



Pengolahan Data Mikrotremor Metode HVSR Menggunakan Bahasa Pemrograman Python

La Hamimu, Laode Ihksan Juarzan, Muhamad Alim, Indrawati

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi XI)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

16 Agustus 2025

Abstract

The main purpose of this research is to implement the Python programming language in the processing of microtremor data using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method. The microtremor data used in this study was obtained from field measurements conducted at several specific sites. The data are then processed using various popular and effective Python libraries, such as ObsPy, NumPy, and Matplotlib. The data processing involved several important steps, including reading MiniSEED data, filtering with a Bandpass Filter to eliminate noise, segmenting the signal using windowing techniques, and transforming from the time domain to the frequency domain using the Fast Fourier Transform (FFT) method. Furthermore, the HVSR curve is processed with smoothing steps by applying the Konno-Ohmachi method to achieve more accurate results. The analysis results from this process can provide the dominant frequency (f_0), amplification factor (A_0), and seismic vulnerability index (K_g), which are crucial for risk evaluation. In addition, the processed data was visualized in the spatial distribution maps using coordinate data and the image of the satellite. Results from this research demonstrate that Python can be effectively used for the processing and visualization of microtremor data and can be applied to identify the potential seismic vulnerability in the research area with a significant degree of accuracy.

Keywords: Python · Microtremor · HVSR · Dominant frequency · Amplification factor

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Parameter fisik dan geologi lokal sangat mempengaruhi karakteristik getaran, yang menyebabkan respons yang beragam terhadap gangguan yang disebabkan oleh manusia dan alam. Menurut teori lempeng tektonik, Indonesia terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik besar, yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Pertemuan ini menyebabkan aktivitas geologi yang signifikan khususnya gempa bumi (Faradilla dkk., 2024). Pemahaman kerentanan seismik melalui pengukuran mikrotremor sangat penting karena dapat membantu dalam pemetaan risiko gempa bumi dan mitigasi bencana. Mikrotremor atau ambient noise merupakan getaran tanah dengan amplitudo dalam micrometer yang ditimbulkan oleh peristiwa alam atau buatan yang muncul di sekitar lokasi pengukuran dan dapat digunakan untuk menentukan parameter dinamika tanah (Laksana dkk., 2023).

✉ La Hamimu
lahamimu.geoph@gmail.com

Muhamad Alim
muhamadalim060604@gmail.com

Laode Ihksan Juarzan
juarzan.ode@uho.ac.id

Indrawati
indrawati@uho.ac.id

Teknik Geofisika, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia.

How to Cite: Hamimu, L., Juarzan, L. I., Alim, M. & Indrawati. (2025). Pengolahan Data Mikrotremor Metode HVSR Menggunakan Bahasa Pemrograman Python. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 4(1), 264 - 283. <https://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi/>

Salah satu metode yang dapat digunakan dalam analisis mikrotremor adalah metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Parameter yang dihasilkan dari analisis dengan metode HVSR adalah frekuensi dominan dan faktor amplifikasi. Parameter-parameter tersebut dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik struktur geologi yang dapat merusak bangunan akibat gempa bumi (Zuliyanti, 2018).

Penelitian ini menggunakan noise seismik untuk menghitung kurva rasio horizontal dan vertikal (H/V). Frekuensi dominan dan amplifikasi tanah, antara parameter penting yang dihasilkan dari metode HVSR, sangat berhubungan dengan parameter fisik bawah permukaan dan geologi di daerah tersebut (Kurniawati dkk., 2017). Penelitian ini memilih untuk menggunakan program *Python* untuk mengatasi masalah analisis data mikrotremor. Penggunaan *Python* dalam pengolahan data seismik memiliki kelebihan. Sintaks yang mudah dipahami dan kemudahan penggunaan merupakan keunggulan utama, yang memungkinkan pengguna, termasuk mereka yang tidak memiliki pengalaman pemrograman yang kuat, untuk memahami dan menerapkan analisis data dengan cepat. Selain itu, *Python* memiliki ekosistem yang kaya dengan berbagai pustaka dan framework. Salah satunya adalah ObsPy, yang dibuat khusus untuk memenuhi kebutuhan seismologi dan menawarkan alat yang dapat digunakan untuk membaca, memproses, dan menganalisis data seismik dengan cepat.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana implementasi bahasa pemrograman *Python* untuk mengolah data mikrotremor dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR)?
2. Bagaimana bahasa pemrograman *Python* dapat digunakan untuk memetakan sebaran frekuensi dominan (f_0), amplifikasi (A_0), dan indeks kerentanan seismik (K_g)?

Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah tersebut, tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menerapkan bahasa pemrograman *Python* dalam pengolahan data mikrotremor menggunakan metode HVSR.
2. Menentukan peta sebaran parameter frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), dan indeks kerentanan seismik (K_g) melalui implementasi bahasa pemrograman *Python*.

TINJAUAN PUSTAKA

Mikrotremor

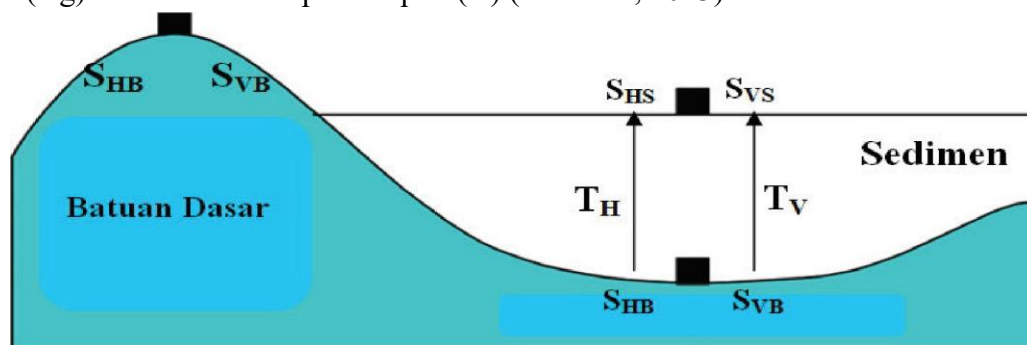
Gelombang mikrotremor merupakan aktivitas gelombang seismik yang berukuran kecil seperti dalam gempa tetapi belum tentu dapat dirasakan. Mikrotremor merupakan salah satu metode seismik pasif untuk merekam getaran yang dihasilkan oleh bumi seperti aktivitas vulkanik, gelombang, kondisi regional meteorologi, aktivitas manusia dan sebagainya (Chemsitra dkk., 2018). Kajian mikrotremor adalah salah satu pendekatan yang semakin penting dalam ilmu pengetahuan, terutama dalam konteks mitigasi bencana alam seperti gempa bumi. Mikrotremor merujuk pada getaran tanah yang sangat kecil dan hampir tidak terasa, yang dihasilkan oleh aktivitas alam maupun manusia (Murdiantoro dkk., 2018).

Pengukuran mikrotremor dapat digunakan untuk menentukan sifat getaran di lapisan bawah permukaan tanah karena karakteristik mikrotremor sangat berkaitan dengan kondisi struktur di bawah permukaan tanah di lokasi penelitian. Nilai periode natural tanah (T_0) yang rendah dapat menunjukkan kekerasan tanah yang tinggi. Hal ini dapat digunakan untuk memetakan area yang berisiko tinggi terhadap guncangan seismik atau gempa bumi (Nurwidyanto dkk., 2023).

Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)

Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) merupakan metode geofisika yang memanfaatkan getaran harmonik alami dari tanah dengan membandingkan spektrum horizontal dan spektrum vertikal pada mikrotremor yang telah direkam. Konsep dari metode HVSr adalah dengan mengasumsikan gelombang mikrotremor sebagian besar terdiri dari gelombang geser serta menghilangkan gelombang permukaan. HVSr merupakan metode analisis berdasarkan pengamatan perambatan gelombang geser akibat peristiwa gempa untuk berbagai kondisi geologi. Fungsi dari metode HVSr ini juga dapat digunakan untuk menentukan nilai faktor amplifikasi serta periode dominan dari suatu lokasi yang dapat diasumsikan dari puncak kurva HVSr (Nurwidyanto dkk., 2023).

Metode HVSr digunakan untuk mengkarakterisasi efek tanah atau situs lokal. Metode HVSr dipilih karena ekonomis, ramah lingkungan, menggunakan peralatan sederhana yang mudah diakses, dan dapat diterapkan di wilayah perkotaan. Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Nakamura (1989) dan digunakan untuk evaluasi struktur lapisan bawah permukaan dengan membandingkan rasio amplitudo pada komponen horizontal dan vertikal dalam domain frekuensi. (Yuniarto, 2023). Metode ini efektif dalam menganalisis karakteristik lapisan tanah permukaan karena mampu mendeteksi frekuensi resonansi alami lapisan tanah, sifatnya yang non-invasif (tidak memerlukan pengeboran) dan ekonomis, serta kemampuannya mengidentifikasi stratifikasi tanah dan lapisan soil (site effect) (Cintia dkk., 2024). Parameter yang dihasilkan dalam metode HVSr meliputi nilai frekuensi natural (f_0) dan amplifikasi (A_0). Dari kedua parameter tersebut dapat diolah lagi untuk menghasilkan nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dan ketebalan lapisan lapuk (H) (Yuniarto, 2023).



Gambar 1. Model cekungan yang mengandung material sedimen halus (Modifikasi Nakamura, 2000)

Faktor amplifikasi pada komponen horizontal (T_H) adalah sebagai berikut:

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (1)$$

Keterangan:

T_H = Faktor amplifikasi komponen horizontal

S_{HS} = Spektrum horizontal permukaan

S_{HB} = Spektrum horizontal di batuan dasar

Faktor amplifikasi pada komponen vertikal (T_V) adalah sebagai berikut:

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2)$$

Keterangan:

T_V = Faktor amplifikasi komponen vertikal

S_{HS} = Spektrum vertikal permukaan

S_{HB} = Spektrum vertikal di batuan dasar

Dalam penelitian Nakamura (1997), ditemukan bahwa rekaman di stasiun yang berada pada batuan dasar memiliki rasio spektrum komponen horizontal terhadap vertikal yang paling tinggi mendekati 1 ($H/V \sim 1$), yang berarti bahwa gelombang horizontal dan vertikal menjalar dengan kecepatan yang sama di batuan dasar.

$$\frac{S_{VS}}{S_{VB}} = 1 \text{ atau } \frac{S_{HS}}{S_{HB}} = 1 \quad (3)$$

Nakamura mencoba mereduksi dampak batuan dasar yang dipengaruhi oleh geologi lokal dengan menemukan persamaan fungsi transfer gelombang untuk lapisan soil (T_{SITE}). Site Effect (T_{SITE}) permukaan sedimen dapat dihitung dengan membandingkan amplifikasi dari gerakan horizontal dan vertikal (Yusran dkk., 2021). Berdasarkan hal tersebut maka persamaan transfer gelombang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} \quad (4)$$

Keterangan:

T_{SITE} = *Site Effect*

T_H = Faktor amplifikasi komponen horizontal

T_V = Faktor amplifikasi komponen vertikal

Apabila persamaan (1) dan (2) disubstitusikan ke dalam persamaan (4) maka diperoleh:

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} = \frac{\frac{S_{HS}}{S_{HB}}}{\frac{S_{VS}}{S_{VB}}} = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \times \frac{S_{VB}}{S_{VS}} \quad (5)$$

Berdasarkan persamaan (3), maka persamaan T_{SITE} yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$T_{SITE} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (6)$$

Fungsi perhitungan untuk lapisan tanah (T_{SITE}) hanya bergantung pada hasil pengukuran permukaan, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 6. Pengukuran di lapangan mengukur dua bagian horizontal yang meliputi, bagian horizontal *north-south* dan bagian horizontal *east-west*. Maka, persamaan HVSR dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_{SITE} = HVSR = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} = \frac{\sqrt{(S_{North-South})^2 + (S_{East-West})^2}}{S_{VS}} \quad (7)$$

Analisis HVSR menghasilkan dua parameter yaitu frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). Nilai frekuensi dominan atau natural dapat digunakan untuk menunjukkan karakteristik lapisan batuan di daerah tersebut. Uji simulasi dilakukan dengan menggunakan enam model struktur geologi sederhana pada tahun 1994, dimana variasi kontras kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan tanah digabungkan. Lachet dan Brad menemukan bahwa nilai puncak frekuensi berubah berkorelasi dengan variasi geologi (Subakti & Haurissa, 2022). Faktor amplifikasi mengacu pada pembesaran gelombang seismik yang terjadi akibat perbedaan mencolok antara lapisan-lapisan bumi. Artinya, gelombang seismik akan mengalami peningkatan amplitudo ketika merambat melalui medium yang lebih lunak daripada medium sebelumnya yang dilaluinya (Arinalofa dkk., 2020).

Dua parameter tersebut digunakan untuk menghitung indeks kerentanan seismik (K_g). Kerentanan seismik (K_g) memberikan gambaran kerentanan suatu wilayah yang dapat mengalami kerusakan akibat gempa bumi. Menurut Nakamura (2000) Indeks kerentanan seismik merupakan indeks yang menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi saat terjadi gempa bumi (Fahrurijal dkk., 2020). Secara matematis, hubungan antara indeks kerentanan seismik (K_g), frekuensi alami (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0). dapat dituliskan melalui persamaan berikut:

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (8)$$

Python Dalam Pengolahan Data Mikrotremor

Python adalah bahasa pemrograman interpreter yang menjalankan instruksi dari kode sumber sesuai aturan sintaksnya (Sweigert, 2015). Tidak seperti bahasa lain yang sulit dipahami dan dibaca, *Python* menekankan keterbacaan kode. Ini membuat pemahaman sintaks lebih mudah. *Python* sangat mudah dipelajari bahkan bagi pemula atau yang sudah menguasai bahasa pemrograman lain (Rosyilaray, 2021). Penerapan program *Python* untuk pengolahan data geofisika telah dilakukan sebelumnya oleh penulis melalui pendanaan riset internal universitas. Penelitian dengan judul implementasi pemodelan matematika berbasis software open-source pada pengolahan data geofisika menjadi topik riset yang sangat menarik dan telah menghasilkan output dalam bentuk publikasi pada jurnal bereputasi. Salah satu kajian yang menjadi output dari riset ini adalah analisis numerik sensitivitas parameter geofisika pada kurva dispersi gelombang Love multimode yang dipublish pada Journal of Physics Communications (Hamimu dkk., 2024). Pada tahun yang sama telah dipublikasikan pula sebuah kajian terkait komputasi dan pemodelan tomografi seismik refraksi untuk medium anisotropi berdasarkan metode pseudo-bending (Hamimu dkk., 2024).

Berikut ini beberapa hal yang harus diperhatikan dalam penerapan *Python* dalam pengolahan data mikrotremor.

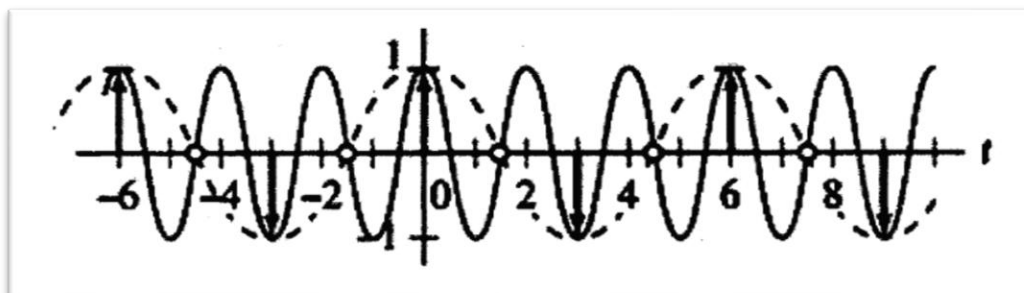
Nyquist Sampling

Teorema Nyquist menyatakan bahwa untuk merepresentasikan sinyal analog secara akurat dalam domain digital, frekuensi sampling harus setidaknya dua kali lipat dari frekuensi tertinggi

dalam sinyal tersebut. Prinsip ini sangat penting karena dapat menghindari aliasing, di mana informasi penting dalam sinyal dapat hilang jika tidak disampling pada frekuensi yang cukup tinggi. Dengan sampling yang sesuai, sinyal dapat direkonstruksi kembali ke bentuk aslinya tanpa kehilangan informasi (Martino dkk., 2019). Hubungan antara laju sampel (f_s) dan frekuensi Nyquist (f_N) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$f_s = 2f_N \quad (9)$$

Jika Efek aliasing terjadi maka akan menghasilkan representasi yang salah dari sinyal asli. Perhatikan gambar berikut:

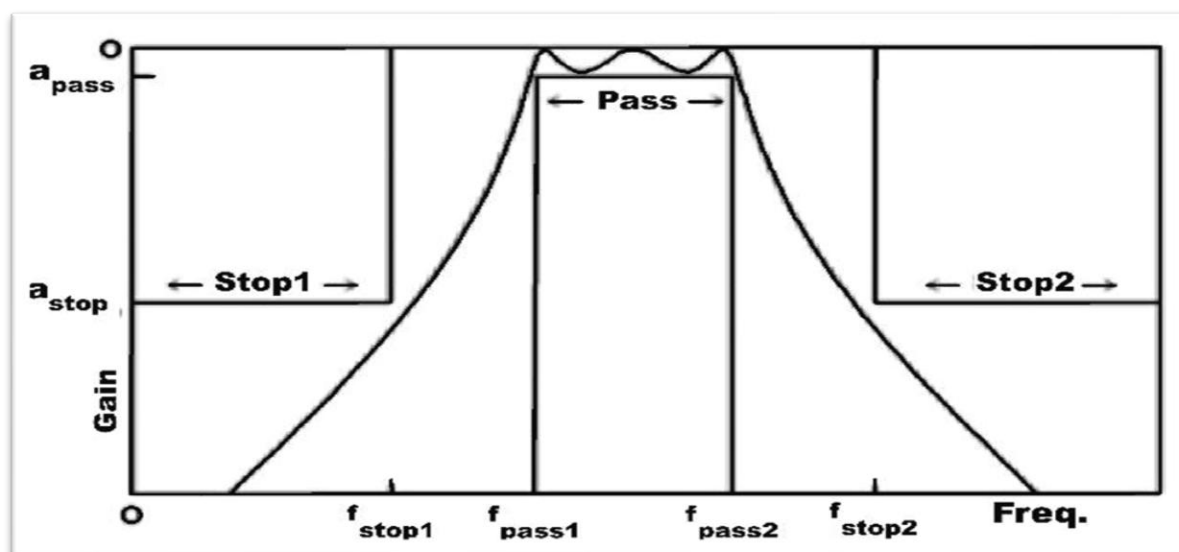


Gambar 2. Efek Aliasing

Berdasarkan gambar 2 di atas jika sinyal asli adalah sinyal bergaris penuh dan proses sampling yang dilakukan tidak memenuhi teorema sampling, sinyal tersebut mungkin akan menjadi sinyal bergaris putus-putus jika dikembalikan lagi menjadi sinyal analog. Oleh karena itu, jika terjadi aliasing, sinyal tersebut tidak dapat dikembalikan lagi menjadi sinyal analog aslinya (Gunawan dan Juwono., 2015).

Bandpass Filter

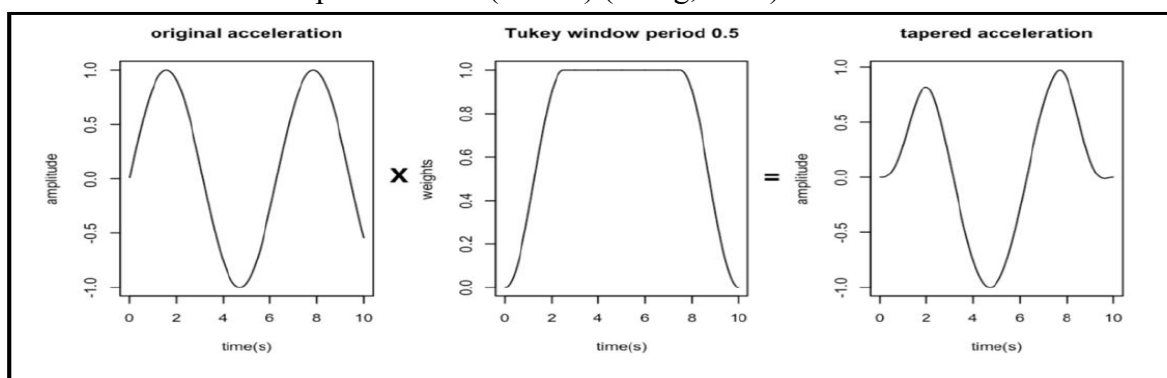
Salah satu jenis filter yang digunakan dalam pengolahan data mikrotremor yaitu *Bandpass Filter*. *Bandpass Filter* adalah jenis filter yang hanya melewatkan sinyal pada rentang frekuensi tertentu dan kemudian meredam sinyal di luar rentang frekuensi tersebut. *Bandpass Filter* memiliki dua frekuensi cut off, frekuensi cut off bawah (f_L) dan frekuensi cut off atas (f_H). Rentang kedua cut off frequency ini yang dilewatkan oleh *Bandpass Filter* dan sinyal di luar rentang frekuensi ini akan dilemahkan (Muliadi dan Khairul., 2019).



Gambar 3. Kurva Respon Frekuensi *Bandpass Filter* (Muliadi dan Muttaqin., 2019)

Windowing

Teknik *Windowing* digunakan untuk membagi sinyal menjadi beberapa segmen kecil, yang dikenal sebagai jendela, di mana jumlah jendela ini ditentukan oleh karakteristik sinyal yang bersifat stasioner. Proses ini sangat penting karena semakin banyak jendela yang digunakan, semakin kuat statistik yang dapat diperoleh dari analisis tersebut. Namun, perlu dicatat bahwa peningkatan jumlah jendela juga berarti durasi masing-masing jendela menjadi lebih pendek, yang dapat mengurangi kemampuan untuk mendeteksi frekuensi rendah dalam analisis Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr) (Wang, 2020).

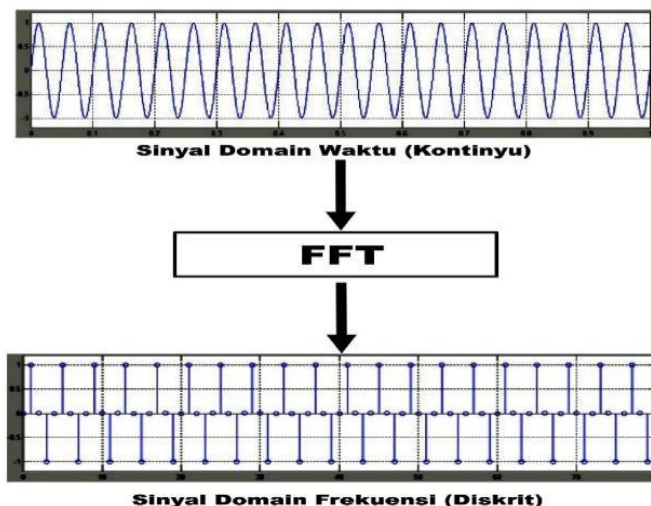


Gambar 4. Contoh Tukey Window Tapering

FFT (Fast Fourier Transform)

Transformasi Fourier dalam mikroseismik merupakan teknik yang sering digunakan untuk memecah sebuah gelombang seismik menjadi beberapa gelombang harmonik sinusoidal dengan frekuensi tertentu. Kumpulan gelombang harmonik sinusoidal ini disebut deret Fourier (Subakti & Haurissa, 2022). Analisis Fourier ini kemudian digunakan dalam studi mikrotremor untuk melakukan hal yang sama. Dengan demikian, gelombang seismik tersebut dapat menghasilkan fungsi penjumlahan sinusoidal dengan frekuensi tunggal. Untuk mengukur mikrotremor, transformasi Fourier digunakan untuk mengubah gelombang seismik dari domain

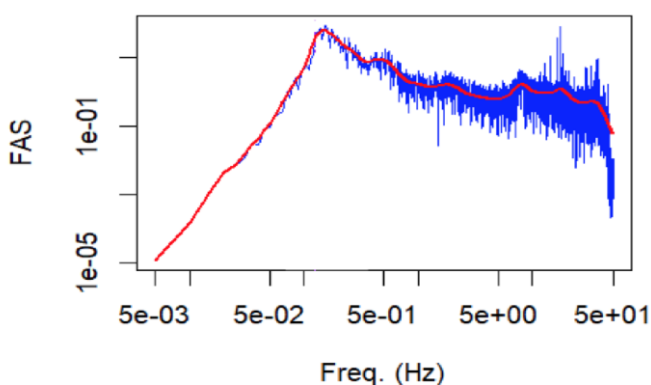
waktu ke domain frekuensi. Prinsipnya adalah bahwa sinyal saat ini didekati dengan sinyal cosinus dan sinus, yang menghasilkan amplitudo masing-masing. Pada transformasi Fourier, nilai amplitudo ini diwakili sebagai sinyal yang berhubungan dengan frekuensi (Ambarsari, 2017).



Gambar 5. Transformasi sinyal domain waktu menjadi sinyal domain frekuensi (Modifikasi Wahyudi & Rahayu, 2015)

Smoothing Konno-Ohmachi

Smoothing yang dilakukan dalam pengolahan data mikrotremor menggunakan persamaan Konno-Omachi yang direkomendasikan dalam SESAME, 2004 untuk evaluasi pengukuran sinyal mikrotremor. Smoothing Konno-Omachi adalah metode untuk menghaluskan spektrum dari data alami yang bersifat bising, menggunakan analisis Fourier. Metode ini mengimplementasikan fungsi Gaussian untuk menghaluskan spektrum frekuensi dengan tujuan mengurangi efek dari noise, sehingga menghasilkan representasi yang lebih jelas dari komponen frekuensi yang ada dalam data.



Gambar 6. Perbandingan antara Fourier amplitude spectra (FAS) mentah dan yang dihaluskan (Wang, 2020)

Rata-Rata (Mean)

Mean dihitung dengan menjumlahkan semua nilai dalam dataset dan membaginya dengan jumlah nilai tersebut. Mean sering digunakan dalam analisis data untuk memberikan gambaran umum tentang karakteristik data (Sari dan Hidayati., 2020). Mean secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$Mean(\bar{a}) = \frac{\sum_{(i=1)}^n xi}{N} \quad (10)$$

dengan xi merupakan data dari satu window dan N merupakan banyak window yang dilakukan dalam pengolahan data.

Standar Deviasi

Standar deviasi menunjukkan seberapa besar variasi atau penyimpangan dari nilai-nilai dalam suatu dataset terhadap nilai rata-ratanya. Standar deviasi yang lebih kecil menunjukkan bahwa nilai-nilai dalam dataset lebih dekat dengan rata-rata, sedangkan standar deviasi yang lebih besar menunjukkan bahwa nilai-nilai tersebut lebih tersebar (Pratiwi dan Supriyadi., 2020). Standar deviasi secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$(Simpangan)^2 = \frac{\sum_{(i=1)}^n |xi - \bar{a}|^2}{N - 1} \quad (11)$$

dengan xi merupakan data dari satu window, \bar{a} merupakan rata-rata dari data semua window, dan N merupakan banyak window yang dilakukan dalam pengolahan data (Faradilla dkk., 2024).

Mapping Toolbox

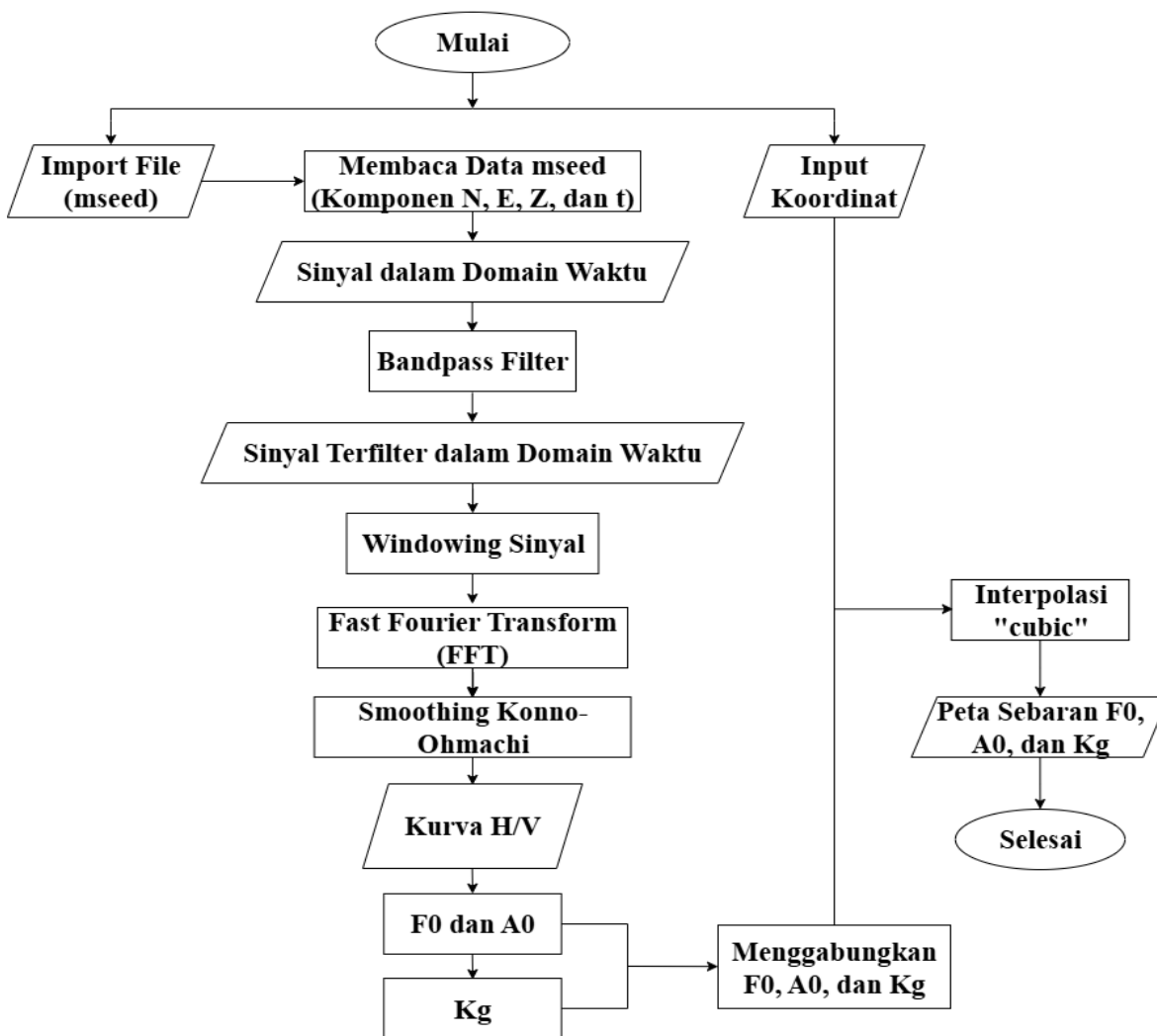
Mapping dalam pemrograman *Python* adalah proses yang melibatkan pengolahan, visualisasi, dan analisis data geospasial menggunakan berbagai pustaka yang tersedia, seperti GeoPandas, Matplotlib, Folium, Shapely, dan Rasterio. Proses ini dimulai dengan persiapan lingkungan pengembangan, di mana pengguna menginstal *Python* dan pustaka yang diperlukan. Setelah itu, pengguna mengimpor pustaka yang relevan untuk memanfaatkan fungsi dan kelas yang disediakan.

Data geospasial, yang dapat berasal dari berbagai format seperti shapefile atau GeoJSON, dimuat ke dalam DataFrame geospasial menggunakan GeoPandas. Selanjutnya, pengguna dapat melakukan manipulasi data, termasuk pemfilteran berdasarkan atribut, penggabungan, dan analisis spasial. Visualisasi adalah langkah penting dalam mapping, dimana pengguna dapat membuat peta statis menggunakan Matplotlib atau peta interaktif dengan Folium. Peta statis dapat disimpan sebagai gambar, sementara peta interaktif dapat disimpan sebagai file HTML untuk dibagikan. Setelah visualisasi, analisis tambahan dapat dilakukan, seperti penghitungan area atau analisis jarak menggunakan pustaka seperti Shapely. Dengan mengikuti langkah-langkah ini, pengguna dapat menghasilkan peta yang informatif dan menarik, serta melakukan analisis geospasial yang mendalam, yang sangat berguna dalam berbagai aplikasi, mulai dari analisis lingkungan hingga perencanaan kota (Hengl dkk., 2020).

METODE

Secara sistematis penelitian ini mengikuti diagram alir yang disajikan pada Gambar 6. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan script *Python* yang mengintegrasikan beberapa fungsi untuk mengolah data mikrotremor dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*

(HVSR). Data yang digunakan merupakan data primer hasil pengukuran lapangan di salah satu kecamatan di kabupaten Konawe. Dalam rangka menghasilkan kode yang terstruktur dan efisien, penerapan penggunaan fungsi dalam pemrograman menjadi suatu keharusan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keterbacaan dan pemeliharaan kode, tetapi juga memungkinkan pengembangan yang lebih mudah.



Gambar 7. Diagram Alir

Pengolahan data dimulai dengan membaca data mikrotremor dari file MiniSEED menggunakan modul *"obspy"* dan memvisualisasikannya dalam plot waktu-amplitudo untuk tiga komponen (N, E, Z) menggunakan *"matplotlib"* dan *"pyplot"*. Data kemudian di filter menggunakan *Bandpass Filter* yang diimplementasikan dengan fungsi *"bandpass_filter"* dari modul *"signal"* dalam package *"scipy"*, diikuti dengan visualisasi ulang data yang telah difilter. Selanjutnya, data disegmentasi menggunakan fungsi *"tukey_window"* dan *"select_signal"* untuk analisis lebih lanjut, dan hasilnya divisualisasikan.

Setiap segmen dianalisis menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)* dari modul *"fft"* dalam package *"scipy"*. Hasil FFT digunakan untuk menghitung kurva HVSR, yang di smooth menggunakan fungsi *"konno_ohmachi_smoothing"*, selanjutnya kurva H/V ditampilkan untuk

mengidentifikasi frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0), kemudian dua parameter ini digunakan untuk menghitung indeks kerentanan seismik (K_g).

Pembuatan peta sebaran dapat dilakukan dengan menggunakan module *Python* seperti *pandas*, *numpy*, *matplotlib*, *pyplot*, *scipy*, dan *image*. Langkah pertama adalah mempersiapkan data mikrotremor yang mencakup nilai frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), indeks kerentanan seismik (K_g) dan koordinat. Pastikan data telah disusun dengan format yang benar, format yang dapat dibaca oleh *Python*, seperti Excel, CSV, atau format data lainnya. Selanjutnya membuat grid x,y, dan z berdasarkan data yang telah disiapkan sebelumnya. Kemudian menggunakan fungsi “*imread*” untuk membaca data citra satelit yang akan di *overlay* dengan pola sebaran yang dihasilkan. Lalu mengatur tampilan peta dengan menambahkan judul, label axis, dan juga colorbar agar peta menjadi lebih informatif. Terakhir, output grafis dilengkapi dengan legenda dan label yang disimpan pada folder tertentu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data di mulai dengan membaca data mikrotremor dari file MiniSEED menggunakan modul “*obspsy*”, dimana file MiniSEED yang disimpan dalam suatu folder dipanggil dalam program dengan menggunakan fungsi “*read*” dari modul “*obspsy*”. Berikut cuplikan skript *Python* untuk pembacaan data:

```
# Define the file path
file_path = "E:\PROJEK\Program Python\COBA 1\DATA CUTING\Data_Hasil_Cutting\Data_Hasil_Cutting\DM_PD_1.mseed"

# Check if the file exists
if not os.path.isfile(file_path):
    raise FileNotFoundError(f"File {file_path} not found.")

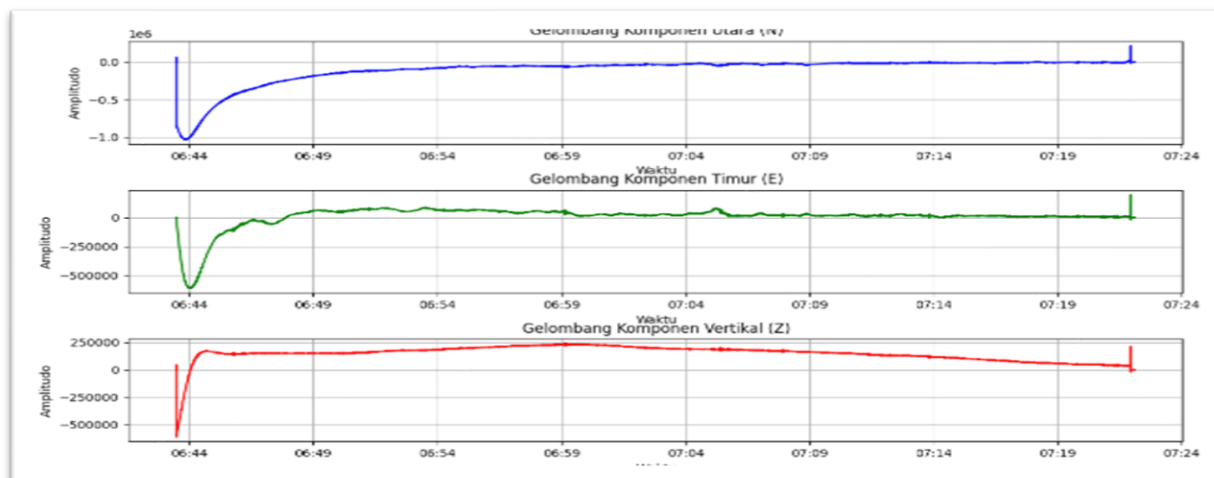
# Membaca file mseed
st = read(file_path) # Ganti dengan nama file Anda
data_n = st.select(component='N')[0] # Komponen Utara
data_e = st.select(component='E')[0] # Komponen Timur
data_z = st.select(component='Z')[0] # Komponen Vertikal
fs = st[0].stats.sampling_rate # Frekuensi sampling
```

Gambar 8. Cuplikan Script Pembacaan Data

Berdasarkan gambar 8 program mendefinisikan path file yang berisi data seismik. Path tersebut mengarah ke file *mseed* yang berada dalam direktori tertentu. Setelah path didefinisikan, program melakukan pengecekan apakah file tersebut benar-benar ada di lokasi yang ditentukan menggunakan fungsi *os.path.isfile()*. Jika file tidak ditemukan, program akan menghentikan eksekusi dan menampilkan pesan error yang informatif. Setelah memastikan file ada, program melanjutkan dengan membaca data seismik menggunakan fungsi *read()* dari library *obspsy*. Fungsi ini membaca file MiniSEED dan mengembalikan objek *Stream* yang berisi semua data seismik. Data seismik biasanya terdiri dari tiga komponen utama: utara (N), timur (E), dan vertikal (Z). Program kemudian memisahkan ketiga komponen ini dengan menggunakan metode *select()* dengan parameter *component* yang sesuai. Setelah pemisahan komponen, program menyimpan frekuensi sampling dari data seismik yang dibaca.

Selanjutnya data yang telah dibaca divisualisasikan dalam domain waktu untuk tiga komponen data (N, E, Z) menggunakan modul “*matplotlib*” dan “*pyplot*”. Kurva sinyal dalam domain waktu ditampilkan dengan warna yang berbeda pada setiap komponen data. Kurva disajikan dalam subplot dengan *figure size* (12 x 8) dengan sumbu X (waktu) dalam format

time.dan sumbu Y (amplitudo). Berikut ini adalah salah satu hasil plotting sinyal mikrotremor dalam domain waktu:



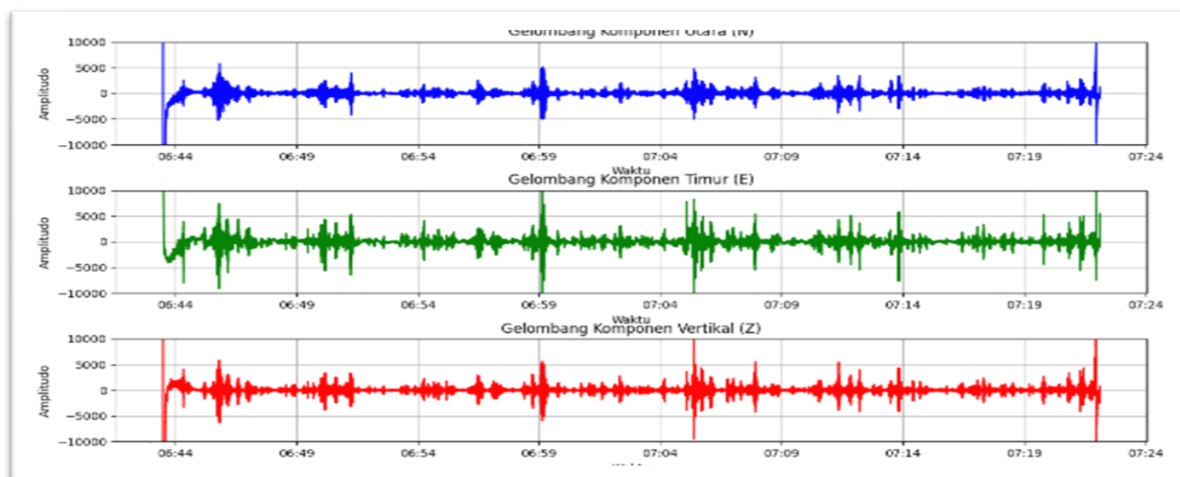
Gambar 9. Sinyal Asli dalam Domain Waktu

Data kemudian difilter menggunakan *Bandpass Filter* yang diimplementasikan dalam fungsi "*bandpass_filter*", Fungsi tersebut menerima data, batas frekuensi bawah dan atas (*lowcut* = 0,10 dan *high cut* = 15,0), frekuensi sampling (*fs* = 50), dan orde filter (*order* = 1) sebagai input. Pertama, fungsi ini menormalisasi frekuensi batas terhadap frekuensi *Nyquist*. Kemudian, menggunakan fungsi "*butter*" dari modul "*scipy.signal*". Fungsi "*bandpass_filter*" mendesain filter Butterworth, yang dikenal karena respons frekuensinya yang datar dalam rentang yang diinginkan. Filter ini diterapkan pada data menggunakan fungsi "*filtfilt*", yang menerapkan filter dua kali untuk menghilangkan distorsi fase. Berikut cuplikan skript *Python* untuk menerapkan *Bandpass Filter*:

```
def bandpass_filter(data, lowcut, highcut, fs, order=1):  
    nyq = 0.5 * fs  
    low = lowcut / nyq  
    high = highcut / nyq  
    b, a = butter(order, [low, high], btype='band')  
    y = filtfilt(b, a, data)  
    return y
```

Gambar 10. Cuplikan Script *Bandpass Filter*

Visualisasi sinyal yang telah difilter dilakukan dengan cara yang sama seperti pada visualisasi gambar 9. Berikut ini adalah salah satu sinyal yang telah difilter menggunakan fungsi "*bandpass_filter*":



Gambar 11. Sinyal Hasil Bandpass Filter dalam Domain Waktu

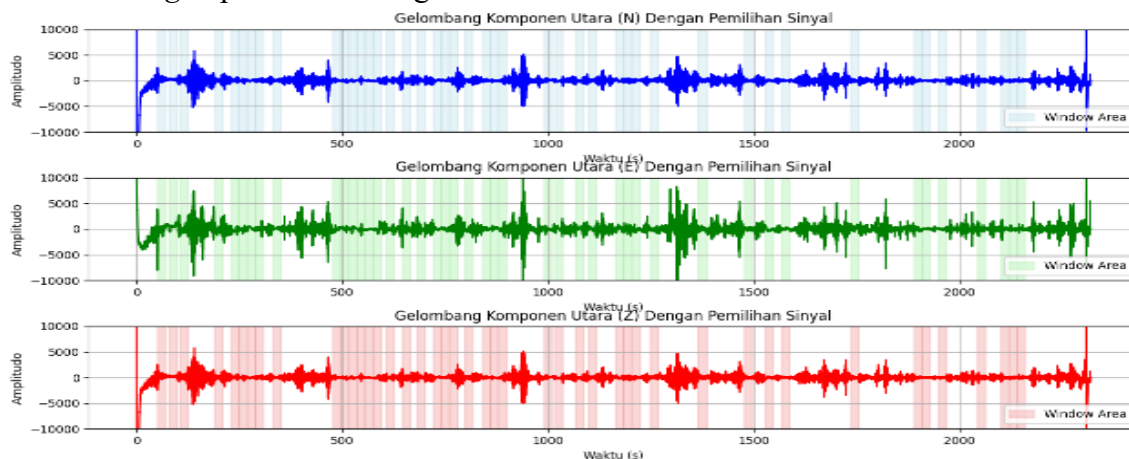
Selanjutnya sinyal dipisahkan menggunakan teknik *Windowing* dilakukan dengan memanfaatkan *tukey window* dimana nilai $\alpha = 0.05$. *Tukey Window* diterapkan pada fungsi “*select_signalsI*”. Fungsi “*select_signals*” dijalankan dengan input berupa signal, *Time Range*, *Duration*, *fs*, *Width*, dan *Lim*. Cuplikan script *Pythin* fungsi “*select_signalsI*” dan “*tukey_window*” adalah sebagai berikut:

```
def tukey_window(length, alpha):  
    """Generate a Tukey window."""  
    return np.hanning(length) * (1 - alpha) + alpha  
  
def select_signals(signal, time_ranges, duration, fs, width, lim):  
    """Select segments of signals based on provided time ranges."""  
    all_segments = []  
    all_peaks = []  
  
    for t in time_ranges:  
        # Calculate start and end samples  
        start_sample = int(t[0] * fs)  
        end_sample = int((t[0] + duration) * fs)  
  
        # Ensure valid range  
        if end_sample > len(signal):  
            end_sample = len(signal)  
  
        # Extract the segment  
        segment = signal[start_sample:end_sample]  
  
        # Create Tukey window  
        window_length = len(segment)  
        window = tukey_window(window_length, alpha=width)
```

Gambar 12. Cuplikan Script *Windowing*

Gambar 12 menunjukkan program *Python* untuk menyeleksi segmen-segmen tertentu dari suatu sinyal berdasarkan rentang waktu yang diberikan. Alur program dimulai dengan fungsi “*tukey_window*” yang bertugas menghasilkan window Tukey, yaitu kombinasi antara window Hann dan window persegi dengan parameter α yang mengontrol transisi antara kedua window tersebut. Fungsi utama “*select_signals*” menerima beberapa parameter seperti sinyal, rentang waktu yang diinginkan, durasi segmen, frekuensi sampling, lebar window, dan parameter batas. Untuk setiap rentang waktu yang diberikan, fungsi ini menghitung posisi sampel awal dan akhir berdasarkan frekuensi sampling. Program kemudian mengekstrak

segmen sinyal sesuai rentang tersebut dan menerapkan window Tukey untuk mengurangi efek leakage spektral. Hasil berupa kumpulan semua segmen sinyal yang telah di-window dan informasi puncak-puncak yang terdeteksi dalam setiap segmen. Visualisasi salah satu sinyal hasil *Windowing* dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 13. Sinyal Hasil *Windowing*

Sinyal hasil *Windowing* kemudian diproses menggunakan algoritma STA/LTA, kemudian algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) diterapkan untuk merubah sinyal dalam domain waktu menjadi domain frekuensi. Hal ini dilakukan agar perhitungan selanjutnya menjadi lebih mudah. Cuplikan *script Python* untuk menerapkan FFT adalah sebagai berikut:

```
# FFT
N = len(event_detection_n)
T = 1.0 / fs
yf_n = fft(event_detection_n)
yf_e = fft(event_detection_e)
yf_z = fft(event_detection_z)
```

Gambar 14. Cuplikan Script FFT

FFT diterapkan pada tiga komponen data (N, E, Z) dengan menggunakan fungsi “*fft*” dari modul *scipy* dan menghitung array frekuensi yang sesuai. Hasil FFT berisi informasi tentang komponen frekuensi dari sinyal, dan array frekuensi (xf) memberikan nilai frekuensi yang sesuai dengan setiap komponen FFT. Data ini kemudian dapat digunakan untuk analisis spektral pada tahap selanjutnya.

Tahapan selanjutnya, perhitungan HVSR dilakukan dengan menerapkan persamaan 7 yang termuat dalam fungsi “*calculate_hvsr*”. Cuplikan scriptnya adalah sebagai berikut:

```
# Fungsi untuk menghitung HVSR
def calculate_hvsr(spectral_n, spectral_e, spectral_z):
    # Menghitung spektrum
    spectrum_n = np.abs(spectral_n)
    spectrum_e = np.abs(spectral_e)
    spectrum_z = np.abs(spectral_z)

    # Menghitung HVSR
    hvsr = ((spectrum_n**2) + (spectrum_e**2))**0.5 / spectrum_z
    return hvsr
```

Gambar 15. Cuplikan Script untuk Menghitung Rasio HVSR

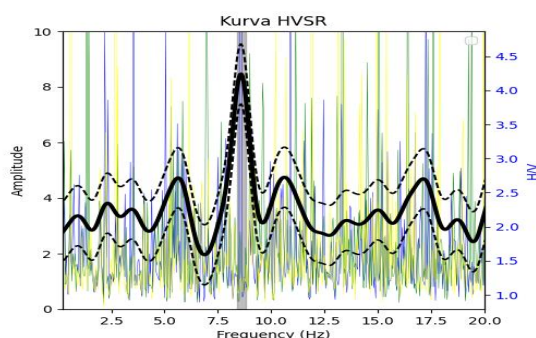
Program pada gambar 15 diterapkan dengan tiga input yang merepresentasikan spektrum frekuensi dari komponen utara (N), timur (E), dan vertikal (Z). Program menghitung magnitudo absolut dari setiap spektrum menggunakan `np.abs()` untuk mendapatkan amplitudo spektral tanpa mempertimbangkan fase. Kemudian, program menghitung spektrum horizontal resultan dengan mengkuadratkan magnitudo komponen utara dan timur, menjumlahkannya, dan mengambil akar kuadrat dari hasil penjumlahan tersebut. Hasil ini merepresentasikan energi total dari gerakan horizontal.

Hasil perhitungan HVSR kemudian dihaluskan dengan menggunakan fungsi “*konno_ohmachi_smoothing*”. Konno-Ohmachi smoothing pada HVSR digunakan untuk memperhalus spektrum rasio horizontal terhadap vertikal. Metode ini membantu mengurangi variasi dan menonjolkan puncak frekuensi. Cupilakan script *Python* untuk menerapkan *smoothing* Konno-Ohmachi adalah sebagai berikut:

```
# Fungsi untuk smoothing Konno-Ohmachi
def konno_ohmachi_smoothing(hvsr, freqs, bandwidth=0.4):
    smoothed_hvsr = np.zeros_like(hvsr)
    for i in range(len(freqs)):
        weights = np.exp(-0.5 * ((freqs - freqs[i]) / bandwidth) ** 2)
        smoothed_hvsr[i] = np.sum(hvsr * weights) / np.sum(weights)
    return smoothed_hvsr
```

Gambar 16. Cuplikan Script *smoothing* Konno-Ohmachi

Program pada gambar 15 menerapkan teknik smoothing (penghalusan) spektral menggunakan metode Konno-Ohmachi pada data *HVSR* (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Program ini menginisialisasi array *smoothed_hvsr* yang ukurannya sama dengan input *hvsr*. Untuk setiap frekuensi dalam array *freqs*, fungsi menghitung bobot Gaussian yang terdistribusi secara simetris di sekitar frekuensi tersebut. Parameter *bandwidth* mengontrol lebar window smoothing - nilai yang lebih kecil menghasilkan smoothing yang lebih lokal, sedangkan nilai yang lebih besar memberikan smoothing yang lebih luas. Bobot Gaussian yang diterapkan menghasilkan nilai tertinggi pada frekuensi pusat dan menurun secara eksponensial ke kedua sisi. Nilai HVSR yang dihaluskan untuk setiap frekuensi kemudian dihitung sebagai rata-rata tertimbang dari semua nilai HVSR asli, dengan bobot Gaussian yang sesuai. Hasil akhir adalah spektrum HVSR yang lebih halus yang mengurangi noise dan fluktuasi acak sambil mempertahankan fitur spektral yang signifikan. Nilai standar deviasi dihitung dengan menerapkan “*std*” dari modul “*Numpy*” yang tersedia pada *Python*. Kurva H/V dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 17. Kurva H/V

Gambar 16 menyajikan kurva H/V yang menginformasikan karakteristik respons dinamis tanah. Frekuensi dominan (f_0) teridentifikasi sebesar 8,6 Hz, menandakan frekuensi resonansi tanah terhadap guncangan seismik. Faktor amplifikasi (A_0) sebesar 4,24 menunjukkan potensi amplifikasi gelombang seismik oleh lapisan tanah. Indeks Kerentanan Seismik (Kg) dihitung menggunakan f_0 dan A_0 menghasilkan nilai Kg sebesar 2,09. Nilai Kg ini mengkuantifikasi kerentanan lokasi terhadap efek seismik. Semakin tinggi Kg, semakin besar potensi kerusakan akibat gempa. Informasi ini krusial untuk analisis risiko seismik dan mitigasi bencana. Pengolahan data selanjutnya dilakukan dengan cara yang sama sehingga memperoleh hasil sebagai berikut:

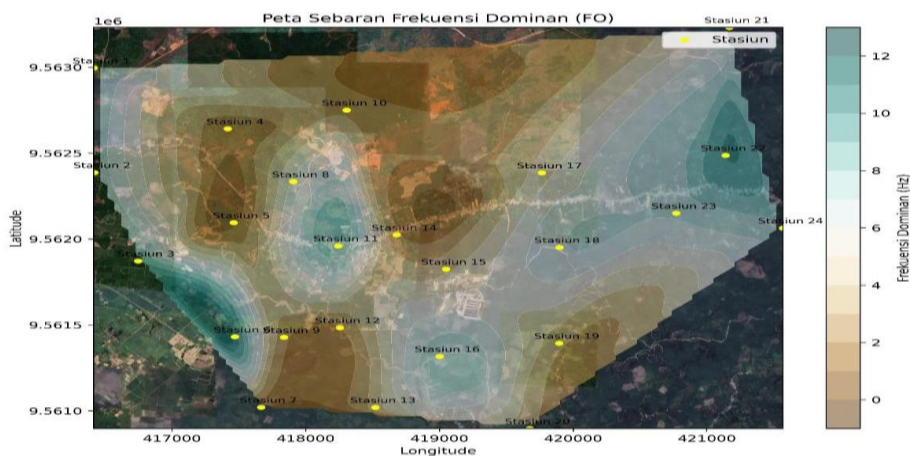
Tabel 1. Hasil Pengolahan Data

Stasiun	f_0	A_0	Kg
1	8,60	4,24	2,09
2	7,85	3,14	1,26
3	9,30	3,37	1,22
4	1,50	2,99	5,97
5	0,75	2,89	11,16
6	10,80	3,28	1,00
7	1,45	4,83	16,12
8	5,15	3,20	1,99
9	2,35	3,55	5,36
10	2,70	3,52	4,58
11	8,60	3,28	1,25
12	2,00	3,29	5,42
13	3,45	3,37	3,30
14	2,25	3,88	6,70
15	3,75	5,19	7,19
16	7,75	3,73	1,80
17	4,55	4,50	4,45
18	6,85	4,54	3,00
19	3,25	2,82	2,45
20	3,10	3,50	3,95
21	5,40	2,51	1,17
22	10,05	4,23	1,78
23	7,20	3,31	1,52
24	7,65	3,54	1,64

Berdasarkan hasil pengolahan data 24 stasiun pengamatan, terlihat adanya variasi yang cukup signifikan pada ketiga variabel yang diukur, yaitu f_0 , A_0 , dan Kg. Nilai f_0 menunjukkan rentang yang lebar, mulai dari 0,75 Hz hingga 10,80 Hz. Perbedaan nilai f_0 antar stasiun ini mengindikasikan adanya faktor-faktor yang mempengaruhi pengukuran di masing-masing lokasi. Sebagai contoh, stasiun 6 mencatat nilai f_0 yang relatif tinggi 10,80 Hz, sementara stasiun 5 memiliki nilai yang jauh lebih rendah 0,75 Hz. Nilai A_0 juga menunjukkan variasi yang menarik, dengan nilai berkisar antara 2,51 hingga 5,19. Perbedaan ini mengindikasikan adanya perbedaan karakteristik yang cukup besar antar stasiun. Nilai A_0 terendah tercatat pada stasiun 21 dengan nilai 2.50, sementara nilai tertinggi ditemukan pada stasiun 15 dengan nilai

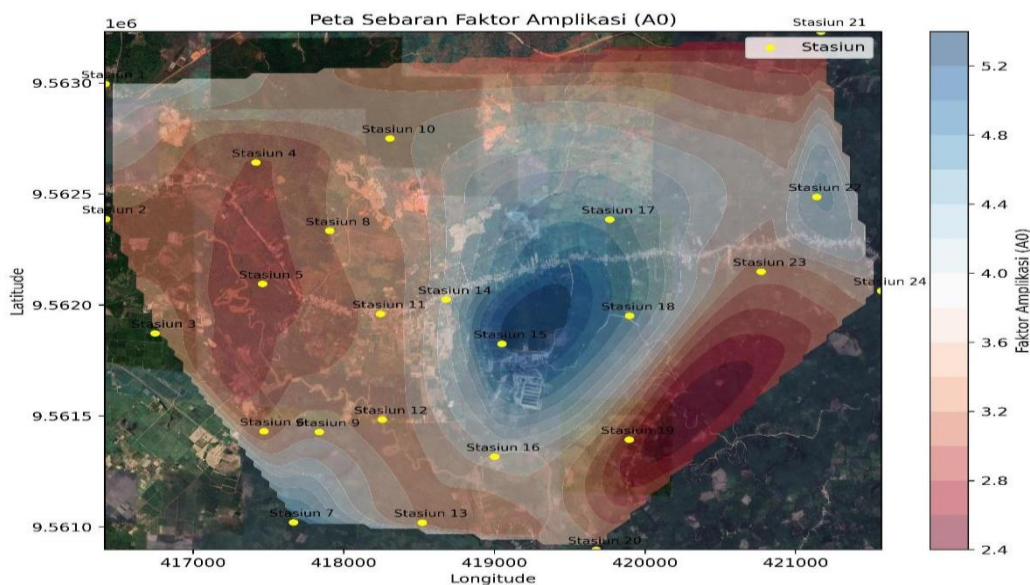
5,19. Nilai K_g juga menunjukkan variasi yang signifikan, yaitu antara 1,00 hingga 16,12. Variasi ini mengindikasikan adanya perbedaan yang mempengaruhi nilai yang terukur di setiap stasiun.

Peta sebaran dibuat dengan menggunakan modul *Python* seperti *pandas*, *numpy*, *matplotlib*, *pyplot*, *scipy*, dan *image*. Data hasil pengolahan yang mencakup nilai frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), indeks kerentanan seismik (K_g) dan koordinat. Data hasil pengolahan selanjutnya diinput dalam program menggunakan fungsi “*read_excel*” dari modul “*pandas*”. Selanjutnya membuat grid x,y , dan z berdasarkan data hasil pengolahan data sebelumnya. Kemudian menggunakan fungsi “*imread*” untuk membaca data citra satelit yang akan di *overlay* dengan pola sebaran yang dihasilkan. Lalu mengatur tampilan peta dengan menambahkan judul, label axis, dan juga *colorbar* agar peta menjadi lebih informatif. Terakhir, output grafis dilengkapi dengan legenda dan label yang disimpan pada folder tertentu. Peta sebaran frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), dan indeks kerentanan seismik (K_g) yang merupakan hasil program dapat dilihat sebagai berikut.



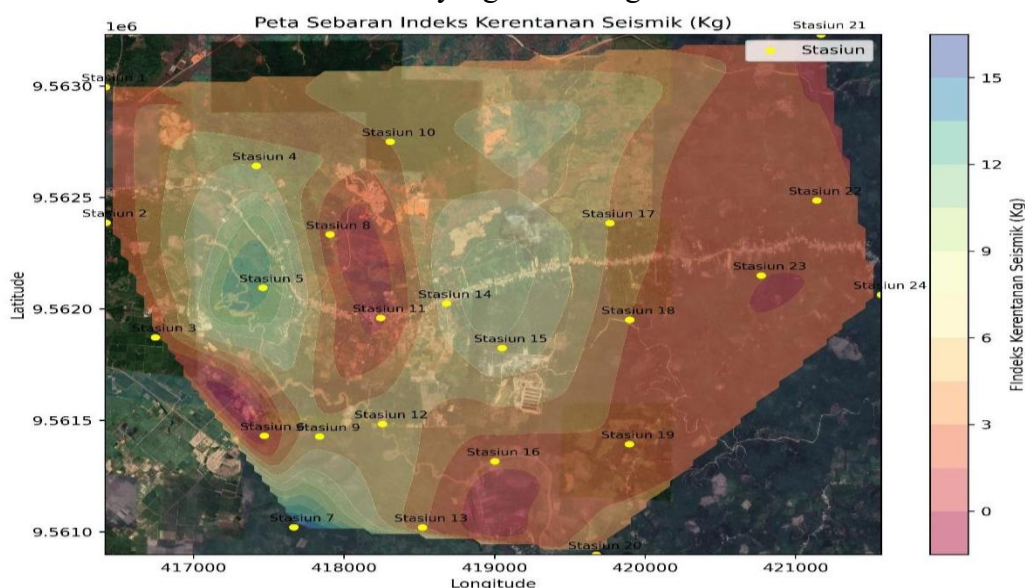
Gambar 18. Peta Sebaran Frekuensi Dominan (f_0)

Peta sebaran frekuensi dominan (f_0), nilai yang tercatat menunjukkan sebaran yang sangat homogen di seluruh area yang diamati, dengan seluruh stasiun pengukuran menunjukkan keberadaan nilai parameter yang seragam. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik dinamis tanah di wilayah ini didominasi oleh respons frekuensi yang stabil dan tidak banyak dipengaruhi oleh variasi lokal kondisi bawah permukaan yang ekstrem.



Gambar 19. Peta Sebaran Faktor Amplifikasi (A_0)

Peta sebaran faktor amplifikasi (A_0) memperlihatkan perbedaan yang sangat tinggi. Sebaran nilai A_0 terkonsentrasi pada kelompok stasiun tertentu, seperti Stasiun 10, 8, 14, 15, 12, 16, dan 13, serta beberapa stasiun lain seperti 17 hingga 20 dan 21. Pola sebaran yang tidak merata dan cenderung mengelompok ini mengindikasikan adanya variasi signifikan dalam kekuatan amplifikasi gelombang seismik di wilayah tersebut. Nilai A_0 yang tinggi pada lokasi-lokasi spesifik umumnya berkorelasi dengan kondisi tanah yang lunak dan ketebalan sedimentasi yang besar, yang berpotensi meningkatkan amplifikasi guncangan gempa. Sementara itu, nilai A_0 yang lebih rendah pada stasiun lain menunjukkan lapisan tanah yang lebih keras atau kedalaman batuan dasar yang lebih dangkal.



Gambar 20. Peta Sebaran Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

Peta sebaran indeks kerentanan seismik (K_g), terlihat adanya variasi nilai yang signifikan antar stasiun pengamatan. Variasi ini menunjukkan tingkat kerentanan tanah yang tidak merata secara geografis, yang diduga kuat dipengaruhi oleh heterogenitas kondisi geologi lokal dan

karakteristik tanah setempat. Nilai K_g yang tinggi terkonsentrasi pada wilayah tertentu, mengindikasikan zona dengan amplifikasi gelombang seismik yang lebih besar akibat jenis tanah lunak, ketebalan sedimen yang besar, atau kondisi water table yang dangkal. Sebaliknya, nilai K_g yang lebih rendah menyebar di area yang didominasi oleh formasi batuan dasar (bedrock) atau tanah dengan kepadatan tinggi yang memiliki kemampuan amplifikasi lebih rendah. Pola sebaran ini memiliki implikasi penting dalam perencanaan tata ruang dan mitigasi bencana gempa bumi. Wilayah dengan nilai K_g tinggi memerlukan perhatian khusus dan penerapan standar konstruksi yang lebih ketat untuk infrastruktur dan bangunan guna mengurangi risiko kerusakan akibat guncangan tanah yang diperkuat.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa bahasa pemrograman Python dapat digunakan dalam pengolahan data mikrotremor dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Program Python yang dihasilkan menjadi sebuah paket program alternatif untuk mengolah data secara simultan, mulai dari tahap awal berupa pembacaan data, penerapan Bandpass Filter, windowing sinyal, transformasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi melalui Fast Fourier Transform (FFT), hingga perhitungan parameter utama, yaitu frekuensi dominan (f_0), faktor amplifikasi (A_0), dan indeks kerentanan seismik (K_g). Selain itu, Python juga mampu menghasilkan visualisasi hasil pengolahan data dalam bentuk peta sebaran f_0 , A_0 , dan K_g yang informatif sehingga mudah diinterpretasi. Visualisasi tersebut memberikan gambaran spasial mengenai karakteristik bawah permukaan dan tingkat kerentanan wilayah terhadap guncangan seismik. Dengan demikian, penerapan program Python tidak hanya mendukung keakuratan analisis risiko gempa bumi, tetapi juga berkontribusi pada penyusunan strategi mitigasi bencana secara lebih terarah, terukur, dan sistematis.

REFERENCES

- Ambarsari, D. (2017). Analisis Mikrotremor Dengan Metode HVSr Untuk Mikrozonasi Kabupaten Gunungkidul Yogyakarta. 95. <https://repository.its.ac.id/72120/>
- Arintalofa, V., Yulianto, G., & Harmoko, U. (2020). Analisis Mikrotremor Menggunakan Metode HVSr untuk Mengetahui Karakteristik Bawah Permukaan Manifestasi Panas Bumi Diwak dan Derekan Berdasarkan Nilai V_p . Jurnal Energi Baru dan Terbarukan, 1(2), 54–61. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9276>
- Chemsitra, P., Utama, W., & Syaeful, A. (2018). Identifikasi litologi lapisan sedimen pada daerah karst Pacitan menggunakan metode mikrotremor HVSr. Jurnal Teknik ITS, 7(1), C77–C80.
- Cintia, J., Br, D., Farduwin, A., & Styawan, Y. (2024). Pemanfaatan Metode Hvsr Untuk Studi Karakteristik Tanah Di Tanjung Kemala Daerah Kabupaten Tanggamus Junita. 10(2), 106–122.
- Di Martino, G., Iodice, A., & Riccio, D. (2019). Closed-Form Anisotropic Polarimetric Two-Scale Model for Fast Evaluation of Sea Surface Backscattering. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(8), 6182–619 <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2904761>
- Fahrurrijal, R., Tohari, A., & Muttaqien, I. (2020). Mikrozonasi Seismik Di Wilayah Ancaman Sesar Lembang Antara Seksi Cihideung Dan Gunung Batu Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor. Riset Geologi dan Pertambangan, 30(1), 81. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2020.v30.1092>
- Faradilla, S. F., Hamimu, L. H., & Juarzan, L. I. (2024). Implementasi Matrix Laboratory Dalam Pengolahan Data Mikrotremor Menggunakan Metode Hvsr: Studi Kasus Di Daerah Pesisir

- Kecamatan Moramo. *Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia*, 6(02), 118–13
<https://doi.org/10.56099/jrgi.v6i02.48>
- Gunawan, Dadang dan Juwono, F. H. (2015). *Pengolahan Sinyal Digital Dengan Pemrograman Matlab*. 6.
- Hamimu, L., Cahyono, E., Budiman, H., S. R., Ransi, N. (2024). Numerical Analysis of Geophysical Parameter Sensitivity on the Multimode Love Wave Dispersion Curves, *Journal of Physics Communications*, Volume 8 Number 1.
- Hamimu, L., Haraty, S.R., Al Rubaiyn, Juarzan, L.I., Indrawati. (2024). Computation and Modelling of Seismic Refraction Tomography for Anisotropic Medium Based on Pseudo Bending Method, *Journal of Physics: Conference Series*, 2734 (2024) 012049
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Leenaars, J. G. B., Walsh, M. G., Shepherd, K. D., Sila, A. M., MacMillan, R. A., De Jesus, J. M., Tamene, L., Tondoh, J. E., Fox, J., Weisberg, S., Baty, F., Ritz, C., Charles, S., Brutsche, M., Flandrois, J. P., Delignette-Muller, M. L., ... Webster, R. (2020). *Learning Geospatial Analysis with Python. Dalam Intelligent Data Mining and Fusion Systems in Agriculture (Vol. 7, Nomor 1)*.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394275-3.00003-1>
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111716>
<https://doi.org/10.1016/j.still.20106.003>
<https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.10.006>
- Muliadi, A; Muttaqin, K. (2019). Filtering Sinyal Menggunakan Band Pass Filter. *JTIM : Jurnal Teknologi Informasi dan Multimedia*, 1(1), 66–69. <https://doi.org/10.35746/jtim.v1i1.16>
- Murdiantoro, R. A., Sismanto, S., & Marjiyono, M. (2018). Pemetaan Daerah Rawan Kerusakan Akibat Gempa Bumi Di Kotamadya Denpasar dan Sekitarnya dengan Menggunakan Analisis Mikrotremor, Studi Kasus : Gempabumi Seririt 14 Juli 1976. *Jurnal Fisika Indonesia*, 20(2), 36. <https://doi.org/10.22146/jfi.28373>
- Nurwidyanto, M. I., Zainuri, M., Wirasatrya, A., & Yuliyanto, G. (2023). Struktur Bawah Permukaan Pantai Semarang berdasarkan Metode HVSR. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 13(1), 117. <https://doi.org/10.13057/ijap.v13i1.66864>
- Rosyilaray, D. P. (2021). Klasifikasi Tanah Berdasarkan Data Distribusi Di Kota Semarang Menggunakan Python. *Dalam Pharmacognosy Magazine (Vol. 75, Nomor 17)*.
- SESAME. (2004). SESAME European research project. European Commision - Research General Directorate, D23.12(December), 62 pp.
- Subakti, H., & Haurissa, A. (2022). Studi Mikrotremor di Wilayah Kerusakan Akibat Gempa bumi Ambon 26 September 2019 menggunakan Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Hvsvr). *Stmkg*, September, 29–49.
- Sweigert, A. (2015). Python: Automate the Boring Stuff. *Dalam Coding*. <https://automatetheboringstuff.com/>
- Wahyudi, S. T., & Rahayu, Y. (2015). Aplikasi Spectrum Analyzer Untuk Menganalisa Frekuensi Sinyal Audio Menggunakan Matlab. *Jom FTEKNIK*, 2(2), 1.
- Wang, P. (2020). Predictability and Repeatability of Non-Ergodic Site Response for Diverse Geological Conditions. *Kaos GL Dergisi*, 8(75), 147–15
<https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125798>
<https://doi.org/10.1016/j.smr.2020.02.002>
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/810049>
<http://doi.wiley.com/10.1002/anie.197505391>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090409500205>
- Yuniarto, A. H. P. (2023). Mikrozonasi Seismik Di Kawasan Itsnu Pekalongan Dengan Menggunakan Metode Hvsr. *Jurnal Kumparan Fisika*, 6(1), 47–5 <https://doi.org/10.33369/jkf.6.1.47-54>
- Yusran, H Simanjuntak, A. V, Umar, M., & Rahmati. (2021). Analisis Kerentanan Seismik dan Model Vs30 Berdasarkan Survei Mikrotremor HVSR dan SPAC (Studi Kasus: Kota Banda Aceh) Seismic Vulnerability and Vs30 Model Analysis based on HVSR and SPAC Microtremor Survey (Case Study: Banda Aceh City). *Lingkungan dan Bencana Geologi*, 12(2), 125–136. <http://jlbjg>