

# Karakterisasi Respons Seismik Lokal dan Estimasi *Peak Ground Acceleration* Berbasis Mikrotremor di Desa Tolnaku, Kabupaten Kupang

Erens Nomleni\* dan Merlintry B. Y. Tlonaen

Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Alberth Foenay, Indonesia; e-mail: [nomlenierens@gmail.com](mailto:nomlenierens@gmail.com)

## ABSTRAK

Desa Tolnaku, Kecamatan Fatuleu, Kabupaten Kupang, merupakan wilayah berbukit yang memerlukan informasi mengenai variasi respons seismik lokal sebagai bagian dari upaya pengurangan risiko bencana. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi respons seismik lokal berdasarkan frekuensi dominan tanah dan mengestimasi Peak Ground Acceleration (PGA) berbasis data mikrotremor. Pengukuran mikrotremor dilakukan pada 45 titik dengan jarak antartitik sekitar 250 m. Data getaran tanah tiga komponen diproses menggunakan metode *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (HVSr) pada perangkat lunak Geopsy untuk memperoleh frekuensi dominan ( $f_0$ ). Estimasi PGA dilakukan menggunakan pendekatan empiris Kanai dengan memanfaatkan periode dominan tanah serta parameter magnitudo, lokasi episenter, dan kedalaman gempa dari katalog gempa historis periode 1900–2014. Nilai  $f_0$  berkisar antara 0,125–17,407 Hz, sedangkan estimasi PGA berkisar antara 48,82–569,01 gal. Nilai PGA tertinggi diperoleh pada Titik 26 dengan  $f_0$  sebesar 17,407 Hz dan PGA 569,01 gal, sedangkan nilai terendah diperoleh pada Titik 8 dengan  $f_0$  sebesar 0,125 Hz dan PGA 48,82 gal. Variasi spasial frekuensi dominan dan PGA menunjukkan adanya heterogenitas respons situs di wilayah penelitian. Peta yang dihasilkan merupakan mikrozonasi seismik awal yang dapat digunakan sebagai informasi pendukung dalam kajian bahaya guncangan tanah dan perencanaan investigasi geologi maupun geoteknik lanjutan.

**Kata kunci:** frekuensi dominan, HVSr, mikrotremor, percepatan tanah maksimum, respons seismik lokal

## ABSTRACT

Tolnaku Village, Fatuleu Subdistrict, Kupang Regency, is a hilly area that requires information on variations in local seismic response as part of disaster-risk reduction efforts. This study aimed to characterize local seismic response based on predominant soil frequency and to estimate microtremor-based Peak Ground Acceleration (PGA). Microtremor measurements were conducted at 45 sites with an approximate spacing of 250 m. Three-component ground-vibration data were processed using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) method in Geopsy software to obtain the predominant frequency ( $f_0$ ). PGA was estimated using the Kanai empirical approach by incorporating the predominant soil period and earthquake magnitude, epicentral location, and focal-depth parameters from a historical earthquake catalog for 1900–2014. The  $f_0$  values ranged from 0.125 to 17.407 Hz, while estimated PGA values ranged from 48.82 to 569.01 gal. The highest PGA was obtained at Site 26, with an  $f_0$  of 17.407 Hz and a PGA of 569.01 gal, whereas the lowest value was obtained at Site 8, with an  $f_0$  of 0.125 Hz and a PGA of 48.82 gal. The spatial variation in predominant frequency and PGA indicates heterogeneous site-response conditions across the study area. The resulting maps represent preliminary seismic microzonation products that can support ground-shaking hazard assessment and the planning of further geological and geotechnical investigations.

**Keywords:** predominant frequency, HVSr, microtremor, peak ground acceleration, local seismic response

**Citation:** Nomleni, E. dan Tlonaen, M. B. Y. (2026). Karakterisasi Respons Seismik Lokal dan Estimasi *Peak Ground Acceleration* Berbasis Mikrotremor di Desa Tolnaku, Kabupaten Kupang. Jurnal Ilmu Lingkungan. Pertama, 24(4), 1003-1009, doi:10.14710/jil.24.4.1003-1009

## 1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu wilayah dengan tingkat seismisitas tinggi di dunia, karena terletak pada zona pertemuan tiga lempeng tektonik aktif, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik. Interaksi antar-lempeng ini

membentuk zona subduksi dan sesar aktif yang memicu berbagai fenomena geologi seperti gempa bumi, letusan gunung api, serta potensi bencana turunan seperti longsor dan likuefaksi (Hamilton, 1979; Katili, 1975). Pulau Timor, sebagai bagian dari Nusa Tenggara Timur, termasuk dalam kawasan aktif

secara tektonik yang didominasi oleh aktivitas subduksi dan intraplate fault, sehingga memiliki tingkat kerawanan bencana geologi yang signifikan (Sianturi, 2010).

Indonesia merupakan salah satu negara dengan aktivitas kegempaan tinggi karena berada pada zona interaksi Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Interaksi antarlempeng tersebut membentuk zona subduksi dan struktur sesar aktif yang berperan terhadap kejadian gempa bumi di berbagai wilayah Indonesia. Pulau Timor, sebagai bagian dari Nusa Tenggara Timur, memiliki tatanan tektonik yang kompleks dengan aktivitas kegempaan yang berkaitan dengan proses subduksi dan struktur tektonik regional (Sianturi, 2010). Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya penyediaan informasi bahaya guncangan tanah pada skala lokal sebagai bagian dari upaya pengurangan risiko bencana.

Dampak guncangan gempa pada suatu lokasi tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik sumber gempa, seperti magnitudo, kedalaman, dan jarak hiposenter, tetapi juga oleh kondisi geologi serta geoteknik setempat. Variasi ketebalan sedimen, kedalaman batuan dasar, dan kontras impedansi bawah permukaan dapat menyebabkan respons getaran yang berbeda pada lokasi-lokasi yang relatif berdekatan. Oleh karena itu, karakterisasi respons seismik lokal diperlukan untuk memberikan gambaran awal mengenai variasi kondisi situs dan potensi respons tanah terhadap guncangan gempa.

Salah satu metode non-destruktif yang banyak digunakan untuk mengkarakterisasi respons situs adalah pengukuran mikrotremor dengan pendekatan Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr). Metode ini memanfaatkan rekaman getaran ambien tiga komponen untuk menghasilkan kurva rasio spektral horizontal terhadap vertikal. Puncak kurva H/V umumnya digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi dominan atau frekuensi resonansi lokal ( $f_0$ ), sedangkan amplitudo puncak dapat digunakan sebagai indikator awal respons situs (Nakamura, 1989). Studi terbaru menegaskan bahwa identifikasi puncak HVSr perlu mempertimbangkan stabilitas, kejelasan puncak, dan kualitas kurva agar frekuensi resonansi yang diperoleh dapat diinterpretasikan secara andal (Wang et al., 2023).

Penerapan HVSr untuk mikrozonasi seismik telah berkembang pada berbagai kondisi geologi, termasuk di Indonesia. Siburian et al. (2024) menggunakan pengukuran derau ambien untuk mengidentifikasi variasi frekuensi dominan, amplifikasi, indeks kerentanan seismik, dan respons situs di Suban, Curup Rejang Lebong, Bengkulu. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemetaan parameter HVSr dapat memberikan informasi spasial awal mengenai heterogenitas kondisi bawah permukaan dan respons guncangan lokal.

Frekuensi dominan merupakan parameter penting dalam interpretasi respons situs. Secara umum, frekuensi rendah dapat berkaitan dengan sedimen yang relatif lebih tebal atau kontras impedansi pada

kedalaman yang lebih besar, sedangkan frekuensi yang lebih tinggi dapat berhubungan dengan lapisan sedimen yang lebih tipis atau batuan dasar yang lebih dangkal. Namun, hubungan tersebut bersifat interpretatif dan perlu dikonfirmasi dengan data geologi, geoteknik, kecepatan gelombang geser, atau survei geofisika tambahan. Pengolahan HVSr juga memerlukan pemilihan window rekaman dan identifikasi puncak yang hati-hati karena kurva HVSr dapat memiliki puncak tunggal, puncak ganda, atau puncak yang tidak jelas (Vantassel et al., 2023; Wang et al., 2023).

Selain parameter HVSr, Peak Ground Acceleration (PGA) merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menggambarkan besarnya percepatan guncangan tanah pada suatu lokasi. Nilai PGA dapat diperoleh dari rekaman akselerograf atau melalui estimasi empiris apabila ketersediaan rekaman instrumental terbatas. Dalam penelitian ini, PGA diestimasi menggunakan pendekatan Kanai dengan mempertimbangkan periode dominan tanah, magnitudo gempa, jarak hiposenter, dan kedalaman sumber gempa. Oleh sebab itu, PGA yang diperoleh dalam penelitian ini merupakan nilai estimasi empiris dan bukan rekaman percepatan tanah langsung.

Desa Tolnaku, Kecamatan Fatuleu, Kabupaten Kupang, merupakan wilayah berbukit yang memerlukan informasi awal mengenai respons seismik lokal. Pengukuran mikrotremor pada wilayah ini relevan untuk mendukung identifikasi variasi frekuensi dominan tanah serta distribusi estimasi PGA pada skala lokal. Penelitian ini menggunakan 45 titik pengukuran dengan jarak antartitik sekitar 250 m, data mikrotremor tiga komponen, dan katalog gempa historis periode 1900–2014. Hasil awal menunjukkan frekuensi dominan tanah berada pada rentang 0,125–17,407 Hz, sedangkan estimasi PGA berada pada rentang 48,82–569,01 gal.

Wilayah Tolnaku juga memiliki konteks pergerakan tanah, sehingga informasi respons seismik lokal dapat digunakan sebagai salah satu masukan dalam penelitian kebencanaan lanjutan. Namun, nilai PGA tidak dapat diperlakukan sebagai indikator tunggal bahaya longsor. Kajian longsor terpicu gempa umumnya melibatkan kombinasi faktor pemicu dan faktor pengontrol, termasuk intensitas guncangan, kemiringan lereng, elevasi, litologi, struktur geologi, kondisi tanah, curah hujan, tutupan lahan, jarak terhadap sungai, dan jarak terhadap sesar (Lu et al., 2024; Liu et al., 2024). Dengan demikian, peta PGA dalam penelitian ini tidak dimaksudkan sebagai peta bahaya longsor final, tetapi sebagai informasi awal bahaya guncangan tanah yang dapat diintegrasikan dengan data geologi dan geoteknik pada penelitian berikutnya.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi respons seismik lokal di Desa Tolnaku berdasarkan frekuensi dominan tanah hasil analisis HVSr dan mengestimasi PGA menggunakan pendekatan empiris Kanai. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: (1)

mengidentifikasi distribusi frekuensi dominan tanah ( $f_0$ ) menggunakan metode HVSR berbasis mikrotremor; (2) mengestimasi nilai PGA menggunakan pendekatan empiris Kanai berdasarkan parameter gempa historis dan periode dominan tanah; serta (3) menganalisis variasi spasial frekuensi dominan dan estimasi PGA sebagai informasi awal respons seismik lokal di Desa Tolnaku, Kabupaten Kupang.

## 2. METODE PENELITIAN

Lokasi dan rancangan penelitian Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui survei geofisika pasif berbasis mikrotremor untuk mengkarakterisasi respons seismik lokal dan mengestimasi PGA di Desa Tolnaku, Kecamatan Fatuleu, Kabupaten Kupang. Pengambilan data lapangan dilakukan pada Mei–Juli 2014. Wilayah penelitian berada pada kisaran koordinat 10,01003°–10,02803° LS dan 123,8656°–123,8746° BT.

Pengukuran dilakukan pada 45 titik dengan jarak antartitik sekitar 250 m. Sebaran titik ditetapkan untuk mewakili kondisi spasial wilayah penelitian dengan mempertimbangkan topografi, aksesibilitas, serta informasi kondisi geologi permukaan. Posisi titik pengukuran direkam menggunakan Global Positioning System (GPS). Data primer penelitian berupa rekaman mikrotremor tiga komponen dan data sekunder berupa katalog gempa historis periode 1900–2014 pada wilayah 9°–12° LS dan 122°–127° BT.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

### Akuisisi data mikrotremor

Data mikrotremor direkam menggunakan seismograf portabel tiga komponen yang mencatat getaran tanah pada komponen horizontal utara–selatan, horizontal timur–barat, dan vertikal. Durasi perekaman pada setiap titik sekitar 20 menit. Data posisi titik dan elevasi lokasi direkam menggunakan GPS. Pada saat pengukuran, lokasi alat diupayakan mewakili kondisi permukaan setempat. Gangguan berupa aktivitas kendaraan, mesin, maupun kegiatan manusia di sekitar titik pengukuran diupayakan diminimalkan.

### Pengolahan Data HVSR

Data mentah hasil akuisisi pada awalnya berada dalam format hexadecimal. Data tersebut dikonversi

ke format ASCII menggunakan perangkat lunak Datapro sebelum diolah menggunakan perangkat lunak Geopsy. Pengolahan dilakukan menggunakan metode Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) untuk memperoleh frekuensi dominan tanah ( $f_0$ ).

Kurva HVSR diperoleh dari perbandingan spektrum gabungan dua komponen horizontal terhadap spektrum komponen vertikal. Puncak utama kurva H/V digunakan untuk menentukan frekuensi dominan tanah. Pengolahan di Geopsy menggunakan smoothing Konno–Ohmachi dengan konstanta pada rentang 30–40, sebanyak 30–60 time windows, rentang frekuensi analisis 0,2–20 Hz, serta fitur anti-triggering on raw signal dan anti-triggering on filtered signal. Metode HVSR digunakan secara luas untuk mengidentifikasi frekuensi dominan dan karakteristik respons situs dari rekaman mikrotremor, tetapi pemilihan puncak H/V harus memperhatikan kualitas serta kejelasan puncak kurva (Nakamura, 1989; Wang et al., 2023; Siburian et al., 2024).

Nilai periode dominan tanah ( $T_g$ ) dihitung berdasarkan hubungan  $T_g = 1/f_0$ , dengan  $T_g$  adalah periode dominan tanah dalam detik dan  $f_0$  adalah frekuensi dominan dalam Hz.

### Estimasi PGA dengan Metode Kanai

Estimasi PGA dilakukan menggunakan pendekatan empiris Kanai dengan memanfaatkan periode dominan tanah hasil HVSR serta parameter gempa historis. Parameter gempa yang digunakan mencakup lintang dan bujur episenter, magnitudo gelombang permukaan ( $M$ ), dan kedalaman pusat gempa ( $h$ ). Perhitungan dilakukan untuk setiap kejadian gempa yang terdapat dalam katalog, kemudian nilai maksimum pada setiap titik pengukuran digunakan sebagai nilai estimasi PGA.

#### Pendekatan Kanai untuk Estimasi Percepatan Tanah Maksimum

|                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(a) Hubungan percepatan tanah permukaan dan percepatan dasar</p> $\alpha_g = G(T) \alpha_0$                                                                                                                                        | <p>(b) Percepatan dasar</p> $\alpha_0 = \frac{1}{T} \cdot 10^{0,61 M - \left(1,66 + \frac{3,6}{R}\right) \log R + 0,187 - \frac{1,83}{R}}$                                                               | <p>(c) Faktor penguatan tanah</p> $G(T) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{T}{T_g}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{0,2}{\sqrt{T_g}} \left(\frac{T}{T_g}\right)\right]^2}}$ |
| <p>(d) Persamaan operasional pada kondisi resonansi (<math>T = T_0 = T_g</math>)</p> $\alpha_g = \left[ \frac{5}{\sqrt{\frac{1}{T_g}}} \right] \cdot 10^{0,61 M - \left(1,66 + \frac{3,6}{R}\right) \log R + 0,187 - \frac{1,83}{R}}$ | <p>(e) Perhitungan jarak sumber</p> $R = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$ $a = \cos \varphi \cos \lambda; \quad b = \cos \varphi \sin \lambda; \quad c = \sin \varphi$ $\cos \Delta = a_x a_x + b_x b_x + c_x c_x$ |                                                                                                                                                                                |

$T_g$  = periode dominan tanah;  $M$  = magnitudo gelombang permukaan;  $R$  = jarak hiposenter;  $h$  = kedalaman pusat gempa;  $\Delta$  = jarak episenter.

Gambar 2. Persamaan Pendekatan Kanai untuk Estimasi PGA

Dalam persamaan tersebut,  $a_g$  adalah percepatan getaran tanah pada titik pengamatan dalam gal;  $\alpha_0$  adalah percepatan dasar;  $G(T)$  adalah faktor penguatan;  $T_g$  adalah periode dominan tanah;  $M$  adalah magnitudo gelombang permukaan;  $R$  adalah jarak hiposenter dalam km;  $h$  adalah kedalaman pusat gempa dalam km; dan  $\Delta$  adalah jarak episenter dalam km. Jarak hiposenter dihitung dari kombinasi jarak episenter dan kedalaman sumber gempa. Koordinat

episenter dan titik pengamatan dikonversi dalam bentuk komponen geosentris untuk menghitung jarak episenter.

### Analisis Spasial dan Interpretasi

Nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ), periode dominan tanah ( $T_g$ ), dan estimasi PGA pada 45 titik dihimpun dalam tabel hasil. Nilai PGA selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk peta kontur menggunakan Surfer versi 10. Peta kontur kemudian diintegrasikan dengan peta lokasi menggunakan Global Mapper dan Google Earth untuk menghasilkan peta distribusi 3 spasial estimasi PGA.

Interpretasi difokuskan pada variasi frekuensi dominan dan estimasi PGA sebagai informasi awal respons seismik lokal. Nilai PGA pada penelitian ini merupakan hasil estimasi empiris berbasis persamaan Kanai dan katalog gempa historis, bukan rekaman akselerograf langsung. Selain itu, peta PGA tidak digunakan sebagai peta bahaya longsor final karena penelitian belum mengintegrasikan kemiringan lereng, litologi rinci, karakteristik kuat geser tanah, kedalaman muka air tanah, curah hujan, tutupan lahan, dan inventarisasi longsor.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Hasil

#### 3.1.1. Frekuensi Dominan Tanah

Pengolahan data mikrotremor menggunakan metode HVSR pada 45 titik pengukuran menghasilkan nilai frekuensi dominan tanah ( $f_0$ ) yang bervariasi antara 0,125 Hz hingga 17,407 Hz. Nilai frekuensi dominan terendah ditemukan pada Titik 8 sebesar 0,125 Hz, sedangkan nilai tertinggi ditemukan pada Titik 26 sebesar 17,407 Hz.

Sebaran nilai  $f_0$  menunjukkan variasi respons situs yang cukup besar pada wilayah penelitian. Nilai frekuensi dominan rendah, yaitu kurang dari 1 Hz, ditemukan pada Titik 8 (0,125 Hz), Titik 19 (0,324 Hz), Titik 41 (0,328 Hz), Titik 25 (0,541 Hz), Titik 36 (0,698 Hz), Titik 29 (0,748 Hz), Titik 30 (0,757 Hz), Titik 35 (0,757 Hz), Titik 12 (0,793 Hz), Titik 23 (0,800 Hz), Titik 2 (0,802 Hz), Titik 22 (0,850 Hz), dan Titik 31 (0,850 Hz). Sementara itu, nilai  $f_0$  tinggi, yaitu lebih dari 10 Hz, ditemukan pada Titik 15 (11,882 Hz), Titik 17 (13,972 Hz), Titik 18 (16,053 Hz), Titik 24 (17,207 Hz), Titik 26 (17,407 Hz), Titik 27 (10,872 Hz), Titik 28 (12,736 Hz), Titik 32 (14,736 Hz), dan Titik 44 (14,804 Hz).

Nilai periode dominan tanah ( $T_g$ ), yang diperoleh dari hubungan  $T_g = 1/f_0$ , juga menunjukkan variasi yang besar. Berdasarkan hubungan tersebut, periode dominan pada Titik 8 adalah sekitar 8,00 s, sedangkan periode dominan pada Titik 26 adalah sekitar 0,057 s. Rentang tersebut menunjukkan adanya variasi karakteristik respons dinamis tanah di antara titik-titik pengukuran.

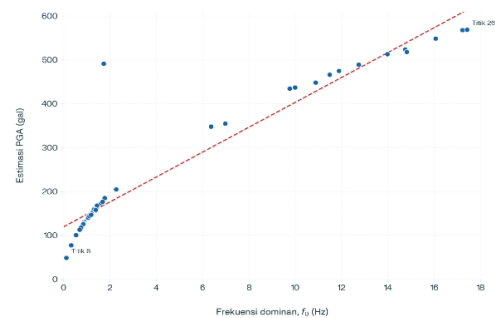
Ringkasan titik terpilih: Titik 8,  $f_0 = 0,125$  Hz;  $T_g = 8,000$  s; PGA = 48,82 gal. Titik 19,  $f_0 = 0,324$  Hz;  $T_g = 3,086$  s; PGA = 78,45 gal. Titik 41,  $f_0 = 0,328$  Hz;  $T_g = 3,049$  s; PGA = 77,59 gal. Titik 14,  $f_0 = 6,361$  Hz;  $T_g = 1006$

0,157 s; PGA = 348,19 gal. Titik 15,  $f_0 = 11,882$  Hz;  $T_g = 0,084$  s; PGA = 475,02 gal. Titik 18,  $f_0 = 16,053$  Hz;  $T_g = 0,062$  s; PGA = 548,49 gal. Titik 24,  $f_0 = 17,207$  Hz;  $T_g = 0,058$  s; PGA = 568,10 gal. Titik 26,  $f_0 = 17,407$  Hz;  $T_g = 0,057$  s; PGA = 569,01 gal. Titik 44,  $f_0 = 14,804$  Hz;  $T_g = 0,068$  s; PGA = 518,24 gal.

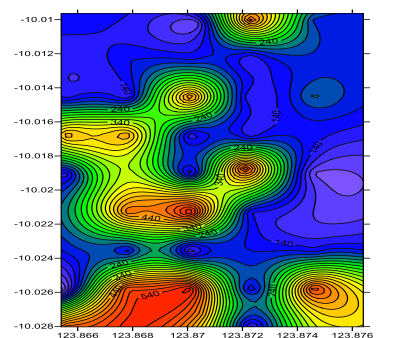
#### 3.1.2. Estimasi Peak Ground Acceleration

Estimasi PGA menggunakan pendekatan Kanai pada 45 titik pengukuran menghasilkan nilai antara 48,82–569,01 gal. Nilai PGA terendah terdapat pada Titik 8 sebesar 48,82 gal, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada Titik 26 sebesar 569,01 gal.

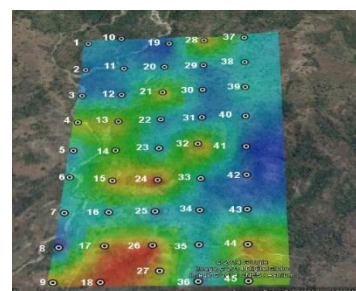
Nilai PGA relatif rendah, yaitu kurang dari 125 gal, diperoleh pada Titik 8 (48,82 gal), Titik 19 (78,45 gal), Titik 41 (77,59 gal), Titik 25 (100,53 gal), Titik 36 (112,99 gal), Titik 35 (117,95 gal), Titik 29 (118,43 gal), Titik 30 (119,00 gal), Titik 23 (122,71 gal), Titik 12 (123,31 gal), dan Titik 2 (124,89 gal). Nilai PGA relatif tinggi, yaitu lebih dari 400 gal, diperoleh pada Titik 4 (434,54 gal), Titik 13 (437,03 gal), Titik 15 (475,02 gal), Titik 17 (512,93 gal), Titik 18 (548,49 gal), Titik 21 (466,20 gal), Titik 24 (568,10 gal), Titik 26 (569,01 gal), Titik 27 (448,39 gal), Titik 28 (489,18 gal), Titik 32 (523,89 gal), dan Titik 44 (518,24 gal).



Gambar 3. Scatter Plot Hubungan  $f_0$  dan Estimasi PGA



Gambar 4. Kontur Estimasi PGA



Gambar 5. Peta Distribusi Spasial Estimasi PGA

### 3.2. Pembahasan

#### 3.2.1. Variasi Respons Situs Berdasarkan Frekuensi Dominan

Rentang frekuensi dominan 0,125–17,407 Hz menunjukkan bahwa respons situs di Desa Tolnaku bersifat heterogen. Frekuensi dominan yang rendah pada beberapa titik, seperti Titik 8, Titik 19, dan Titik 41, mengindikasikan adanya periode resonansi yang lebih panjang dibandingkan titik-titik dengan frekuensi dominan tinggi. Dalam interpretasi HVSR, frekuensi dominan rendah sering dikaitkan dengan keberadaan lapisan sedimen yang relatif lebih tebal atau kontras impedansi yang berada pada kedalaman lebih besar. Sebaliknya, frekuensi dominan tinggi dapat mengindikasikan kontras impedansi yang lebih dangkal, sedimen yang relatif lebih tipis, atau kondisi batuan dasar yang lebih dekat ke permukaan. Namun, interpretasi tersebut tetap bersifat indikatif dan perlu divalidasi menggunakan data kecepatan gelombang geser, survei geolistrik, refraksi seismik, pengeboran, atau data geologi rinci (Siburian et al., 2024; Wang et al., 2023).

Titik 8 dengan  $f_0$  sebesar 0,125 Hz menghasilkan periode dominan sekitar 8,00 s. Titik tersebut menunjukkan respons berperiode panjang dan dapat menjadi lokasi prioritas untuk verifikasi kondisi bawah permukaan. Sebaliknya, Titik 24 dan Titik 26 memiliki  $f_0$  masing-masing 17,207 Hz dan 17,407 Hz, atau periode dominan sekitar 0,058 s dan 0,057 s. Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik dinamis tanah tidak seragam pada area studi yang relatif terbatas.

Meski demikian, frekuensi dominan tidak boleh langsung digunakan sebagai satu-satunya dasar untuk menyatakan jenis tanah atau tingkat amplifikasi. Nilai  $f_0$  menunjukkan posisi frekuensi puncak respons, sedangkan amplitudo puncak H/V atau faktor amplifikasi ( $A_0$ ) menunjukkan besarnya penguatan relatif pada frekuensi tersebut. Karena nilai  $A_0$  belum dilaporkan secara kuantitatif pada naskah ini, interpretasi difokuskan pada distribusi frekuensi dominan dan tidak menyamakan  $f_0$  tinggi dengan amplifikasi tinggi. Pendekatan ini sejalan dengan kebutuhan evaluasi kualitas puncak HVSR dan penafsiran parameter H/V secara hati-hati (Wang et al., 2023).

#### 3.2.2. Interpretasi Estimasi PGA

Rentang estimasi PGA 48,82–569,01 gal menunjukkan adanya perbedaan nilai percepatan tanah hasil model empiris Kanai antar titik pengukuran. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh parameter gempa dalam katalog historis, termasuk magnitudo, kedalaman, dan jarak sumber, serta oleh periode dominan tanah yang diperoleh dari data HVSR. Oleh karena itu, nilai PGA dalam penelitian ini harus disebut sebagai estimasi PGA empiris, bukan sebagai nilai percepatan hasil rekaman langsung dari akselerograf.

Titik 26 menghasilkan estimasi PGA tertinggi, yaitu 569,01 gal, diikuti Titik 24 sebesar 568,10 gal

dan Titik 18 sebesar 548,49 gal. Titik-titik tersebut dapat diprioritaskan untuk investigasi respons situs lebih lanjut, terutama melalui pengukuran nilai amplifikasi H/V, pengukuran kecepatan gelombang geser, dan verifikasi kondisi geologi permukaan. Sebaliknya, Titik 8, Titik 19, dan Titik 41 menghasilkan estimasi PGA relatif rendah. Nilai tersebut menggambarkan hasil model pada parameter yang digunakan dan tidak dapat diinterpretasikan sebagai bukti bahwa suatu lokasi aman untuk pembangunan atau bebas dari bahaya geologi.

Dalam penelitian ini, pola peningkatan PGA seiring kenaikan  $f_0$  tampak pada sebagian besar titik. Sebagai contoh, Titik 8 memiliki  $f_0$  0,125 Hz dan PGA 48,82 gal, sedangkan Titik 26 memiliki  $f_0$  17,407 Hz dan PGA 569,01 gal. Akan tetapi, hubungan ini tidak boleh langsung dinyatakan sebagai hubungan sebab-akibat atau korelasi independen. Periode dominan tanah, yang diturunkan dari  $T_g = 1/f_0$ , digunakan dalam persamaan Kanai untuk menghitung PGA. Dengan demikian, adanya hubungan antara  $f_0$  dan PGA sebagian dapat terbentuk oleh struktur matematis model yang digunakan.

#### 3.2.3. Implikasi untuk Mikrozonasi Seismik Awal

Peta distribusi PGA dan frekuensi dominan dapat digunakan sebagai produk mikrozonasi seismik awal untuk menunjukkan lokasi-lokasi dengan perbedaan respons tanah terhadap skenario parameter gempa yang digunakan. Informasi ini dapat mendukung penentuan lokasi prioritas survei lanjutan, perencanaan pengukuran geoteknik, dan pengembangan kajian bahaya guncangan tanah dengan data yang lebih lengkap. Studi mikrozonasi berbasis mikrotremor di Indonesia juga menunjukkan kegunaan parameter HVSR dalam memetakan variasi respons situs dan mendukung evaluasi awal kondisi bawah permukaan (Siburian et al., 2024).

Namun, peta yang dihasilkan tidak dapat digunakan sebagai peta bahaya longsor final. Kejadian longsor terpicu gempa dipengaruhi oleh kombinasi intensitas guncangan, kemiringan lereng, litologi, struktur geologi, ketebalan tanah, sifat mekanik material, kondisi air tanah, curah hujan, penggunaan lahan, dan riwayat longsor. Oleh karena itu, nilai PGA tinggi hanya dapat diposisikan sebagai salah satu informasi bahaya guncangan yang perlu diintegrasikan dalam analisis multikriteria apabila penelitian dilanjutkan untuk menyusun peta kerentanan longsor terpicu gempa (Lu et al., 2024; Liu et al., 2024).

#### 3.2.4. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, nilai PGA yang diperoleh merupakan estimasi empiris menggunakan pendekatan Kanai dan bukan rekaman akselerograf langsung. Oleh sebab itu, hasil dipengaruhi oleh asumsi model, parameter magnitudo, kedalaman, jarak sumber, periode dominan tanah, serta kelengkapan katalog gempa

yang digunakan. Kedua, pengukuran mikrotremor digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi dominan tanah, tetapi interpretasi kondisi bawah permukaan belum divalidasi menggunakan data kecepatan gelombang geser, geolistrik, refraksi seismik, pengeboran, atau data geoteknik. Ketiga, penelitian ini belum mengintegrasikan kemiringan lereng, litologi rinci, kondisi air tanah, curah hujan, kuat geser tanah, penggunaan lahan, dan inventarisasi longsor. Dengan demikian, hasil penelitian diposisikan sebagai mikrozonasi seismik awal dan tidak sebagai peta bahaya longsor final.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa respons seismik lokal di Desa Tolnaku bersifat heterogen berdasarkan variasi frekuensi dominan hasil analisis HVSR dan estimasi Peak Ground Acceleration (PGA) menggunakan pendekatan empiris Kanai. Peta frekuensi dominan dan estimasi PGA yang dihasilkan dapat digunakan sebagai mikrozonasi seismik awal untuk mendukung identifikasi lokasi prioritas, kajian bahaya guncangan tanah, serta perencanaan investigasi geologi dan geoteknik lanjutan. Namun, nilai PGA pada penelitian ini merupakan hasil estimasi empiris, bukan rekaman akselerograf langsung, sehingga tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar penetapan keamanan pembangunan maupun sebagai peta bahaya longsor final. Penelitian selanjutnya perlu memverifikasi kondisi bawah permukaan dan respons situs melalui pengukuran kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ), MASW, refraksi seismik, geolistrik, atau pengeboran; melaporkan nilai amplifikasi puncak HVSR ( $A_0$ ) serta kualitas puncak  $H/V$ ; dan memvalidasi estimasi PGA menggunakan rekaman akselerograf, GMPE, peta bahaya gempa nasional, atau katalog gempa terbaru dari sumber resmi. Untuk pengembangan kajian longsor terpicu gempa, parameter PGA perlu diintegrasikan dengan kemiringan lereng, litologi, kondisi tanah dan air tanah, curah hujan, tutupan lahan, riwayat longsor, serta analisis stabilitas lereng. Oleh karena itu, peta hasil penelitian ini sebaiknya digunakan sebagai informasi awal dalam penentuan prioritas survei lapangan dan edukasi kesiapsiagaan gempa, bukan sebagai dasar tunggal bagi zonasi tata ruang atau rekomendasi teknis bangunan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? In *The effects of surface geology on seismic motion* (pp. 1251–1279). Balkema.
- Arifin, S. S., Mulyatno, B. S., Marjiyono, & Setianegara, R. (2013). Penentuan zona rawan guncangan bencana gempa bumi berdasarkan analisis nilai amplifikasi HVSR mikrotremor dan analisis periode dominan daerah Liwa dan sekitarnya. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 1(2), 30–40.
- Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? In K. Irikura, K. Kudo, H. Okada, & T. Sasatani (Eds.), *The effects of surface geology on seismic motion* (pp. 1251–1279). Balkema.
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057–1085. <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- Gonzales, C., Garay, R., Moya, L., Lazares, F., Aguilar, Z., Calderon, D., Diaz, M., Matsuoka, M., & Zavala, C. (2023). Preliminary system for the estimation of peak ground acceleration distribution in Metropolitan Lima and Callao: Application in recent seismic events. *Journal of Disaster Research*, 18(4), 319–328.
- Kanai, K. (1957). The requisite conditions of ground for earthquake-resistant structures. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, 485–492.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5), 1574–1594.
- Liu, X., Yang, X., Yuan, R., Xu, R., & Liu, C. (2024). Seismic landslide susceptibility evaluation model based on historical data and its application to areas with similar environmental settings. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1419851. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1419851>
- Lu, Y., Ma, S., & Xia, C. (2024). Application of different earthquake-induced landslide hazard assessment models on the 2022 Ms 6.8 Luding earthquake. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1429421. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1429421>
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25–33.
- Poggi, V., Fäh, D., & Giardini, D. (2012). Calibration of empirical models for site amplification using the ambient vibration technique. *Geophysical Journal International*, 188(3), 1536–1556. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05302.x>
- Siburian, B. I., Marzuki, M., & Lubis, A. M. (2024). Local site effects and seismic microzonation around Suban Area, Curup Rejang Lebong, Bengkulu deduced by ambient noise measurements. *Geoenvironmental Disasters*, 11, 5. <https://doi.org/10.1186/s40677-024-00268-7>
- Sianturi, H. L. (2010). *Pengantar seismologi*. Universitas Nusa Cendana.
- Sungkono, & Santosa, B. J. (2011). Karakterisasi kurva Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio: Kajian literatur dan pemodelan. *Jurnal Neutrino*, 4(1), 1–15.
- Vantassel, J. P., Stolte, A. C., Wotherspoon, L. M., & Cox, B. R. (2023). AutoHVSR: A machine-learning-supported algorithm for the fully automated processing of horizontal-to-vertical spectral ratio measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 170, 107884. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107884>
- Wang, P., Zimmario, P., Ahdi, S. K., Yong, A., & Stewart, J. P. (2023). Identification protocols for horizontal-to-vertical spectral ratio peaks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113(2), 782–803. <https://doi.org/10.1785/0120220181>

- Nomleni, E. dan Tlonaen, M. B. Y. (2026). Karakterisasi Respons Seismik Lokal dan Estimasi *Peak Ground Acceleration* Berbasis Mikrotremor di Desa Tolnaku, Kabupaten Kupang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. Pertama, 24(4), 1003-1009, doi:10.14710/jil.24.4.1003-1009
- Wibowo, N. B., Niyartama, T. F., Andi, A., Septiana, R., Widianingrum, E., et al. (2024). Pemodelan Peak Ground Acceleration (PGA) dan intensitas gempabumi berdasarkan pengukuran mikrotremor pada kawasan longsor di Desa Kalongan, Ungaran Timur. *Jurnal Fisika Unand*, 13(2), 225-233. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.2.225-233.2024>