

## Evaluasi Kerentanan Seismik Wilayah Kota Mamuju Pasca Gempa Bumi 15 Agustus 2021 Menggunakan Data Mikrotremor

Ramadhan Priadi<sup>1,2</sup>, Muhammad Arsyad<sup>1,\*</sup> dan Agus Susanto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Fisika, Universitas Negeri Makassar, Makassar, 9022, Indonesia

<sup>2</sup>Stasiun Geofisika Klas II Gowa, Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia

### Info Artikel

#### Histori Artikel:

Diajukan: 15 Juli 2023

Direvisi: 26 Oktober 2023

Diterima: 22 Desember 2023

#### Kata kunci:

HVSR

Mamuju

Mikrotremor

Seismik

#### Keywords:

HVSR

Mamuju

Microtremor

Seismic

#### Penulis Korespondensi:

Muhammad Arsyad

Email: ramadhan.priadi@bmgk.go.id

### ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian untuk mengevaluasi kerentanan seismik wilayah Kota Mamuju pasca gempa bumi 15 Agustus 2021 dengan menggunakan data mikrotremor. Data yang digunakan merupakan data sinyal *microtremor* dari hasil pengukuran lapangan sebanyak 39 titik menggunakan *portable seismometer* TDS-303 jenis *short period*. Terdapat empat parameter *output* yang dapat digunakan untuk menganalisis dan mengevaluasi kerentanan seismik yaitu frekuensi dominan ( $f_0$ ), faktor amplifikasi ( $A_0$ ), indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ), dan periode dominan ( $T_0$ ). Dari hasil pengukuran di lapangan, *output* HVSR tersebut dapat dipetakan untuk menginterpretasikan sebaran data secara spasial. Hasil penelitian menunjukkan jika wilayah kota Mamuju memiliki nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) antara 0,608 Hz-0,97 Hz, faktor amplifikasi ( $A_0$ ) antara 1,01-7,69, indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) antara 0,468-73,886, dan periode dominan ( $T_0$ ) antara 0,09 s-1,64 s. Dari hasil tersebut wilayah Kota Mamuju yang berada dekat dengan pesisir pantai memiliki potensi kerentanan terhadap bahaya gempa bumi yang jauh lebih tinggi, jika dibandingkan dengan wilayah yang berada di sebelah selatan. Hal ini juga didukung oleh hasil perhitungan ketebalan sedimen yang berkisar antara 7,6 m-130,2 m dengan wilayah utara jauh lebih tebal dari wilayah sebelah selatan.

*Microtremor data has been used in research to determine how seismically vulnerable the Mamuju City region will be following the earthquake on August 15, 2021. The data used is based on field observations made at 39 locations using the TDS-303 portable short-period seismometer. The dominant frequency ( $f_0$ ), the amplification factor ( $A_0$ ), the seismic vulnerability index ( $K_g$ ), and the dominant period ( $T_0$ ) are the four output parameters that can be utilized to examine and assess seismic vulnerability. The HVSR output can be mapped using the field measurement results to understand the data's spatial distribution. In accordance with the findings, the Mamuju city area had dominant frequency values ( $f_0$ ) between 0.608 Hz and 0.97 Hz, amplification factors ( $A_0$ ) between 1.01 and 7.69, seismic vulnerability indices ( $K_g$ ) between 0.468 and 73.886, and dominant periods ( $T_0$ ) between 0.09 and 1.64 s. According to this research, compared to regions to the south, the Mamuju city area, which is near the shore, has a substantially higher potential vulnerability to seismic hazards. The result of calculations of sediment thickness ranging from 7.6 m to 130.2 m, with the northern part being significantly thicker than the southern zone, also confirms this.*

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

## I. PENDAHULUAN

Kota Mamuju merupakan wilayah yang memiliki potensi kegempaan dari sumber Makassar-Strait Fault maupun dari sesar lokal Mamuju. Sesar aktif di wilayah Sulawesi Barat memiliki jenis pergeseran dominan sesar geser (*strike slip*) dan terkadang campuran (*oblique*) antara sesar naik dan sesar geser dengan arah barat laut–tenggara (Hamilton, 1979). Berdasarkan data historis gempa bumi yang terjadi di wilayah Sulawesi Barat dalam kurun waktu 1991-2013 dengan magnitudo 4-5 SR terjadi sebanyak 319 kali, magnitudo 5-7,5 SR terjadi sebanyak 53 kali dengan hiposenter antara 30-100 km (Massinai, 2018). Pada tanggal 15 Januari 2021, pukul 02.28 WITA 2021 terjadi gempa bumi signifikan dengan magnitudo M 6,2 di wilayah pesisir barat pulau Sulawesi, tepatnya di 7 km timur laut Majene. Gempa bumi tersebut masuk ke dalam kategori gempa bumi dangkal dengan kedalaman 10 km. Gempa bumi ini disebabkan oleh aktivitas sesar lokal Mamuju dengan pola patahan naik (*Thrust Fault*). Wilayah yang terdampak guncangan gempa bumi adalah Kabupaten Majene dan Mamuju dengan skala V–VI MMI, di Mamasa, Polewali Mandar serta di Makassar dengan skala IV–V MMI, serta di Palu dengan skala III–IV MMI.

Suatu wilayah akan mengalami amplifikasi ketika nilai frekuensi gelombang gempa bumi sama dengan frekuensi resonansi tanah yang berada di permukaan (Hakimov et al., 2021). Kondisi seperti ini diakibatkan oleh *local site effect* (pengaruh lokal) daerah setempat. *Local site effect* merupakan gambaran kondisi tanah lokal disekitar wilayah (Stanko et al., 2017). Getaran sinyal gelombang gempa bumi yang berada di sumber dan di permukaan akan sangat berbeda, karena kondisi permukaan akan sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi setempat serta medium yang dilalui oleh gelombang gempa bumi dari sumber hingga ke permukaan (Guo et al., 2021). Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis *local site effect* daerah kota Mamuju sebagai upaya mitigasi bencana adalah menggunakan metode HVSR (*Horizontal Vertical to Spectral Ratio*). Metode HVSR merupakan metode yang dikembangkan oleh Nakamura (1989), dengan menganalisis kerawanan seismik suatu wilayah menggunakan data *microtremor*. Gelombang yang direkam merupakan *ambient vibration* yang termasuk dalam *microtremor* terdiri dari gelombang *Rayleigh* dengan periode puncak H/V merepresentasikan periode gelombang S (Asten et al., 2014). *Ambient vibration* yang diperoleh berupa getaran tanah dengan amplitudo rendah pada orde 0,1-10 m/s yang disebabkan oleh fenomena alam (gempa bumi, angin, pasang surut, sungai, curah hujan) dan aktivitas manusia (jalan, mesin) (Nakamura, 1997).

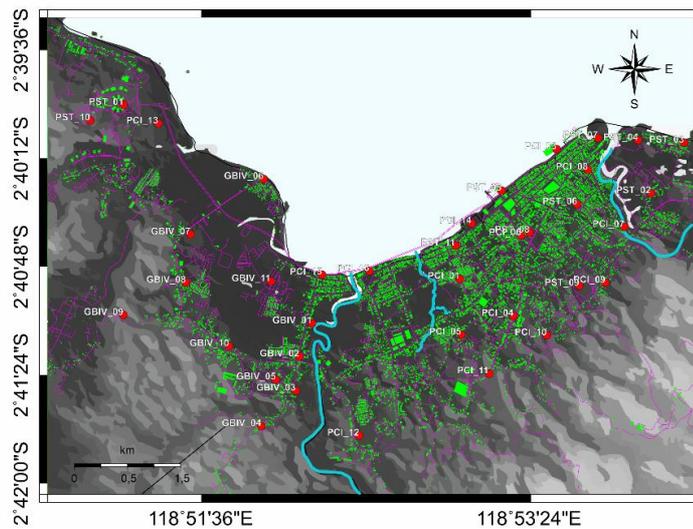
Data *microtremor* hanya mengandung sebagian kecil dari gelombang badan (gelombang S dan Gelombang P) dan kaya akan gelombang permukaan (gelombang *Love* dan gelombang *Rayleigh*) (Abdialim et al., 2021). Periode dominan suatu lokasi secara umum dapat diperkirakan dari periode puncak perbandingan H/V gelombang *microtremor* (Prasetyo, 2017). Sumber gelombang buatan seperti aktivitas manusia pada permukaan tanah cenderung memicu gelombang *Rayleigh* yang merambat pada lapisan tanah atau sedimen lunak. Getaran dari gelombang *Rayleigh* pada permukaan akan mempengaruhi perekaman komponen horizontal dan komponen vertikal, akan tetapi sinyal gelombang dari batuan dasar hampir tidak mempengaruhi komponen (Murphy & Shah, 1988). Perbandingan antara amplitudo komponen horizontal dan vertikal menunjukkan frekuensi resonansi dominan ( $f_0$ ) dan nilai faktor amplifikasi ( $A_0$ ). Perbandingan yang diperoleh dari spektrum HVSR dapat menggambarkan karakteristik struktur lapisan tanah (Capizzi & Martorana, 2022). Pada penelitian (Nakamura, 1997) dilakukan pendekatan untuk perilaku tanah di bawah beban dinamis dengan menggunakan hubungan teoritis antara nilai perpindahan horizontal dan indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ). Indeks kerentanan seismik merupakan parameter ( $K_g$ ) yang menyatakan tingkat kerawanan suatu wilayah dari ancaman resiko gempa.

Hasil pengolahan menggunakan metode HVSR akan dilakukan pemetaan secara spasial. Hal ini dilakukan untuk mengetahui distribusi nilai  $f_0$ ,  $A_0$ , dan  $K_g$  sebagai acuan pemetaan wilayah rawan di kota Mamuju. Kajian mengenai resiko ancaman tingkat guncangan gempabumi menjadi perlu dilakukan sebagai bentuk upaya mitigasi terhadap dampak yang timbul akibat bencana gempa bumi. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjelaskan dampak kerusakan parah yang diterima kota Mamuju akibat gempa bumi Mamuju-Majene.

## II. METODE

### 2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini menggunakan data mikrotremor pasca gempa bumi Mamuju-Majene sebanyak 39 titik pengukuran mikrotremor. Batasan wilayah penelitian yang digunakan merupakan wilayah perkotaan kota Mamuju dengan batas antara 2,73°-2,63° LS dan 118,82°-118,97° BT dengan luasan wilayah sebesar 22,131 km<sup>2</sup>. Gambar 1 memperlihatkan batasan wilayah dan 39 titik pengukuran yang digunakan dalam penelitian. Wilayah perkotaan digunakan sebagai batasan penelitian. Berdasarkan peta batasan wilayah penelitian terlihat jika area timur kota Mamuju memiliki zona terbangun yang padat. Wilayah dengan zona terbangun yang padat memiliki potensi kerawanan yang tinggi. Hal ini karena material runtuh dari konstruksi bangunan merupakan penyebab utama jatuhnya korban jiwa saat terjadi gempa bumi.



Gambar 1 Peta Batasan Wilayah Penelitian Pada Kawasan Perkotaan Mamuju

### 2.2 Metode HVSR

*Horizontal To Vertical Spectral Ratio* (HVSR) merupakan metode perbandingan amplitudo spektral komponen horizontal terhadap komponen vertikal dari gelombang dari alam atau *ambient vibration* yang direkam pada satu stasiun temporer. Metode HVSR pertama kali diperkenalkan oleh (Nogoshi, 1971) kemudian disempurnakan dan disebarluaskan oleh (Nakamura, 1989). Semakin lunak batuan dari suatu wilayah maka perbandingan komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya semakin besar (Siddiqi & Atkinson, 2002). Pada metode HVSR dilakukan perhitungan pada komponen horizontal dua komponen yang diukur yaitu komponen utara-selatan  $HNS_{(\omega)}$  dan komponen barat-timur ( $HWE_{(\omega)}$ ) dan dibagi dengan seprum gelombang komponen vertikal di permukaan ( $v_s$ ) sehingga persamaan HVSR dirumuskan sebagai:

$$SM_{(\omega)} = \sqrt{\frac{HSN_{(\omega)}^2 + HWE_{(\omega)}^2}{v_s}} \quad (1)$$

Parameter yang dapat digunakan untuk menentukan kerawanan seismik suatu wilayah adalah frekuensi dominan ( $f_0$ ), faktor amplifikasi ( $A_0$ ), periode dominan ( $T_0$ ), dan indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ). Frekuensi dominan ( $f_0$ ) diperoleh dari nilai puncak H/V. Sementara itu faktor amplifikasi ( $A_0$ ) dipengaruhi oleh kecepatan gelombang P ( $v_p$ ), kecepatan gelombang S ( $v_s$ ), densitas ( $\rho$ ), dan atenuasi gelombang geser ( $Q_s$ ) yang merepresentasikan tingkat gelombang mengalami amplifikasi di permukaan dalam skala 1-10. Konstanta regangan geser (*shear strain*)  $\gamma$  diperlukan untuk menghitung nilai faktor amplifikasi ( $A_0$ ) titik pengukuran. Pada *shear strain*  $\gamma \cong 1000 \times 10^{-6}$  menunjukkan jika karakter gelombang melewati medium elastis dan pada  $\gamma \geq 1000 \times 10^{-6}$  maka medium dan permukaan di atasnya akan terjadi deformasi dan keruntuhan yang besar (Nakamura, 2000). Tabel 1 memperlihatkan klasifikasi tanah kanai dan otome-nakajima berdasarkan nilai periode dominan.

**Tabel 1.** Klasifikasi Tanah Kanai dan Omote-Nakajima

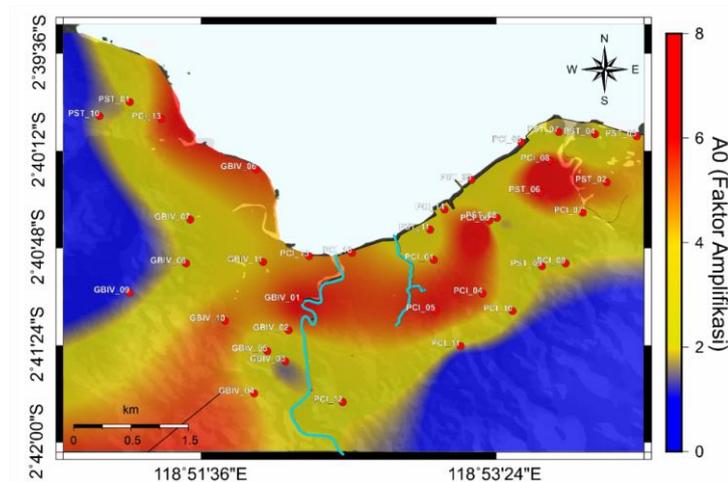
Kanai	Otome-Nakajima	Periode (s)	Keterangan	Karakteristik
Jenis I	Jenis A	0,05 – 0,15	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>hard sandy, gravel</i> , dll.	Keras
Jenis II			Batuan alluvial, dengan ketebalan 5 m. Terdiri dari <i>sandy – gravel, sandy hard clay, loam</i> , dll.	Sedang
Jenis III	Jenis B	0,25 – 0,40	Batuan alluvial, dengan ketebalan > 5m. Terdiri dari <i>sandy-gravel hard clay, loam</i> , dll.	Lunak
Jenis IV	Jenis C	> 0,40	Bahan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur, dll	Sangat Lunak

Hubungan antara periode dominan ( $T_0$ ) dengan tingkat kerawanan suatu wilayah berbanding lurus (Parwatiningtyas et al., 2013). Hal ini karena semakin tinggi nilai  $T_0$  semakin lunak tanah setempat yang mengindikasikan potensi amplifikasi saat terjadi gempa bumi. Pada penelitian (Nakamura, 1997) dilakukan pendekatan untuk perilaku tanah di bawah beban dinamis dengan menggunakan hubungan teoritis antara nilai perpidahan horizontal dan indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ). Indeks kerentanan seismik merupakan parameter ( $K_g$ ) yang menyatakan tingkat kerawanan suatu wilayah dari ancaman resiko gempa. Perubahan deformasi horizontal dapat terjadi pada batas elastisitas akibat pengaruh beban dinamis dengan nilai indeks  $K_g > 20$  masuk kedalam klasifikasi daerah rawan (Nakamura, 2008). Sedangkan deformasi elastis akan terjadi pada daerah dengan nilai indeks  $K_g < 20$ . Indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) merupakan hasil bagi antara kuadrat faktor amplifikasi terhadap faktor dominan yang diruumuskan sebagai berikut:

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

### III. HASIL DAN DISKUSI

Pemilihan 39 titik pengukuran berdasarkan dampak kerusakan dan medan yang dapat diakses untuk melakukan pengukuran. Gambar 2 memperlihatkan peta sebaran nilai faktor amplifikasi ( $A_0$ ) wilayah kota Mamuju. Nilai faktor amplifikasi bervariasi antara 1,01 hingga 7,69 dengan nilai faktor amplifikasi tertinggi berada di wilayah pesisir kota Mamuju.

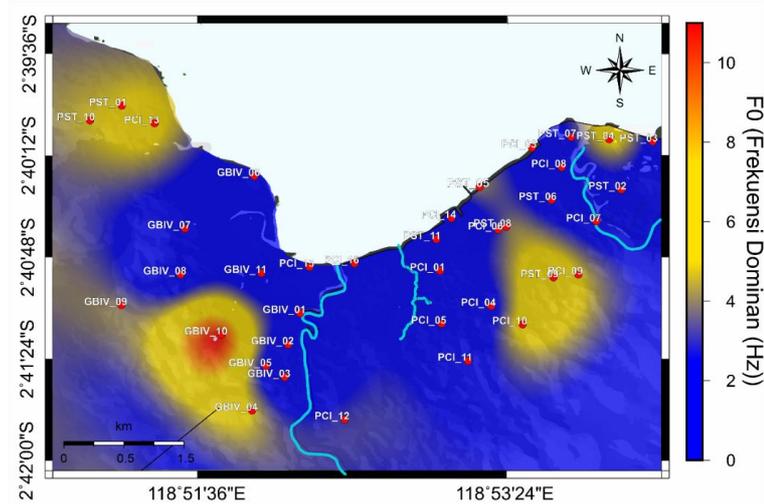


**Gambar 2** Peta Sebaran Nilai Faktor Amplifikasi ( $A_0$ ) Kota Mamuju

Wilayah pesisir kota Mamuju memiliki nilai faktor amplifikasi yang tinggi jika dibandingkan dengan wilayah sebelah selatan dari kota Mamuju. Nilai faktor amplifikasi tertinggi berada pada titik pengukuran PCI\_08 dengan nilai faktor amplifikasi sebesar 7,696 yang berada di sekitar wilayah Binanga. Wilayah dengan nilai faktor amplifikasi yang tinggi di kota Mamuju meliputi Kelurahan Simboro, Kelurahan Binanga, Kelurahan Rangas, dan Kelurahan Karema. Sebaran nilai faktor

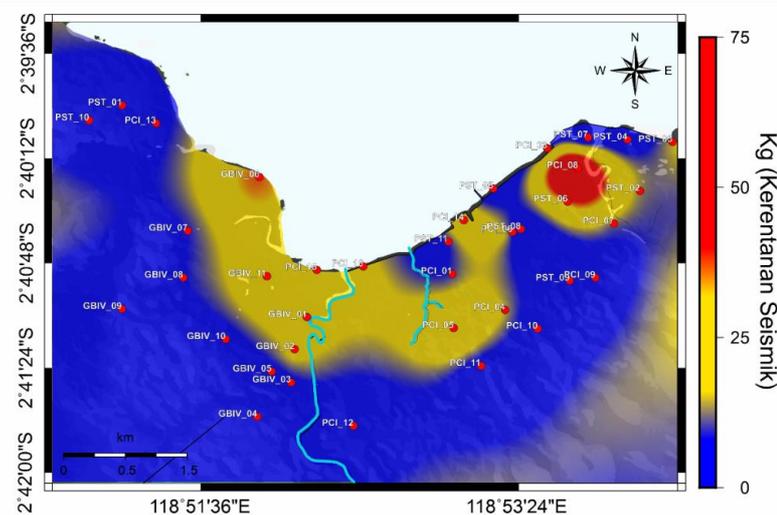
amplifikasi ( $A_0$ ) wilayah kota Mamuju memperlihatkan jika wilayah dengan faktor amplifikasi tinggi dominan berada di wilayah pesisir kota Mamuju.

Pada Gambar 3 memperlihatkan peta sebaran nilai frekuensi dominan wilayah kota Mamuju pasca gempa bumi. Berdasarkan hasil pengolahan dikehui jika nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) wilayah kota Mamuju bervariasi dari 0,608 Hz hingga 10,97 Hz dari 39 titik pengukuran. Dari hasil pengolahan menggunakan frekuensi dominan ( $f_0$ ) kedalaman sedimen di kota Mamuju berkisar antara 7,6 m – 130,3 m.



Gambar 3 Peta Sebaran Nilai Faktor Amplifikasi ( $f_0$ ) Kota Mamuju

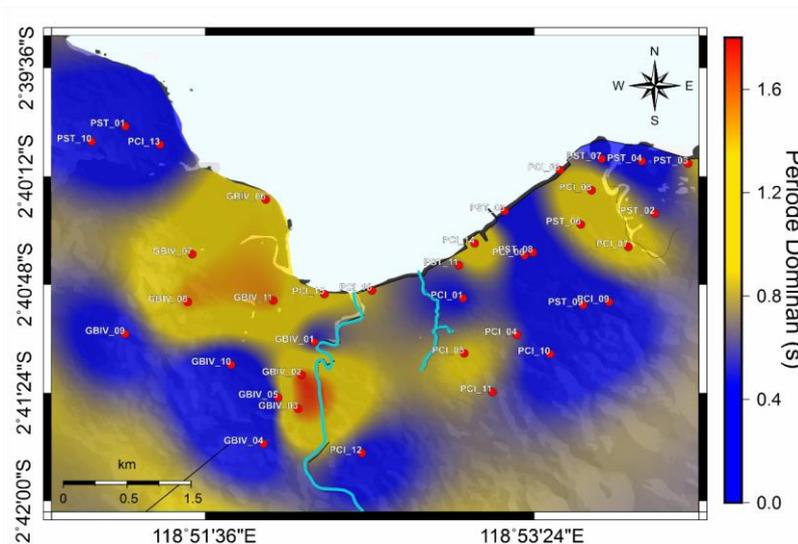
Pada Gambar 4 memperlihatkan peta sebaran nilai kerentanan seismik ( $K_g$ ) wilayah kota Mamuju. Pada wilayah kota Mamuju nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) bervariasi antara 0,468 hingga 73,886 dari 39 titik pengukuran di lapangan. Wilayah dengan indeks kerentanan seismik tertinggi terukur di titik pengukuran PCI\_08 dengan nilai sebesar 73,886 yang berada di Kelurahan Binanga.



Gambar 4 Peta Sebaran Kerentanan Seismik ( $K_g$ ) Kota Mamuju

Selain itu pada titik pengukuran GBIV\_06 juga menjadi wilayah dengan kerentanan seismik yang cukup tinggi sebesar 36,994 yang berada sekitar wilayah pelabuhan ferry Mamuju. Periode dominan ( $T_0$ ) wilayah kota Mamuju bervariasi antara 0,09 s hingga 1,64 s dengan periode dominan tertinggi terukur pada titik GBIV\_02. Pada Gambar 5 diperlihatkan peta sebaran nilai periode dominan ( $T_0$ ) wilayah kota Mamuju. Titik pengukuran dengan nilai periode dominan tertinggi ( $T_0$ ) berada di daerah kecamatan Simboro. Pada wilayah pesisir kota Mamuju didominasi oleh jenis tanah tipe B dan C yang masuk kedalam klasifikasi jenis tanah lunak. Jika melihat morfologi dan kondisi tanah setempat wilayah pesisir pantai kota Mamuju tersusun dari sedimentasi *delta* dan sedimen *aluvial* yang menyebabkan wilayah pesisir jauh lebih lunak jika dibandingkan pada wilayah sebelah selatan Kota

Mamuju. Jika dibandingkan dengan peta geologi wilayah kota Mamuju (Ratman & Atmawinata, 1993) wilayah Mamuju didominasi oleh jenis batuan gunung api adang (Tma). Jenis batuan ini tersusun atas tufa, lava, dan breksi gunung api terutama bersusunan leusit basal. Pada peta distribusi nilai  $A_0$  wilayah kota mamuju menunjukkan jika wilayah dengan potensi guncangan yang besar berada di wilayah pesisir yang disebabkan oleh endapan sedimen dan jenis tanah yang lunak sebagai akibat dari sedimentasi delta aliran sungai (Liang et al., 2018). Daerah dengan nilai faktor amplifikasi yang tinggi memiliki resiko terjadinya penguatan guncangan gempa bumi akibat medium yang dilalui oleh gelombang (Partono et al., 2013).



Gambar 5 Peta Sebaran Nilai Periode Dominan ( $T_0$ ) Kota Mamuju

Sehingga lebih rentan terjadi kerusakan bangunan ketika terjadi gempa bumi. Hal ini karena pada medium yang lunak ikatan antar partikel tanah lemah yang menyebabkan gerakan osilasi dari gelombang seismik dari sumber ke permukaan mengalami amplifikasi gelombang.

#### IV. KESIMPULAN

Kerentanan seismik wilayah Kota Mamuju masuk kedalam tingkat wilayah rentan terhadap dampak kejadian seismik. Nilai faktor amplifikasi ( $A_0$ ) relatif cukup tinggi dengan rentang nilai antara 1,01 hingga 7,69. Nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) bervariasi antara 0,608 Hz hingga 10,97 Hz. Nilai indeks kerentanan seismik ( $K_s$ ) berkisar antara 0,468 hingga 73,886, dan nilai periode dominan ( $T_0$ ) bervariasi antara 0,09 s hingga 1,64 s. Potensi kerentanan seismik wilayah kota Mamuju juga diakibatkan oleh ketebalan sedimen yang berkisar antara 7,6 m – 130,3 m. Hal ini mengindikasikan jika wilayah kota Mamuju dengan  $f_0$  rendah memiliki ketebalan sedimen yang tebal dengan potensi amplifikasi yang besar.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), khususnya bidang seismologi teknik yang telah menyediakan data mikrotremor. Terima kasih juga kepada dosen pembimbing program pascasarjana Universitas Negeri Makassar dalam membimbing penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abdialim, S., Hakimov, F., Kim, J., Ku, T., & Moon, S.-W. (2021). Seismic site classification from HVSR data using the Rayleigh wave ellipticity inversion: a case study in Singapore. *Earthquakes and Structures*, 21(3), 231–238.
- Asten, M. W., Askan, A., Ekincioglu, E. E., Sisman, F. N., & Ugurhan, B. (2014). Site characterisation in north-western Turkey based on SPAC and HVSR analysis of microtremor noise. *Exploration Geophysics*, 45(2), 74–85.
- Capizzi, P., & Martorana, R. (2022). Analysis of HVSR data using a modified centroid-based algorithm for near-surface geological reconstruction. *Geosciences*, 12(4), 147.

- Gallipoli, M. R., Mucciarelli, M., Gallicchio, S., Tropeano, M., & Lizza, C. (2004). Horizontal to vertical spectral ratio (HVSr) measurements in the area damaged by the 2002 Molise, Italy, earthquake. *Earthquake Spectra*, 20(1\_suppl), 81–93.
- Guo, Z., Aydin, A., Huang, Y., & Xue, M. (2021). Polarization characteristics of Rayleigh waves to improve seismic site effects analysis by HVSr method. *Engineering Geology*, 292, 106274.
- Hakimov, F., Domej, G., Ischuk, A., Reicherter, K., Cauchie, L., & Havenith, H.-B. (2021). Site amplification analysis of Dushanbe City Area, Tajikistan to support seismic microzonation. *Geosciences*, 11(4), 154.
- Hamilton, W. B. (1979). *Tectonics of the Indonesian region* (Issue 1078). US Govt. Print. Off.
- Liang, D., Gan, F., Zhang, W., & Jia, L. (2018). The application of HVSr method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1–9.
- Martorana, R., Capizzi, P., D'Alessandro, A., Luzio, D., Di Stefano, P., Renda, P., & Zarcone, G. (2018). Contribution of HVSr measures for seismic microzonation studies. *Annals of Geophysics*.
- Massinai, M. A. (2018). Tektonik dan Pengaruhnya Terhadap Potensi Bencana Kebumihan di Wilayah Tana Toraja. *Neutrino*, 1(2), 25–31.
- Mucciarelli, M., & Gallipoli, M. R. (2001). A critical review of 10 years of microtremor HVSr technique. *Boll. Geof. Teor. Appl*, 42(3–4), 255–266.
- Murphy, J. R., & Shah, H. K. (1988). An analysis of the effects of site geology on the characteristics of near-field Rayleigh waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), 64–82.
- Nakamura, Y. (1989). *Hv\_1989.Pdf*.
- Nakamura, Y. (1997). Seismic vulnerability indices for ground and structures using microtremor. *World Congress on Railway Research in Florence, Italy*.
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, 2656.
- Nakamura, Y. (2008). On the H/V Spectrum, The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October.
- Nogoshi, M. (1971). n the amplitude characteristics of microtremor, Part II. *Journal of the Seismological Society of Japan*, 24, 26–40.
- Partono, W., Irsyam, M., RW, S. P., & Maarif, S. (2013). Aplikasi metode HVSr pada perhitungan faktor amplifikasi tanah di Kota Semarang. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 19(2), 125–134.
- Parwatiningsy, D., Ambarsari, E. W., Marlina, D., & Wiratomo, Y. (2013). Calculation Of Disaster Risk Value In The Prospect Mining Area, Blitar District, East Java Using Microtremor Analysis. *The 3 Rd International Symposium For Sustainable Humanosphere (ISSH)*, 46–55.
- PRASETYO, D. W. I. (2017). Pemetaan Persebaran Nilai Frekuensi Alamiah Dan Amplifikasi Menggunakan Metode HVSr Dan Inversi HVSr Daerah Pidie.
- Ratman, N., & Atmawinata, S. (1993). Peta Geologi Indonesia Lembar Mamuju dan Sekitarnya, Sulawesi. *Skala (1: 250.000), Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi, Bandung*.
- Siddiqi, J., & Atkinson, G. M. (2002). Ground-motion amplification at rock sites across Canada as determined from the horizontal-to-vertical component ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(2), 877–884.
- Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S., & Gazdek, M. (2017). HVSr analysis of seismic site effects and soil-structure resonance in Varaždin city (North Croatia). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 666–677.