

## Implementasi Matrix Laboratory Dalam Pengolahan Data Mikrotremor Menggunakan Metode Hvsr: Studi Kasus Di Daerah Pesisir Kecamatan Moramo

### *Implementation Of Matrix Laboratory In Microtremor Data Processing Using Hvsr Method: A Case Study In The Coastal Area Of Moramo Sub-District*

Sitti Fauziah Faradilla<sup>1</sup>, La Hamimu<sup>2\*</sup>, La Ode Ihksan Juarzan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Geofisika Universitas Halu Oleo; Kampus Hijau Bumi Tridharma; Kota Kendari

#### Article history:

Received: 21 December 2023

Accepted: 26 August 2024

#### Keywords:

Microtremor, HVSR, MATLAB, Mapping Toolbox.

#### Correspondent author:

[lahamimu@uho.ac.id](mailto:lahamimu@uho.ac.id)

**Abstrak.** Karakteristik getaran di suatu wilayah bumi sangat dipengaruhi oleh parameter fisik dan geologi yang unik, sehingga memberikan respons yang beragam terhadap gangguan alam dan antropogenik. Penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pemahaman geologi dan respons getaran, tetapi juga memaparkan metodologi yang dapat diterapkan secara luas dalam penelitian seismik pasif. Metode analisis dalam penelitian ini menggunakan bahasa pemrograman MATLAB untuk pengolahan sinyal mikrotremor. Algoritma penelitian ini mampu menghasilkan model yang mengungkap karakteristik frekuensi dan statistik dari sinyal mikrotremor, outputnya cukup serupa dengan perangkat lunak *open-source* GEOPSY dalam pengolahan HVSR. Terdapat 15 data penelitian dengan tipe *.msd* sebagai representasi 15 titik pengukuran yang tersebar di kecamatan moramo. Statistik yang diperoleh menunjukkan frekuensi dominan tanah ( $F_0$ ), faktor amplifikasi ( $A_0$ ), dan indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) di Daratan Pesisir Kecamatan Moramo berturut – turut berkisar antara 0,519792 - 14,692654 Hz, 2,250096 - 6,370357 kali penguatan, dan 0,500194 - 50,516144  $s^2/cm$ . Hasil ini cukup serupa dengan penelitian terdahulu oleh RIVAL (2023) yang menggunakan perangkat lunak GEOPSY sebagai alat analisisnya. Sebaran statistik yang berupa frekuensi dominan ( $F_0$ ), amplifikasi ( $A_0$ ) dan indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) kemudian diinterpolasi dan di *overlay* dengan geodata daerah penelitian menggunakan *Mapping Toolbox* yang juga dalam lingkungan MATLAB

**Abstract.** *Vibration characteristics in a region of the earth are strongly influenced by unique physical and geological parameters, resulting in diverse responses to natural and anthropogenic disturbances. This research not only*

contributes to the understanding of geology and vibration response, but also presents a methodology that can be widely applied in passive seismic research. The analysis method in this study uses MATLAB programming language for microtremor signal processing. The algorithm of this research is able to produce a model that reveals the frequency and statistical characteristics of the microtremor signal, the output is quite similar to the open-source software GEOPSY in HVSR processing. There are 15 research data with type .msd as a representation of 15 measurement points scattered in Moramo sub-district. The statistics obtained show that the dominant ground frequency ( $F_0$ ), amplification factor ( $A_0$ ), and seismic susceptibility index ( $K_g$ ) in the Coastal Land of Moramo Subdistrict range from 0.519792 - 14.692654 Hz, 2.250096 - 6.370357 times amplification, and 0.500194 - 50.516144  $s^2/cm$ , respectively. These results are quite similar to previous research by RIVAL (2023) who used GEOPSY software as his analysis tool. The statistical distribution in the form of dominant frequency ( $F_0$ ), amplification ( $A_0$ ) and seismic susceptibility index ( $K_g$ ) were then interpolated and overlaid with the geodata of the study area using the Mapping Toolbox which is also in the MATLAB environment.

© 2024 JRGI (Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia)

## 1. PENDAHULUAN

Karakteristik getaran di suatu wilayah bumi sangat dipengaruhi oleh parameter fisik dan geologi yang unik, yang memberikan respons yang beragam terhadap gangguan alam dan antropogenik. Berdasarkan landasan teori lempeng tektonik, Indonesia, terutama Sulawesi, terletak di kawasan Cincin Api Pasifik, di mana pertemuan tiga lempeng tektonik utama terjadi, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik (Akbar, 2018). Dampak dari aktivitas tektonik ini menciptakan sesar-sesar aktif di Pulau Sulawesi, khususnya di Sulawesi Tenggara, yang menjadi fokus penelitian. Struktur utama di wilayah ini didominasi oleh sesar geser mengiri berarah barat laut –

tenggara, yang terbukti sebagai sumber seismisitas dan potensi tanah longsor.

Penelitian ini bertujuan mendalami kondisi geologi Sulawesi Tenggara, dengan fokus pada Kabupaten Konawe Selatan yang teridentifikasi sebagai wilayah dengan tingkat bahaya tanah longsor pada kelas rendah yaitu 17.841 Ha (BNPB, 2021). Pengamatan terhadap respons gangguan alam dan antropogenik dilakukan melalui metode pengukuran mikrotremor, sebuah teknik rekam getaran yang digunakan untuk memperkirakan tingkat kerusakan yang timbul akibat gempa bumi (Arintalofa, 2020).

Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) menjadi metode utama dalam menganalisis data mikrotremor. Nakamura (1989) telah membuktikan bahwa rasio dari

spektrum vertikal dan horizontal dari mikrotremor mengalami peningkatan pada frekuensi resonansi dan akan memperlihatkan puncak pada frekuensi tersebut. Pengamatan ini yang menjadi dasar bagi popularitas metode HVSR. Pentingnya informasi bawah permukaan yang diperoleh dari HVSR dalam konteks risiko gempa dan tanah longsor menjadikan penelitian ini relevan dan bermakna.

Dalam pemrosesan data penelitian, perangkat lunak MATLAB dipilih sebagai alat utama. Keunggulan MATLAB dalam perhitungan numerik, visualisasi data, dan fleksibilitas pengembangan model matematika dan algoritma memastikan kehandalan dalam mengolah data seismik pasif.

Dengan pendekatan ini, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pemahaman geologi dan respons getaran, tetapi juga memaparkan metodologi yang dapat diterapkan secara luas dalam penelitian seismik pasif. Selain itu, penggunaan perangkat lunak sumber terbuka seperti MATLAB memfasilitasi transparansi dan kemungkinan modifikasi yang lebih besar dalam pengolahan data seismik pasif.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Mikrotremor

Beberapa peneliti menyampaikan pendapatnya mengenai definisi dari mikrotremor. Menurut Tokimatsu (2004), Mikrotremor atau yang biasa disebut dengan *ambient vibration* adalah getaran tanah dengan amplitudo yang dapat ditimbulkan oleh peristiwa alam ataupun buatan, seperti angin,

gelombang laut atau getaran kendaraan yang bisa menggambarkan kondisi geologi suatu wilayah dekat permukaan. Rahmaningtyas (2017) menyatakan, mikrotremor juga dapat diartikan sebagai getaran harmonik yang disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah atau kegiatan alam lainnya yang terjadi secara kontinyu yang terjebak di lapisan sedimen permukaan, kemudian dipantulkan oleh bidang batas lapisan dengan frekuensi yang tetap.

### 2.2. Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR)

Nakamura (2000) memaparkan HVSR merupakan metode yang didasarkan pada asumsi bahwa rasio spektrum horizontal dan vertikal dari getaran permukaan merupakan fungsi perpindahan. Metode HVSR mengestimasi nilai frekuensi dan amplifikasi keadaan geologi setempat dengan membandingkan faktor amplifikasi dari arah horizontal dengan faktor amplifikasi dari (1) vertikal untuk mendapatkan nilai frekuensi dominan pada suatu daerah.

$$HVSR = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} = \frac{\sqrt{[(S_{North-South})^2 + (S_{East-West})^2]}}{S_{Vertikal}} \quad (1)$$

### 2.3. Frekuensi Dominan

Nilai frekuensi dominan tanah dapat menunjukkan jenis dan karakteristik batuan. Pada formasi geologi yang sama akan didapatkan frekuensi dominan yang berbeda, hal ini dikarenakan perbedaan ketebalan sedimentasi pada daerah tersebut. Nilai frekuensi dominan yang relatif tinggi mencerminkan material batuan masif yang terdapat pada lokasi perbukitan struktural (Ngadmanto dkk., 2013).

## 2.4. Amplifikasi

Amplifikasi dapat terjadi akibat dari adanya perbesaran gelombang seismik karena perbedaan yang mencolok antar lapisan. Artinya gelombang seismik akan mengalami perbesaran jika melalui medium yang lebih lunak dari pada medium awal yang dilaluinya. Semakin besar perbedaan itu maka perbesaran gelombang semakin besar pula. Berkurangnya kepadatan batuan meningkatkan nilai faktor amplifikasi. Hal ini disebabkan oleh sedimen lunak yang memperlambat durasi gelombang yang menjalar di daerah tersebut, sehingga terjadi guncangan terhadap bangunan, begitu juga sebaliknya (Hartati, 2014).

## 2.5. Indeks Kerentanan Seismik

Indeks kerentanan seismik merupakan suatu parameter yang berhubungan dengan tingkat kerawanan suatu wilayah saat terjadi gempa. Indeks kerentanan seismik yang tinggi memiliki nilai frekuensi dominan yang relatif rendah artinya pada lapisan sedimen yang relatif cukup tebal menutupi batuan dasar akan menunjukkan tingkat kerentanan seismik yang tinggi, selain itu faktor penguatan gelombang atau disebut faktor amplifikasi yang tinggi akan meningkatkan nilai indeks kerentanan seismik. Secara matematis hubungan indeks kerentanan seismik, frekuensi dominan dan faktor amplifikasi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$K_g = \frac{A_0^2}{F_0} \quad (2)$$

Dimana  $K_g$  adalah indeks kerentanan seismik,  $A_0$  adalah faktor amplifikasi, dan  $F_0$  adalah frekuensi dominan

## 2.6. Nyquist Sampling

Teorema *Nyquist Sampling* menjelaskan hubungan antara laju sampel dan frekuensi sinyal yang diukur. Teorema ini menyatakan bahwa laju sampel  $f_s$ , harus lebih besar atau sama dengan dua kali komponen frekuensi tertinggi yang diinginkan dalam sinyal yang diukur. Frekuensi ini sering disebut sebagai frekuensi Nyquist,  $f_N$ .

$$f_s \geq 2 * f_N \quad (3)$$

Jika sinyal diambil sampelnya pada laju sampling yang lebih kecil dari dua kali frekuensi Nyquist, komponen frekuensi yang lebih rendah akan muncul pada data yang diambil sampelnya. Fenomena ini disebut sebagai *aliasing*.

## 2.7. Low-pass Filter

*Filter low-pass* (LPF) adalah filter yang melewatkan sinyal dengan frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi *cut-off* tertentu dan melemahkan sinyal dengan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi *cut-off*. (Farida, 2017). LPF *Butterworth* ini memiliki respon *flat* pada daerah *passband* maupun *stopband*.

## 2.8. Windowing

*Tukey window* (*tapered cosine window*) adalah fungsi *window* yang umum digunakan dalam pemrosesan gerakan tanah. Lebih banyak *window* menghasilkan statistik yang lebih kuat. Namun, semakin banyak jumlah *window*, semakin pendek durasi *window*, yang mengurangi resolusi frekuensi rendah HVSR. *Tukey window* dapat dirumuskan sebagai berikut,

$$w(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \pi \left( \frac{2n}{\alpha(N-1)} - 1 \right) \right) \right], & \frac{\alpha(N-1)}{2} \leq n \leq (N-1) \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) \\ 1, & 0 \leq n < \frac{\alpha(N-1)}{2} \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \pi \left( \frac{2n}{\alpha(N-1)} - \frac{2}{\alpha} + 1 \right) \right) \right], & (N-1) \left( 1 - \frac{\alpha}{2} \right) < n \leq (N-1) \end{cases} \quad (4)$$

Menggunakan parameter  $\alpha$  untuk mengontrol bentuk jendela yang merupakan rasio periode terhadap durasi *window*, dengan  $n$  sebagai indeks sampel, dan  $N$  adalah total jumlah sampel dalam *window* (Wang, 2020).

### 2.9. FFT (Fast Fourier Transform)

*Fast Fourier Transform* (FFT) adalah teknik perhitungan operasi matematika yang digunakan untuk mentransformasi sinyal analog menjadi sinyal digital berbasis frekuensi. *Fast Fourier Transform* (FFT) membagi sebuah sinyal menjadi frekuensi yang berbeda-beda dalam fungsi eksponensial yang kompleks (kusuma, 2021).

Transformasi fourier  $F(\omega)$  dari sebuah fungsi waktu kontinyu  $F(t)$  didefenisikan sebagai berikut,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t)e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

Dimana  $\omega$  sama dengan  $2\pi f$  (variabel frekuensi sudut dengan satuan radian per detik).

### 2.10. Smoothing Konno-Ohmachi

*Konno-Ohmachi* merupakan fungsi dalam melakukan *smoothing* data mikrotremor untuk mendapat nilai spektrum H/V yang lebih halus ketika mencari rata-rata dari semua *window* pada satu titik. Persamaan *Smoothing Konno-Ohmachi* yang dipaparkan Konno dan Ohmachi (1998) adalah sebagai berikut,

$$W_B(f, f_c) = \left[ \sin \left( \frac{\log_{10} \left( \frac{f}{f_c} \right)^b}{\log_{10} \left( \frac{f}{f_c} \right)^b} \right) \right]^4 \quad (6)$$

Dengan  $b$  adalah Koefisien untuk lebar *bandwidth*,  $f_c$  sebagai Frekuensi Pusat yang dihaluskan dan  $f$  adalah Frekuensi.

### 2.11. Nilai Rata-Rata (Mean)

Nilai rata-rata merupakan nilai yang menjadi acuan dari persebaran frekuensi rata-rata dari setiap pengolahan per-*window* setelah dilakukan pengolahan data FFT. *Mean* pada dasarnya merupakan jumlah nilai dibagi dengan jumlah individu (Syafрил, 2019). Rumus mencari rata-rata (*mean*) yaitu,

$$\text{Rata - rata } (\bar{x}) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N} \quad (7)$$

Dengan  $x_i$  sebagai Data dari satu *window* dan  $N$  adalah Banyak *window* yang dilakukan dalam pengolahan data.

#### 2.11.1. Nilai Standar Deviasi

Standar Deviasi pada dasarnya dapat dikatakan sebagai akar dari jumlah deviasi kuadrat yang dibagi dengan banyaknya data dalam suatu distribusi nilai (Syafрил, 2019). Sebagian besar nilai data cenderung berada dalam satu standar deviasi dari *mean*. Standar deviasi dirumuskan sebagai berikut,

$$\text{Standar deviasi} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|^2}{N-1} \quad (8)$$

Dengan  $x_i$  sebagai Data dari satu *window*,  $\bar{x}$  sebagai Hasil rata-rata dari data semua *window* dan  $N$  adalah Banyak *window* yang dilakukan dalam pengolahan data.

#### 2.11.2. Mapping Toolbox

*Mapping Toolbox* berisi sejumlah fitur yang memperluas kemampuan MATLAB di bidang analisis data geografis dan pembuatan *output* peta. *Mapping Toolbox* memungkinkan untuk memuat data vektor dan raster dari file dalam

format yang berbeda atau dari server peta web, memfasilitasi manipulasi data geospasial, memfasilitasi kombinasinya dengan layer dari sumber yang berbeda ke dalam tampilan akhir peta tunggal dan banyak lagi (Snopl, 2022)

### 3. METODE PENELITIAN

Pengumpulan data mikrotremor dilakukan secara intensif selama empat hari berturut-turut, tepatnya pada tanggal 24-27 Agustus 2022. Sebanyak 15 titik pengukuran yang dipilih secara strategis tersebar di sepanjang daerah pesisir, dan penggunaan peralatan canggih seperti *Digital Portable Seismograph*, *Seismometer*, dan *Global Positioning System* (GPS) menjadi kunci dalam memastikan akurasi pengukuran dan pemetaan lokasi yang tepat.

Selanjutnya, data yang terkumpul mengalami tahapan analisis di Laboratorium Komputer Teknik Geofisika Universitas Halu Oleo. Metode yang diterapkan adalah *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Proses analisis melibatkan langkah-langkah seperti pembacaan data MiniSEED, penyortiran, dan penerapan *low-pass filter* guna mengurangi noise yang dapat memengaruhi akurasi hasil. Pengaplikasian *Fast Fourier Transform* (FFT) menjadi langkah kritis dalam mendapatkan kurva H/V yang memberikan gambaran lebih mendalam mengenai frekuensi dominan dan amplifikasi tanah di daerah penelitian.

Tahap selanjutnya melibatkan perhitungan Indeks Kerentanan Seismik (Kg) berdasarkan hasil frekuensi dominan dan amplifikasi. Hasil dari analisis ini memberikan gambaran yang

lebih khusus mengenai respons tanah terhadap getaran mikrotremor di Kecamatan Moramo.

Untuk lebih menggambarkan temuan penelitian secara spasial, pembuatan peta sebaran nilai frekuensi dominan dilakukan menggunakan MATLAB dan *Mapping Toolbox*. Langkah-langkah ini mencakup persiapan data spasial yang melibatkan pembacaan data dari file SHP. Penggunaan *Mapping Toolbox* memungkinkan tampilan data dalam bentuk peta yang memberikan gambaran visual yang jelas mengenai distribusi nilai frekuensi dominan, amplifikasi dan indeks kerentanan seismik di seluruh wilayah

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Implementasi MATLAB dalam Pengolahan Data

Implementasi algoritma penelitian ini dimulai dengan tahap pembacaan data mikrotremor dalam format Miniseed (MSD) menggunakan kode program *readmseed.m* pada **Gambar 1**. Melalui kode ini, data mikrotremor diorganisir menjadi tiga komponen utama: Timur-Barat (E), Utara-Selatan (N), dan Vertikal (Z), bersama dengan informasi waktu terkait. Dalam analisis kode tersebut, *readmseed.m* memanfaatkan sejumlah fungsi MATLAB, seperti *rdmseed* untuk membaca file miniSEED yang dikembangkan oleh François Beauducel, serta *datetime* untuk mengelola data waktu.

Pernyataan *if* dan *try* digunakan untuk memeriksa dan mengedit waktu data, memberikan solusi efisien dan ekspresif dengan kemampuan adaptasi menggunakan argumen variabel dan opsi "*edit*". Pentingnya

pengaturan waktu terkait dengan instrumen mikrotremor menjadi jelas, mengingat beberapa kendala waktu yang mungkin terjadi selama pengukuran. *Output* dari fungsi ini berupa struktur data mikrotremor yang terformat dengan baik bersama waktu yang sesuai yang dapat dilihat pada **Gambar 8**.

**Tabel 1.** Rentang waktu dan jumlah data dalam pengolahan data mikrotremor

Titik	[Jam Menit]	Jumlah Data
T1.MSD	[10 21]	134.200
T2.MSD	[10 21]	186.700
T3.MSD	[10 17]	181.300
T4.MSD	[10 27]	182.200
T5.MSD	[10 21]	181.400
T6.MSD	[10 31]	185.200
T7.MSD	[10 47]	184.600
T8.MSD	[10 24]	181.700
T9.MSD	[10 17]	183.900
T10.MSD	[10 47]	181.500
T11.MSD	[10 25]	179.300
T12.MSD	[10 45]	185.100
T13.MSD	[10 33]	181.300
T14.MSD	[10 15]	186.000
T15.MSD	[10 15]	185.700

Selanjutnya, penjelasan **Tabel 1** menyoroti keberhasilan algoritma dalam menangani volume data yang signifikan, yang dapat mencapai ratusan ribu data per titik pengukuran yakni berkisar antara 134.200 data hingga 186.700 data selama kurang lebih 30 menit perekaman. Pernyataan ini mengkonfirmasi keandalan dan efisiensi algoritma dalam membaca dan mengelola informasi yang diperlukan.

Implementasi *low-pass filter* menggunakan *filtfilt* dilakukan melalui *function lpfilter.m* pada **Gambar 2**, memastikan eliminasi efek *delay fase* untuk menghasilkan data yang akurat. Fungsi ini menerima dua parameter input yaitu *data* (struktur data yang berisi komponen-komponen E, N, dan Z) dan *design* (parameter desain untuk *low-pass filter*). Penggunaan desain filter dalam MATLAB menerapkan filter *lowpass IIR (Infinite Impulse Response)* dengan orde 8. Parameter lainnya adalah *Passband Frequency* sebesar 15 Hz, dengan *Passband Ripple* setidaknya 0,2 dan *Sample Rate* sebesar *Frequency Sampling*.

Mengenai teorema sampel Nyquist, pada pengolahan data ini *frequency sampling* ( $f_s$ ) yang digunakan untuk tiap pengukuran sebesar 100 Hz. Nilai ini diperoleh berdasarkan persamaan 3, dimana nilai *frequency sampling* harus lebih besar atau sama dengan dua kali *frequency nyquist* ( $f_N$ ). Pada **Gambar 11, 12, dan 13**, disajikan hasil plot dalam domain frekuensi tiap komponen dengan maksimum frekuensi 46 Hz.

Pada **Gambar 9**, puncak atau tegangan maksimum baik positif maupun negatif lebih kecil daripada puncak atau tegangan maksimum sebelum hasil filtrasi. Hasil ini menunjukkan proses filtrasi terhadap bentuk gelombang sinyal mengeliminasi atau meredam komponen frekuensi dan amplitudo yang tinggi. Hal ini terlihat jelas pada hasil plot tiap komponen, yakni pada **Gambar 10**, di mana warna merah mewakili hasil filtrasi, sedangkan warna hijau mewakili sinyal mentah mikrotremor

## Cuplikan kode 1: readmseed.m

```
%author: Sitti Fauziah Faradilla & Sidratul Akbar
%created: 2023-06-27
%updated: 2023-09-09

1 function varargout = readmseed (varargin)
2   X = rdmsseed (varargin {1}, 'simple'); %function rdmsseed from
   % François Beauducel
3   if any (strcmpi(varargin, 'edit'))
4     try
5       t = datetime (X(1).t, "ConvertFrom", "datenum")+...
           hours (varargin {2}(1))-minutes(varargin {2}(2));
6     catch
```

Gambar 1. Kode program pembacaan data Miniseed

## Cuplikan kode 2: lpfilter.m

```
%author: Sitti Fauziah Faradilla & Sidratul Akbar
%created: 2023-06-27
%updated: 2023-09-09

1 function output = lpfilter (data, design)
2   filtered.E = filtfilt (design, data.E);
3   % do the same for component N & Z
4   ...
5   output = filtered
```

Gambar 2. Kode program lowpass filter

## Cuplikan kode 3: windowing.m

```
%author: Sitti Fauziah Faradilla & Sidratul Akbar
%created: 2023-06-27
%updated: 2023-09-09

1 function varargout = windowing (signal, t, duration, fs, width, lim)
2   ...
3   for j = 1:numSegments
4     switch j
5       case 1
6         q = (t >= ft) & ((t - ft) <= seconds(duration));
7         otherwise
8           ft = t (idx);
9           q = (t >= ft) & ((t - ft) >= seconds(duration));
10    end
11    if max(signal(1).data(q)) < lim(1) && min(signal(1).data(q)) > -lim(2)
12      if nargin > 4
13        method = tukeywin(length(output(1).signalSegment{j}), width/100)';
14      ...
15    varargout{1} = output;
```

Gambar 3. Kode program pemisahan segmen sinyal

**Cuplikan kode 4: kohmachi.m**

```

%author: Sitti Fauziah Faradilla & Sidratul Akbar
%created: 2023-07-02
%updated: 2023-09-10
1 function out = kohmachi(signal,freq,k)
2   ref_z = 0.5:0.001:2;
3   ref_array = smoothArray(k); %is the pre-calculated smoothing window
   %values from Jian Shi
4   y = zeros(1,length(freq));
5   for i = 1 : length(freq)
6     w = zeros(1,length(freq));
7     fc = freq(i);

```

**Gambar 4.** Kode program smoothing data**Cuplikan kode 5: hv.m**

```

%author: Sitti Fauziah Faradilla & Sidratul Akbar
%created: 2023-07-09
%updated: 2023-09-10
1 function varargout = hv(signal,width,fs)
2   ...
3   h = sqrt(((component{1}.^2)+(component{2}.^2))./2);
4   hs = kohmachi(h,f,width);
5   vs = kohmachi(component{3},f,width);
6   output(1).hv{j} = hs ./ vs;
7   mean = mean + log(output(1).hv{j});
8 end

```

**Gambar 5.** Kode program menghitung rasio H/V**Cuplikan kode 6: hvsr.m**

```

%author: Sitti Fauziah Faradilla & Sidratul Akbar
%created: 2023-07-09
%updated: 2023-12-19
1 Mn_log = mean(hv_log{i});
2 sdt = 0;
3   for j = 1:length(hv_log{i})
4     sdt = sdt+((hv_log{i}(j)-(mn_log))^2);
5   end
6   sd_log_hv = (sdt/(length(hv_log{i})-1));
7   mn_add_sd(i) = (mn_log+(sd_log_hv)*(+ 1.96));
8   mn_sub_sd(i) = (mn_log-(sd_log_hv)*(+ 1.96));

```

**Gambar 6.** Kode program menghitung standar deviasi

```

Cuplikan kode 7: gridding.m

%author: Sitti Fauziah Faradilla & Sidratul Akbar
%created: 2023-11-21
%updated: 2023-11-22
1 data = readcell('data.xlsx');
2 [xq, yq] = meshgrid(linspace(min(x_coor), max(x_coor), 500), linspace...
    (min(y_coor), max(y_coor), 500));
3 interpolate = griddata(x_coor, y_coor, f0, xq, yq, 'cubic');
4 shp = shaperead('Desa_Penelitian.shp');
5 Interpolate(~in) = NaN;
6 Contourf(xq,yq,interpolate)
7 hc = colorbar;
8 xlabel(hc,'Nilai F0')
9 Legend([h1, h2], 'Daerah Penelitian', 'Titik Pengukuran','Location', ...
    'northeast')

```

**Gambar 7.** Kode program membuat peta sebaran

Oleh karena proses pengambilan sampel yang terbatas oleh waktu, muncul diskontinuitas pada awal dan akhir data yang di kompresi dengan menerapkan prosedur *windowing*. Berdasarkan cuplikan kode 3 pada **Gambar 3**, logika akan memeriksa apakah data dalam segmen sinyal yang telah dipotong sesuai dengan batasan yang telah diberikan (*lim*). Jika memenuhi syarat, maka logika akan melakukan proses *tapering* menggunakan metode Tukey. Proses ini melibatkan fungsi *cosinus* dengan lebar *taper window (width)* 5% untuk meminimalkan efek tepi atau distorsi yang mungkin terjadi pada sinyal saat pengambilan sampel.

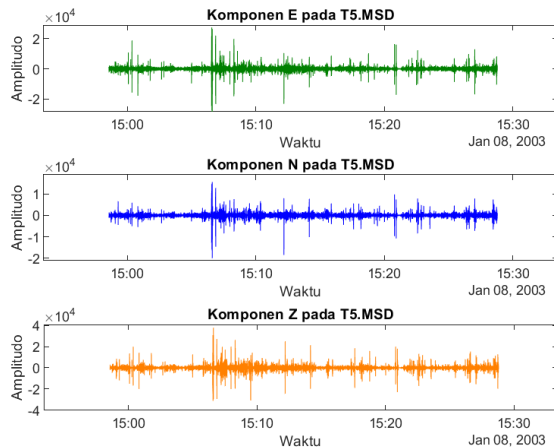
Segmen-segmen yang sesuai dengan kriteria batas nilai (*lim*) disimpan dalam bentuk *cell array signalSegment*, dalam hal ini hanya segmen-segmen yang memenuhi batasan nilai (*lim*) yang diproses lebih lanjut. Setelah proses ini selesai, dilanjutkan dengan proses FFT (*Fast Fourier Transform*). Hasil FFT dari setiap segmen data disimpan dalam *cell array fftSegment*. Untuk visualisasi, *ploting* pada sinyal setelah proses *windowing* di *customisasi* menyerupai *output* Geopsy dengan

membuat sebuah kotak berwarna yang ditentukan oleh fungsi *filling* seperti pada **Gambar 14**. Adapun variabel yang digunakan cukup variatif seperti yang tercantum pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Durasi, limit yang digunakan serta total segmen yang dihasilkan dalam pengolahan data mikrotremor

Titik	Dur	Lim	Total Segmen	Segmen FFT
T1.MSD	25	2.000	53	36
T2.MSD	25	2.500	74	33
T3.MSD	25	2.000	72	34
T4.MSD	20	2.500	91	37
T5.MSD	25	2.500	72	42
T6.MSD	35	1.500	52	27
T7.MSD	30	500	61	41
T8.MSD	25	1.000	72	31
T9.MSD	35	1.500	52	24
T10.MSD	25	300	72	30
T11.MSD	25	1.500	71	30
T12.MSD	25	3.500	74	33
T13.MSD	25	2.500	72	32
T14.MSD	30	2.000	62	32
T15.MSD	25	2.500	74	25

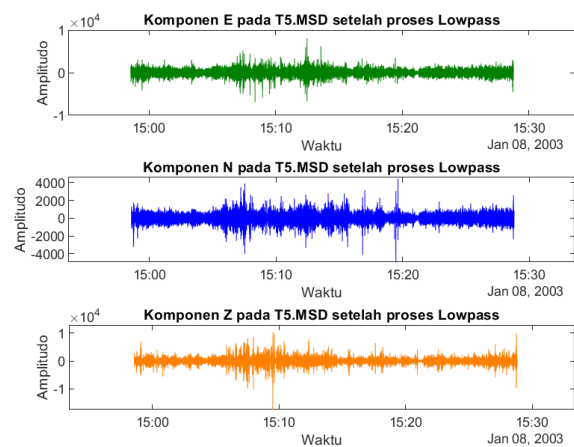
Implementasi MATLAB dalam *smoothing* data dapat dilihat pada **Gambar 4**. Penerapan jendela *smoothing* dilakukan dengan menggunakan *Konno- Ohmachi*. Cuplikan kode 4 menggunakan teknik interpolasi linear untuk menciptakan pola pergerakan (pangkat suku) yang cocok untuk semua frekuensi yang diminta. Hal ini dilakukan dengan cara mencari titik maksimum pada interpolasi pangkat suku, lalu mengecualikan bagian awal pola yang tidak relevan untuk frekuensi yang dianalisis. Pola yang dihasilkan ini digunakan untuk menghitung bobot keluaran (*output*) untuk setiap frekuensi. Jendela *samoothing* berisi *array* 2D yang berupa nilai hasil dari eksekusi fungsi *smoothing Konno – Ohmachi* secara manual dengan koefisien berbeda bernilai genap.



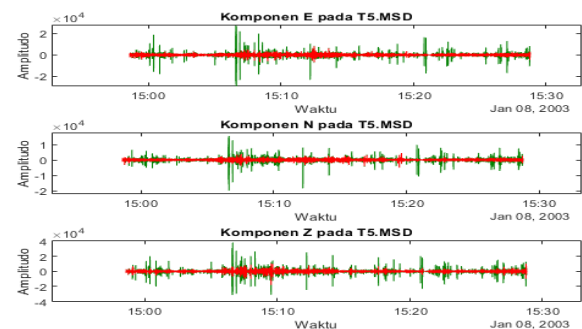
**Gambar 8.** Komponen E (hijau), N (biru), dan Z (range) pada titik pengukuran T5

Cuplikan kode 5 pada **Gambar 5**, digunakan untuk menghitung rasio amplitudo horizontal terhadap amplitudo vertikal (H/V) dari sinyal mikrotremor sesuai dengan persamaan 1. Pada baris 3 nilai *h* dihitung sebagai akar kuadrat dari rata-rata kuadrat dua komponen pertama hasil transformasi fourier. Seperti yang dicantumkan pada baris

4 hingga 5, untuk mempertegas profil, prosedur penghalusan dilakukan dengan koefisien *bandwidth (width)* 40. Nilai *h* dan komponen ke 3 (amplitudo vertikal) dari transformasi fourier dimasukkan kedalam fungsi *kohmachi* untuk proses *smoothing*. Pada baris selanjutnya nilai H/V tersebut diakumulasikan dalam variabel *mean*. Rata-rata dari H/V dihitung dengan membagi *mean* dan jumlah segmen FFT.



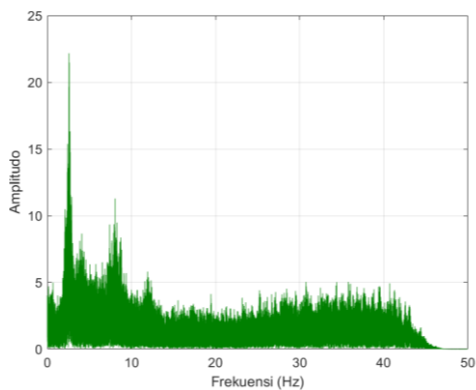
**Gambar 9.** Komponen E (hijau), N (biru), dan Z (orange) pada titik pengukuran T5 setelah proses *low-pass*



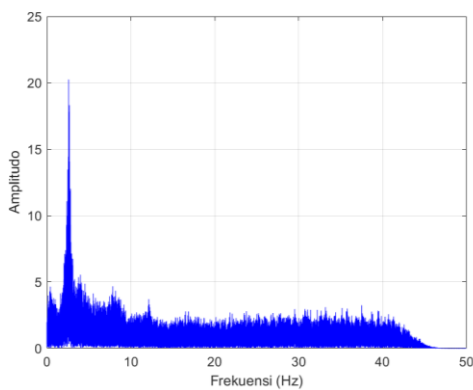
**Gambar 10.** Perbandingan komponen E, N dan Z sebelum di filter (hijau) dan setelah di filter (merah) pada titik pengukuran T5

Untuk mencari nilai standar deviasi pada kumpulan nilai matriks H/V, Matriks asli *hv* diubah menjadi matriks baru *hv\_log* dengan menghitung logaritma natural (basis e) dari setiap elemen matriks asli. Seperti yang

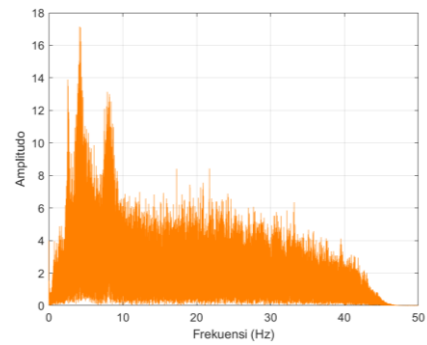
tercantum pada **Gambar 6**, standar deviasi dihitung dengan mengkuadratkan selisih antara setiap elemen matriks logaritma dan nilai rata-ratanya, kemudian menjumlahkan hasilnya. Batas kepercayaan 95% dihitung dengan menambahkan dan mengurangi 1,96 kali standar deviasi dari nilai rata-rata. Ini dilakukan untuk mengubah distribusi data dan memungkinkan analisis statistik yang lebih baik. Hubungan antara frekuensi dan rasio spektral komponen horizontal dan vertikal dalam skala logritmik dapat dilihat pada **Gambar 13**. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa kurva hitam merupakan rata-rata dari kurva yang berwarna. Sedangkan dua kurva hitam yang berupa garis putus-putus menunjukkan standar deviasi.



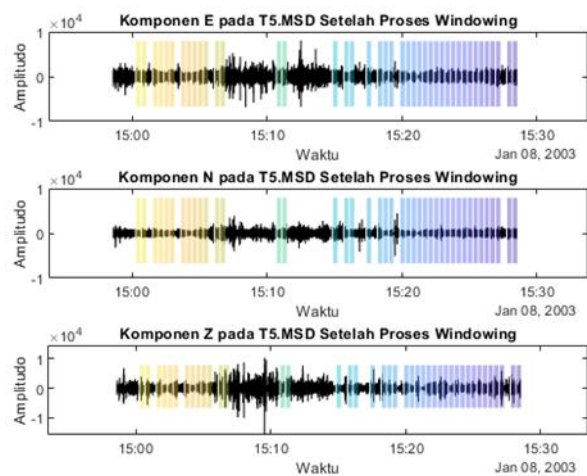
**Gambar 11.** Plot sinyal dalam domain frekuensi komponen E, T5



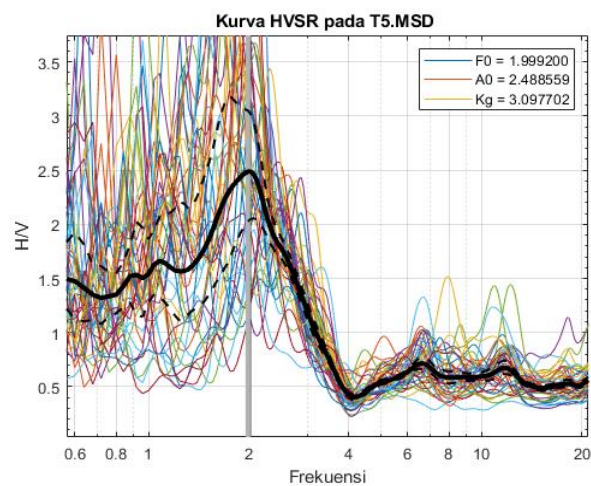
**Gambar 12.** Plot sinyal dalam domain frekuensi komponen N, T5



**Gambar 13.** Plot sinyal dalam domain frekuensi komponen Z, T5



**Gambar 14.** Komponen E, N, dan Z setelah proses windowing pada titik pengukuran T5



**Gambar 15.** Kurva HVSR titik pengukuran T5

Data yang diperoleh cukup sesuai dengan perangkat lunak yang tersedia secara komersial dan menghasilkan pola kurva yang sama. Jika dibandingkan dengan hasil

referensi yang disajikan oleh Rival (2023), terdapat perbedaan hasil yang relatif kecil. Perbedaan frekuensi dominan 0,00046 Hz, amplifikasi 0,078361 dan indeks kerentanan seismik 0,1973 s<sup>2</sup>/cm untuk titik pengukuran T5, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 15**, terbukti membantu untuk mengungkapkan informasi penting dalam

sinyal tersebut. Adapun penyimpangan terburuk adalah sekitar 0,41326 Hz untuk frekuensi dominan, 2,596387 untuk amplifikasi dan 41,45326 s<sup>2</sup>/cm untuk indeks kerentanan seismik dari data referensi titik pengukuran T1, Untuk hasil data yang diperoleh dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Hasil frekuensi dominan, amplifikasi, dan indeks kerentanan seismik

Titik	Hasil Penelitian			Perhitungan Perbedaan Nilai dengan Hasil Referensi Rival (2023)		
	F <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>	K <sub>g</sub>	F <sub>0</sub>	A <sub>0</sub>	K <sub>g</sub>
T1.MSD	0,64	5,685977	50,516144	0,41326	2,596387	41,45327
T2.MSD	0,92	4,962898	26,772124	0,14769	0,941128	11,62294
T3.MSD	0,519792	2,29261	10,111856	1,26340	0,54083	8,390933
T4.MSD	1,994	3,15647	8,306906	0,77853	0,3985	2,048916
T5.MSD	1,9992	2,488559	3,097702	0,00046	0,078361	0,197397
T6.MSD	2,627821	2,487715	2,35508	0,16662	0,057185	0,045162
T7.MSD	6,331223	2,250096	0,799677	0,14738	0,119254	0,108144
T8.MSD	3,198721	2,744865	2,355405	0,26417	0,087615	0,316363
T9.MSD	2,027992	2,544074	3,191488	0,13689	0,256074	0,423287
T10.MSD	14,692654	2,710937	0,500194	0,25005	0,291263	0,123877
T11.MSD	5,52	4,117159	3,070833	0,36615	0,100171	0,380155
T12.MSD	2,079168	3,749093	6,760252	0,15764	0,179507	1,271836
T13.MSD	1,559376	6,370357	26,024157	0,05996	0,38814	4,43917
T14.MSD	2,799067	4,756133	8,081551	0,14130	0,148223	0,092585
T15.MSD	1,639344	6,159525	23,143244	0,05602	0,175285	0,525499

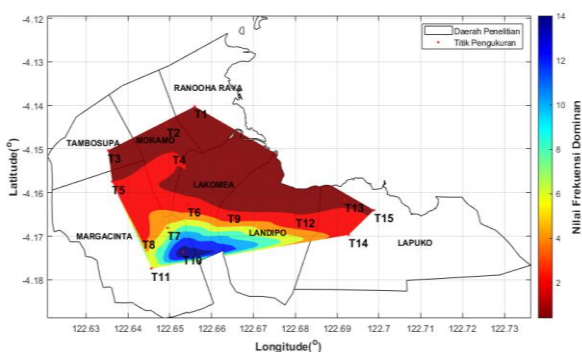
Implementasi MATLAB dalam membuat peta sebaran dapat dilihat pada cuplikan kode **7 Gambar 7**. Pada dasarnya, kode ini menggunakan data koordinat geografis (*latitude* dan *longitude*) dari setiap desa yang terlibat dalam penelitian untuk membangun representasi dunia (*map*) dari lokasi menghasilkan peta sebaran data yang informatif dan visual. Pada baris 4 Kode ini melakukan interpolasi pada data Frekuensi

Dominan (F<sub>0</sub>), Amplifikasi (A<sub>0</sub>) dan Indeks Kerentanan Seismik (K<sub>g</sub>) berdasarkan posisi titik pengukuran (*x<sub>coord</sub>*, *y<sub>coord</sub>*) sesuai dengan koordinat titik pengukuran. Data interpolasi ini kemudian digabungkan dengan peta dasar berupa titik koordinat dari poligon (baris 5). Poligon-poligon yang mewakili daerah penelitian diwarnai sesuai dengan interpolasi nilai yang telah dilakukan. Selain itu, pada baris 7 – 10 kode ini menampilkan

kontur nilai dan menambahkan titik pengukuran ke peta serta menambahkan nama daerah di atas setiap poligon.

Sebagai catatan, dalam proses interpolasi, kode menggunakan metode interpolasi *cubic* (kuadrat) untuk membuat permukaan yang halus sehingga hasil lebih alami dan lebih konsisten. Selain itu, dalam penggunaan fungsi *inpolyon*, kode melakukan pengecekan apakah titik koordinat ( $xq$ ,  $yq$ ) terdapat di dalam poligon. Jika titik tersebut ada di dalam poligon, maka kode akan menghitung nilai untuk titik tersebut dan menggambarkan nilai tersebut di atas peta. Jika tidak, maka kode akan menandai titik tersebut sebagai tidak ada data (baris 6).

Dengan menggunakan nilai yang diperoleh dari hasil pengolahan data dan koordinat titik pengukuran untuk semua titik dalam `data.xlsx`, diperoleh sebaran nilai frekuensi dominan, sebaran nilai amplifikasi dan sebaran nilai indeks kerentanan seismik berturut turut pada **Gambar 16, 17, dan 18.**



**Gambar 16.** Peta sebaran nilai Frekuensi Dominan

#### 4.2. Analisis Frekuensi Dominan

Pada **Gambar 16**, Titik pengukuran T1, T2, T3, T4, T5, T9, T12, T13, dan T15 menunjukkan gradien warna merah tua di

arah utara Desa Moramo, Lakomea, Lapuko, dan arah selatan Desa Tambosupa dan Ranoha Jaya. Dalam konteks klasifikasi tanah berdasarkan Kanai 1983 seperti yang diuraikan dalam Siregar dan Madlazim 2017, tanah di wilayah tersebut dapat dikategorikan sebagai jenis IV tipe II. Jenis tanah ini teridentifikasi sebagai batuan alluvial yang terbentuk dari proses sedimentasi delta, top soil, lumpur, dan lainnya dengan ketebalan sedimen permukaan yang sangat tebal.

Sementara itu, titik pengukuran T6, T8, dan T14, yang membentang dari bagian timur Margacinta melalui area selatan Desa Langkomea menuju bagian barat Lapuko, dengan frekuensi dominan tanah antara 2,627821 Hz hingga 3,198721 Hz, dikategorikan sebagai jenis III tipe III. Jenis tanah ini teridentifikasi sebagai batuan alluvial dengan ketebalan sedimen permukaan sekitar 10 – 30 meter.

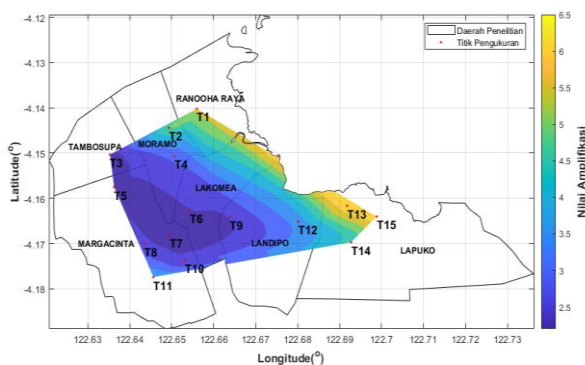
Rentang warna orange hingga biru tua pada gambar mengindikasikan frekuensi dominan tanah berkisar antara 5,52 Hz hingga 7,692654 Hz. Distribusi ini terpencah di beberapa titik pengukuran, termasuk T17, T10, dan T11. Titik pengukuran T11, yang berada di arah selatan Desa Margacinta, dengan frekuensi dominan tanah sebesar 5,497251 Hz, dan T7, yang berada di arah tenggara Desa Margacinta, dengan frekuensi dominan tanah sebesar 6,331223 Hz, dikategorikan sebagai jenis II tipe IV. Jenis tanah ini teridentifikasi sebagai batuan alluvial dengan ketebalan sedimen permukaan mencapai 5 hingga 10 meter.

Sedangkan titik pengukuran T10, yang berada di arah tenggara Desa Margacinta,

dengan frekuensi dominan tanah sebesar 14,692654 Hz, dikategorikan sebagai jenis I tipe IV. Jenis tanah ini teridentifikasi sebagai batuan tersier atau lebih tua dengan ketebalan sedimen permukaan yang sangat tipis.

#### 4.3. Analisis Amplifikasi

Dalam kerangka evaluasi risiko amplifikasi berdasarkan nilai faktor amplifikasi, mengacu pada kajian oleh Marjiyono 2010 dan peta sebaran nilai amplifikasi pada **Gambar 17**, titik pengukuran T3, T5, T6, T7, T8, T9, dan T10 yang tersebar di Desa Margacinta, Desa Tambosupa, arah Barat Desa Lapuko, dan bagian Selatan Desa Moramo dan Lakomea, menunjukkan faktor amplifikasi berkisar antara 2,50096 hingga 2,744865, yang secara kategoris tergolong rendah. Hal ini mengindikasikan risiko kerusakan yang lebih rendah akibat gempa bumi atau aktivitas seismik lainnya di wilayah tersebut.



**Gambar 17.** Peta sebaran nilai Amplifikasi

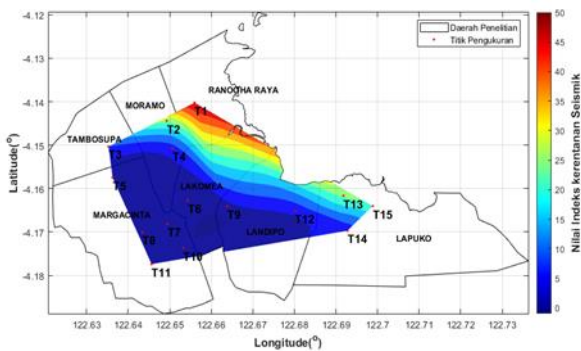
Sementara itu, faktor amplifikasi berkisar antara 3,15647 hingga 5,685977, mengindikasikan risiko amplifikasi sedang. Risiko sedang ini mencerminkan potensi kerusakan yang lebih signifikan. Adapun wilayah yang dimaksud terletak di bagian Timur Laut Desa Moramo, Lakomea, dan Landipo, dengan titik pengukuran T1, T2, T4,

T11, T12, dan T14. Adapun risiko amplifikasi tinggi, berkisar antara 6,159525 hingga 6,370357, terdapat di Barat Laut Desa Lapuko, terutama pada titik pengukuran T13 dan T15. Risiko tinggi ini mengindikasikan potensi kerusakan struktural yang serius akibat gempa bumi atau aktivitas seismik lainnya.

#### 4.4. Analisis Indeks Kerentanan Seismik

Pada titik pengukuran T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, dan T14, yang berlokasi di Desa Margacinta, bagian Selatan Desa Landipo, Lakomea dan Moramo, serta bagian Barat Desa Lapuko, memiliki rentang nilai indeks kerentanan seismik yang tergolong rendah, berkisar antara 0,500194  $s^2/cm$  hingga 10,111856  $s^2/cm$  yang ditunjukkan oleh warna biru gelap. Di sisi lain, titik pengukuran T2, T13, dan T15 yang membentang di sepanjang arah Barat Laut Desa Lapuko hingga Tenggara Desa Moramo, menunjukkan rentang indeks kerentanan seismik yang juga rendah, berkisar dari 23,143244  $s^2/cm$  hingga 26,772124  $s^2/cm$ , dengan gradien warna hijau. Adapun gradien warna merah, yang mencirikan nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi (50,516144  $s^2/cm$ ), terdapat di bagian Selatan Desa Ranooha Raya dengan titik pengukuran T1.

Secara keseluruhan, daerah yang berlokasi dekat laut cenderung memiliki nilai indeks kerentanan seismik yang lebih tinggi, sedangkan daerah yang berdekatan dengan daratan menunjukkan nilai indeks kerentanan seismik yang lebih rendah (**Gambar 18**).



**Gambar 18.** Peta sebaran nilai Indeks Kerentanan Seismik

## 5. KESIMPULAN

Distribusi frekuensi dominan tanah di Daratan Pesisir Kecamatan Moramo berkisar antara 0,519792 - 14,692654 Hz. Distribusi nilai faktor amplifikasi tanah di Daratan Pesisir Kecamatan Moramo berkisar antara 2,250096 - 6,370357 kali penguatan. Sedangkan untuk distribusi nilai indeks kerentanan seismik di Daratan Pesisir Kecamatan Moramo berkisar antara 0,500194 - 50,516144  $s^2/cm$ .

Dalam penelitian ini, diperoleh nilai frekuensi dominan, amplifikasi dan indeks kerentanan seismik terbaik berturut turut adalah 1,9992 Hz, 2,488559 dan 3,097702  $s^2/cm$  pada titik pengukuran T5 yang hanya melenceng 0,00046 Hz untuk frekuensi dominan, 0,078361 untuk amplifikasi dan 0,1973  $s^2/cm$  untuk indeks kerentanan seismik dari nilai referensi.

Daerah yang berlokasi dekat laut memiliki kecenderungan untuk memiliki nilai indeks kerentanan seismik yang lebih tinggi, sementara daerah bagian daratan menunjukkan nilai yang lebih rendah. Hal ini sejalan dengan hasil risiko amplifikasi yang dihasilkan. Temuan ini juga konsisten dengan distribusi nilai frekuensi dominan yang

menurun seiring perjalanan ke arah Timur Laut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, R., Darman, R., Marizka., Namora, J., & Ardewati, N. (2018). *Implementasi Business Intelligence Menentukan Daerah Rawan Gempa Bumi di Indonesia dengan Fitur Geolokasi*. Jurnal Edukasi dan Penelitian Informatika, 4(1), 30.
- Arintalofa, V., Yulianto, G., & Harmoko, U. (2020). *Analisa Mikrotremor Menggunakan Metode HVSR untuk Mengetahui Karakteristik Bawah Permukaan Manifestasi Panas Bumi Diwak dan Derekan Berdasarkan Nilai Vp*. Jurnal Energi Baru dan Terbarukan, 1(2), 54-61.  
<https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9276>
- BNPB. (2021). *Kajian Risiko Bencana Nasional Provinsi Sulawesi Tenggara 2022-2026*. Direktorat Pemetaan dan Evaluasi Risiko Bencana.
- Farida, F. (2017). *Optimasi Lowpass Filter Mikrostrip Frekuensi 10,6 GHz dengan Metode Step-Impedansi*. Jurnal Sustainable: Jurnal Hasil Penelitian dan Industri Terapan, Vol. 06, No.02, hal. 89- 95.
- François Beauducel. (2023). *RDMSEED and MKMSEED: Read and write miniSEED files* (<https://github.com/IPGP/mseed-lib>), GitHub
- Hartati, Lidia. (2014). *Pemetaan Tingkat Resiko Gempabumi Daerah Liwa dan Sekitarnya Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor*. Thesis. Yogyakarta : UGM.
- Konno, K & Ohmachi, T. (1998). *Ground Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor*. Bull. Seism. Soc. Am. 88, 228–241.  
<https://doi.org/10.1785/BSSA0880010228>
- Kusuma, DT. (2021). *Fast Fourier Transform (FFT) Dalam Transformasi Sinyal Frekuensi Suara Sebagai Upaya Perolehan Average Energy (AE)*

- Musik*. Jurnal Pengkajian dan Penerapan Teknik Informatika. Vol. 14, No.1.  
<https://doi.org/10.33322/petir.v14i1.1022>
- Marjiyono. (2010). *Estimasi Karakteristik Dinamika Tanah Dari Data Mikrotremor Wilayah Bandung*. Thesis ITB. Bandung.
- Nakamura, Y. (1989). *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*. Japan: Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.
- Nakamura, Y. (2000). *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Application*. Japan: Tokyo University.
- Ngadmanto, D., Susilanto, P., Nurdiyan, B., Pakpahan, S., & Masturyono. (2013). *Efek Tapak Lokal Daerah Kerusakan Akibat Gempa Bumi*  
<https://doi.org/10.31172/jmg.v14i3.162>
- Rahmaningtyas, Aindya Putri. (2017). *Identifikasi Percepatan Tanah Maksimum (PGA) dan Kerentanan Seismik Menggunakan Metode Mikrotremor di Jalur Sesar Kendeng*. Skripsi Surabaya: Departemen Teknik Geofisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.  
<http://dx.doi.org/10.12962/j25023659.v3i2.2966>
- Rival. (2023). *Mikrozinasasi Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan analisis HVSR Data Mikrotremor di Daratan Pesisir Kecamatan Moramo Kabupaten Konawe Selatan*. Kendari: Universitas Halu Oleo
- Shi, Jian. (2013). *A Python Library That Performs Konno-Ohmachi Filtering Very Fast*.  
<https://pypi.org/project/fast-konno-ohmachi/>
- Siregar, I.S., Madlazim. (2017). *Analisis Mikrotremor dengan Metode HVSR untuk Mengetahui Zona Penguatan Gempa Bumi di Wilayah Stasiun Seismik Jawa Timur*. Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI), Vol. 06 No. 03.
- Syafril. (2019). *Statistik Pendidikan*. Jakarta: Kencana (Prenadamedia Group).
- Tokimatsu, K. (2004). *S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum*. Bulletin of the Seismological Society of America No.94(1).
- Wang, P. (2020). *Predictability and repeatability of non-ergodic site response for diverse geological conditions*, PhD Thesis, UCLA, Dept. Civil Engineering, 210 p.