

MIKROZONASI SEISMIK KOTA PALU MENGGUNAKAN INDEKS NAKAMURA DAN ESTIMASI PGA BERBASIS MIKROTREMOR

Icha Untari Meidji^{1*}, Nia Ramadanti², Asrafil², Harsano Jayadi³

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam-Universitas Negeri Gorontalo

²Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik-Universitas Tadulako

³Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam-Universitas Tadulako
e-mail : ichauntarimeiji10@ung.ac.id

Abstrak. Penelitian ini menyusun peta mikrozonasi kerentanan akibat gempa di Kecamatan Mantikulore, Kota Palu, menggunakan 83 titik data mikrotremor. Nilai frekuensi dominan (f_0) dan faktor penguatan (A_0) ditentukan dari hasil analisis HVSR, kemudian Indeks Kerentanan Seismik dihitung menggunakan metode Nakamura. Percepatan getaran tanah maksimum (PGA) ditentukan secara empiris melalui persamaan Kanai dengan menghitung parameter magnitudo, kedalaman (hiposenter), dan jarak dari sumber gempa, serta periode dominan tanah ($T_0 = 1/f_0$). Pemetaan spasial parameter dilakukan menggunakan interpolasi IDW, dan peta mikrozonasi Kg diklasifikasikan mengacu pada Refrizon, sedangkan peta mikrozonasi PGA mengacu pada klasifikasi BMKG. Hasil menunjukkan Kg berkisar 1,338–57,204 dan PGA berkisar 74,84–414,38 gal. Peta mikrozonasi Kg membagi wilayah menjadi dua zona (sedang dan tinggi), sementara peta mikrozonasi PGA menunjukkan dua tingkat potensi kerusakan (ringan dan sedang), dengan kecenderungan nilai PGA lebih tinggi pada bagian timur yang berasosiasi dengan perbukitan, sedangkan bagian barat yang mengarah ke pesisir didominasi PGA lebih rendah. Peta mikrozonasi ini dapat digunakan sebagai masukan mitigasi dan arahan pembangunan berbasis kondisi tapak di Kecamatan Mantikulore.

Kata Kunci: HVSR; indeks kerentanan seismik; Kota Palu; mikrozonasi; percepatan getaran tanah maksimum

Abstract. This study developed a seismic vulnerability microzonation map for Mantikulore District, Palu City, based on 83 microtremor measurement points. The dominant frequency (f_0) and amplification factor (A_0) were obtained using the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSR) method. The Seismic Vulnerability Index (Kg) was calculated using the Nakamura approach, while Peak Ground Acceleration (PGA) was estimated empirically using the Kanai equation, incorporating earthquake magnitude, focal depth, hypocentral distance, and predominant soil period ($T_0 = 1/f_0$). Spatial distribution maps were generated using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method. The Kg microzonation was classified based on Refrizon's criteria, whereas PGA microzonation map followed the classification standards of the Indonesian Agency for Meteorology, Climatology, and Geophysics (BMKG). The results indicate that Kg values range from 1.338 to 57.204, while PGA values range from 74.84 to 414.38 gal. The Kg microzonation delineates the area into two zones (moderate and high vulnerability), whereas the PGA microzonation identifies two levels of potential damage (light and moderate). Higher PGA values are predominantly observed in the eastern hilly areas, while lower values are found in the western coastal zone. The resulting microzonation maps provide essential input for seismic hazard mitigation and site-specific development planning in Mantikulore District.

Keywords: HVSR; seismic vulnerability index; Central Sulawesi; microzonation; peak ground acceleration (PGA)

PENDAHULUAN

Sebagai bagian dari wilayah Indonesia yang berada di zona tektonik aktif, Sulawesi Tengah memiliki potensi yang sangat besar untuk mengalami kejadian gempa bumi (Muin *et al.*, 2025; Sippan and Setiyawati, 2025). Kota-kota yang paling sering terdampak oleh gempa di Sulawesi Tengah adalah Palu, Sigi, dan Donggala. Aktivitas gempa di wilayah ini dipicu oleh keberadaan patahan utama yang dikenal sebagai Sesar Palu-Koro. Struktur geologi ini memiliki panjang sekitar 500 kilometer, membentang dari Selat Makassar hingga Teluk Bone. Sebagai salah satu sesar paling aktif di Indonesia, jalurnya melintasi Teluk Palu, kemudian masuk ke daratan, memotong pusat kota, dan berlanjut hingga ke Sungai Lariang di kawasan Lembah Pipikoro. (Hamad, 2021; Nurdin *et al.*, 2022; Pratiwi *et al.*, 2022). Keberadaan sesar aktif ini sangat dekat dengan

pemukiman padat penduduk, sehingga dapat menyebabkan potensi guncangan yang besar di Kota Palu di masa depan dan menimbulkan dampak yang signifikan.

Kota Palu dan sekitarnya berada di zona aktif tektonik yang rentan terhadap gempa bumi, sehingga karakteristik geologi dan kondisi tapak menjadi faktor penting yang memengaruhi penguatan gelombang seismik dan potensi kerusakan. Untuk mitigasi bencana dan perencanaan pembangunan yang lebih baik, diperlukan pemetaan mikrozonasi yang dapat menggambarkan variabilitas kerentanan seismik pada skala kecamatan, terutama di wilayah yang padat penduduk seperti Kecamatan Mantikulore. (Simanjuntak and Tampubolon, 2023).

Pasca gempa 28 September 2018, tidak semua bangunan di wilayah yang lebih dekat dengan pusat gempa mengalami kerusakan berat. Beberapa daerah yang lebih jauh dari pusat gempa juga mengalami kerusakan berat akibat pengaruh kondisi geologi lokal dan topografi yang mempengaruhi sebaran kerusakan saat gempa terjadi (Salsabila *et al.*, 2023; Setiawan *et al.*, 2024). Kondisi geologi dan jenis tanah tertentu dapat menyebabkan perbedaan respons tanah terhadap gempa (Amirudin *et al.*, 2023). Hal ini menyebabkan wilayah yang berada pada jarak lebih jauh dari episentrum justru mengalami kerusakan berat, sedangkan area di sekitarnya yang lebih dekat cenderung hanya terdampak ringan atau bahkan tetap utuh.

Dampak kerusakan akibat gempa bumi tahun 2018 di Palu, Sigi, dan Donggala menunjukkan perlunya penguatan pengelolaan bencana secara menyeluruh di ketiga wilayah tersebut. Salah satu aspek penting dalam manajemen bencana adalah mitigasi, yaitu upaya untuk mengurangi dampak buruk dari ancaman bencana (Ningrum *et al.*, 2022). Mitigasi yang efektif terhadap risiko gempa bumi dapat dilakukan dengan melakukan mikrozonasi di daerah rawan gempa berdasarkan kondisi geologi dan karakteristik tanah (Asri *et al.*, 2018; Widyawarman and Fauzi, 2020).

Metode HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) telah banyak diterapkan dalam studi mikrozonasi dan analisis efek tapak lokal, karena mampu memberikan informasi mengenai frekuensi dominan serta tingkat amplifikasi gelombang gempa. Metode ini juga digunakan untuk estimasi kerentanannya terhadap bahaya gempa dan dinamika aktivitas vulkanik, yang dikembangkan oleh Nakamura (Mahajan *et al.*, 2021; Nakamura, 2019). Indeks Kerentanan Seismik (Kg) mencerminkan seberapa rentan lapisan tanah permukaan mengalami deformasi ketika terjadi gempa, dan nilainya erat kaitannya dengan karakteristik geomorfologi suatu wilayah, di mana faktor seperti endapan sedimen yang telah berumur tua namun memiliki tingkat kekompakan rendah cenderung memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan amplifikasi gelombang saat terjadi gempa (Hesti *et al.*, 2021; Prabowo *et al.*, 2016). Sedangkan PGA mengukur percepatan gelombang seismik atau getaran tanah yang merupakan parameter penting dalam seismologi teknik. Analisis PGA dimanfaatkan untuk menilai tingkat bahaya gempa di suatu wilayah berdasarkan kuatnya getaran tanah yang ditimbulkan (Gupta and Satyam, 2022; Meidji *et al.*, 2022).

Namun, meskipun terdapat beberapa studi yang telah memanfaatkan mikrotremor dan HVSR untuk menggambarkan kerentanan seismik di Palu, integrasi antara mikrozonasi Kg dan estimasi PGA pada skala kecamatan, khususnya di Kecamatan Mantikulore, belum banyak dilakukan (Rundle *et al.*, 2022). Penelitian ini dilakukan untuk menjembatani kesenjangan tersebut dengan menyusun peta mikrozonasi berdasarkan analisis mikrotremor, yang mencakup perhitungan Kg dan estimasi PGA. Penelitian ini bertujuan untuk: (i) menganalisis parameter HVSR berupa frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) dari 83 titik pengukuran mikrotremor di Kecamatan Mantikulore, (ii) menghitung Indeks Kerentanan Seismik (Kg) menggunakan pendekatan Nakamura, (iii) mengestimasi PGA menggunakan persamaan Kanai dengan mempertimbangkan parameter-parameter gempa dan karakteristik tanah, (iv) memetakan distribusi spasial f_0 , A_0 , Kg, dan PGA menggunakan interpolasi IDW, serta (v) menyusun mikrozonasi Kg dan PGA berdasarkan klasifikasi Refrizon dan BMKG, serta mengidentifikasi zona kerentanannya untuk digunakan dalam perencanaan pembangunan yang lebih aman. Hasil dari mikrozonasi ini akan memberikan informasi yang berguna untuk mitigasi bencana dan perencanaan pembangunan, khususnya dalam merancang struktur bangunan yang lebih tahan terhadap guncangan gempa di Kecamatan Mantikulore (Simanjuntak, 2020).

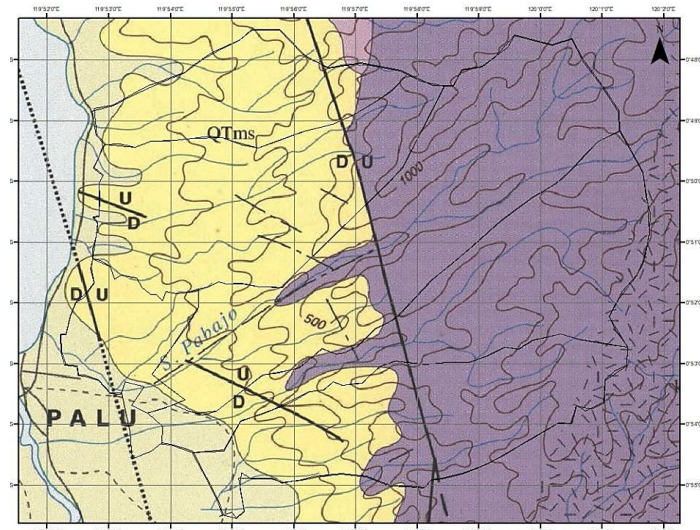
METODOLOGI

Daerah penelitian seperti pada Gambar 1. berada pada Kecamatan Mantikulore meliputi Kelurahan Talise, Talise Valanguni, Tondo, Layana indah, Kawatuna, Lasoani, Poboya, Tanamodindi. Dengan koordinat Secara astronomis daerah ini terletak pada 119.8667° – 120.0167° Bujur Timur dan -0.8000° – -0.9167° Lintang Selatan.



Gambar 1. Peta daerah penelitian dan titik-titik pengambilan data

Data yang diambil pada penelitian ini antara lain yaitu data sekunder mikrotremor sejumlah 83 titik, data tersebut merupakan data yang diambil di BPBD. Data ini diambil menggunakan sensor Velbox SL06 pada bulan Maret tahun 2018. perekaman data dilakukan selama kurang lebih satu jam pada setiap titik pengukuran. Selanjutnya, diterapkan proses *windowing* untuk memisahkan sinyal mikrotremor dari gangguan sementara (transien), seperti aktivitas langkah kaki dan lalu lintas kendaraan, gerakan pohon, bangunan yang kami catat dan dianggap sebagai *noise*. Dalam penelitian ini, lebar *window* yang digunakan 20 detik, *window* dipilih secara manual. Pada penelitian ini, metode *smoothing* yang digunakan adalah Metode Konno dan Ohmachi dengan konstanta *smoothing* konstan atau nilai konstanta bandwidth (b) = 15, karena pada saat nilai $b=15$ ini tampilan spektrum H/V lebih halus dan standar deviasinya lebih kecil.



Gambar 2. Geologi Tinjau Lembar Palu Daerah penelitian (Rab Sukanto.1973)

Data geologi yang diambil antara lain; jenis litologi, topografi, dan morfologi menggunakan geologi regional lembar Palu terlihat pada Gambar 2. Data Gempa bumi diambil dari badan penanggulangan bencana daerah Provinsi Sulawesi Tengah (BPBD), data kegempaan yang dimaksud mempertimbangkan hubungan magnitudo gempa dan nilai hiposenter. Nilai hiposenter atau titik asal gempa bumi di bawah permukaan juga digunakan untuk menghitung jarak dari sumber gempa ke titik pengukuran, yang berpengaruh terhadap intensitas gempa yang dirasakan di permukaan. Data tersebut selanjutnya dimanfaatkan sebagai dasar dalam menghitung nilai PGA dan Kg, yang kemudian digunakan untuk keperluan analisis mikrozonasi serta upaya mitigasi risiko gempa bumi di daerah penelitian.

Tahap Pengolahan Data

Dari data di lapangan data geologi dan data mikrotremor dilakukan pengolahan data. Data geologi digunakan untuk memperoleh gambaran dan kondisi geologi daerah penelitian berupa data geomorfologi, stratigrafi dan struktur geologi. Data gempa dan mikrotremor digunakan untuk perhitungan PGA, Kg di Kecamatan Mantikulore.

Perhitungan dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)*

Dalam metode HVSr, digunakan tiga komponen data, yaitu dua komponen horizontal (NS dan EW) serta satu komponen vertikal. Data ini diolah menggunakan persamaan 1, kemudian dibuatkan kurva grafik HVSr hingga diperoleh nilai frekuensi dominan dan amplifikasi.

$$R(f) = \sqrt{\frac{H_{EW}^2(f) + H_{NS}^2(f)}{V_{UD}(f)}} \quad (1)$$

Notasi dalam rumus di atas adalah :

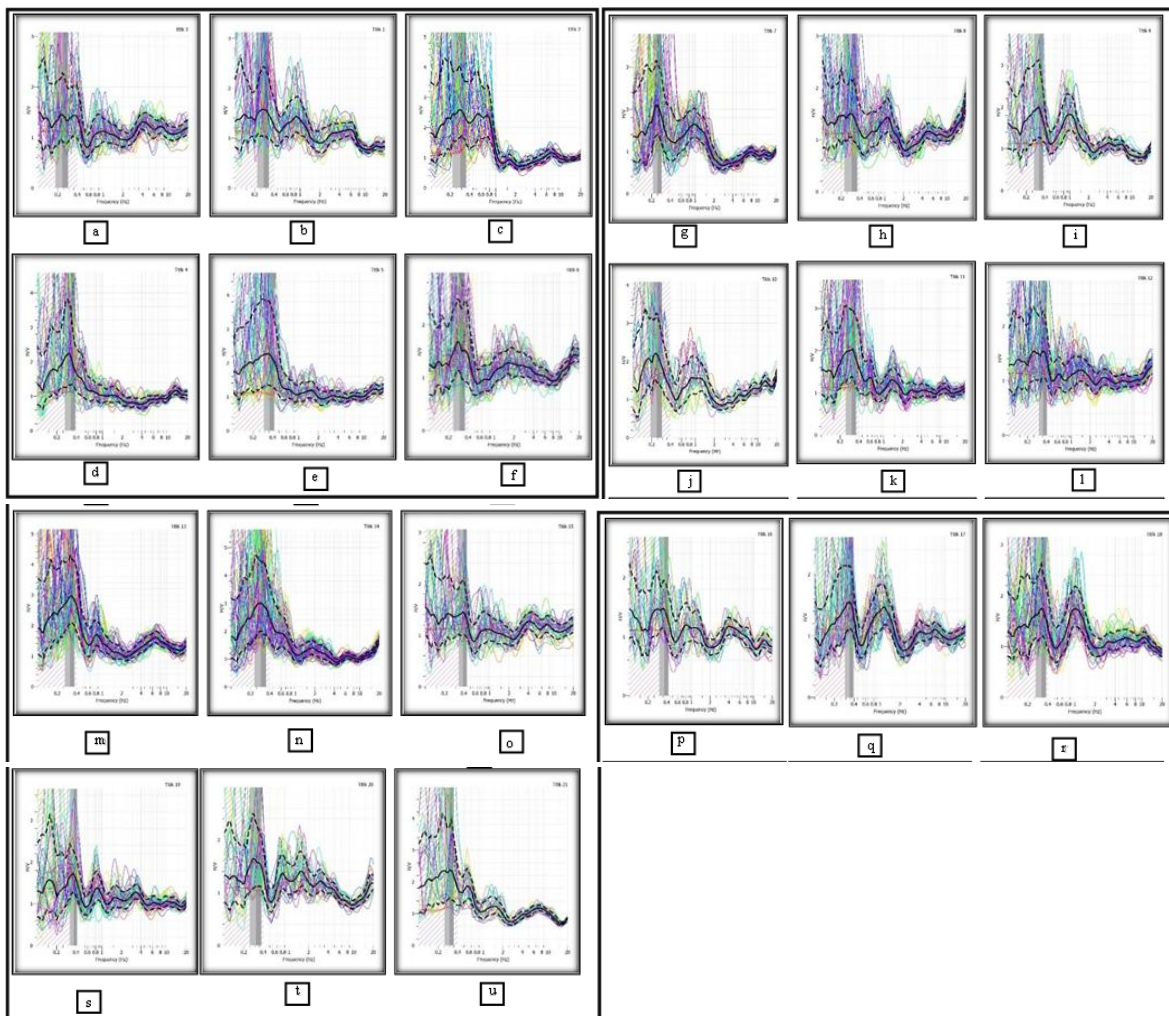
- R (f) = rentang frekuensi proporsi HVSr
- H_{EW} (f) = rentang frekuensi sinyal horizontal barat-timur,
- H_{NS} (f) = rentang frekuensi sinyal horizontal utara-selatan,
- V_{UD} (f) = rentang frekuensi sinyal vertikal.

Rasio ini menggambarkan penguatan gelombang seismik di permukaan tanah akibat adanya lapisan sedimen atau perubahan geologi pada kedalaman tertentu. Dari rasio tersebut menghasilkan spektrum HVSr, tahap berikutnya adalah memplot nilai rata-rata distribusi frekuensi pada setiap titik pengukuran sehingga diperoleh dua parameter utama yakni f₀ dan A₀ yang digunakan untuk menghitung nilai Kg. Sebagai bentuk validasi untuk menilai apakah hasil spektrum yang diperoleh dapat diandalkan, dilakukan uji keandalan

(reliability test) berdasarkan kriteria kurva HVSR dari pedoman SESAME yang ditampilkan pada Gambar 3. Pada penelitian ini, uji keandalan hanya diterapkan pada 21 kurva HVSR yang ditunjukkan pada Gambar 4, dan hasil evaluasinya disajikan pada Tabel 1.

Criteria for a reliable H/V curve i) $f_0 > 10 / l_w$ and ii) $n_c(f_0) > 200$ and iii) $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ If $f_0 > 0.5\text{Hz}$ or $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ If $f_0 < 0.5\text{Hz}$	l_w = window length n_w = number of windows selected for the average H/V curve $n_c = l_w \cdot n_w$, f_0 = number of significant cycles f = current frequency f_{sensor} = sensor cut-off frequency f_0 = H/V peak frequency σ_f = standard deviation of H/V peak frequency ($f_0 \pm \sigma_f$) $\varepsilon(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ A_0 = H/V peak amplitude at frequency f_0 $A_{H/V}(f)$ = H/V curve amplitude at frequency f f^* = frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^*) < A_0/2$ f^* = frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^*) < A_0/2$ $\sigma_A(f)$ = "standard deviation" of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided $\sigma_{\log H/V}(f)$ = standard deviation of the $\log A_{H/V}(f)$ curve, $\sigma_{\log H/V}(f)$ is an absolute value which should be added to or subtracted from the mean $\log A_{H/V}(f)$ curve $\theta(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ $V_{s,av}$ = average S-wave velocity of the total deposits $V_{s,surf}$ = S-wave velocity of the surface layer h = depth to bedrock $h_{\min}$ = lower-bound estimate of h
Criteria for a clear H/V peak (at least 5 out of 6 criteria fulfilled) i) $\exists f^* \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$ ii) $\exists f^* \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$ iii) $A_0 > 2$ iv) $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ v) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ vi) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	

Gambar 3. Kriteria Reabilitas menurut SESAME (2004)



Gambar 4. 21 Spektrum HVSR pada daerah penelitian

Tabel 1. Reliabilitas Kurva HVSR Daerah Penelitian

Spektrum	Nw	f0	lw	10/lw	nc	Kriteria Reliable		
						i	ii	iii
a	39	0,4	25	0,4	390	√	√	√
b	54	0,29	25	0,4	391,5	√	√	√
c	56	0,33	25	0,4	462	√	√	√
d	42	0,35	25	0,4	367,5	√	√	√
e	44	0,35	25	0,4	385	√	√	√
f	51	0,26	25	0,4	331,5	√	√	√
g	54	0,29	25	0,4	391,5	√	√	√
h	48	0,28	25	0,4	336	√	√	√
i	32	0,3	25	0,4	240	√	√	√
j	25	0,25	25	0,4	156,25	√	√	√
k	55	0,3	25	0,4	412,5	√	√	√
l	59	0,32	25	0,4	472	√	√	√
m	64	0,35	25	0,4	560	√	√	√
n	73	0,36	25	0,4	657	√	√	√
o	45	0,22	25	0,4	247,5	√	√	√
p	28	0,36	25	0,4	252	√	√	√
q	49	0,3	25	0,4	367,5	√	√	√
r	47	0,34	25	0,4	399,5	√	√	√
s	41	0,27	25	0,4	276,75	√	√	√
t	32	0,28	25	0,4	224	√	√	√
u	23	0,35	25	0,4	201,25	√	√	√

Perhitungan Nilai Indeks Kerentanan seismik (Kg)

Nilai Kg dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 dengan nilai frekuensi dan amplifikasi dari analisis kurva HVSR.

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

Notasi dalam rumus di atas adalah :

K_g = indeks kerentanan seismik

A_0^2 = nilai puncak respons frekuensi HVSR

F_0 = frekuensi resonansi tanah (Hz)

Perhitungan Nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA)

Nilai percepatan getaran tanah ditentukan secara empiris menggunakan metode Kanai sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3), dengan parameter masukan berupa data episenter, kedalaman, magnitudo, serta periode dominan tanah. Periode dominan tersebut diperoleh dari frekuensi alami tanah. Selanjutnya, perhitungan PGA didasarkan pada data gempa rujukan yang digunakan dalam analisis. Perhitungan PGA maksimum menggunakan data gempa USGS 30 tahun.

$$a = \frac{5}{\sqrt{T_0}} 10^{0,16M - 1,66 + \frac{3,60}{R} \log 10 R + (0,167 + \frac{1,83}{R})} \quad (3)$$

Notasi dalam rumus di atas adalah :

a = nilai percepatan tanah (gal)

T_0 = periode predomnan tanah (s)

M = besaran magnitudo gempa bumi (skala Richter)

R = jarak dari sumber gempa (hiposenter) dalam kilometer

Meskipun saat ini telah banyak dikembangkan model atenuasi modern seperti Boore–Atkinson atau Chiou–Youngs (*NGA models*), penelitian ini menggunakan rumus Kanai (1966) dengan beberapa pertimbangan metodologis. Pemilihan metode Kanai didasarkan pada kesesuaiannya dengan parameter yang tersedia, yaitu periode dominan tanah (T_0) yang diperoleh dari analisis mikrotremor (HVSr). Berbeda dengan GMPE modern yang umumnya memerlukan parameter V_{s30} sebagai representasi kondisi tapak, penelitian ini tidak memiliki data kecepatan gelombang geser sehingga penggunaan model NGA menjadi kurang relevan. Selain itu, keterbatasan data strong-motion lokal di Sulawesi Tengah juga menjadi pertimbangan, mengingat model modern dikembangkan dari basis data regional tertentu yang belum sepenuhnya mewakili kondisi geologi Sulawesi Tengah. Dengan demikian, metode Kanai dipilih karena lebih konsisten dengan data yang digunakan dan sesuai untuk kajian mikrozonasi skala kecamatan dan mendekati kondisi geologi lokasi tapak di wilayah penelitian. Namun demikian, perlu disadari bahwa metode ini tidak sepenuhnya mempertimbangkan efek nonlinier tanah dan kompleksitas respons tapak, sehingga hasil estimasi PGA dalam penelitian ini bersifat indikatif untuk keperluan zonasi, bukan untuk desain struktur secara detail.

Analisis dan interpretasi

Analisis dalam penelitian ini mencakup penentuan karakteristik dinamika tanah, yang meliputi nilai frekuensi alami yang hasilnya langsung dapat menginterpretasikan klasifikasi tanah pada tabel 2. Luaran analisis lainnya meliputi nilai amplifikasi, periode dominan, tingkat kerentanan tanah, serta percepatan getaran tanah (PGA). Indeks kerentanan seismik dihitung dengan mengacu pada frekuensi alami dan faktor penguatan. Selanjutnya, hasil overlay dengan peta rupa bumi mengidentifikasi wilayah-wilayah yang menunjukkan tingkat kerentanan seismik tertentu.

Persamaan Kanai (1966) yang tercantum dalam Persamaan 3 menjelaskan bahwa Nilai PGA tidak hanya ditentukan oleh magnitudo dan jarak terhadap sumber gempa, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah lokal, termasuk periode dominannya.

Tabel 2. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi predomnan oleh Kanai (Arifin et al., 2014)

Klasifikasi Tanah		Frekuensi Alami (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi
Type	Jenis			
IV	I	6.67 - 20.0	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan hard sandy, gravel, dan lainnya.	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tipis, didominasi oleh batuan keras, lebih kecil dari 5 meter.
	II	4.0 - 10.0	Batuan alluvial dengan ketebalan 5 m. Terdiri dari sandy-gravel, sandy hard clay, loam, dan lainnya.	Ketebalan sedimen permukaannya masuk dalam kategori menengah 5-10 meter.
III	III	2.5 - 4.0	Batuan alluvial dengan ketebalan lebih dari 5 m. Terdiri dari sandy- gravel, sandy hard clay, loam, dan lainnya.	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10-30 meter.
II I	IV	< 2.5	Batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur, dan lainnya. Dengan kedalaman 30 m atau lebih.	Ketebalan sedimen permukaannya sangatlah tebal, lebih dari 30 meter.

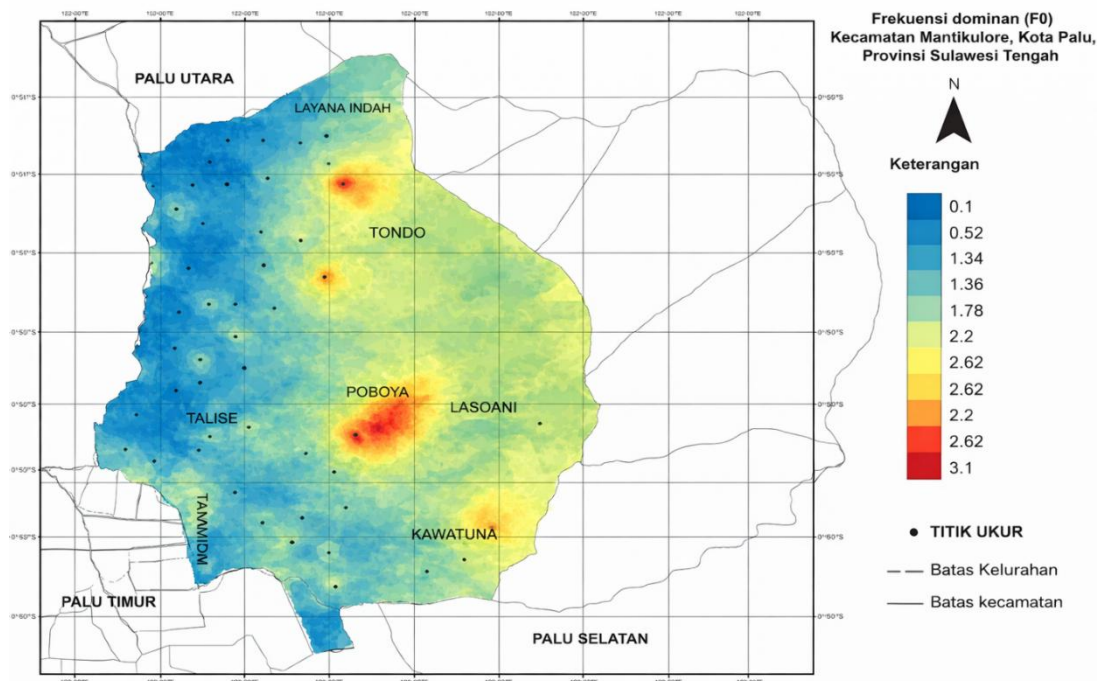
Selanjutnya, hasil perhitungan tersebut diinterpretasikan untuk menghasilkan peta mikrozonasi. Pembuatan peta mikrozonasi dilakukan melalui beberapa tahap: pertama, data indeks kerentanan seismik dimasukkan ke dalam aplikasi *ArcGIS* dan diproses menggunakan metode IDW (*Inverse Distance Weighting*) untuk memperoleh distribusi nilai di suatu wilayah. Kemudian, peta mikrozonasi dibuat berdasarkan klasifikasi dari Refrizon untuk menentukan nilai tinggi, sedang, dan rendah kerentanannya terhadap gempa bumi. Sementara itu, interpretasi percepatan getaran tanah maksimum dilakukan dengan menggunakan klasifikasi dari BMKG untuk menentukan skala kegempaan. Hasil dari kedua data ini kemudian dikorelasikan dengan kondisi geologi di daerah penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data mikrotremor (sumber BPBD) yang digunakan dalam penelitian ini tersebar di area penelitian (Kecamatan Mantikulore) sebanyak 83 titik pengukuran. Distribusi persebaran data mikrotremor pada area penelitian terdiri dari 14 data di Kelurahan Layana Indah, 20 data di Kelurahan Tondo, 19 di Kelurahan Poboya, 10 data di Kelurahan Talise, 7 data di Kelurahan Lasoani, 9 data di Kelurahan Kawatuna, dan 4 di Kelurahan Tanamodindi. Data ini kemudian dianalisis menggunakan persamaan 1 kemudian menghasilkan nilai frekuensi dominan yang kemudian dipetakan hingga diperoleh peta pada Gambar 2.

Frekuensi Dominan

Nilai frekuensi dominan terendah (F_0) berada pada Daerah yang memiliki Geomorfologi Pedataran alluvial dan Wilayah pedataran denudasional mencakup seluruh titik pengukuran dengan nilai frekuensi dominan umumnya berada di bawah 2,5 Hz. Nilai frekuensi yang rendah ini, jika dikaitkan dengan klasifikasi tanah menurut Kanai, menunjukkan bahwa hasil pengolahan data termasuk dalam kategori tanah Tipe I, yang umumnya berupa endapan aluvial hasil sedimentasi delta, lapisan tanah penutup, serta material lumpur dengan ketebalan lebih dari 30 meter, sehingga menunjukkan lapisan sedimen permukaan yang sangat tebal. Sementara itu, nilai frekuensi dominan tertinggi tercatat sebesar 3,524 Hz. Berdasarkan klasifikasi yang sama, nilai ini termasuk dalam kategori tanah Tipe III, yang dicirikan oleh material aluvial dengan ketebalan lebih dari 5 meter, tersusun atas pasir berkerikil (*sandy gravel*), lempung keras berpasir (*sandy hard clay*), dan lempung (*loam*).



Gambar 5. Peta Sebaran frekuensi dominan di Kecamatan Mantikulore

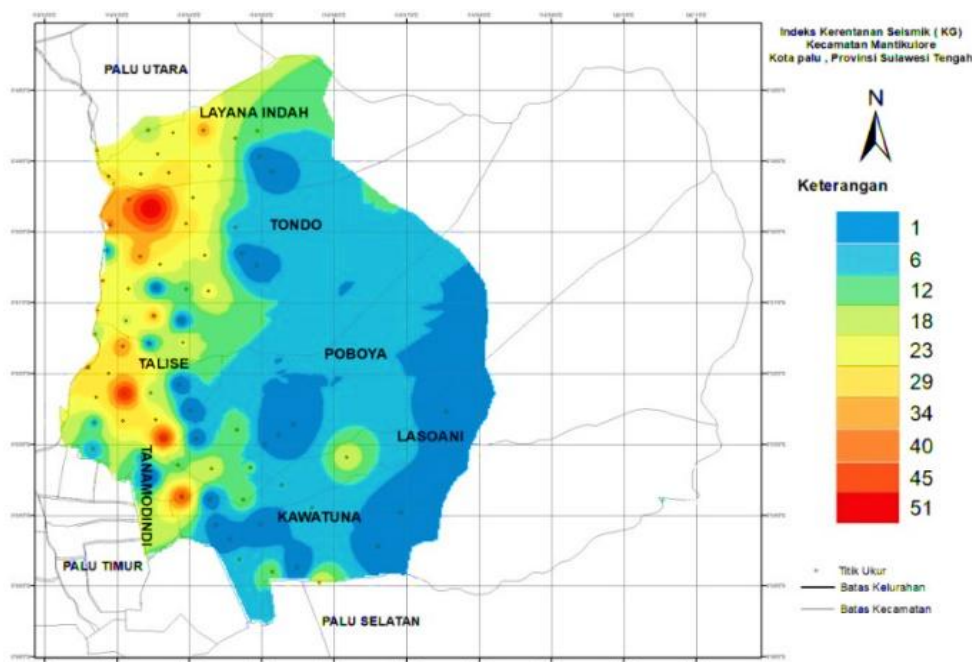
Kelurahan Mantikulore didominasi oleh daerah yang memiliki F_0 yang rendah, namun di beberapa titik penelitian terdapat juga beberapa wilayah memiliki nilai frekuensi yang sedang hingga tinggi. Pada Kelurahan Layana indah memiliki nilai 0,1 Hz -2,5 Hz yang ditandai dengan warna biru pada arah barat sampai utara timur laut dan warna jingga mengarah pada timur laut yang memiliki bentuk geomorfologi pedataran alluvial-perbukitan denudasional, daerah ini memiliki F_0 kecil termasuk dalam tipe I yang memiliki lapisan sedimen yang sangat tebal, Pada Kelurahan Tondo pada arah barat hingga utara barat laut dengan bentuk geomorfologi pedataran hingga perbukitan di dominasi oleh warna biru dan semakin tinggi elevasinya nilai dari F_0 menjadi jauh lebih besarditandi dengan warna hijau dan kuning, Kelurahan Kawatuna pada gambar di tandai dengan warna biru pada arah utara barat laut hingga timur laut, semakin kearah perbukitan nilai dari F_0 semakin tinggi di tandai dengan warna kuning di mana nilai F_0 dari 0,1 Hz -1,8 Hz, Kelurahan Poboya memiliki nilai F_0 dari yang terendah ditandai dengan warna biru pada pedataran alluvial mengarah ke arah perbukitan nilai F_0 menjadi jauh lebih

besar nilai terbesar di tandai dengan warna merah pada arah utara barat laut, Kelurahan Talise di dominasi oleh warna biru dan beberapa daerah berwarna hijau, Kelurahan Lasoani di bagian pedataran memiliki nilai F_0 yang jauh lebih rendah di tandai dengan warna biru semakin tinggi elevasinya nilai F_0 semakin besar pula, dan Kelurahan Tanamodindi di tandai dengan warna hijau pada arah selatan barat daya dan warna biru pada arah selatan yang memiliki nilai frekuensi dominan dominan 0,1 Hz -1,1 Hz.

Nilai Indeks Kerentanan Seismik (Kg)

Parameter utama yang diukur menggunakan alat mikrotremor meliputi nilai A_0 dan f_0 . Oleh karena itu, penentuan nilai Kg di Kecamatan Mantikulore dilakukan berdasarkan kedua parameter tersebut, kedua parameter tersebut diperlukan dalam perhitungan. Kg diperoleh melalui persamaan 2. Nilai Kg diberbagai titik tersebut kemudian direpresentasikan dalam bentuk peta seperti pada gambar 3 berikut.

Nilai Kg ditentukan oleh besarnya faktor amplifikasi tanah dan frekuensi dominan yang diperoleh dari tabel nilai hasil pengolahan data F_0 dan A_0 berdasarkan persamaan 2. Untuk nilai Kg terendah yaitu sebesar 1,338 pada Kelurahan Lasoani. Nilai Kg Tertinggi terdapat pada titik pengukuran dengan nilai sebesar 57,204. Pada Kelurahan Layana hal ini menjelaskan bahwa Kecamatan Mantikulore memiliki nilai Kg yang beragam didominasi oleh daerah yang Memiliki Kg rendah. Pada Kelurahan layana indah pada daerah yang dekat dengan pantai dengan bentuk geomorfologi pedataran alluvial hingga pedataran denudasional memiliki nilai Kg yang cukup besar di tandai dengan warna kuning semakin tinggi elevasi pada daerah tersebut dengan bentuk geomorfologi perbukitan denudasional nilai kg semakin rendah, Kelurahan Tondo memiliki nilai kg pada daerah yang dekat dengan pantai dengan bentuk geomorfologi pedataran alluvial sampai ke pedataran denudasional di tandai dengan warna jingga hingga merah yang mana daerah ini memiliki nilai Kg yang sangat besar tetapi semakin tinggi elevasinya nilai kg semakin kecil, Kelurahan Talise lebih di dominasi oleh daerah yang memiliki nilai kg yang cukup besar di tandai dengan warna kuning hingga jingga. Kelurahan Lasoani memiliki nilai Kg yang sedang di tandai dengan warna jingga tetapi semakin tinggi elevasi nilai kg di dominasi dengan warna biru, Kelurahan Poboya, Kelurahan Kawatuna dan Kelurahan Tanamodindi memiliki Nilai Kg rendah di mana daerah ini di dominasi oleh warna biru.

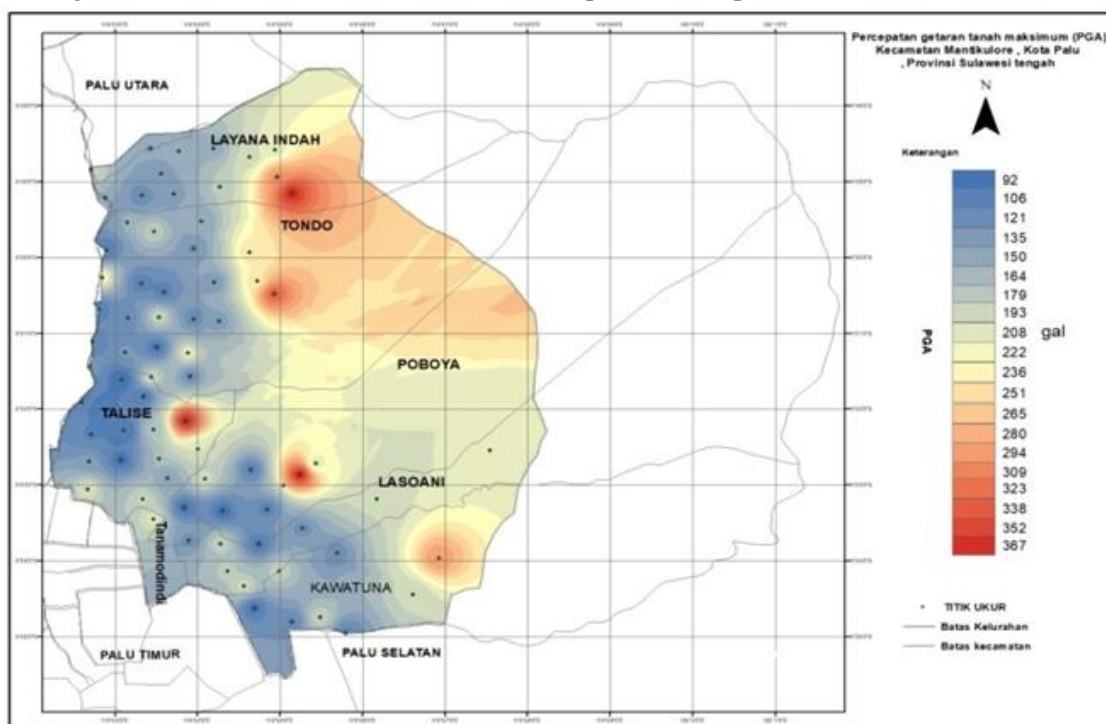


Gambar 6. Peta Sebaran Nilai Indeks Kerentanan Seismik (Kg) di Kecamatan Mantikulore

Nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA)

Data gempa yang diambil untuk melengkapi persamaan PGA yaitu gempa bumi yang berepisentrum di $0,2559^{\circ}$ LS dan $119,8462^{\circ}$ BT pada 0 km permukaan bumi dengan kekuatan gempa yaitu 7,5 Mw. Berdasarkan kedalamannya, gempa tersebut tergolong sebagai gempa dangkal dengan kedalaman kurang dari 30 km. Gempa yang terjadi pada kedalaman kecil umumnya menimbulkan kerusakan yang lebih besar. Selain itu, besarnya magnitudo turut memperparah dampak yang ditimbulkan, terutama pada wilayah perbukitan.

Dari hasil perhitungan PGA dengan parameter gempa bumi Pasigala 28 September 2018 (Mw 7,5) dan rumusan atenuasi Kanai. Untuk nilai PGA terendah yaitu sebesar 79,840 gal. Nilai PGA Tertinggi, terdapat pada titik dengan nilai sebesar 414,381 gal. Pada gambar 4 menjelaskan bahwa nilai PGA yang tinggi ditandai dengan warna merah berada pada daerah perbukitan atau daerah daerah yang memiliki elevasi yang cukup tinggi, di Kelurahan Layana, Kelurahan Tondo, Kelurahan Kawatuna, Kelurahan Lasoani, kelurahan Poboya memiliki nilai PGA dari rendah ke tinggi di mana pada geomorfologi Aluvial dan pedataran Denudasional didominasi oleh warna biru sementara kearah perbukitan denudasional memiliki nilai PGA yang tinggi ditandai dengan warna merah, di Kelurahan Tanamodindi, Kelurahan Talise memiliki nilai PGA yang Rendah Ditandai dengan warna Biru, Berikut hasil sebaran PGA pada daerah penelitian di Kecamatan Mantikulore.



Gambar 7. Peta Sebaran Nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA) di Kecamatan Mantikulore

Dalam kajian kegempaan, PGA digunakan sebagai parameter untuk menggambarkan tingkat getaran permukaan tanah di suatu wilayah. Pada penelitian ini, nilai PGA dihitung berdasarkan Persamaan (3). Semakin besar nilai PGA, semakin tinggi pula potensi dampak gempa yang dapat ditimbulkan, sedangkan nilai yang lebih kecil menunjukkan tingkat bahaya yang relatif lebih rendah. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebaran zona bahaya gempa di lokasi penelitian terbagi menjadi dua kategori. Kategori pertama adalah kerusakan ringan dengan nilai PGA berkisar antara 89–167 gal, yang direpresentasikan pada zona berwarna coklat hingga merah. Kategori kedua adalah kerusakan sedang dengan rentang nilai 168–564 gal, yang ditunjukkan oleh zona berwarna krem hingga biru. Kedua kategori ini mengindikasikan tingkat bahaya gempa yang cukup tinggi, mengingat kejadian gempa tahun 2018 yang mencapai magnitudo 7,5 Mw dan menimbulkan korban jiwa serta kerusakan bangunan yang signifikan. Namun demikian, besarnya dampak yang terjadi tidak hanya dipengaruhi oleh gempa itu sendiri, melainkan juga oleh faktor bencana lain yang menyertainya.

Meskipun penelitian ini berhasil menyusun mikrozonasi kerentanan seismik berbasis data mikrotremor di Kecamatan Mantikulore, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Pertama,

keterbatasan data. Data mikrotremor yang digunakan merupakan data sekunder dengan jumlah 83 titik pengukuran. Meskipun distribusi titik telah mewakili wilayah penelitian, kepadatan titik di beberapa zona belum merata sehingga dapat mempengaruhi detail spasial hasil interpolasi. Selain itu, penelitian ini tidak didukung oleh data kecepatan gelombang geser (V_{s30}) maupun data strong-motion lokal, sehingga karakteristik tapak dievaluasi hanya berdasarkan parameter HVSr (f_0 dan A_0). Kedua, keterbatasan metode. Estimasi PGA menggunakan persamaan Kanai yang bersifat empiris dan dikembangkan dari pendekatan klasik. Model ini tidak secara eksplisit mempertimbangkan efek nonlinier tanah maupun kompleksitas respons tapak yang biasanya dimodelkan dalam GMPE modern. Selain itu, metode interpolasi IDW yang digunakan dalam pemetaan spasial mengasumsikan bahwa pengaruh titik pengukuran hanya bergantung pada jarak, tanpa mempertimbangkan struktur geologi bawah permukaan secara eksplisit. Ketiga, asumsi yang digunakan. Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik (K_g) mengasumsikan bahwa puncak kurva HVSr merepresentasikan frekuensi resonansi utama tanah dan bahwa amplifikasi maksimum terjadi pada frekuensi tersebut. Dalam kenyataannya, respons tanah dapat dipengaruhi oleh heterogenitas lapisan bawah permukaan yang tidak seluruhnya terdeteksi oleh metode mikrotremor satu titik. Selain itu, estimasi PGA mengasumsikan parameter gempa skenario tertentu dan kondisi tapak linier.

Dengan demikian, hasil mikrozonasi dalam penelitian ini lebih bersifat indikatif dan digunakan untuk kepentingan zonasi awal serta perencanaan mitigasi skala kecamatan. Untuk pengembangan lebih lanjut, diperlukan integrasi dengan data geoteknik, pengukuran V_{s30} , serta pemodelan numerik yang lebih komprehensif agar diperoleh estimasi kerentanan yang lebih detail dan representatif.

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik dinamika tanah di Kecamatan Mantikulore memiliki variasi kerentanan yang dipengaruhi oleh kondisi geologi dan morfologi setempat. Integrasi Indeks Kerentanan Seismik (K_g) berbasis HVSr dan estimasi PGA memberikan gambaran spasial yang lebih komprehensif mengenai potensi respons tapak terhadap guncangan gempa. Zona dengan nilai K_g dan PGA relatif lebih tinggi mengindikasikan potensi amplifikasi gelombang yang lebih besar, terutama pada wilayah dengan karakter sedimen yang lebih lunak dan morfologi tertentu. Secara praktis, peta mikrozonasi yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan tata ruang dan pengendalian pembangunan berbasis risiko gempa di tingkat kecamatan. Informasi ini dapat menjadi acuan dalam penentuan prioritas mitigasi, evaluasi kelayakan lokasi pembangunan infrastruktur baru, serta penyusunan rekomendasi teknis desain bangunan yang lebih adaptif terhadap kondisi tapak lokal. Selain itu, hasil penelitian ini dapat mendukung pemerintah daerah dalam menyusun kebijakan pengurangan risiko bencana berbasis data spasial. Meskipun demikian, hasil yang diperoleh masih bersifat indikatif dan memerlukan penguatan melalui integrasi data geoteknik, pengukuran V_{s30} , serta pemodelan respons tapak yang lebih rinci pada penelitian selanjutnya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan terutama kepada Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) atas dukungan dan penyediaan data dalam penelitian ini. Kontribusi BPBD dalam menyediakan informasi dan akses data mikrotremor telah memungkinkan penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Amirudin, Madrinovella, I. And Sofian. (2023), "Seismic Vulnerability Analysis Using The Horizontal To Vertical Spectral Ratio (HVSr) Method On The West Palu Bay Coastline", *Journal Of Geoscience, Engineering, Environment, And Technology*, Vol. 8 No. 02–2, Pp. 23–34, Doi: 10.2529/Igeet.2023.8.02-2.13879.
- Asri, W., Suharno, S. And Rustadi, R. (2018), "Pemetaan Mikrozonasi Daerah Rawan Gempabumi Menggunakan Metode Hvsr Daerah Painan Sumatera Barat", *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, Teknik Geofisika, Vol. 4 No. 1, Pp. 31–45.
- Gupta, K. And Satyam, N. (2022), "Estimation Of Arias Intensity And Peak Ground Acceleration (PGA) Using Probabilistic Seismic Hazard Assessment Of Uttarakhand State (India)", *Arabian Journal Of Geosciences*, Vol. 15 No. 5, P. 437, Doi: 10.1007/S12517-022-09733-9.

- Hamad, H. (2021), “Analisa Kinematik Sesar Palu-Koro Segmen Palu Daerah Wisolo Hingga Wera Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah”, *Jurnal Sains Dan Teknologi Tadulako*, Vol. 7 No. 1, Pp. 1–15, Doi: 10.22487/Jstt.V7i1.364.
- Hesti, H., Suharno, S., Mulyasari, R. And Hidayatika, A. (2021), “Analisis Karakteristik Lapisan Sedimen Berdasarkan Data Mikrotremor Di Area Rumah Sakit Pendidikan Unila”, *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, Vol. 7 No. 2, Pp. 150–159, Doi: 10.23960/Jge.V7i2.123.
- Mahajan, A.K., Kumar, P. And Kumar, P. (2021), “Near-Surface Seismic Site Characterization Using Nakamura-Based HVSR Technique In The Geological Complex Region Of Kangra Valley, Northwest Himalaya, India”, *Arabian Journal Of Geosciences*, Vol. 14 No. 10, P. 826, Doi: 10.1007/S12517-021-07136-W.
- Meidji, I.U., Mulyati, S., Janat, N.R., Jayadi, H., And Asrafil. (2022), “Determination Of Earthquake Prone Zones At University Of Tadulako Based On Dominant Periods And Peak Ground Acceleration (PGA)”, *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, IOP Publishing, Vol. 1212 No. 1, P. 012037, Doi: 10.1088/1757-899X/1212/1/012037.
- Muin, M.R., Sutarto, S., Prasetyadi, C. And Suharsono, S. (2025), “Neotektonik Segmen Moa Berdasarkan Data Paleomagnetik Dan Implikasi Gerak Mikroblok Pada Zona Sesar Palu Koro”, *Jurnal Geosaintek*, Vol. 11 No. 2, Pp. 168–175, Doi: 10.12962/J25023659.V11i2.7114.
- Nakamura, Y. (2019), “What Is The Nakamura Method?”, *Seismological Research Letters*, Vol. 90 No. 4, Pp. 1437–1443, Doi: 10.1785/0220180376.
- Ningrum, R.W., Amelia, R.N., Taib, S., Achmad, R. And Aswan, M. (2022), “Mapping Of Seismic Vulnerability Potential For Earthquake Disaster Mitigation In South Morotai: Pemetaan Potensi Kerentanan Seismik Sebagai Mitigasi Bencana Gempa Di Morotai Selatan”, *Jurnal Geoelebes*, Pp. 37–46, Doi: 10.20956/Geoelebes.V6i1.19150.
- Nurdin, N., Pujiastuti, D. And Marzuki, M. (2022), “Analisis Kecepatan Pergeseran Seismik Sesar Palu Koro Akibat Gempa Palu 2018 Menggunakan Data Global Navigation Satellite System”, *Jurnal Fisika Unand*, Vol. 11 No. 4, Pp. 428–434, Doi: 10.25077/Jfu.11.4.428-434.2022.
- Prabowo, U.N., Marjiyono, M. And Sismanto, S. (2016), “Amplifikasi Dan Atenuasi Gelombang Seismik Di Lapisan Sedimen Permukaan”, *Science Tech: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi*, Vol. 2 No. 1, Pp. 112–116, Doi: 10.30738/Jst.V2i1.414.
- Pratiwi, W., Martha, A.A. And Setyonegoro, W. (2022), “Identifikasi Letak Sesar Palu Koro Menggunakan Metode Gravitasi Mikro”, *Buletin Meteorologi, Klimatologi Dan Geofisika*, Vol. 2 No. 6, Pp. 20–24, Doi: 10.3451/Buletinmkg.V2i6.50.
- Rundle, J.B., Donnellan, A., Fox, G. And Crutchfield, J.P. (2022), “Nowcasting Earthquakes By Visualizing The Earthquake Cycle With Machine Learning: A Comparison Of Two Methods”, *Surveys In Geophysics*, Vol. 43 No. 2, Pp. 483–501, Doi: 10.1007/S10712-021-09655-3.
- Salsabila, R.S., Yudistira, T. And Tohari, A. (2023), “Mapping Of Soil Dynamic Response Of Palu City Based On Horizontal To Vertical Spectral Ratio (HVSR) Method”, *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science*, IOP Publishing, Vol. 1288 No. 1, P. 012019, Doi: 10.1088/1755-1315/1288/1/012019.
- Setiawan, D.G.E., Meidji, I.U., Adam, S. And Jayadi, H. (2024), “Soil Dynamics Characteristics To Earthquake Using HVSR Method In Palu City”, *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science*, IOP Publishing, Vol. 1425 No. 1, P. 012025, Doi: 10.1088/1755-1315/1425/1/012025.
- Simanjuntak, P. (2020), “Evaluasi Kerusakan Bangunan Akibat Gempa Di Indonesia”, *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Dan Lingkungan-CENTECH*, Vol. 1 No. 1, Pp. 44–53.
- Simanjuntak, P. And Tampubolon, S.P. (2023), “Evaluasi Respon Seismik Struktur Bangunan Universitas Terbuka Palu Terhadap Gempa Sulteng 28 September 2018 | Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Dan Lingkungan - CENTECH”.
- Sippan, R.B. And Setiyawati, N. (2025), “Pemetaan Dan Klasterisasi Daerah Rawan Bencana Alam Di Provinsi Sulawesi Tengah Menggunakan K-Means”, *JIPi (Jurnal Ilmiah Penelitian Dan Pembelajaran Informatika)*, Vol. 10 No. 2, Pp. 1031–1045, Doi: 10.29100/Jipi.V10i2.6161.
- Widyawarman, D. And Fauzi, E.R. (2020), “Aplikasi Mikrotremor Untuk Mikrozonasi Tingkat Potensi Bencana Gempa Bumi Di Kampus I Universitas Pgri Yogyakarta”, *Jurnal Geosaintek*, Vol. 6 No. 2, p. 87, doi: 10.12962/j25023659.v6i2.6778.