

## **TUGAS AKHIR**

**ANALISIS INDEKS KERENTANAN SEISMIK DAN  
KETEBALAN SEDIMEN DI KECAMATAN DUKUN  
MENGUNAKAN METODE *HORIZONTAL TO VERTICAL  
SPECTRAL RATIO* (HVSr) BERDASARKAN PENGUKURAN  
MIKROTREMOR  
(*ANALYSIS SEISMIC VULNERABILITY INDEX AND  
SEDIMENT THICKNESS IN DUKUN SUBDISTRICT USING  
THE HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr)  
METHOD BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENT*)**

**Ditujukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi  
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**Muhammad Firdaus Sani Wijaya Kusuma**

**20511402**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

**2025**

## TUGAS AKHIR

**ANALISIS INDEKS KERENTANAN SEISMIK DAN  
KETEBALAN SEDIMEN DI KECAMATAN DUKUN  
MENGUNAKAN METODE *HORIZONTAL TO VERTICAL  
SPECTRAL RATIO* (HVSr) BERDASARKAN PENGUKURAN  
MIKROTREMOR  
(*ANALYSIS SEISMIC VULNERABILITY INDEX AND  
SEDIMENT THICKNESS IN DUKUN SUBDISTRICT USING  
THE HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr)  
METHOD BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENT*)**

Disusun Oleh :

**Muhammad Firdaus Sani Wijaya Kusuma**

**20511402**

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk  
memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 25 September 2025

Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing

Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.  
NIK: 18511304

Penguji I

Astriaana Hardawati, S.T., M.Eng.  
NIK: 16511301

Penguji II

Jafar S.T., MURP., M.T.  
NIK: 185111305

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil



Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D (Eng). IPM.  
NIK: 095110101

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa penelitian Tugas Akhir yang saya susun untuk memenuhi salah satu persyaratan Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu yang saya kutip dari karya orang lain telah saya sebutkan sumbernya dengan jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah. Jika di kemudian hari ditemukan bahwa seluruh atau sebagian dari penelitian ini bukan merupakan karya saya sendiri atau terdapat plagiasi dalam bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya peroleh sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Yogyakarta, 17 September 2025

Yang membuat pernyataan,



Muhammad Firdaus Sani Wijaya Kusuma  
(20511402)

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penyusun dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir dengan judul Analisis Indeks Kerentanan Seismik dan Ketebalan Sedimen Di Kecamatan Dukun Menggunakan Metode *Horizontal To Vertical Spectral Ratio* (HVSr) Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor. Penyusunan penelitian Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menempuh gelar sarjana strata satu di Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan penelitian Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapat bantuan dari pihak lain baik dari segi bimbingan, arahan, serta saran dan kritik demi terselesaikannya Tugas Akhir ini dengan hasil yang baik. Untuk itu, pada kesempatan kali ini penyusun ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Ir. Yunalia Muntafi S.T., M.T., Ph.D.(Eng),IPM. selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
2. Bapak Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing, memberikan kritik dan saran, serta dorongan dalam pengerjaan tugas akhir penulis.
3. Bapak Drs. Muhammad Zunaidi, Ibu Setianingsih S.E., Firda Sani Wijayanti S.Farm., Nur Azizah Sani Dwi Jayanti A.Md. selaku orang tua dan kakak penulis yang telah berkorban begitu banyak baik material maupun spiritual, serta selalu memberi dorongan yang menjadikan semangat penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Muhammad Arjuna W, Alfredo Rizqi Syahbana, Aryasuta Danishwara Nugrahatama selaku partner yang membantu penulis mulai dari pengambilan data di lapangan hingga pengolahan data dan penyelesaian naskah tugas akhir penulis

5. Ibu Winarsih dan Bapak Thomas Effendy selaku pemilik posko di Kecamatan Dukun yang sudah mengizinkan penulis menginap selama 10 hari saat pengambilan data di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang.
6. Muhammad Farrel Ghifary, S.T. yang telah membimbing dan membantu penulis menentukan judul tugas akhir ini dan membantu proses pengolahan data serta penyusunan naskah penulis.
7. Mahir Ijlal S., Muhammad Nuzul S., Yafi Dzakia M, Alfina Aflah A., Ghina Hanifah F., Ainaya Filza Jaunaa' F., Fika Risti N., Diah Ayu P., serta teman-teman seperjuangan kuliah yang tidak bisa disebutkan satu persatu. Terima kasih selalu mendukung dan membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Almas Zain A., Rio Pratama, Adam Albary S.Tr.Hut., Muhamad Galang Rasis I.D.P., S.Pd., serta teman-teman seperjuangan "Reuni Tua" yang tidak bisa disebutkan satu persatu. Terima kasih selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini,
9. Semua teman – teman penulis yang sudah meluangkan waktu siang dan malam yang sudah membantu dan memberi semangat kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Seluruh pihak yang terlibat yang tidak dapat penulis sebutkan namanya satu persatu yang telah membantu segala proses dari awal hingga selesainya penyusunan tugas akhir ini.
11. Terakhir, penulis mengapresiasi diri sendiri karena dapat bertahan dan menyelesaikan tugas akhir ini melewati segala hambatan yang ada.  
Akhirnya penulis berharap agar penelitian Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 17 September 2025  
Penulis,

Muhammad Firdaus Sani Wijaya Kusuma  
(20511402)

## DAFTAR ISI

|                                                                                                                                              | Hal  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| HALAMAN JUDUL                                                                                                                                | i    |
| HALAMAN PENGESAHAN                                                                                                                           | ii   |
| HALAMAN ERNYATAAN                                                                                                                            | iii  |
| DAFTAR ISI                                                                                                                                   | vi   |
| DAFTAR TABEL                                                                                                                                 | ix   |
| DAFTAR GAMBAR                                                                                                                                | x    |
| DAFTAR LAMPIRAN                                                                                                                              | xii  |
| DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN                                                                                                                  | xiii |
| ABSTRAK                                                                                                                                      | xiv  |
| <i>ABSTRACT</i>                                                                                                                              | xv   |
| BAB I PENDAHULUAN                                                                                                                            | 1    |
| 1.1    Latar Belakang                                                                                                                        | 1    |
| 1.2    Rumusan Masalah                                                                                                                       | 3    |
| 1.3    Tujuan Penelitian                                                                                                                     | 3    |
| 1.4    Manfaat Penelitian                                                                                                                    | 4    |
| 1.5    Batasan Penelitian                                                                                                                    | 4    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA                                                                                                                      | 7    |
| 2.1    Penelitian Terdahulu                                                                                                                  | 7    |
| 2.1.1    Estimasi Ketebalan Lapisan Sedimen Kawasan Perbukitan<br>Kecamatan Wangi-Wangi Kabupaten Wakatobi Menggunakan<br>Metode HVSR        | 7    |
| 2.1.2 <i>The updated zonation of Seismic Vulnerability Index and ground<br/>                    shear strain at Bengkulu City, Indonesia</i> | 9    |
| 2.1.3    Analisis Data Mikrotremor Untuk Mengetahui Nilai Indeks<br>Kerentanan Seismik Di Kecamatan Jambi Luar Kota                          | 11   |
| 2.1.4 <i>Correlation Between Building Damage Levels and Microtremor<br/>                    HVSR Curve Parameters</i>                        | 13   |
|                                                                                                                                              | vi   |

|                          |                                                                                                                                              |    |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.5                    | <i>V<sub>s30</sub> and depth to bedrock estimates from integrating HVSr measurements and geology-slope approach in the Oslo area, Norway</i> | 16 |
| 2.2                      | Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian yang Akan Dilakukan                                                                      | 19 |
| 2.3                      | Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Penelitian ini                                                                                            | 25 |
| BAB III LANDASAN TEORI   |                                                                                                                                              | 26 |
| 3.1                      | Kondisi Geologi                                                                                                                              | 26 |
| 3.1.1                    | Kondisi Geologi di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang                                                                                       | 26 |
| 3.2                      | Gempa Bumi                                                                                                                                   | 28 |
| 3.3                      | Gelombang Seismik                                                                                                                            | 30 |
| 3.3.1                    | Gelombang Badan ( <i>Body Wave</i> )                                                                                                         | 31 |
| 3.3.2                    | Gelombang Permukaan ( <i>Surface Wave</i> )                                                                                                  | 33 |
| 3.4                      | Mikrotremor                                                                                                                                  | 35 |
| 3.5                      | Metode <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr)                                                                                   | 38 |
| 3.6                      | Uji <i>Outlier</i>                                                                                                                           | 41 |
| 3.7                      | Frekuensi Dominan ( <i>f<sub>g</sub></i> )                                                                                                   | 41 |
| 3.8                      | Amplifikasi                                                                                                                                  | 43 |
| 3.9                      | Faktor Amplifikasi ( <i>A<sub>g</sub></i> )                                                                                                  | 43 |
| 3.10                     | Indeks Kerentanan Seismik ( <i>K<sub>g</sub></i> )                                                                                           | 44 |
| 3.11                     | V <sub>s30</sub> Mikrotremor Menggunakan Inversi Kurva HVSr                                                                                  | 45 |
| 3.12                     | Ketebalan Lapisan Sedimen ( <i>h</i> )                                                                                                       | 46 |
| 3.13                     | Perbandingan V <sub>s30</sub> Mikrotremor dan V <sub>s30</sub> <i>United States Geological Survey</i> (USGS)                                 | 48 |
| BAB IV METODE PENELITIAN |                                                                                                                                              | 50 |
| 4.1                      | Lokasi Penelitian                                                                                                                            | 50 |
| 4.2                      | Peralatan dan Titik Pengumpulan Data                                                                                                         | 51 |
| 4.2.1                    | Peralatan                                                                                                                                    | 51 |
| 4.2.2                    | Teknik Pengumpulan Data                                                                                                                      | 53 |
| 4.3                      | Pengolahan Data                                                                                                                              | 56 |
| 4.3.1                    | Pengolahan Data Mikrotremor                                                                                                                  | 56 |

|                                |                                                                                                                   |     |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.2                          | Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik ( $Kg$ )                                                                    | 57  |
| 4.3.3                          | $V_{s30}$ Mikrotremor Dengan Inversi Kurva H/V Menggunakan Metode <i>Ellipticity Curve</i>                        | 57  |
| 4.3.4                          | Perhitungan Ketebalan Lapisan Sedimen ( $h$ )                                                                     | 58  |
| 4.3.5                          | Perbandingan $V_{s30}$ Mikrotremor dan $V_{s30}$ <i>United States Geological Survey</i> (USGS)                    | 58  |
| 4.4                            | Diagram Alir Penelitian                                                                                           | 60  |
| BAB V                          |                                                                                                                   | 61  |
| DATA, ANALISIS, DAN PEMBAHASAN |                                                                                                                   | 61  |
| 5.1                            | Pengambilan Data di Lapangan                                                                                      | 61  |
| 5.2                            | Analisis Data Mikrotremor                                                                                         | 63  |
| 5.3                            | Uji <i>Outlier</i>                                                                                                | 66  |
| 5.4                            | Analisis Frekuensi Dominan ( $f_g$ )                                                                              | 71  |
| 5.5                            | Analisis Faktor Amplifikasi ( $Ag$ )                                                                              | 75  |
| 5.6                            | Analisis Indeks Kerentanan Seismik ( $Kg$ )                                                                       | 79  |
| 5.7                            | Analisis Inversi Kurva HVSR                                                                                       | 83  |
| 5.8                            | Analisis Nilai Ketebalan Lapisan Sedimen ( $h$ )                                                                  | 88  |
| 5.9                            | Perbandingan Hasil Inversi HVSR $V_{s30}$ Mikrotremor dan $V_{s30}$ <i>United States Geological Survey</i> (USGS) | 94  |
| 5.10                           | Rekapitulasi Hasil Analisis Penelitian                                                                            | 98  |
| BAB VI                         |                                                                                                                   | 102 |
| KESIMPULAN DAN SARAN           |                                                                                                                   | 102 |
| 6.1                            | Kesimpulan                                                                                                        | 102 |
| 6.2                            | Saran                                                                                                             | 104 |
| DAFTAR PUSTAKA                 |                                                                                                                   | 105 |
| LAMPIRAN                       |                                                                                                                   | 109 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                                       | Hal |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabel 2.1 Nilai Parameter Tanah Di Kecamatan Jambi Luar Kota                                          | 12  |
| Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu                                                           | 20  |
| Tabel 3.1 Prosedur Operasional Untuk Pengukuran Mikrotremor                                           | 36  |
| Tabel 3.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai Frekuensi Natural Oleh Kanai                            | 42  |
| Tabel 3.3 Klasifikasi Nilai Faktor Amplifikasi                                                        | 44  |
| Tabel 3.4 Klasifikasi Nilai Indeks Kerentanan Seismik                                                 | 45  |
| Tabel 3.5 Klasifikasi Site Berdasarkan Nilai Vs Hasil Penyelidikan Tanah dan<br>Laboratorium SNI 1726 | 47  |
| Tabel 4.1 Koordinat Titik Penelitian                                                                  | 54  |
| Tabel 5.1 Hasil Uji <i>Outlier</i> Nilai Frekuensi Dominan ( $fg$ )                                   | 68  |
| Tabel 5.2 Hasil Uji <i>Outlier</i> Nilai Amplifikasi Tanah ( $Ag$ )                                   | 69  |
| Tabel 5.3 Rekapitulasi Nilai Frekuensi Dominan ( $fg$ ) di Kecamatan Dukun                            | 72  |
| Tabel 5.4 Rekapitulasi Nilai Faktor Amplifikasi ( $Ag$ ) di Kecamatan Dukun                           | 75  |
| Tabel 5.5 Rekapitulasi Indeks Kerentanan Seismik ( $Kg$ ) di Kecamatan Dukun                          | 80  |
| Tabel 5.6 Hasil Inversi HVSR Pada Titik 35                                                            | 85  |
| Tabel 5.7 Rekapitulasi Nilai $V_{s30}$ di Kecamatan Dukun                                             | 85  |
| Tabel 5.8 Rekapitulasi Nilai Ketebalan Lapisan Sedimen ( $h$ ) di Kecamatan<br>Dukun                  | 89  |
| Tabel 5.9 Rekapitulasi Nilai $V_{s30}$ Mikrotremor dan $V_{s30}$ USGS                                 | 95  |
| Tabel 5.10 Rekapitulasi Hasil Analisis Penelitian                                                     | 99  |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                                            | Hal |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 1.1 Peta Tektonika Indonesia                                                                                                                                        | 1   |
| Gambar 1.2 Peta Titik Penelitian di Kawasan TNGM                                                                                                                           | 5   |
| Gambar 2.1 Profil Penampang 3D                                                                                                                                             | 8   |
| Gambar 2.2 Kurva HVSR Dari Data Mikrotremor Yang Digunakan Untuk<br>Menentukan Frekuensi Resonansi dan Faktor Amplifikasi                                                  | 10  |
| Gambar 2.3 Peta Indeks Kerentanan Seismik Hasil Penelitian Sebelumnya dan<br>Zonasi Terbaru Nilai Kg di Kota Bengkulu                                                      | 11  |
| Gambar 2.4 Peta Sebaran Indeks Kerentanan Seismik di Kecamatan Jambi Luar<br>Kota                                                                                          | 12  |
| Gambar 2.5 Hasil Kurva HSVR                                                                                                                                                | 14  |
| Gambar 2.6 Peta Distribusi Nilai Frekuensi Dominan ( $f_0$ )                                                                                                               | 15  |
| Gambar 2.7 Peta Sebaran Nilai $V_{s30}$ di Oslo                                                                                                                            | 17  |
| Gambar 2.8 Kurva HVSR                                                                                                                                                      | 18  |
| Gambar 2.9 Perbandingan Antara Pendekatan HVSR (Hijau), Geologi-<br>Kemiringan (Biru), dan Gabungan (Kuning) Dalam Memperkirakan<br>Nilai $V_{s30}$ (dalam m/s) di Area 1. | 18  |
| Gambar 3.1 Peta Kondisi Wilayah Kecamatan Dukun                                                                                                                            | 27  |
| Gambar 3.2 Peta Geologi Kabupaten Magelang                                                                                                                                 | 28  |
| Gambar 3.3 Pergerakan Lempeng Tektonika                                                                                                                                    | 30  |
| Gambar 3.4 Pergerakan Gelombang Primer                                                                                                                                     | 32  |
| Gambar 3.5 Pergerakan Gelombang Sekunder                                                                                                                                   | 33  |
| Gambar 3.6 Pergerakan Gelombang <i>Rayleigh</i>                                                                                                                            | 34  |
| Gambar 3.7 Pergerakan Gelombang <i>Love</i>                                                                                                                                | 35  |
| Gambar 3.8 Data Mikrotremor                                                                                                                                                | 38  |
| Gambar 3.9 Gerakan Horizontal dan Vertikal Pada Area Cekungan                                                                                                              | 40  |
| Gambar 4.1 Peta Administrasi Kecamatan Dukun                                                                                                                               | 50  |
| Gambar 4.2 Peta Titik Penelitian Di Kecamatan Dukun                                                                                                                        | 51  |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.3 Peralatan Yang Digunakan Dalam Proses Pengukuran Mikrotremor                                         | 53 |
| Gambar 4.4 Proses Windowing Data Mikrotremor                                                                    | 57 |
| Gambar 4.5 Diagram Alir Penelitian                                                                              | 60 |
| Gambar 5.1 Penunjuk Arah Mata Angin Pada Seismometer                                                            | 62 |
| Gambar 5.2 Proses <i>Leveling</i> Seismometer                                                                   | 62 |
| Gambar 5.3 Sinyal Rekaman Mikrotremor Titik 35                                                                  | 63 |
| Gambar 5.4 <i>Filter Option</i> untuk <i>Windowing</i> Sinyal Mikrotremor Titik 35                              | 64 |
| Gambar 5.5 <i>Windowing</i> Sinyal Mikrotremor Titik 35                                                         | 65 |
| Gambar 5.6 Kurva HVSR Pada Titik 35                                                                             | 65 |
| Gambar 5.7 Kurva HVSR Pada Titik 35 Setelah Filterisasi                                                         | 66 |
| Gambar 5.8 Peta Persebaran Nilai Frekuensi Dominan ( $fg$ ) di Kecamatan<br>Dukun                               | 74 |
| Gambar 5.9 Peta Persebaran Nilai Faktor Amplifikasi ( $Ag$ ) di Kecamatan<br>Dukun                              | 78 |
| Gambar 5.10 Peta Persebaran Indeks Kerentanan Seismik ( $Kg$ ) di Kecamatan<br>Dukun                            | 82 |
| Gambar 5.11 Tampilan Proses Inversi HVSR Pada Perangkat Lunak Dinver                                            | 83 |
| Gambar 5.12 Grafik Hasil Inversi HVSR Pada Titik 35                                                             | 84 |
| Gambar 5.13 Peta Persebaran Kecepatan Geser Tanah Hingga Kedalaman 30<br>Meter ( $V_{s30}$ ) di Kecamatan Dukun | 87 |
| Gambar 5.14 Model 3D Lapisan Sedimen dan <i>Bedrock</i> di Kecamatan Dukun                                      | 92 |
| Gambar 5.15 Model 3D Lapisan Sedimen di Kecamatan Dukun                                                         | 93 |
| Gambar 5.16 Model 3D Lapisan <i>Bedrock</i> di Kecamatan Dukun                                                  | 93 |
| Gambar 5.17 Penampang Lapisan Sedimen dan <i>Bedrock</i> di Kecamatan Dukun                                     | 94 |
| Gambar 5.18 Grafik Perbandingan $V_{s30}$ Mikrotremor dan $V_{s30}$ USGS                                        | 97 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|                                       | Hal |
|---------------------------------------|-----|
| Lampiran 1 Gambar Kurva HVSR          | 110 |
| Lampiran 2 Grafik Kurva Inversi HVSR  | 124 |
| Lampiran 3 Gambar Peta Persebaran     | 138 |
| Lampiran 4 Model 3D Lapisan           | 143 |
| Lampiran 5 Surat Perizinan Penelitian | 147 |

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

|                           |                                                          |
|---------------------------|----------------------------------------------------------|
| HVSR                      | = <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i>           |
| BMKG                      | = Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika          |
| USGS                      | = <i>United States Geological Survey</i>                 |
| P                         | = Kecepatan Material                                     |
| V <sub>s</sub>            | = Kecepatan Gelombang Geser                              |
| V <sub>s30</sub>          | = Kecepatan Gelombang Geser Hingga Kedalaman 30 Meter    |
| $\lambda$                 | = Kekakuan Batuan                                        |
| $\rho$                    | = Kerapatan Batuan                                       |
| h                         | = Ketebalan Sedimen                                      |
| T <sub>H</sub>            | = Faktor Amplifikasi Horizontal                          |
| S <sub>HS</sub>           | = Spektra Fourier Komponen Horizontal di Permukaan Tanah |
| S <sub>HB</sub>           | = Spektra Fourier Komponen Vertikal di Lapisan Dasar     |
| T <sub>V</sub>            | = Faktor Amplifikasi Vertikal                            |
| S <sub>VS</sub>           | = Spektra Fourier Komponen Vertikal di Permukaan Tanah   |
| S <sub>VB</sub>           | = Spektra Fourier Komponen Vertikal di Lapisan Dasar     |
| T <sub>SITE</sub>         | = Rasio Spektrum Mikrotremor                             |
| SH <sub>North-South</sub> | = Sinyal horizontal arah utara dan selatan               |
| SH <sub>East-West</sub>   | = Sinyal horizontal arah timur dan barat                 |
| K <sub>g</sub>            | = Indeks Kerentanan Seismik                              |
| A <sub>g</sub>            | = Faktor Amplifikasi Tanah                               |
| F <sub>g</sub>            | = Frekuensi Dominan Tanah                                |
| EW                        | = <i>East - West</i>                                     |
| NS                        | = <i>North - South</i>                                   |

## ABSTRAK

Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang, merupakan wilayah rawan gempa karena posisinya berdekatan dengan Gunung Merapi. Penelitian ini menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) berbasis pengukuran mikrotremor untuk menganalisis kondisi bawah permukaan. Dari 43 titik rencana, data berhasil diperoleh di 42 titik, dengan satu data teridentifikasi sebagai outlier dan tidak digunakan. Parameter utama yang dihitung meliputi frekuensi dominan ( $f_g$ ), faktor amplifikasi ( $A_g$ ), indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ), kecepatan gelombang geser rata-rata hingga 30 meter ( $V_{s30}$ ), serta ketebalan sedimen ( $h$ ).

Hasil penelitian menunjukkan nilai frekuensi dominan ( $f_g$ ) berkisar 0,87–11,72 Hz, faktor amplifikasi ( $A_g$ ) berada pada rentang 1,18–5,55, dan indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) bervariasi antara 0,38–12,91. Ketebalan sedimen ( $h$ ) diperoleh antara 4,96–65,65 meter dengan pola sebaran yang dipengaruhi kondisi geologi setempat. Perbandingan nilai  $V_{s30}$  mengindikasikan perbedaan yang cukup besar, di mana  $V_{s30}$  mikrotremor rata-rata hanya 177–245 m/s, sedangkan  $V_{s30}$  USGS mencapai 478–542 m/s. Perbedaan ini menunjukkan adanya pengaruh heterogenitas material vulkanik Merapi terhadap respons seismik lokal.

Penelitian ini memberikan gambaran detail mengenai kerentanan seismik dan ketebalan sedimen di Kecamatan Dukun yang dapat menjadi dasar dalam perencanaan pembangunan, perancangan struktur tahan gempa, serta strategi mitigasi bencana di wilayah rawan gempa.

Kata kunci: HVSr, indeks kerentanan seismik,  $V_{s30}$ , ketebalan sedimen, Kecamatan Dukun

## ***ABSTRACT***

*Dukun Subdistrict, Magelang Regency, is a seismically vulnerable area due to its proximity to Mount Merapi. This study applies the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) method based on microtremor measurements to analyze subsurface conditions. Of the 43 planned measurement points, data were successfully collected at 42 points, with one dataset identified as an outlier and excluded from the analysis. The main parameters calculated include dominant frequency ( $f_g$ ), amplification factor ( $A_g$ ), seismic vulnerability index ( $K_g$ ), average shear-wave velocity to 30 meters depth ( $V_{s30}$ ), and sediment thickness ( $h$ ).*

*The results show that the dominant frequency ( $f_g$ ) ranges from 0,87 to 11,72 Hz, the amplification factor ( $A_g$ ) ranges between 1,18 and 5,55, and the seismic vulnerability index ( $K_g$ ) varies from 0,38 to 12,91. Sediment thickness ( $h$ ) is estimated to be between 5,96 and 65,65 meters, with distribution patterns influenced by local geological conditions. A significant difference was observed in  $V_{s30}$  values: microtremor-based  $V_{s30}$  ranges from 177 to 245 m/s, whereas USGS data indicates values between 478 and 542 m/s. This discrepancy highlights the influence of Merapi's heterogeneous volcanic materials on the local seismic response.*

*This research provides a detailed overview of seismic vulnerability and sediment thickness in Dukun Subdistrict, which can serve as a basis for urban planning, earthquake-resistant structural design, and disaster mitigation strategies in seismically prone areas.*

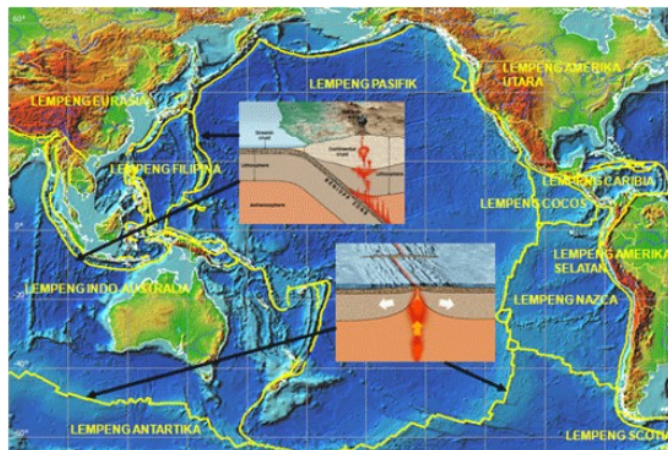
***Keywords:*** *HVSr, seismic vulnerability index,  $V_{s30}$ , sediment thickness, Dukun Subdistrict*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia terletak di kawasan pertemuan tiga lempeng tektonik besar dunia, yaitu Lempeng Eurasia di bagian utara, Lempeng Indo-Australia di selatan, dan Lempeng Pasifik di timur. Pergerakan dan interaksi terus-menerus antara lempeng-lempeng bumi ini menyebabkan terjadinya tekanan dan gesekan di sepanjang batasnya. Fenomena ini berpotensi memicu bencana alam seperti gempa bumi yang dapat mengancam keselamatan penduduk dan merusak infrastruktur di wilayah yang terpengaruh (Fadhilah dkk., 2021). Berikut merupakan peta tektonika Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1.1.



**Gambar 1.1 Peta Tektonika Indonesia**

*(Sumber: BMKG)*

Gempa bumi adalah getaran yang terjadi secara tiba-tiba di permukaan bumi akibat dari pelepasan energi yang disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik, aktivitas gunung berapi, atau aktivitas penambangan. Risiko yang disebabkan oleh gempa bumi biasanya dipengaruhi oleh magnitudo gempa, jarak dari pusat gempa,

serta karakteristik geologi lokal pada area tersebut. Saat gempa terjadi, gelombang seismik akan mengalami multi refleksi antara lapisan batuan dasar dan lapisan sedimen, yang dapat memperkuat atau mengurangi dampak guncangan tergantung pada sifat dan ketebalan lapisan tersebut (Sugianto et al., 2021).

Kecamatan Dukun, yang terletak di Kabupaten Magelang, Jawa Tengah, merupakan salah satu daerah dengan risiko tinggi terhadap gempa bumi. Posisi geografisnya yang dekat dengan Gunung Merapi, salah satu gunung api paling aktif di dunia membuat wilayah ini memiliki karakteristik geologi yang kompleks. Aktivitas vulkanik dan tektonik di sekitar berpotensi menghasilkan getaran seismik yang signifikan, baik dalam bentuk gempa vulkanik maupun gempa tektonik. Oleh karena itu, kajian kerentanan seismik di Kecamatan Dukun menjadi langkah penting dalam memahami potensi bahaya dan risiko yang dihadapi masyarakat setempat.

Kerentanan seismik suatu wilayah sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal, terutama ketebalan lapisan sedimen yang dapat memperbesar amplitudo gelombang seismik melalui proses amplifikasi. Lapisan sedimen yang tebal cenderung menghasilkan resonansi yang lebih kuat, meningkatkan risiko kerusakan pada struktur bangunan di permukaan tanah. Dalam konteks ini, metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) yang berbasis pengukuran mikrotremor menjadi salah satu metode unggulan untuk memetakan ketebalan sedimen dan menentukan frekuensi dominan tanah. Data ini dapat digunakan untuk menghitung indeks kerentanan seismik ( $Kg$ ), yang merupakan parameter penting dalam mengevaluasi potensi dampak gempa bumi.

Mikrotremor adalah getaran tanah dengan amplitudo rendah yang disebabkan oleh aktivitas alami maupun buatan manusia. Getaran ini dapat direkam menggunakan perangkat seismograf, kemudian dianalisis menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Metode HVSr bekerja dengan menghitung perbandingan antara komponen horizontal dan vertikal dari gelombang seismik, menghasilkan kurva yang menunjukkan frekuensi dominan ( $fg$ ) dan faktor amplifikasi ( $Ag$ ). Kurva ini menyediakan informasi penting mengenai struktur bawah permukaan, seperti estimasi kecepatan gelombang geser ( $Vs$ )

(Diniati et al., 2024). Selanjutnya, data diolah dimana nilai frekuensi dominan ( $fg$ ) dan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) digunakan untuk menentukan ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ). Sementara itu, frekuensi dominan ( $fg$ ) dan faktor amplifikasi ( $Ag$ ) dimanfaatkan untuk menghitung nilai indeks kerentanan seismik ( $Kg$ ).

Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi kerentanan seismik di Kecamatan Dukun melalui analisis indeks kerentanan seismik, ketebalan sedimen, serta pemodelan bawah permukaan berdasarkan metode HVSR. Selain itu, penelitian ini juga menekankan validasi hasil dengan membandingkan nilai  $V_{s30}$  dari pengukuran mikrotremor dan data *United States Geological Survey* (USGS), sehingga dapat memperkuat pemahaman terhadap karakteristik geologi lokal dan potensi bahaya gempa di wilayah Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan menjadi fokus penelitian dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana distribusi nilai indeks kerentanan seismik ( $Kg$ ) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang?
2. Bagaimana hasil inversi kurva HVSR dalam memperoleh kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang?
3. Bagaimana ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang?
4. Bagaimana perbandingan hasil inversi HVSR  $V_{s30}$  mikrotremor penelitian ini dan  $V_{s30}$  *United States Geological Survey* (USGS) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang dirancang berdasarkan rumusan masalah tersebut adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis distribusi nilai indeks kerentanan seismik ( $Kg$ ) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang.
2. Inversi kurva HVSR menggunakan metode *ellipticity curve* untuk memperoleh kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ).
3. Mengidentifikasi ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang disertai pemodelan 3D.
4. Menganalisis hasil perbandingan inversi HVSR  $V_{s30}$  mikrotremor penelitian ini dan  $V_{s30}$  *United States Geological Survey* (USGS) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yang diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan adalah sebagai berikut.

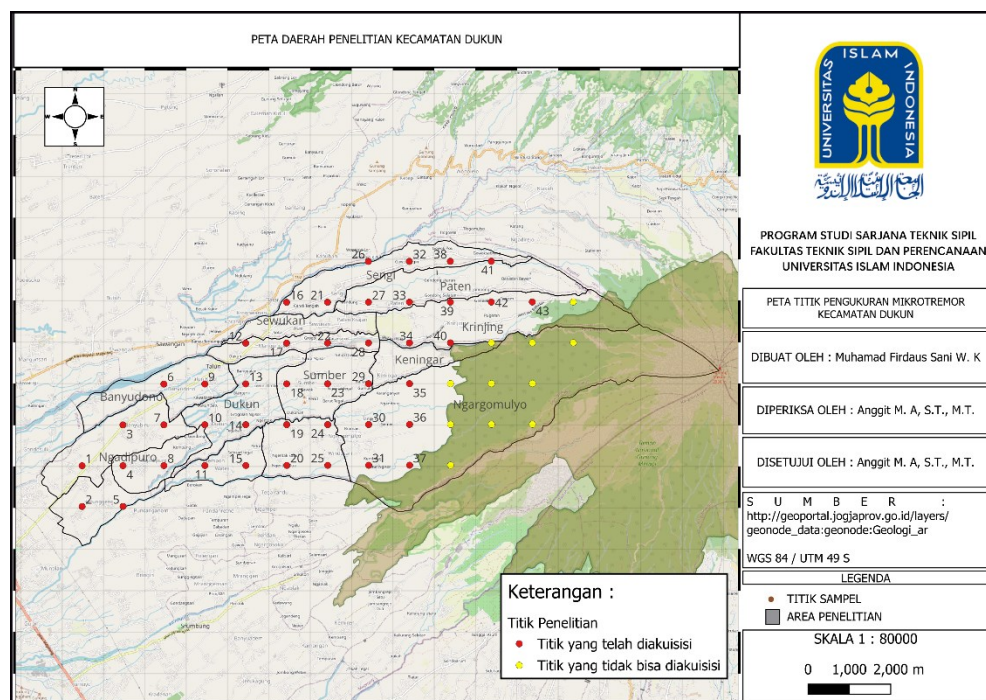
1. Memberikan informasi terkait kedalaman lapisan sedimen ( $h$ ) dan indeks kerentanan seismik ( $Kg$ ) yang dapat digunakan dalam upaya mitigasi bencana gempa bumi.
2. Memberikan informasi mengenai perbedaan  $V_{s30}$  mikrotremor dan  $V_{s30}$  *United States Geological Survey* (USGS).
3. Memberikan informasi yang dapat digunakan untuk merencanakan pembangunan di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang guna mengurangi dampak kerusakan akibat gempa bumi.
4. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi atau sumber literatur yang bermanfaat bagi penelitian-penelitian selanjutnya.

#### 1.5 Batasan Penelitian

1. Penelitian untuk memenuhi tugas akhir ini dilaksanakan Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang atau dengan letak geografis  $110^{\circ} 01' 51'' - 110^{\circ} 12' 48''$  BT dan  $7^{\circ} 19' 13''$  BT –  $7^{\circ} 35' 99''$  LS.
2. Dalam analisis data, software Geopsy digunakan, sedangkan untuk pemetaan memanfaatkan software QGIS. Pengolahan data dilakukan menggunakan

metode HVSR, kemudian pemodelan akan dilakukan dengan bantuan aplikasi Dinver untuk menentukan ketebalan lapisan sedimen.

3. Pengambilan data mikrotremor dilakukan dengan mengacu pada aturan yang ditetapkan oleh SESAME European Research Project (SESAME, 2004).
4. Alat yang digunakan untuk pengambilan data mikrotremor adalah *Lennartz Electronic type LE-3D/20s*.
5. Pengambilan data mikrotremor penelitian ini menggunakan jarak interval titik pengukuran sekitar  $\pm 1$  km.
6. Beberapa titik penelitian tidak dapat dijangkau karena kondisi yang tidak memungkinkan untuk pengambilan data, seperti kawasan Taman Nasional Gunung Merapi (TNGM), area pertambangan, dan wilayah di luar batas administrasi Kecamatan Dukun. Bagian dari Kecamatan Dukun yang masuk dalam kawasan TNGM ditunjukkan pada Gambar 1.1. Titik-titik berwarna kuning pada gambar tersebut menunjukkan area yang termasuk dalam zona konservasi, sehingga pengambilan data di lokasi tersebut tidak diperbolehkan.



**Gambar 1.2 Peta Titik Penelitian di Kawasan TNGM**

7. Dari total 43 titik yang direncanakan untuk penelitian terdapat satu titik yang tidak dapat dijangkau, yaitu titik 36. Titik tersebut tidak dapat diakses karena berada dalam area tambang pasir yang memerlukan izin khusus apabila ingin melakukan pengambilan data di lokasi tersebut.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

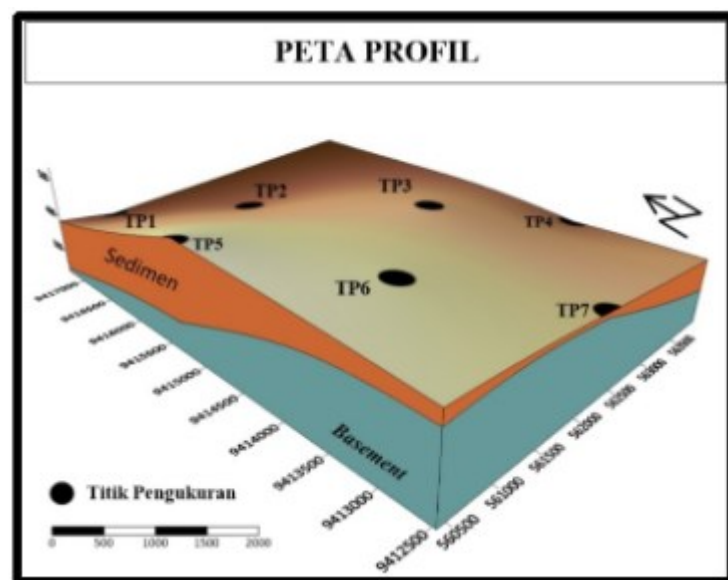
Penelitian ini mengacu pada berbagai referensi yang digunakan sebagai dasar dalam penyusunan tugas akhir. Referensi yang dipilih merupakan penelitian terdahulu yang memiliki kesamaan baik dari segi lokasi penelitian maupun metode yang digunakan sehingga relevan dengan penelitian yang dilakukan. Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan oleh peneliti.

##### **2.1.1 Estimasi Ketebalan Lapisan Sedimen Kawasan Perbukitan Kecamatan Wangi-Wangi Kabupaten Wakatobi Menggunakan Metode HVSR**

Penelitian oleh Pratama dkk. (2021) mengkaji ketebalan lapisan sedimen di Kawasan Perbukitan Kecamatan Wangi-Wangi, Kabupaten Wakatobi, menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Metode ini memanfaatkan getaran alami tanah (mikrotremor) untuk mengidentifikasi frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan tingkat amplifikasi ( $A_0$ ), yang kemudian dikonversi menjadi estimasi ketebalan sedimen melalui pendekatan empiris. Studi ini dilakukan di wilayah perbukitan dengan kondisi geologi yang kompleks, di mana pemahaman ketebalan sedimen sangat penting untuk mitigasi risiko bencana, seperti longsor atau gempa, serta perencanaan pembangunan infrastruktur. Penelitian ini menegaskan bahwa metode HVSR dapat menjadi solusi praktis untuk memetakan kondisi bawah permukaan di daerah terpencil atau berbukit, di mana metode eksplorasi konvensional seringkali sulit diterapkan.

Hasil penelitian menunjukkan variasi ketebalan sedimen yang cukup signifikan di wilayah tersebut, mulai dari 5 meter hingga 40 meter. Daerah dengan frekuensi dominan rendah (di bawah 1 Hz) cenderung memiliki lapisan sedimen yang lebih tebal, sementara frekuensi tinggi (di atas 3 Hz) mengindikasikan sedimen tipis atau batuan dasar yang dekat dengan permukaan. Temuan ini sesuai

dengan studi sebelumnya yang menyatakan bahwa frekuensi dominan berbanding terbalik dengan ketebalan sedimen. Selain itu, analisis juga mengungkap bahwa kondisi topografi dan jenis material sedimen memengaruhi akurasi estimasi. Misalnya, lereng curam atau material sedimen heterogen dapat menyebabkan variasi hasil yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi data. Penelitian ini juga memvalidasi hasil HVSr dengan data geologi eksisting, menunjukkan konsistensi dalam mengidentifikasi zona tanah lunak dan batuan keras. Gambar 2.1 merupakan hasil dari ketebalasan sedimen yang telah 3D.



pengambilan sampel bor tanah atau uji geoteknik langsung dapat digunakan sebagai pembanding untuk memastikan keandalan estimasi.

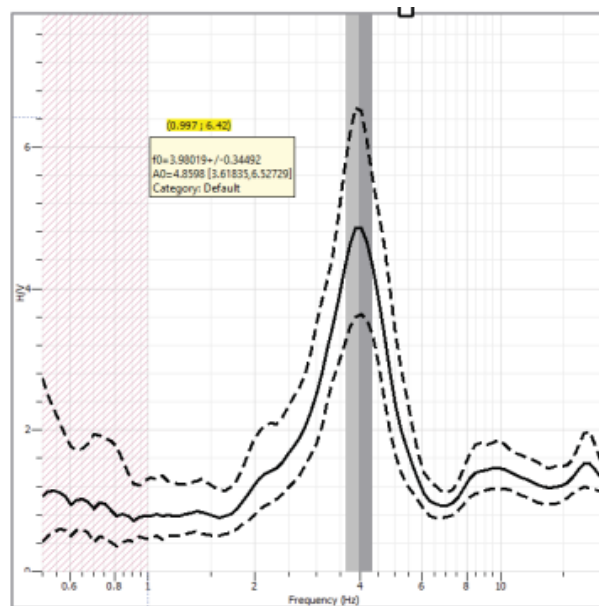
Kontribusi utama penelitian ini terletak pada aplikasi praktis metode HVSR untuk pemetaan geoteknik di daerah berbukit dan terpencil seperti Wakatobi. Hasilnya dapat menjadi dasar bagi pemerintah setempat dalam merencanakan tata ruang, membangun infrastruktur tahan gempa, atau mengidentifikasi zona rawan longsor. Selain itu, metode ini menawarkan alternatif yang lebih ekonomis dan efisien dibandingkan teknik eksplorasi konvensional, terutama di wilayah dengan akses terbatas. Penelitian ini juga mendorong perlunya kolaborasi multidisiplin antara ahli geofisika, geologi, dan perencana wilayah untuk mengoptimalkan mitigasi risiko bencana berbasis data. Dengan demikian, studi ini tidak hanya memperkaya pengetahuan geofisika terapan, tetapi juga memberikan solusi nyata bagi pembangunan berkelanjutan di daerah kepulauan.

#### *2.1.2 The updated zonation of Seismic Vulnerability Index and ground shear strain at Bengkulu City, Indonesia*

Penelitian yang dilakukan oleh Sugianto et al. (2021) berfokus pada pembaruan zonasi indeks kerentanannya seismik dan analisis regangan geser tanah di Kota Bengkulu, Indonesia. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memperbarui peta mikrozonasi kerentanannya terhadap gempa yang telah ada, serta untuk mengeksplorasi lebih dalam mengenai distribusi regangan geser tanah yang mempengaruhi respons tanah terhadap guncangan gempa. Pembaruan ini sangat penting, mengingat Kota Bengkulu terletak di daerah yang rawan gempa akibat adanya sesar aktif, yang berpotensi menyebabkan kerusakan yang signifikan pada bangunan dan infrastruktur. Mengingat kondisi geografis dan seismik yang ada, penelitian ini memberikan informasi yang dibutuhkan untuk meningkatkan ketahanan bangunan terhadap gempa.

Dalam penelitian ini, Sugianto et al. (2021) menggunakan data pengukuran regangan geser tanah yang dikumpulkan dari berbagai titik di Kota Bengkulu, serta data seismik untuk memperbarui zonasi kerentanannya. Regangan geser tanah, yang merupakan parameter geoteknik penting, berfungsi untuk menganalisis

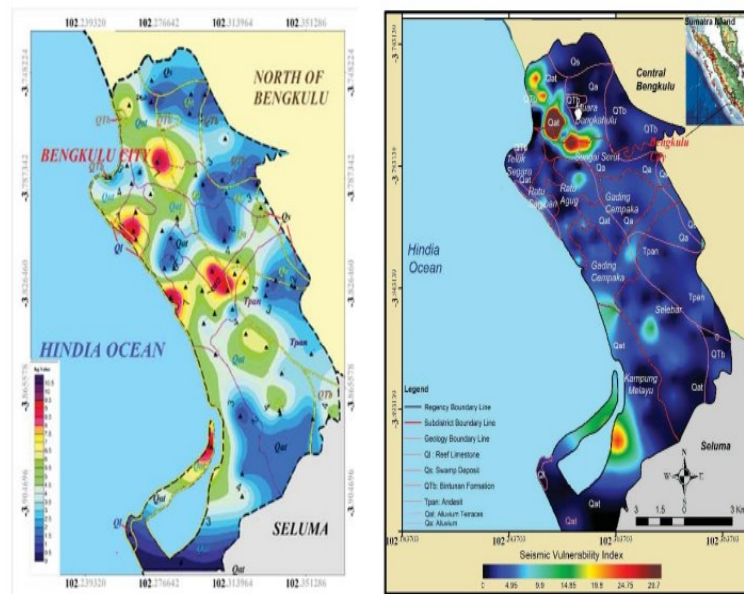
bagaimana tanah bereaksi terhadap getaran gempa. Hasil analisis ini sangat berguna untuk mengetahui seberapa besar potensi kerusakan yang dapat terjadi pada bangunan dan infrastruktur lainnya ketika terjadi guncangan gempa. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data mikrotremor untuk menghasilkan kurva HVSR untuk memberikan informasi tentang frekuensi resonansi dan faktor amplifikasi, yang berperan penting dalam menilai tingkat kerentanan seismik tanah. Hasil analisis mikrotremor dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2 Kurva HVSR Dari Data Mikrotremor Yang Digunakan Untuk Menentukan Frekuensi Resonansi dan Faktor Amplifikasi**

*(Sumber: Sugianto et al., 2021)*

Melalui data yang terkumpul, para peneliti berhasil menghasilkan peta zonasi yang lebih akurat, menggambarkan distribusi kerentanannya serta sebaran regangan geser tanah di seluruh kawasan Kota Bengkulu. Dengan pembaruan ini, diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tingkat kerentanannya di masing-masing zona, serta membantu dalam merancang strategi mitigasi yang lebih efektif untuk menghadapi ancaman gempa di masa depan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peta terbaru indeks kerentanan seismik Kota Bengkulu disajikan pada Gambar 2.3.

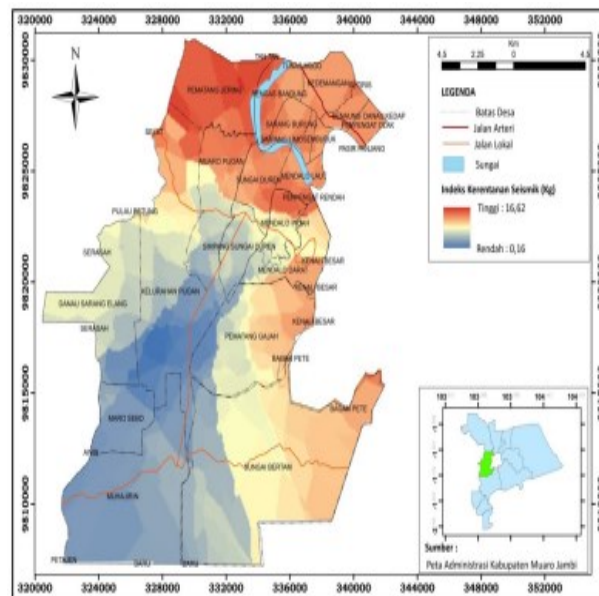


**Gambar 2.3 Peta Indeks Kerentanan Seismik Hasil Penelitian Sebelumnya dan Zonasi Terbaru Nilai Kg di Kota Bengkulu**

(Sumber: Sugianto et al., 2021)

### 2.1.3 Analisis Data Mikrotremor Untuk Mengetahui Nilai Indeks Kerentanan Seismik Di Kecamatan Jambi Luar Kota

Penelitian yang dilakukan oleh Airunisa dkk. (2024) fokus pada analisis indeks kerentanan seismik di Kecamatan Jambi Luar Kota dengan memanfaatkan data mikrotremor. Metode ini dipilih karena dinilai efektif untuk memahami respons tanah terhadap getaran gempa, terutama di daerah yang rawan aktivitas seismik. Data mikrotremor diambil dari beberapa lokasi di wilayah tersebut, kemudian dianalisis menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) untuk mengidentifikasi frekuensi dominan dan tingkat amplifikasi gelombang seismik. Hasil penelitian menunjukkan adanya variasi nilai indeks kerentanan seismik di berbagai area, yang mengindikasikan perbedaan tingkat kerentanan terhadap gempa. Beberapa wilayah memiliki nilai kerentanan seismik tinggi, menandakan kerentanan yang lebih besar, sementara wilayah lain memiliki nilai lebih rendah. Gambar 2.4 merupakan hasil dari peta sebaran indeks kerentanan seismik di Kecamatan Jambi Luar Kota.



**Gambar 2.4 Peta Sebaran Indeks Kerentanan Seismik di Kecamatan Jambi Luar Kota**

(Sumber: Airunisa dkk, 2024)

Berdasarkan analisis data mikrotremor, nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) di Kecamatan Jambi Luar Kota yang dihitung dari parameter amplifikasi ( $A_0$ ) dan frekuensi dominan ( $f_0$ ), menunjukkan rentang antara 0,16 hingga 16,62. Nilai parameter tanah tersebut dicantumkan pada Tabel 2.1 berikut.

**Tabel 2.1 Nilai Parameter Tanah Di Kecamatan Jambi Luar Kota**

| Parameter | Nilai          |
|-----------|----------------|
| $f_0$     | 0,31 – 6,08 Hz |
| $A_0$     | 0,99 – 2,89    |
| $K_g$     | 0,16 – 16,62   |

(Sumber: Airunisa dkk., 2024)

Temuan ini juga mengungkap bahwa faktor-faktor seperti jenis tanah dan kondisi geologi setempat turut memengaruhi nilai kerentanan seismik. Daerah dengan tanah lunak dan frekuensi dominan rendah cenderung lebih rentan terhadap gempa, sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya. Informasi ini sangat penting untuk memahami distribusi kerentanan seismik di Kecamatan Jambi Luar Kota dan

dapat menjadi dasar dalam merencanakan langkah-langkah mitigasi bencana. Misalnya, area dengan nilai kerentanan seismik tinggi dapat diprioritaskan untuk pembangunan infrastruktur yang tahan gempa atau dijadikan sebagai zona evakuasi.

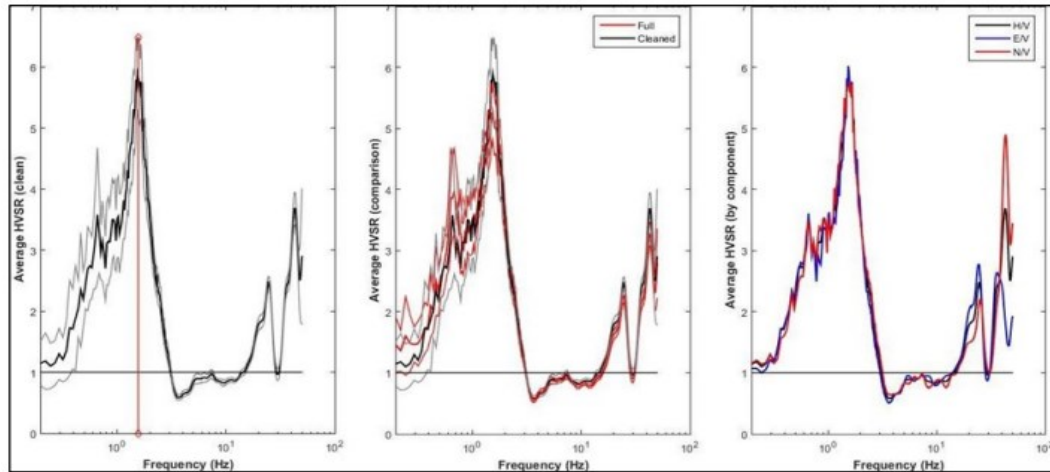
Meskipun studi ini memberikan informasi yang berguna, terdapat beberapa keterbatasan yang harus diperhatikan. Jumlah titik pengukuran yang terbatas mungkin tidak mencakup seluruh variasi geologi di wilayah tersebut. Oleh karena itu, disarankan untuk menambah titik pengukuran di masa depan guna meningkatkan akurasi data. Selain itu, integrasi dengan parameter seismik lainnya, seperti data gempa historis dan analisis struktur geologi, dapat memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh tentang risiko seismik di daerah tersebut.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam bidang geofisika dan mitigasi bencana, khususnya dalam penggunaan metode mikrotremor untuk menilai kerentanan seismik. Temuan ini dapat menjadi acuan bagi pemerintah dan pihak terkait dalam menyusun kebijakan mitigasi bencana gempa bumi di Kecamatan Jambi Luar Kota. Selain itu, penelitian ini juga membuka peluang untuk studi lanjutan guna memperkuat basis data dan analisis risiko seismik di wilayah lainnya.

#### 2.1.4 *Correlation Between Building Damage Levels and Microtremor HVSR Curve Parameters*

Penelitian yang dilakukan oleh Diniati et al. (2024) mengkaji hubungan antara tingkat kerusakan bangunan dan parameter kurva *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) dari data mikrotremor. Tujuannya adalah untuk memahami bagaimana karakteristik tanah, seperti frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan tingkat amplifikasi ( $A_0$ ), memengaruhi kerusakan bangunan saat terjadi gempa. Data mikrotremor diambil dari beberapa lokasi yang mengalami kerusakan, lalu dianalisis menggunakan metode HVSR. Hasilnya menunjukkan bahwa ada kaitan erat antara parameter HVSR dan tingkat kerusakan bangunan. Nilai amplifikasi ( $A_0$ ) yang tinggi dan frekuensi dominan ( $f_0$ ) yang rendah cenderung menyebabkan kerusakan bangunan lebih parah. Gambar 2.5 menampilkan contoh kurva HVSR

yang memperlihatkan hubungan antara frekuensi dominan dan amplifikasi di beberapa lokasi dalam penelitian ini.



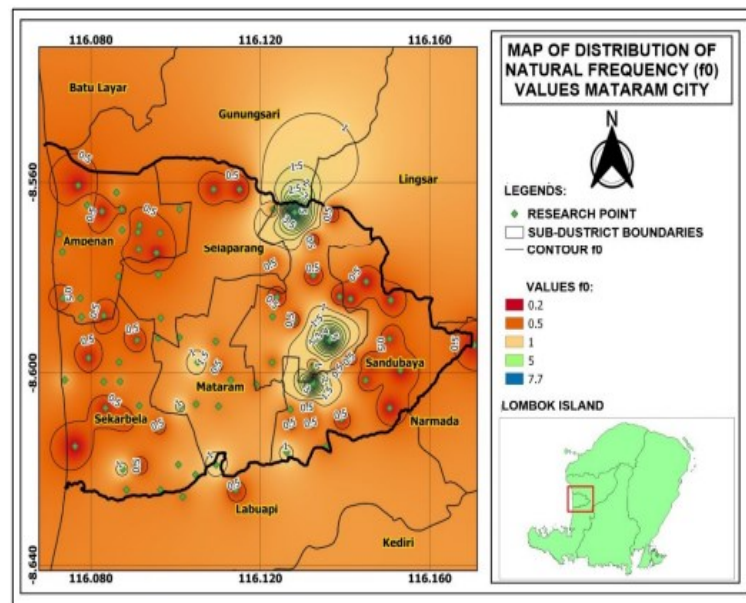
**Gambar 2.5 Hasil Kurva HSVR**

(Sumber: Diniati et al., 2024)

Temuan ini mendukung teori bahwa tanah dengan amplifikasi tinggi dan frekuensi dominan rendah, seperti tanah lunak, lebih rentan terhadap guncangan gempa. Akibatnya, bangunan yang didirikan di atasnya lebih berisiko mengalami kerusakan, terutama jika tidak dirancang dengan mempertimbangkan karakteristik seismik lokal. Studi ini juga menemukan bahwa bangunan dengan desain struktural yang kurang memadai, seperti yang tidak memiliki sistem peredam gempa atau fondasi yang kuat, lebih mudah mengalami kerusakan jika berada di area dengan nilai  $A_0$  tinggi dan  $f_0$  rendah. Dengan kata lain, semakin besar nilai amplifikasi seismik ( $A_0$ ) dan semakin rendah frekuensi dominan tanah ( $f_0$ ), semakin tinggi pula risiko kegagalan struktural pada bangunan yang berdiri di atasnya.

Selain itu, penelitian ini menyoroti bahwa parameter HVSR dapat digunakan sebagai alat prediktif untuk mengestimasi risiko kerusakan bangunan akibat gempa bumi, terutama di daerah dengan kondisi tanah yang bervariasi. Dengan menganalisis karakteristik tanah melalui kurva HVSR, para peneliti dapat mengidentifikasi zona dengan potensi amplifikasi seismik yang tinggi dan menentukan langkah mitigasi yang sesuai untuk mengurangi risiko bencana. Informasi ini sangat penting bagi perencana kota, insinyur sipil, dan pembuat

kebijakan dalam menetapkan standar bangunan yang lebih tahan gempa di wilayah rawan bencana. Gambar 2.6 menunjukkan peta sebaran nilai  $f_0$  yang dikaitkan dengan tingkat kerusakan bangunan di wilayah yang diteliti.



**Gambar 2.6 Peta Distribusi Nilai Frekuensi Dominan ( $f_0$ )**

(Sumber: Diniati et al., 2024)

Meskipun penelitian ini memberikan wawasan berharga, ada beberapa keterbatasan. Jumlah data yang dikumpulkan masih terbatas, dan variasi jenis bangunan yang diteliti tidak terlalu beragam. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan dengan cakupan wilayah yang lebih luas dan jenis bangunan yang lebih beragam. Integrasi dengan data gempa historis dan analisis struktur bangunan juga bisa memberikan pemahaman lebih mendalam tentang faktor-faktor yang memengaruhi kerusakan bangunan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam bidang rekayasa gempa dan mitigasi bencana, khususnya dalam penggunaan data mikrotremor untuk menilai risiko kerusakan bangunan. Temuan ini bisa menjadi acuan bagi insinyur dan perencana kota dalam merancang bangunan tahan gempa serta menyusun strategi mitigasi bencana di daerah rawan gempa. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menambah khazanah ilmu pengetahuan tetapi

juga memiliki manfaat praktis yang besar untuk mengurangi dampak bencana gempa bumi.

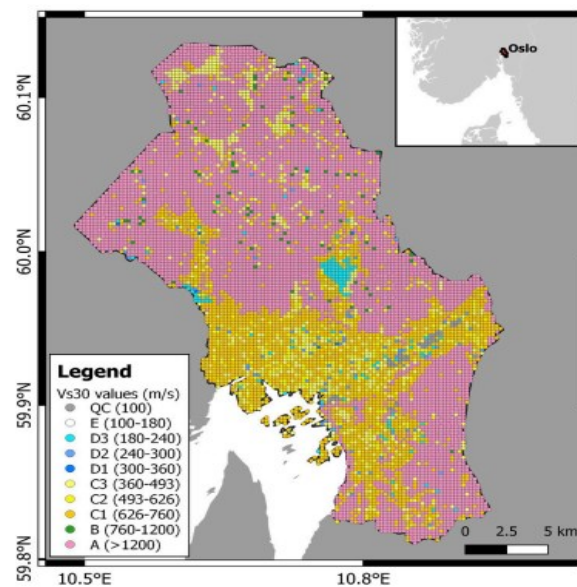
#### 2.1.5 $V_{s30}$ and depth to bedrock estimates from integrating HVSR measurements and geology-slope approach in the Oslo area, Norway

Penelitian yang dilakukan oleh Ghione et al. (2023) mengeksplorasi cara mengestimasi parameter  $V_{s30}$  (kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 meter) serta kedalaman batuan dasar di wilayah Oslo, Norwegia. Penelitian ini memiliki relevansi yang tinggi dalam bidang geoteknik dan mitigasi bencana, terutama untuk wilayah perkotaan yang rentan terhadap aktivitas seismik. Dalam studi ini, para peneliti menggabungkan dua metode utama, yaitu pengukuran *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) dan pendekatan berbasis geologi serta kemiringan lereng (*geology-slope approach*). Kombinasi kedua metode ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap karakteristik tanah dan batuan dasar, yang sangat penting dalam perencanaan konstruksi, penilaian risiko seismik, serta pengembangan tata ruang yang berkelanjutan.

Metode HVSR digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi resonansi tanah dengan memanfaatkan data mikrotremor yang diukur di berbagai lokasi penelitian. Teknik ini telah banyak diterapkan dalam studi geoteknik untuk menentukan ketebalan lapisan sedimen serta estimasi kedalaman batuan dasar. Di sisi lain, pendekatan *geology-slope* digunakan sebagai metode pelengkap untuk mengonfirmasi dan meningkatkan akurasi estimasi  $V_{s30}$ . Metode ini memanfaatkan informasi geologi lokal serta kemiringan lereng sebagai indikator utama dalam menentukan karakteristik tanah di berbagai wilayah. Dengan mengintegrasikan kedua pendekatan ini, para peneliti berhasil menghasilkan pemetaan nilai  $V_{s30}$  dan kedalaman batuan dasar yang lebih rinci dan akurat dibandingkan dengan metode tunggal.

Studi ini mengungkap bahwa nilai  $V_{s30}$  dan kedalaman batuan dasar bervariasi cukup signifikan di wilayah Oslo, dipengaruhi oleh kondisi geologi dan topografi setempat. Daerah dengan tanah lunak dan lapisan sedimen tebal cenderung memiliki nilai  $V_{s30}$  rendah dan batuan dasar yang lebih dalam, sementara

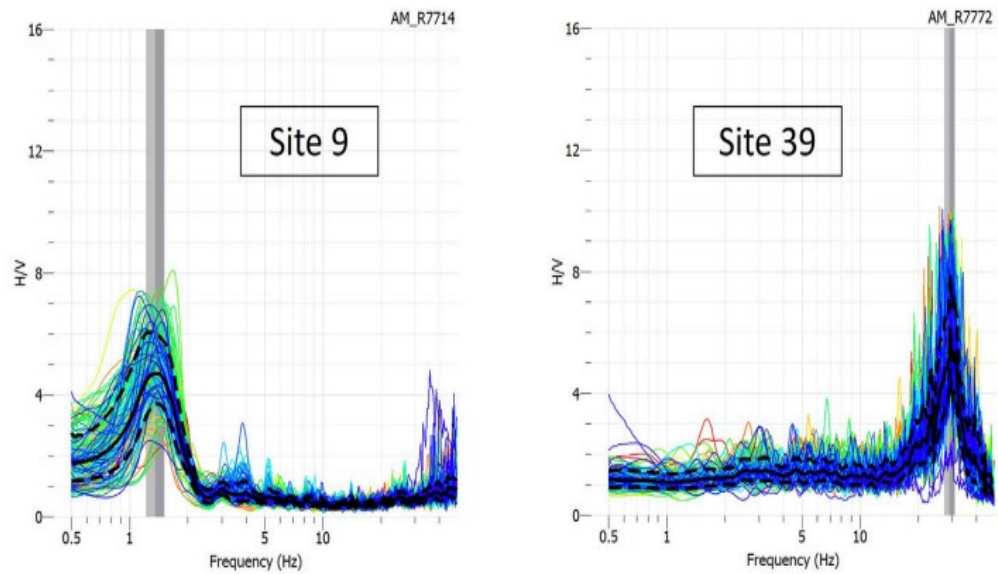
daerah dengan batuan keras yang dekat permukaan memiliki nilai  $V_{s30}$  tinggi. Gambar 2.7 menampilkan peta sebaran nilai  $V_{s30}$  yang dihasilkan dari integrasi kedua metode, memberikan gambaran visual yang jelas tentang variasi karakteristik tanah di Oslo. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pendekatan terintegrasi dapat meningkatkan akurasi estimasi parameter geoteknik. Selain itu, hasil ini juga menegaskan pentingnya mempertimbangkan faktor geologi lokal dalam analisis risiko seismik.



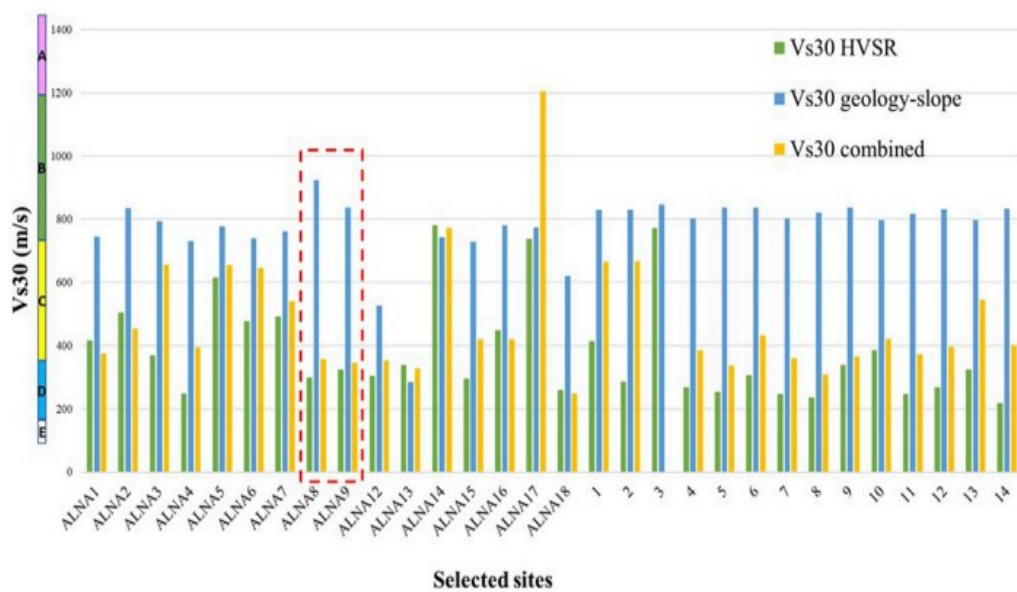
**Gambar 2.7 Peta Sebaran Nilai Vs30 di Oslo**

(Sumber: Ghione et al., 2023)

Terdapat ketergantungan pada ketersediaan data geologi, topografi yang detail, serta jumlah titik pengukuran HVSR yang masih terbatas. Oleh karena itu, disarankan untuk menambah titik pengukuran dan mengintegrasikan data lain, seperti survei geofisika tambahan, untuk meningkatkan keandalan hasil. Gambar 2.8 merupakan contoh kurva HVSR yang digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi resonansi tanah, sementara Gambar 2.9 membandingkan estimasi kedalaman batuan dasar dari metode HVSR dengan pendekatan geologi-slope. Perbandingan ini menunjukkan bahwa integrasi kedua metode menghasilkan estimasi yang lebih konsisten dan dapat diandalkan.



**Gambar 2.8 Kurva HVSr**  
(Sumber: Ghione at al., 2023)



**Gambar 2.9 Perbandingan Antara Pendekatan HVSr (Hijau), Geologi-Kemiringan (Biru), dan Gabungan (Kuning) Dalam Memperkirakan Nilai  $V_{s30}$  (dalam m/s) di Area 1.**  
(Sumber: Ghione at al., 2023)

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam bidang geoteknik dan seismologi, terutama dalam penggunaan metode terpadu untuk mengestimasi  $V_{s30}$  dan kedalaman batuan dasar. Temuan ini bisa menjadi panduan bagi insinyur, perencana kota, dan peneliti dalam merancang infrastruktur yang aman dan tahan gempa, serta dalam menyusun strategi mitigasi risiko bencana. Dengan menggabungkan data mikrotremor dan pendekatan *geologi-slope*, penelitian ini tidak hanya menambah wawasan ilmiah tetapi juga memberikan solusi praktis untuk pengembangan perkotaan yang berkelanjutan. Hasilnya dapat diaplikasikan dalam perencanaan tata ruang, pembangunan infrastruktur, dan upaya mitigasi bencana di daerah rawan gempa, seperti Oslo.

## **2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian yang Akan Dilakukan**

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dibahas, hasilnya dapat dilihat dalam bentuk tabel berikut.

**Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu**

| No | Aspek                    | Penelitian Terdahulu                                                                                                                                                |                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                          | Penelitian Sekarang                                                                                                                                                                   |
|----|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                          | (Pratama dkk., 2021)                                                                                                                                                | (Sugianto et al., 2021)                                                                                                          | (Ghione et al., 2023)                                                                                                                                            | (Diniati et al., 2024)                                                                                                                                                      | (Airunisa dkk, 2024)                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                       |
| 1  | <b>Judul Penelitian</b>  | Estimasi Ketebalan Lapisan Sedimen Kawasan Perbukitan Kecamatan Wangi-Wangi Kabupaten Wakatobi Menggunakan Metode Hvsr                                              | <i>The updated zonation of Seismic Vulnerability Index and ground shear strain at Bengkulu City, Indonesia</i>                   | <i>Vs30 and depth to bedrock estimates from integrating HVSR measurements and geology-slope approach in the Oslo area, Norway</i>                                | <i>Correlation Between Building Damage Levels and Microtremor HVSR Curve Parameters</i>                                                                                     | Analisis Data Mikrotremor Untuk Mengetahui Nilai Indeks Kerentanan Seismik Di Kecamatan Jambi Luar Kota                                  | Analisis Indeks Kerentanan Seismik Dan Ketebalan Sedimen Di Kecamatan Dukun Menggunakan Metode <i>Horizontal To Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr) Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor |
| 2  | <b>Tujuan Penelitian</b> | 1. Menganalisis karakteristik geologi daerah penelitian dengan menggunakan metode <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr) berdasarkan data mikrotremor. | 1. Memperbarui zonasi indeks kerentanan seismik ( <i>Kg</i> ) dan regangan geser tanah ( $\gamma$ ) di Kota Bengkulu, Indonesia. | 1. Mengembangkan metode estimasi Vs30 dan kedalaman batuan dasar di Oslo, Norwegia, dengan menggabungkan analisis HVSR dan pendekatan geologi-kemiringan lereng. | 1. Menganalisis hubungan antara tingkat kerusakan bangunan dengan parameter kurva <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr) yang diperoleh dari data mikrotremor. | 1. Menentukan distribusi nilai indeks kerentanan seismik ( <i>Kg</i> ) di Kecamatan Jambi Luar Kota dengan menggunakan data mikrotremor. | 1. Menganalisis distribusi nilai indeks kerentanan seismik ( <i>Kg</i> ) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang.                                                                      |

**Lanjutan Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu**

| No | Aspek                    | Penelitian Terdahulu                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Penelitian Sekarang                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                          | (Pratama dkk., 2021)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | (Sugianto et al., 2021)                                                                                | (Ghione et al., 2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | (Diniati et al., 2024)                                                                                                                                    | (Airunisa dkk, 2024)                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 2  | <b>Tujuan Penelitian</b> | 2. Menentukan nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan faktor amplifikasi ( $A_0$ ) sebagai parameter utama dalam interpretasi ketebalan sedimen.<br>3. Mengestimasi ketebalan lapisan sedimen di Kecamatan Wangi-Wangi, Kabupaten Wakatobi. Menggunakan data kecepatan gelombang geser ( $V_{s30}$ ) dari USGS untuk mendukung estimasi dan validasi ketebalan lapisan sedimen. | 2. Menganalisis parameter amplifikasi dan frekuensi dominan untuk menentukan nilai $Kg$ dan $\gamma$ . | 2. Meningkatkan pemahaman tentang faktor amplifikasi situs yang memengaruhi risiko seismik lokal, yang penting untuk penilaian bahaya gempa dan perencanaan mitigasi risiko.<br>3. Menyediakan peta estimasi $V_{s30}$ dan kedalaman batuan dasar yang dapat digunakan dalam evaluasi risiko seismik dan perencanaan infrastruktur di wilayah tersebut. | 2. Mengidentifikasi parameter HVSR yang paling berpengaruh terhadap kerusakan bangunan untuk meningkatkan pemahaman tentang kerentanannya terhadap gempa. | 2. Mengidentifikasi karakteristik dinamis lapisan tanah untuk memahami potensi pergerakan tanah.<br>3. Memberikan informasi yang lebih baik mengenai daerah-daerah yang rentan terhadap pergerakan tanah, sehingga dapat digunakan dalam perencanaan pembangunan yang lebih aman dan berkelanjutan. | 2. Inversi kurva HVSR menggunakan metode ellipticity curve dengan persamaan $V_{s30}$ .<br>3. Mengidentifikasi ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang.<br>4. Menganalisis hasil perbandingan inversi HVSR $V_{s30}$ mikrotremor penelitian ini dan $V_{s30}$ <i>United States Geological Survey</i> (USGS) di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang. |

**Lanjutan Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu**

| No | Aspek            | Penelitian Terdahulu                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Penelitian Sekarang |
|----|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|    |                  | (Pratama dkk., 2021)                                                                                                                                                                                                                                                                          | (Sugianto et al., 2021)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | (Ghione et al., 2023)                                                                                                                                                                                                                                                       | (Diniati et al., 2024)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | (Airunisa dkk, 2024)                                                                                                                                                                                                                                                                             |                     |
| 3  | Hasil Penelitian | <p>1. Mendapatkan nilai frekuensi dominan (<math>F_0</math>) dan faktor amplifikasi (<math>A_0</math>).</p> <p>2. Mendapatkan nilai kecepatan gelombang geser (<math>V_{s30}</math>) yang bervariasi.</p> <p>3. Ketebalan lapisan sedimen yang diperoleh dari analisis penampang seismik.</p> | <p>1. Mendapatkan Indeks kerentanan seismik (<math>K_g</math>) dan Regangan geser tanah (<math>\gamma</math>).</p> <p>2. Pet zonasi yang diperbarui memberikan informasi yang lebih detail mengenai potensi kerusakan akibat gempa, yang dapat digunakan untuk merencanakan pembangunan lebih aman dan strategi mitigasi yang lebih efektif.</p> | <p>1. Mengembangkan metodologi yang menggabungkan data dari basis data sumur yang ada, kemiringan topografi yang diperoleh dari Digital Elevation Models (DEM), dan peta geologi kuartir permukaan untuk memperkirakan <math>V_{s30}</math> dan kedalaman batuan dasar.</p> | <p>1. Ditemukan korelasi signifikan antara parameter puncak frekuensi dominan (<math>f_0</math>) dan amplitudo puncak (<math>A_0</math>) pada kurva HVSR dengan tingkat kerusakan bangunan.</p> <p>2. Bangunan yang terletak di area dengan nilai <math>f_0</math> rendah dan <math>A_0</math> tinggi cenderung mengalami kerusakan lebih parah selama gempa.</p> | <p>1. Mendapatkan nilai kerentanan seismik (<math>K_g</math>) dan menunjuka wilayah dengan nilai (<math>K_g</math>) yang tinggi.</p> <p>2. Memberikan informasi yang berguna untuk perencanaan pembangunan yang lebih aman dan mitigasi risiko di daerah yang lebih rentan terhadap bencana.</p> |                     |

Lanjutan Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu

| No | Aspek            | Penelitian Terdahulu                                                                                                                        |                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                      | Penelitian Sekarang |
|----|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|
|    |                  | (Pratama dkk., 2021)                                                                                                                        | (Sugianto et al., 2021) | (Ghione et al., 2023)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | (Diniati et al., 2024) | (Airunisa dkk, 2024) |                     |
| 3  | Hasil Penelitian | 4. Memberikan informasi penting bagi mitigasi risiko bencana gempa bumi serta perencanaan tata ruang dan pembangunan di Kabupaten Wakatobi. |                         | 2. Menggunakan metode <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr) dan alat pemetaan geologi berbasis statistik (COHIBA) untuk mengintegrasikan berbagai sumber data dan menghasilkan estimasi yang lebih akurat.<br>3. Menyediakan eta estimasi Vs30 dan kedalaman batuan dasar di wilayah Oslo, yang dapat digunakan untuk penilaian risiko seismik dan perencanaan mitigasi risiko. |                        |                      |                     |

Lanjutan Tabel 2.2 Perbandingan Penelitian Terdahulu

| No | Aspek            | Penelitian Terdahulu |                         |                                                                                                                                                                    |                        |                      | Penelitian Sekarang |
|----|------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|
|    |                  | (Pratama dkk., 2021) | (Sugianto et al., 2021) | (Ghione et al., 2023)                                                                                                                                              | (Diniati et al., 2024) | (Airunisa dkk, 2024) |                     |
| 3  | Hasil Penelitian |                      |                         | 4. Menyediakan peta estimasi Vs30 dan kedalaman batuan dasar di wilayah Oslo, yang dapat digunakan untuk penilaian risiko seismik dan perencanaan mitigasi risiko. |                        |                      |                     |

### 2.3 Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Penelitian ini

Penelitian sebelumnya menunjukkan variasi fokus yang cukup luas dalam pemanfaatan metode HVSR. Penelitian yang dilakukan oleh Pratama dkk. (2021) menitikberatkan pada estimasi ketebalan sedimen di daerah berbukit maupun kepulauan, sedangkan penelitian lain lebih menekankan pada aspek zonasi kerentanan seismik dan regangan geser tanah, contohnya oleh Sugianto et al. (2021) di Kota Bengkulu. Airunisa dkk. (2024) mengkaji nilai indeks kerentanan seismik di Kecamatan Jambi Luar Kota melalui analisis data mikrotremor, sementara penelitian oleh Diniati et al. (2024) menyoroti peran nilai frekuensi dominan dan amplifikasi HVSR dalam memengaruhi besarnya kerusakan bangunan akibat guncangan gempa. Ghione et al. (2023) menerapkan pendekatan gabungan antara analisis HVSR dan informasi geologi sampai kemiringan lereng untuk memperoleh estimasi nilai  $V_{s30}$  serta menentukan kedalaman batuan dasar di kawasan Oslo, Norwegia.

Dibandingkan dengan penelitian-penelitian tersebut, studi ini memiliki perbedaan yang cukup jelas. Penelitian ini tidak hanya membahas distribusi indeks kerentanan seismik dan ketebalan sedimen, tetapi juga melakukan inversi kurva HVSR menggunakan metode *ellipticity curve* untuk memperoleh nilai  $V_{s30}$  secara lebih detail. Selain itu, penelitian ini menambahkan pemodelan tiga dimensi ketebalan sedimen, sehingga mampu memberikan gambaran spasial yang lebih komprehensif. Perbedaan lainnya adalah adanya tahap validasi melalui perbandingan hasil  $V_{s30}$  mikrotremor dengan data  $V_{s30}$  dari USGS. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan informasi yang lebih lengkap mengenai kondisi seismik di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang yang belum banyak dilakukan dalam penelitian terdahulu.

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Kondisi Geologi**

Kondisi geologi merujuk pada karakteristik fisik dan struktural dari lapisan-lapisan bumi serta bahan penyusunnya di suatu wilayah tertentu. Aspek-aspek yang termasuk dalam kondisi geologi mencakup jenis batuan yang ada, komposisi tanah, topografi atau bentuk permukaan tanah, serta adanya patahan atau pergeseran geologi lainnya. Selain itu, aspek geologi lainnya seperti keberadaan lapisan sedimen, air tanah, dan potensi aktivitas vulkanik juga menjadi bagian dari analisis geologi suatu daerah.

Memahami kondisi geologi sangat krusial dalam tahap perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi. Para insinyur dan perencana bangunan perlu menganalisis kestabilan tanah serta mengidentifikasi potensi risiko geologi yang dapat mempengaruhi proyek, seperti ancaman gempa bumi, tanah longsor, atau pergeseran tanah. Penilaian yang akurat terhadap kondisi geologi ini memungkinkan mereka untuk merancang struktur yang tidak hanya aman dan tahan lama, tetapi juga dapat bertahan menghadapi kondisi alam yang mungkin terjadi, serta meminimalkan potensi kerusakan atau kegagalan struktur di masa depan.

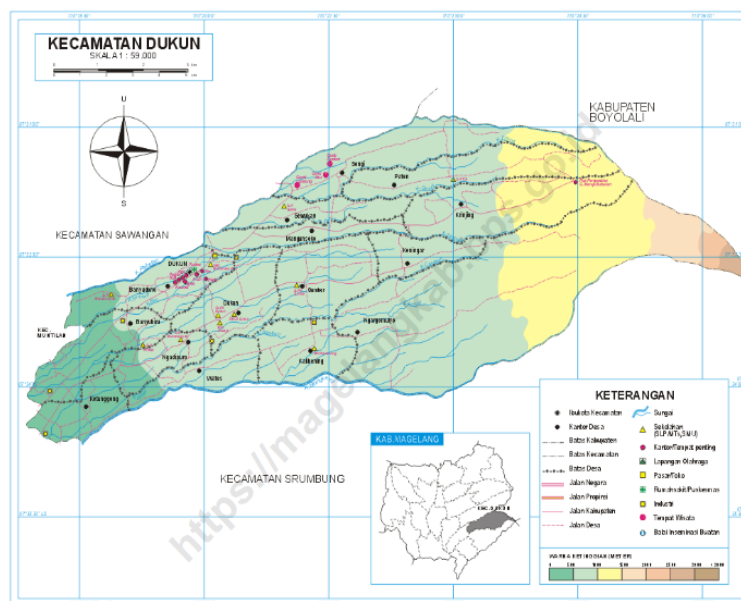
##### **3.1.1 Kondisi Geologi di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang**

Kondisi geologi di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang dipengaruhi oleh interaksi faktor litologi, geomorfologi, dan aktivitas vulkanik Gunung Merapi. Wilayah ini tersusun oleh batuan gunung api muda, endapan sedimen, dan aliran lava yang membentuk karakteristik tanah serta memengaruhi sifat fisik kawasan (Prayogi dkk., 2018). Selain itu, Kecamatan Dukun juga merupakan wilayah dengan tingkat risiko bencana erupsi yang tinggi, di mana aspek bahaya dan kerentanan masyarakat dipengaruhi langsung oleh kondisi geologi setempat (Ardi & Sumunar, 2017). Oleh karena itu, pemahaman mengenai geologi kawasan ini

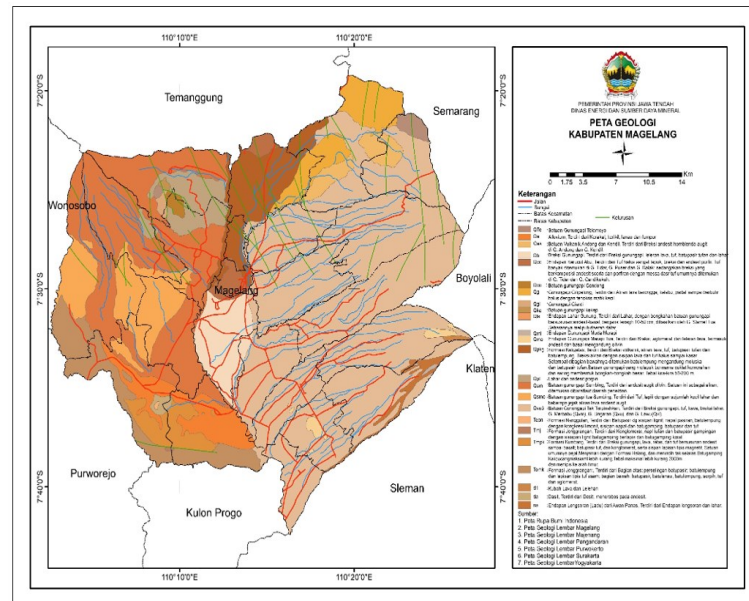
sangat penting dalam mendukung perencanaan pembangunan sekaligus strategi mitigasi bencana.

Menurut Yogafanny dkk. (2020), kondisi geologi di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang yang memiliki topografi berbukit dan berlereng, menunjukkan kerentanannya terhadap potensi pergerakan tanah. Wilayah ini didominasi oleh lereng curam yang menjadi faktor penting dalam kestabilan tanah. Lereng yang terjal membuat kawasan tersebut lebih rentan terhadap erosi dan longsor, terutama pada saat curah hujan tinggi. Aliran air hujan yang cepat dapat memperburuk erosi dan memicu pergeseran tanah.

Struktur geologi yang melibatkan batuan beku dan sedimen turut mempengaruhi stabilitas tanah di daerah ini. Batuan yang lebih mudah hancur dan terfragmentasi memperburuk kondisi lereng, meningkatkan risiko longsor, dan menurunkan kestabilan tanah. Oleh karena itu, kondisi geologi dengan kemiringan lereng ini perlu diperhatikan dalam perencanaan penggunaan lahan dan pembangunan untuk menghindari dampak buruk. Berikut merupakan peta kondisi wilayah di kecamatan dukun serta peta geologi untuk wilayah semarang dan magelang dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



**Gambar 3.1 Peta Kondisi Wilayah Kecamatan Dukun**  
(Sumber: Badan Pusat Statistik Kabupaten Magelang)



**Gambar 3.2 Peta Geologi Kabupaten Magelang**  
(Sumber: Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral)

### 3.2 Gempa Bumi

Menurut BMKG, gempa bumi adalah peristiwa alam yang ditandai dengan getaran atau guncangan yang terasa pada permukaan bumi, yang disebabkan oleh pelepasan energi yang terakumulasi di dalam kerak bumi. Energi ini berasal dari tekanan yang terjadi akibat pergerakan atau gesekan antar lapisan batuan di dalam bumi. Ketika energi tersebut dilepaskan, ia merambat dalam bentuk gelombang seismik yang menyebar melalui lapisan-lapisan bumi hingga mencapai permukaan, menyebabkan getaran yang dirasakan sebagai gempa.

Penyebab utama gempa bumi adalah:

#### 1 Aktivitas Tektonik

Sebagian besar gempa bumi disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik di kerak bumi. Gesekan atau pergeseran pada patahan yang berada di sepanjang batas lempeng dapat menimbulkan tekanan yang kemudian dilepaskan dalam bentuk gempa.

## 2 Aktivitas Vulkanik

Erupsi gunung berapi juga dapat menyebabkan gempa vulkanik. Penumpukan magma di bawah permukaan bumi menimbulkan tekanan yang dapat memicu terjadinya gempa.

## 3 Aktivitas Manusia

Kegiatan manusia seperti pengeboran minyak, penambangan, atau pembangunan reservoir air besar, dapat menyebabkan terjadinya gempa bumi. Fenomena ini dikenal dengan istilah gempa buatan atau gempa induksi manusia.

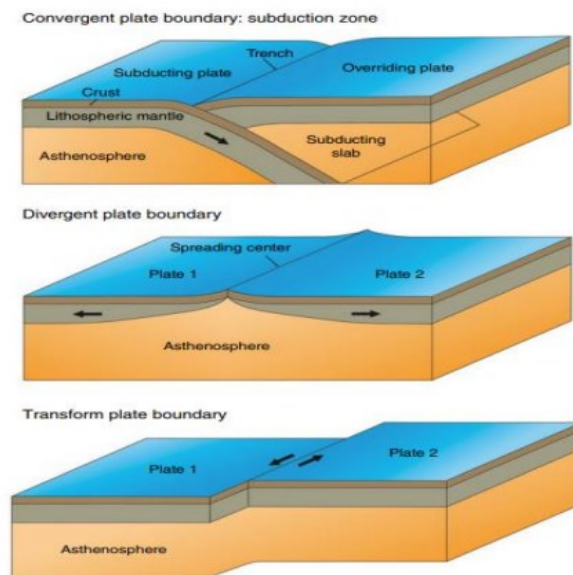
Dari penjelasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa gempa bumi terjadi ketika energi yang terakumulasi di dalam bumi dilepaskan, dan energi tersebut kemudian merambat melalui gelombang seismik menuju permukaan bumi, yang menyebabkan terjadinya getaran atau goncangan.

Gempa bumi diukur dengan menggunakan beberapa jenis skala, di antaranya yang paling sering digunakan adalah Skala Richter dan Skala Moment. Skala-skala ini memberikan informasi tentang besarnya energi yang dilepaskan selama terjadinya gempa. Sebagai fenomena alam yang cukup kompleks, gempa bumi memerlukan pemahaman yang mendalam mengenai penyebab, jenis gelombang yang dihasilkan, serta karakteristiknya. Hal ini sangat penting untuk mengelola potensi risiko bencana dan melindungi masyarakat dari dampak buruk yang mungkin terjadi.

Permukaan bumi terdiri dari beberapa lempeng tektonik besar. Lempeng-lempeng ini adalah lapisan keras kerak bumi yang terletak di atas mantel bumi yang cair dan panas, yang memungkinkan lempeng-lempeng tersebut bergerak dan bertumbukan di perbatasan antar lempeng. Interaksi antara lempeng-lempeng ini terjadi di daerah perbatasan, yang disebut daerah tektonik aktif.

Terdapat tiga jenis pergerakan lempeng yang dapat terjadi, yaitu *divergen*, *konvergen*, dan *transform*. *Divergen* adalah pergerakan lempeng yang saling menjauh, menyebabkan terbentuknya celah yang bisa diisi lava, yang menghasilkan kepulauan vulkanik. *Konvergen* adalah pergerakan lempeng yang saling bertumbukan di zona subduksi, menghasilkan gaya tekan yang dapat memicu

gempa bumi. Sedangkan *transform* adalah pergerakan lempeng yang saling berpapasan secara horizontal, baik menyamping maupun berlawanan, yang dapat menghasilkan sesar (Fadhilah dkk., 2021). Pergerakan lempeng tektonik dilihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



**Gambar 3.3 Pergerakan Lempeng Tektonika**

(Sumber: Duarte dan Schellart, 2016)

### 3.3 Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah rambatan energi yang disebabkan oleh gangguan yang berasal dari dalam atau permukaan bumi. Gelombang ini, yang juga dikenal sebagai gelombang elastis, bergerak melalui lapisan-lapisan bumi yang memiliki elastisitas batuan yang berbeda. Proses perambatan gelombang ini dimulai ketika gelombang seismik melewati lapisan batuan dengan impedansi yang bervariasi, yang menyebabkan sebagian gelombang dipantulkan kembali ke permukaan bumi dan sebagian lagi melanjutkan perjalanan ke bawah permukaan (Sunarjo dkk., 2012).

Gelombang seismik dapat terjadi melalui dua metode, yaitu metode aktif dan metode pasif. Metode aktif adalah sumber gelombang yang berasal dari aktivitas manusia, seperti ledakan, benda yang jatuh, atau getaran mesin. Sementara itu,

metode pasif adalah sumber gelombang yang berasal dari aktivitas alam, seperti gempa bumi, erupsi gunung berapi, dan longsor. Gelombang seismik terdiri dari dua komponen utama, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*) (Sitorus, 2017).

### 3.3.1 Gelombang Badan (*Body Wave*)

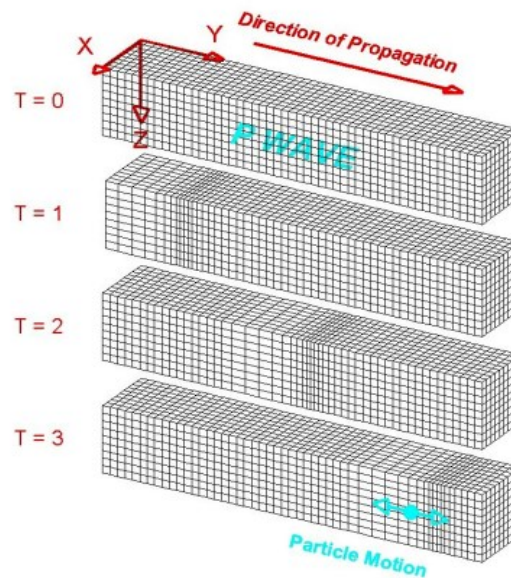
Gelombang badan (*body waves*) merupakan jenis gelombang seismik yang merambat melalui lapisan-lapisan dalam bumi. Keunikan dari gelombang ini adalah kemampuannya untuk menjalar ke segala arah di dalam bumi, sehingga dapat memberikan informasi mengenai struktur internal bumi. Gelombang badan terbagi menjadi dua jenis utama berdasarkan arah perambatannya yaitu gelombang longitudinal atau gelombang P (Primer) dan gelombang transversal atau gelombang S (Sekunder) (Simatupang dkk., 2020).

#### 1. Gelombang Primer

Gelombang primer merupakan gelombang longitudinal yang merambat sejajar dengan arah propagasinya. Gelombang ini juga disebut gelombang kompresi karena memiliki kecepatan paling tinggi dibandingkan jenis gelombang seismik lainnya, sehingga menjadi gelombang pertama yang terdeteksi dan memiliki frekuensi yang lebih tinggi serta tajam. Kecepatan gelombang primer pada batuan berkisar antara 1,8 hingga 7 km/s, sementara periodenya berada dalam rentang 5 hingga 10 milidetik. Faktor yang mempengaruhi kecepatan gelombang ini adalah tingkat kekakuan batuan ( $\lambda$ ) serta kerapatan batuan ( $\rho$ ).

Gelombang primer dapat merambat melalui berbagai jenis medium termasuk zat padat, cair, dan gas sehingga mampu menembus inti bumi yang bersifat cair. Saat merambat, gelombang ini akan menghilang pada sudut lebih dari  $130^\circ$  dan tidak terdeteksi dalam rentang kurang dari  $140^\circ$  akibat keberadaan inti bumi. Gelombang primer menyentuh permukaan inti bumi pada sudut  $103^\circ$  dan tidak terlihat dalam rentang  $114^\circ$  karena terhalang oleh inti bumi. Namun, setelah melewati inti bumi, gelombang ini dapat muncul

kembali (Haerudin dkk., 2019). Gambar 3.4 menunjukkan ilustrasi dari pergerakan gelombang primer.

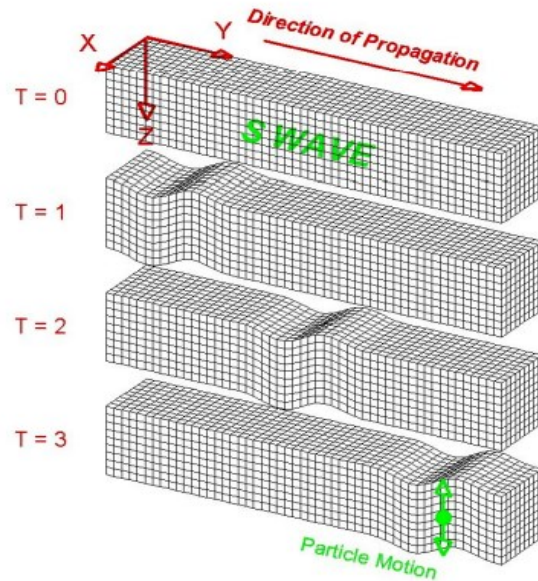


**Gambar 3.4 Pergerakan Gelombang Primer**

(Sumber: Braile, 2006)

## 2. Gelombang Sekunder

Gelombang sekunder atau gelombang S (*Shear Wave*) merupakan gelombang seismik transversal di mana arah getaran partikel tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Gelombang ini muncul setelah gelombang primer (*P-wave*), sehingga memiliki kecepatan lebih lambat dan tiba di permukaan bumi belakangan. Tidak seperti gelombang P, gelombang S hanya mampu merambat melalui medium padat karena membutuhkan kekakuan geser, sehingga tidak dapat melewati inti luar bumi yang bersifat cair (Suzuki et al., 2021). Berdasarkan arah getaran partikelnya, gelombang S terbagi menjadi dua komponen, yaitu SH-wave (*shear horizontal*) yang bergerak ke samping dan SV-wave (*shear vertical*) yang bergerak naik-turun terhadap arah rambat (Parisi et al., 2018). Untuk memperjelas mekanisme perambatan dan arah gerakannya, ilustrasi mengenai pergerakan gelombang sekunder dapat dilihat pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



**Gambar 3.5 Pergerakan Gelombang Sekunder**

(Sumber: Braile, 2006)

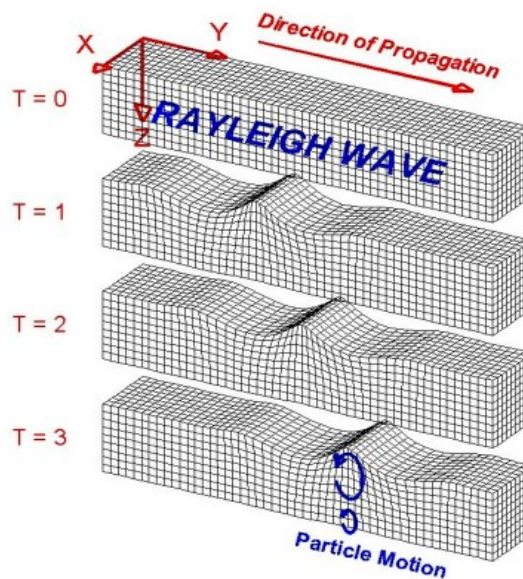
### 3.3.2 Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang permukaan (*surface wave*) adalah gelombang yang merambat di sepanjang permukaan bumi atau batas antara dua media. Berdasarkan sifat gerakan partikel dalam media elastis, gelombang ini memiliki karakteristik yang kompleks, dengan frekuensi yang relatif rendah serta amplitudo yang besar. Pergerakan gelombang permukaan terjadi akibat adanya efek permukaan bebas (*free surface*), di mana terdapat perbedaan sifat elastis antara lapisan-lapisan medium yang dilaluinya. Karena amplitudo yang lebih besar dibandingkan gelombang dalam, gelombang ini sering kali menyebabkan dampak lebih signifikan, terutama dalam kejadian seperti gempa bumi. Terdapat dua jenis gelombang permukaan, yaitu gelombang *rayleigh* dan gelombang *love* (Simatupang dkk., 2020).

#### 1. Gelombang *Rayleigh*

Gelombang *rayleigh* adalah jenis gelombang permukaan yang pergerakan partikelnya merupakan hasil kombinasi antara gelombang primer (*P-wave*) dan gelombang sekunder (*S-wave*). Gelombang ini memiliki pola gerak berbentuk elips, dengan sumbu utama yang tegak lurus terhadap permukaan serta tegak lurus terhadap arah rambatannya. Seiring dengan

bertambahnya kedalaman, amplitudo gelombang *rayleigh* akan semakin berkurang. Oleh karena itu, gelombang ini memiliki amplitudo terbesar pada lapisan permukaan yang dangkal, menjadikannya salah satu penyebab utama kerusakan saat terjadi gempa bumi (Braile, 2006). Ilustrasi pergerakan gelombang *rayleigh* dapat dilihat pada Gambar 3.6.

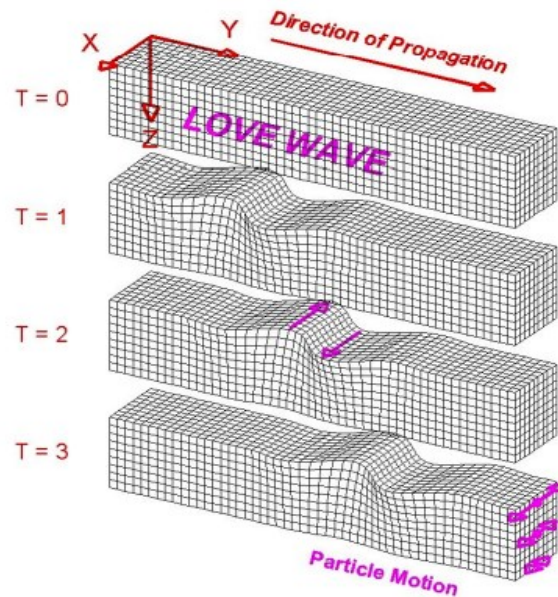


**Gambar 3.6 Pergerakan Gelombang *Rayleigh***

(Sumber: Braile, 2006)

## 2. Gelombang *Love*

Gelombang *love* yang sering disebut sebagai gelombang L atau gelombang Q, adalah salah satu jenis gelombang permukaan yang bergerak secara transversal di sepanjang permukaan bumi. Pergerakannya menyebabkan getaran horizontal yang sejajar dengan permukaan tanah dan tegak lurus terhadap arah rambatan gelombang. Kecepatannya bervariasi tergantung pada panjang gelombang serta karakteristik medium yang dilaluinya. Karena sifatnya yang terbatas pada permukaan, amplitudo gelombang *love* paling besar di permukaan bumi dan berkurang secara bertahap seiring bertambahnya kedalaman (Braile, 2006). Gambar 3.7 menampilkan ilustrasi pergerakan gelombang *love*.



**Gambar 3.7 Pergerakan Gelombang Love**

(Sumber: Braile, 2006)

### 3.4 Mikrotremor

Mikrotremor merupakan getaran tanah yang kecil dan berlangsung terus-menerus, yang berasal dari berbagai sumber baik oleh aktivitas manusia maupun fenomena alam. Mikrotremor dapat digunakan untuk mendeteksi sifat seismik tanah dan struktur bangunan tanpa menimbulkan kerusakan. Frekuensi getaran mikrotremor ini, terutama, terletak pada rentang frekuensi rendah hingga tinggi (Ardy, 2024).

Berdasarkan penelitian Kanai (1983), getaran mikrotremor pada tanah memiliki amplitudo perpindahan yang berkisar antara 0,1 hingga 1 mikron, dengan kecepatan amplitudo yang berada dalam rentang 0,001 hingga 0,01 cm/s. Meskipun getaran ini sangat kecil, namun dapat dideteksi dengan menggunakan seismograf yang dilengkapi dengan pembesaran tinggi, yang memungkinkan pengukuran bahkan terhadap getaran yang sangat halus (Airunisa dkk., 2024). Berikut merupakan penyebab mikrotremor yang berasal dari aktivitas manusia maupun fenomena alam, antara lain:

# 1. Penyebab Alami

## a. Angin

Getaran yang disebabkan oleh angin dapat memicu terjadinya mikrotremor pada tanah.

## b. Gelombang Laut

Aktivitas laut seperti gelombang dan ombak, dapat menghasilkan getaran yang merambat melalui tanah.

## c. Gaya Pasang Surut

Perubahan gaya pasang surut laut dapat mempengaruhi pergerakan tanah di sekitar pesisir.

# 2. Penyebab Buatan Manusia

## a. Lalu Lintas

Gerakan kendaraan terutama yang terjadi di daerah perkotaan, dapat menimbulkan getaran tanah yang disebut mikrotremor.

## b. Konstruksi

Aktivitas konstruksi dan penggunaan mesin berat di lokasi pembangunan dapat menghasilkan getaran yang merambat melalui tanah.

## c. Proses Industri

Beberapa kegiatan industri seperti operasi mesin dan peralatan berat, dapat menyumbang pada terjadinya mikrotremor di sekitar area industri.

**Tabel 3.1 Prosedur Operasional Untuk Pengukuran Mikrotremor**

| Jenis Parameter   | Saran yang dianjurkan  |                                                      |
|-------------------|------------------------|------------------------------------------------------|
|                   | Frekuensi Minimum [Hz] | Durasi Rekaman Minimum yang Direkomendasikan [menit] |
| Durasi Pengukuran | 0,2                    | 30                                                   |
|                   | 0,5                    | 20                                                   |
|                   | 1                      | 10                                                   |
|                   | 2                      | 5                                                    |
|                   | 5                      | 3                                                    |
|                   | 10                     | 2                                                    |

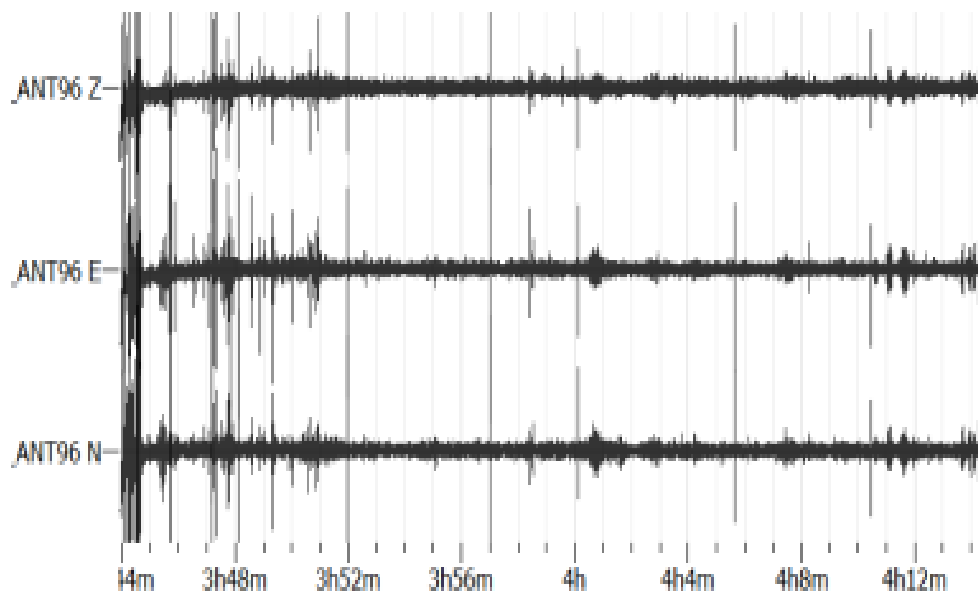
**Lanjutan Tabel 3.1 Prosedur Operasional Untuk Pengukuran Mikrotremor**

| <b>Jenis Parameter</b>     | <b>Saran yang dianjurkan</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Penentuan Spasi Pengukuran | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Untuk mikrozonasi, mulai dengan grid besar (misalnya grid 500 m x 500 m). Jika terdapat variasi lokal, tingkatkan kepadatan grid hingga 250 m atau kurang.</li> <li>2. Untuk analisis satu titik, lakukan minimal tiga pengukuran untuk mendapatkan nilai Vs.</li> </ol>                                                          |
| Parameter Pengukuran       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sesuaikan pengaturan sensitivitas (<i>gain</i>) alat sesuai dengan panduan dari pabriknya, agar sinyal tetap jelas tanpa berlebihan atau "<i>overload</i>".</li> </ol>                                                                                                                                                            |
| Pemasangan Sensor Tanah    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hindari menempatkan sensor langsung di tanah, terutama di permukaan lunak seperti lumpur, pasir, atau rumput.</li> <li>2. Sebisa mungkin hindari material "lunak" buatan seperti papan karet atau karton.</li> </ol>                                                                                                              |
| Pemasangan Sensor Buatan   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Jika sensor tidak dapat dipasang di permukaan datar (seperti di lereng curam), gunakan tiang atau wadah berisi pasir untuk stabilisasi.</li> <li>2. Pada salju atau es, gunakan piring logam atau kayu, lalu tambahkan beban (misalnya pasir) untuk mencegah pergerakan akibat pencairan es</li> </ol>                            |
| Struktur di Dekat Sensor   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hindari rekaman di dekat struktur besar seperti bangunan karena dapat menyebabkan gangguan dari angin (<math>&gt;5</math> m/s).</li> <li>2. Hindari pengukuran di atas struktur bawah tanah seperti pipa, saluran listrik, atau kabel.</li> </ol>                                                                                 |
| Kondisi Cuaca              | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Angin: Hindari lokasi dengan kecepatan angin tinggi (<math>&gt;5</math> m/s).</li> <li>2. Hujan: Pengaruhnya minimal kecuali ada struktur di dekatnya.</li> <li>3. Suhu: Pastikan kondisi suhu sesuai spesifikasi produsen alat.</li> <li>4. Gangguan Meteorologi: Hindari pengukuran di dekat stasiun tekanan rendah.</li> </ol> |
| Gangguan Lainnya           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sumber Mekanik: Hindari area dengan gangguan dari mesin konstruksi, kendaraan, generator, dll.</li> <li>2. Transien: Hindari gangguan seperti langkah kaki atau kendaraan. Tingkatkan durasi perekaman untuk memungkinkan filter data setelah penghapusan gangguan.</li> </ol>                                                    |

*Sumber: SESAME (2004)*

Nakamura (2000) menjelaskan bahwa pengukuran mikrotremor bertujuan untuk mengidentifikasi sifat getaran tanah, karena mikrotremor berkaitan erat dengan kondisi struktur tanah serta keadaan di bawah permukaan tanah. Gambar

3.8 menunjukkan data sinyal mikrotremor yang diperoleh dari pembacaan seismograf.



**Gambar 3.8 Data Mikrotremor**

(Sumber: Candraningtyas dkk., 2024)

### 3.5 Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr)

Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) merupakan salah satu teknik analisis geofisika pasif yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik dinamis lapisan tanah berdasarkan rekaman sinyal mikrotremor. Prinsip dasar dari metode ini adalah dengan membandingkan nilai spektrum dari dua komponen horizontal gelombang seismik terhadap komponen vertikalnya sehingga diperoleh rasio spektral yang dapat merepresentasikan respons dinamis suatu lokasi terhadap getaran. Metode HVSr sangat berguna dalam mengidentifikasi frekuensi dominan lokal (*natural frequency*) serta potensi amplifikasi gelombang seismik yang dipengaruhi oleh kondisi geologi bawah permukaan. Informasi ini menjadi penting dalam penilaian kerentanan seismik suatu wilayah terutama dalam konteks perencanaan dan mitigasi bencana gempa bumi. Data yang digunakan dalam metode HVSr diperoleh dari hasil pengukuran mikrotremor yaitu getaran kecil

alami yang bersumber dari aktivitas antropogenik maupun alamiah, tanpa memerlukan sumber getar buatan. Hasil analisis HVSR dapat memberikan gambaran awal mengenai struktur bawah permukaan khususnya dalam mengestimasi ketebalan lapisan sedimen serta variasi kekakuan tanah di lokasi pengamatan (Airunisa dkk., 2024).

Metode HVSR menunjukkan adanya hubungan antara perbandingan komponen horizontal dan vertikal, di mana rasio antara kedua komponen gelombang permukaan merepresentasikan fungsi perpindahan. Melalui metode ini, hasil yang diperoleh berupa nilai frekuensi dominan ( $f_g$ ) serta nilai amplifikasi ( $A_g$ ). Berdasarkan analisis getaran seismik horizontal dan vertikal pada permukaan tanah yang berinteraksi dengan lapisan batuan di area cekungan, diperoleh faktor amplifikasi. Dalam hal ini, komponen horizontal dilambangkan sebagai  $T_H$ , sedangkan komponen vertikal dilambangkan sebagai  $T_V$ . Besarnya nilai amplifikasi dihitung dengan membandingkan spektrum pada permukaan tanah dengan spektrum yang terjadi pada batuan dasar. Perhitungan faktor amplifikasi horizontal dan vertikal didasarkan pada Persamaan 3.1 dan Persamaan 3.2 berikut.

$$T_H = \frac{S_{Hs}}{S_{Hb}} \quad (3.1)$$

$$T_V = \frac{S_{Vs}}{S_{Vb}} \quad (3.2)$$

Keterangan:

$T_H$  = Faktor amplifikasi gerakan horizontal

$T_V$  = Faktor amplifikasi gerakan vertikal

$S_{Hs}$  = Spektrum komponen horizontal di permukaan tanah

$S_{Hb}$  = Spektrum komponen horizontal di lapisan dasar

$S_{Vs}$  = Spektrum komponen vertikal di permukaan tanah

$S_{Vb}$  = Spektrum komponen vertikal di lapisan dasar

Gambar 3.9 berikut ini menggambarkan ilustrasi faktor amplifikasi untuk gerakan vertikal dan horizontal.

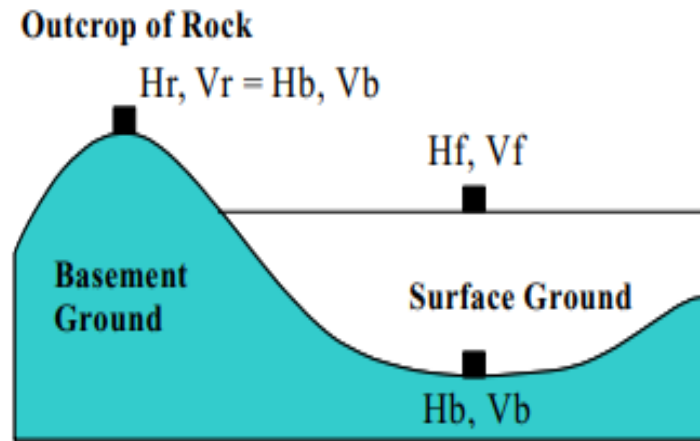


**Figure 8. Typical geological structure of sedimentary basin**

**Gambar 3.9 Gerakan Horizontal dan Vertikal Pada Area Cekungan**

(Sumber: Candraningtyas dkk., 2024)

Data yang digunakan dalam analisis metode HVSR berasal dari data mikrotremor, yang diperoleh melalui penelitian langsung di lapangan. Dalam pengukuran mikrotremor menggunakan seismograf, terdapat tiga komponen utama, yaitu komponen horizontal *east-west* (EW), komponen horizontal *north-south* (NS), dan komponen *up-down* (vertikal). Selanjutnya, rasio spektrum mikrotremor dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.3 berikut.

$$HVSR = T_{SITE} = \frac{\sqrt{(SH_{North-South})^2 - (SH_{East-West})^2}}{S_{Vs}} \quad (3.3)$$

Keterangan:

- $T_{SITE}$  = Rasio spektrum mikrotremor
- $SH_{North-South}$  = Sinyal horizontal arah utara dan selatan
- $SH_{East-West}$  = Sinyal horizontal arah timur dan barat
- $S_{Vs}$  = Sinyal vertical

### 3.6 Uji *Outlier*

*Outlier* adalah data yang memiliki nilai yang sangat berbeda dari data lainnya, yang dapat terlihat pada hasil pengamatan yang jauh menyimpang. Kehadiran *outlier* dapat mempengaruhi hasil analisis dan menghasilkan kesimpulan yang kurang tepat. Oleh karena itu data outlier sebaiknya dikeluarkan dari proses analisis. Untuk mendeteksi adanya *outlier*, dilakukan uji *outlier* menggunakan metode *Z Score* atau standar baku dengan nilai *Z Score* yang dianggap memenuhi kriteria berada kurang dari 3 (Yaro dkk., 2023). Proses uji *outlier* mencakup perhitungan rata-rata dan standar deviasi dari masing-masing parameter menggunakan Persamaan 3.4, Persamaan 3.5, dan Persamaan 3.6.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (3.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3.5)$$

$$Z \text{ Score} = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma} \quad (3.6)$$

Keterangan :

$x_i$  = Nilai sampel

$\bar{x}$  = Rata – rata nilai sampel

$\sigma$  = Standar deviasi atau simpangan baku

*Z Score* = Standar Batas

### 3.7 Frekuensi Dominan (*fg*)

Frekuensi dominan (*fg*) merupakan frekuensi alami yang paling menonjol pada suatu wilayah, dihasilkan dari getaran gelombang dalam rentang waktu tertentu. Fenomena ini erat kaitannya dengan resonansi, di mana gempa bumi dengan frekuensi serupa dapat memperkuat (amplifikasi) getaran di daerah tersebut, berpotensi meningkatkan risiko kerusakan struktur bangunan. Nilai *fg* diperoleh melalui analisis metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr), dengan mengidentifikasi puncak kurva rasio spektral horizontal-vertikal.

Penelitian oleh Lachet dan Bard (1995) terhadap enam model geologi dengan variasi ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ) dan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) menunjukkan bahwa nilai  $fg$  bervariasi tergantung pada kedua parameter tersebut. Hasil ini membuktikan bahwa  $fg$  dipengaruhi secara signifikan oleh ketebalan lapisan sedimen dan kecepatan geser tanah. Semakin tebal lapisan sedimen ( $h$  besar) atau semakin rendah kecepatan geser ( $V_s$  kecil), nilai  $fg$  akan semakin rendah. Sebaliknya, lapisan sedimen tipis dengan material kaku ( $V_s$  tinggi) menghasilkan  $fg$  yang tinggi. Dengan demikian, daerah dengan  $fg$  rendah mengindikasikan adanya lapisan sedimen yang tebal.

Selain itu, frekuensi dominan dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis dan karakteristik tanah. Seperti yang tercantum dalam Tabel 3.2 klasifikasi nilai  $fg$  memberikan gambaran tentang profil tanah, mulai dari lapisan batuan keras hingga sedimen lunak. Informasi ini penting dalam menilai kerentanan suatu wilayah terhadap efek amplifikasi gempa.

**Tabel 3.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai Frekuensi Natural Oleh Kanai**

| Klasifikasi Tanah |       | Frekuensi Dominan (Hz) | Klasifikasi Kanai                                                                                                    | Deskripsi                                                                      |
|-------------------|-------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Tipe              | Jenis |                        |                                                                                                                      |                                                                                |
| IV                | I     | 6,67 – 20              | Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>hard sandy</i> , gravel, dll.                                  | Ketebalan sedimen permukaannya sangat tipis, didominasi oleh batuan keras.     |
| III               | II    | 4 – 6,67               | Batuan alluvial dengan ketebalan 5 m. terdiri dari <i>sandygravel</i> , <i>sandy hard clay</i> , <i>loam</i> , dll.  | Ketebalan sedimen permukaannya masuk dalam kategori menengah 5 – 10 meter.     |
| II                | III   | 2,5 – 4                | Batuan alluvial dengan ketebalan >5 m. terdiri dari <i>sandygravel</i> , <i>sandy hard clay</i> , <i>loam</i> , dll. | Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10 – 30 meter. |

**Lanjutan Tabel 3.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai Frekuensi Natural  
Oleh Kanai**

| Klasifikasi Tanah |       | Frekuensi Dominan (Hz) | Klasifikasi Kanai                                                                                                       | Deskripsi                                    |
|-------------------|-------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Tipe              | Jenis |                        |                                                                                                                         |                                              |
| I                 | IV    | < 2,5                  | Batuan alluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, <i>top soil</i> , lumpur, dll. dengan ketebalan 30 m atau lebih. | Ketebalan sedimen permukaannya sangat tebal. |

*Sumber: (Yuniarto dkk., 2023)*

### 3.8 Amplifikasi

Amplitudo maksimum yang dicapai oleh suatu gelombang dikenal sebagai amplifikasi. Amplifikasi sendiri sangat dipengaruhi oleh kecepatan gelombang, di mana semakin besar faktor amplifikasi, semakin lambat laju perambatan gelombang tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa sifat fisik batuan, terutama kerapatannya, memiliki peran penting dalam menentukan besarnya faktor amplifikasi. Batuan dengan kerapatan yang lebih rendah akan menghasilkan faktor amplifikasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan batuan yang lebih padat. Penurunan kecepatan gelombang ini umumnya disebabkan oleh keberadaan sedimen lunak yang memiliki karakteristik lebih elastis dan kurang padat, sehingga gelombang mengalami perlambatan saat merambat melaluinya. Akibatnya, daerah dengan endapan sedimen yang tebal dan lunak cenderung mengalami amplifikasi gelombang yang lebih besar dibandingkan daerah dengan batuan yang lebih padat dan keras (Yuniarto dkk., 2023).

### 3.9 Faktor Amplifikasi ( $A_g$ )

Faktor Amplifikasi adalah proses penguatan atau peningkatan gelombang yang terjadi akibat perbedaan signifikan antara impedansi lapisan bawah dengan lapisan di atasnya. Fenomena ini terjadi ketika gelombang merambat melalui lapisan tanah yang lebih lunak dibandingkan dengan lapisan sebelumnya. Semakin besar perbedaan impedansi antara kedua lapisan tersebut, semakin tinggi pula nilai

amplifikasi yang dihasilkan, dan sebaliknya. Hal ini disebabkan oleh sifat lapisan tanah lunak, yang memperlambat durasi serta meningkatkan frekuensi gelombang saat merambat. Jika gelombang tersebut memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi alami tanah, maka akan terjadi amplifikasi.

Tingginya faktor amplifikasi dapat meningkatkan risiko kerusakan pada suatu wilayah. Dalam kurva H/V, nilai amplifikasi diperoleh dari puncak kurva pada frekuensi dominan yang sering muncul. Nilai ini juga menggambarkan amplitudo maksimum gelombang yang terjadi. Selain itu, nilai amplifikasi dapat meningkat apabila batuan mengalami deformasi yang mengubah sifat fisiknya, sehingga batuan dengan jenis yang sama dapat memiliki nilai amplifikasi yang berbeda. Amplitudo gelombang sendiri dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori sebagaimana dalam Tabel 3.3.

**Tabel 3.3 Klasifikasi Nilai Faktor Amplifikasi**

| Zona | Klasifikasi   | Faktor Amplifikasi |
|------|---------------|--------------------|
| 1    | Rendah        | $Ag \leq 3$        |
| 2    | Sedang        | $3 \leq Ag < 6$    |
| 3    | Tinggi        | $6 \leq Ag < 9$    |
| 4    | Sangat Tinggi | $Ag \geq 9$        |

*Sumber: (Yuniarto dkk., 2023)*

### 3.10 Indeks Kerentanan Seismik ( $K_g$ )

Indeks kerentanan seismik atau indeks kerentanan gempa adalah parameter yang menunjukkan tingkat kerentanan lapisan permukaan tanah terhadap deformasi akibat gempa bumi. Indeks ini memiliki hubungan linier dengan tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa. Jika nilai indeks kerentanan seismik tinggi, maka risiko kerusakan akibat gempa juga tinggi. Sebaliknya, jika nilai indeks rendah maka tingkat risiko kerusakan juga lebih kecil (Yuniarto dkk., 2023). Klasifikasi nilai indeks kerentanan seismik dapat dilihat pada Tabel 3.4.

**Tabel 3.4 Klasifikasi Nilai Indeks Kerentanan Seismik**

| No | Zona   | Indeks Kerentanan Seismik ( $Kg$ ) |
|----|--------|------------------------------------|
| 1  | Rendah | $< 3$                              |
| 2  | Sedang | $3 \leq Kg < 6$                    |
| 3  | Tinggi | $> 6$                              |

*Sumber: Yuniarto dkk (2023)*

Dalam menentukan indeks kerentanan seismik, faktor geologi menjadi salah satu aspek yang perlu diperhatikan. Wilayah dengan frekuensi dominan rendah cenderung memiliki indeks kerentanan seismik yang tinggi. Frekuensi dominan yang rendah menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki lapisan sedimen yang tebal. Ketebalan sedimen yang besar dapat meningkatkan amplifikasi gelombang seismik sehingga menyebabkan nilai indeks kerentanan seismik lebih tinggi. Persamaan 3.7 menunjukkan hubungan antara amplifikasi ( $Ag$ ) dan frekuensi dominan ( $fg$ ) seperti yang tertera berikut ini.

$$Kg = \frac{Ag^2}{fg} \quad (3.7)$$

Keterangan:

$Kg$  = Indeks Kerentanan Seismik

$Ag$  = Faktor Amplifikasi

$fg$  = Frekuensi dominan (Hz)

### 3.11 $V_{s30}$ Mikrotremor Menggunakan Inversi Kurva HVSr

Metode inversi kurva HVSr adalah teknik yang digunakan untuk memperkirakan model berdasarkan data observasi dengan menghasilkan model secara acak dan mencocokkannya dengan data yang ada guna memperoleh model yang paling sesuai. Kurva HVSr dianalisis menggunakan metode inversi *ellipticity curve* dengan bantuan sub-perangkat lunak Dinver 0.5.4. Metode *ellipticity curve* merupakan salah satu teknik pemodelan inversi yang bekerja dengan mencocokkan data (*fitting*) guna menemukan parameter model yang paling sesuai dengan data

observasi. Model yang dihasilkan berupa profil tanah berdasarkan nilai  $V_s$  dengan tingkat *misfit* terkecil, yang kemudian dianggap sebagai model paling optimal (Safitri dkk, 2021). Selain itu, diperlukan data sekunder berupa data bor yang digunakan untuk mengetahui ketebalan dan jenis tanah pada lokasi penelitian. Pengolahan data menggunakan metode *ellipticity curve* menghasilkan nilai kecepatan gelombang geser permukaan untuk setiap lapisan tanah di titik penelitian. Berdasarkan nilai gelombang geser permukaan pada setiap lapisan, selanjutnya akan dihitung nilai gelombang geser permukaan hingga kedalaman 30 meter dengan menggunakan persamaan  $V_{s30}$  sesuai dengan SNI 1726 Tahun 2019, sebagaimana dapat dilihat pada Persamaan 3.8 berikut.

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n di}{\sum_{i=1}^n \frac{di}{V_{si}}} \quad (3.8)$$

Keterangan:

$V_{s30}$  = Kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter

$\sum_{i=1}^n di$  = 30 Meter

$di$  = Tebal setiap lapisan hingga kedalaman 30 meter

$V_{si}$  = Kecepatan gelombang geser lapisan  $i$  (m/s)

### 3.12 Ketebalan Lapisan Sedimen (h)

Ketebalan lapisan sedimen merujuk pada ketebalan lapisan tanah yang lapuk atau lunak yang terletak di atas batuan dasar atau *bedrock*. Lapisan ini terbentuk akibat akumulasi material yang terlepas dari batuan sebelumnya, yang kemudian mengalami proses pembatuan atau tetap dalam kondisi tidak mengalami pembatuan. Material yang terlepas namun tidak mengalami proses pembatuan akan membentuk lapisan sedimen. Ketebalan lapisan sedimen di suatu wilayah berpengaruh terhadap kecepatan gelombang badan. Pada lapisan sedimen, kecepatan geser gelombang cenderung lebih rendah dibandingkan dengan batuan dasar, yang memiliki kecepatan gelombang lebih tinggi (Lubis dkk., 2021).

Kecepatan gelombang ini dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 3.5.

**Tabel 3.5 Klasifikasi *Site* Berdasarkan Nilai Vs Hasil Penyelidikan Tanah dan Laboratorium SNI 1726**

| <b>Tipe Batuan</b> | <b>Jenis Batuan</b>                 | <b>Nilai Vs (m/s)</b> |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| A                  | Batuan Keras                        | $V_s \geq 1500$       |
| B                  | Batuan Sedang                       | $750 < V_s \leq 1500$ |
| C                  | Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak | $350 < V_s \leq 750$  |
| D                  | Tanah Sedang                        | $175 < V_s \leq 350$  |
| E                  | Tanah Lunak                         | $V_s \leq 175$        |

*Sumber: Badan Standarisasi Nasional (2019)*

Selain itu, ketebalan lapisan sedimen memengaruhi frekuensi dominan dengan hubungan yang bersifat berbanding terbalik. Semakin tinggi nilai frekuensi dominan yang terdeteksi maka semakin tipis lapisan sedimen di lokasi tersebut. Sebaliknya, jika frekuensi dominan lebih rendah maka ketebalan lapisan sedimen cenderung lebih besar. Persamaan 3.9 digunakan untuk menentukan ketebalan lapisan sedimen sekaligus menggambarkan keterkaitan antara frekuensi dominan ( $fg$ ), kecepatan geser tanah pada kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ), dan ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ).

$$h = \frac{V_{s30}}{4fg} \quad (3.9)$$

Keterangan:

$h$  = Ketebalan lapisan sedimen (m)

$V_{s30}$  = Kecepatan geser tanah hingga kedalaman 30 meter (m/s)

$fg$  = Frekuensi dominan (Hz)

### 3.13 Perbandingan $V_{s30}$ Mikrotremor dan $V_{s30}$ *United States Geological Survey* (USGS)

Untuk menilai tingkat keakuratan hasil inversi, dilakukan perbandingan dalam bentuk rasio antara nilai  $V_{s30}$  yang diperoleh dari inversi kurva HVSR dengan nilai  $V_{s30}$  yang disediakan oleh USGS. Nilai  $V_{s30}$  dalam penelitian diperoleh melalui proses inversi kurva mikrotremor HVSR dengan pendekatan *ellipticity curve*, yang diterapkan hingga kedalaman 30 meter. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil inversi mencerminkan karakteristik kecepatan gelombang geser secara akurat pada lapisan tanah dangkal, sehingga dapat dibandingkan secara objektif dengan data referensi dari USGS.

Sementara itu, nilai  $V_{s30}$  dari USGS diperoleh dengan mengunduh data dari situs resmi USGS yang kemudian diekstrak untuk mendapatkan nilai yang sesuai dengan lokasi penelitian. Setelah data  $V_{s30}$  dari kedua sumber diperoleh, rasio  $V_{s30}$  dihitung dengan membandingkan nilai  $V_{s30}$  hasil inversi mikrotremor dengan nilai  $V_{s30}$  dari USGS. Rasio ini memberikan gambaran mengenai sejauh mana hasil inversi kurva HVSR mendekati data referensi yang selanjutnya dapat digunakan untuk mengevaluasi keandalan metode inversi yang digunakan (Mangininsih dkk., 2023).

Karena beberapa wilayah tidak dapat diukur akibat keterbatasan akses lokasi, nilai tersebut diperoleh dengan memanfaatkan data  $V_{s30}$  dari USGS yang kemudian disesuaikan menggunakan data  $V_{s30}$  hasil pengukuran langsung di lapangan. Penyesuaian nilai  $V_{s30}$  dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$V_{s30} \text{ USGS} - V_{s30} \text{ Ukur} = \Delta V \quad (3.10)$$

$$\overline{\Delta V} = \frac{\sum vi}{n} \quad (3.11)$$

$$V_{s30} \text{ Terkoreksi} = V_{s30} \text{ USGS} - \overline{\Delta V} \quad (3.12)$$

Keterangan:

$V_{s30}$  USGS = Nilai  $V_{s30}$  yang diperoleh dari data *United States Geological Survey* (USGS)

$V_{s30}$  Ukur = Nilai  $V_{s30}$  hasil pengukuran langsung di lapangan

$\Delta V$  = Selisih antara  $V_{s30}$  USGS dan  $V_{s30}$  hasil pengukuran lapangan

$\overline{\Delta V}$  = Nilai rata-rata dari selisih  $\Delta V$  yang diperoleh dari beberapa titik pengukuran

$vi$  = Nilai individu dari perbedaan  $V_{s30}$  pada titik pengukuran tertentu

$n$  = Jumlah total titik pengukuran yang digunakan dalam perhitungan rata-rata

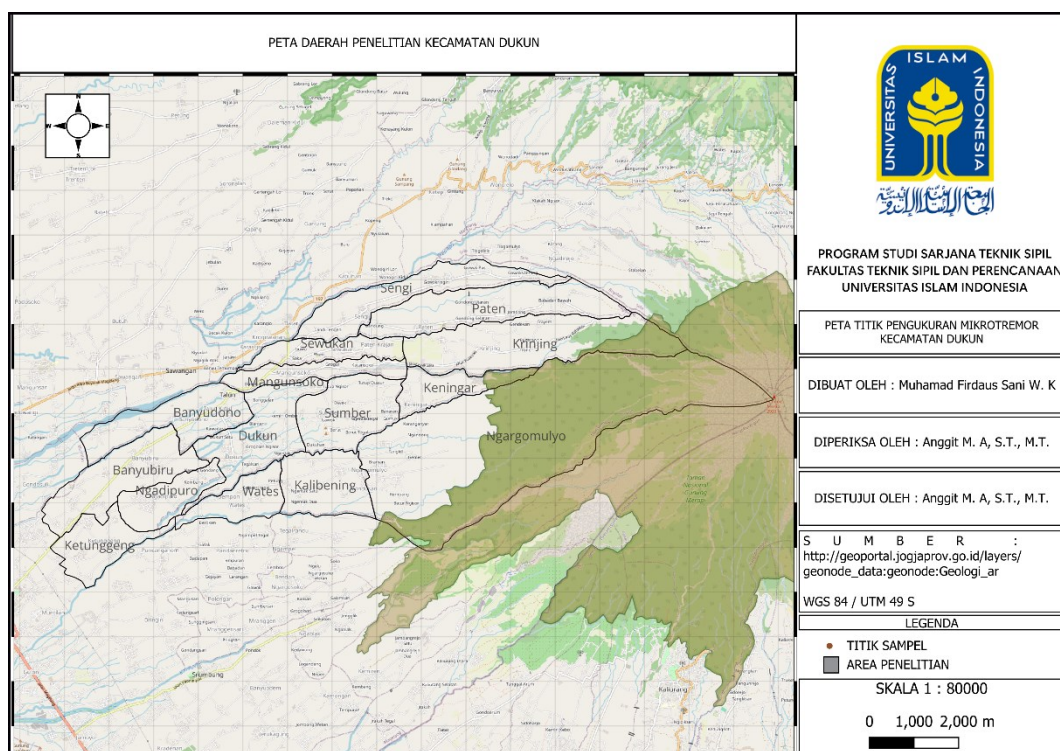
$V_{s30}$  Terkoreksi = Nilai  $V_{s30}$  hasil koreksi

## BAB IV

### METODE PENELITIAN

#### 4.1 Lokasi Penelitian

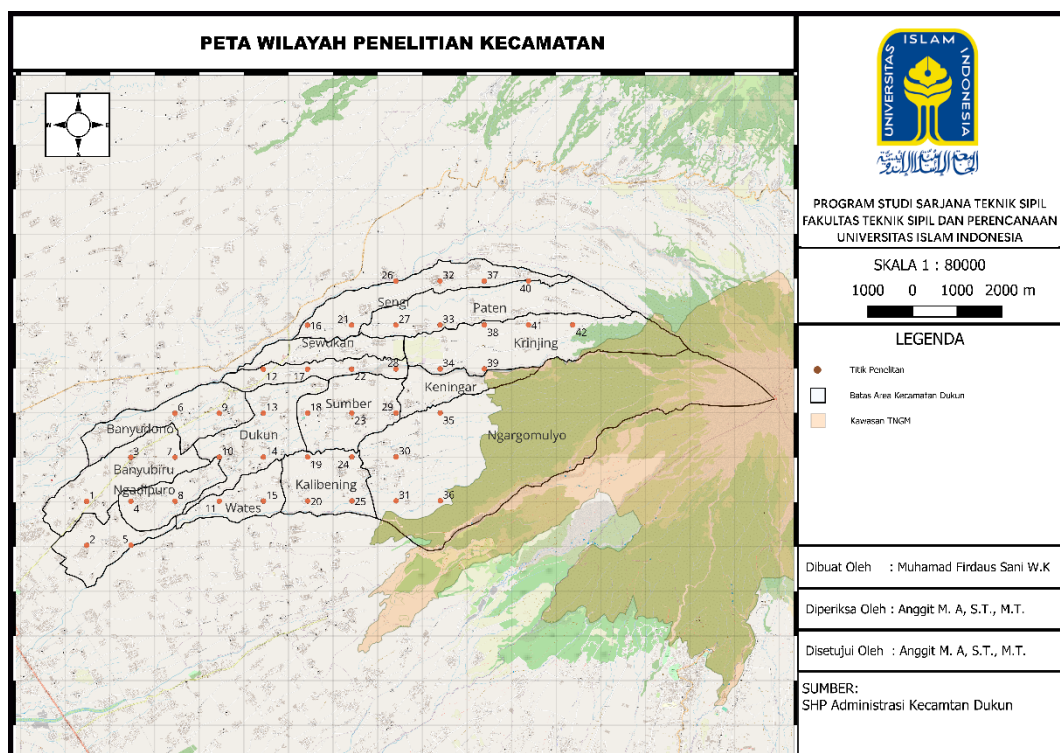
Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang. Secara geografis, lokasi ini terletak antara  $110^{\circ} 01' 51''$  –  $110^{\circ} 12' 48''$  BT dan  $7^{\circ} 19' 13''$  BT –  $7^{\circ} 35' 99''$  LS. Kecamatan Dukun terdiri dari 15 desa, yaitu Banyubiru, Banyudono, Dukun, Kalibening, Keningar, Ketunggeng, Krinjing, Magunsuko, Ngadipuro, Ngargomulyo, Paten, Sengi, Sewukan, Sumber, dan Wates. Gambar 4.1 berikut ini menunjukkan batas administrasi Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang.



Gambar 4.1 Peta Administrasi Kecamatan Dukun

## 4.2 Peralatan dan Titik Pengumpulan Data

Data mikrotremor diperoleh dengan melakukan pengukuran langsung di titik-titik yang telah ditentukan di daerah penelitian. Titik pengukuran tersebut disusun dalam pola grid dengan interval jarak sekitar  $\pm 1,0 \text{ km} \times 1,0 \text{ km}$ . Pengambilan data dilakukan menggunakan alat digital seismograph merk *Lennartz Electronic type LE-3D/20s*. Gambar 4.2 berikut ini menunjukkan lokasi titik pengukuran dalam penelitian ini.



**Gambar 4.2 Peta Titik Penelitian Di Kecamatan Dukun**

### 4.2.1 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua kategori, yaitu perangkat lunak (*software*) dan perangkat keras (*Hardware*).

#### 1. Perangkat Lunak (*Software*)

Perangkat lunak adalah alat yang digunakan untuk mengoperasikan perangkat elektronik.

- a. QGIS 3.38.3 digunakan untuk menentukan lokasi penelitian dan membuat peta penelitian.
  - b. ArcMaps 10.8 digunakan untuk membuat peta distribusi hasil pengolahan data.
  - c. Google Maps digunakan sebagai panduan untuk menuju lokasi titik penelitian.
  - d. *Software DataQ Hardware* berfungsi untuk mengatur perangkat perekaman data.
  - e. Sesarry Geopsy digunakan untuk menganalisis dan memilih sinyal mikrotremor yang bebas dari gangguan dengan menggunakan proses windowing dan cutting.
  - f. Dinver dalam *software* Sesarry Geopsy digunakan untuk menganalisis kurva H/V dengan metode *ellipticity curve* yang menghasilkan nilai kecepatan gelombang (*Vs*) dan kedalaman sedimen (*h*).
  - g. Microsoft Excel 2019 digunakan untuk mengolah data yang diperoleh.
  - h. Microsoft Word 2019 digunakan untuk menyusun laporan penelitian.
2. Perangkat Keras (*Hardware*)
- a. *Lennartz Electronic type LE-3D/20s* digunakan untuk merekam getaran tanah yang terjadi.
  - b. *WIFI Antenna* atau *Ethernet Cable* berfungsi untuk menghubungkan perangkat satu sama lain.
  - c. *Handheld Global Positioning System (GPS)* digunakan untuk mendapatkan data lokasi titik pengukuran.
  - d. Baterai tipe 18650, 3400 mAh, 3,7 Volt berfungsi sebagai sumber daya untuk perangkat perekam.
  - e. Adaptor dan *Power Cable* digunakan sebagai sumber daya untuk mengisi baterai.
  - f. *Flashdisk* digunakan untuk menyimpan data hasil penelitian.
  - g. Laptop berfungsi sebagai perangkat untuk mengelola data dan menyusun laporan.

- h. Lembar *Checklist* digunakan untuk mencatat pengukuran data selama penelitian.
- i. *Handphone* sebagai alat untuk mendokumentasikan gambar di lokasi lapangan.

Untuk penjelasan yang lebih jelas, perangkat keras (*hardware*) yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini.



*Lennartz Electronic type LE-3D/20s*



*Handheld GPS*



*WIFI Antena*



*Laptop*



*Adaptor + Power Cable*



*Baterai*



*Flashdisk*



*Handphone*

**Gambar 4.3 Peralatan Yang Digunakan Dalam Proses Pengukuran Mikrotremor**

#### 4.2.2 Teknik Pengumpulan Data

Sebelum memulai penelitian, langkah pertama yang dilakukan adalah merancang titik lokasi penelitian. Proses perancangan ini menggunakan *software*

QGIS 3.38.3, di mana langkah awalnya adalah menginput data seperti batas administrasi wilayah penelitian dan peta geologi lembar Dukun. Kemudian, dibuatlah *grid* berbentuk persegi dengan interval titik setiap  $\pm 1,0 \text{ km} \times 1,0 \text{ km}$ . Setelah koordinat titik diperoleh, data tersebut dimasukkan ke dalam Google Maps untuk memudahkan penentuan lokasi penelitian. Koordinat yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1 Koordinat Titik Penelitian**

| Titik | X (Longitude) | Y (Latitude) |
|-------|---------------|--------------|
| 1     | 110,3063184   | -7,562424255 |
| 2     | 110,3063184   | -7,571329181 |
| 3     | 110,3153015   | -7,553519145 |
| 4     | 110,3153015   | -7,562424255 |
| 5     | 110,3153015   | -7,571329181 |
| 6     | 110,3242847   | -7,544613852 |
| 7     | 110,3242847   | -7,553519145 |
| 8     | 110,3242847   | -7,562424255 |
| 9     | 110,3332678   | -7,544613852 |
| 10    | 110,3332678   | -7,553519145 |
| 11    | 110,3332678   | -7,562424255 |
| 12    | 110,342251    | -7,535708375 |
| 13    | 110,342251    | -7,544613852 |
| 14    | 110,342251    | -7,553519145 |
| 15    | 110,342251    | 7,562424255  |
| 16    | 110,3512341   | -7,526802716 |
| 17    | 110,3512341   | -7,535708375 |
| 18    | 110,3512341   | -7,544613852 |
| 19    | 110,3512341   | -7,553519145 |
| 20    | 110,3512341   | -7,562424255 |
| 21    | 110,3602173   | -7,526802716 |

**Lanjutan Tabel 4.1 Koordinat Titik Penelitian**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|
| 22           | 110,3063184          | -7,562424255        |
| 23           | 110,3602173          | -7,535708375        |
| 24           | 110,3602173          | -7,544613852        |
| 25           | 110,3602173          | -7,553519145        |
| 26           | 110,3602173          | -7,562424255        |
| 27           | 110,3692004          | -7,517896873        |
| 28           | 110,3692004          | -7,526802716        |
| 29           | 110,3692004          | -7,535708375        |
| 30           | 110,3692004          | -7,544613852        |
| 31           | 110,3692004          | -7,553519145        |
| 32           | 110,3692004          | -7,562424255        |
| 33           | 110,3781836          | -7,517896873        |
| 34           | 110,3781836          | -7,526802716        |
| 35           | 110,3781836          | -7,535708375        |
| 36           | 110,3781836          | -7,553519145        |
| 37           | 110,3781836          | -7,562424255        |
| 38           | 110,3871667          | -7,517896873        |
| 39           | 110,3871667          | -7,526802716        |
| 40           | 110,3871667          | -7,535708375        |
| 41           | 110,3961499          | -7,517896873        |
| 42           | 110,3961499          | -7,526802716        |

Pengukuran data mikrotremor dilakukan langsung di lokasi penelitian, dengan durasi pengukuran sekitar  $\pm 30$  menit untuk setiap titik. Selain itu, pengukuran dilakukan sesuai dengan pedoman yang telah ditetapkan oleh *SESAME European Research Project*, yang mengatur standar dan ketentuan pengukuran mikrotremor seperti yang tercantum dalam Tabel 3.1. Terdapat dua jenis data yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

### 1. Data Primer

Data primer yang digunakan dalam penelitian ini berupa data mikrotremor, yang diperoleh melalui perekaman getaran tanah. Perekaman ini menghasilkan tiga komponen gelombang, yaitu gelombang horizontal EW (*east-west*), gelombang horizontal NS (*north-south*), dan gelombang vertikal (*up-down*). Data yang diperoleh kemudian disimpan dalam format *.mseed* dan selanjutnya diolah menggunakan software Geopsy untuk mendapatkan parameter yang dibutuhkan dalam penelitian ini.

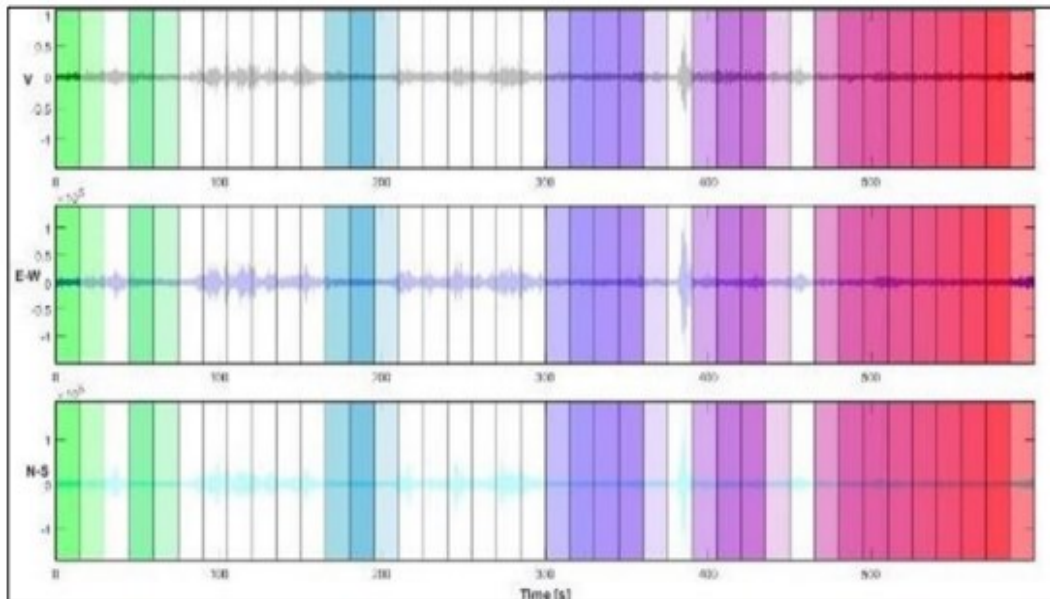
### 2. Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan adalah data borlog dan data pendukung lainnya terkait lapisan tanah di sekitar wilayah penelitian. Data ini diperoleh melalui studi pustaka dari laporan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya di wilayah tersebut.

## 4.3 Pengolahan Data

### 4.3.1 Pengolahan Data Mikrotremor

Metode yang digunakan untuk mengelola data mikrotremor dalam penelitian ini adalah *Horizontal to Vertical Ratio* (HVSr). Hasil pengukuran menghasilkan tiga komponen gelombang getaran, yaitu gelombang horizontal EW (*east-west*), gelombang horizontal NS (*north-south*), dan gelombang vertikal (*up-down*), yang kemudian disimpan dalam format file *.mseed*. Selanjutnya, data mikrotremor tersebut diproses dengan *windowing* dan *cutting*. Proses ini bertujuan untuk membagi dan memilih sinyal yang bebas gangguan secara manual menggunakan *software* Geopsy. Hasil dari proses tersebut menghasilkan kurva H/V yang kemudian disimpan dalam format file *.hv*. Berdasarkan kurva H/V ini, nilai frekuensi dominan ( $f_g$ ) dan faktor amplifikasi ( $A_g$ ) dapat dihitung. Gambar 4.4 berikut ini menunjukkan contoh proses *windowing* dan *cutting* pada data mikrotremor.



**Gambar 4.4 Proses Windowing Data Mikrotremor**

(Sumber: Diniati et al., 2024)

#### 4.3.2 Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik ( $K_g$ )

Nilai indeks kerentanan seismik dihitung menggunakan Persamaan 3.7. Dalam perhitungan ini, diperlukan nilai frekuensi dominan dan amplifikasi. Setelah nilai indeks kerentanan seismik diperoleh, nilai tersebut kemudian dipetakan untuk mengetahui distribusi dan persebarannya. Berdasarkan nilai indeks kerentanan seismik dan ketebalan lapisan sedimen, perhitungan selanjutnya dapat dilakukan untuk mengetahui hubungan antara kedua nilai tersebut.

#### 4.3.3 $V_{s30}$ Mikrotremor Dengan Inversi Kurva H/V Menggunakan Metode *Ellipticity Curve*

Kurva H/V yang diperoleh dari proses sebelumnya dapat digunakan sebagai data input pada metode *ellipticity curve*. Proses ini dilakukan dengan menggunakan program Dinver dalam *software* Geopsy. Metode ini menggunakan pendekatan inversi dengan cara menyesuaikan (*fitting*) parameter model hingga diperoleh hasil yang paling mendekati data observasi. Model yang dihasilkan berupa profil tanah yang disusun berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) dengan tingkat kesesuaian tertentu (*misfit*), yang kemudian digunakan untuk menentukan struktur

bawah permukaan secara optimal. Dari hasil inversi ini, nilai rerata kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter dapat dihitung menggunakan rumus  $V_{s30}$  sesuai dengan standar SNI 1726 Tahun 2019, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.8. Nilai  $V_s$  yang diperoleh sangat dipengaruhi oleh nilai parameter input yang menggambarkan karakteristik tanah di sekitar wilayah penelitian, seperti nilai kecepatan gelombang S ( $V_s$ ), kecepatan gelombang P ( $V_p$ ), *poisson ratio*, dan densitas batuan.

Garis hitam dalam profil permukaan menunjukkan model dengan nilai misfit paling rendah, yang mengindikasikan tingkat kecocokan terbaik antara hasil inversi dan data observasi. Semakin kecil nilai *misfit*, semakin akurat model yang dihasilkan dalam merepresentasikan kondisi tanah di lokasi penelitian. Oleh karena itu, hasil inversi ini dapat memberikan estimasi  $V_{s30}$  yang lebih representatif terhadap kondisi geologi setempat.

#### 4.3.4 Perhitungan Ketebalan Lapisan Sedimen ( $h$ )

Nilai ketebalan lapisan sedimen diperoleh melalui perhitungan menggunakan Persamaan 3.9. Frekuensi dominan yang digunakan didapatkan dari pengolahan data dengan *software* Geopsy. Sementara itu, nilai kecepatan gelombang geser diperoleh dari hasil inversi kurva HVSR menggunakan program Dinver dalam *software* Geopsy. Setelah perhitungan dilakukan, nilai ketebalan lapisan sedimen tersebut dipetakan untuk mengetahui sebaran dan distribusinya.

#### 4.3.5 Perbandingan $V_{s30}$ Mikrotremor dan $V_{s30}$ *United States Geological Survey* (USGS)

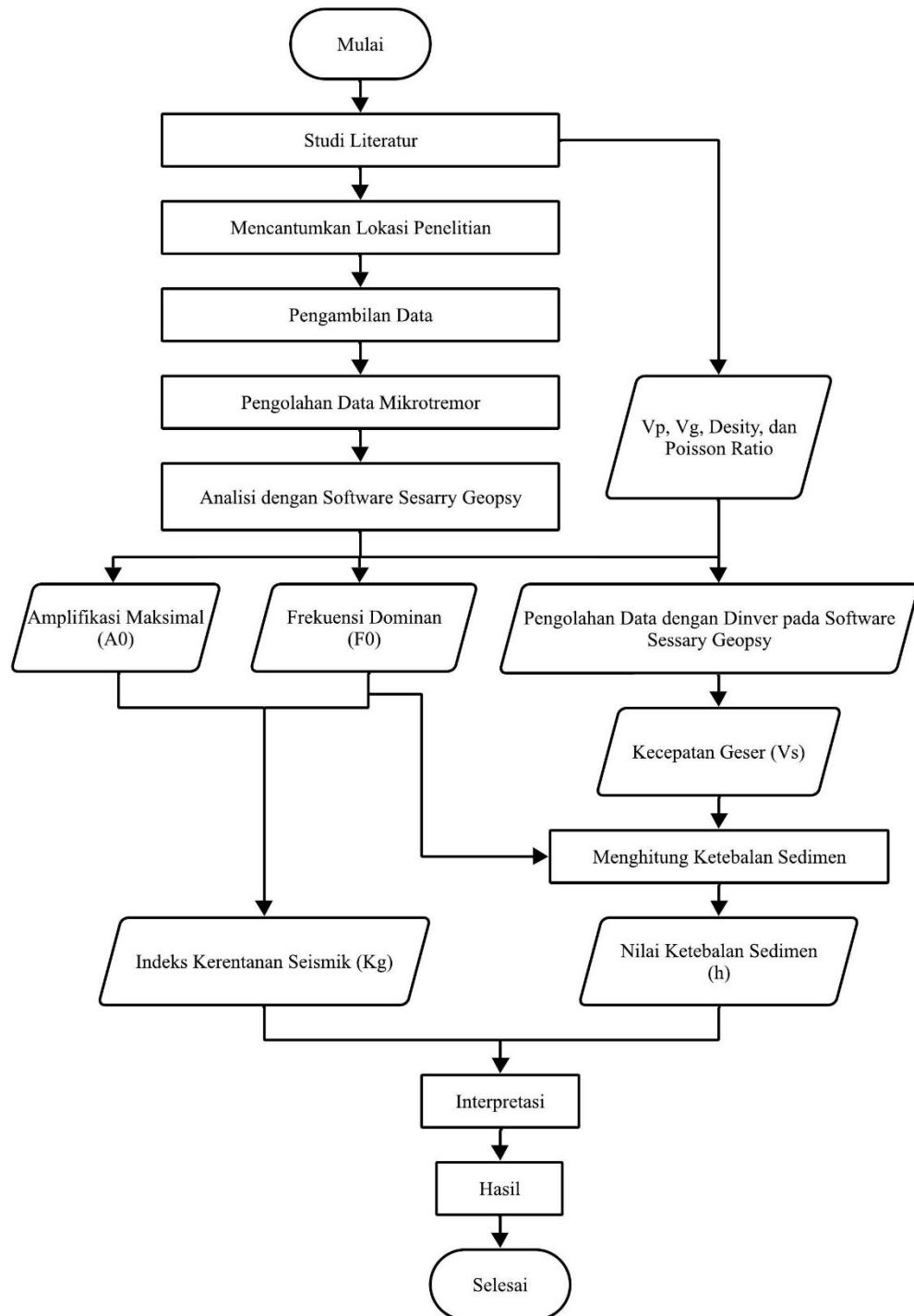
Dilakukan perbandingan antara hasil pengukuran mikrotremor dengan data  $V_{s30}$  yang diperoleh dari *United States Geological Survey* (USGS). Tujuan utama dari perbandingan ini adalah untuk memahami sejauh mana perbedaan antara kedua metode dalam menentukan kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ). Selain itu, perbandingan ini juga bertujuan untuk menyesuaikan nilai  $V_{s30}$  dari USGS agar lebih mencerminkan kondisi geoteknik di lokasi penelitian.

Pengukuran mikrotremor dilakukan di lapangan menggunakan seismometer di beberapa titik yang telah ditentukan sebelumnya. Data  $V_{s30}$  mikrotremor telah dihitung sebelumnya menggunakan inversi kurva H/V dengan metode *ellipticity curve* sedangkan data  $V_{s30}$  dari USGS diambil berdasarkan koordinat geografis lokasi penelitian ini dan digunakan sebagai acuan dalam proses perbandingan. Setelah kedua data dikumpulkan, langkah berikutnya adalah menghitung selisih antara nilai  $V_{s30}$  dari USGS dengan hasil pengukuran di lapangan menggunakan persamaan 3.10 hingga 3.12.

Hasil perbandingan antara  $V_{s30}$  dari USGS dan pengukuran mikrotremor ini kemudian divisualisasikan dalam bentuk tabel serta grafik *scatter plot* untuk melihat pola dan tingkat perbedaannya sehingga memberikan pemahaman yang lebih rinci mengenai persebaran dan perbedaan karakteristik geoteknik di seluruh area penelitian. Dengan adanya perbandingan ini, kita dapat mengetahui sejauh mana perbedaan antara data USGS dan hasil pengukuran langsung di lapangan. Analisis ini juga membantu dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi perbedaan tersebut, seperti karakteristik geologi setempat, ketebalan lapisan sedimen, serta variasi sifat tanah di setiap titik pengukuran.

#### 4.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini sebagai berikut.



**Gambar 4.5 Diagram Alir Penelitian**

## **BAB V**

### **DATA, ANALISIS, DAN PEMBAHASAN**

Penelitian ini berfokus pada analisis ketebalan lapisan sedimen dan penilaian indeks kerentanan seismik di wilayah Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang dengan memanfaatkan data mikrotremor yang diperoleh melalui survei lapangan. Dari hasil pengukuran mikrotremor, diperoleh sejumlah parameter utama yang merepresentasikan karakteristik dinamis tanah setempat, yaitu frekuensi dominan tanah lokal ( $fg$ ), dan amplifikasi ( $Ag$ ). Parameter-parameter ini dianalisis lebih lanjut untuk mengestimasi ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ) yang menyelimuti batuan dasar serta menghitung indeks kerentanan seismik ( $Kg$ ) yang mencerminkan tingkat respons suatu lokasi terhadap getaran seismik. Pendekatan ini memungkinkan diperolehnya pemahaman yang lebih menyeluruh terkait kondisi bawah permukaan serta potensi amplifikasi seismik yang berperan penting dalam upaya mitigasi bencana gempa bumi dan perencanaan tata ruang. Dalam penelitian ini, tahap pertama yang dilakukan adalah menentukan lokasi pengambilan data sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2 dan kemudian dilanjutkan pengambilan data di lapangan.

#### **5.1 Pengambilan Data di Lapangan**

Teknik pengambilan data yang dilakukan di melalui pengambilan data mikrotremor yang didapatkan melalui bantuan alat Lennartz Electronic LE3D - 20s. Lokasi pengambilan data disesuaikan dengan titik koordinat yang telah disesuaikan sebelumnya. Proses perekaman dilakukan dengan menggunakan panduan SESAME seperti pada Tabel 3.1. Langkah awal yang dilakukan pada pengambilan data mikrotremor adalah menuju ke titik yang telah ditentukan sebelumnya dengan bantuan aplikasi Avenza. Jika lokasi telah sesuai dengan lokasirencana, selanjutnya mempersiapkan instrumen alat. Proses persiapan instrumen alat terdiri dari beberapa tahapan, sebelum alat dapat digunakan, yaitu :

1. Gali tanah sedalam  $\pm 60$  cm untuk menaruh seismometer, alat diletakan didalam tanah untuk mengurangi noise yang ditimbulkan dari angin.
2. Letakan paving block di dalam lubang sebagai alas untuk seismometer.
3. Letakkan seismometer pada titik pengukuran tersebut dan arahkan seismometer menuju arah utara, terdapat penunjuk arah pada seismometer seperti pada Gambar 5.1.



**Gambar 5.1 Penunjuk Arah Mata Angin Pada Seismometer**

4. Hubungkan seismometer dengan data logger menggunakan kabel penghubung.
5. Lakukan leveling pada seismometer dengan cara menempatkan gelembung di dalam nivo di bagian tengah. Gelembung tersebut dapat diatur dengan menggunakan 3 buah kaki penyangga. Proses leveling dapat dilihat pada Gambar 5.2

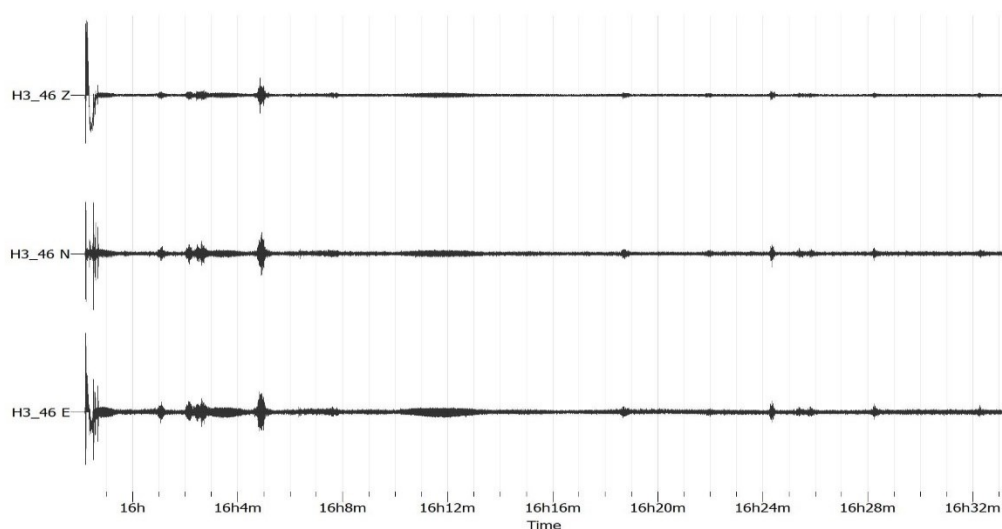


**Gambar 5.2 Proses *Leveling* Seismometer**

6. Hubungkan data logger dengan Laptop menggunakan kabel penghubung. Ulur semua kabel yang tergulung untuk menghindari coupling yang dapat menyebabkan gangguan terhadap tegangan dan arus.
7. Buka software DataQ dan lakukan setting untuk menentukan nilai sampling rate dan gain.
8. Lakukan pengujian respons gelombang sebelum melakukan perekaman data, jika respons gelombang yang ditunjukkan sama antara ketiga komponen, maka dapat melakukan proses perekaman data mikrotremor.

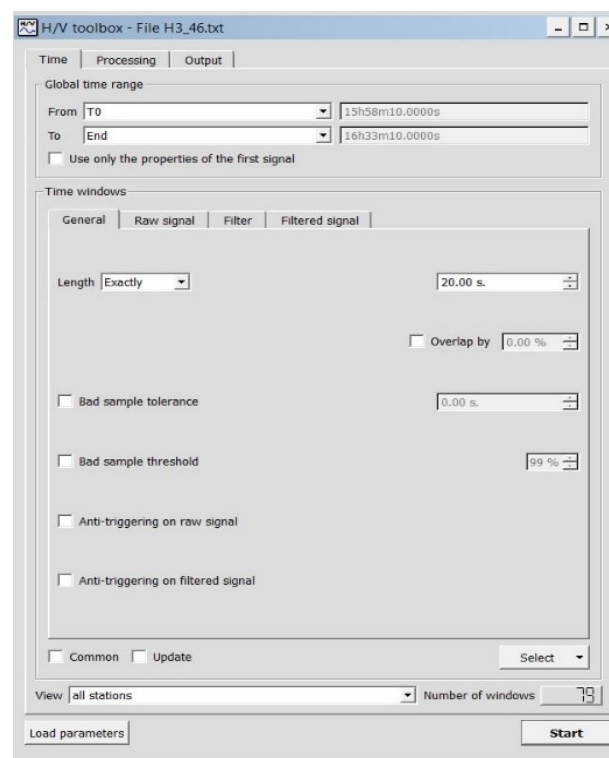
## 5.2 Analisis Data Mikrotremor

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang. Pengambilan data dilakukan di 42 titik pengukuran yang tersebar merata di seluruh kecamatan tersebut dengan jarak antar titik sekitar 1 kilometer yang dapat dilihat pada Gambar 4.2. Tujuan pemilihan lokasi ini adalah untuk mendapatkan gambaran yang akurat mengenai kondisi bawah permukaan serta potensi kerentanan seismik di wilayah tersebut. Penentuan titik pengukuran secara spesifik dilakukan dengan mengacu pada persyaratan yang tercantum pada Tabel 3.1. Contoh seismogram hasil perekaman mikrotremor pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 5.3.

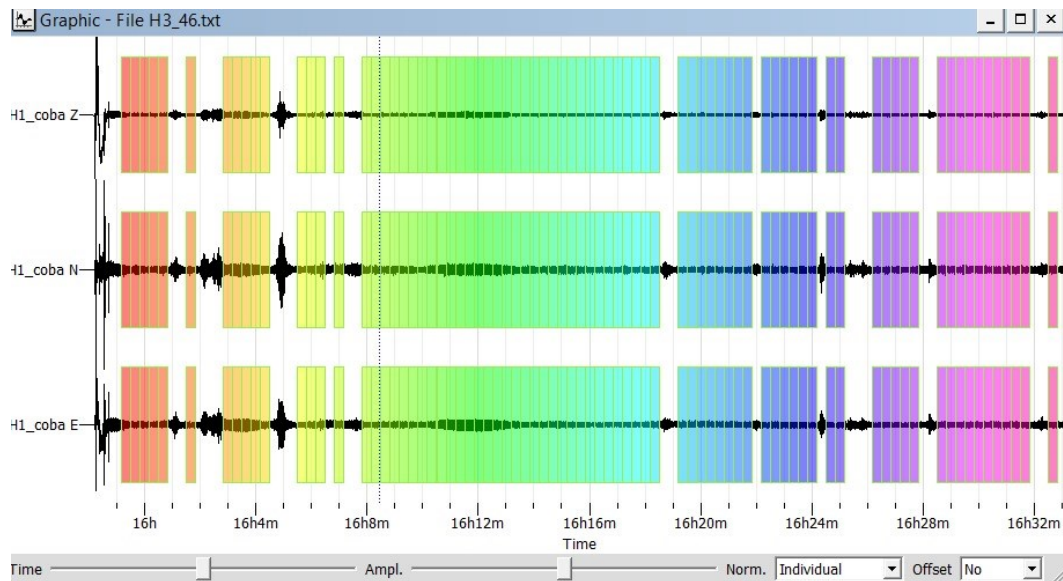


**Gambar 5.3 Sinyal Rekaman Mikrotremor Titik 35**

Penelitian ini menggunakan *software* Geopsy untuk mengolah data mentah hasil perekaman mikrotremor di lapangan. Langkah berikutnya adalah melakukan proses *windowing*, yaitu seleksi terhadap gelombang yang dinilai kurang sesuai untuk dianalisis. Tahapan ini memiliki peran penting karena rekaman sinyal saat pengambilan data bisa saja mengandung gangguan, baik dari getaran alami tanah maupun aktivitas manusia di area sekitar. Dalam proses ini digunakan metode *auto select* yang dipadukan dengan pembersihan *noise* secara manual, dengan panjang *window* sekitar 20 detik sehingga data yang dianalisis memiliki tingkat akurasi dan keterwakilan yang baik sebagaimana terlihat pada Gambar 5.4. Langkah ini membantu memastikan bahwa proses *windowing* tidak hanya dilakukan secara otomatis oleh perangkat lunak, tetapi juga dikendalikan melalui pengecekan manual sehingga hasil analisis lebih dapat dipercaya. Proses *windowing* membagi sinyal rekaman menjadi beberapa segmen atau *window* yang ditandai dengan warna berbeda. Masing-masing warna menggambarkan satu *window*, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.5.

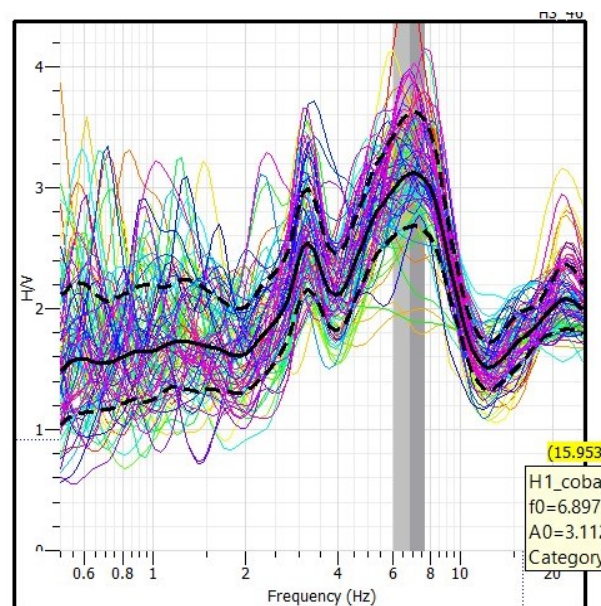


**Gambar 5.4 Filter Option untuk Windowing Sinyal Mikrotremor Titik 35**



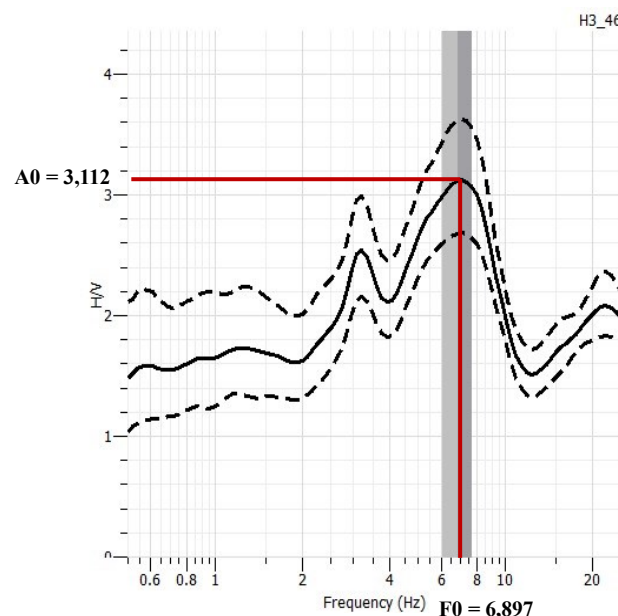
**Gambar 5.5 Windowing Sinyal Mikrotremor Titik 35**

Setelah proses windowing setiap segmen sinyal menghasilkan kurva HVSR tersendiri yang ditampilkan dalam Gambar 5.6. Garis hitam menunjukkan nilai rata-rata dari seluruh kurva HVSR hasil setiap *window* yang valid. Garis putus-putus menunjukkan simpangan baku yang merepresentasikan variasi antar kurva (Vantassel et al., 2023).



**Gambar 5.6 Kurva HVSR Pada Titik 35**

Kurva HVSR yang diperoleh akan mengindikasikan frekuensi dominan dan nilai amplifikasi maksimum yang terletak pada puncak grafik H/V seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5.7.



**Gambar 5.7 Kurva HVSR Pada Titik 35 Setelah Filterisasi**

### 5.3 Uji *Outlier*

*Outlier* merupakan sekumpulan data yang memiliki karakteristik yang sangat berbeda dibandingkan dengan data lainnya, yang biasanya ditunjukkan oleh munculnya nilai ekstrem pada suatu variabel tunggal maupun kombinasi variabel. Kehadiran *outlier* dalam data dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap proses pengolahan data maupun hasil pengambilan keputusan. Untuk mengidentifikasi nilai ekstrem tersebut, dilakukan uji *outlier* dengan cara mengubah nilai data menjadi *Z-score* atau nilai standar baku. Dalam penelitian ini, batas *Z-score* yang digunakan adalah kurang dari 3. Pendeteksian *outlier* dilakukan pada parameter frekuensi dominan dan faktor amplifikasi hasil pengolahan mikrotremor menggunakan perangkat lunak Sessary Geopsy, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.7. Analisis uji *outlier* dihitung sesuai dengan Persamaan 3.4, Persamaan 3.5, dan Persamaan 3.6. Melalui proses ini, data yang tidak wajar dapat diidentifikasi dan dipisahkan, sehingga kualitas analisis menjadi

lebih terjaga. Dengan demikian, hasil penelitian yang diperoleh lebih akurat serta dapat merepresentasikan kondisi geologi dan seismik di lapangan. Berikut merupakan contoh perhitungan uji outlier pada nilai frekuensi dominan ( $fg$ ).

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{\sum x}{n} \\ \bar{x} &= \frac{211,1535}{42} \\ \bar{x} &= 5,02746\end{aligned}$$

Setelah didapatkan nilai *mean* ( $\bar{x}$ ) kemudian dicari nilai simpangan baku atau standar deviasi.

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \\ \sigma &= \sqrt{\frac{501.8215}{42}} \\ \sigma &= 3,498506\end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai *Z-score* pada setiap titik penelitian setelah diperoleh nilai simpangan baku atau standar deviasi. Di bawah ini merupakan contoh pada titik 35.

$$\begin{aligned}Z\text{-score} &= \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma} \\ Z\text{-score} &= \frac{(6,8978 - 5,02746)}{3,498506} \\ Z\text{-score} &= 0,534615\end{aligned}$$

Hasil perhitungan yang telah diperoleh kemudian direkapitulasi dalam bentuk table, yaitu pada Tabel 5.1, dan Tabel 5.2.

Tabel 5.1 Hasil Uji *Outlier* Nilai Frekuensi Dominan (*fg*)

| Titik | <i>Fg</i> | <i>Mean</i> | Standar<br>Deviasi | <i>Z Score</i> | Keterangan    |
|-------|-----------|-------------|--------------------|----------------|---------------|
| 1     | 1,3753    | 5,027464    | 3,498506           | 1,043924       | Tidak Outlier |
| 2     | 1,0187    |             |                    | 1,145856       | Tidak Outlier |
| 3     | 16,7232   |             |                    | 3,343065       | Outlier       |
| 4     | 1,1895    |             |                    | 1,097041       | Tidak Outlier |
| 5     | 1,0446    |             |                    | 1,138444       | Tidak Outlier |
| 6     | 1,2653    |             |                    | 1,07536        | Tidak Outlier |
| 7     | 0,9029    |             |                    | 1,178961       | Tidak Outlier |
| 8     | 0,8929    |             |                    | 1,181816       | Tidak Outlier |
| 9     | 1,0244    |             |                    | 1,14423        | Tidak Outlier |
| 10    | 11,2053   |             |                    | 1,765849       | Tidak Outlier |
| 11    | 4,5615    |             |                    | 0,13319        | Tidak Outlier |
| 12    | 1,2842    |             |                    | 1,069966       | Tidak Outlier |
| 13    | 7,6929    |             |                    | 0,761881       | Tidak Outlier |
| 14    | 1,2415    |             |                    | 1,08216        | Tidak Outlier |
| 15    | 5,0137    |             |                    | 0,003929       | Tidak Outlier |
| 16    | 11,6785   |             |                    | 1,901107       | Tidak Outlier |
| 17    | 4,9148    |             |                    | 0,032206       | Tidak Outlier |
| 18    | 3,6903    |             |                    | 0,382204       | Tidak Outlier |
| 19    | 4,8928    |             |                    | 0,038503       | Tidak Outlier |
| 20    | 4,9047    |             |                    | 0,035085       | Tidak Outlier |
| 21    | 3,6315    |             |                    | 0,399006       | Tidak Outlier |
| 22    | 4,7035    |             |                    | 0,092606       | Tidak Outlier |
| 23    | 0,9012    |             |                    | 1,179434       | Tidak Outlier |
| 24    | 4,1769    |             |                    | 0,243119       | Tidak Outlier |
| 25    | 5,3112    |             |                    | 0,08111        | Tidak Outlier |
| 26    | 11,7211   |             |                    | 1,913284       | Tidak Outlier |
| 27    | 5,4573    |             |                    | 0,122848       | Tidak Outlier |

Lanjutan Tabel 5.1 Hasil Uji *Outlier* Nilai Frekuensi Dominan (*fg*)

| Titik | <i>Fg</i> | Mean     | Standar Deviasi | Z Score  | Keterangan    |
|-------|-----------|----------|-----------------|----------|---------------|
| 28    | 6,2305    | 5,027464 | 3,498506        | 0,343883 | Tidak Outlier |
| 29    | 0,8737    |          |                 | 1,187287 | Tidak Outlier |
| 30    | 5,0753    |          |                 | 0,013676 | Tidak Outlier |
| 31    | 4,3221    |          |                 | 0,201619 | Tidak Outlier |
| 32    | 6,3676    |          |                 | 0,383065 | Tidak Outlier |
| 33    | 6,9470    |          |                 | 0,548684 | Tidak Outlier |
| 34    | 5,6776    |          |                 | 0,185832 | Tidak Outlier |
| 35    | 6,8978    |          |                 | 0,534615 | Tidak Outlier |
| 36    | 5,2466    |          |                 | 0,062628 | Tidak Outlier |
| 37    | 8,4142    |          |                 | 0,968046 | Tidak Outlier |
| 38    | 5,5811    |          |                 | 0,158249 | Tidak Outlier |
| 39    | 7,4414    |          |                 | 0,689987 | Tidak Outlier |
| 40    | 7,8982    |          |                 | 0,82056  | Tidak Outlier |
| 41    | 5,7873    |          |                 | 0,2172   | Tidak Outlier |
| 42    | 5,9734    |          |                 | 0,270374 | Tidak Outlier |

Tabel 5.2 Hasil Uji *Outlier* Nilai Amplifikasi Tanah (*Ag*)

| Titik | <i>Ag</i> | Mean     | Standar Deviasi | Z Score  | Keterangan    |
|-------|-----------|----------|-----------------|----------|---------------|
| 1     | 1,9832    | 2,819014 | 0,902319        | 0,926272 | Tidak Outlier |
| 2     | 2,6504    |          |                 | 0,186878 | Tidak Outlier |
| 3     | 3,1644    |          |                 | 0,382787 | Tidak Outlier |
| 4     | 1,1895    |          |                 | 1,805961 | Tidak Outlier |
| 5     | 1,9811    |          |                 | 0,928644 | Tidak Outlier |
| 6     | 1,9371    |          |                 | 0,97743  | Tidak Outlier |
| 7     | 1,9252    |          |                 | 0,990584 | Tidak Outlier |
| 8     | 1,9877    |          |                 | 0,921263 | Tidak Outlier |

Lanjutan Tabel 5.2 Hasil Uji *Outlier* Nilai Amplifikasi Tanah (*Ag*)

| Titik | <i>Ag</i> | Mean     | Standar Deviasi | Z Score  | Keterangan    |
|-------|-----------|----------|-----------------|----------|---------------|
| 9     | 1,6201    | 2,819014 | 0,902319        | 1,328702 | Tidak Outlier |
| 10    | 3,1206    |          |                 | 0,334179 | Tidak Outlier |
| 11    | 2,8023    |          |                 | 0,018512 | Tidak Outlier |
| 12    | 4,0714    |          |                 | 1,387975 | Tidak Outlier |
| 13    | 2,3443    |          |                 | 0,526059 | Tidak Outlier |
| 14    | 2,9671    |          |                 | 0,164151 | Tidak Outlier |
| 15    | 2,8645    |          |                 | 0,050422 | Tidak Outlier |
| 16    | 2,1203    |          |                 | 0,774364 | Tidak Outlier |
| 17    | 2,5831    |          |                 | 0,261441 | Tidak Outlier |
| 18    | 3,5868    |          |                 | 0,850914 | Tidak Outlier |
| 19    | 2,1020    |          |                 | 0,794623 | Tidak Outlier |
| 20    | 2,6653    |          |                 | 0,170354 | Tidak Outlier |
| 21    | 3,1951    |          |                 | 0,416844 | Tidak Outlier |
| 22    | 2,9111    |          |                 | 0,102077 | Tidak Outlier |
| 23    | 1,7289    |          |                 | 1,208168 | Tidak Outlier |
| 24    | 2,0533    |          |                 | 0,848639 | Tidak Outlier |
| 25    | 2,5262    |          |                 | 0,324568 | Tidak Outlier |
| 26    | 3,1817    |          |                 | 0,401916 | Tidak Outlier |
| 27    | 5,5492    |          |                 | 2,985765 | Tidak Outlier |
| 28    | 3,3419    |          |                 | 0,579525 | Tidak Outlier |
| 29    | 1,8806    |          |                 | 1,039957 | Tidak Outlier |
| 30    | 2,4669    |          |                 | 0,390265 | Tidak Outlier |
| 31    | 3,0414    |          |                 | 0,246494 | Tidak Outlier |
| 32    | 3,3099    |          |                 | 0,544027 | Tidak Outlier |
| 33    | 3,1808    |          |                 | 0,400974 | Tidak Outlier |
| 34    | 3,6642    |          |                 | 0,936682 | Tidak Outlier |
| 35    | 3,1128    |          |                 | 0,325635 | Tidak Outlier |

Lanjutan Tabel 5.2 Hasil Uji *Outlier* Nilai Amplifikasi Tanah (*Ag*)

| Titik | <i>Ag</i> | Mean     | Standar Deviasi | Z Score  | Keterangan    |
|-------|-----------|----------|-----------------|----------|---------------|
| 36    | 2,1484    | 2,819014 | 0,902319        | 0,743211 | Tidak Outlier |
| 37    | 2,9068    |          |                 | 0,097234 | Tidak Outlier |
| 38    | 4,2793    |          |                 | 1,618348 | Tidak Outlier |
| 39    | 2,8331    |          |                 | 0,015556 | Tidak Outlier |
| 40    | 3,5717    |          |                 | 0,834191 | Tidak Outlier |
| 41    | 5,3728    |          |                 | 2,83028  | Tidak Outlier |
| 42    | 2,4761    |          |                 | 0,38008  | Tidak Outlier |

Hasil uji outlier pada Tabel 5.1 menunjukkan adanya satu data *outlier* pada titik 3 dengan nilai *Z-score* sebesar 3,343065 sedangkan pada Tabel 5.2 tidak ditemukan data *outlier*. Data *outlier* atau data yang menyimpang jauh dari kelompoknya tidak dianalisis lebih lanjut karena dapat memengaruhi keakuratan hasil analisis. Oleh karena itu, dalam penelitian ini terdapat satu data yang teridentifikasi sebagai outlier dan tidak digunakan pada proses analisis.

#### 5.4 Analisis Frekuensi Dominan (*fg*)

Frekuensi adalah jumlah getaran atau gelombang yang terjadi dalam suatu satuan waktu. Frekuensi dominan tanah (*fg*) merupakan frekuensi pada saat kurva HVSR mencapai puncak atau nilai tertingginya. Besar kecilnya nilai frekuensi dominan dipengaruhi oleh ketebalan sedimen (*h*) dan kecepatan gelombang geser tanah (*Vs*). Parameter ini mencerminkan jenis tanah serta ketebalan lapisan sedimen di bawahnya. Daerah dengan nilai frekuensi dominan tinggi umumnya memiliki lapisan sedimen yang tipis, sedangkan nilai frekuensi dominan rendah menunjukkan lapisan sedimen yang tebal. Nilai *fg* diperoleh dari puncak kurva HVSR hasil pengukuran mikrotremor. Berdasarkan hasil pengukuran di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang, nilai frekuensi dominan tanah berkisar antara 0,8737 hingga 11,7211 sebagaimana tercantum pada Tabel 5.3.

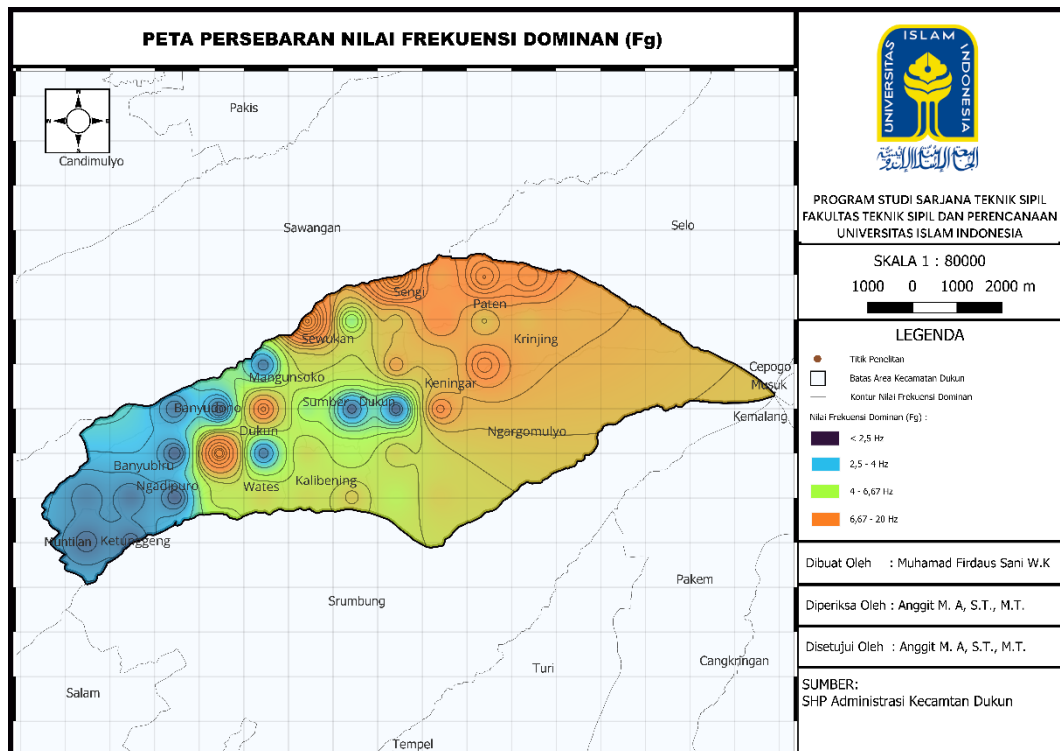
**Tabel 5.3 Rekapitulasi Nilai Frekuensi Dominan ( $fg$ ) di Kecamatan Dukun**

| Titik | X (Longitude) | Y (Latitude) | Frekuensi Dominan ( $fg$ ) |
|-------|---------------|--------------|----------------------------|
| 1     | 110,3063184   | -7,562424255 | 1,3753                     |
| 2     | 110,3063184   | -7,571329181 | 1,0187                     |
| 3     | 110,3153015   | -7,562424255 | Outlier                    |
| 4     | 110,3153015   | -7,571329181 | 1,1895                     |
| 5     | 110,3242847   | -7,544613852 | 1,0446                     |
| 6     | 110,3242847   | -7,553519145 | 1,2653                     |
| 7     | 110,3242847   | -7,562424255 | 0,9029                     |
| 8     | 110,3332678   | -7,544613852 | 0,8929                     |
| 9     | 110,3332678   | -7,553519145 | 1,0244                     |
| 10    | 110,3332678   | -7,562424255 | 11,2053                    |
| 11    | 110,342251    | -7,535708375 | 4,5615                     |
| 12    | 110,342251    | -7,544613852 | 1,2842                     |
| 13    | 110,342251    | -7,553519145 | 7,6929                     |
| 14    | 110,342251    | -7,562424255 | 1,2415                     |
| 15    | 110,3512341   | -7,526802716 | 5,0137                     |
| 16    | 110,3512341   | -7,535708375 | 11,6785                    |
| 17    | 110,3512341   | -7,544613852 | 4,9148                     |
| 18    | 110,3512341   | -7,553519145 | 3,6903                     |
| 19    | 110,3512341   | -7,562424255 | 4,8928                     |
| 20    | 110,3602173   | -7,526802716 | 4,9047                     |
| 21    | 110,3602173   | -7,535708375 | 3,6315                     |
| 22    | 110,3602173   | -7,544613852 | 4,7035                     |
| 23    | 110,3602173   | -7,553519145 | 0,9012                     |
| 24    | 110,3602173   | -7,562424255 | 4,1769                     |
| 25    | 110,3692004   | -7,517896873 | 5,3112                     |
| 26    | 110,3692004   | -7,526802716 | 11,7211                    |

**Lanjutan Tabel 5.3 Rekapitulasi Nilai Frekuensi Dominan ( $fg$ ) di  
Kecamatan Dukun**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b>Frekuensi Dominan (<math>fg</math>)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------------|
| 27           | 110,3692004          | -7,535708375        | 5,4573                                     |
| 28           | 110,3692004          | -7,544613852        | 6,2305                                     |
| 29           | 110,3692004          | -7,553519145        | 0,8737                                     |
| 30           | 110,3692004          | -7,562424255        | 5,0753                                     |
| 31           | 110,3781836          | -7,517896873        | 4,3221                                     |
| 32           | 110,3781836          | -7,526802716        | 6,3676                                     |
| 33           | 110,3781836          | -7,535708375        | 6,9470                                     |
| 34           | 110,3781836          | -7,544613852        | 5,6776                                     |
| 35           | 110,3781836          | -7,553519145        | 6,8978                                     |
| 36           | 110,3781836          | -7,562424255        | 5,2466                                     |
| 37           | 110,3871667          | -7,517896873        | 8,4142                                     |
| 38           | 110,3871667          | -7,526802716        | 5,5811                                     |
| 39           | 110,3871667          | -7,535708375        | 7,4414                                     |
| 40           | 110,3961499          | -7,517896873        | 7,8982                                     |
| 41           | 110,3961499          | -7,526802716        | 5,7873                                     |
| 42           | 110,405133           | -7,526802716        | 5,9734                                     |

Berdasarkan hasil nilai frekuensi dominan tanah yang telah diperoleh, wilayah di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang dapat dikelompokkan ke dalam beberapa klasifikasi jenis tanah yang tertera pada Tabel 3.2. Klasifikasi ini membantu mengidentifikasi karakteristik tanah di setiap lokasi, termasuk ketebalan sedimen dan kekerasan lapisan bawah permukaan. Kemudian, dibuat peta distribusi frekuensi dominan tanah yang menggambarkan variasi nilai tersebut di seluruh wilayah Kecamatan Dukun. Peta ini memberikan gambaran visual mengenai pola sebaran nilai frekuensi dominan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.8.



**Gambar 5.8 Peta Persebaran Nilai Frekuensi Dominan ( $f_g$ ) di Kecamatan Dukun**

Berdasarkan klasifikasi nilai frekuensi dominan yang ditunjukkan pada Gambar 5.8 dan Tabel 5.3. Wilayah penelitian menunjukkan variasi persebaran nilai frekuensi dominan pada beberapa kategori. Daerah yang masuk kategori Tipe IV dan Jenis I dengan rentang  $6,67 \text{ Hz} < f_g < 20 \text{ Hz}$  meliputi Desa Sengi (titik 26, titik 16, dan titik 37), Desa Paten (titik 40, dan titik 33), Desa Dukun (titik 10 dan titik 13), Desa Krinjing (titik 39), dan Desa Ngargomulyo (titik 35).

Daerah yang tergolong Tipe III dan Jenis II dengan rentang  $4 \text{ Hz} < f_g < 6,67 \text{ Hz}$  tersebar di Desa Sengi (titik 32), Desa Mangunsoko (titik 28, titik 17 dan titik 22), Desa Krinjing (titik 42, titik 41, titik 34 dan titik 38), Desa Paten (titik 27), Desa Kalibening (titik 25, titik 20, titik 19 dan titik 24), Desa Ngargomulyo (titik 36, titik 30, dan titik 31), Desa Wates (titik 15 dan titik 11), dan Desa Mangunsoko (titik 17 dan titik 22).

Untuk kategori Tipe II dan Jenis III dengan rentang  $2,5 \text{ Hz} < f_g < 4 \text{ Hz}$ , wilayah yang termasuk di dalamnya adalah Desa Sumber (titik 18) dan Desa Sengi

(titik 21). Selain itu, terdapat juga persebaran Tipe I Jenis IV dengan nilai  $fg < 2,5$  Hz yang mencakup Desa Banyubiru (titik 1 dan titik 7), Desa Mangunsoko (titik 12), Desa Banyudono (titik 6 dan titik 9), Desa Dukun (titik 14), Desa Ngadipuro (titik 4 dan titik 8), Desa Ketunggeng (titik 5 dan titik 2), dan Desa Sumber (titik 23 dan titik 29).

### 5.5 Analisis Faktor Amplifikasi ( $A_g$ )

Nakamura (2000) menyatakan bahwa faktor amplifikasi sangat berkaitan erat dengan kontras impedansi atau perbedaan densitas antara lapisan sedimen dan batuan di bawahnya. Semakin besar perbedaan densitas tersebut, semakin tinggi pula tingkat penguatan gelombang seismik di permukaan. Wilayah dengan faktor amplifikasi tinggi umumnya ditandai oleh keberadaan sedimen yang relatif lunak di bagian atas. Kondisi ini menjadikan daerah tersebut lebih rentan terhadap kerusakan bangunan ketika terjadi gempa, karena lapisan sedimen lunak mampu memperbesar getaran dan meningkatkan respons tanah secara signifikan (Boudghene Stambouli & Guizani, 2025). Dengan demikian, hubungan antara faktor amplifikasi dan potensi kerusakan bangunan akibat gempa bumi bersifat berbanding lurus, artinya semakin tinggi faktor amplifikasi maka semakin besar pula kemungkinan terjadinya kerusakan. Pada penelitian ini, nilai faktor amplifikasi berada pada kisaran 1,189 hingga 5,549. Rekapitulasi hasil faktor amplifikasi di Kecamatan Dukun dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut.

**Tabel 5.4 Rekapitulasi Nilai Faktor Amplifikasi ( $A_g$ ) di Kecamatan Dukun**

| Titik | X (Longitude) | Y (Latitude) | Faktor Amplifikasi ( $A_g$ ) |
|-------|---------------|--------------|------------------------------|
| 1     | 110,3063184   | -7,562424255 | 1,98322                      |
| 2     | 110,3063184   | -7,571329181 | 2,65039                      |
| 3     | 110,3153015   | -7,562424255 | Outlier                      |
| 4     | 110,3153015   | -7,571329181 | 1,18946                      |
| 5     | 110,3242847   | -7,544613852 | 1,98108                      |

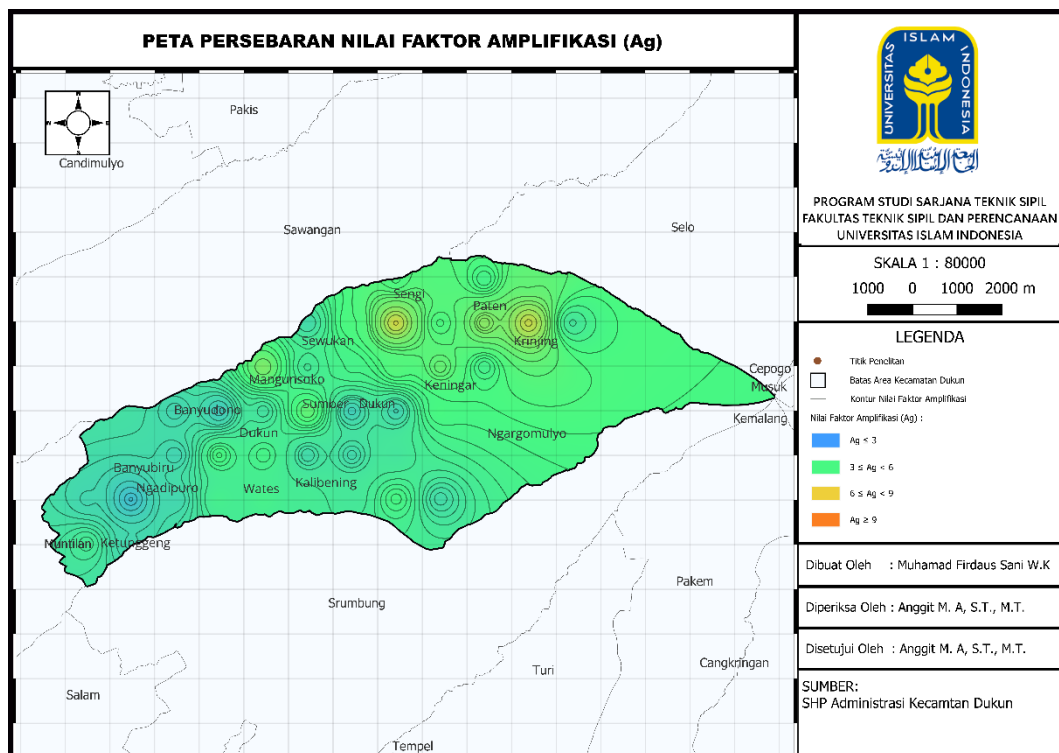
**Lanjutan Tabel 5.4 Rekapitulasi Nilai Faktor Amplifikasi ( $A_g$ ) di Kecamatan  
Dukun**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b>Faktor<br/>Amplifikasi (<math>A_g</math>)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------------------|
| 6            | 110,3242847          | -7,553519145        | 1,93706                                          |
| 7            | 110,3242847          | -7,562424255        | 1,92519                                          |
| 8            | 110,3332678          | -7,544613852        | 1,98774                                          |
| 9            | 110,3332678          | -7,553519145        | 1,6201                                           |
| 10           | 110,3332678          | -7,562424255        | 3,12055                                          |
| 11           | 110,342251           | -7,535708375        | 2,80231                                          |
| 12           | 110,342251           | -7,544613852        | 4,07141                                          |
| 13           | 110,342251           | -7,553519145        | 2,34434                                          |
| 14           | 110,342251           | -7,562424255        | 2,96713                                          |
| 15           | 110,3512341          | -7,526802716        | 2,86451                                          |
| 16           | 110,3512341          | -7,535708375        | 2,12029                                          |
| 17           | 110,3512341          | -7,544613852        | 2,58311                                          |
| 18           | 110,3512341          | -7,553519145        | 3,58681                                          |
| 19           | 110,3512341          | -7,562424255        | 2,10201                                          |
| 20           | 110,3602173          | -7,526802716        | 2,6653                                           |
| 21           | 110,3602173          | -7,535708375        | 3,19514                                          |
| 22           | 110,3602173          | -7,544613852        | 2,91112                                          |
| 23           | 110,3602173          | -7,553519145        | 1,72886                                          |
| 24           | 110,3602173          | -7,562424255        | 2,05327                                          |
| 25           | 110,3692004          | -7,517896873        | 2,52615                                          |
| 26           | 110,3692004          | -7,526802716        | 3,18167                                          |
| 27           | 110,3692004          | -7,535708375        | 5,54922                                          |
| 28           | 110,3692004          | -7,544613852        | 3,34193                                          |
| 29           | 110,3692004          | -7,553519145        | 1,88064                                          |
| 30           | 110,3692004          | -7,562424255        | 2,46687                                          |
| 31           | 110,3781836          | -7,517896873        | 3,04143                                          |

**Lanjutan Tabel 5.4 Rekapitulasi Nilai Faktor Amplifikasi ( $A_g$ ) di Kecamatan Dukun**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b>Faktor Amplifikasi (<math>A_g</math>)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|----------------------------------------------|
| 32           | 110,3781836          | -7,526802716        | 3,3099                                       |
| 33           | 110,3781836          | -7,535708375        | 3,18082                                      |
| 34           | 110,3781836          | -7,544613852        | 3,6642                                       |
| 35           | 110,3781836          | -7,553519145        | 3,11284                                      |
| 36           | 110,3781836          | -7,562424255        | 2,1484                                       |
| 37           | 110,3871667          | -7,517896873        | 2,90675                                      |
| 38           | 110,3871667          | -7,526802716        | 4,27928                                      |
| 39           | 110,3871667          | -7,535708375        | 2,83305                                      |
| 40           | 110,3961499          | -7,517896873        | 3,57172                                      |
| 41           | 110,3961499          | -7,526802716        | 5,37283                                      |
| 42           | 110,405133           | -7,526802716        | 2,47606                                      |

Berdasarkan hasil faktor amplifikasi tanah yang telah diperoleh, wilayah di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang dapat dikelompokkan ke dalam beberapa klasifikasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.3. Klasifikasi ini digunakan untuk mengidentifikasi variasi tingkat amplifikasi tanah pada setiap lokasi, yang mencerminkan perbedaan respon lapisan sedimen terhadap gelombang seismik. Variasi tersebut memperlihatkan adanya zonasi tertentu yang menggambarkan tingkat kerentanan berbeda di setiap area. Selanjutnya, disusun peta distribusi faktor amplifikasi yang menampilkan persebaran nilai di seluruh wilayah Kecamatan Dukun. Peta ini memberikan gambaran visual mengenai pola sebaran faktor amplifikasi tanah, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.9 sehingga hasilnya dapat membantu menjelaskan area yang relatif lebih rentan terhadap pengaruh seismik dibandingkan dengan wilayah lain di sekitarnya.



**Gambar 5.9 Peta Persebaran Nilai Faktor Amplifikasi ( $A_g$ ) di Kecamatan Dukun**

Berdasarkan klasifikasi nilai faktor amplifikasi yang ditunjukkan pada Gambar 5.9 dan Tabel 5.4. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa wilayah studi memiliki variasi persebaran nilai faktor amplifikasi yang dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori. Daerah yang masuk kategori rendah dengan nilai  $A_g < 3$  meliputi Desa Ngadipuro (titik 4 dan titik 8), Desa Banyudono (titik 9 dan titik 6), Desa Sumber (titik 23 dan titik 29), Desa Banyubiru (titik 7 dan titik 1), Desa Ketunggeng (titik 5 dan titik 2), Desa Kalibening (titik 24, titik 19, titik 25, dan titik 20), Desa Sengi (titik 16 dan titik 37), Desa Ngargomulyo (titik 36 dan titik 30), Desa Dukun (titik 13 dan titik 14), Desa Krinjing (titik 42 dan titik 39), Desa Mangunsoko (titik 17 dan titik 22), Desa Wates (titik 11 dan titik 15).

Daerah yang tergolong kategori sedang dengan rentang  $3 < A_g < 6$  tersebar di Desa Ngargomulyo (titik 31 dan titik 35), Desa Dukun (titik 10), Desa Paten (titik 33, titik 40, dan titik 27), Desa Sengi (titik 26, titik 21, dan titik 32), Desa Mangunsoko (titik 28 dan titik 12), Desa Sumber (titik 18), Desa Krinjing (titik 34,

titik 38, dan titik 41). Di wilayah Kecamatan Dukun tidak ditemukan adanya kategori dengan nilai faktor amplifikasi tinggi maupun sangat tinggi.

## 5.6 Analisis Indeks Kerentanan Seismik ( $Kg$ )

Indeks kerentanan seismik merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menggambarkan tingkat potensi suatu wilayah mengalami kerusakan akibat guncangan gempa bumi. Menurut Nakamura (1997), penilaian  $Kg$  dapat digunakan sebagai salah satu metode untuk memperkirakan besarnya risiko yang mungkin muncul di suatu daerah ketika terjadi gempa bumi, di mana setiap wilayah memiliki nilai  $Kg$  yang berbeda-beda. Nilai tersebut menggambarkan tingkat potensi kerusakan yang bisa dialami oleh suatu kawasan atau bangunan akibat gempa. Selain itu,  $Kg$  memiliki keterkaitan erat dengan kondisi geologi bawah permukaan. Indeks kerentanan seismik ini juga menunjukkan hubungan linier dengan tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa. Semakin tinggi nilai indeks, semakin besar pula potensi kerusakan yang mungkin terjadi, sedangkan nilai indeks yang rendah mencerminkan risiko kerusakan yang relatif kecil (Yuniarto dkk., 2023). Perhitungan indeks kerentanan seismik dilakukan dengan memanfaatkan nilai frekuensi dominan yang tercantum pada Tabel 5.3 serta faktor amplifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 5.4. Selanjutnya, penentuan nilai indeks kerentanan seismik dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.7 pada titik 35 sebagai berikut.

$$Kg = \frac{Ag^2}{fg}$$

$$Kg = \frac{3,11284^2}{6,89782}$$

$$Kg = 1,40476$$

Hasil perhitungan dengan persamaan tersebut menghasilkan nilai indeks kerentanan seismik pada seluruh titik penelitian. Di Kecamatan Dukun, nilai indeks kerentanan seismik diperoleh dalam rentang 0,38495 hingga 12,9081. Rekapitulasi hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

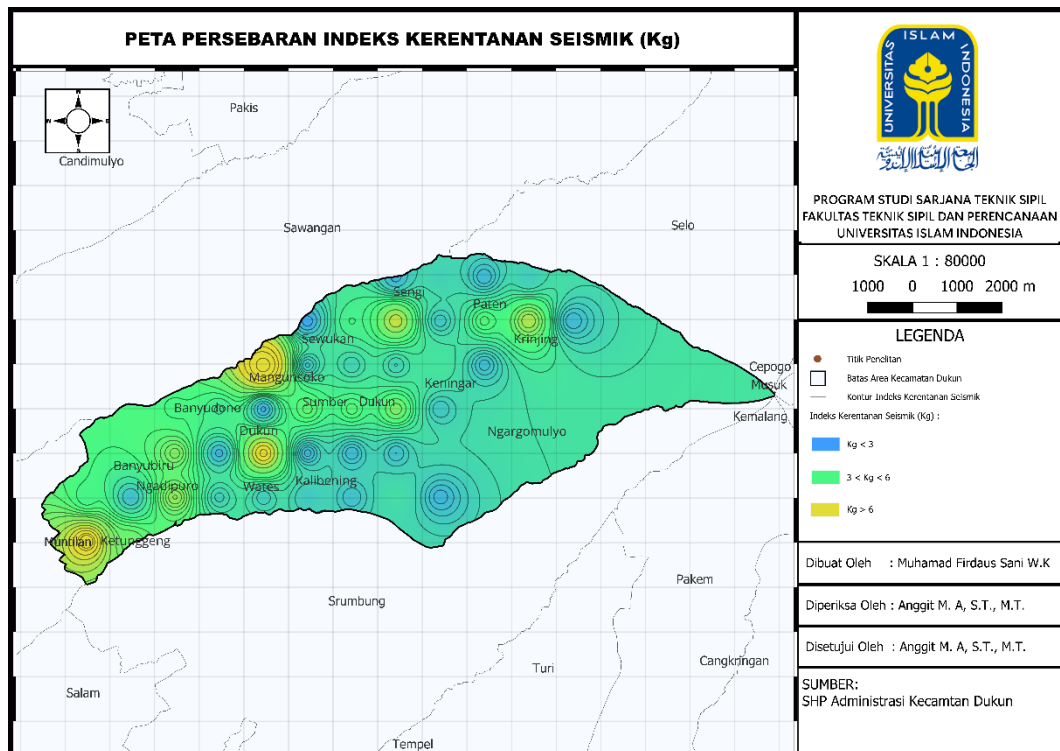
**Tabel 5.5 Rekapitulasi Indeks Kerentanan Seismik (*K<sub>g</sub>*) di Kecamatan  
Dukun**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b>Indeks Kerentanan Seismik (<i>K<sub>g</sub></i>)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------------------------------------------|
| 1            | 110,3063184          | -7,562424255        | 2,85988                                                 |
| 2            | 110,3063184          | -7,571329181        | 6,89575                                                 |
| 3            | 110,3153015          | -7,562424255        | Outlier                                                 |
| 4            | 110,3153015          | -7,571329181        | 1,18946                                                 |
| 5            | 110,3242847          | -7,544613852        | 3,75707                                                 |
| 6            | 110,3242847          | -7,553519145        | 2,96544                                                 |
| 7            | 110,3242847          | -7,562424255        | 4,10512                                                 |
| 8            | 110,3332678          | -7,544613852        | 4,42517                                                 |
| 9            | 110,3332678          | -7,553519145        | 2,56228                                                 |
| 10           | 110,3332678          | -7,562424255        | 0,86904                                                 |
| 11           | 110,342251           | -7,535708375        | 1,72157                                                 |
| 12           | 110,342251           | -7,544613852        | 12,9081                                                 |
| 13           | 110,342251           | -7,553519145        | 0,71441                                                 |
| 14           | 110,342251           | -7,562424255        | 7,0912                                                  |
| 15           | 110,3512341          | -7,526802716        | 1,63659                                                 |
| 16           | 110,3512341          | -7,535708375        | 0,38495                                                 |
| 17           | 110,3512341          | -7,544613852        | 1,35763                                                 |
| 18           | 110,3512341          | -7,553519145        | 3,4862                                                  |
| 19           | 110,3512341          | -7,562424255        | 0,90306                                                 |
| 20           | 110,3602173          | -7,526802716        | 1,44836                                                 |
| 21           | 110,3602173          | -7,535708375        | 2,81118                                                 |
| 22           | 110,3602173          | -7,544613852        | 1,80178                                                 |
| 23           | 110,3602173          | -7,553519145        | 3,31661                                                 |
| 24           | 110,3602173          | -7,562424255        | 1,00934                                                 |
| 25           | 110,3692004          | -7,517896873        | 1,2015                                                  |
| 26           | 110,3692004          | -7,526802716        | 0,86366                                                 |

**Lanjutan Tabel 5.5 Rekapitulasi Indeks Kerentanan Seismik (*Kg*) di  
Kecamatan Dukun**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b>Indeks Kerentanan<br/>Seismik (<i>Kg</i>)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------------------|
| 27           | 110,3692004          | -7,535708375        | 5,51876                                          |
| 28           | 110,3692004          | -7,544613852        | 1,79254                                          |
| 29           | 110,3692004          | -7,553519145        | 4,04793                                          |
| 30           | 110,3692004          | -7,562424255        | 1,19903                                          |
| 31           | 110,3781836          | -7,517896873        | 2,14023                                          |
| 32           | 110,3781836          | -7,526802716        | 1,72049                                          |
| 33           | 110,3781836          | -7,535708375        | 1,45639                                          |
| 34           | 110,3781836          | -7,544613852        | 2,3648                                           |
| 35           | 110,3781836          | -7,553519145        | 1,40476                                          |
| 36           | 110,3781836          | -7,562424255        | 0,87974                                          |
| 37           | 110,3871667          | -7,517896873        | 1,00416                                          |
| 38           | 110,3871667          | -7,526802716        | 3,28112                                          |
| 39           | 110,3871667          | -7,535708375        | 1,07859                                          |
| 40           | 110,3961499          | -7,517896873        | 1,6152                                           |
| 41           | 110,3961499          | -7,526802716        | 4,98801                                          |
| 42           | 110,405133           | -7,526802716        | 1,02637                                          |

Hasil perhitungan indeks kerentanan seismik menunjukkan bahwa wilayah di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori indeks kerentanan seismik sebagaimana tercantum pada Tabel 3.4. Klasifikasi tersebut menggambarkan variasi tingkat kerentanan di setiap titik pengukuran dan memberikan indikasi area yang berpotensi mengalami kerusakan lebih besar apabila terjadi gempa bumi. Visualisasi distribusi indeks kerentanan ini dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.



**Gambar 5.10 Peta Persebaran Indeks Kerentanan Seismik ( $Kg$ ) di Kecamatan Dukun**

Berdasarkan indeks kerentanan seismik yang ditunjukkan pada Tabel 5.5 dan Gambar 5.10. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa wilayah Kecamatan Dukun memiliki variasi persebaran indeks kerentanan seismik yang dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori. Daerah yang masuk kategori rendah dengan nilai  $Kg < 3$  meliputi Desa Sengi (titik 16, titik 26, titik 37, titik 32, dan titik 21), Desa Dukun (titik 13 dan titik 10), Desa Ngargomulyo (titik 36, titik 30, titik 35, dan titik 31). Desa Kalibening (titik 19, titik 24, titik 25, dan titik 20), Desa Kringing (titik 42, titik 39, dan titik 34), Desa Ngadipuro (titik 4), Desa Mangunsoko (titik 17, titik 28, dan titik 22), Desa Paten (titik 33 dan titik 40), Desa Wates (titik 15 dan titik 11), Desa Banyudono (titik 9 dan titik 6), dan Desa Banyubiru (titik 1).

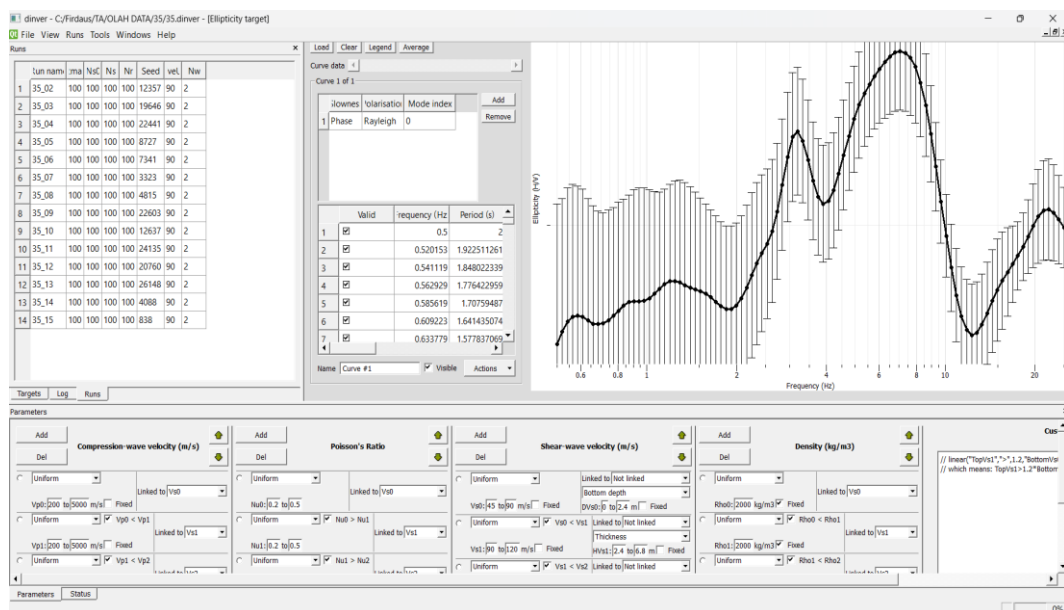
Daerah yang tergolong kategori sedang dengan rentang  $3 < Kg < 6$  tersebar di Desa Kringing (titik 38 dan titik 41), Desa Sumber (titik 23, titik 18, dan titik 29), Desa Ketunggeng (titik 5), Desa Banyubiru (titik 7), Desa Ngadipuro (titik 8), dan Desa Paten (titik 27). Selain itu, terdapat juga persebaran kategori tinggi dengan

nilai  $Kg > 6$  yang mencakup Desa Ketunggeng (titik 2), Desa Dukun (titik 14), dan Desa Mangunsoko (titik 12).

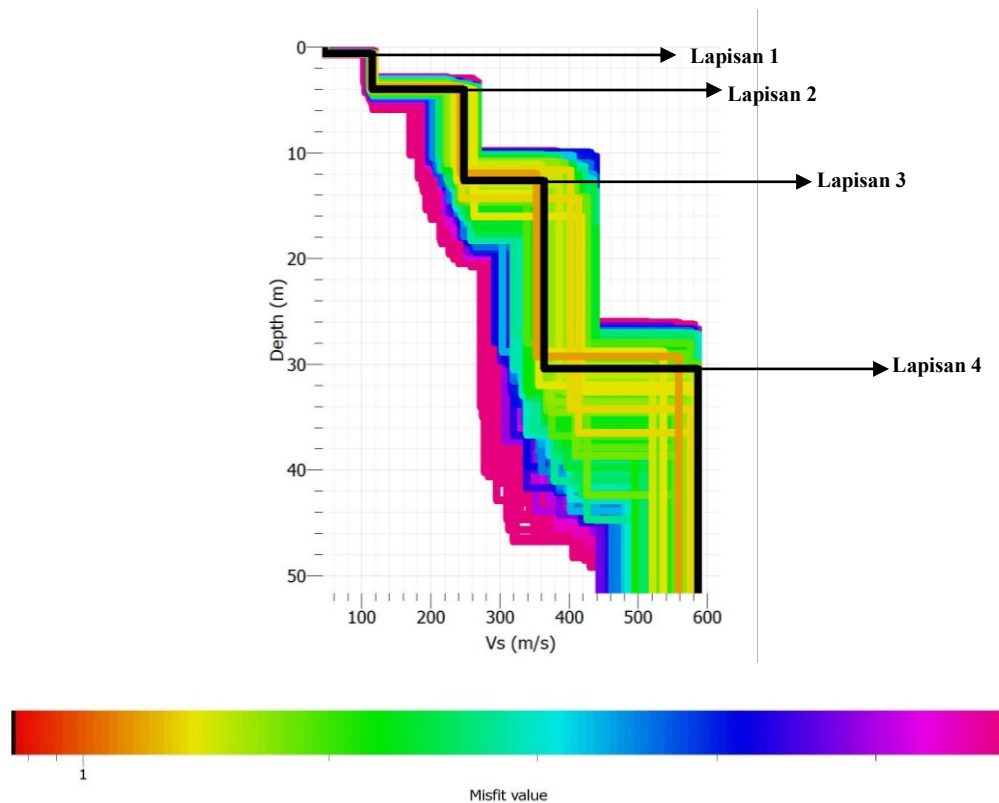
### 5.7 Analisis Inversi Kurva HVSr

Estimasi kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) umumnya dilakukan melalui pengeboran langsung di lapangan. Metode ini akurat namun memerlukan waktu dan biaya yang besar, terutama jika pengukuran dilakukan pada banyak titik. Sebagai alternatif, nilai  $V_s$  dapat diperoleh dari pengukuran mikrotremor yang dianalisis menggunakan metode *ellipticity curve*. Metode ini merupakan teknik inversi untuk mengetahui struktur lapisan bawah permukaan tanah.

Dalam penelitian ini, inversi kurva HVSr diolah dengan perangkat lunak Dinver yang merupakan bagian dari paket Geopsy. Prosesnya memerlukan beberapa parameter masukan seperti kecepatan gelombang P ( $V_p$ ), kecepatan gelombang S ( $V_s$ ), massa jenis material, dan rasio Poisson. Parameter ini dapat berbeda di setiap lokasi sesuai kondisi geologi. Pada penelitian ini nilainya disesuaikan dengan data borlog di sekitar Kecamatan Dukun. Tampilan proses inversi pada perangkat lunak Dinver disajikan pada Gambar 5.11 dan Contoh hasil inversi kurva HVSr untuk titik 35 dapat dilihat pada Gambar 5.12.



**Gambar 5.11 Tampilan Proses Inversi HVSr Pada Perangkat Lunak Dinver**



**Gambar 5.12 Grafik Hasil Inversi HVSR Pada Titik 35**

Berdasarkan Gambar 5.12 terlihat garis-garis berwarna hasil inversi kurva HVSR yang menunjukkan berbagai model kurva dengan nilai misfit berbeda. Semakin kecil nilai misfit, semakin baik kesesuaian model dengan kondisi lapangan. Garis berwarna hitam digunakan sebagai model referensi karena memiliki nilai *misfit* paling kecil.

Hasil inversi pada titik 35 menunjukkan profil Vs yang mencapai kedalaman lebih dari 50 meter. Namun, untuk perhitungan  $V_{s30}$  hanya digunakan kedalaman hingga 30 meter sesuai definisinya, yaitu kecepatan gelombang geser rata-rata sampai kedalaman 30 meter dari permukaan. Data di bawah kedalaman tersebut tidak diikutsertakan, dan lapisan terakhir yang memotong kedalaman 30 meter dipotong ketebalannya agar perhitungan sesuai standar klasifikasi tanah pada kajian geoteknik dan seismik. Ketebalan lapisan sedimen dihitung dari selisih elevasi antara lapisan di atas dan lapisan di bawahnya. Hasil perhitungan tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.6.

**Tabel 5.6 Hasil Inversi HVSr Pada Titik 35**

| Lapisan   | Tebal Lapisan (m) | Vs (m/s) |
|-----------|-------------------|----------|
| Lapisan 1 | 0,61              | 45,55    |
| Lapisan 2 | 2,27              | 115,39   |
| Lapisan 3 | 9,22              | 247,99   |
| Lapisan 4 | 17,39             | 364,02   |

Selanjutnya, nilai  $V_{s30}$  pada titik 35 dihitung menggunakan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) setiap lapisan dengan menerapkan Persamaan 3.4 berikut.

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n di}{\sum_{i=1}^n \frac{di}{V_{si}}}$$

$$V_{s30} = \frac{30}{\frac{0,61}{45,55} + \frac{2,27}{115,39} + \frac{9,22}{247,99} + \frac{17,39}{364,02}}$$

$$V_{s30} = 245,03 \text{ m/s}$$

Perhitungan nilai  $V_{s30}$  dilakukan pada seluruh titik pengukuran dengan pengecualian titik 3 karena teridentifikasi sebagai *outlier*. Dari hasil tersebut diperoleh kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ) di wilayah penelitian yang berkisar antara 177,47 m/s hingga 278,91 m/s. Rekapitulasi hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 5.7.

**Tabel 5.7 Rekapitulasi Nilai  $V_{s30}$  di Kecamatan Dukun**

| Titik | X (Longitude) | Y (Latitude) | $V_{s30}$ (m/s) |
|-------|---------------|--------------|-----------------|
| 1     | 110,3063184   | -7,562424255 | 207,44          |
| 2     | 110,3063184   | -7,571329181 | 219,63          |
| 3     | 110,3153015   | -7,562424255 | Outlier         |
| 4     | 110,3153015   | -7,571329181 | 225,81          |
| 5     | 110,3242847   | -7,544613852 | 239,92          |
| 6     | 110,3242847   | -7,553519145 | 221,90          |

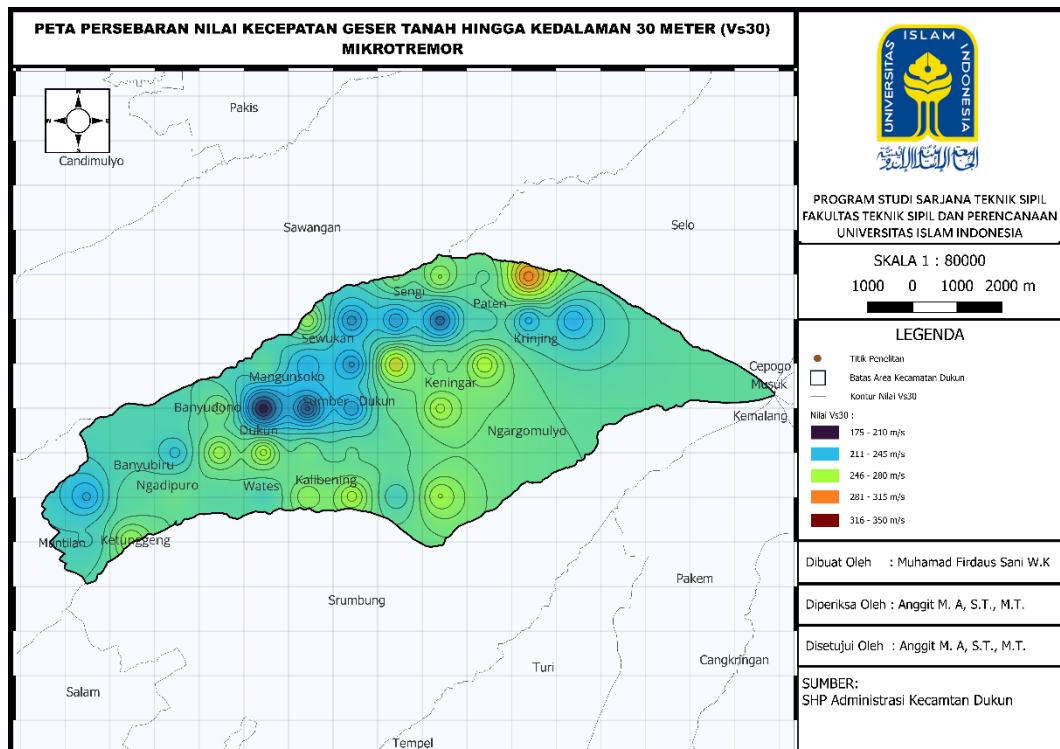
**Lanjutan Tabel 5.7 Rekapitulasi Nilai  $V_{s30}$  di Kecamatan Dukun**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b><math>V_{s30}</math> (m/s)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 7            | 110,3242847          | -7,562424255        | 215,00                            |
| 8            | 110,3332678          | -7,544613852        | 229,69                            |
| 9            | 110,3332678          | -7,553519145        | 233,23                            |
| 10           | 110,3332678          | -7,562424255        | 242,29                            |
| 11           | 110,342251           | -7,535708375        | 225,11                            |
| 12           | 110,342251           | -7,544613852        | 226,69                            |
| 13           | 110,342251           | -7,553519145        | 177,47                            |
| 14           | 110,342251           | -7,562424255        | 245,07                            |
| 15           | 110,3512341          | -7,526802716        | 221,70                            |
| 16           | 110,3512341          | -7,535708375        | 238,50                            |
| 17           | 110,3512341          | -7,544613852        | 208,89                            |
| 18           | 110,3512341          | -7,553519145        | 191,45                            |
| 19           | 110,3512341          | -7,562424255        | 231,95                            |
| 20           | 110,3602173          | -7,526802716        | 239,69                            |
| 21           | 110,3602173          | -7,535708375        | 202,64                            |
| 22           | 110,3602173          | -7,544613852        | 203,46                            |
| 23           | 110,3602173          | -7,553519145        | 204,49                            |
| 24           | 110,3602173          | -7,562424255        | 228,50                            |
| 25           | 110,3692004          | -7,517896873        | 245,47                            |
| 26           | 110,3692004          | -7,526802716        | 232,46                            |
| 27           | 110,3692004          | -7,535708375        | 204,66                            |
| 28           | 110,3692004          | -7,544613852        | 259,15                            |
| 29           | 110,3692004          | -7,553519145        | 229,42                            |
| 30           | 110,3692004          | -7,562424255        | 227,30                            |
| 31           | 110,3781836          | -7,517896873        | 220,41                            |
| 32           | 110,3781836          | -7,526802716        | 240,16                            |
| 33           | 110,3781836          | -7,535708375        | 193,45                            |
| 34           | 110,3781836          | -7,544613852        | 232,61                            |

Lanjutan Tabel 5.7 Rekapitulasi Nilai  $V_{s30}$  di Kecamatan Dukun

| Titik | X (Longitude) | Y (Latitude) | $V_{s30}$ (m/s) |
|-------|---------------|--------------|-----------------|
| 35    | 110,3781836   | -7,553519145 | 245,03          |
| 36    | 110,3781836   | -7,562424255 | 244,16          |
| 37    | 110,3871667   | -7,517896873 | 227,47          |
| 38    | 110,3871667   | -7,526802716 | 221,74          |
| 39    | 110,3871667   | -7,535708375 | 247,35          |
| 40    | 110,3961499   | -7,517896873 | 278,91          |
| 41    | 110,3961499   | -7,526802716 | 211,34          |
| 42    | 110,405133    | -7,526802716 | 209,15          |

Dilakukan pemetaan nilai kecepatan gelombang geser tanah hingga kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ) yang diperoleh dari hasil pengolahan kurva HVSR menggunakan perangkat lunak *Dinver* yang ditunjukkan pada Gambar 5.13.



**Gambar 5.13 Peta Persebaran Kecepatan Geser Tanah Hingga Kedalaman 30 Meter ( $V_{s30}$ ) di Kecamatan Dukun**

Berdasarkan klasifikasi Tabel 3.5 seluruh wilayah Kecamatan Dukun tergolong dalam tipe batuan D dengan rentang  $175 < V_s < 350$  yang menandakan bahwa kondisi tanah di daerah ini didominasi oleh tanah sedang. Hal tersebut menunjukkan bahwa karakteristik lapisan tanah memiliki tingkat kekakuan serta kemampuan perambatan gelombang seismik yang relatif sebanding di sebagian besar titik pengukuran, meskipun masih terdapat variasi nilai  $V_{s30}$  pada tiap titik pengukuran yang berpotensi memengaruhi kerentanan lokal. Nilai kecepatan gelombang geser tanah terendah berada pada titik 13 di Desa Dukun dengan nilai 177,47 m/s, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada titik 40 di Desa Paten dengan nilai 278,91 m/s.

### 5.8 Analisis Nilai Ketebalan Lapisan Sedimen ( $h$ )

Pemahaman terhadap ketebalan lapisan sedimen sangat penting dalam kajian kegempaan, karena parameter ini dapat memengaruhi besar kecilnya kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa bumi. Ketebalan sedimen diketahui memiliki hubungan berbanding terbalik dengan frekuensi dominan ( $fg$ ), di mana semakin kecil nilai frekuensi dominan maka lapisan sedimen yang menutupi batuan dasar semakin tebal dan sebaliknya. Selain itu, variasi ketebalan sedimen juga dapat memengaruhi karakteristik kurva HVSR meskipun pengaruhnya relatif kecil. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Prabowo dkk. (2021) yang membuktikan bahwa metode HVSR mampu mengestimasi ketebalan sedimen secara efektif melalui analisis nilai frekuensi dominan dan kecepatan gelombang geser. Penelitian lain oleh Sandra et al. (2024) juga menunjukkan bahwa distribusi ketebalan sedimen memiliki keterkaitan erat dengan indeks kerentanan seismik, sehingga menjadikan HVSR sebagai metode penting dalam mitigasi bencana gempa.

Dalam penelitian ini, perhitungan ketebalan lapisan sedimen dilakukan dengan menggunakan nilai frekuensi dominan ( $fg$ ) yang ditampilkan pada Tabel 5.3 serta nilai kecepatan gelombang geser ( $V_{s30}$ ) pada Tabel 5.6. Estimasi ketebalan lapisan sedimen kemudian dihitung dengan Persamaan 3.9 pada setiap titik pengukuran, dengan titik 35 dijadikan sebagai contoh perhitungan.

$$h = \frac{V_{s30}}{4fg}$$

$$h = \frac{245.03}{4(6,8978)}$$

$$h = 8,88 \text{ m}$$

Perhitungan ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ) dilakukan pada seluruh titik pengukuran dengan ketebalan lapisan sedimen yang diperoleh berkisar antara 4,96 meter hingga 65,65 meter. Rekapitulasi hasil perhitungan ketebalan lapisan sedimen dapat dilihat pada tabel 5.8.

**Tabel 5.8 Rekapitulasi Nilai Ketebalan Lapisan Sedimen ( $h$ ) di Kecamatan Dukun**

| Titik | X (Longitude) | Y (Latitude) | Ketebalan Lapisan Sedimen ( $h$ ) |
|-------|---------------|--------------|-----------------------------------|
| 1     | 110,3063184   | -7,562424255 | 37,71                             |
| 2     | 110,3063184   | -7,571329181 | 53,90                             |
| 3     | 110,3153015   | -7,562424255 | Outlier                           |
| 4     | 110,3153015   | -7,571329181 | 47,46                             |
| 5     | 110,3242847   | -7,544613852 | 57,42                             |
| 6     | 110,3242847   | -7,553519145 | 43,84                             |
| 7     | 110,3242847   | -7,562424255 | 59,53                             |
| 8     | 110,3332678   | -7,544613852 | 64,31                             |
| 9     | 110,3332678   | -7,553519145 | 56,92                             |
| 10    | 110,3332678   | -7,562424255 | 5,41                              |
| 11    | 110,342251    | -7,535708375 | 12,34                             |
| 12    | 110,342251    | -7,544613852 | 44,13                             |
| 13    | 110,342251    | -7,553519145 | 5,77                              |
| 14    | 110,342251    | -7,562424255 | 49,35                             |
| 15    | 110,3512341   | -7,526802716 | 11,05                             |

**Lanjutan Tabel 5.8 Rekapitulasi Nilai Ketebalan Lapisan Sedimen (*h*) di  
Kecamatan Dukun**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b>Ketebalan<br/>Lapisan Sedimen<br/>(<i>h</i>)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|
| 16           | 110,3512341          | -7,535708375        | 5,11                                                |
| 17           | 110,3512341          | -7,544613852        | 10,63                                               |
| 18           | 110,3512341          | -7,553519145        | 12,97                                               |
| 19           | 110,3512341          | -7,562424255        | 11,85                                               |
| 20           | 110,3602173          | -7,526802716        | 12,22                                               |
| 21           | 110,3602173          | -7,535708375        | 13,95                                               |
| 22           | 110,3602173          | -7,544613852        | 10,81                                               |
| 23           | 110,3602173          | -7,553519145        | 56,73                                               |
| 24           | 110,3602173          | -7,562424255        | 13,68                                               |
| 25           | 110,3692004          | -7,517896873        | 11,55                                               |
| 26           | 110,3692004          | -7,526802716        | 4,96                                                |
| 27           | 110,3692004          | -7,535708375        | 9,17                                                |
| 28           | 110,3692004          | -7,544613852        | 10,40                                               |
| 29           | 110,3692004          | -7,553519145        | 65,65                                               |
| 30           | 110,3692004          | -7,562424255        | 11,20                                               |
| 31           | 110,3781836          | -7,517896873        | 12,75                                               |
| 32           | 110,3781836          | -7,526802716        | 9,43                                                |
| 33           | 110,3781836          | -7,535708375        | 6,96                                                |
| 34           | 110,3781836          | -7,544613852        | 10,24                                               |
| 35           | 110,3781836          | -7,553519145        | 8,88                                                |
| 36           | 110,3781836          | -7,562424255        | 11,63                                               |
| 37           | 110,3871667          | -7,517896873        | 6,76                                                |
| 38           | 110,3871667          | -7,526802716        | 9,93                                                |
| 39           | 110,3871667          | -7,535708375        | 8,31                                                |
| 40           | 110,3961499          | -7,517896873        | 8,83                                                |

**Lanjutan Tabel 5.8 Rekapitulasi Nilai Ketebalan Lapisan Sedimen ( $h$ ) di  
Kecamatan Dukun**

| Titik | X (Longitude) | Y (Latitude) | Ketebalan<br>Lapisan Sedimen<br>( $h$ ) |
|-------|---------------|--------------|-----------------------------------------|
| 41    | 110,3961499   | -7,526802716 | 9,13                                    |
| 42    | 110,405133    | -7,526802716 | 8,75                                    |

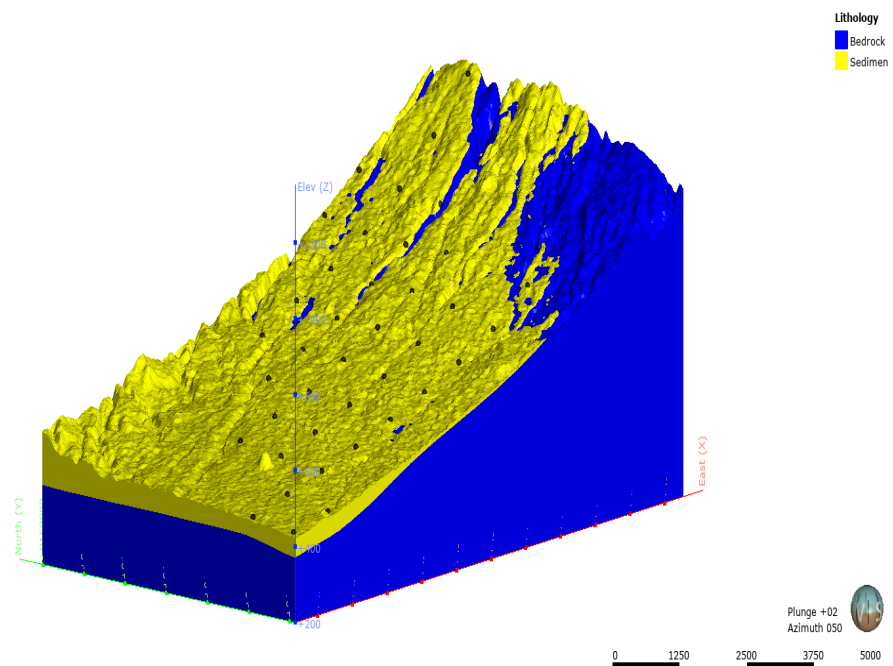
Berdasarkan hasil perhitungan nilai ketebalan sedimen pada Tabel 5.6 kemudian diklasifikasikan sebagaimana pada Tabel 3.2 pada wilayah penelitian. Hanya ada satu wilayah yang termasuk dalam kategori Tipe IV dan Jenis I dengan nilai  $h < 5$  m yaitu pada titik 26 yang terletak di Desa Sengi. Untuk kategori Tipe III dan Jenis II dengan rentang  $5 \text{ m} < h < 10 \text{ m}$ , wilayah yang termasuk di dalamnya adalah Desa Sengi (titik 16, titik 37, dan titik 32), Desa Dukun (titik 10 dan titik 13), Desa Paten (titik 33, titik 40, dan titik 27), Desa Krinjing (titik 39, titik 42, titik 41, dan titik 38), dan Desa Ngargomulyo (titik 35).

Wilayah yang tergolong Tipe II dan Jenis III dengan rentang  $10 \text{ m} < h < 30 \text{ m}$  tersebar di Desa Krinjing (titik 34), Desa Mangunsoko (titik 28, titik 17, dan titik 22), Desa Wates (titik 15 dan titik 11), Desa Ngargomulyo (titik 30, titik 36, dan titik 31), Desa Kalibening (titik 25, titik 19, titik 20, dan titik 24), Desa Sumber (titik 18), dan Desa Sengi (titik 21). Terdapat juga persebaran Tipe I Jenis IV dengan nilai  $h > 30 \text{ m}$  yang mencakup Desa Banyubiru (titik 1 dan titik 7), Desa Bayudono (titik 6 dan titik 9), Desa Mangunsoko (titik 12), Desa Ngadipuro (titik 4 dan titik 8), Desa Dukun (titik 14), Desa Ketunggeng (titik 2 dan titik 5), Desa Sumber (titik 23 dan titik 29).

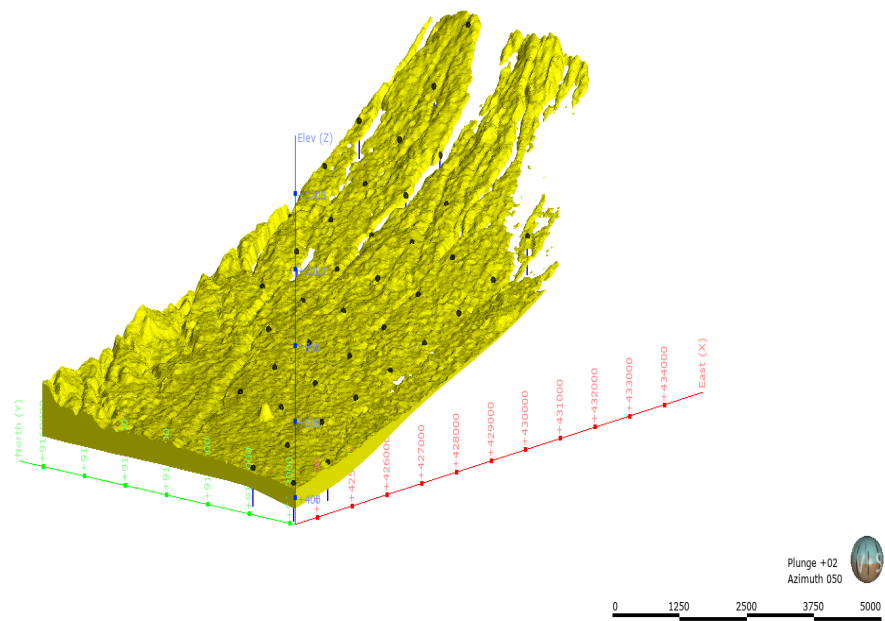
Setelah analisis data selesai dilakukan, kemudian dilakukan pemodelan 3D lapisan sedimen dan *bedrock* menggunakan *software* Leapfrog untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan pada wilayah penelitian. Model tiga dimensi ini memperlihatkan sebaran ketebalan lapisan sedimen serta posisi lapisan *bedrock* di bawahnya, berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan yang telah dilaksanakan. Informasi dari model ini dapat menjadi acuan dalam mengidentifikasi

area yang memiliki potensi lebih rentan terhadap guncangan gempa bumi. Pemodelan lapisan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua kategori yaitu lapisan lunak (sedimen) dan lapisan keras (*bedrock*) yang berada di bawahnya. Visualisasi pemodelan 3D lapisan sedimen dan *bedrock* dapat dilihat pada Gambar 5.14 hingga Gambar 5.17.

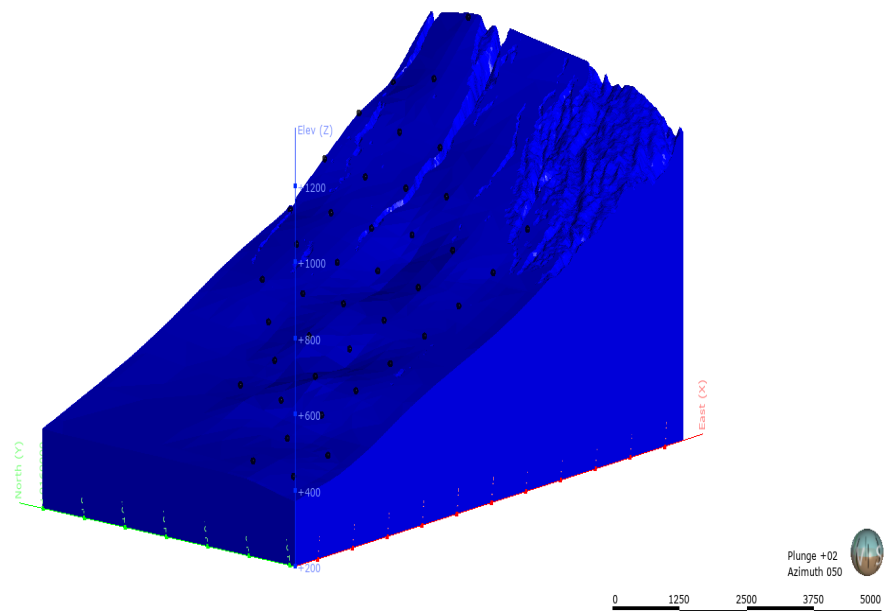
Terdapat hubungan antara ketebalan lapisan sedimen dan nilai frekuensi dominan. Semakin tebal lapisan sedimen, maka frekuensi dominan cenderung semakin rendah. Hal ini terjadi karena gelombang seismik yang merambat pada lapisan sedimen yang lebih tebal akan mengalami perlambatan dan pengebakan energi, sehingga menghasilkan frekuensi dominan yang lebih kecil. Dengan demikian, wilayah dengan ketebalan sedimen yang tinggi berpotensi memiliki karakteristik getaran dengan frekuensi rendah. Kondisi ini penting untuk diperhatikan karena frekuensi rendah dapat beresonansi dengan struktur bangunan bertingkat. Oleh sebab itu, informasi mengenai hubungan ketebalan sedimen dan frekuensi dominan dapat membantu dalam perencanaan mitigasi risiko gempa bumi di daerah penelitian.



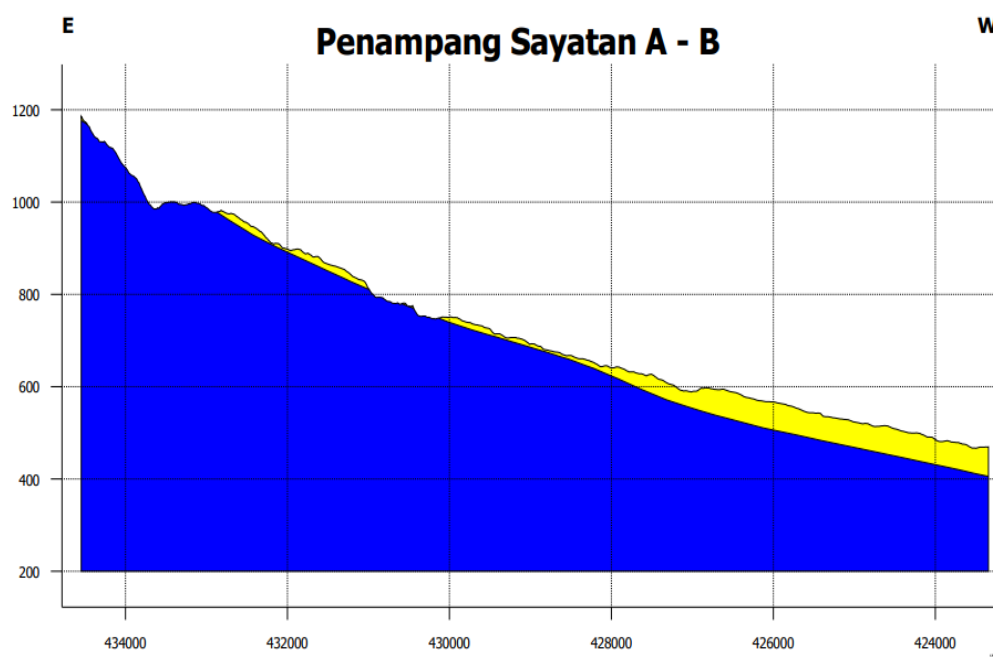
**Gambar 5.14 Model 3D Lapisan Sedimen dan *Bedrock* di Kecamatan Dukun**



**Gambar 5.15 Model 3D Lapisan Sedimen di Kecamatan Dukun**



**Gambar 5.16 Model 3D Lapisan *Bedrock* di Kecamatan Dukun**



**Gambar 5.17 Penampang Lapisan Sedimen dan *Bedrock* di Kecamatan Dukun**

Berdasarkan hasil pemodelan 3D dapat dilihat bahwa pada wilayah penelitian lapisan sedimen di bagian barat memiliki ketebalan yang relatif besar. Sementara itu, ke arah timur ketebalan sedimen semakin berkurang seiring dengan kenaikan elevasi permukaan. Pola ini menunjukkan adanya pengaruh kondisi topografi terhadap distribusi sedimen, di mana daerah dengan elevasi rendah cenderung menjadi lokasi akumulasi material sedimen, sedangkan pada daerah dengan elevasi yang lebih tinggi ketebalan sedimen menipis karena lapisan batuan dasar berada lebih dekat ke permukaan. Temuan ini memperlihatkan keterkaitan antara morfologi permukaan dan variasi ketebalan sedimen di Kecamatan Dukun.

### **5.9 Perbandingan Hasil Inversi HVSR $V_{s30}$ Mikrotremor dan $V_{s30}$ *United States Geological Survey* (USGS)**

Analisis perbandingan antara hasil inversi HVSR berbasis mikrotremor dan data  $V_{s30}$  dari *United States Geological Survey* (USGS) dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian serta perbedaan kedua metode dalam menggambarkan

kondisi tanah di wilayah penelitian. Metode mikrotremor menghasilkan nilai  $V_{s30}$  yang merepresentasikan kondisi geologi secara lokal melalui pengukuran langsung di lapangan, sedangkan data USGS disusun berdasarkan pemodelan global yang menggunakan pendekatan *slope-based* atau *mosaic* dengan resolusi spasial tertentu. Perbandingan ini penting untuk mengetahui sejauh mana data global dapat menggambarkan karakteristik tanah vulkanik yang bersifat heterogen, sekaligus menilai reliabilitas hasil mikrotremor sebagai data detail yang lebih representatif. Dengan demikian, subbab ini menyajikan analisis komprehensif terkait perbedaan nilai  $V_{s30}$  dari kedua sumber data tersebut. Berikut merupakan rekapitulasi data dari  $V_{s30}$  mikrotremor dan  $V_{s30}$  USGS pada Tabel 5.9.

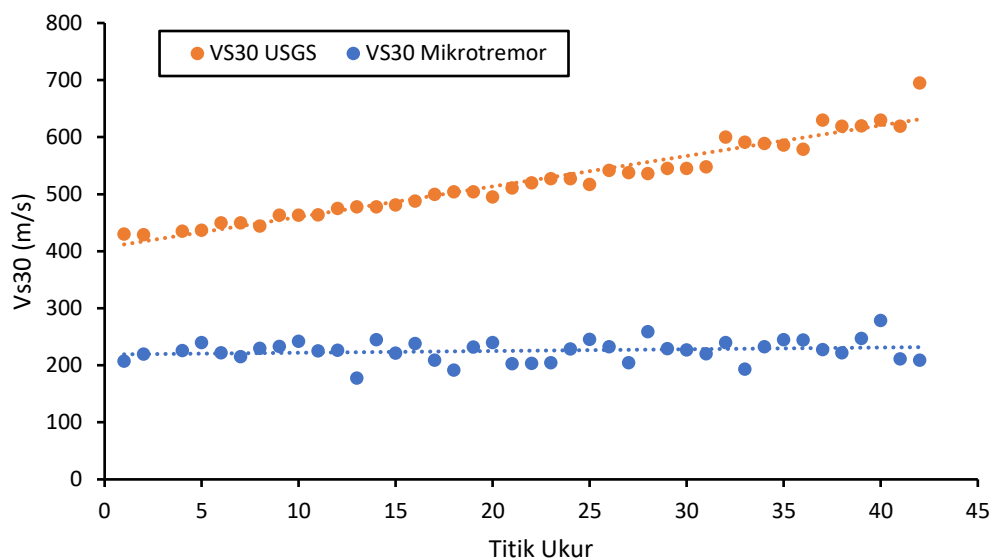
**Tabel 5.9 Rekapitulasi Nilai  $V_{s30}$  Mikrotremor dan  $V_{s30}$  USGS**

| Titik | X (Longitude) | Y (Latitude) | $V_{s30}$<br>Mikrotremor | $V_{s30}$ USGS |
|-------|---------------|--------------|--------------------------|----------------|
| 1     | 110,3063184   | -7,562424255 | 207,44                   | 430            |
| 2     | 110,3063184   | -7,571329181 | 219,63                   | 429            |
| 3     | 110,3153015   | -7,562424255 | Outlier                  | Outlier        |
| 4     | 110,3153015   | -7,571329181 | 225,81                   | 435            |
| 5     | 110,3242847   | -7,544613852 | 239,92                   | 437            |
| 6     | 110,3242847   | -7,553519145 | 221,90                   | 450            |
| 7     | 110,3242847   | -7,562424255 | 215,00                   | 450            |
| 8     | 110,3332678   | -7,544613852 | 229,69                   | 444            |
| 9     | 110,3332678   | -7,553519145 | 233,23                   | 463            |
| 10    | 110,3332678   | -7,562424255 | 242,29                   | 463            |
| 11    | 110,342251    | -7,535708375 | 225,11                   | 464            |
| 12    | 110,342251    | -7,544613852 | 226,69                   | 475            |
| 13    | 110,342251    | -7,553519145 | 177,47                   | 478            |
| 14    | 110,342251    | -7,562424255 | 245,07                   | 478            |
| 15    | 110,3512341   | -7,526802716 | 221,70                   | 481            |

**Lanjutan Tabel 5.9 Rekapitulasi Nilai  $V_{s30}$  Mikrotremor dan  $V_{s30}$  USGS**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b><math>V_{s30}</math><br/>Mikrotremor</b> | <b><math>V_{s30}</math> USGS</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------------------------------|----------------------------------|
| 16           | 110,3512341          | -7,535708375        | 238,50                                      | 488                              |
| 17           | 110,3512341          | -7,544613852        | 208,89                                      | 500                              |
| 18           | 110,3512341          | -7,553519145        | 191,45                                      | 504                              |
| 19           | 110,3512341          | -7,562424255        | 231,95                                      | 504                              |
| 20           | 110,3602173          | -7,526802716        | 239,69                                      | 495                              |
| 21           | 110,3602173          | -7,535708375        | 202,64                                      | 511                              |
| 22           | 110,3602173          | -7,544613852        | 203,46                                      | 520                              |
| 23           | 110,3602173          | -7,553519145        | 204,49                                      | 527                              |
| 24           | 110,3602173          | -7,562424255        | 228,50                                      | 527                              |
| 25           | 110,3692004          | -7,517896873        | 245,47                                      | 517                              |
| 26           | 110,3692004          | -7,526802716        | 232,46                                      | 542                              |
| 27           | 110,3692004          | -7,535708375        | 204,66                                      | 538                              |
| 28           | 110,3692004          | -7,544613852        | 259,15                                      | 536                              |
| 29           | 110,3692004          | -7,553519145        | 229,42                                      | 545                              |
| 30           | 110,3692004          | -7,562424255        | 227,30                                      | 545                              |
| 31           | 110,3781836          | -7,517896873        | 220,41                                      | 548                              |
| 32           | 110,3781836          | -7,526802716        | 240,16                                      | 600                              |
| 33           | 110,3781836          | -7,535708375        | 193,45                                      | 591                              |
| 34           | 110,3781836          | -7,544613852        | 232,61                                      | 589                              |
| 35           | 110,3781836          | -7,553519145        | 245,03                                      | 586                              |
| 36           | 110,3781836          | -7,562424255        | 244,16                                      | 586                              |
| 37           | 110,3871667          | -7,517896873        | 227,47                                      | 579                              |
| 38           | 110,3871667          | -7,526802716        | 221,74                                      | 630                              |
| 39           | 110,3871667          | -7,535708375        | 247,35                                      | 619                              |
| 40           | 110,3961499          | -7,517896873        | 278,91                                      | 620                              |
| 41           | 110,3961499          | -7,526802716        | 211,34                                      | 630                              |
| 42           | 110,405133           | -7,526802716        | 209,15                                      | 619                              |

Setelah data perbandingan nilai  $V_{s30}$  antara hasil pengolahan mikrotremor dan data USGS ditampilkan pada tabel sebelumnya, visualisasi hubungan keduanya dapat dilihat pada Gambar 5.18. Grafik ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pola perbedaan nilai  $V_{s30}$  di setiap titik pengukuran.



**Gambar 5.18 Grafik Perbandingan  $V_{s30}$  Mikrotremor dan  $V_{s30}$  USGS**

Berdasarkan grafik perbandingan antara nilai  $V_{s30}$  hasil pengolahan mikrotremor dengan  $V_{s30}$  dari USGS terlihat adanya perbedaan yang cukup signifikan. Nilai  $V_{s30}$  mikrotremor rata-rata hanya mencapai 225,63 m/s, sedangkan nilai  $V_{s30}$  USGS rata-rata berada pada 523,95 m/s. Perbedaan yang mencolok ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, terutama perbedaan metode pengambilan dan pengolahan data. Data mikrotremor diperoleh langsung dari hasil pengukuran lapangan yang sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal, ketebalan sedimen, serta heterogenitas lapisan bawah permukaan. Sementara itu, data  $V_{s30}$  USGS dihitung menggunakan pendekatan *topographic slope* pada skala regional, yang menghasilkan estimasi lebih general dan cenderung kurang merepresentasikan variasi detail pada skala lokal (Allen & Wald, 2007). Indonesia yang berada pada wilayah tektonik aktif belum dijadikan sampel dalam proses koreksi model  $V_{s30}$

USGS. Akibatnya, data tersebut kurang mewakili kondisi sebenarnya di Indonesia sehingga diperlukan koreksi atau bahkan pengembangan model yang lebih sesuai (Wibowo et al., 2025). Oleh karena itu, meskipun  $V_{s30}$  USGS sangat bermanfaat sebagai acuan awal pada skala regional, hasil pengukuran mikrotremor dinilai lebih mampu menggambarkan kondisi sesungguhnya pada lokasi penelitian. Dengan mengombinasikan keduanya, hasil analisis dapat menjadi lebih komprehensif dan mendukung pemetaan kerentanan seismik secara lebih akurat.

### 5.10 Rekapitulasi Hasil Analisis Penelitian

Rekapitulasi hasil analisis penelitian disusun untuk merangkum seluruh parameter yang diperoleh dari pengolahan data mikrotremor dengan metode HVSR, meliputi nilai frekuensi dominan ( $f_g$ ), faktor amplifikasi ( $A_g$ ), indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ), kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ), serta ketebalan sedimen ( $h$ ). Penyajian rekapitulasi ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi seismik di Kecamatan Dukun. Rekapitulasi hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 5.10.

**Tabel 5.10 Rekapitulasi Hasil Analisis Penelitian**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b><i>fg</i><br/>(Hz)</b> | <b><i>Ag</i></b> | <b><i>Kg</i></b> | <b><math>V_{s30}</math><br/>Mikrotrmor<br/>(m/s)</b> | <b><math>V_{s30}</math> USGS<br/>(m/s)</b> | <b><i>h</i><br/>(m)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| 1            | 110,3063184          | -7,562424255        | 1,3753                    | 1,98322          | 2,8599           | 207,44                                               | 430                                        | 37,71                   |
| 2            | 110,3063184          | -7,571329181        | 1,0187                    | 2,65039          | 6,8958           | 219,63                                               | 429                                        | 53,90                   |
| 3            | 110,3153015          | -7,562424255        | Outlier                   | Outlier          | Outlier          | Outlier                                              | Outlier                                    | Outlier                 |
| 4            | 110,3153015          | -7,571329181        | 1,1895                    | 1,18946          | 1,1895           | 225,81                                               | 435                                        | 47,46                   |
| 5            | 110,3242847          | -7,544613852        | 1,0446                    | 1,98108          | 3,7571           | 239,92                                               | 437                                        | 57,42                   |
| 6            | 110,3242847          | -7,553519145        | 1,2653                    | 1,93706          | 2,9654           | 221,90                                               | 450                                        | 43,84                   |
| 7            | 110,3242847          | -7,562424255        | 0,9029                    | 1,92519          | 4,1051           | 215,00                                               | 450                                        | 59,53                   |
| 8            | 110,3332678          | -7,544613852        | 0,8929                    | 1,98774          | 4,4252           | 229,69                                               | 444                                        | 64,31                   |
| 9            | 110,3332678          | -7,553519145        | 1,0244                    | 1,6201           | 2,5623           | 233,23                                               | 463                                        | 56,92                   |
| 10           | 110,3332678          | -7,562424255        | 11,2053                   | 3,12055          | 0,8690           | 242,29                                               | 463                                        | 5,41                    |
| 11           | 110,342251           | -7,535708375        | 4,5615                    | 2,80231          | 1,7216           | 225,11                                               | 464                                        | 12,34                   |
| 12           | 110,342251           | -7,544613852        | 1,2842                    | 4,07141          | 12,9081          | 226,69                                               | 475                                        | 44,13                   |
| 13           | 110,342251           | -7,553519145        | 7,6929                    | 2,34434          | 0,7144           | 177,47                                               | 478                                        | 5,77                    |
| 14           | 110,342251           | -7,562424255        | 1,2415                    | 2,96713          | 7,0912           | 245,07                                               | 478                                        | 49,35                   |

**Lanjutan Tabel 5.10 Rekapitulasi Hasil Analisis Penelitian**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b><i>fg</i><br/>(Hz)</b> | <b><i>Ag</i></b> | <b><i>Kg</i></b> | <b><math>V_{s30}</math><br/>Mikrotrmor<br/>(m/s)</b> | <b><math>V_{s30}</math> USGS<br/>(m/s)</b> | <b><i>h</i><br/>(m)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| 15           | 110,3512341          | -7,526802716        | 5,0137                    | 2,86451          | 1,6366           | 221,70                                               | 481                                        | 11,05                   |
| 16           | 110,3512341          | -7,535708375        | 11,6785                   | 2,12029          | 0,3849           | 238,50                                               | 488                                        | 5,11                    |
| 17           | 110,3512341          | -7,544613852        | 4,9148                    | 2,58311          | 1,3576           | 208,89                                               | 500                                        | 10,63                   |
| 18           | 110,3512341          | -7,553519145        | 3,6903                    | 3,58681          | 3,4862           | 191,45                                               | 504                                        | 12,97                   |
| 19           | 110,3512341          | -7,562424255        | 4,8928                    | 2,10201          | 0,9031           | 231,95                                               | 504                                        | 11,85                   |
| 20           | 110,3602173          | -7,526802716        | 4,9047                    | 2,6653           | 1,4484           | 239,69                                               | 495                                        | 12,22                   |
| 21           | 110,3602173          | -7,535708375        | 3,6315                    | 3,19514          | 2,8112           | 202,64                                               | 511                                        | 13,95                   |
| 22           | 110,3602173          | -7,544613852        | 4,7035                    | 2,91112          | 1,8018           | 203,46                                               | 520                                        | 10,81                   |
| 23           | 110,3602173          | -7,553519145        | 0,9012                    | 1,72886          | 3,3166           | 204,49                                               | 527                                        | 56,73                   |
| 24           | 110,3602173          | -7,562424255        | 4,1769                    | 2,05327          | 1,0093           | 228,50                                               | 527                                        | 13,68                   |
| 25           | 110,3692004          | -7,517896873        | 5,3112                    | 2,52615          | 1,2015           | 245,47                                               | 517                                        | 11,55                   |
| 26           | 110,3692004          | -7,526802716        | 11,7211                   | 3,18167          | 0,8637           | 232,46                                               | 542                                        | 4,96                    |
| 27           | 110,3692004          | -7,535708375        | 5,5799                    | 5,54922          | 5,5188           | 204,66                                               | 538                                        | 9,17                    |
| 28           | 110,3692004          | -7,544613852        | 6,2305                    | 3,34193          | 1,7925           | 259,15                                               | 536                                        | 10,40                   |

**Lanjutan Tabel 5.10 Rekapitulasi Hasil Analisis Penelitian**

| <b>Titik</b> | <b>X (Longitude)</b> | <b>Y (Latitude)</b> | <b><i>fg</i><br/>(Hz)</b> | <b><i>Ag</i></b> | <b><i>Kg</i></b> | <b><math>V_{s30}</math><br/>Mikrotrmor<br/>(m/s)</b> | <b><math>V_{s30}</math> USGS<br/>(m/s)</b> | <b><i>h</i><br/>(m)</b> |
|--------------|----------------------|---------------------|---------------------------|------------------|------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| 29           | 110,3692004          | -7,553519145        | 0,8737                    | 1,88064          | 4,0479           | 229,42                                               | 545                                        | 65,65                   |
| 30           | 110,3692004          | -7,562424255        | 5,0753                    | 2,46687          | 1,1990           | 227,30                                               | 545                                        | 11,20                   |
| 31           | 110,3781836          | -7,517896873        | 4,3221                    | 3,04143          | 2,1402           | 220,41                                               | 548                                        | 12,75                   |
| 32           | 110,3781836          | -7,526802716        | 6,3676                    | 3,3099           | 1,7205           | 240,16                                               | 600                                        | 9,43                    |
| 33           | 110,3781836          | -7,535708375        | 6,9470                    | 3,18082          | 1,4564           | 193,45                                               | 591                                        | 6,96                    |
| 34           | 110,3781836          | -7,544613852        | 5,6776                    | 3,6642           | 2,3648           | 232,61                                               | 589                                        | 10,24                   |
| 35           | 110,3781836          | -7,553519145        | 6,8978                    | 3,11284          | 1,4048           | 245,03                                               | 586                                        | 8,88                    |
| 36           | 110,3781836          | -7,562424255        | 5,2466                    | 2,1484           | 0,8797           | 244,16                                               | 586                                        | 11,63                   |
| 37           | 110,3871667          | -7,517896873        | 8,4142                    | 2,90675          | 1,0042           | 227,47                                               | 579                                        | 6,76                    |
| 38           | 110,3871667          | -7,526802716        | 5,5811                    | 4,27928          | 3,2811           | 221,74                                               | 630                                        | 9,93                    |
| 39           | 110,3871667          | -7,535708375        | 7,4414                    | 2,83305          | 1,0786           | 247,35                                               | 619                                        | 8,31                    |
| 40           | 110,3961499          | -7,517896873        | 7,8982                    | 3,57172          | 1,6152           | 278,91                                               | 620                                        | 8,83                    |
| 41           | 110,3961499          | -7,526802716        | 5,7873                    | 5,37283          | 4,9880           | 211,34                                               | 630                                        | 9,13                    |
| 42           | 110,405133           | -7,526802716        | 5,9734                    | 2,47606          | 1,0264           | 209,15                                               | 619                                        | 8,75                    |

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan mengenai analisis ketebalan lapisan sedimen serta indeks kerentanan seismik di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang dengan menggunakan metode HVSR pada pengukuran lapangan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan nilai frekuensi dominan ( $f_g$ ) dan faktor amplifikasi ( $A_g$ ) yang diperoleh dari analisis metode HVSR, nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) di Kecamatan Dukun berada dalam kisaran 0,38495 hingga 12,9081. Sebagian besar wilayah penelitian termasuk dalam kategori rendah. Nilai indeks kerentanan seismik terendah tercatat pada Desa Sengi (titik 16), sedangkan nilai tertinggi terdapat di Desa Mangunsoko (titik 12).
2. Berdasarkan hasil inversi kurva HVSR menggunakan metode ellipticity curve, didapatkan nilai  $V_{s30}$  di Kecamatan Dukun berada pada kisaran 177,47–278,91 m/s, sehingga wilayah penelitian umumnya termasuk dalam klasifikasi tanah lunak hingga sedang. Nilai  $V_{s30}$  terendah berada pada titik 13 di Desa Dukun dengan nilai 177,47 m/s, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada titik 40 di Desa Paten dengan nilai 278,91 m/s.
3. Berdasarkan perhitungan yang memanfaatkan nilai frekuensi dominan ( $f_g$ ) serta kecepatan gelombang geser tanah hingga kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ), yang diperoleh melalui proses inversi kurva HVSR dengan pendekatan Ellipticity Curve, diperoleh estimasi ketebalan lapisan sedimen. Ketebalan sedimen ( $h$ ) di Kecamatan Dukun bervariasi antara 4,96 meter hingga 65,65 meter. Lapisan sedimen paling tipis terdapat di Desa Sengi (titik 26), sedangkan lapisan sedimen paling tebal berada di Desa Sumber (titik 29).

Hasil analisis menunjukkan bahwa ketebalan lapisan sedimen cenderung semakin bertambah pada daerah dengan topografi yang lebih rendah.

4. Perbandingan antara nilai  $V_{s30}$  hasil mikrotremor dan  $V_{s30}$  dari USGS menunjukkan adanya selisih yang cukup besar, di mana nilai mikrotremor lebih rendah dibandingkan dengan USGS. Hal ini terutama disebabkan oleh perbedaan metode penentuan data, di mana mikrotremor menggambarkan

kondisi geologi lokal secara detail, sedangkan USGS menggunakan pendekatan topografi berskala regional yang bersifat lebih umum. Keterbatasan model USGS yang belum mempertimbangkan karakteristik tektonik dan geologi di Indonesia membuat hasilnya kurang representatif.

## 6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk mendukung penelitian selanjutnya sebagai berikut

1. Perlu adanya persiapan perizinan yang lebih optimal agar pelaksanaan penelitian dapat berlangsung dengan lancar.
2. Pengambilan data bor di beberapa wilayah Kecamatan Dukun diperlukan untuk memperoleh informasi lapisan penyusun bawah permukaan sehingga proses inversi kurva HVSR dengan metode *ellipticity curve* dapat dilakukan secara lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Airunisa, A., Resta, I. L., & Ngatijo, N. (2024). Analisis Data Mikrotremor Untuk Mengetahui Nilai Indeks Kerentanan Seismik Di Kecamatan Jambi Luar Kota. *Jurnal Geofisika*, 22(1), 21-25.
- Allen, T. I., & Wald, D. J. (n.d.). *Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions (VS30) and Amplification Around the Globe Open-File Report 2007-1357*.
- Ardi, A. S., & Sumunar, D. R. S. (2017). Analisis risiko bencana erupsi gunung merapi di Kecamatan Dukun Kabupaten Magelang. *Geo Media: Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian*, 15(1), 99-110.
- Ardy, V. T. (2024). Frekuensi Jembatan Layak Guna Berdasarkan Analisis Frekuensi Natural Menggunakan Mikrotremor. *Kohesi: Jurnal Sains dan Teknologi*, 5(2), 11-20.
- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (n.d.). Peta Tektonika Indonesia. <https://gis.bmkg.go.id/portal>.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Magelang (2020). *KECAMATAN DUKUN DALAM ANGKA* (No. Publikasi: 33080.2220; ISSN: 2406-9949). Badan Pusat Statistik. <https://web-api.bps.go.id>.
- Badan Standarisasi Nasional, (2019). SNI 1726:2019, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung. Badan Standarisasi Nasional : Jakarta.
- Baiq Laelatin Diniati, Syamsuddin, S., Bakti Sukrisna, Kormil Saputra, Ika Umratul Asni Aminy, Rahmatun Inayah, & Adella Ulyandana Jayatri. (2024). *Correlation Between Building Damage Levels and Microtremor HVSR Curve Parameters. Frontier Advances in Applied Science and Engineering*, 2(2), 137–147.

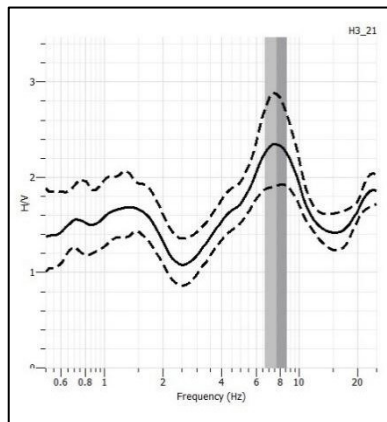
- Boudghene Stambouli, A., & Guizani, L. (2025). *Neural Network-Based Prediction of Amplification Factors for Nonlinear Soil Behaviour: Insights into Site Proxies*. *Applied Sciences* (Switzerland), 15(7).
- Braile, P.L.W. (2006) “*Seismic Waves and the Slinky*”.
- Candraningtyas, S. A. N., & Susanti, D. B. (2024). Mikrozonasi Frekuensi Dominan (F0) dan Faktor Amplifikasi (A0) Di Desa Pacarejo Bagian Barat, Semanu, Gunungkidul, Yogyakarta. *Jurnal Stasiun Geofisika Sleman*, 2(2), 07-12
- Dinas Energi Dan Sumber Daya Mineral (2022). Peta Geologi Kabupaten Magelang. <https://data.jatengprov.go.id>.
- Duarte, J. C., & Schellart, W. P. (2016). *Introduction to plate boundaries and natural hazards*. *Plate Boundaries and Natural Hazards*, 1-10.
- Dwi Prayogi, F., Bahagiarti Kusumayudha, S., & Teguh Paripurno, E. (2018). Geologi Dan Hidrogeokimia Air Tanah Daerah Pandanretno Dan Sekitarnya, Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang, Jawa Tengah. In *Jurnal Ilmiah Geologi Pangea* (Vol. 5, Issue 2).
- Fadhilah, U., Wibowo, N. B., & Darmawan, D. (2021). Mikrozonasi Indeks Kerentanan Seismik di Kawasan Jalur Sesar Grindulu, Kabupaten Pacitan Berdasarkan Data Mikrotremor. *Jurnal Ilmu Fisika dan Terapannya (JIFTA)*, 8(2).
- Ghione, F., Köhler, A., Dichiarante, A. M., Aarnes, I., & Oye, V. (2023). *Vs30 and depth to bedrock estimates from integrating HVSR measurements and geology-slope approach in the Oslo area, Norway*. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1242679.
- Haerudin, N., Alami, F. dan Rustasi (2019) *Mikroseismik, Mikrotremor, dan Microearthquake Dalam Ilmu Kebumihan*. Bandarlampung: Pusaka Media.
- Irawan, A. B., & Yogafanny, E. (2020). Rancangan Teknik Reklamasi Penambangan Pasir dan Batu Di Dusun Banaran, Desa Keningar, Kec. Dukun, Kab. Magelang, Jawa Tengah. *Jurnal Ilmiah Lingkungan Kebumihan*, 2(2), 10-17.
- Lubis, A.M. et al. (2021) “Penentuan Ketebalan Sedimen pada Segmen Kumering, Sesar Sumatra di Daerah Liwa Lampung Barat dengan Menggunakan Metode

- Seismik Aktif MASW,” *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 12(3), hal. 137–147.
- Mangininsih, S. L., & Praja, N. K. (2023). Pemetaan Lapisan Tanah Menggunakan Data Mikrotremor HVSR dan Dampaknya Terhadap Daya Dukung Tanah di Kawasan Kota Kendari. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 24(1), 51–58.
- Nakamura, Y. (1997). *Seismic Vulnerability Indices For Ground And Structures Using Microtremor*.
- Nakamura, Y. (2000). *Clear Identification of the Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications. 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand (CD-ROM) Paper No. 2656*, 8 p.
- Parisi, L., Olofsson, A., & Gudmundsson, O. (2018). *Apparent splitting of S waves propagating through an anisotropic medium. Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1), 579–593.
- Prabowo, U. N., Seha, S., & Ferdiyan, A. (2021). Estimasi ketebalan lapisan sedimen permukaan menggunakan pengukuran mikrotremor di Pemalang, Jawa Tengah. *Jurnal Teras Fisika*, 4(1), 187.
- Pratama, M. P., Hamimu, L., Manan, A., & Puspitafuri, C. (2021). Estimasi Ketebalan Lapisan Sedimen Kawasan Perbukitan Kecamatan Wangi-Wangi Kabupaten Wakatobi Menggunakan Metode HVSR. *Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia, Universitas Halu Oleo*, 3(2).
- Safitri, A., Hamimu, L., & Manan, A. (2021). Inversi HVSR Data Mikrotremor untuk Penentuan Kecepatan Gelombang Shear (S) di Daratan Pesisir Kecamatan Wangi-Wangi Kabupaten Wakatobi. *Jurnal Riset Geofisika Indonesia*, 3(1), 1–10.
- Sandra, S., Aisy, A. N., Rusydi, M., Abdullah, A., Jamidun, J., Awaliah, W. O., Rahmawati, R., & Basri, C. A. (2024). *Determination of Seismic Vulnerability Index and Sediment Thickness Using the HVSR Method in Mamuju, Tapalang, and Malunda districts* (pp. 27–30).

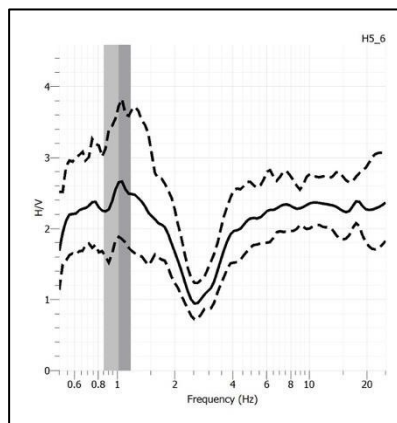
- SESAME (2004) *Guidelines For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique On Ambient Vibrations, Europe: SESAME European Research Project.*
- Simatupang, F. H. U., Jamaluddin, K., & Irwandi, I. (2022). Model Lapisan Geologi Teknik Permukaan Menggunakan Metode Gelombang Geser Di Kecamatan Darul Imarah Aceh Besar. *Journal of The Civil Engineering Student*, 4(3), 260-266.
- Sitorus, Nomensen.M.H. (2017). Estimasi ketebalan lapisan sedimen dan amplifikasi Desa Olak Alen, Blitar. Surabaya: Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh November.
- Sugianto, N., Refrizon, Mase, L. Z., & Anggeraini, S. (2021). *The updated zonation of seismic vulnerability index and ground shear strain at Bengkulu City, Indonesia. AIP Conference Proceedings*, 2320.
- Sunarjo, Gunawan. M. T dan Pribadi. S. 2012. Gempa Bumi Edisi Populer. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Suzuki, R., Nakahara, H., & Nakata, N. (2021). *Ground water-induced changes in velocities of P and S waves. Earth, Planets and Space*, 73, 89.
- Vantassel, J. P., Stolte, A. C., Wotherspoon, L. M., & Cox, B. R. (2023). *AutoHVSr: a machine-learning-supported algorithm for the fully-automated processing of horizontal-to-vertical spectral ratio measurements.*
- Wibowo, N. B., Fathani, T. F., Pramumijoyo, S., & Marliyani, G. I. (2025). The topographic-based vs30 model of the Opak River basin Yogyakarta. *Geoenvironmental Disasters*, 12(1).
- Yaro, A. S., Maly, F., & Prazak, P. (2023). *Outlier Detection in Time-Series Receive Signal Strength Observation Using Z-Score Method with Sn Scale Estimator for Indoor Localization. Applied Sciences (Switzerland)*, 13(6).
- Yuniarto, A. H. P. (2023). Mikrozonasi Seismik Di Kawasan Itsnu Pekalongan Dengan Menggunakan Metode Hvsr. *Jurnal Kumparan Fisika*, 6(1), 47-54.

# LAMPIRAN

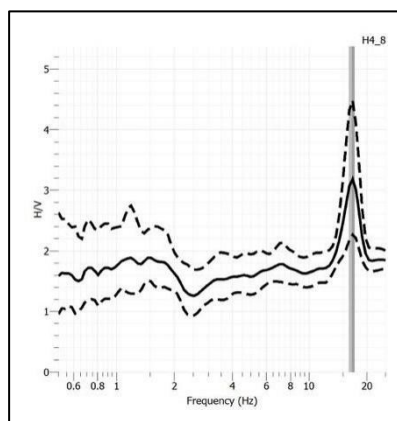
### Lampiran 1 Gambar Kurva HVSR



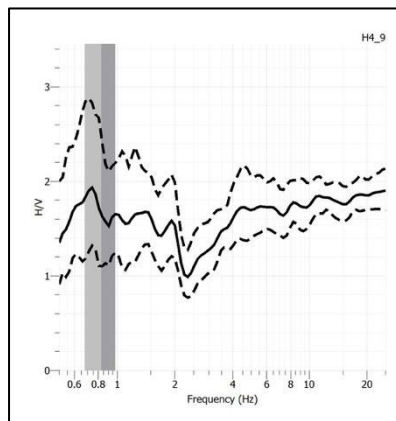
**Gambar L.1- 1 Kurva HVSR Titik 1**



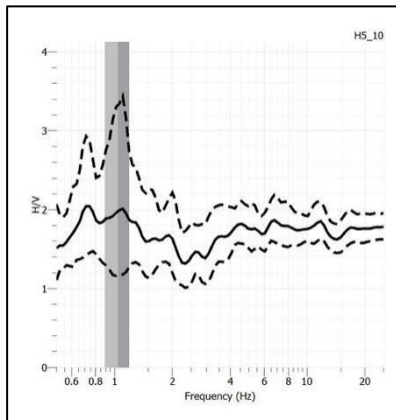
**Gambar L.1- 2 Kurva HVSR Titik 2**



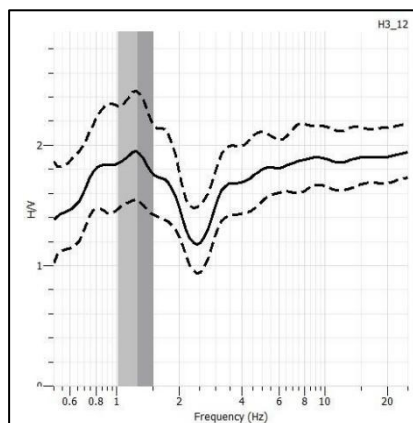
**Gambar L.1- 3 Kurva HVSR Titik 3**



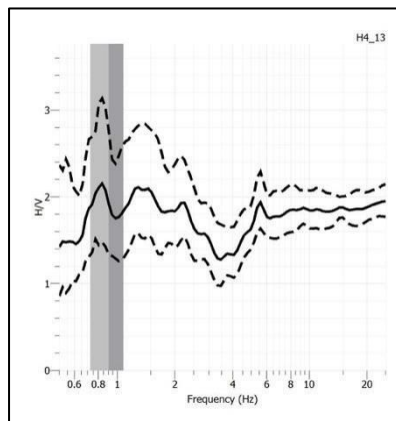
**Gambar L.1- 4 Kurva HVSR Titik 4**



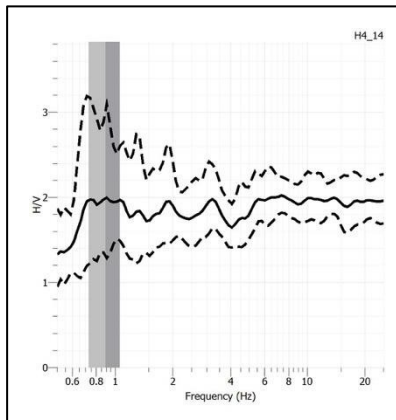
**Gambar L.1- 5 Kurva HVSR Titik 5**



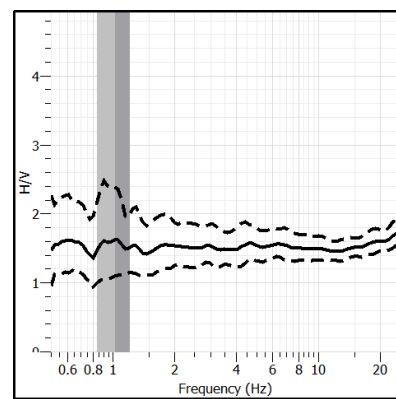
**Gambar L.1- 6 Kurva HVSR Titik 6**



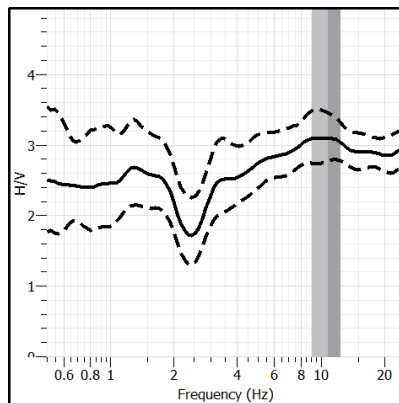
**Gambar L.1- 7 Kurva HVSR Titik 7**



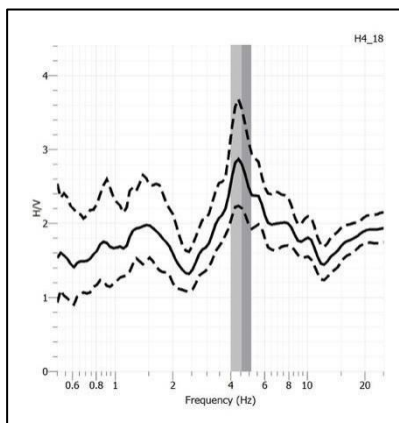
**Gambar L.1- 8 Kurva HVSR Titik 8**



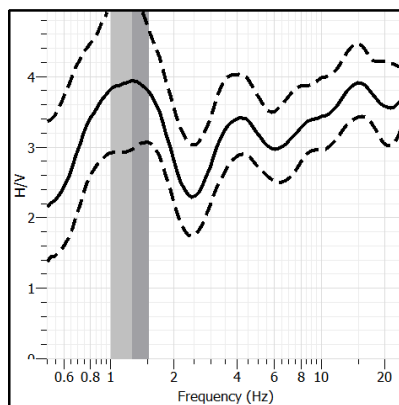
**Gambar L.1- 9 Kurva HVSR Titik 9**



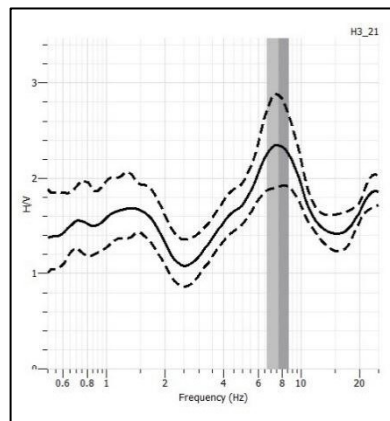
**Gambar L.1- 10 Kurva HVSR Titik 10**



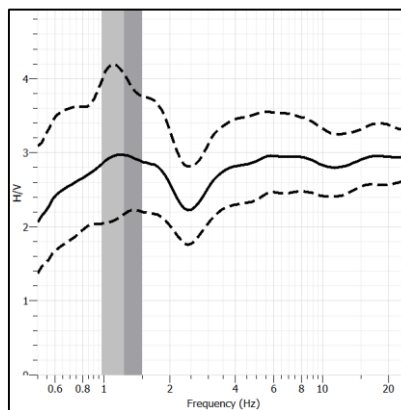
**Gambar L.1- 11 Kurva HVSR Titik 11**



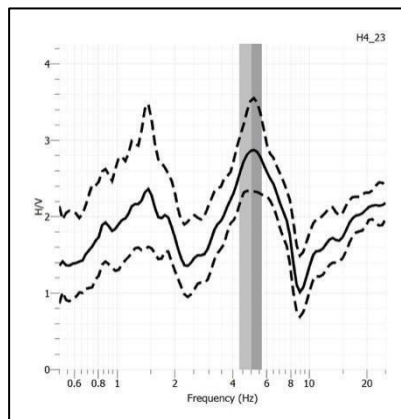
**Gambar L.1- 12 Kurva HVSR Titik 12**



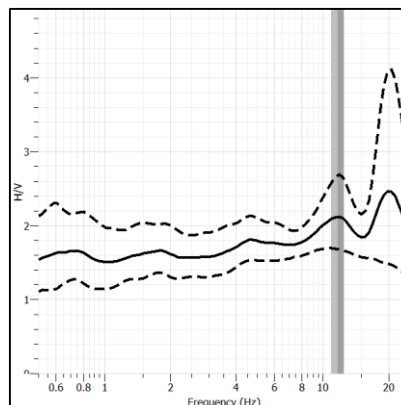
**Gambar L.1- 13 Kurva HVSR Titik 13**



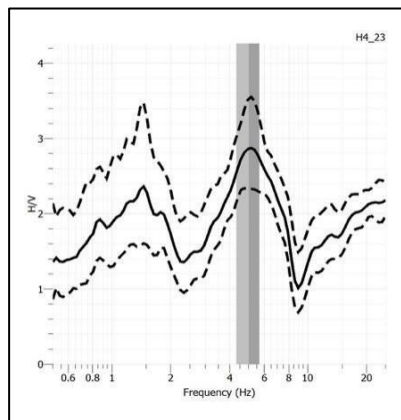
**Gambar L.1- 14 Kurva HVSR Titik 14**



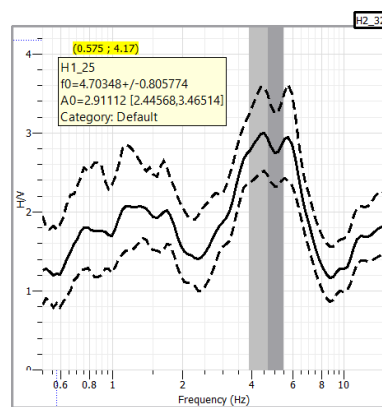
**Gambar L.1- 15 Kurva HVSR Titik 15**



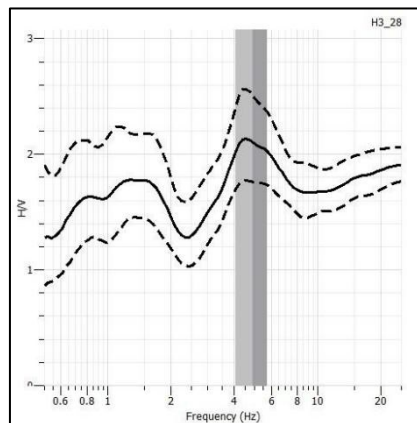
**Gambar L.1- 16 Kurva HVSR Titik 16**



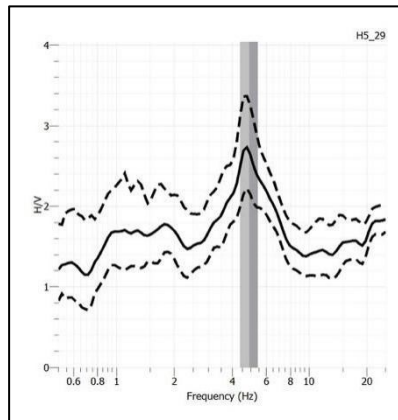
**Gambar L.1- 17 Kurva HVSR Titik 17**



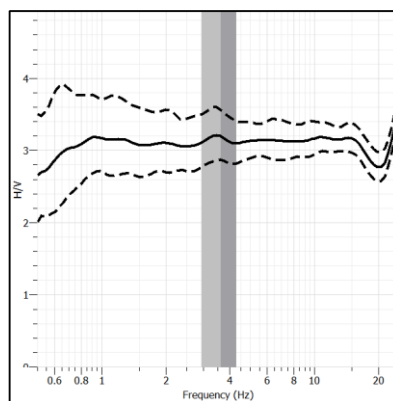
**Gambar L.1- 18 Kurva HVSR Titik 18**



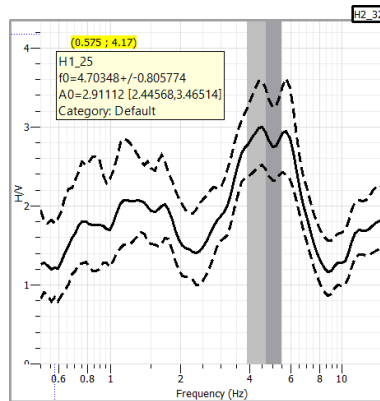
**Gambar L.1- 19 Kurva HVSR Titik 19**



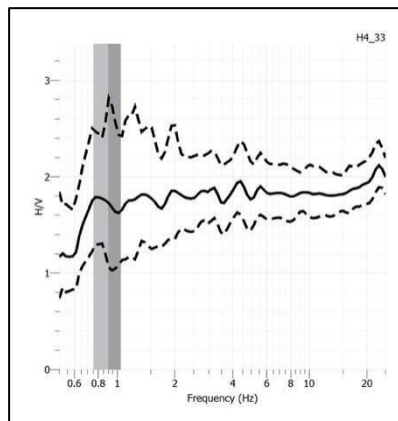
**Gambar L.1- 20 Kurva HVSR Titik 20**



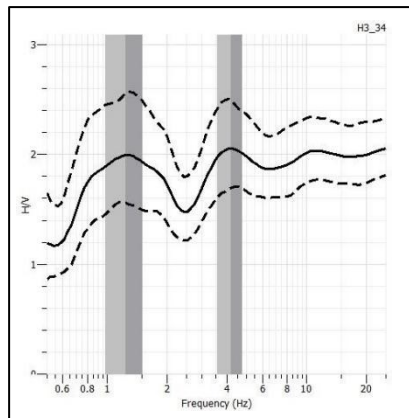
**Gambar L.1- 21 Kurva HVSR Titik 21**



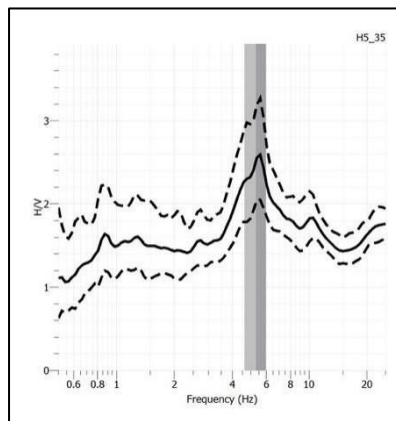
**Gambar L.1- 22 Kurva HVSR Titik 22**



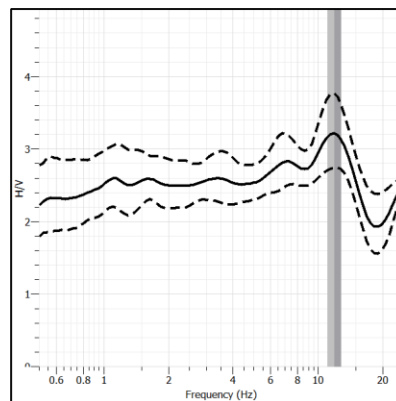
**Gambar L.1- 23 Kurva HVSR Titik 23**



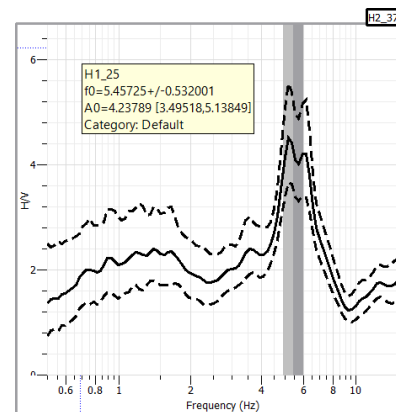
**Gambar L.1- 24 Kurva HVSR Titik 24**



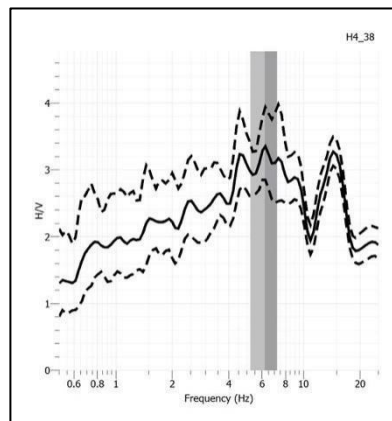
**Gambar L.1- 25 Kurva HVSR Titik 25**



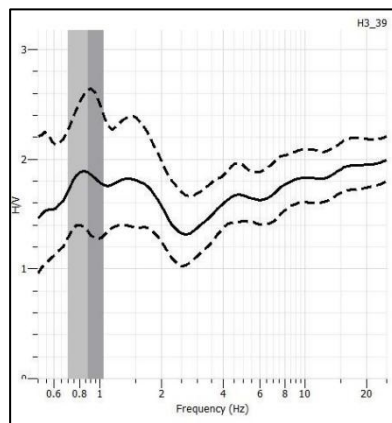
**Gambar L.1- 26 Kurva HVSR Titik 26**



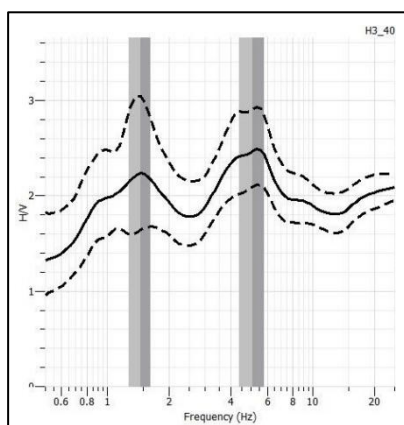
**Gambar L.1- 27 Kurva HVSR Titik 27**



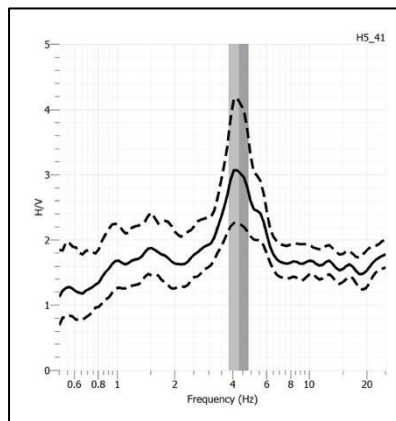
**Gambar L.1- 28 Kurva HVSR Titik 28**



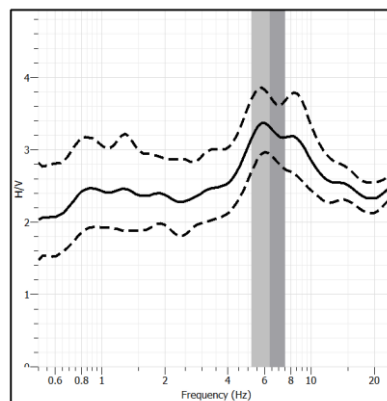
**Gambar L.1- 29 Kurva HVSR Titik 29**



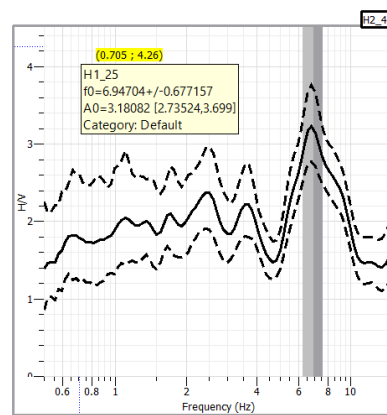
**Gambar L.1- 30 Kurva HVSR Titik 30**



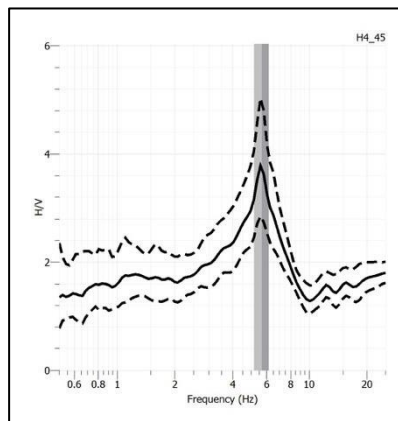
**Gambar L.1- 31 Kurva HVSR Titik 31**



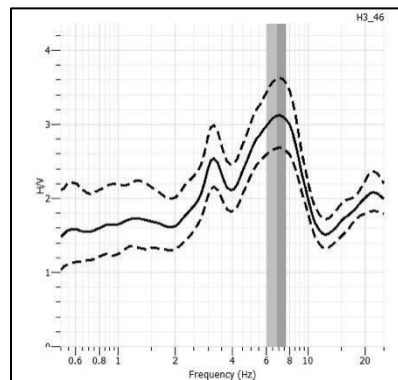
**Gambar L.1- 32 Kurva HVSR Titik 32**



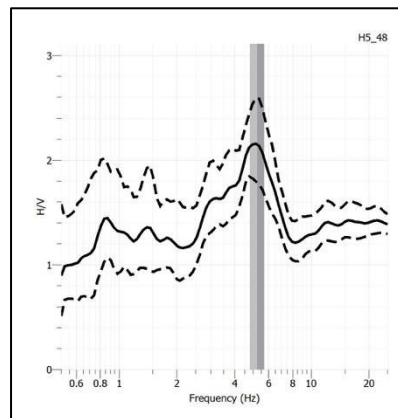
**Gambar L.1- 33 Kurva HVSR Titik 33**



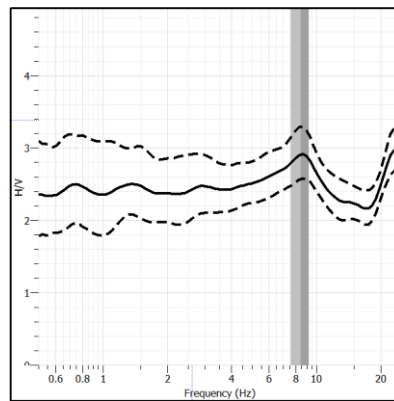
**Gambar L.1- 34 Kurva HVSR Titik 34**



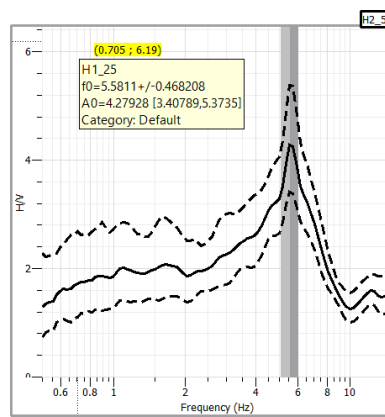
**Gambar L.1- 35 Kurva HVSR Titik 35**



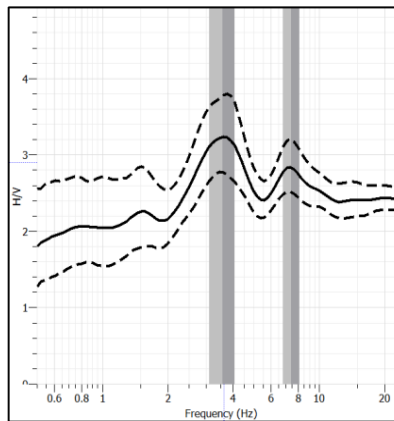
**Gambar L.1- 36 Kurva HVSR Titik 36**



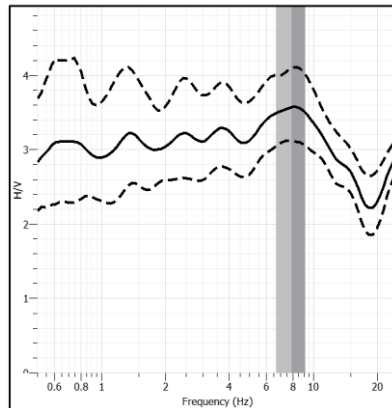
**Gambar L.1- 37 Kurva HVSR Titik 37**



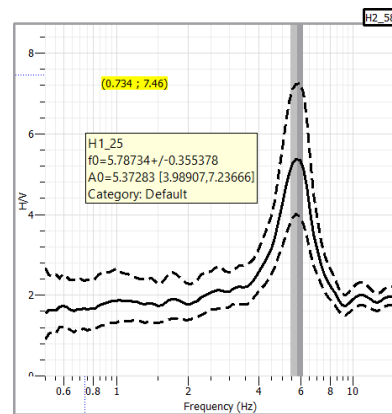
**Gambar L.1- 38 Kurva HVSR Titik 38**



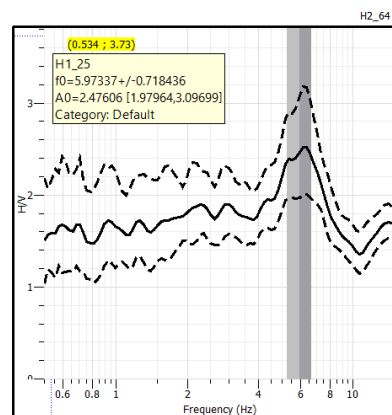
**Gambar L.1- 39 Kurva HVSR Titik 39**



**Gambar L.1- 40 Kurva HVSR Titik 40**

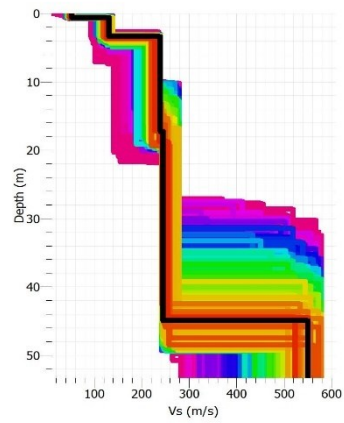


**Gambar L.1- 41 Kurva HVSR Titik 41**

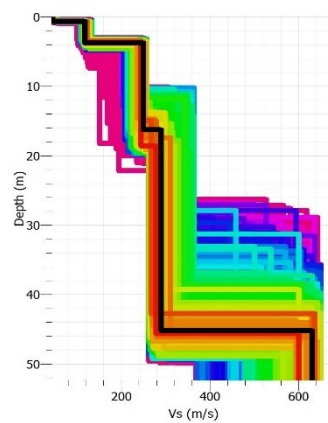


**Gambar L.1- 42 Kurva HVSR Titik 42**

## Lampiran 2 Grafik Kurva Inversi HVSR



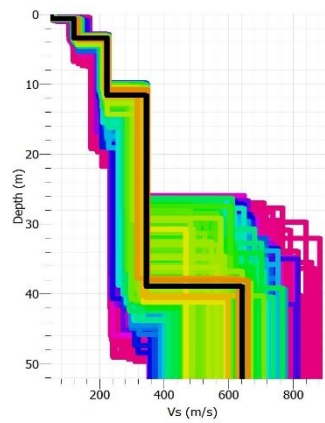
**Gambar L.2- 43 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 1**



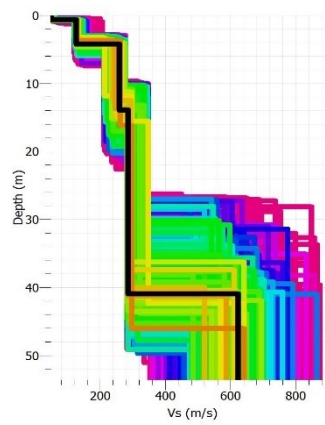
**Gambar L.2- 2 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 2**



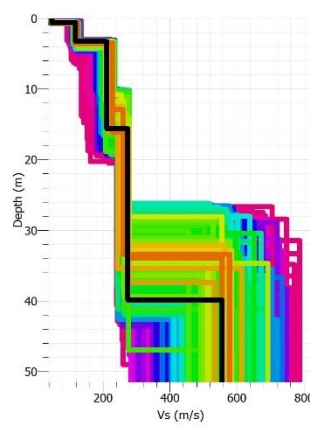
**Gambar L.2- 3 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 4**



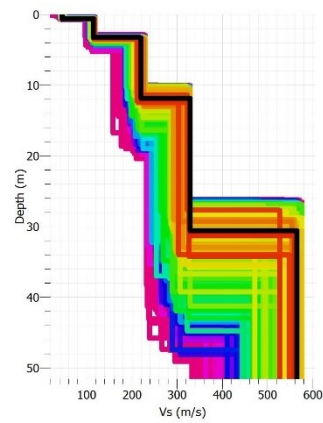
**Gambar L.2- 4 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 5**



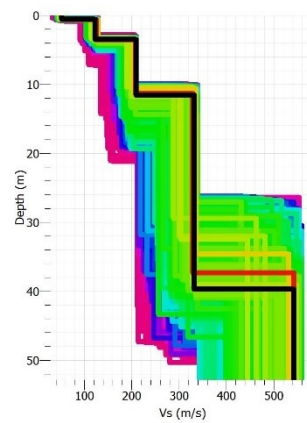
**Gambar L.2- 5 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 6**



**Gambar L.2- 6 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 7**



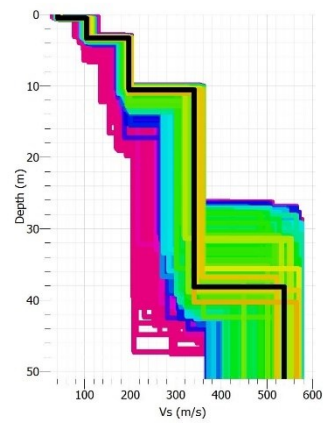
**Gambar L.2- 7 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 8**



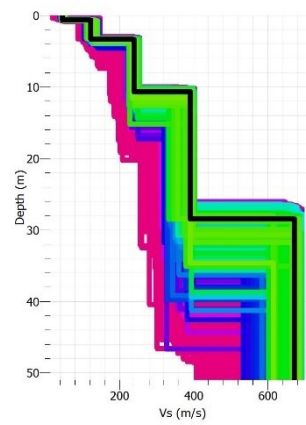
**Gambar L.2- 8 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 9**



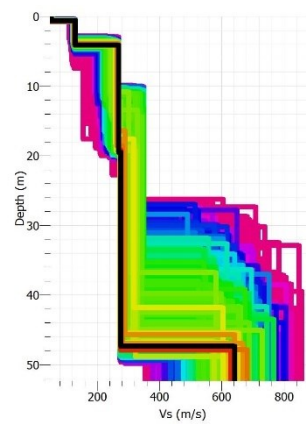
**Gambar L.2- 9 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 10**



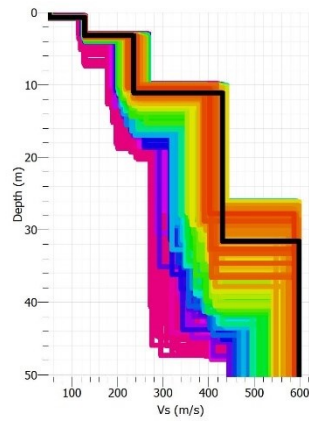
**Gambar L.2- 10 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 11**



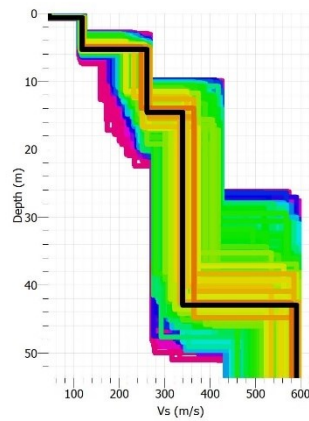
**Gambar L.2- 11 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 12**



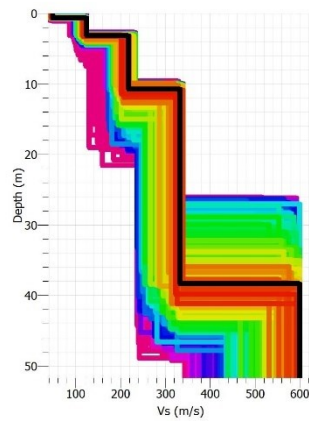
**Gambar L.2- 12 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 13**



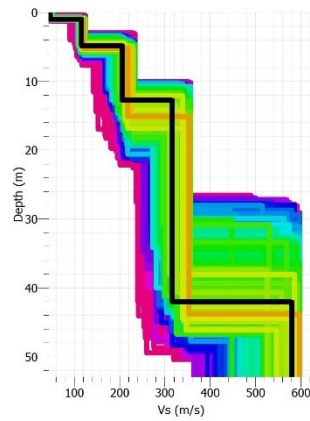
**Gambar L.2- 13 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 14**



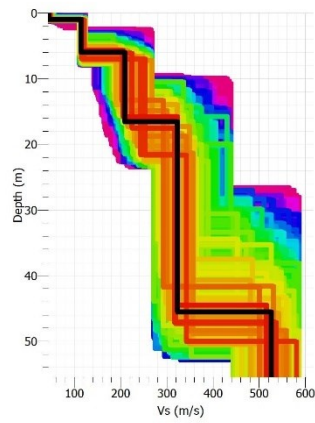
**Gambar L.2- 14 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 15**



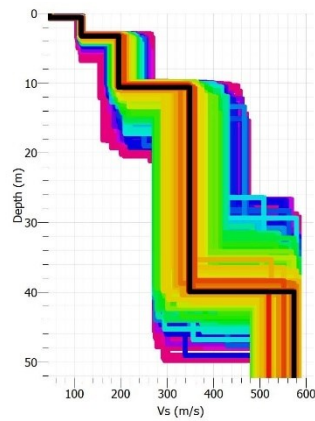
**Gambar L.2- 15 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 16**



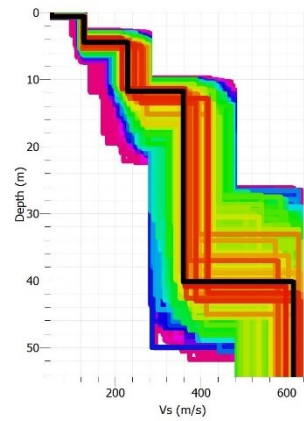
**Gambar L.2- 16 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 17**



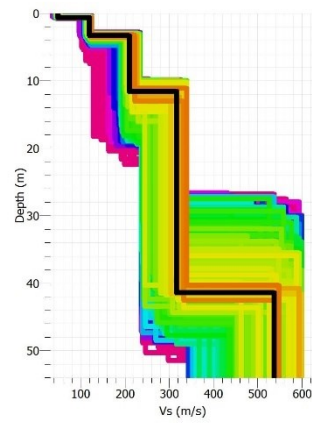
**Gambar L.2- 17 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 18**



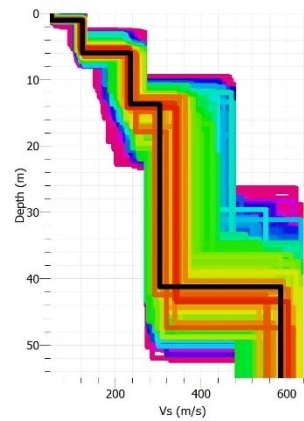
**Gambar L.2- 18 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 19**



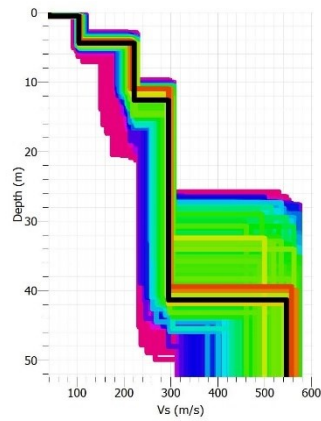
**Gambar L.2- 19 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 20**



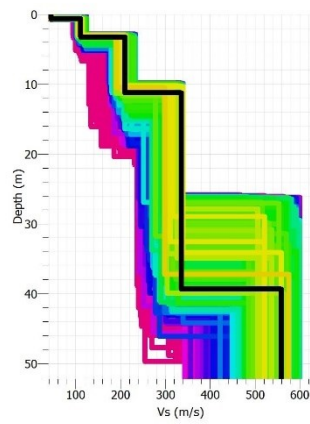
**Gambar L.2- 20 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 21**



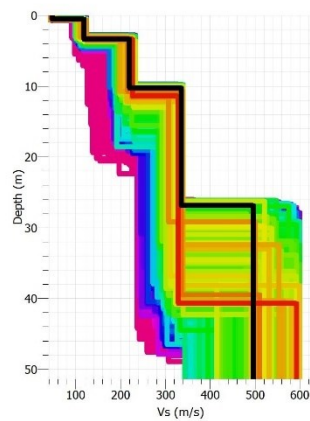
**Gambar L.2- 21 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 22**



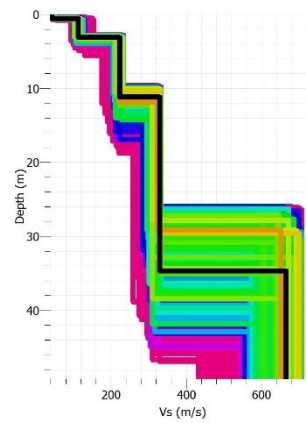
**Gambar L.2- 22 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 23**



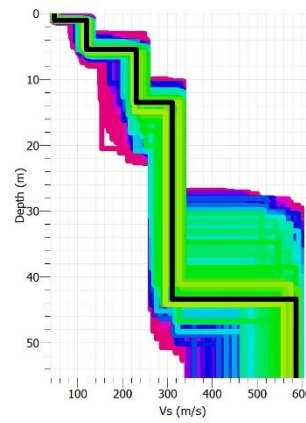
**Gambar L.2- 23 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 24**



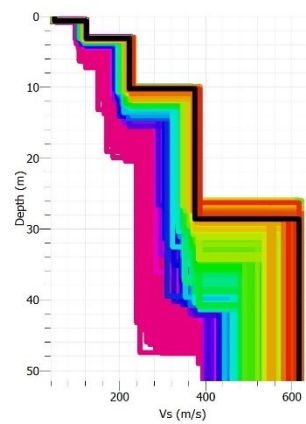
**Gambar L.2- 24 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 25**



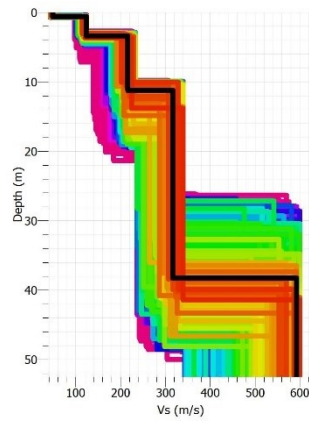
**Gambar L.2- 25 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 26**



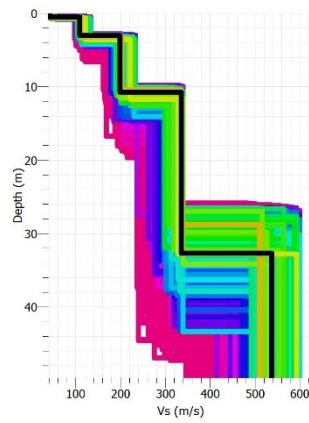
**Gambar L.2- 26 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik27**



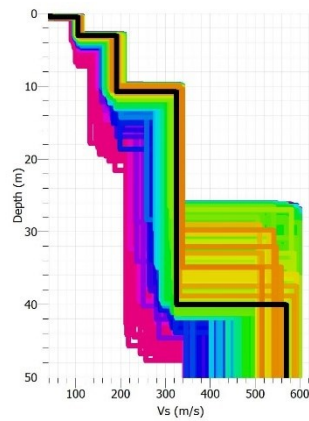
**Gambar L.2- 27 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 28**



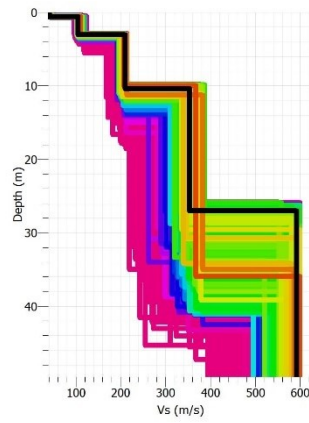
**Gambar L.2- 28 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 29**



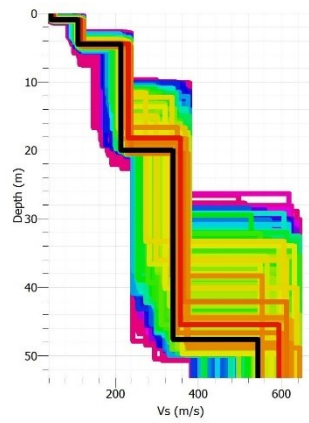
**Gambar L.2- 29 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 30**



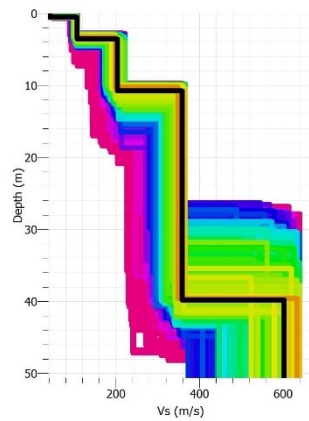
**Gambar L.2- 30 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 31**



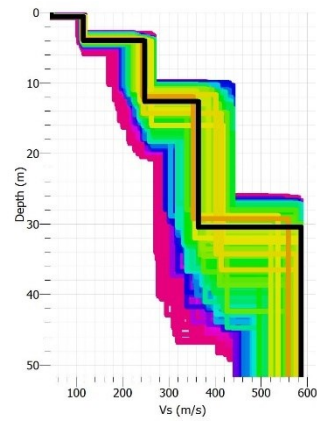
**Gambar L.2- 31 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 32**



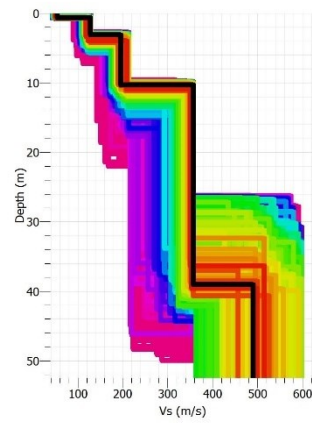
**Gambar L.2- 32 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 33**



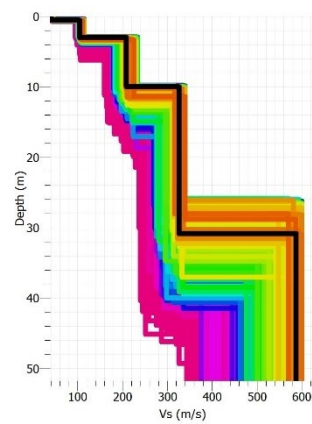
**Gambar L.2- 33 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 34**



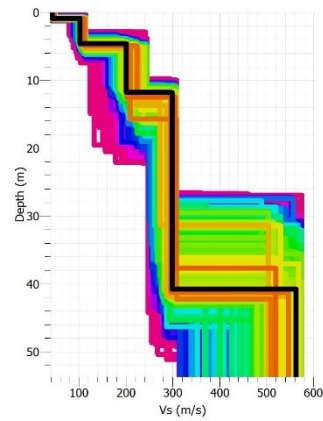
**Gambar L.2- 34 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 35**



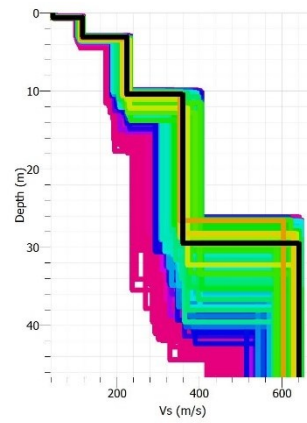
**Gambar L.2- 35 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 36**



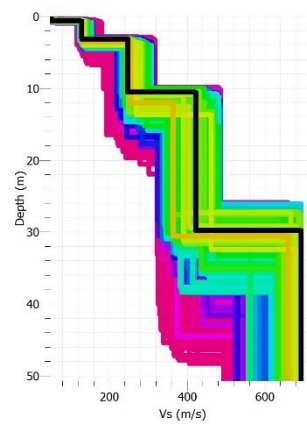
**Gambar L.2- 36 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 37**



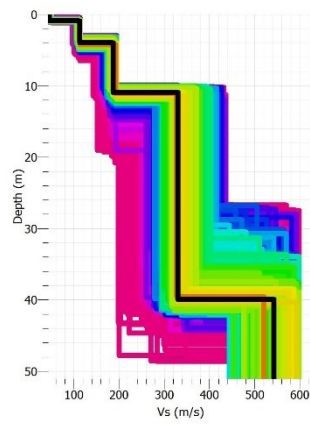
**Gambar L.2- 37 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 38**



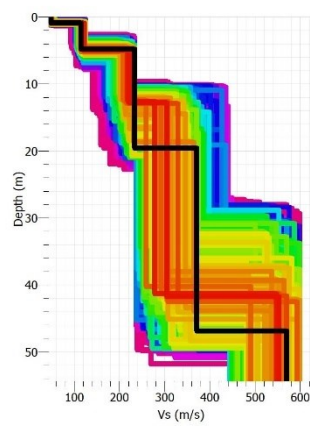
**Gambar L.2- 38 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 39**



**Gambar L.2- 39 Grafik Kurva Inversi HVSR Titik 40**

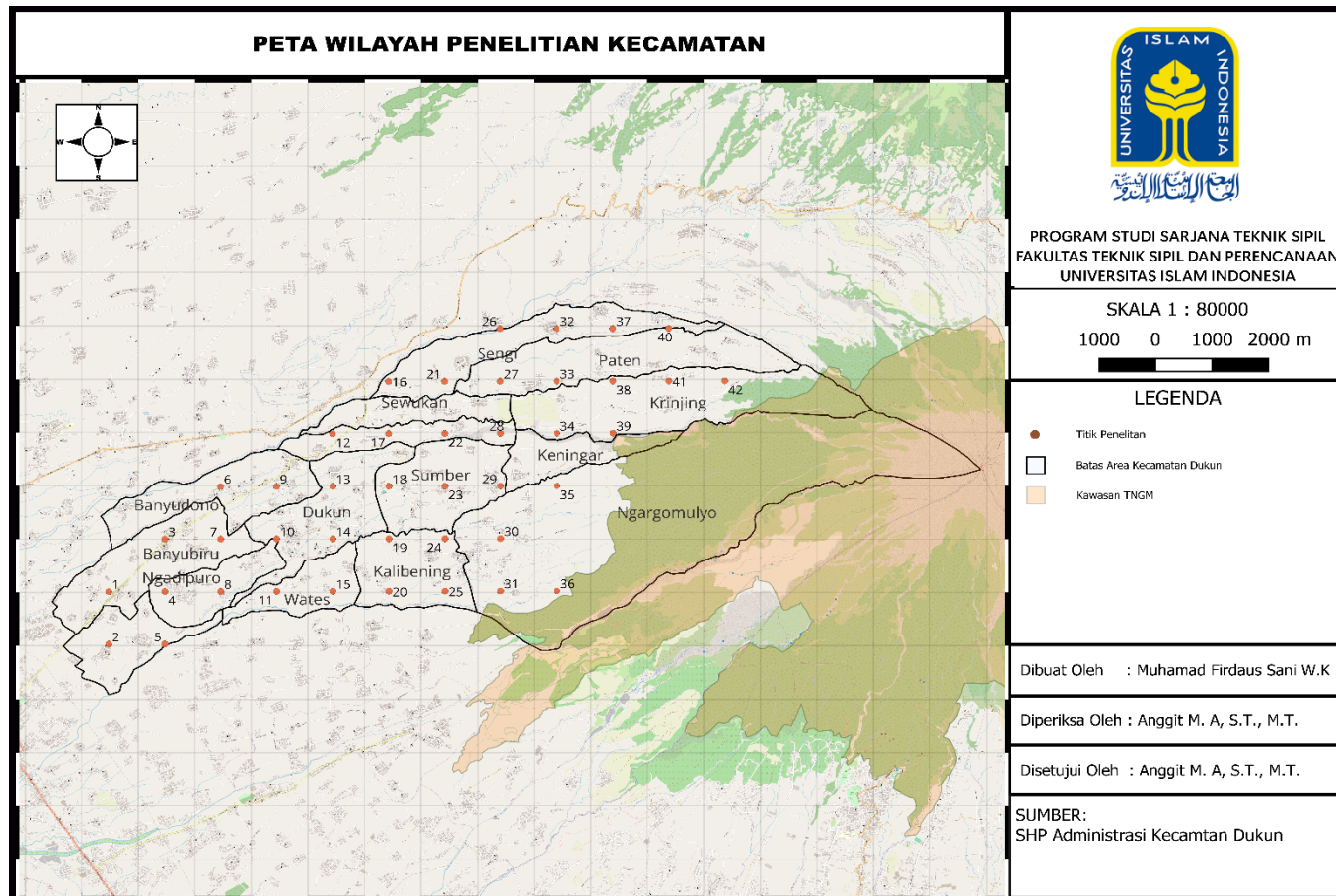


**Gambar L.2- 40 Grafik Kurva Inversi HVSr Titik 41**

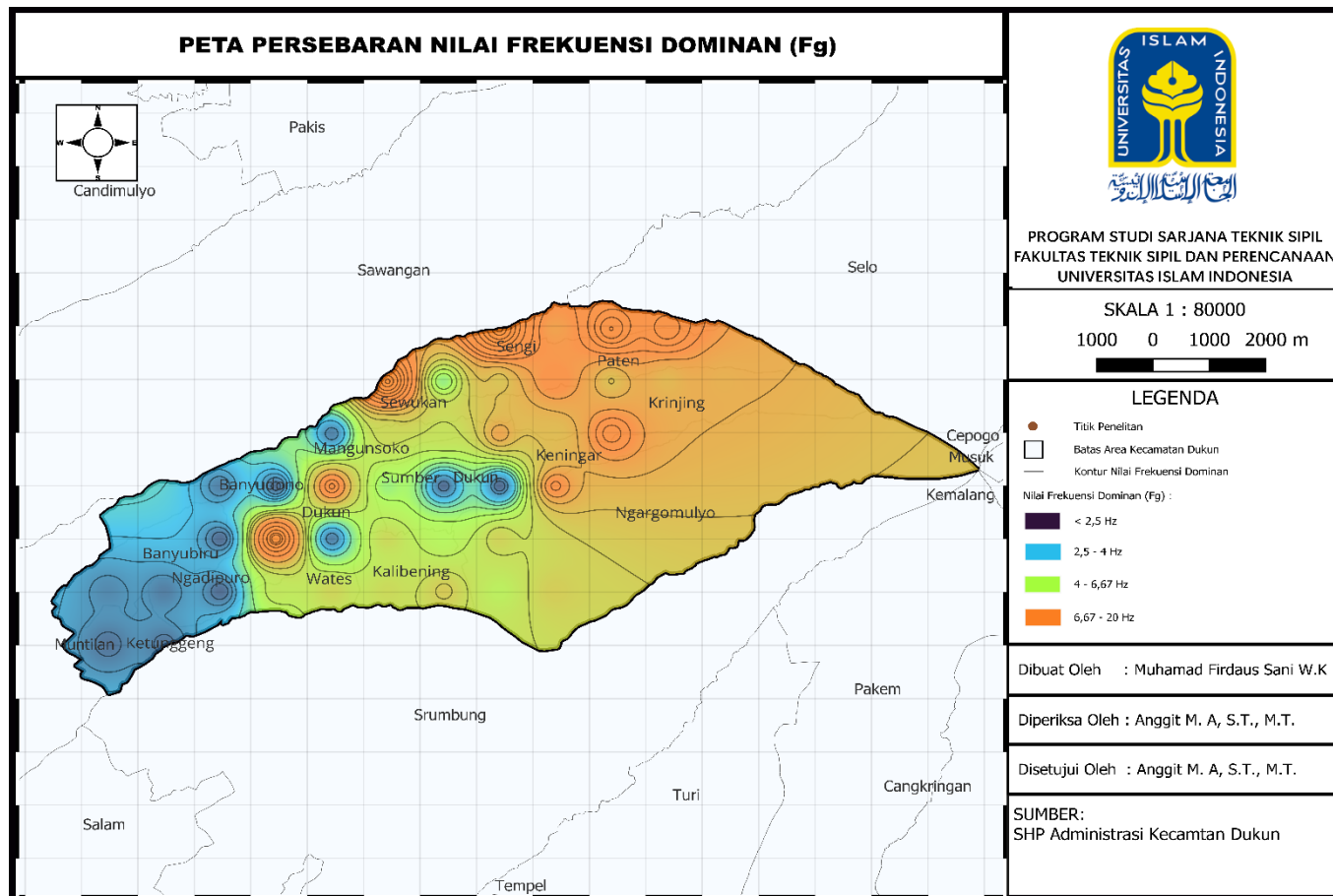


**Gambar L.2- 41 Grafik Kurva Inversi HVSr Titik 42**

### Lampiran 3 Gambar Peta Persebaran

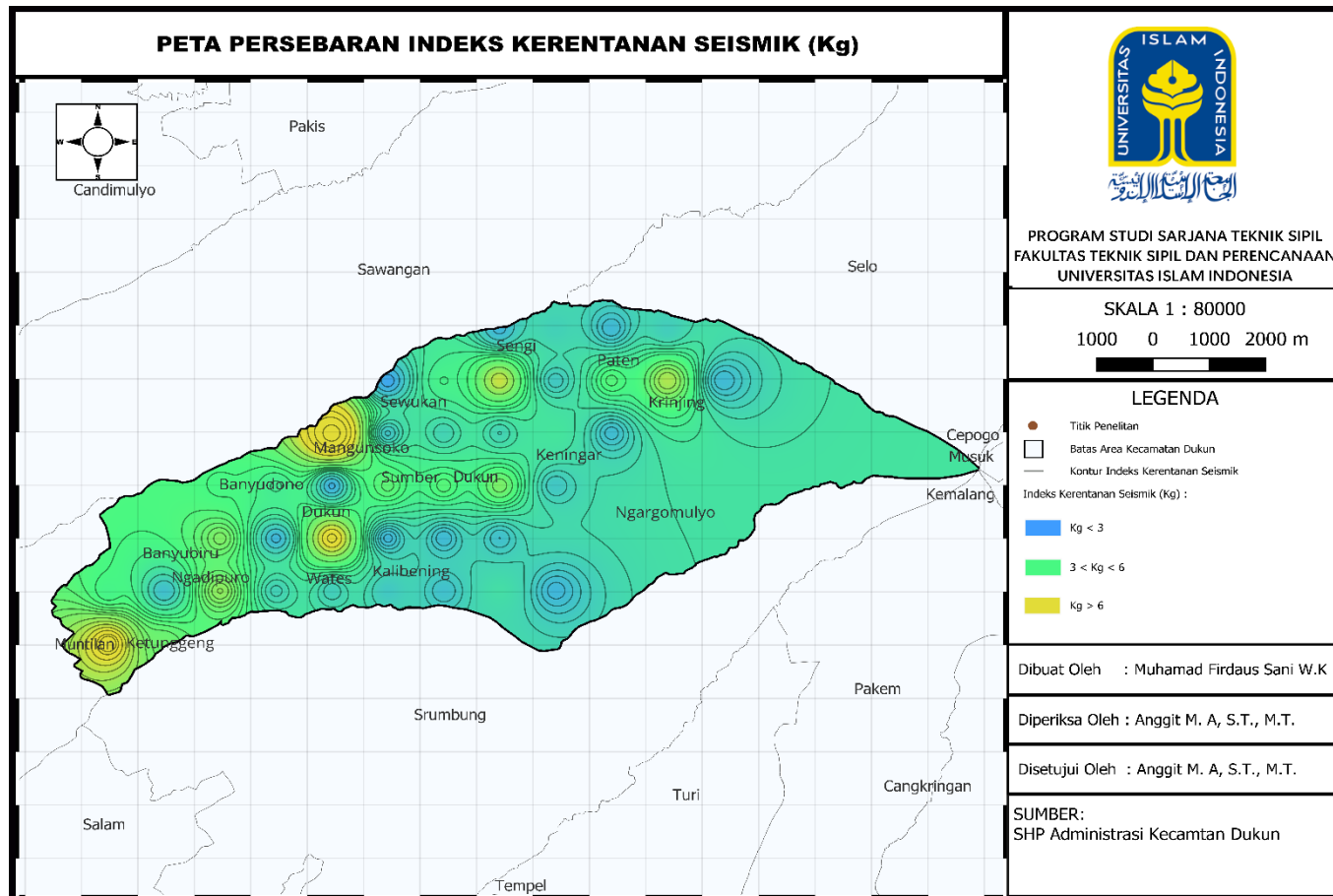


**Gambar L.3- 1 Peta Titik Pengambilan Data Mikrotremor**

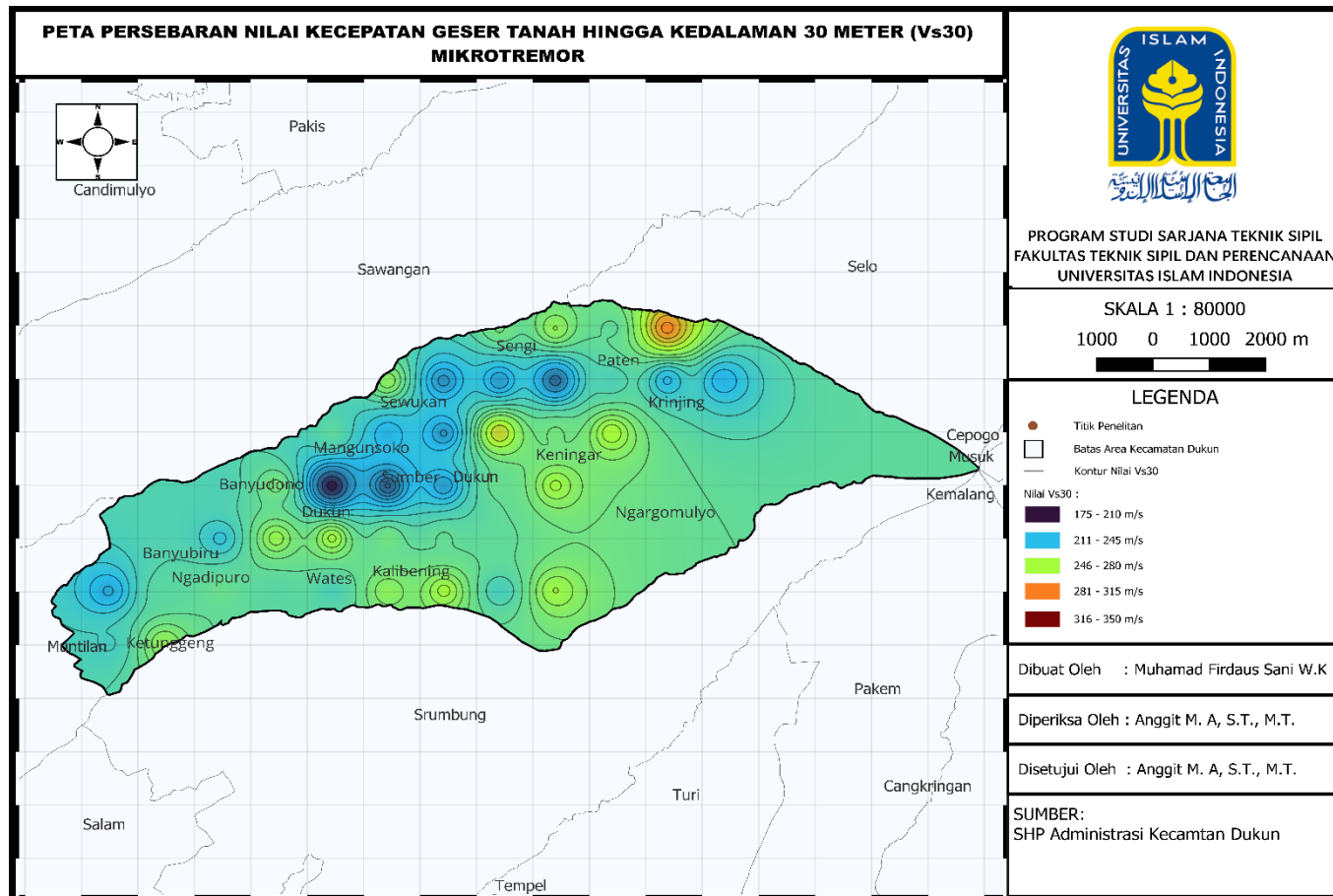


**Gambar L.3- 2 Peta Persebaran Nilai Frekuensi Dominan (Fg)**



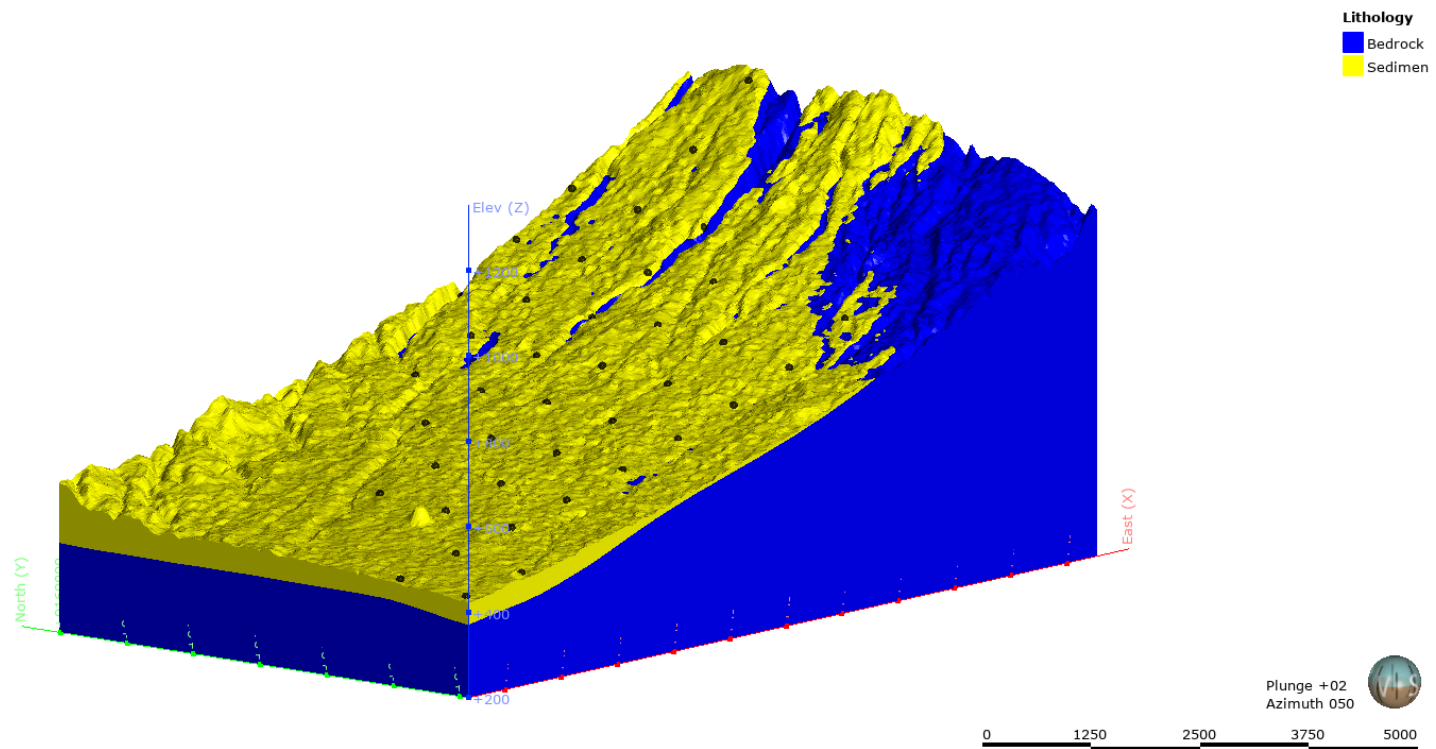


**Gambar L.3- 4 Peta Persebaran Nilai Kerentanan Seismik (Kg)**

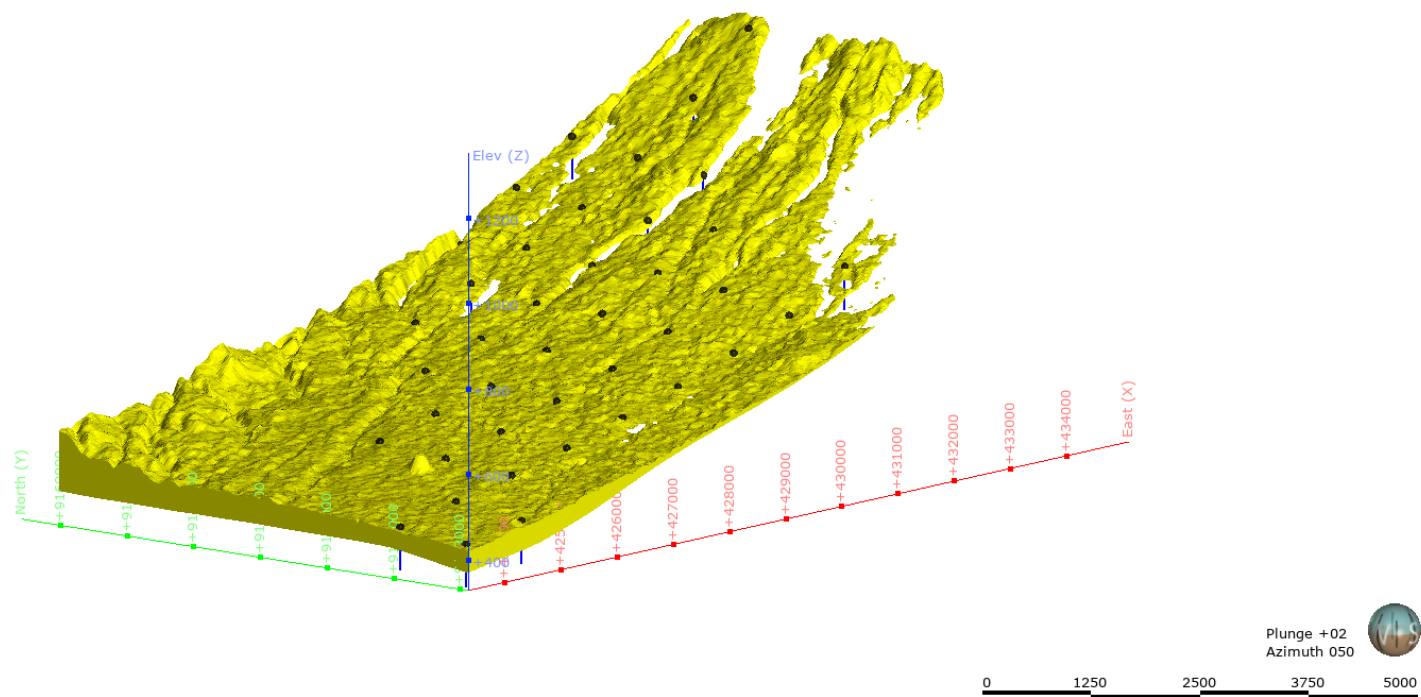


**Gambar L.3- 5 Peta Persebaran Kecepatan Geser Tanah Hingga Kedalaman 30 Meter ( $V_{s30}$ ) di Kecamatan Dukun**

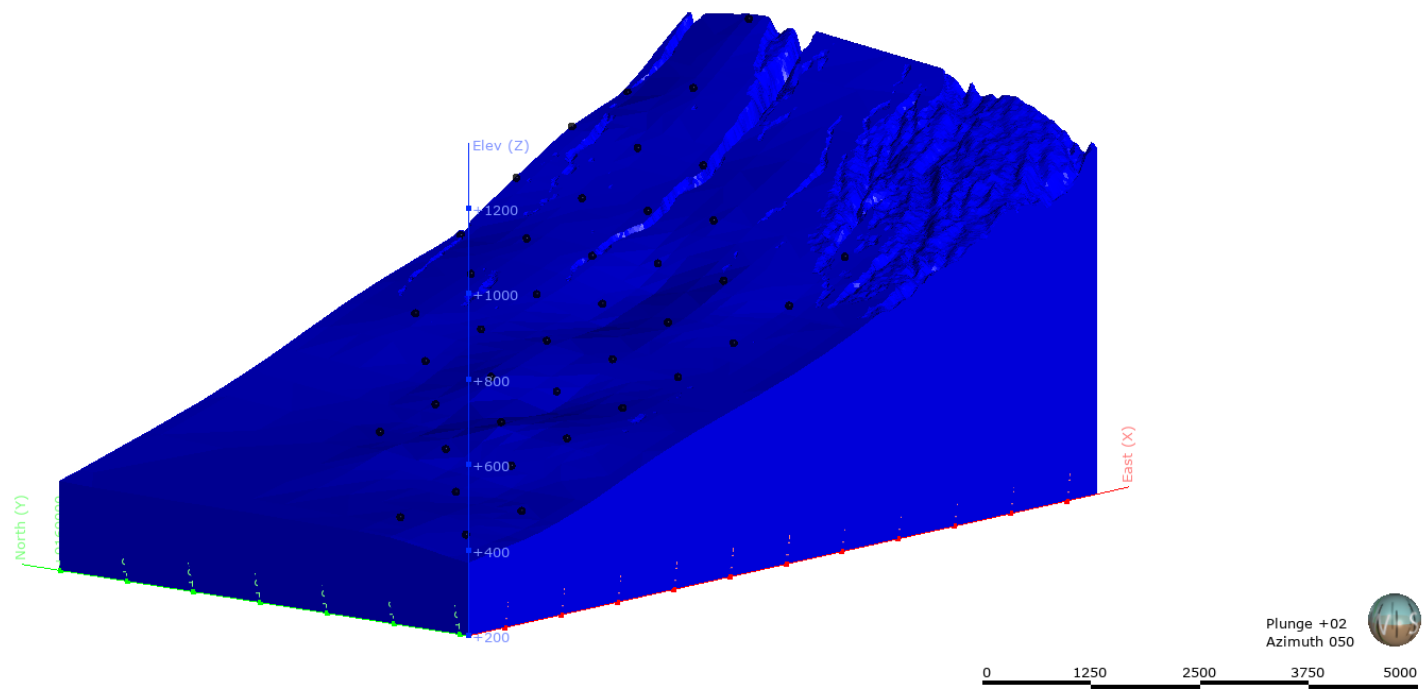
## Lampiran 4 Model 3D Lapisan



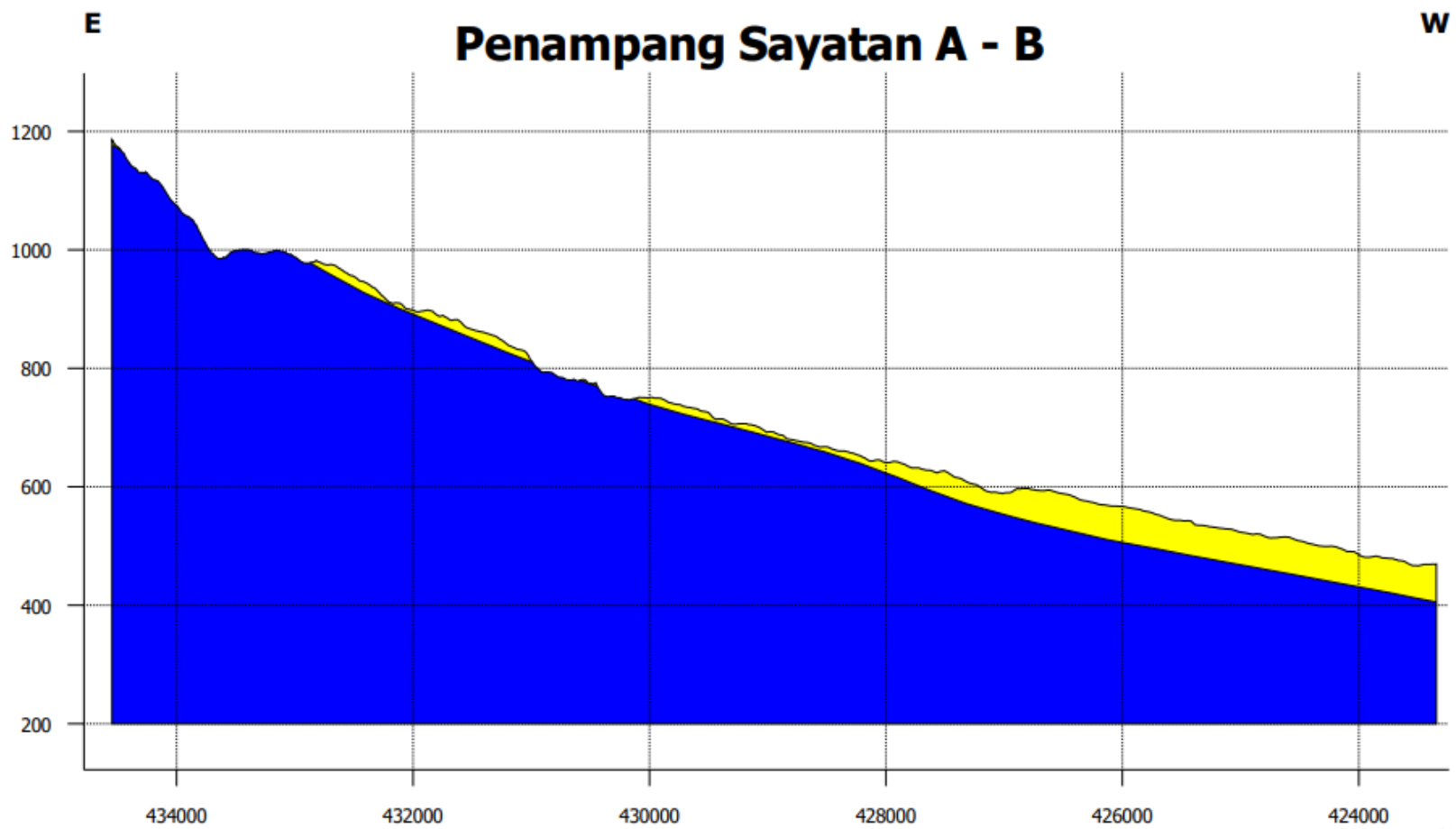
Gambar L.4- 1 Model 3D Lapisan Sedimen dan *Bedrock* di Kecamatan Dukun



**Gambar L.4- 2 Model 3D Lapisan Sedimen di Kecamatan Dukun**



**Gambar L.4- 3 Model 3D Lapisan *Bedrock* di Kecamatan Dukun**



**Gambar L.4- 4 Penampang Lapisan Sedimen dan *Bedrock* di Kecamatan Dukun**

## Lampiran 5 Surat Perizinan Penelitian

|                                                                                   |                                     |                                                        |                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |                                     | <b>FAKULTAS<br/>TEKNIK SIPIL<br/>&amp; PERENCANAAN</b> | Gedung KH. Moh. Natsir<br>Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia<br>Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584<br>T. : (0274) 890444 ext 3200, 3201<br>F. : (0274) 895330<br>E. : dekanat.ftsp@uii.ac.id<br>W. : ftsp.uii.ac.id |
| Yogyakarta, 15 Januari 2025                                                       |                                     |                                                        |                                                                                                                                                                                                                                 |
| Nomor                                                                             | : 34/WDKKA-FTSP/90/FTSP/II/2025     | Kepada:                                                |                                                                                                                                                                                                                                 |
| Sifat                                                                             | :                                   | Yth.                                                   | Kepala Badan Kesatuan Bangsa dan Politik Kabupaten Magelang.                                                                                                                                                                    |
| Lampiran                                                                          | : 1 (satu) bendel                   | Di -                                                   | <u>KOTA MUNGKID</u>                                                                                                                                                                                                             |
| Perihal                                                                           | : Permohonan Rekomendasi Penelitian |                                                        |                                                                                                                                                                                                                                 |

Dalam rangka menyelesaikan studi pada Program Studi Teknik Sipil Prorgam Sarjana Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, setiap mahasiswa diwajibkan memenuhi salah satu persyaratan akademik diantaranya pembuatan skripsi.

Sehubungan dengan hal tersebut kami mohon Bapak/Ibu memberikan ijin kepada mahasiswa kami dibawah ini, untuk memperoleh data atau keterangan yang diperlukan dalam penyusunan skripsi.

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nama             | : 1. Aryasuta Danishwara Nugrahatama<br>2. M. Firdaus Sani Wijaya Kusuma                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| NPM              | : 1. 20511195<br>2. 20511402                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| No. Telp/HP      | : 082324020002 (Aryasuta)<br>085228003796 (Firdaus)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Program Studi    | : Teknik Sipil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Alamat           | : Griya Saka Permai, Ngaglik, Sleman, Yogyakarta                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Judul Penelitian | : 1. Penyusunan Peta Kerentanan Gempa Menggunakan Metode <i>Horizontal To Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr) Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor Di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang.<br>2. Analisis Indeks Kerentanan Seismik Dan Ketebalan Sedimen Di Kecamatan Dukun Menggunakan Metode <i>Horizontal To Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr) Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor |
| Dosen Pembimbing | : Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

Skripsi tersebut semata-mata hanya bersifat dan bertujuan keilmuan serta tidak disebarluaskan untuk umum.

Demikian permohonan disampaikan atas bantuan dan kerjasamanya diucapkan terima kasih.

a.n. Dekan  
Wakil Dekan II,



I. Fitri Nugraheni, S.T., M.T., Ph.D., IPM



Tembusan:

1. Kepala DPM-PTSP Kab. Magelang
2. Kepala Bappeda dan Litbangda Kab. Magelang

**Gambar L.5- 1 Surat Permohonan Perizinan Penelitian**



**PEMERINTAH KABUPATEN MAGELANG  
DINAS PENANAMAN MODAL  
DAN PELAYANAN TERPADU SATU PINTU**

Jl. Soekarno-Hatta No.20 Kota Mungkid Telp.(0293) 788249 Fax.(0293) 789549  
Kode Pos 56511 Website: <https://dpmtsp.magelangkab.go.id>  
Email: [dpmtsp@magelangkab.go.id](mailto:dpmtsp@magelangkab.go.id)

**SURAT KETERANGAN PENELITIAN**  
Nomor: 070/052/16/2025

- Dasar:
- a. Peraturan Menteri Dalam Negeri Nomor 3 Tahun 2018 Tentang Penerbitan Surat Keterangan Penelitian;
  - b. Peraturan Bupati Magelang Nomor 19 Tahun 2023 tentang Penyelenggaraan Pelayanan Perizinan Berusaha, Perizinan Non Berusaha, dan Nonperizinan;
  - c. Surat Kepala Badan Kesatuan Bangsa dan Politik Kabupaten Magelang Nomor: 070/031/47/2025 Tanggal 16 Januari 2025, Perihal Surat Keterangan Penelitian.

Yang bertanda tangan dibawah ini, Kepala DPMTSP Kabupaten Magelang tidak keberatan dan menyetujui pelaksanaan Kegiatan Penelitian di Kabupaten Magelang yang dilaksanakan oleh Saudara:

|                  |                                                                                                                                                                               |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nama             | : Aryasuta Danishwara Nugrahatama dan M. Firdaus Sani Wijaya Kusuma                                                                                                           |
| Pekerjaan        | : Mahasiswa                                                                                                                                                                   |
| Alamat           | : Griya Saka Permai, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman, Yogyakarta                                                                                                                |
| Nomor Telp/HP    | : 082324020002                                                                                                                                                                |
| Lembaga          | : Universitas Islam Indonesia                                                                                                                                                 |
| Penanggung Jawab | : Anggit Mas Arifudin S.T., M.T.                                                                                                                                              |
| Lokasi           | : Kecamatan Dukun                                                                                                                                                             |
| Waktu            | : 18 Januari s/d 18 April 2025                                                                                                                                                |
| Peserta          | : -                                                                                                                                                                           |
| Judul Penelitian | : Penyusunan Peta Kerentanan Gempa Menggunakan Metode Horizontal To Vertical Spectral Ratio (HVSr) Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor Di Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang. |

Dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Melapor kepada Pejabat Pemerintah setempat dan berkoordinasi dengan Instansi terkait untuk mendapatkan petunjuk seperlunya;
2. Wajib menjaga tata tertib dan menaati ketentuan-ketentuan yang berlaku;
3. Memenuhi ketentuan, etika dan norma yang berlaku di lokasi penelitian;
4. Surat keterangan dapat dicabut dan dinyatakan tidak berlaku, apabila pemegang surat ini tidak menaati/mengindahkan peraturan yang berlaku; dan
5. Setelah kegiatan selesai agar menyerahkan laporan/hasilnya kepada Badan Perencanaan Pembangunan, Penelitian, dan Pengembangan Daerah Kabupaten Magelang Cq. Kepala Bidang Penelitian dan Pengembangan.

Demikian surat keterangan ini untuk digunakan seperlunya.

Dikeluarkan di : Kota Mungkid  
Pada Tanggal : 17 Januari 2025

a.n. BUPATI MAGELANG  
Plt. KEPALA DINAS PENANAMAN MODAL  
DAN PELAYANAN TERPADU SATU PINTU  
SEKRETARIS,



Ditandatangani secara elektronik oleh:  
DIDIK KRISTIA SOFIAN, S.Kom., M.Sc  
Pembina  
NIP. 197611262005011004

Tembusan:

1. Bupati Magelang;
2. Kepala Bappeda dan Litbangda;
3. Kepala Badan Kesbangpol.



- Surat ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh BSrE
- Untuk mengecek keaslian dokumen ini, bisa melakukan scan pada QR Code yang tertera

**Gambar L.5- 2 Surat Persetujuan Perizinan Penelitian**

## LAMPIRAN SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 070/052/16/2025

Tanggal : 17 Januari 2025

## Daftar Peserta Penelitian

Lokasi: Kecamatan Dukun

| No | Nama                          | NIK              | Jabatan |
|----|-------------------------------|------------------|---------|
| 1  | Aryasuta Danishwara N         | 3404120109020005 | Anggota |
| 2  | M. Firdaus Sani Wijaya Kusuma | 3302200604020001 | Anggota |



- Surat ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh BSrE
- Untuk mengecek keaslian dokumen ini, bisa melakukan scan pada QR Code yang tertera

Gambar L.5- 3 Lanjutan Surat Persetujuan Perizinan Penelitian