur laut tergolong Kelas I ($f_0 > 6,67$ Hz), yang tersusun oleh batuan keras dari Formasi Wonocolo, Ngrayong, dan Breksi Gunungapi

Lasem, dengan batuan dasar relatif dangkal. Di zona transisi, titik-titik yang berada pada Kelas II (f_0 4-6,67 Hz), seperti pada Formasi Lidah dan Formasi Bulu, menunjukkan litologi lempung keras dan pasir berkerikil. Sementara itu, beberapa titik dengan nilai frekuensi dominan (f_0) antara 2,5-4 Hz (Kelas III) mencerminkan sedimen campuran atau aluvial yang lebih bervariasi. Secara keseluruhan, distribusi nilai frekuensi dominan menunjukkan keterkaitan erat dengan litologi penyusun, dari sedimen kuarter lepas hingga batuan keras yang lebih tua.

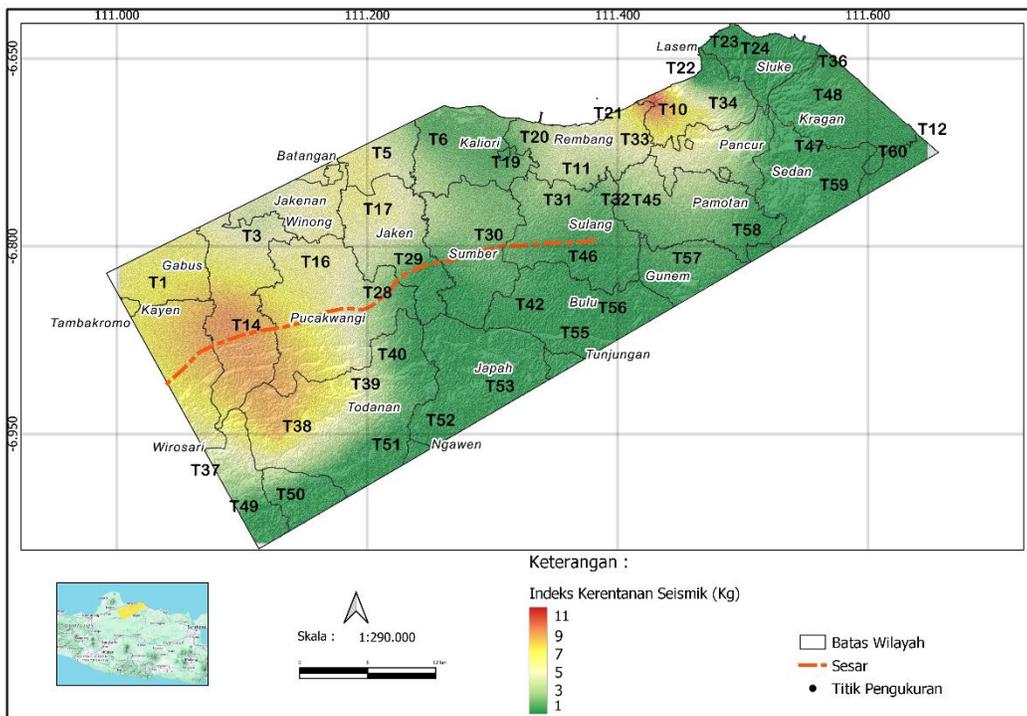
Nilai frekuensi dominan yang rendah umumnya terkonsentrasi pada area dengan sedimen lepas atau formasi aluvial, hasil dari proses pengendapan dan pelapukan, yang mencerminkan keberadaan tanah lunak. Sebaliknya, wilayah yang tersusun atas batuan keras seperti breksi vulkanik dan batugamping menunjukkan nilai frekuensi dominan (f_0) yang tinggi, mengindikasikan tanah yang lebih kaku dan dangkal terhadap batuan dasar. Temuan ini didukung oleh [22], yang menyatakan bahwa variasi frekuensi dominan (f_0) mencerminkan ketebalan sedimen dan kedalaman batuan dasar.

Nilai Indeks Kerentanan Seismik

Distribusi nilai K_g di wilayah penelitian memperlihatkan variasi antar kecamatan. Nilai tinggi

tercatat di beberapa titik, misalnya T10 dengan nilai 10,32 di Kecamatan Lasem, T14 dengan 9,03 di Kecamatan Sluke, serta T38 dengan 8,20 di Kecamatan Pamotan. Sebaliknya, nilai sangat rendah (<1,0) terlihat di Kecamatan Sale dan Pancur, seperti T22 (0,23), T23 (0,36), T24 (0,26), serta T55 (0,16). Terdapat titik dengan nilai rendah meskipun berada di wilayah aluvial, seperti T6 dan T19 di Kecamatan Lasem, yang menunjukkan kondisi bawah permukaan lebih padat sehingga menghasilkan nilai indeks kerentanan seismik (Kg) lebih kecil dibandingkan aluvium di lokasi lain. Tingkat kerentanan seismik (Kg) pada penelitian ini dikelompokkan ke dalam tiga kategori, yakni rendah (Kg < 3), sedang (Kg 3–7), dan tinggi (Kg > 7), yang disesuaikan dengan karakteristik geologi lokal. Hal yang penting untuk diperhatikan

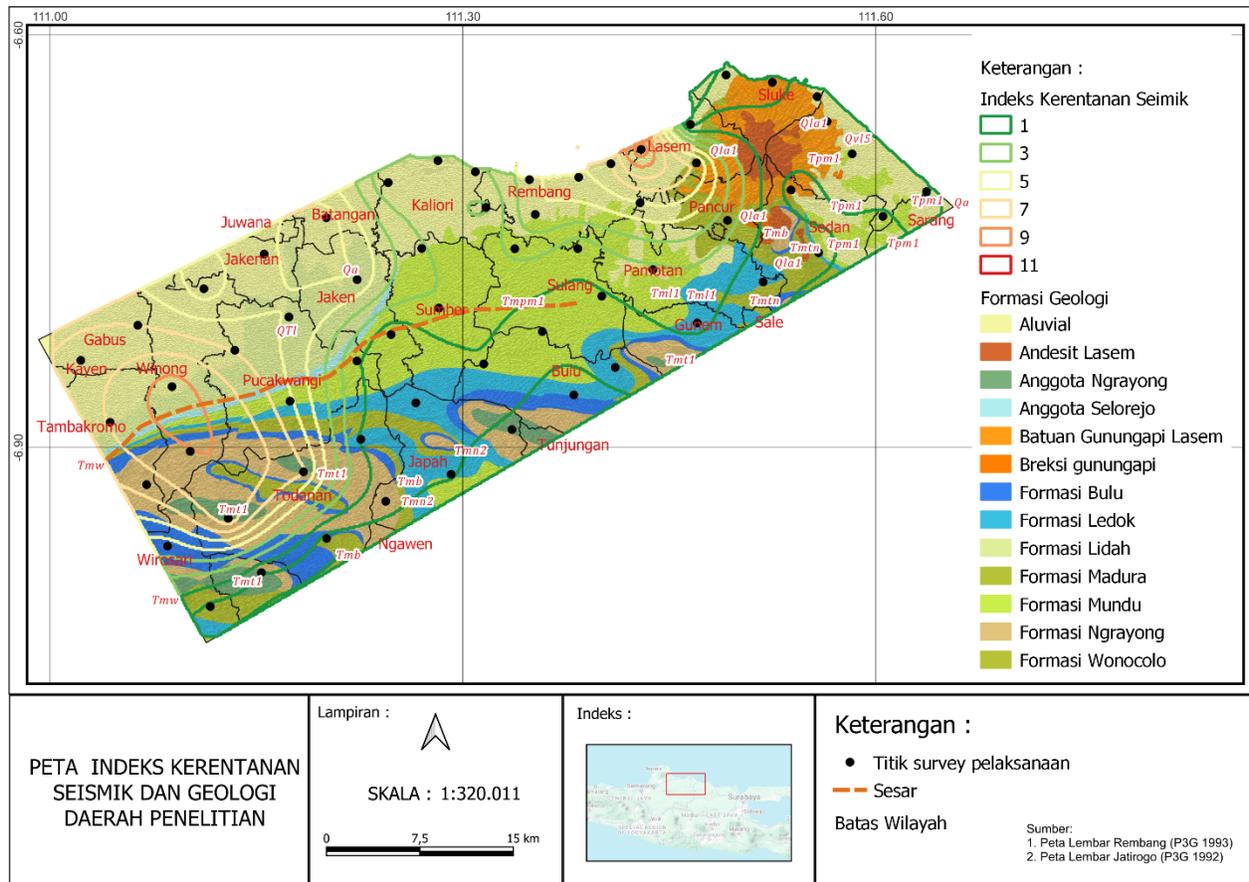
adalah bahwa tidak terdapat standar baku dalam klasifikasi nilai Kg, karena parameter ini sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi, ketebalan sedimen, serta distribusi nilai hasil pengukuran di masing-masing wilayah. Oleh karena itu, pengelompokan kategori Kg dalam studi ini bersifat relatif dan khusus digunakan untuk menggambarkan kondisi kerentanan seismik di daerah penelitian. Kategori kerentanan rendah ditetapkan untuk nilai Kg < 3 dan umumnya dijumpai pada wilayah dengan batuan keras atau tanah terkonsolidasi yang menunjukkan stabilitas relatif tinggi. Kategori sedang (Kg 3-7) mengindikasikan keberadaan lapisan tanah pelapukan atau sedimen menengah, sementara kategori tinggi (Kg > 7) dihubungkan dengan tanah lunak, sedimen lepas, serta kedekatan dengan struktur sesar aktif (Gambar 5).



Gambar 5. Peta sebaran nilai indeks kerentanan seismik

Nilai indeks kerentanan seismik (Kg) tinggi umumnya ditemukan pada endapan aluvial dan formasi sedimen lepas seperti Lidah, Mundu, dan Anggota Selorejo, yang terdiri atas pasir, lanau, dan lempung tak terkonsolidasi, serta pada zona yang berdekatan dengan jalur Sesar Lasem. Kondisi ini mencerminkan litologi lunak yang cenderung memperkuat gelombang gempa. Sebaliknya, nilai Kg rendah teridentifikasi pada satuan batuan keras seperti

Formasi Ngrayong, Wonocolo, Breksi Gunungapi, dan Batuan Gunungapi Lasem, yang memiliki densitas dan kekakuan tinggi. Beberapa titik aluvial juga menunjukkan nilai Kg rendah karena berada di atas Formasi Lidah atau Selorejo yang lebih padat, sehingga lapisan aluvialnya mengalami kompaksi alami. Hal ini menunjukkan adanya kesesuaian antara distribusi nilai indeks kerentanan seismik (Kg) dengan kondisi geologi setempat (Gambar 6).



Gambar 6. Peta Indeks Kerentanan Seismik dan Formasi Geologi Daerah Penelitian

Sebaran spasial indeks kerentanan seismik (K_g) menunjukkan korelasi erat dengan kondisi litologi permukaan dan bawah permukaan. Area dengan dominasi sedimen lepas dan lokasi di sekitar jalur sesar menunjukkan nilai indeks kerentanan seismik (K_g) tinggi, yang mencerminkan kerentanan tinggi terhadap amplifikasi seismik. Sebaliknya, wilayah dengan litologi tua dan padat cenderung memiliki nilai indeks kerentanan seismik (K_g) yang rendah. Pola ini menguatkan hasil studi Daryono dalam penelitiannya di zona graben Bantul [23], klasifikasi indeks kerentanan seismik (K_g) tidak mengikuti batas nilai tetap, melainkan bersifat relatif dan ditentukan berdasarkan karakteristik lokal tiap wilayah. Hal ini juga tercermin dari kemiripan pola antara distribusi nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dan kerusakan struktural akibat gempa Bantul 2006, yang menguatkan pendekatan kontekstual dalam penentuan zona kerentanan.

Oleh karena itu, pendekatan klasifikasi relatif berbasis geologi lokal terbukti efektif sebagai alat evaluasi dalam mikrozonasi seismik, serta menjadi

dasar penting dalam penyusunan strategi mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang yang responsif terhadap potensi bahaya gempa.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis data di 60 titik pengamatan, diketahui bahwa nilai frekuensi dominan (f_0) berkisar antara 0,59 Hz hingga 20,76 Hz, dan faktor amplifikasi (A_0) antara 1,01 hingga 5,05. Sebaran nilai-nilai ini sangat dipengaruhi oleh kondisi litologi dan morfologi lokal. Nilai f_0 rendah dan faktor amplifikasi (A_0) tinggi umumnya ditemukan di daerah dataran aluvial dan dekat pesisir yang tersusun atas sedimen lepas, sementara nilai f_0 tinggi dan faktor amplifikasi (A_0) rendah terdapat di wilayah perbukitan berbatu padat. Indeks kerentanan seismik (K_g) yang dihitung dari kedua parameter tersebut menunjukkan variasi antara 0,076 hingga 10,322, dengan zonasi kerentanan tinggi terkonsentrasi di Kecamatan Lasem, Kayen, dan Pucakwangi. Daerah-daerah ini tergolong rentan terhadap penguatan gelombang seismik dan

berpotensi mengalami kerusakan signifikan jika terjadi gempa bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PusGeN, Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017, 2017.
- [2] S. Geofisika, "Skenario peta guncangan (shakemap) gempa sesar lokal di Jawa Tengah," 2021.
- [3] R. D. Indriana, "Model of Lasem fault inversion," *Int. Res. J. Eng. IT Sci. Res.*, vol. 4, no. 3, pp. 1-11, 2018.
- [4] W. Partono, "Development of two components acceleration time histories for Semarang, Indonesia, due to Semarang fault earthquake scenarios using 30 meters soil deposit model," *MATEC Web Conf.*, vol. 159, pp. 1-5, 2018.
- [5] K. Kanai and T. Tanaka, "On Microtremors. VIII." 1961.
- [6] Y. Nakamura, "Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications," *Proc. 12th world Conf. ...*, p. Paper no. 2656, 2000.
- [7] SESAME, "Guidelines for The Implementations of H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation.," p. 200, 2004.
- [8] R. Fitrianingtyas, M. Firdaus Al Hakim, A. Wibowo, and dan Khafidh Nur Aziz, "Analisis seismisitas di yogyakarta berdasarkan hasil relokasi hiposenter menggunakan metode double-difference seismicity analysis in yogyakarta based on hypocenter relocation using double-difference method," *J. Sains Dasar*, vol. 12, no. 1, pp. 62-70, 2023.
- [9] J. P. G. N. Rochman, M. A. Sadewa, and A. M. Putra, "Earthquake microzonation using microtremor analysis and horizontal to vertical spectral ratio method study case at Ampelgading and Tirtoyudo sub-district, Malang, East Java," *Atlantis Press International BV*, 2023.
- [10] E. R. Iswanto, T. A. Riyanto, and H. Suntoko, "Mikrozonasi di daerah Plampang, Nusa Tenggara Barat microzonation in Plampang Area, West Nusa Tenggara," *Eksplorium*, vol. 42, no. 1, pp. 39-46, 2021.
- [11] R. Aris Munandar and R. Sulsaladin, "Karakteristik tektonik dan periode ulang gempabumi pada sesar Cimandiri Jawa Barat," *Bul. Meteorol. Klimatologi, dan Geofis.*, vol. 3, no. 3, pp. 42-51, 2022.
- [12] R. Fahrurrijal, A. Tohari, and I. Muttaqien, "Mikrozonasi seismik di wilayah ancaman sesar lembang antara seksi Cihideung dan Gunung Batu berdasarkan pengukuran mikrotremor," *Riset Geologi dan Pertambangan*, vol. 30, no. 1, pp. 81-92, 2020.
- [13] Y. Nakamura, "Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor," *World Congr. Railw. Res.*, pp. 1-7, 1997.
- [14] B. P. Sepriyanto, D. R. Hizbaron, and M. A. Setiawan, "Mikrozonasi rawan gempabumi sebagai bahan evaluasi RDTR Kecamatan Kasihan Tahun 2018 - 2038," *Maj. Geogr. Indones.*, vol. 36, no. 2, p. 135, 2022.
- [15] N. B. Wibowo and I. Huda, "Analisis amplifikasi, indeks kerentanan seismik dan klasifikasi tanah berdasarkan distribusi vs30 D.I.Yogyakarta analysis of amplification, seismic vulnerability index and soil classification based on vs30 in Yogyakarta," *Bul. Meteorol. Klimatologi, dan Geofis.*, vol. 1, no. 2, pp. 21-31, 2020.
- [16] BPS Kabupaten, "Kabupaten Rembang dalam Angka 2024," p. 493, 2024.
- [17] BPS and Kabupaten, "Kabupaten Pati dalam Angka," p. 41, 2024.
- [18] S. Firdaus and A. Setianto, "Interpretasi struktur geologi berdasarkan citra landsat 8, Srtm dan anomali medan gravitasi satelit di cekungan Jawa Timur Utara," *Pros. Semin. Nas. Geotik*, pp. 193-204, 2018.
- [19] Badan Geologi, Peta Geologi Lembar Rembang, Jawa Tengah, skala 1:100.000, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1993.
- [20] Badan Geologi, Peta Geologi Lembar Jatirogo, Jawa Timur, skala 1:100.000, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1992.
- [21] Badan Informasi Geospasial (BIG), Data DEMNAS (Digital Elevation Model Nasional), resolusi 8,25 m . Cibinong: BIG, 2018.
- [22] J. Saita, M. L. P. Bautista, and Y. Nakamura, "13 th world conference on earthquake engineering on relationship between the estimated strong motion characteristics of surface layer and the earthquake damage - case study at intramuros, Metro Manila," *Distribution*, no. 905, pp. 1-7, 2004.
- [23] Daryono, "Indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor pada setiap satuan bentuklahan di zona Graben Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta," [Tesis], 2011.