

Analisis Frekuensi Dominan dan Power Spectral Density untuk Penentuan Lokasi Shelter Gempa di Bendungan Rukoh, Pidie

Dominant Frequency and Power Spectral Density Analysis for Determining the Location of Earthquake Shelters in the Rukoh Dam, Pidie

**Abdi Jihad^{1,2*}, Tommy Ardiyansyah¹, Zaenal Abidin Al Atas¹,
Fajaruddin¹, Andi Azhar Rusdin¹, T Agus Putra PN³**

¹ BMKG, Stasiun Geofisika Aceh Besar, Jl. Raya Mata Ie, Aceh Besar

² Fakultas Ilmu-Ilmu Kesehatan (FIKES), Program Studi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3),
Universitas Abulyatama, Banda Aceh

³ PUPR, Unit Pelaksana Bendungan (UPB), Rukoh, Pidie

Korespondensi: abdi.jihad@bmkg.go.id

Diterima: 18 Juni 2025,

Disetujui: 5 Desember 2025

ABSTRAK

Aktivitas seismik di sekitar Bendungan Rukoh, Kabupaten Pidie, Provinsi Aceh, dipengaruhi oleh dua sistem patahan aktif, yaitu Patahan Aceh dan Patahan Seulimeum. Kondisi ini menuntut adanya kajian karakteristik respons tanah secara rinci guna mendukung perencanaan infrastruktur tahan gempa, khususnya dalam penentuan lokasi shelter gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian tiga lokasi potensial shelter gempa di sekitar Bendungan Rukoh dengan menggunakan data mikrotremor. Analisis data dilakukan dengan metode rasio spektral Horizontal terhadap Vertikal (H/V) untuk menentukan frekuensi dominan tanah (F_0) dan Power Spectral Density (PSD) untuk karakterisasi lokasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa Titik 1 memiliki nilai F_0 tertinggi (5,0 Hz) dan ketebalan sedimen paling dangkal (~15 m) yang mengindikasikan kondisi tanah yang kaku dan potensi amplifikasi seismik yang rendah. Sementara, titik 2 dan 3 menunjukkan nilai F_0 lebih rendah (masing-masing 2,0 Hz dan 1,6 Hz) dengan ketebalan sedimen >35 m, yang mengindikasikan risiko amplifikasi lebih tinggi. Dengan demikian, titik 1 direkomendasikan sebagai lokasi shelter permanen, sementara Titik 2 dan 3 memerlukan penguatan struktur atau pemanfaatan alternatif.

Kata kunci: Bendungan, frekuensi dominan, sedimen, seismometer.

ABSTRACT

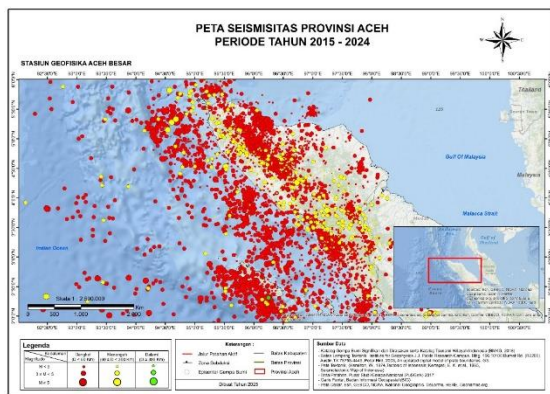
Seismic activity around the Rukoh Dam, Pidie Regency, Aceh Province, is affected by two active fault systems, the Aceh Fault and the Seulimeum Fault. This condition requires a detailed study of soil response characteristics to support earthquake-resistant infrastructure planning, especially in determining the location of earthquake shelters. This study aims to evaluate the suitability of three potential earthquake shelter locations around the Rukoh Dam using microtremor data. Meanwhile, data analysis was carried out using the Horizontal to Vertical (H/V) spectral ratio method to determine the dominant frequency of the soil (F_0) and Power Spectral Density (PSD) to assess the characterization of the location. The results of the analysis showed that Point 1 had the highest F_0 (5.0 Hz) and the shallowest sediment thickness (~15 m) which indicated stiff soil conditions and low seismic amplification potential. In contrast, points 2 and 3 showed lower F_0 (2.0 Hz and 1.6 Hz, respectively) with a sediment thickness of >35 m, indicating a higher risk of amplification. Point 1 is

recommended as a permanent shelter location, while points 2 and 3 require structural strengthening or alternative utilization.

Keywords: *DAM, Dominat Frequency, Sediment, Seismometer*

PENDAHULUAN

Provinsi Aceh, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1, dikenal sebagai salah satu zona seismik aktif sebagai batas pertemuan dua lempeng tektonik Eurasia dan Lempeng Indo-Australia [1]. Lokasi seismik aktif menyebabkan kawasan-kawasan strategis di Indonesia, seperti bendungan memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan ketahanan terhadap gempa bumi. Bagian penting dalam mitigasi bencana gempa bumi di kawasan bendungan adalah pemilihan lokasi *shelter* gempa bumi yang aman dari potensi amplifikasi gelombang seismik akibat kondisi lokal bawah permukaan. Pemasangan sensor gempa bumi di area bendungan membantu sistem monitoring kesehatan dan ketahanan bendungan.



Gambar 1. Seismisitas Provinsi Aceh tahun 2015 s.d. 2025

Fenomena amplifikasi gelombang gempa bumi sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal, terutama kontras impedansi antara lapisan lunak dan batuan dasar [2]. Salah satu pendekatan yang telah terbukti efektif dan efisien dalam mengidentifikasi kondisi bawah permukaan secara non-destruktif adalah analisis mikrotremor menggunakan metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) atau dikenal juga sebagai metode H/V [3]. Metode ini memungkinkan identifikasi frekuensi dominan tanah (F_0), yang berperan penting dalam mengungkap potensi resonansi lokal akibat gempa bumi. F_0 ini berkorelasi erat dengan ketebalan lapisan sedimen dan jenis material bawah permukaan [4], [5]

Selain itu, metode Power Spectral Density (PSD) juga digunakan untuk menganalisis distribusi energi spektral dari sinyal mikrotremor, yang dapat mengindikasikan kestabilan frekuensi dalam sinyal [6]. Analisis ini menjadi sangat penting dalam menghindari terjadinya *resonance coupling* antara struktur *shelter* dan tanah, yang dapat memperbesar dampak guncangan seismik [7].

Bendungan Rukoh yang terletak di Kabupaten

Pidie, Provinsi Aceh, salah satu infrastruktur penting yang memiliki riwayat kegempaan aktif diakibatkan keberadaan patahan aktif Segmen Seulimeum dan Segmen Aceh [8]. Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi frekuensi dominan (F_0), (2) dan menganalisis karakteristik spektral mikrotremor melalui analisis Power Spectral Density (PSD), serta merekomendasikan lokasi *shelter* gempa berdasarkan potensi amplifikasi gelombang seismik lokal terhadap ketebalan lapisan sedimen.

Dengan menggabungkan dua pendekatan analisis spektral ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam kajian mikrozonasi seismik dan mendukung pengambilan keputusan yang berbasis bukti dalam penempatan infrastruktur tanggap darurat di kawasan bendungan.

METODE

Penelitian ini dilakukan di kawasan Bendungan Rukoh, Kabupaten Pidie, Provinsi Aceh, Indonesia (Gambar 2). Ketiga lokasi pengukuran dipilih berdasarkan observasi lapangan dan diskusi teknis dengan pihak bendungan. Kriteria pemilihan didasarkan pada, antara lain;

- **Kondisi geologi permukaan:** Lokasi menunjukkan indikasi atau didominasi batuan dasar atau tanah kaku [2],[5].
- **Minim gangguan antropogenik:** Jauh dari sumber kebisingan seperti kendaraan, kantor, atau aktivitas konstruksi [6].
- **Kemudahan akses dan pemeliharaan:** Lokasi yang memungkinkan untuk dilakukan pengecekan sensor secara berkala.



Gambar 2. Lokasi pengukuran. Bendungan Rukoh, Sigli, Aceh

Pengambilan data dilakukan di masing-masing titik selama durasi 2 jam menggunakan peralatan

seismometer broadband Quantera8 tipe Kinematics MBB2. Data mikrotremor direkam dan diolah menggunakan perangkat lunak Geopsy [9], yang mendukung analisis spektral berbasis ambient vibration.

Analisis Power Spectral Density (PSD)

Analisis PSD digunakan untuk mengevaluasi tingkat kebisingan seismik di setiap lokasi. Kurva PSD yang tenang dan konsisten menjadi indikator lingkungan yang ideal untuk sensor seismik [6]. Kurva puncak PSD juga digunakan untuk mengidentifikasi kestabilan frekuensi dan potensi gangguan sinyal.

Analisis Rasio Spektral Horizontal terhadap Vertikal (HVSr)

Metode HVSr digunakan untuk menentukan frekuensi dominan (F_0), yang menunjukkan frekuensi resonansi lokal akibat perbedaan impedansi antara lapisan sedimen dan batuan dasar [3]. Selanjutnya, penentuan dan evaluasi lokasi dilakukan berdasarkan kriteria berikut:

- Lokasi dengan nilai $F_0 < 1$ Hz berpotensi berada di atas sedimen lunak dan dalam, yang dapat memperkuat gelombang gempa (*site amplification*) dan berisiko tinggi [4],[5].
- Lokasi dengan $F_0 > 1.5$ Hz umumnya menunjukkan kedalaman batuan dasar yang dangkal dan lebih stabil.

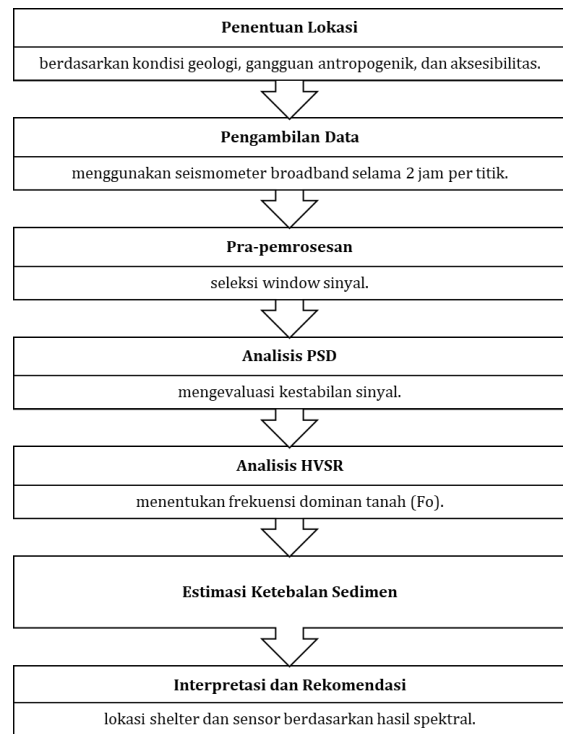
Estimasi Ketebalan Sedimen dan Implikasinya

Nilai frekuensi dominan (F_0) dari kurva H/V digunakan untuk memperkirakan ketebalan lapisan sedimen di bawah masing-masing titik pengukuran dengan menggunakan rumus empirik:

$$H = \frac{V_s}{4f_0} \quad (1)$$

Dengan asumsi kecepatan gelombang geser (V_s) rata-rata sebesar **425 m/s** (nilai umum untuk tanah sedang-lunak di zona aluvial) [12].

Alur pengolahan dan analisis data diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Alur pengolahan dan analisis data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

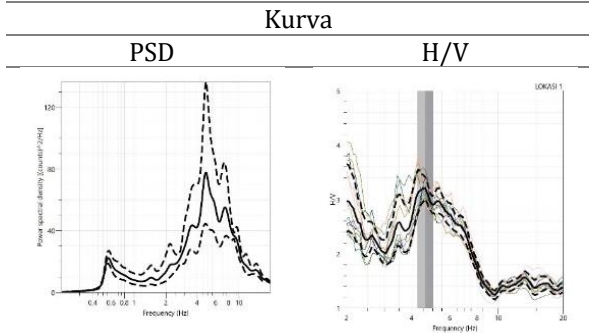
Hasil analisis berupa Grafik *Power Spectral Density* (PSD) dan H/V yang menunjukkan hubungan antara frekuensi (sumbu X, Hz) dan intensitas energi spektral (sumbu Y). Grafik PSD dan H/V yang digunakan untuk menilai kestabilan sinyal mikrotremor di lokasi pengukuran. Puncak kurva pada grafik menandakan frekuensi dominan tanah (F_0) atau frekuensi resonansi lokal yang berkorelasi dengan kedalaman sedimen dan potensi amplifikasi seismik. Garis solid merepresentasikan kurva utama PSD dan H/V, sementara garis putus-putus menunjukkan batas kepercayaan dari estimasi spektral.

Titik 1

Titik 1 (Gambar 4) memiliki frekuensi dominan H/V 5,0 Hz dan puncak PSD pada 4,7 Hz, mengindikasikan kesesuaian yang sangat baik untuk pemasangan shelter. Puncak H/V yang tajam dan konsisten dengan amplitudo <4 menunjukkan keberadaan tanah kaku atau batuan dengan kedalaman dangkal. Lokasi ini termasuk dalam klasifikasi Site Class B atau C dengan tingkat amplifikasi rendah dan kestabilan tinggi terhadap guncangan seismik [10].

Tabel 1. Hasil Analisis H/V dan PSD

Lokasi	Frekuensi Dominan (H/V)	Frekuensi Dominan (PSD)	Interpretasi Karakteristik Tanah
Titik 1	5,0 Hz	4,7 Hz	Tanah sangat kaku / mendekati batuan dasar



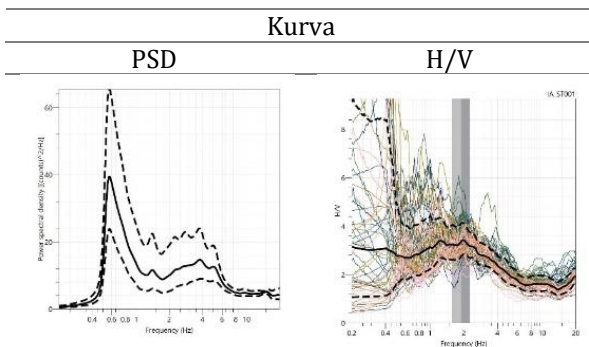
Gambar 4. Data pengukuran dan analisis di titik 1.

Titik 2

Pengukuran di titik 2 (Gambar 5) memiliki frekuensi dominan H/V 2,0 Hz dan puncak PSD yang lebih rendah di 0,6 Hz. Ini menunjukkan kemungkinan keberadaan lapisan sedimen tebal di atas batuan dasar yang lebih dalam. Karakteristik ini cenderung memperbesar gelombang seismik pada frekuensi rendah, yang dapat berdampak pada struktur fleksibel atau tinggi. Respon ini sejalan dengan hasil penelitian Lachet & Bard (1994), di mana kontras impedansi menyebabkan amplifikasi selektif pada frekuensi tertentu [4].

Tabel 2. Hasil Analisis H/V dan PSD

Lokasi	Frekuensi Dominan (H/V)	Frekuensi Dominan (PSD)	Interpretasi Karakteristik Tanah
Titik 2	2,0 Hz	0,6 Hz	Sedimen sedang, lapisan transisi



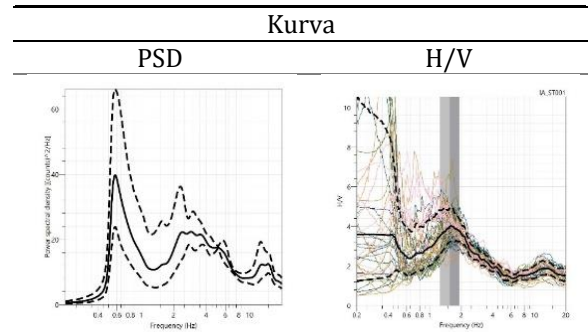
Gambar 5. Data pengukuran dan analisis di titik 2.

Titik 3

Titik 3 memiliki nilai H/V 1,6 Hz dan puncak PSD di 0,5 Hz, yang menandakan kondisi tanah yang lebih lunak dan lapisan sedimen yang cukup dalam (Gambar 6). Lokasi ini berpotensi mengalami amplifikasi gelombang gempa yang signifikan dan lebih sesuai untuk struktur sementara atau lokasi dengan modifikasi desain fondasi. Dalam konteks keamanan, titik ini memerlukan penanganan khusus jika tetap digunakan untuk shelter.

Tabel 3. Hasil Analisis H/V dan PSD

Lokasi	Frekuensi Dominan (H/V)	Frekuensi Dominan (PSD)	Interpretasi Karakteristik Tanah
Titik 3	1,6 Hz	0,5 Hz	Sedimen tebal / lunak



Gambar 6. Data pengukuran dan analisis di titik 2.

Analisis Resonansi dan Potensi Amplifikasi

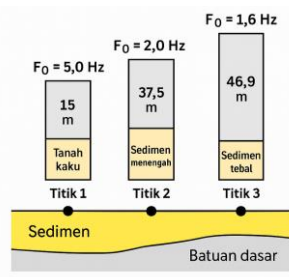
Titik 1 ($f_0 = 5$ Hz) berada di luar kisaran frekuensi alami untuk sebagian besar bangunan sederhana (shelter satu lantai $\approx 5-10$ Hz), sehingga aman dari resonansi. Sementara, di titik 2 dan 3 memiliki f_0 rendah ($f_0 \leq 2$ Hz), berpotensi tumpang tindih dengan struktur fleksibel seperti shelter dengan atap ringan atau dinding tinggi, sehingga berisiko resonansi.

Resonansi tanah-struktur dapat meningkatkan percepatan puncak tanah (PGA) hingga 2-3 kali lipat [7], sehingga pemilihan lokasi shelter sebaiknya menghindari lokasi dengan f_0 di bawah 2 Hz jika tidak dilakukan rekayasa struktural tambahan.

Pada penelitian sebelumnya, hasil penelitian mikrozonasi di wilayah Aceh oleh Irsyam et al. (2020), yang menunjukkan bahwa variasi kondisi sedimen dan topografi lokal dapat sangat memengaruhi respons seismik [12]. Zulfakrizza et al. (2017) juga mencatat bahwa respon spektral tanah di Aceh sangat heterogen, dengan f_0 yang dapat berubah signifikan dalam jarak ratusan meter [13].

Pada perhitungan estimasi ketebalan sedimen (Gambar 7), Titik 3 memiliki ketebalan sedimen paling dalam, dan dapat dikategorikan sebagai zona tanah lunak berlapis tebal, yang dikenal sebagai area dengan potensi amplifikasi tinggi terhadap gelombang seismik, terutama pada gempa berkekuatan besar [4], [12]

Di sisi lain, Titik 1 memiliki ketebalan sedimen yang tipis, bahkan mungkin berada langsung di atas batuan dasar, sehingga menjadi lokasi paling aman terhadap penguatan gelombang. Tanah yang tipis dan kaku menghasilkan frekuensi dominan tinggi, yang biasanya tidak beresonansi dengan struktur bangunan pendek (/rendah) (seperti shelter satu lantai).



Gambar 7. Estimasi ketebalan sedimen berdasarkan nilai frekuensi dominan H/V di setiap titik lokasi pengukuran.

Dampak terhadap Desain Shelter dan Strategi Mitigasi

Hasil ini memiliki implikasi langsung terhadap desain dan penempatan shelter gempa di kawasan Bendungan Rukoh, antara lain;

- Titik 1 tidak hanya memiliki nilai H/V dan PSD terbaik, tetapi juga sedimen yang tipis. Struktur shelter dapat dibangun tanpa rekayasa fondasi khusus, dan lokasi ini juga cocok untuk penempatan sensor seismik permanen.
- Titik 2 masih memungkinkan digunakan untuk shelter, namun sebaiknya menggunakan fondasi dangkal yang diperkuat atau sistem isolasi sederhana untuk menghindari efek resonansi lokal.
- Titik 3 kurang disarankan untuk struktur permanen, terutama yang memiliki massa besar atau tinggi. Jika tetap digunakan, diperlukan desain teknik khusus seperti pondasi dalam, pengaku struktur, atau rekayasa fondasi ringan.

Temuan ini sejalan dengan pedoman NEHRP yang

menyebutkan bahwa penempatan sensor seismik di lokasi dengan tanah kaku akan menghasilkan data yang lebih representatif dan minim distorsi [10]. Selain itu, proses pengolahan data yang merujuk pada SESAME atau panduan teknis pengambilan dan analisis data mikrotremor, menjadi pendukung bahwa hasil yang diperoleh dapat digunakan untuk perencanaan shelter berbasis bukti [5].

KESIMPULAN

Secara tektonik, Bendungan Rukoh di Kabupaten Pidie dipengaruhi oleh dua patahan aktif, yaitu Patahan Aceh dan Patahan Seulimeum, yang berjarak kurang dari 15 km dari lokasi bendungan. Kondisi ini menempatkan Bendungan Rukoh dalam risiko tinggi terhadap gempa bumi, sehingga penempatan shelter gempa yang aman menjadi kebutuhan penting dalam strategi mitigasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan tiga titik lokasi shelter di sekitar Bendungan Rukoh berdasarkan karakteristik frekuensi dominan (f_0), karakteristik spektrum (PSD), dan estimasi ketebalan sedimen melalui analisis mikrotremor menggunakan metode H/V dan PSD.

Titik 1 menunjukkan kondisi tanah yang paling stabil dengan nilai frekuensi dominan tinggi ($f_0 = 5,0$ Hz), ketebalan sedimen relatif tipis (15 m), dan spektrum noise yang tenang. Hal ini menandakan bahwa titik ini berada di atas tanah kaku atau batuan dasar, sehingga sangat layak untuk penempatan shelter gempa maupun instalasi sensor seismik.

Sementara, di Titik 2 dan Titik 3 menunjukkan frekuensi dominan lebih rendah ($f_0 = 2,0$ Hz dan $1,6$ Hz) serta estimasi ketebalan sedimen masing-masing 37,5 m dan 46,9 m. Hal ini merefleksikan adanya lapisan sedimen yang lebih lunak dan dalam, yang berpotensi mengalami amplifikasi gelombang gempa.

Lokasi-lokasi dengan nilai $f_0 < 2$ Hz memiliki risiko resonansi terhadap struktur bangunan tertentu, terutama shelter fleksibel atau struktur bertingkat ringan. Oleh karena itu, Titik 1 direkomendasikan sebagai lokasi utama penempatan shelter gempa di kawasan Bendungan Rukoh. Sementara, Titik 2 dan 3 harus dievaluasi dengan cermat sebelum digunakan sebagai lokasi permanen shelter.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diucapkan kepada Kepala BMKG Stasiun Geofisika Aceh Besar dan Dinas PUPR Bendungan Rukoh untuk diskusi dan ruang penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Hall, "Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations," 2002. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/jseaes*
- [2] P.-Y. Bard, "Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?," in *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, 1998, pp. 1251–1275. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/235623097>
- [3] Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface," *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, vol. 1, no. 30, pp. 25–33, 1989.
- [4] C. Lachetl and P.-Y. Bard, "Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique," 1994.
- [5] European Research Project, "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: Measurements, processing and interpretation," 2004.
- [6] D. E. Mcnamara and R. P. Buland, "Ambient Noise Levels in the Continental United States," 2004.
- [7] R. , Dobry, I. M. , Idriss, and M. S. Power, "New site coefficients and site Classification system used in recent building seismic code provisions," *Earthquake Spectra*, vol. 1, no. 16, pp. 41–67, 2000.
- [8] PuSGeN, *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*, 1st ed., vol. 1. Indonesia: Puslitbang Kementrian PUPR, Indonesia, 2017.
- [9] M. Wathelet *et al.*, "Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing," *Seismological Research Letters*, vol. 91, no. 3, pp. 1878–1889, May 2020, doi: 10.1785/0220190360.
- [10] W. W. Stewart *et al.*, *NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES (FEMA 450)*, 2003 Edition. Washington, D.C: The National Institute of Building Sciences, 2003. [Online]. Available: www.bssconline.org
- [11] M. Irsyam *et al.*, "Development of the 2017 national seismic hazard maps of Indonesia," *Earthquake Spectra*, vol. 36, no. 1_suppl, pp. 112–136, Oct. 2020, doi: 10.1177/8755293020951206.
- [12] A. S. Putra *et al.*, "Seismicity Pattern of the Great Sumatran Fault System from Hypocenter Relocation of Regional Seismic Network," *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 10, no. 1, pp. 83–96, Apr. 2023, doi: 10.17014/ijog.10.1.83-96.