

**ANALISIS PARAMETER MIKROTREMOR DI KAWASAN JALUR
SESAR GRINDULU PACITAN**

SKRIPSI

Diajukan Kepada Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains



Oleh:
Rizka Zuliyanti
NIM. 14306144018

**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA**

2018

LEMBAR PERSETUJUAN

Tugas Akhir Skripsi dengan Judul

ANALISIS PARAMETER MIKROTREMOR DI KAWASAN JALUR SESAR GRINDULU PACITAN

Disusun oleh:

Rizka Zuliyanti
NIM. 14306144018

telah memenuhi syarat dan disetujui oleh Dosen Pembimbing untuk dilaksanakan
Ujian Tugas Akhir Skripsi bagi yang bersangkutan.

Yogyakarta, 24 September 2018

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Denny Darmawan, M.Sc.
NIP.197912022003121002



Nugroho Budi Wibowo, M.Si.
NIP.19840223200811011

Mengetahui,

Ketua Program Studi Fisika



Nur Kadarisman, M.Si.
NIP.196402051991011001

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir Skripsi

ANALISIS PARAMETER MIKROTREMOR DI KAWASAN JALUR SESAR GRINDULU PACITAN

Disusun oleh:

Rizka Zuliyanti
NIM. 14306144018

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Tugas Akhir Skripsi
Program Studi Fisika Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta pada tanggal 11 Oktober 2018

TIM PENGUJI

| Nama | Jabatan | Tanda Tangan | Tanggal |
|--|-----------------------|--|-----------------|
| <u>Denny Darmawan, M.Sc.</u> NIP.197912022003121002 | Ketua Penguji |  | 16 oktober 2018 |
| <u>Bambang Ruwanto, M.Si.</u> NIP.196512251991011001 | Penguji Utama |  | 16 oktober 2018 |
| <u>Nugroho Budi Wibowo, M.Si.</u> NIP.19840223200811011 | Sekretaris Penguji |  | 16 oktober 2018 |

Yogyakarta, 27 Oktober 2018

Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Dekan



Dr. Hartono

NIP. 196203291987021002

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rizka Zuliyanti

NIM : 14306144018

Program studi : Fisika

Fakultas : Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam

Judul skripsi : Analisis Parameter Mikrotremor Di Kawasan Jalur Sesar

Grindulu Pacitan.

menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar hasil penelitian dan karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim. Apabila terbukti pernyataan tidak benar, sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya.

Yogyakarta, September 2018

Yang Menyatakan,



Rizka Zuliyanti
NIM. 14306144018

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur atas ridho-Nya karya ini saya persembahkan untuk:

1. Kedua orangtua terbaik (Bapak Subroto dan Ibu Suyatmi) yang senantiasa memberikan dukungan baik secara moril, materil, maupun spiritual untuk kesuksesan saya sekaligus menjadi penyemangat hidup dan penyejuk hati.
2. Kakak (Sulastri dan Sulis Setyowati), adik (Erika Yuni Astuti), dan keluarga tercinta yang telah mempercayakan harapan terbaiknya kepada saya serta doa dan dukungan yang senantiasa mengiringi di setiap perjalanan hidup saya.
3. Pribadi saya sendiri yang selalu berusaha terbaik untuk menyelesaikan karya ini.
4. Madrasah Aliyah Sunan Prawoto dan Bapak Kholid Rosyadi, S.T. selaku wali kelas XII IPA yang telah banyak membantu dan mengantarkan saya untuk mewujudkan mimpi saya melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri. Bangga menjadi alumni Madrasah Aliyah Sunan Prawoto.
5. Almamater Universitas Negeri Yogyakarta tempat menimba ilmu selama 4 tahun. Waktu yang cukup singkat namun penuh kesan sekaligus mengajarkan saya banyak hal terutama nilai-nilai kehidupan.

MOTTO

“Dan janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tiada berputus asa dari rahmat Allah, melainkan orang-orang yang kufur”

(QS. Yusuf: 87)

“Niatkan. Persiapkan. Kerjakan. Doakan. Lawan Rintangan. Selesaikan”

(Ridwan Kamil, 2018)

KATA PENGANTAR

Assalamua'laikum Wr. Wb.

Alhamdulillah segala puji atas kehadiran Allah SWT berkat hidayah-Nya penulisan skripsi berjudul “Analisis Parameter Mikrotremor Di Kawasan Jalur Sesar Grindulu Pacitan” yang disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan guna memperoleh gelar Sarjana Sains pada program studi Fisika dapat terselesaikan dengan baik dan lancar.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, tentunya tidak terlepas dari dukungan dan andil dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Hartono selaku Dekan FMIPA UNY yang telah mengesahkan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Slamet Suyanto selaku Wakil Dekan I FMIPA UNY yang telah menyetujui izin pelaksanaan penelitian.
3. Bapak Yusman Wiyatmo, M.Si. selaku Ketua Jurusan Pendidikan Fisika yang telah membantu dalam hal administrasi.
4. Bapak Nur Kadarisman, M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika yang telah memberikan izin penelitian.
5. Bapak Denny Darmawan, M.Sc. selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan motivasi sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik dan lancar. Terimakasih untuk ilmu, waktu, dan semangatnya.
6. Bapak Nugroho Budi Wibowo, M.Si. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan arahan, bimbingan dengan sabar dan ikhlas serta membantu selama penelitian berlangsung. Terimakasih untuk ilmu dan waktunya.
7. Bapak Dr. Supahar selaku Pembimbing Akademik yang telah membimbing dan memberi nasihat selama studi di Universitas Negeri Yogyakarta.
8. Bapak/Ibu dosen Program Studi Fisika FMIPA UNY. Terimakasih untuk bekal ilmunya semoga bermanfaat dan menjadikan pahala yang tiada henti mengalir.

9. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Kelas I Stasiun Geofisika D.I Yogyakarta yang telah membantu dan memfasilitasi peralatan lapangan selama penelitian berlangsung.
10. Tim Pancagati Pacitan (Ummah, Liddiyah, Ulfa, dan Neneng) untuk kerelaan hati berjuang bersama dari awal hingga akhir.
11. Teman-teman Fisika E 2014 yang sudah seperti keluarga. Terimakasih teman-teman hebatku atas waktu 4 tahunnya yang sangat berkesan.
12. Geofisika UNY 2014 teman seperjuangan sekaligus teman diskusi yang saling membantu. Terimakasih untuk waktunya semoga silaturahmi ini tidak akan pernah putus.
13. Geofisika UNY 2013 (Teh Yulis, Teh Patim, dan Mbak Uut) yang telah meluangkan waktu di sela-sela kesibukan untuk berbagi ilmu.
14. Sahabat (Ummah dan Liddiyah) yang selalu ada dalam keadaan apapun, saling menguatkan, memotivasi, dan mengerti satu sama lain. Semoga persahabatan ini senantiasa terjalin dengan tulus.
15. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu dan memberi semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

Tidak ada kata lain yang dapat penulis ucapkan selain terima kasih yang tak terhingga. Penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, maka dari itu saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan tugas akhir ini. Semoga karya ini dapat memberi kemanfaatan bagi pembaca khususnya dan masyarakat pada umumnya serta kemajuan ilmu pengetahuan. Amin.

Wassalamua'laikum Wr. Wb.

Yogyakarta, September 2018

Penulis

Rizka Zuliyanti
NIM. 14306144018

ANALISIS PARAMETER MIKROTREMOR DI KAWASAN JALUR SESAR GRINDULU PACITAN

Oleh

Rizka Zuliyanti

NIM. 14306144018

ABSTRAK

Penelitian tentang karakteristik mikrotremor telah dilakukan di kawasan jalur Sesar Grindulu Pacitan dengan tujuan: mengetahui mikrozonasi nilai frekuensi predominan dan faktor amplifikasi; menentukan nilai kecepatan gelombang S dan ketebalan lapisan sedimen; dan mengetahui karakteristik Sesar Grindulu berdasarkan pemodelan *rose diagram*.

Penelitian ini dilakukan pada koordinat geografis $-8,19^{\circ}$ LS sampai $-8,11^{\circ}$ LS dan $111,06^{\circ}$ BT sampai $111,16^{\circ}$ BT sebanyak 27 titik ukur dengan jarak antar titiknya sejauh 1 km. Pengambilan data dilakukan menggunakan *Digital Portable Seismograph* merk Taide tipe TDL-303S dengan durasi pengukuran selama ± 30 menit untuk setiap titik pengukuran. Sinyal mikrotremor dalam domain waktu dianalisis menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr), sehingga didapatkan parameter frekuensi predominan (f_g) dan faktor amplifikasi (A_g). Parameter ini digunakan untuk mikrozonasi, analisis *ground profiles* V_s , analisis ketebalan lapisan sedimen, dan analisis arah sumber datang gelombang seismik terhadap jalur Sesar Grindulu.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai frekuensi predominan (f_g) di kawasan jalur Sesar Grindulu bervariasi antara 0,55 Hz sampai 10,5 Hz. Nilai terendah yaitu 0,55 Hz terletak pada Formasi Oyo yang memiliki topografi dataran tinggi atau perbukitan, sedangkan nilai tertinggi yaitu 10,5 Hz terletak pada Formasi Arjosari yang juga memiliki topografi dataran tinggi atau perbukitan. Nilai terendah faktor amplifikasi (A_g) di kawasan jalur Sesar Grindulu yaitu 2,85 terletak pada Formasi Arjosari dengan topografi perbukitan, untuk nilai tertinggi yaitu 27,15 terletak pada Formasi Aluvium dengan topografi Dataran Aluvial Sungai Grindulu. Nilai kecepatan gelombang S (V_s) di kawasan jalur Sesar Grindulu memiliki rentang antara 134,83 m/s sampai 2909,25 m/s dengan variasi ketebalan lapisan sedimen di kawasan jalur Sesar Grindulu bernilai 7 meter sampai 66 meter. Arah sumber datang gelombang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu rata-rata mengarah pada keberadaan jalur sesarnya.

Kata Kunci: Mikrotremor, HVSr, Sesar Grindulu.

ANALYSIS OF MICROTREMOR PARAMETERS IN GRINDULU FAULT LINE AREA IN PACITAN

By

Rizka Zuliyanti

NIM. 14306144018

ABSTRACT

Study of microtremor characteristics had been carried out in Grindulu fault line area in Pacitan with the following aims: to determine the microzonation of predominant frequency values and amplification factors around the Grindulu fault line area; to determine the value of S wave velocity and the thickness of the sediment layer; to determine the characteristics of the Grindulu Fault based on rose diagram modeling.

This study was carried out at geographical coordinates of -8.19° S to 8.11° S and 111.06° E to 111.16° E with 27 measurement points and space between each point was 1 km. Data acquisition was done using the type TDL-303S Taide brand Digital Portable Seismograph with measurement duration of ± 30 minutes for each measurement point. Microtremor signals in time domain were analyzed using Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) method, so that the predominant frequency (f_g) and amplification factors (A_g) can be obtained. These parameters were used for microzonation, analysis of ground profiles V_s , analysis of the thickness of the sediment layer, and analysis of the source directions of the seismic waves to the Grindulu Fault line.

The results showed that the predominant frequency (f_g) values in the Grindulu Fault line area varied between 0.55 Hz to 10.5 Hz. The lowest value is 0.55 Hz located in Oyo Formation which is a highland and hilly area, while the highest value is 10.5 Hz located in Arjosari Formation which is also a highland and hilly area. The amplification factor (A_g) in the Grindulu Fault line area has the lowest value of 2.85 that located in Arjosari Formation which is a hilly area, and the highest value of 27.15 located in Aluvium Formation with topography of Grindulu River alluvial plain. The S wave velocity (V_s) in the Grindulu Fault line ranged between 134.83 m/s to 2909.25 m/s with variations in the thickness of the sediment layer in the Grindulu Fault line area ranged from 7 meters to 66 meters. Source directions of seismic wave in the Grindulu Fault line area showed that they are mostly oriented to the presence of the fault line.

Keywords: Microtremor, HVSr, Grindulu Fault.

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERSETUJUAN | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN..... | iv |
| HALAMAN PERSEMBAHAN | v |
| HALAMAN MOTTO | vi |
| KATA PENGANTAR..... | vii |
| ABSTRAK | ix |
| ABSTRACT | x |
| DAFTAR ISI..... | xi |
| DAFTAR TABEL | xiii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xiv |
| DAFTAR LAMPIRAN | xvi |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| A. Latar Belakang..... | 1 |
| B. Identifikasi Masalah..... | 7 |
| C. Batasan Masalah | 7 |
| D. Rumusan Masalah..... | 8 |
| E. Tujuan Penelitian | 8 |
| F. Manfaat Penelitian | 9 |
| BAB II DASAR TEORI..... | 10 |
| A. Gempa Bumi..... | 10 |
| 1. Pengertian | 10 |
| 2. Teori Kekenyalan Elastis | 10 |
| B. Gelombang Seismik..... | 11 |
| 1. Gelombang Badan (<i>Body wave</i>) | 14 |
| 2. Gelombang Permukaan (<i>Surface wave</i>) | 16 |

| | |
|--|-----------|
| C. Mikrotremor..... | 19 |
| D. <i>Fast Fourier Transform</i> (FFT) | 20 |
| E. <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> (HVSr)..... | 23 |
| F. Frekuensi Predominan | 25 |
| G. Faktor Amplifikasi..... | 27 |
| H. <i>Ground Profiles</i> V_s | 28 |
| I. Ketebalan Lapisan Sedimen (H)..... | 30 |
| J. Sesar Grindulu | 31 |
| K. <i>H/V Rotate</i> dan <i>Rose Diagram</i> | 33 |
| L. Geologi Regional Daerah Penelitian | 34 |
| M. Kerangka Berpikir | 36 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 38 |
| A. Waktu dan Tempat Penelitian..... | 38 |
| B. Alat dan Bahan Penelitian | 38 |
| C. Teknik Pengambilan Data..... | 43 |
| D. Teknik Analisis Data | 49 |
| E. Diagram Alir Penelitian..... | 56 |
| BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN..... | 57 |
| A. Mikrozonasi Gempa Bumi..... | 57 |
| 1. Mikrozonasi nilai frekuensi dominan(f_g)..... | 57 |
| 2. Mikrozonasi nilai faktor amplifikasi (A_g) | 63 |
| B. <i>Ellipticity Curve</i> dan <i>Ground Profiles</i> V_s | 67 |
| C. Penampang Seismik..... | 72 |
| D. <i>Solid Model</i> Amplifikasi..... | 77 |
| E. <i>Rose Diagram</i> | 79 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 82 |
| A. Kesimpulan..... | 82 |
| B. Saran | 83 |
| DAFTAR PUSTAKA | 84 |
| LAMPIRAN..... | 89 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 1. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan oleh Kanai..... | 26 |
| Tabel 2. Zonasi risiko amplifikasi berdasarkan nilai faktor amplifikasi oleh Marjiyono | 28 |
| Tabel 3. Klasifikasi <i>site</i> berdasarkan nilai V_s oleh SNI-1726..... | 30 |
| Tabel 4. Standar operasional pengukuran mikrotremor | 48 |
| Tabel 5. Nilai <i>threshold</i> untuk σ_A dan $\sigma_f(f_g)$ | 51 |
| Tabel 6. Hasil klasifikasi nilai <i>site</i> berdasarkan nilai kecepatan gelombang S (V_s) | 70 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 1. Peta bahaya gempa bumi di Kabupaten Pacitan | 1 |
| Gambar 2. Pola kelurusan struktur sesar di Kabupaten Pacitan | 3 |
| Gambar 3. Ilustrasi teori kekenyalan elastis | 11 |
| Gambar 4. Komponen tegangan (<i>stress</i>) | 12 |
| Gambar 5. Gelombang Primer | 15 |
| Gambar 6. Gelombang Sekunder | 16 |
| Gambar 7. Gelombang Love | 17 |
| Gambar 8. Gelombang Rayleigh | 18 |
| Gambar 9. Ilustrasi pergerakan sesar | 32 |
| Gambar 10. <i>Digital Portable Seismograph</i> merk Taide tipe TDL-303S | 41 |
| Gambar 11. Peralatan tambahan pengambilan data | 42 |
| Gambar 12. Desain survei penelitian di kawasan jalur Sesar Grindulu | 44 |
| Gambar 13. Titik pengambilan data di kawasan jalur Sesar Grindulu | 46 |
| Gambar 14. Tampilan hasil pengukuran sinyal mikrotremor pada <i>software</i> Monost | 47 |
| Gambar 15. Contoh <i>cutting</i> sinyal pada titik D36 | 49 |
| Gambar 16. Kurva <i>H/V</i> hasil analisis di Matlab R2010a | 50 |
| Gambar 17. <i>Ground profiles</i> nilai kecepatan gelombang S (V_s) dan kedalaman (<i>depth</i>) | 52 |
| Gambar 18. Lintasan penampang seismik pada lintasan 1 | 54 |
| Gambar 19. Model 3D ketebalan lapisan sedimen dan faktor amplifikasi | 54 |
| Gambar 20. Pemodelan orientasi Sesar Grindulu | 55 |
| Gambar 21. Diagram alir penelitian | 56 |
| Gambar 22. Topografi 3D yang di- <i>overlay</i> peta geologi regional Pacitan | 59 |
| Gambar 23. Mikrozonasi nilai frekuensi dominan (f_g), topografi dan geologi di kawasan jalur Sesar Grindulu | 60 |
| Gambar 24. Batuan breksi gunung api di titik D07 | 63 |
| Gambar 25. Mikrozonasi nilai faktor amplifikasi (A_g), topografi dan geologi di kawasan jalur Sesar Grindulu | 65 |
| Gambar 26. Dampak gerakan tanah di titik D12 | 66 |
| Gambar 27. Kurva dari metode <i>ellipticity curve</i> di kawasan jalur Sesar Grindulu | 67 |
| Gambar 28. Lintasan penampang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu | 73 |
| Gambar 29. Model penampang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu | 76 |
| Gambar 30. Model 3D zonasi persebaran faktor amplifikasi di kawasan jalur Sesar Grindulu | 78 |

| | |
|---|----|
| Gambar 31. Model sayatan persebaran faktor amplifikasi di kawasan jalur Sesar Grindulu | 79 |
| Gambar 32. Persebaran arah gelombang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu | 80 |

DAFTAR LAMPIRAN

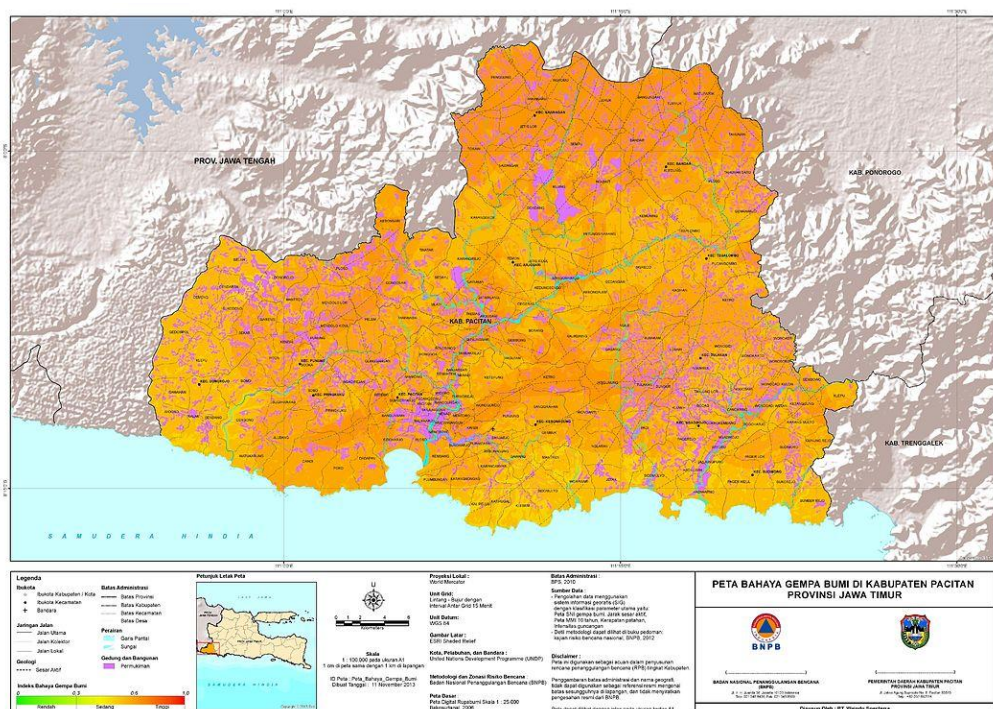
| | |
|---|-----|
| Lampiran 1. Tahapan Pengolahan Sinyal Mikrotremor | 88 |
| Lampiran 2. Pemrograman Matlab R2010a..... | 116 |
| Lampiran 3. Hasil Pengolahan Data | 121 |
| Lampiran 4. Peta Geologi Regional Pacitan | 145 |
| Lampiran 5. <i>Checklist</i> Pengambilan Data | 146 |
| Lampiran 6. Dokumentasi Lapangan..... | 147 |

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kabupaten Pacitan merupakan bagian dari Provinsi Jawa Timur yang terletak di ujung barat daya dan berbatasan langsung dengan Provinsi Jawa Tengah. Kabupaten Pacitan terletak pada koordinat geografis antara $-8,17^{\circ}$ LS sampai $-7,55^{\circ}$ LS dan $110,55^{\circ}$ BT sampai $111,25^{\circ}$ BT. Berdasarkan topografinya, 85% kondisi alam di Kabupaten Pacitan merupakan daerah perbukitan dan berada pada zona pertemuan lempeng tektonik. Kondisi inilah yang menyebabkan daerah Pacitan rawan terhadap bencana gerakan tanah dan gempa bumi.



Gambar 1. Peta bahaya gempa bumi di Kabupaten Pacitan (Syamsol, 2013).

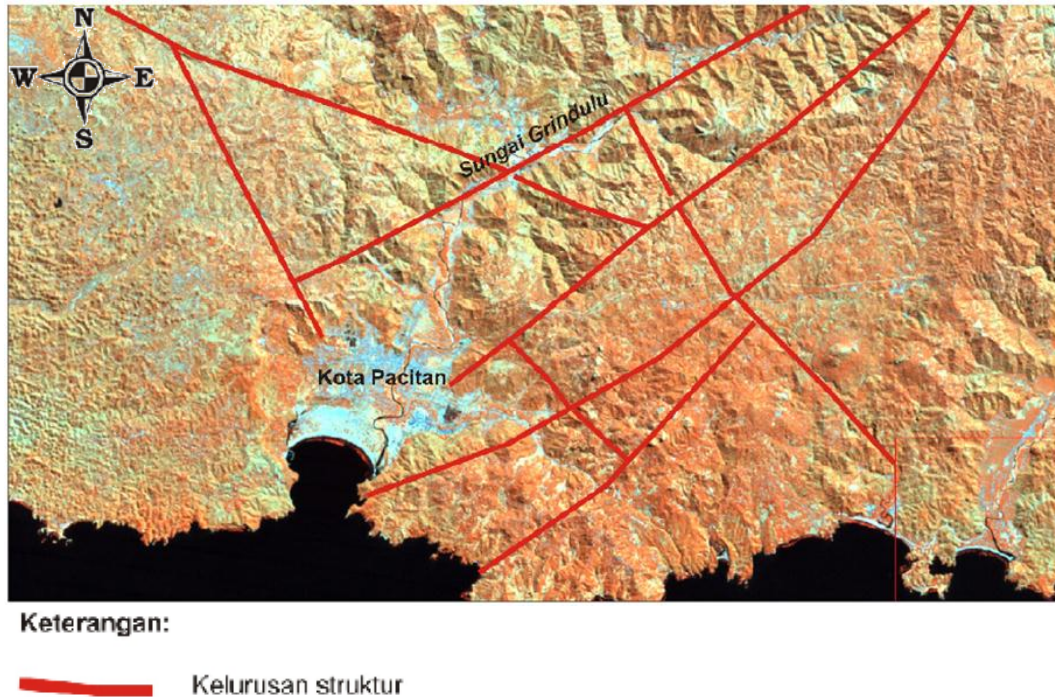
Gempa bumi adalah getaran di permukaan bumi yang disebabkan oleh pergerakan mendadak dari batuan karena proses pelepasan akumulasi energi regangan (*strain*) di luar batas elastis batuan. Umumnya gempa bumi terjadi akibat pelepasan energi yang dihasilkan oleh pergerakan lempeng tektonik (Kumala dan Wahyudi, 2016).

Aktivitas gempa bumi di Pacitan dikendalikan oleh adanya gerak aktif Lempeng Indo-Australia yang bergerak relatif ke arah utara-timur laut dengan kecepatan 7 cm/tahun, menunjam di bawah Lempeng Eurasia yang relatif diam. Interaksi kedua lempeng tersebut menyebabkan terjadinya pembentukan struktur geologi berupa lipatan, sesar geser, dan sesar normal yang berarah barat laut-tenggara, barat daya-timur laut, utara-selatan, dan barat-timur (Hastuti, 2009).

Sesar (*fault*) adalah rekahan pada batuan yang memperlihatkan gejala pergeseran (Abdullah *et al.*, 2003). Salah satu sesar yang terletak di daerah Pacitan adalah Sesar Grindulu yang bergerak aktif dengan pergerakan 5 mm/tahun yang melintang sejauh kurang lebih 50 km dan diperkirakan keberadaannya sejajar dengan Sungai Grindulu (Kumala dan Wahyudi, 2016). Penggambaran mengenai pola struktur Sesar Grindulu ditunjukkan pada Gambar 2.

Sesar Grindulu membentang di 5 kecamatan, yaitu Kecamatan Bandar, Nawangan, Punung, Arjosari, serta Donorojo (Indrianti *et al.*, 2013). Sesar Grindulu dapat berpotensi menjadi sumber gempa bumi di daerah Pacitan. Aktivitas sesar dapat menimbulkan kerusakan yang cukup berarti meskipun

magnitudo atau kekuatan gempanya tidak terlalu besar, karena mempunyai kedalaman dangkal dan dekat dengan pemukiman serta aktivitas manusia.



Gambar 2. Pola kelurusan struktur sesar di Kabupaten Pacitan (Hidayat *et al.*, 2012).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai karakteristik Sesar Grindulu di antaranya: Parera *et al.* (2015) melakukan penelitian menggunakan data anomali gravitasi dari hasil anomali udara bebas (FAA) dan data topografi berdasarkan citra satelit dari TOPEX yang diolah menggunakan *software* GRAV3D dan metode *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk menentukan pola sesar yang ada di Pacitan; Indrianti *et al.* (2013) melakukan penelitian menggunakan data anomali gravitasi hasil digitasi peta anomali *Bouguer* lembar Pacitan yang dibuat dengan ukuran *grid* 64 x 100 serta spasi *grid* 555 meter sebanyak 13 lintasan menggunakan

metode *moving average* dengan lebar *window* berukuran 21x21 untuk memodelkan struktur geologi bawah permukaan di Pacitan.

Parera *et al.* (2015) melalui hasil penelitiannya mengidentifikasi bahwa Sesar Grindulu berada pada kedalaman antara 4.000 meter sampai 6.000 meter dan berorientasi barat daya-timur laut. Sesar Grindulu memiliki jenis sesar geser dan sesar turun sedikit *oblique* yang diperoleh dari analisis struktur jenis patahan yang dibuat melintang tegak lurus di wilayah dugaan Sesar Grindulu berdasarkan anomali gravitasi. Indrianti *et al.* (2013) melalui hasil penelitiannya memvisualisasikan bahwa Sesar Grindulu merupakan sesar yang tampak di permukaan dan melewati daerah Pacitan sampai di lapisan batuan dasar pada kedalaman 2 km sampai 3,7 km dengan densitas (massa jenis) lapisan batuan dasar sebesar $2,81 \text{ g/cm}^3$ yang diperoleh dari nilai kontras batuan.

Keberadaan Sesar Grindulu di daerah Pacitan dapat juga dianalisis menggunakan pemodelan *rose diagram*. Pemodelan *rose diagram* merupakan representasi polarisasi horizontal dari gerakan tanah pada setiap titik yang diukur dari koordinat utara sebagai acuannya dan bertujuan untuk mengetahui arah datang sumber gelombang seismik dalam hal ini yaitu keberadaan Sesar Grindulu. Pischiutta *et al.* (2017) telah melakukan penelitian mengenai karakteristik Sesar Vado di Corno yang berada di Italia Tengah menggunakan data mikrotremor dan memperoleh hasil bahwa orientasi atau arah datang sumber gelombang seismik rata-rata tegak lurus terhadap jalur sesarnya.

Menurut Nakamura (1989), mikrotremor atau *ambient noise* merupakan getaran tanah dengan amplitudo dalam mikrometer yang dapat ditimbulkan oleh peristiwa alam atau buatan yang muncul di sekitar lokasi pengukuran dan dapat digunakan untuk menentukan parameter dinamika tanah. Salah satu metode yang dapat digunakan dalam analisis mikrotremor adalah metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Parameter yang dihasilkan dari analisis dengan metode HVSr adalah frekuensi dominan dan faktor amplifikasi. Parameter-parameter tersebut dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik struktur geologi yang dapat merusak bangunan akibat gempa bumi (Sungkono dan Santoso, 2011).

Tingkat kerusakan bangunan dan bahaya gempa bumi tidak hanya dipengaruhi oleh aktivitas sesar, tetapi juga dari karakteristik struktur geologinya atau efek tapak lokal. Fenomena tapak lokal yang pernah terjadi yaitu gempa bumi pada 27 Mei 2006 di Bantul yang memiliki magnitudo relatif kecil, namun mengakibatkan lebih dari 6.000 orang meninggal dunia dan 1.000.000 orang kehilangan tempat tinggal (Sunardi *et al.*, 2012).

Hardaningrum *et al.* (2016) memaparkan bahwa karakteristik struktur geologi yang berupa lapisan sedimen lunak tebal dapat mengakibatkan penguatan getaran gelombang gempa atau amplifikasi ketika terjadi gempa bumi. Hal ini dipengaruhi oleh perbedaan parameter perambatan gelombang di batuan dasar dan sedimen sehingga mengakibatkan adanya variasi nilai faktor amplifikasi dan variasi nilai frekuensi dominan.

Berdasarkan peta geologi lembar Pacitan (Samodra *et al.*, 1992), secara umum daerah Pacitan tersusun oleh batuan sedimen klastik, batuan gunung api, dan batuan terobosan-terobosan yang terbentuk melalui proses endapan. Tipe struktur geologi yang paling mungkin mengakibatkan kerusakan yang parah akibat bencana gempa bumi adalah struktur yang terdiri dari lapisan lapuk (*soft soil*) yang terlalu tebal di atas lapisan keras (*bedrock*). Struktur geologi regional Pacitan didominasi oleh lapisan lapuk yaitu lapisan aluvium (Qa). Menurut Abdullah *et al.* (2003) lapisan aluvium yang terdapat di Pacitan terbentuk karena adanya endapan yang terdapat di Sungai Grindulu bagian tengah sampai hilir yaitu berupa material lepas dari hasil rombakan dan pelapukan batuan berumur lebih tua yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, dan tanah.

Wibowo *et al.* (2018b) melalui hasil penelitiannya telah menginterpretasi ketebalan lapisan sedimen di Kota Pacitan dan memperoleh hasil bahwa ketebalan lapisan sedimen di Kota Pacitan bagian Utara bervariasi dari 21 sampai 103 meter, di Kota Pacitan bervariasi dari 16 sampai 66 meter, dan di Kota Pacitan bagian Selatan bervariasi dari 25 sampai 275 meter. Nilai ketebalan lapisan sedimen yang diperoleh cukup tinggi dikarenakan kawasan Kota Pacitan berada di Dataran Aluvial Sungai Grindulu yang memiliki potensi mengalami amplifikasi yang cukup tinggi jika terjadi gempa bumi.

Berdasarkan pemaparan di atas, maka perlu dilakukan penelitian terkait potensi gempa bumi di kawasan jalur Sesar Grindulu. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi risiko bahaya gempa bumi dan dapat menjadi salah satu

pertimbangan Pemerintah Daerah Pacitan dalam mengatur tata ruang dan wilayah guna pengembangan dan pembangunan yang akan dilakukan ke depannya.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya dapat diidentifikasi masalah-masalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan stuktur geologi regional dan tektonik, daerah Pacitan merupakan wilayah yang dikategorikan rawan bencana gerakan tanah dan gempa bumi.
2. Terbatasnya informasi mengenai struktur bawah permukaan di kawasan jalur Sesar Grindulu yang ditunjukkan dengan tidak adanya data bor.
3. Belum ada penelitian terkait karakteristik Sesar Grindulu menggunakan data mikrotremor.

C. Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah yang diteliti adalah sebagai berikut:

1. Lokasi pengambilan data terletak di kawasan jalur Sesar Grindulu bagian selatan dengan batasan koordinat geografis $-8,19^{\circ}$ LS sampai $-8,11^{\circ}$ LS dan $111,06^{\circ}$ BT sampai $111,16^{\circ}$ BT yang meliputi kawasan jalur Sesar Grindulu di Kecamatan Pringkuku, Pacitan, dan Arjosari.
2. Pengambilan data mikrotremor menggunakan *Digital Portable Seismograph* merk Taide tipe TDL-303S.

3. Standar operasional pengambilan data mengacu pada aturan yang telah ditetapkan oleh *SESAME European Research Project*.

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah di atas maka dapat dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mikrozonasi nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi di kawasan jalur Sesar Grindulu?
2. Berapa nilai kecepatan gelombang S (V_s) dan ketebalan lapisan sedimen di kawasan jalur Sesar Grindulu?
3. Bagaimana keterkaitan antara arah sumber datang gelombang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu dengan keberadaan jalur sesar Grindulu?

E. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini dimaksudkan untuk:

1. Mengetahui mikrozonasi nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi di kawasan jalur Sesar Grindulu.
2. Menentukan nilai kecepatan gelombang S (V_s) dan ketebalan lapisan sedimen di kawasan jalur Sesar Grindulu.
3. Mengetahui keterkaitan antara arah sumber datang gelombang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu dengan keberadaan jalur sesar Grindulu.

F. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan mampu memberi manfaat sebagai berikut:

- a. Bagi mahasiswa
 - Sebagai bahan studi literatur terkait potensi gempa bumi di daerah Pacitan khususnya di kawasan jalur Sesar Grindulu.
- b. Bagi pemerintah daerah
 - Memberi informasi mengenai potensi gempa bumi di daerah Pacitan agar pemerintah setempat lebih tanggap terhadap bencana alam.
 - Dapat menjadi bahan tinjauan bagi Pemerintah Daerah Pacitan dalam upaya mitigasi bencana gempa bumi yaitu sebagai pertimbangan dalam pembangunan infrastruktur guna mengurangi dampak kerusakan akibat gempa bumi di daerah Pacitan.
- c. Bagi masyarakat
 - Menambah pengetahuan bagi masyarakat di sekitar kawasan jalur Sesar Grindulu mengenai potensi kegempaan dan upaya mitigasi bencana gempa bumi.
 - Memberikan informasi kepada masyarakat untuk menumbuhkan kesadaran dan meningkatkan kewaspadaan terhadap bencana gempa bumi yang tidak dapat diprediksi waktu terjadiannya.

BAB II

DASAR TEORI

A. Gempa Bumi

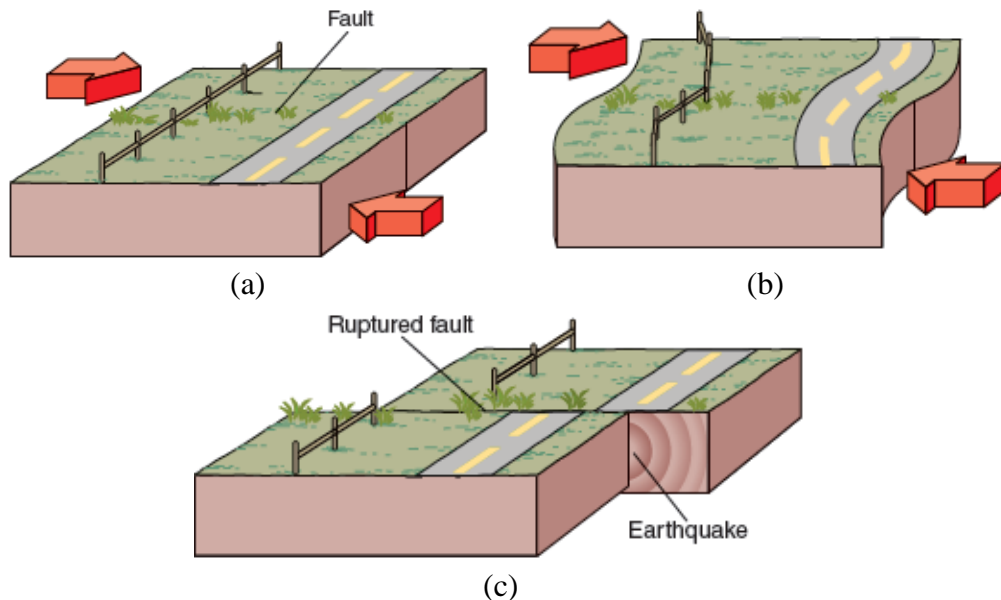
1. Pengertian

Gempa bumi adalah peristiwa bergetar atau bergoncangnya bumi karena pergerakan atau pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi yang terjadi secara tiba-tiba. Pergerakan tiba-tiba dari lapisan batuan di dalam bumi menghasilkan energi yang dipancarkan ke segala arah berupa gelombang seismik. Ketika gelombang seismik mencapai permukaan bumi, getarannya dapat merusak segala sesuatu yang berada di permukaan bumi seperti bangunan dan infrastruktur lainnya sehingga dapat menimbulkan korban jiwa dan kerugian material. Gempa bumi dapat disebabkan oleh aktivitas pergerakan lempeng tektonik yang disebut gempa bumi tektonik maupun aktivitas gunung berapi yang disebut gempa bumi vulkanik (Sunarjo *et al.*, 2012).

2. Teori Kekenyalan Elastis

Teori kekenyalan elastis (*ellastic rebound theory*) menyatakan bahwa gempa bumi terjadi akibat pergerakan sesar di dalam kerak bumi yang disebabkan oleh pelepasan mendadak dari energi *strain* elastik apabila melampaui batas kekuatan batuan, sehingga batuan tersebut akan mengalami patah (*rupture*) atau kembali ke bentuk semula (*rebound*). Teori kekenyalan

elastis dapat menjelaskan mekanisme penyebab terjadinya gempa bumi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



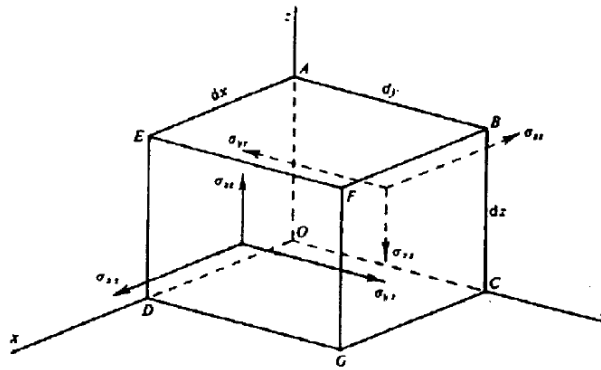
Gambar 3. Ilustrasi teori kekenyalan elastis (Plummer *et al.*, 2016).

Gambar 3(a) menunjukkan keadaan awal pada batuan di kawasan sesar (*fault*) dengan *stress* yang bekerja padanya. Gambar 3(b) menunjukkan bahwa *stress* menyebabkan *strain* terakumulasi dalam jangka waktu lama dan menyebabkan perubahan bentuk (deformasi) pada batuan. Gambar 3(c) menunjukkan bahwa *strain* yang telah terakumulasi dalam waktu yang lama hingga melampaui batas keelastisan batuan menyebabkan batuan tersebut patah di sepanjang jalur sesarnya disertai dengan pelepasan energi ke segala arah yang disebut gempa bumi.

B. Gelombang Seismik

Menurut Nurdiyanto *et al.* (2011), gelombang seismik merupakan gelombang yang merambat ke seluruh bagian bumi akibat adanya suatu

lapisan batuan yang patah atau adanya suatu ledakan. Gelombang seismik termasuk dalam gelombang elastik karena melalui medium bumi yang bersifat elastik, oleh karena itu perambatan gelombangnya bergantung pada elastisitas batuan yang dilaluinya. Konsep elastisitas berhubungan dengan deformasi batuan yang dialami oleh suatu medium akibat adanya gaya tekan (*stress*) yang menyebabkan perubahan ukuran dan bentuk (*strain*) (Telford *et al.*, 1990). Jika ditinjau dari *stress* maupun *strain* yang bekerja pada sebuah medium homogen berupa kubus seperti pada Gambar 4, persamaan gelombang seismik dapat dijabarkan sebagai berikut.



Gambar 4. Komponen tegangan (*stress*) (Telford *et al.*, 1990).

Dalam bentuk tiga dimensi komponen (u, v, w) merupakan komponen perpindahan dari titik O pada arah sumbu (x, y, z), sehingga regangan (*strain*) ϵ normal dan geser masing-masing dapat dijabarkan dalam persamaan (1) dan (2) berikut:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \epsilon_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \epsilon_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2)$$

Hubungan antara *stress* (σ) dan *strain* (ε) normal ataupun geser dari bentuk diferensiasi Hukum Hooke dapat dirumuskan dengan

$$\sigma_{ii} = \lambda' \theta + 2\mu \varepsilon_{ii} \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \mu \varepsilon_{ij} \quad i, j = x, y, z; i \neq j \quad (4)$$

dengan λ' adalah konstanta Lamé, dilatasi θ adalah perubahan volume per satuan volume yang disebabkan oleh perubahan regangan (*strain*) normal yang didefinisikan pada persamaan (5). Kemudian modulus geser (rigiditas) μ adalah setengah rasio antara tegangan (*stress*) geser dan *strain* geser yang didefinisikan pada persamaan (6) (Shearer, 2009).

$$\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\sigma_{xy}}{2\varepsilon_{xy}} \quad (6)$$

Berdasarkan Hukum II Newton, jika suatu benda tidak mengalami perubahan massa maka gaya merupakan perkalian antara massa benda (m) dan percepatan (a). Apabila dikaitkan dengan densitas $\rho = \frac{m}{V}$, dimana satuan volume V adalah $dx dy dz$ maka dapat didefinisikan persamaan (7)

$$F = \rho V a = \rho(dx dy dz) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (7)$$

Total gaya per satuan volume pada benda (medium) kubus pada arah sumbu x adalah

$$\rho(dx dy dz) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz$$

$$\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \quad (8)$$

Gelombang seismik merambat pada medium ke segala arah. Secara tiga dimensi perambatan gelombang dinyatakan dengan arah sumbu (x, y, z) . Jika dilakukan operasi diferensial pada persamaan (8), kemudian pada ruas kanan disubstitusi ke persamaan (3) dan (4) maka didapatkan persamaan (9) (Telford *et al.*, 1990).

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= (\lambda' + \mu) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \\ &\quad + \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \frac{\rho}{(\lambda' + 2\mu)} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} &= \nabla^2 \theta \end{aligned} \quad (9)$$

Persamaan (9) merupakan persamaan dasar gelombang seismik yang digunakan untuk menentukan kecepatan rambat gelombang seismik berdasarkan tipe gelombangnya. Gelombang seismik terdiri dari dua tipe yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*).

1. Gelombang badan (*Body wave*)

Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam media elastik dengan arah perambatan gelombangnya ke seluruh bagian di dalam bumi serta memiliki efek kerusakan yang cukup kecil. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjalaran gelombang, gelombang badan dibedakan menjadi dua yaitu:

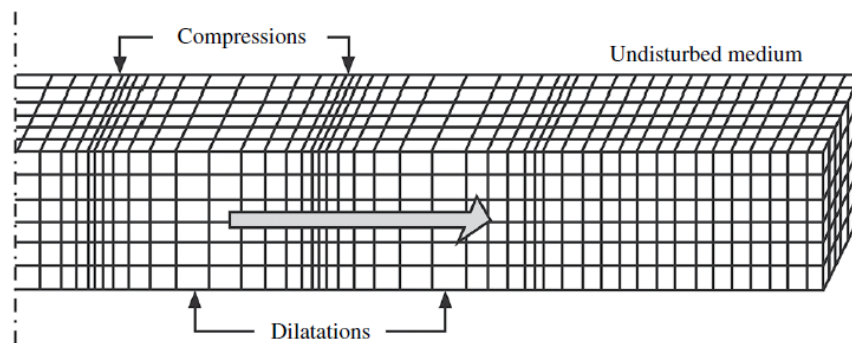
a. Gelombang Primer (P)

Gelombang P merupakan gelombang badan yang disebut sebagai gelombang kompresi atau gelombang longitudinal. Gelombang P memiliki waktu penjaran gelombang paling cepat yaitu antara 1,5 km/s sampai 8 km/s pada kerak bumi. Kecepatan rambat gelombang P dapat dinyatakan menggunakan persamaan (10) (Lowrie, 2007).

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (10)$$

dengan V_p adalah kecepatan gelombang P (m/s), K adalah modulus Bulk (Pa), μ adalah rigiditas atau modulus geser (N/m^2), ρ adalah densitas batuan (kg/m^3).

Gelombang P memiliki arah gerakan partikel yang searah dengan arah rambat gelombangnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Gelombang P dapat menjalar pada semua medium yaitu padat, cair, dan gas.



Gambar 5. Gelombang Primer (Elnashai dan Sarno, 2008)

b. Gelombang Sekunder (S)

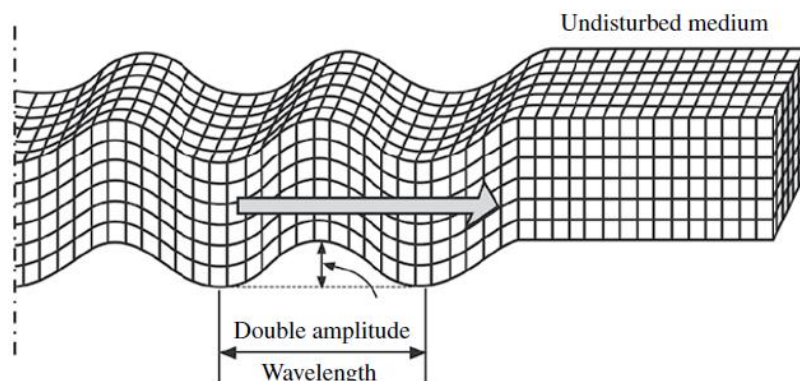
Gelombang S disebut sebagai gelombang geser (*shear*) atau gelombang transversal. Gelombang S memiliki waktu penjaran lebih rendah

dibandingkan dengan gelombang P. Kecepatan rambat gelombang S dapat dinyatakan menggunakan persamaan (11) (Lowrie, 2007).

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (11)$$

dengan V_s adalah kecepatan gelombang S (m/s), μ adalah rigiditas atau modulus geser (N/m^2), ρ adalah densitas batuan (kg/m^3).

Gelombang S memiliki arah gerakan partikel tegak lurus dengan arah rambat gelombangnya seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Gelombang S hanya dapat menjalar pada medium padat. Dalam medium padat, gelombang S menjalar dengan kecepatan antara 3 km/s sampai 4 km/s. Ketika menjalar di bawah permukaan, gelombang S memberikan regangan geser pada material yang dilaluinya (Thompson dan Turk, 1997).



Gambar 6. Gelombang Sekunder (Elnashai dan Sarno, 2008)

2. Gelombang permukaan (*Surface wave*)

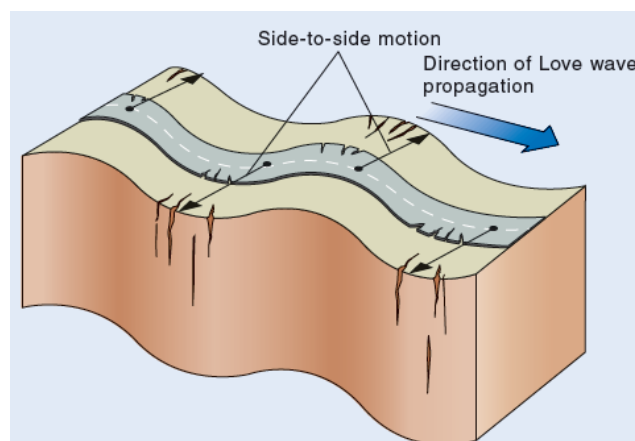
Gelombang permukaan adalah gelombang yang menjalar di atas permukaan bumi. Gelombang permukaan lebih berpotensi menimbulkan kerusakan pada bangunan, karena memiliki frekuensi rendah dan amplitudo besar. Amplitudo gelombang permukaan akan mengecil terhadap kedalaman

penjalaran gelombang yang diakibatkan oleh dispersi gelombang. Ada dua tipe gelombang permukaan yaitu:

a. Gelombang Love

Gelombang Love pertama kali diperkenalkan oleh seorang matematikawan berkebangsaan Inggris bernama A.E.H Love pada tahun 1911. Gelombang Love terbentuk karena adanya interferensi konstruktif dari gelombang S yang arah gerakan partikelnya horizontal seperti pada Gambar 7. Hal inilah yang menyebabkan tanah mengalami pergeseran ke arah horizontal. Gelombang Love memiliki frekuensi dominan rendah dan kecepatan rambat gelombang tinggi. Gelombang Love memiliki kecepatan rambat gelombang (V_L) lebih besar dari kecepatan gelombang S di permukaan bumi (V_{s1}) dan lebih kecil dari kecepatan gelombang S di lapisan lebih dalam (V_{s2}), sehingga gelombang Love hanya dapat merambat pada permukaan bumi. Besarnya kecepatan gelombang Love yaitu (Lowrie, 2007):

$$V_{s1} < V_L < V_{s2}$$

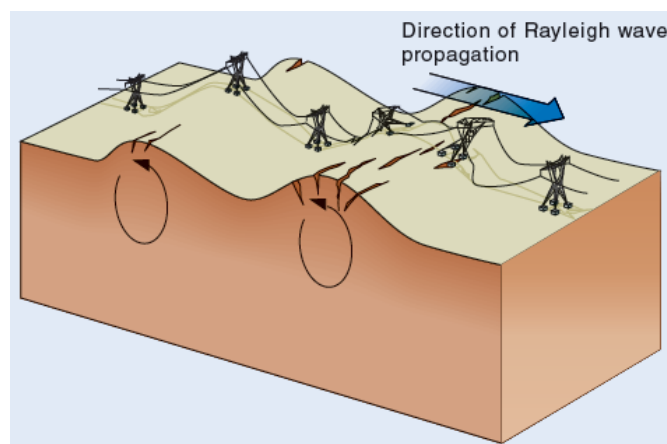


Gambar 7. Gelombang Love (Plummer *et al.*, 2016)

b. Gelombang Rayleigh

Gelombang Rayleigh pertama kali diperkenalkan oleh Lord Rayleigh pada tahun 1885. Gelombang Rayleigh terbentuk karena adanya interaksi antara gelombang SV (gelombang S yang arah gerakan partikelnya terpolarisasi pada bidang vertikal) dan gelombang P, kemudian merambat secara paralel terhadap permukaan bumi. Gerakan partikel dari gelombang Rayleigh adalah eliptik tegak lurus terhadap arah penjalarannya seperti pada Gambar 8. Gelombang Rayleigh merambat pada permukaan bumi dengan medium berlapis maupun homogen yang memiliki frekuensi dominan tinggi dan kecepatan rambat gelombangnya rendah. Besarnya kecepatan gelombang Rayleigh (V_R) yaitu (Lowrie, 2007):

$$V_R \approx 0,92 V_s$$



Gambar 8. Gelombang Rayleigh (Plummer *et al.*, 2016)

Gelombang Rayleigh bersifat dispersif dimana periode gelombang yang lebih panjang dapat merambat pada material yang lebih dalam. Hal ini menjadikan gelombang Rayleigh dapat digunakan untuk menentukan struktur keras bawah permukaan.

C. Mikrotremor

Menurut Arai dan Tokimatsu (2005), mikrotremor (*ambient noise*) merupakan getaran tanah dengan amplitudo dalam orde mikrometer yang ditimbulkan oleh peristiwa alam ataupun aktivitas manusia yang dapat menggambarkan kondisi geologi suatu wilayah dekat permukaan. Sumber getaran mikrotremor yang berasal dari peristiwa alam di antaranya adalah efek gelombang laut, kegiatan atmosfer, interaksi angin dengan tanaman maupun pepohonan, aliran air sungai, dan getaran alamiah dari tanah. Sumber getaran mikrotremor yang berasal dari aktivitas manusia di antaranya adalah getaran mesin pabrik, kebisingan lalu lintas kendaraan, dan langkah kaki manusia. Mikrotremor juga dapat dikatakan sebagai getaran harmonik alami di bawah permukaan tanah yang terjadi secara terus-menerus sehingga terjebak pada lapisan sedimen dan terpantulkan akibat adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi tetap (Pratiwi *et al.*, 2017).

Mikrotremor merupakan getaran tanah dengan amplitudo pergeseran sekitar 0,1 μm hingga 1 μm dan amplitudo kecepatan 0,001 cm/s hingga 0,01 cm/s. Mikrotremor diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan rentang periodenya, yaitu jenis pertama adalah mikrotremor periode pendek dengan periode kurang dari 1 sekon yang terkait dengan struktur bawah permukaan dangkal dengan ketebalan sedimen beberapa puluh meter dan jenis kedua adalah mikrotremor periode panjang dengan periode lebih dari 1 sekon yang terkait dengan struktur tanah yang lebih dalam atau menunjukkan dasar dari batuan keras (Mirzaoglu dan Dykmen, 2003).

D. Fast Fourier Transform (FFT)

Transformasi Fourier adalah metode yang digunakan untuk mengubah sinyal dalam bentuk gelombang seismik dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Berikut formula transformasi Fourier (Park, 2010):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (12)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\{\cos(2\pi ft) - j\sin(2\pi ft)\}dt \quad (13)$$

dengan $X(f)$ adalah fungsi sinyal dalam domain frekuensi, $x(t)$ adalah fungsi sinyal dalam domain waktu, $e^{-j2\pi ft}$ adalah fungsi *kernel*, $j = \sqrt{-1}$, f dalam Hertz, dan t dalam sekon. Persamaan (12) memiliki nilai apabila memenuhi syarat berikut (Park, 2010):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (14)$$

Transformasi Fourier pada persamaan (12) masih bersifat kontinyu, sehingga perlu diubah ke dalam bentuk diskrit agar memudahkan perhitungan secara komputasi dengan cara mengkonversi operasi integral ke operasi penjumlahan pada persamaan (15), dan dalam bentuk eksponensial yaitu ω menjadi θn pada persamaan (16), sehingga dihasilkan algoritma *Discrete Time Fourier Transform* (DTFT) pada persamaan (17), dengan θ adalah frekuensi angular dalam satuan radian per sampel.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rightarrow \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \quad (15)$$

$$e^{-j\omega} \rightarrow e^{-j\theta n} \quad (16)$$

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} x[n]e^{-j\theta n} \quad (17)$$

Dalam algoritma DFTF, θ belum bersifat diskrit pada domain frekuensi, sehingga perlu dilakukan *sampling* pada domain frekuensi. Sampel yang digunakan berada pada rentang 0 hingga 2π yang ekuivalen dengan 0 hingga f_s Hz. *Sampling* dilakukan dengan membagi rentang sampel sedemikian rupa sehingga didapatkan data slot frekuensi berjumlah N dengan interval yang sama. Jika N adalah panjang data sinyal yang akan dikenakan transformasi Fourier, maka:

$$\text{unit frekuensi} = \frac{2\pi}{N}$$

sehingga pada *sampling* frekuensi terdapat $\frac{2\pi}{N}$ yang merepresentasikan interval *sampling* frekuensi (dalam satuan frekuensi). Frekuensi digital (θ) yang telah dilakukan *sampling* dapat direpresentasikan sebagai $\theta[k]$, dengan k adalah indeks frekuensi bilangan bulat. Pada persamaan (18) didefinisikan nilai $\theta[k]$ untuk Transformasi Fourier dengan panjang data N adalah

$$\theta[k] = \frac{2\pi k}{N} \quad (18)$$

Kemudian substitusi θ ke $\theta[k]$ pada persamaan (17) akan didapatkan persamaan yang dikenal dengan algoritma *Discrete Fourier Transform* (DFT) dengan indeks frekuensi diskrit k , sinyal input $x[n]$ dengan indeks waktu diskrit n , dan panjang data N (Park, 2010).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{n=N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (19)$$

Jika didefinisikan

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (20)$$

maka dapat ditulis menjadi

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \quad (21)$$

Dari DFT N data pada persamaan (21) dapat dijabarkan sebagai berikut

$$X^d[k] = x[0] + x[1]W_N^{k(1)} + x[2]W_N^{k(2)} + \dots + x[N-1]W_N^{k(N-1)} \quad (22)$$

apabila $x(n)$ dikelompokkan menjadi suku genap dan ganjil, maka persamaan (22) dapat diubah menjadi persamaan (23)

$$X[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n]W_N^{2kn} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1]W_N^{k(2n+1)} \quad (23)$$

atau,

$$X[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n]W_N^{2kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1]W_N^{2kn} \quad (24)$$

karena $W_N^2 = W_{\frac{N}{2}}$, sehingga persamaan (24) dapat ditulis kembali menjadi

$$X[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n]W_{\frac{N}{2}}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1]W_{\frac{N}{2}}^{kn} \quad (25)$$

dengan $k = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$. Persamaan (25) dapat ditulis sebagai persamaan

baru yaitu:

$$X[k] = G[k] + W_N^k H[k] \quad (26)$$

dimana $G[k]$ dan $H[k]$ masing-masing didefinisikan sebagai persamaan (27)

dan (28)

$$G[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n]W_{\frac{N}{2}}^{kn} \quad (27)$$

$$H[k] = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1] W_N^{\frac{kn}{2}} \quad (28)$$

karena $G[k]$ dan $H[k]$ periodik dengan periode $\frac{N}{2}$, akan diperoleh $G\left[k + \frac{N}{2}\right] = G[k]$ dan $H\left[k + \frac{N}{2}\right] = H[k]$, dan karena $W_N^{k+\frac{N}{2}} = -W_N^k$ maka diperoleh persamaan (29)

$$G\left[k + \frac{N}{2}\right] = G[k] - W_N^k H[k] \quad (29)$$

Persamaan (26) dan (29) inilah yang dikenal sebagai algoritma *Fast Fourier Transform radix-2 Decimation in Time* (DIT), dengan data dipilah menjadi bagian genap dan ganjil (Proakis dan Manolakis, 1996).

E. Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)

Metode HVSr pertama kali diperkenalkan oleh Nogoshi dan Iragashi pada tahun 1971 yang menyatakan adanya hubungan antara perbandingan komponen horizontal dan komponen vertikal terhadap eliptisitas pada gelombang Rayleigh. Kemudian disempurnakan oleh Nakamura pada tahun 1989 yang menyatakan bahwa perbandingan spektrum antara komponen horizontal dan vertikal sebagai fungsi frekuensi memiliki hubungan dengan *site effect* transfer untuk gelombang S. Hal ini dibuktikan Nakamura melalui hasil penelitiannya yang menunjukkan bahwa rekaman pada stasiun yang berada pada batuan keras, nilai maksimum spektrum rasio komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya mendekati satu, sedangkan rekaman pada stasiun yang berada pada batuan lunak, nilai rasio

maksimumnya mengalami amplifikasi yaitu lebih besar dari satu (Arifin *et al.*, 2014).

Faktor amplifikasi dari gerakan komponen horizontal dan vertikal di permukaan tanah berdasarkan pada perambatan gelombang seismik di permukaan tanah yang bersentuhan langsung dengan batuan dasar di daerah cekungan dilambangkan dengan T_H dan T_V (Nakamura, 2000). Besarnya faktor amplifikasi komponen horizontal T_H adalah

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (30)$$

dengan S_{HS} adalah spektrum mikrotremor komponen horizontal di permukaan tanah, S_{HB} adalah spektrum mikrotremor komponen horizontal di batuan dasar. Sedangkan besarnya faktor amplifikasi komponen vertikal T_V adalah

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (31)$$

dengan S_{VS} adalah spektrum mikrotremor komponen vertikal di permukaan tanah, S_{VB} adalah spektrum mikrotremor komponen vertikal di batuan dasar.

Mikrotremor tersusun dari berbagai jenis gelombang di antaranya gelombang Rayleigh dan gelombang badan, namun yang lebih mendominasi yaitu gelombang Rayleigh yang merambat pada permukaan tanah. Pengaruh gelombang Rayleigh pada mikrotremor untuk spektrum komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar besarnya sama saat berada pada rentang frekuensi 0,2 hingga 20 Hz, sehingga dapat dituliskan seperti persamaan (32) berikut:

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} = 1 \quad (32)$$

Karena rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar sama, maka gangguan yang terekam pada permukaan tanah akibat efek dari gelombang Rayleigh dapat dihilangkan, sehingga hanya ada pengaruh dari struktur geologi lokal atau *site effect* (T_{SITE}). T_{SITE} menunjukkan faktor amplifikasi akibat pengaruh *site effect* pada lokasi tertentu (Yulistiani, 2017). Berdasarkan definisi tersebut maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (33)$$

Pada pengukuran mikrotremor terdapat dua spektrum komponen horizontal yaitu komponen NS (*North-South*) dan komponen EW (*East-West*), sehingga komponen horizontal yang digunakan merupakan resultan dari kedua komponen tersebut (Hidayat *et al.*, 2017). Persamaan (30), (31), dan (33) dapat dituliskan menjadi

$$HVSr = T_{SITE} = \frac{\sqrt{[(S_{North-South})^2 + (S_{East-West})^2]}}{S_{VS}} \quad (34)$$

Persamaan (34) inilah yang menjadi dasar perhitungan dalam metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) pada pengukuran mikrotremor.

F. Frekuensi Predominan

Frekuensi dominan adalah nilai frekuensi yang kerap muncul, sehingga dianggap sebagai nilai frekuensi dari lapisan batuan di wilayah tersebut. Dengan kata lain, nilai frekuensi dominan dapat menunjukkan jenis dan karakteristik batuan tersebut. Besarnya nilai frekuensi dominan berasosiasi dengan kedalaman *bedrock*. Nilai frekuensi dominan yang rendah

menunjukkan kedalaman *bedrock* yang dalam dan sebaliknya, nilai frekuensi dominan yang tinggi menunjukkan kedalaman *bedrock* yang dangkal. Nilai frekuensi dominan yang relatif tinggi mencerminkan material batuan masif yang terdapat pada lokasi perbukitan struktural (Ngadmanto *et al.*, 2013).

Tabel 1. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan oleh Kanai (Arifin *et al.*, 2014).

| Klasifikasi Tanah | | Frekuensi Dominan (Hz) | Klasifikasi Kanai | Deskripsi |
|-------------------|----------|------------------------|---|--|
| Tipe | Jenis | | | |
| Tipe I | Jenis I | <2,5 | Batuan aluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, <i>top soil</i> , lumpur dengan kedalaman 30 meter atau lebih. | Ketebalan sedimen pada permukaan sangat tebal. |
| Tipe II | | | | |
| Tipe III | Jenis I | 2,5-4 | Batuan aluvial dengan ketebalan sedimen >5 meter. Terdiri dari <i>sandy gravel</i> , <i>sandy hard clay</i> , <i>loam</i> . | Ketebalan sedimen pada permukaan dikategorikan tebal, yaitu 10 sampai 30 meter. |
| Tipe IV | Jenis I | 4-10 | Batuan aluvial dengan ketebalan sedimen 5 meter. Terdiri dari <i>sandy gravel</i> , <i>sandy hard clay</i> , <i>loam</i> . | Ketebalan sedimen pada permukaan dikategorikan menengah, yaitu 5 sampai 10 meter |
| | Jenis II | 6,7-20 | Batuan tersier atau berumur lebih tua. Terdiri dari batuan <i>hard sandy</i> , <i>gravel</i> . | Ketebalan sedimen permukaan sangat tipis, didominasi oleh batuan keras. |

Lachet dan Brad (1994) telah melakukan uji simulasi dengan menggunakan enam model struktur geologi sederhana dengan kombinasi variasi kontras kecepatan gelombang sekunder dan ketebalan lapisan sedimen. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai puncak frekuensi (frekuensi dominan) berubah terhadap variasi kondisi geologi. Gallipoli *et al.* (2004)

juga telah melakukan penelitian untuk mengetahui respon geologi (*site*) terhadap mikrotremor menggunakan metode HVSR dan mendapatkan hasil bahwa nilai frekuensi dominan berubah terhadap karakteristik dinamis tanah.

Nilai frekuensi dominan yang terukur di permukaan dapat digunakan untuk mengetahui struktur bawah permukaan. Kanai (1983) telah mengelompokkan beberapa klasifikasi tipe dan jenis tanah berdasarkan parameter frekuensi dominan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

G. Faktor Amplifikasi

Faktor amplifikasi merupakan faktor penguatan dari gelombang yang menjalar pada lapisan sedimen di permukaan tanah (Sutrisno *et al.*, 2013). Besarnya nilai faktor penguatan gelombang suatu wilayah sangat dipengaruhi oleh kontras impedansi (densitas batuan dikalikan kecepatan gelombang S) antara lapisan sedimen permukaan dan lapisan batuan dasar. Semakin besar nilai kontras impedansinya, maka nilai faktor penguatan gelombang semakin besar (Marjiyono, 2016). Definisi tersebut dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$A_g = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \quad (35)$$

dengan ρ_b adalah densitas batuan dasar (gr/ml), V_b adalah kecepatan rambat gelombang sekunder di batuan dasar (m/s), ρ_s adalah densitas batuan sedimen lunak (gr/ml), dan V_s adalah kecepatan rambat gelombang sekunder di batuan

sedimen lunak (m/s). Nakamura (2008) mengasumsikan densitas batuan dasar dan densitas batuan sedimen lunak tersebut bernilai sama, sehingga persamaan (35) dapat ditulis menjadi persamaan (36).

$$A_g = \frac{V_b}{V_s} \quad (36)$$

Daerah yang berpotensi mengalami amplifikasi gelombang seismik dan rawan kerusakan bangunan yaitu daerah yang memiliki kondisi geologi berupa lapisan sedimen lunak berupa material pasir, pasir lanauan, dan gambut yang tebal atau sedimen lunak yang berada di atas batuan keras (Sungkono dan Santoso, 2011). Marjiyono (dalam Efendi, 2017) telah membagi zona risiko amplifikasi terhadap kerusakan yang ditimbulkan akibat gempa bumi berdasarkan parameter faktor amplifikasi seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Zonasi risiko amplifikasi berdasarkan nilai faktor amplifikasi oleh Marjiyono (Efendi, 2017).

| Faktor Amplifikasi (A_g) | Risiko Amplifikasi |
|------------------------------|--------------------|
| 0-3 | Rendah |
| 3-6 | Sedang |
| 6-9 | Tinggi |
| Lebih dari 9 | Sangat tinggi |

H. *Ground Profiles V_s*

Profil kecepatan gelombang S (V_s) bawah permukaan dapat diketahui dengan melakukan inversi gelombang Rayleigh (*inverse modelling*). *Inverse modelling* dilakukan untuk memodelkan struktur bawah permukaan dengan cara menentukan parameter-parameter mediumnya terlebih dahulu, salah

satunya yaitu parameter kecepatan gelombang S. Pemodelan inversi gelombang Rayleigh dapat dilakukan menggunakan metode *ellipticity curve*.

Metode *ellipticity curve* merupakan metode yang dilakukan untuk mengekstrak sifat-sifat fisis bawah permukaan yang tidak dapat ditentukan oleh metode HVSR (Patimah, 2017). Metode *ellipticity curve* dipengaruhi oleh parameter model awal yaitu bergantung pada penentuan nilai parameter V_p , V_s , ρ (densitas batuan), dan σ (*Poisson's ratio*) atau elastisitas batuan. Penentuan nilai parameter tersebut dilakukan berdasarkan data hasil observasi untuk selanjutnya dilakukan pencocokan data (*data fitting*). Tingkat keakuratan *data fitting* dapat diketahui dari nilai *error (misfit)*. Semakin kecil nilai *misfit* maka profil kecepatan gelombang S bawah permukaan yang diperoleh akan semakin baik atau mendekati hasil yang sebenarnya. Besarnya nilai *misfit* dapat ditentukan menggunakan metode Monte Carlo yang dinyatakan dalam persamaan berikut (Hobiger, 2011):

$$misfit = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i - M_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (37)$$

dengan N adalah jumlah data, D_i adalah data hasil inversi, M_i adalah data hasil model struktur tanah, σ_i standar deviasi dari data hasil inversi.

Metode *ellipticity curve* menghasilkan kurva eliptisitas gelombang Rayleigh (*ellipticity curve*) yang diasumsikan untuk model horizontal berlapis. *Ellipticity curve* merupakan kurva yang merepresentasikan struktur bawah permukaan berdasarkan nilai kecepatan gelombang S pada setiap lapisan. Badan Standarisasi Nasional (SNI) 1726 (2012) telah mengelompokkan

beberapa klasifikasi *site* berdasarkan nilai V_s seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.

Kecepatan gelombang S bawah permukaan sangat penting untuk menentukan desain struktur, karakterisasi kelongsoran, evaluasi zona mitigasi bencana gempa bumi, pengembangan peta mitigasi bencana, dan desain kerentanan bangunan terhadap gempa bumi.

Tabel 3. Klasifikasi *site* berdasarkan nilai V_s (Badan Standarisasi Nasional (SNI) 1726, 2012).

| Klasifikasi <i>site</i> | V_s (m/s) |
|--|-----------------|
| SA (batuan keras) | > 1500 |
| SB (batuan) | 750 sampai 1500 |
| SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak) | 350 sampai 750 |
| SD (tanah sedang) | 175 sampai 350 |
| SE (tanah lunak) | < 750 |

I. Ketebalan Lapisan Sedimen (H)

Menurut Sunardi *et al.* (2012), tingkat kerusakan dan bahaya gempa bumi sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal yang disebut *local site effect*. Daerah yang memiliki struktur bawah permukaan berupa litologi yang lebih lunak cenderung akan memberikan respon periode getaran yang panjang (frekuensi dominan rendah) serta memiliki risiko yang lebih tinggi saat terjadi gempa bumi, karena berpotensi mengalami amplifikasi gelombang seismik yang lebih besar dibandingkan dengan batuan yang lebih kompak. Salah satu parameter yang dapat menggambarkan kondisi geologi lokal yang dapat mempengaruhi *local site effect* adalah ketebalan lapisan sedimen. Pipkin (1977) menyebutkan bahwa sedimen adalah pecahan, mineral, atau material

organik yang ditransformasikan dari berbagai sumber dan diendapkan oleh media udara, angin, es, atau air.

Ketebalan lapisan sedimen dapat dianalisis menggunakan persamaan (38) (Nakamura, 2008).

$$H = \frac{V_b}{(4A_g f_g)} \quad (38)$$

Jika persamaan (36) disubstitusikan ke persamaan (39) diperoleh:

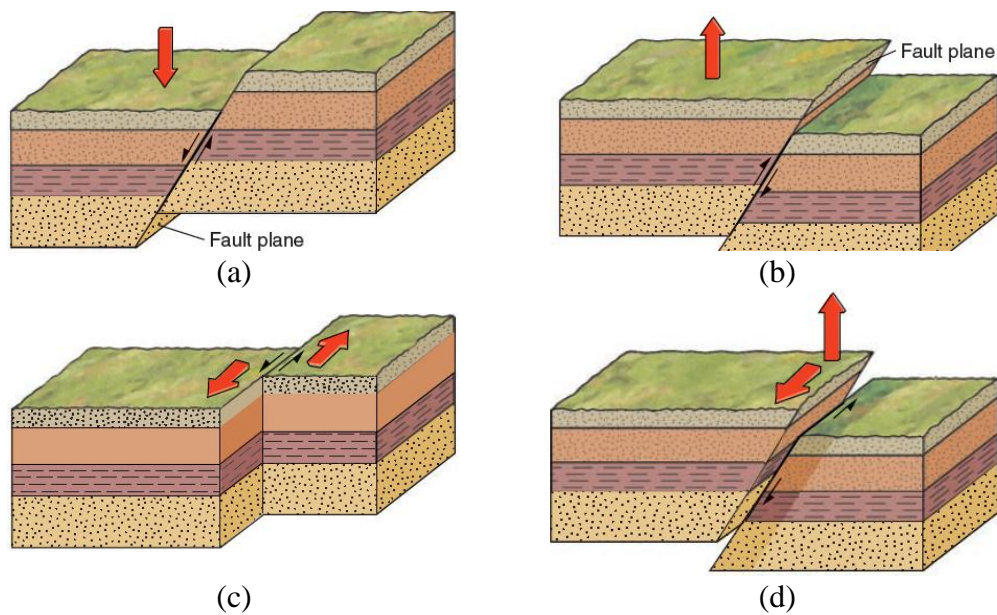
$$H = \frac{V_s}{4f_g} \quad (39)$$

dimana H adalah ketebalan lapisan sedimen dalam meter, dan f_g adalah frekuensi dominan dalam Hertz, V_s adalah kecepatan gelombang S dalam m/s. Persamaan (39) memiliki hubungan antar parameternya, yaitu nilai ketebalan lapisan sedimen sebanding dengan nilai kecepatan rambat gelombang sekunder di batuan sedimen lunak dan berbanding terbalik dengan frekuensi dominan.

J. Sesar Grindulu

Menurut Plummer *et al.* (2016), sesar adalah rekahan pada lapisan batuan yang mengalami pergeseran. Pergeseran dapat terjadi sepanjang beberapa centimeter bahkan mencapai ratusan kilometer. Berdasarkan arah pergerakan dan gaya yang bekerja, sesar dibagi menjadi empat yaitu sesar naik, sesar turun, sesar geser, dan sesar *oblique* (Ismawati, 2011), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Orientasi sesar dapat ditentukan dari bidang sesar yang terdiri dari *strike* dan *dip*. *Strike* merupakan sudut bidang sesar yang diukur dari arah utara ke timur dengan sudut antara 0° sampai 360° , sedangkan *dip* merupakan sudut yang dibentuk oleh bidang sesar dengan bidang horizontal dan diukur pada bidang vertikal yang arahnya tegak lurus jalur sesar dengan sudut antara 0° sampai 90° .



Gambar 9. Ilustrasi pergerakan sesar (Plummer *et al.*, 2016).

Gambar 9(a) menunjukkan sesar turun (*normal fault*) yaitu salah satu bidang sesar (*fault plane*) menumpu ke bawah akibat penumpu di kedua sisinya bergerak saling menjauh. Gambar 9(b) menunjukkan sesar naik (*reverse fault*) yaitu salah satu bidang sesarnya terangkat akibat penumpu di kedua sisinya bergerak saling mendorong. Gambar 9(c) menunjukkan sesar geser (*strike slip fault*) yang memiliki pergerakan antara kedua bidang sesar yang saling bergeser pada arah horizontal. Gambar 9(d) menunjukkan sesar *oblique* yaitu kombinasi antara sesar geser dan sesar naik/turun.

Berdasarkan peta geologi regional lembar Pacitan (Samodra *et al.*, 1992), Sesar Grindulu merupakan jenis sesar geser (*strike slip fault*). Sesar Grindulu mengalami pergeseran pada permukaan (*slip rate*) sejauh 5 mm/tahun (Kumala dan Wahyudi, 2016). Parera *et al.* (2015) menyebutkan bahwa Sesar Grindulu berorientasi baratdaya-timur laut.

K. *H/V Rotate dan Rose Diagram*

H/V Rotate merupakan salah satu *toolbar* pada *software* Geopsy yang digunakan untuk mengetahui sudut *azimuth* arah sumber datang gelombang seismik dari hasil pengukuran mikrotremor pada setiap titik di permukaan tanah. Analisis *H/V Rotate* dilakukan menggunakan metode HVSR dalam domain waktu yang dihitung dari polarisasi horizontal yaitu memutar spektrum komponen horizontal pada arah *North-South* dan *East-West* dari 0° sampai 180° untuk setiap langkah 10° (Pischiutta *et al.*, 2017). Hasil analisis *H/V Rotate* berupa spektrum *H/V* yang merepresentasikan sebagai fungsi frekuensi dan *azimuth*. Dimana spektrum *H/V* pada sudut 0° menunjukkan arah utara dan pada sudut 90° menunjukkan arah timur.

Penyelidikan terhadap orientasi sesar dapat dilakukan menggunakan metode pengukuran geofisika salah satunya yaitu mikrotremor. Komponen sinyal mikrotremor yang melintasi kawasan sesar dapat memberikan informasi mengenai kelurusan struktur sesar. Komponen sinyal yang berperan penting adalah arah gelombang S yang terpolarisasi. Arah polarisasi gelombang S

yang berada di kawasan sesar cenderung memiliki sudut (*azimuth*) besar terhadap *strike* sesarnya (Pischiutta *et al.*, 2012).

Analisis kelurusan struktur sesar dapat dilakukan menggunakan *rose diagram*, yaitu diagram yang digunakan untuk menyajikan data hasil pengukuran mikrotremor yang ditunjukkan sesuai dengan *azimuth*-nya. *Rose diagram* digambarkan dalam lingkaran penuh dengan jari-jari sebagai fungsi frekuensi dan busur lingkaran sebagai fungsi orientasi sesarnya.

L. Geologi Regional Daerah Penelitian

Daerah penelitian yaitu kawasan jalur Sesar Grindulu secara administratif terletak di Kecamatan Pringkuku, Kecamatan Pacitan, dan Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan. Kondisi geologi di daerah penelitian umumnya berupa material vulkanik dan batugamping yang terbentuk dari aktivitas gunung api.

Berdasarkan peta geologi regional lembar Pacitan (Samodra *et al.*, 1992), litologi di daerah penelitian tersusun atas beberapa formasi sebagai berikut:

1. Formasi Arjosari

Formasi Arjosari merupakan satuan batuan tertua di daerah penelitian yang terbentuk dari endapan turbidit atau sedimen yang dipengaruhi oleh gejala pelengseran bawah laut yang berselingan dengan batuan gunung api. Bagian bawah formasi terdiri dari litologi berupa breksi polimik sisipan tufan, dan batupasir tufan. Bagian tengah terdiri dari breksi polimik, batupasir, lava andesit, dan tufa bersisipan batulempung, sedangkan bagian atas terdiri dari

batupasir konglomeratan, perselingan breksi gunung api, lava, dan tufa. Formasi ini terbentuk pada Oligosen Akhir sampai Miosen Awal dan memiliki ketebalan ± 500 meter.

2. Formasi Jaten

Formasi Jaten terdiri dari litologi batupasir kuarsa, batulempung, batulempung karbonan, batubara dan sisipan tipis batupasir gampingan. Formasi ini diperkirakan terbentuk pada Miosen Awal sampai Miosen Tengah dengan ketebalan mencapai ± 150 meter.

3. Formasi Wuni

Penyusun Formasi Wuni terdiri dari aglomerat berselingan dengan batupasir tufan berbutir kasar dan batulanau serta terdapat batugamping terumbu koral pada bagian atasnya. Formasi ini diperkirakan terbentuk pada Miosen Tengah dengan ketebalan mencapai ± 200 meter.

4. Formasi Oyo

Formasi Oyo merupakan satuan dari kumpulan batugamping klastik dimana proses pembentukannya dipengaruhi oleh aktivitas gunung api. Penyusun litologinya terdiri dari batupasir tufan, batupasir gampingan, batulanau gampingan, batugamping pasir, batugamping konglomeratan yang bersisipan tuf pasir, napal dan batugamping terumbu. Bagian bawah satuan ini umumnya bersifat tufan, semakin ke atas unsur tufannya berkurang dan cenderung bersifat gampingan. Formasi ini diperkirakan terbentuk pada Miosen Tengah dengan ketebalan antara 20 sampai 100 meter.

5. Formasi Aluvium

Endapan aluvial terdapat di Sungai Grindulu bagian tengah sampai hilir. Penyusun litologinya berupa material dari hasil rombakan dan pelapukan batuan yang berumur lebih tua yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir dan tanah (Abdullah *et al.*, 2011).

M. Kerangka Berpikir

Daerah penelitian merupakan daerah rawan bencana gerakan tanah dan gempa bumi. Hal ini disebabkan karena sebagian besar daerah penelitian memiliki topografi berupa daerah perbukitan atau dataran tinggi dan berada pada zona pertemuan lempeng tektonik, sehingga perlu dilakukan penelitian sebagai upaya mitigasi bencana untuk memetakan potensi kerusakan berdasarkan kondisi geologi terhadap respon gempa bumi.

Dari penelitian di kawasan jalur Sesar Grindulu diperoleh data mentah berupa sinyal mikrotremor dalam domain waktu. Proses pengolahan sinyal mikrotremor dilakukan dengan pemilihan sinyal tanpa *noise (cutting)* pada *software* Geopsy. Pengolahan sinyal menggunakan metode HVSR dengan *software* MATLAB R2010a, sehingga diperoleh kurva *H/V* sebagai fungsi frekuensi dan rasio *H/V* dimana puncak dari kurva tersebut menunjukkan parameter frekuensi dominan dan faktor amplifikasinya.

Parameter frekuensi dominan digunakan untuk mikrozonasi berdasarkan klasifikasi *site* sesuai pada Tabel 1 dan parameter faktor amplifikasi digunakan untuk mikrozonasi potensi kerusakan berdasarkan pada

Tabel 2, kemudian mikrozonasi kedua parameter tersebut dikorelasi dengan topografinya. Untuk menentukan parameter ketebalan lapisan sedimen dapat dihitung menggunakan persamaan yang juga melibatkan parameter kecepatan gelombang S yang diperoleh dari hasil pengolahan menggunakan metode *ellipticity curve*. Nilai ketebalan lapisan sedimen yang diperoleh dari hasil perhitungan kemudian diidentifikasi berdasarkan karakteristik penampang seismik pada setiap lintasan. Selain itu, sinyal mikrotremor juga dapat digunakan untuk mengetahui keberadaan Sesar Grindulu dari hasil pengolahan spektrum kurva *H/V*. Selanjutnya dianalisis arah sumber datang gelombang seismik terhadap kelurusan sesarnya menggunakan pemodelan *rose diagram*.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data primer, yaitu data yang diukur secara langsung di titik lokasi penelitian pada koordinat geografis $-8,19^{\circ}$ LS sampai $-8,11^{\circ}$ LS dan $111,06^{\circ}$ BT sampai $111,16^{\circ}$ BT. Sebelum dilakukan pengukuran sinyal mikrotremor, telah dilakukan studi literatur, bimbingan dan konsultasi ke dosen pembimbing, diskusi kelompok, dan survei lapangan yang dimulai pada 2 April 2017. Survei lapangan ini dimaksudkan untuk mengetahui kondisi geologi di lapangan dan memasukkan titik koordinatnya di *Global Positioning System* (GPS) untuk mengetahui elevasi dan topografinya. Pengukuran sinyal mikrotremor telah dilaksanakan pada tanggal 21 sampai 26 Agustus 2017 dengan target penelitian di sepanjang jalur Sesar Grindulu yang meliputi Kecamatan Pringkuku, Kecamatan Pacitan, dan Kecamatan Arjosari sebanyak 27 titik ukur dengan jarak antar titiknya sejauh 1 km.

B. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari piranti lunak (*software*) dan piranti keras (*hardware*).

1. Piranti lunak terdiri dari:
 - a. Sesarrry Geopsy digunakan untuk menganalisis sinyal mikrotremor (*ambient noise*) dilakukan berdasarkan *cutting* data atau memilih sinyal tanpa *noise* sehingga diperoleh kurva *H/V*.
 - b. Matlab R2010a digunakan untuk menganalisis sinyal mikrotremor menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT).
 - c. Dinver pada *software* Sesarrry Geopsy digunakan untuk menganalisis kurva *H/V* menggunakan metode *ellipticity curve* (inversi gelombang Rayleigh) sehingga diperoleh *ground profiles* sebagai fungsi kecepatan gelombang S dan kedalaman (*depth*).
 - d. RockWork15 untuk membuat pemodelan 3D *Solid Model Amplification*, sayatan persebaran nilai faktor amplifikasi pada kawasan Sesar Grindulu, dan pemodelan *rose diagram* arah sumber datang gelombang seismik.
 - e. H/V Rotate pada *software* Sesarrry Geopsy digunakan untuk menganalisis sinyal mikrotremor sehingga diperoleh spektrum kurva *H/V* sebagai fungsi frekuensi (Hz) dan sudut *azimuth* (°).
 - f. Surfer10 untuk mikrozonasi daerah rawan gempa bumi berdasarkan nilai frekuensi dominan, faktor amplifikasi, dan topografi di kawasan jalur Sesar Grindulu.
 - g. Google Earth digunakan untuk memperkirakan kondisi lokasi terutama topografi daerah penelitian dan menentukan titik pengambilan data sekaligus membuat desain survei.

- h. TCX Converter berfungsi untuk mengkonversi hasil pengolahan dari Google Earth dalam format .kml ke dalam format .csv yang dapat dibuka pada Microsoft Excel 2010.
- i. Global Mapper13 berfungsi untuk memasukkan titik koordinat pengambilan data yang telah diregister dengan peta geologi daerah Pacitan ke GPS.
- j. Peta geologi regional Pacitan dalam format .JPG seperti pada Lampiran 4 dan peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) Pacitan digunakan sebagai bahan desain survei dan bahan analisis geologi.
- k. Microsoft Excel 2010 digunakan untuk proses perhitungan matematis terutama dalam menentukan kriteria *reliability* dan *clear peak* sinyal mikrotremor dengan cara mengubah format data .hv dari hasil analisis Sesarry Geopsy menjadi format data Excel Workbook (.xlsx).
- l. Microsoft Word 2010 digunakan untuk menyusun laporan.

2. Piranti Keras:

Adapun piranti keras yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. *Digital Portable Seismograph* merk Taide tipe TDL-303S yang ditunjukkan pada Gambar 10 terdiri dari:
 - 1) Seismometer tipe TDV-23S berfungsi untuk mengukur getaran tanah pada setiap titik pengambilan data.
 - 2) *Digitizer* berfungsi untuk merekam sinyal getaran mikro pada permukaan tanah yang diperoleh dari seismometer.

- 3) Satu set kabel penghubung yang menghubungkan antara seismometer ke laptop dan seismometer ke *digitizer*.
- 4) Antena GPS berfungsi untuk menerima data lokasi maupun waktu dari satelit.



Gambar 10. *Digital Portable Seismograph* merk Taide tipe TDL-303S
 (1) Seismometer (2) *Digitizer* (3) Kabel penghubung
 (4) Antena GPS.

- b. Laptop yang dihubungkan dengan *digitizer* digunakan untuk menampilkan sinyal yang terekam oleh *digitizer* sekaligus digunakan untuk menyimpan hasil rekaman dalam format .MSD.
- c. Catatan (*checklist*) yang mengacu pada standar operasional *SESAME European Research Project* yang ditunjukkan pada Lampiran 5.
- d. Alat tulis digunakan untuk mencatat segala sesuatu yang berhubungan dengan kondisi di lapangan pada waktu pengambilan data.

- e. *Global Positioning System* (GPS) merk Garmin tipe Map 78s digunakan sebagai pemandu atau navigator dalam menentukan posisi titik penelitian sekaligus menandai koordinat pada saat terjadi pergeseran titik maupun penambahan titik ukur.
- f. Kompas geologi digunakan untuk menentukan arah utara sebelum meletakkan sensor.
- g. Adaptor berfungsi sebagai pengisi daya untuk *digitizer* dan laptop.

Adapun peralatan tambahan pengambilan data di antaranya ditunjukkan pada Gambar 11.



(a)



(b)



(c)

Gambar 11. Peralatan tambahan pengambilan data (a) GPS (b) Kompas geologi (c) Adaptor.

- h. Cangkul kecil digunakan untuk meratakan permukaan tanah sebelum meletakkan sensor.

- i. Payung digunakan untuk melindungi seismometer dan *digitizer* dari terik matahari agar tidak mempengaruhi proses pengukuran dan perekaman data.
- j. Kamera digunakan untuk dokumentasi lapangan.

C. Teknik Pengambilan Data

Tahapan-tahapan yang dilakukan sebelum pengambilan data di antaranya:

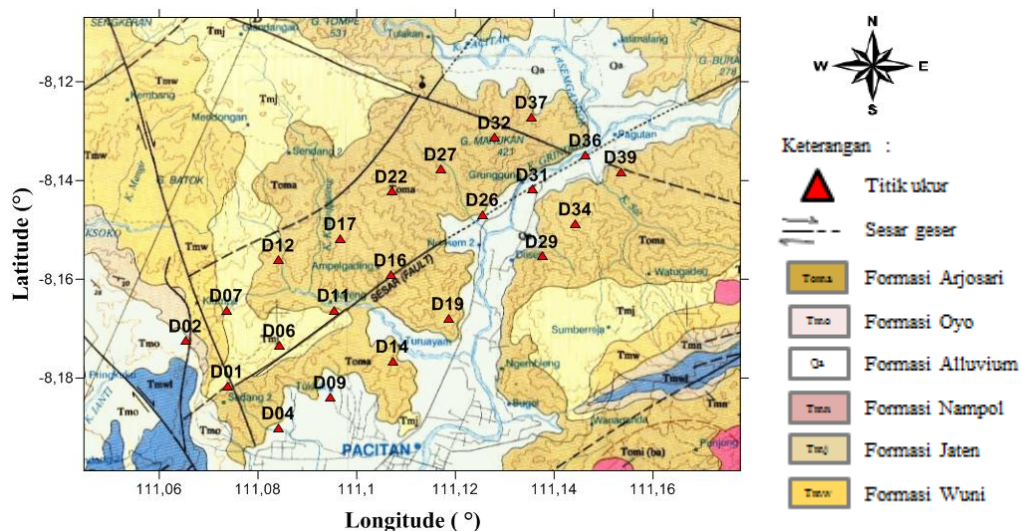
1. Studi literatur dan penentuan lokasi penelitian

Studi literatur dilakukan guna menggali informasi dari hasil penelitian yang telah dimuat dalam skripsi, jurnal, maupun paper. Berdasarkan informasi yang didapat maka dimungkinkan untuk dilakukan penelitian lanjutan. Dalam penelitian ini, penentuan lokasi pengambilan data didasarkan pada:

- a. Kabupaten Pacitan merupakan wilayah di Jawa Timur yang memiliki nilai percepatan getaran tanah terbesar ketika terjadi gempa bumi, dikarenakan wilayah Pacitan dilalui oleh keberadaan Sesar Grindulu (Kumala dan Wahyudi, 2016).
- b. Pada 14 Februari 2011, wilayah Pacitan telah terjadi peristiwa gempa bumi dengan lokasi episenter gempa berada di sekitar jalur Sesar Grindulu (Parera *et al.*, 2015).
- c. Sesar Grindulu merupakan sesar yang terlihat di permukaan dan memiliki arah orientasi sesar yaitu timurlaut-baratdaya dan timurlaut-tenggara serta memiliki kedalaman mencapai 2 km hingga 3,7 km (Indrianti *et al.*, 2013).

2. Desain survei dan input titik koordinat di GPS

Desain survei merupakan langkah awal dalam menentukan titik pengukuran yang dibuat sesuai dengan target penelitian agar titik-titik ukur tersebut dapat mencakup dan mewakili target yang akan diteliti. Pembuatan desain survei dimulai dengan meregister peta geologi regional Pacitan di Global Mapper 13. Selanjutnya menentukan luasan area penelitian dimana spasi atau jarak antar titiknya dibuat secara *grid* di Surfer12. Desain survei pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 12. Titik penelitian dibuat berpotongan terhadap target penelitian yaitu Sesar Grindulu yang berjumlah 3 segmen memanjang yang sejajar dengan jalur sesarnya dan jarak antar titik dibuat sejauh 1 km sebanyak 22 titik. Kemudian titik koordinat yang diperoleh dari proses *grid* pada Surfer12 dimasukkan ke GPS dengan tujuan untuk memudahkan dalam menemukan titik lokasi yang akan menjadi lokasi pengambilan data.

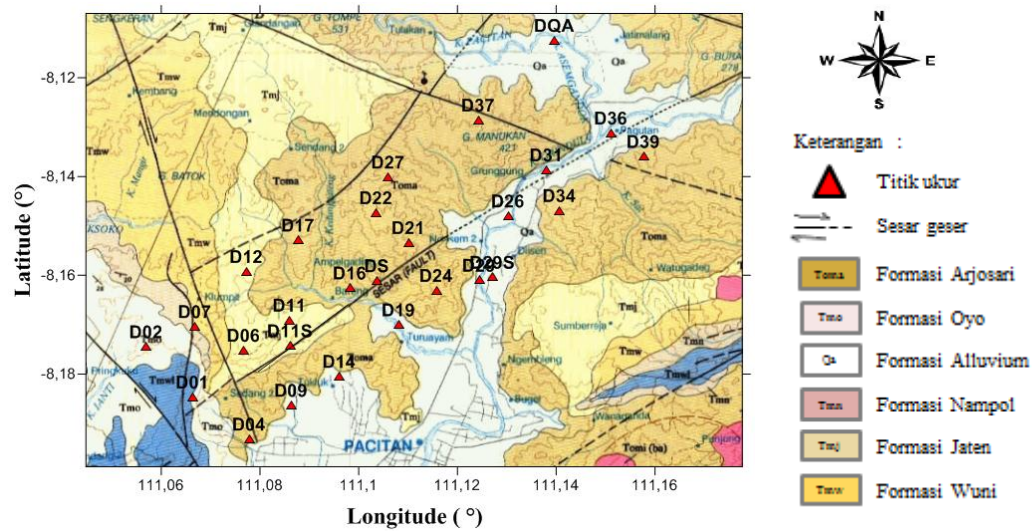


Gambar 12. Desain survei penelitian di kawasan jalur Sesar Grindulu.

3. Survei lapangan

Survei lapangan dilakukan dengan mendatangi titik lokasi yang sebelumnya telah ditentukan dari desain survei. Survei lapangan bertujuan untuk mengetahui kondisi lingkungan yaitu dimungkinkan atau tidaknya untuk dilakukan pengambilan data berdasarkan letak topografi, jangkauan dari pemukiman penduduk, dan medan yang ditempuh dapat diakses dengan mudah sehingga dapat menjadi pertimbangan untuk efisiensi waktu dan jarak tempuhnya. Standar operasional pemilihan lokasi dan pengambilan data mengacu pada aturan *SESAME European Research Project* yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Berdasarkan hasil survei lapangan telah ditetapkan sebanyak 27 titik ukur dari semula 22 titik. Terdapat 5 titik tambahan dimana 2 titik berada tepat di jalur Sesar Grindulu yaitu titik D11S dan DS, 2 titik lainnya berada pada Formasi Aluvium yaitu DQA dan D29S, serta 1 titik berada pada Formasi Arjosari yaitu D24. Jika dilihat dari desain survei penelitian pada Gambar 12, titik pengambilan data pada Gambar 13 telah mengalami pergeseran sejauh 0,2 km sampai 0,6 km dikarenakan secara topografi kondisi alam di daerah Pacitan berupa perbukitan sehingga terdapat banyak titik yang berada di jurang maupun lokasi yang sulit dijangkau dan tidak dimungkinkan untuk dijadikan lokasi pengambilan data.



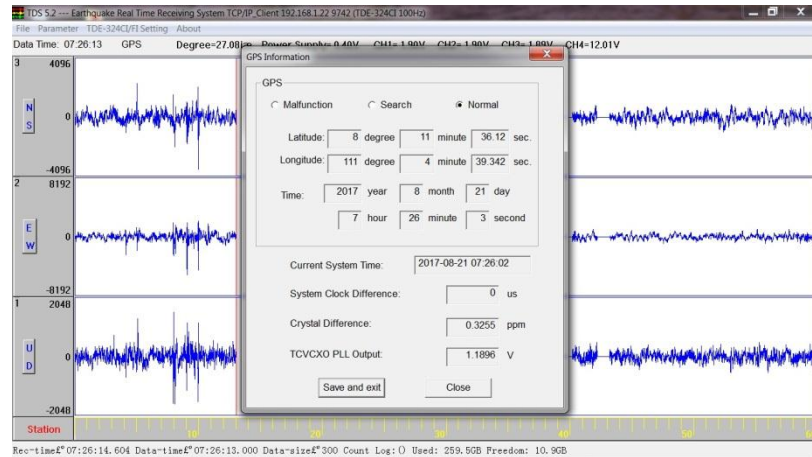
Gambar 13. Titik pengambilan data di kawasan jalur Sesar Grindulu.

4. Pengambilan data

Pengambilan data dilakukan dengan durasi pengukuran selama ± 30 menit untuk setiap titik pengukuran dan menggunakan frekuensi *sampling* 100 Hz. Selama proses pengukuran berlangsung, diharuskan untuk mengisi lembar *checklist* yang memuat waktu dan tempat penelitian, kondisi cuaca, jenis tanah, dan keberadaan bangunan atau pohon di sekitar area pengambilan data. Disarankan juga bagi peneliti untuk mengurangi pergerakan di dekat seismometer karena dapat mempengaruhi hasil pengukuran dalam bentuk *noise*.

Pengukuran sinyal mikrotremor menghasilkan 3 komponen sinyal yang terdiri dari komponen sinyal vertikal (SHZ), komponen sinyal horizontal arah barat-timur (SHE), dan komponen horizontal arah utara-selatan (SHN). Sinyal mikrotremor tersebut secara otomatis tersimpan di dalam *digitizer* yang dapat

ditampilkan pada laptop menggunakan *software* Monost seperti ditunjukkan Gambar 14.



Gambar 14. Tampilan hasil pengukuran sinyal mikrotremor pada *software* Monost.

Sinyal mikrotremor dari hasil pengukuran kemudian dianalisis melalui proses *cutting* atau pemilihan sinyal tanpa *noise* untuk mendapatkan data yang baik. Jumlah *window* yang disarankan oleh *SESAME European Research Project* minimal sebanyak 10 *window* dengan panjang *window* 20 sekon untuk setiap *window*. Oleh karena itu semakin lama durasi pengukuran maka data yang diperoleh akan semakin baik (Patimah, 2017). Seperti pada titik D04 durasi pengukuran dilakukan selama ± 45 menit dikarenakan titik tersebut berada di dekat jalan raya Kota Pacitan yang cukup ramai sehingga durasi pengukuran dilakukan lebih lama agar mendapatkan data yang baik untuk dianalisis.

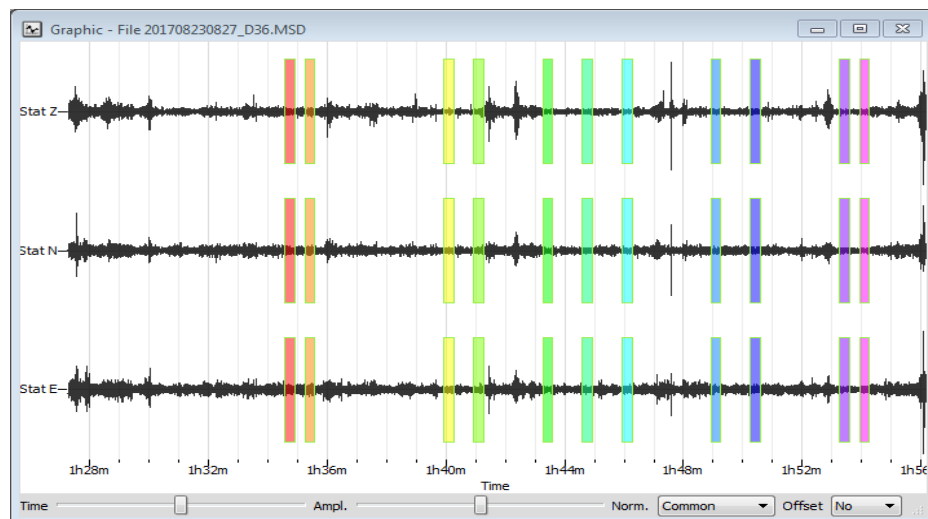
Tabel 4. Standar operasional pengukuran mikrotremor (SESAME, 2004).

| Jenis Parameter | Saran yang dianjurkan | |
|---|---|---|
| Durasi Pencatatan | f_g minimum yang diharapkan (Hz) | Durasi pencatatan minimum yang disarankan (menit) |
| | 0,2 | 30 |
| | 0,5 | 20 |
| | 1 | 10 |
| | 2 | 5 |
| | 5 | 3 |
| | 10 | 2 |
| Coupling soil-sensor alam (in situ) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Atur sensor pada permukaan tanah. 2. Hindari penempatan sensor pada permukaan tanah lunak (lumpur, semak-semak) atau tanah lunak setelah hujan. | |
| Coupling soil-sensor buatan (Artificial) | <ol style="list-style-type: none"> 1. Hindari lempengan yang terbuat dari material lunak seperti karet dan busa. 2. Pada kemiringan yang curam dimana sulit mendapatkan level sensor yang baik, pasanglah sensor menggunakan timbunan pasir atau wadah yang diisi pasir | |
| Keberadaan Bangunan atau pohon | <ol style="list-style-type: none"> 1. Hindari pengukuran dekat dengan bangunan, gedung bertingkat, dan pohon yang tinggi jika tiupan angin di atas ± 5 m/s. Kondisi ini sangat mempengaruhi hasil analisis HVSR yang ditunjukkan dengan kemunculan frekuensi rendah pada kurva. 2. Hindari pengukuran di lokasi tempat parkir, pipa air, dan gorong-gorong. | |
| Kondisi cuaca | <ol style="list-style-type: none"> 1. Angin: lindungi sensor dari angin jika kecepatan angin di atas ± 5 m/s. 2. Hujan: hindari pengukuran di bawah terpaan hujan lebat kecuali hujan ringan karena tidak memberikan gangguan yang berarti. 3. Suhu: memeriksa sensor seismograf dan mengikuti instruksi pabrik. | |
| Gangguan | <ol style="list-style-type: none"> 1. Sumber monokromatik: hindari pengukuran mikrotremor dekat dengan mesin, industri, pompa air, dan generator yang sedang beroperasi. 2. Sumber sementara: jika terdapat sumber getar <i>transient</i> (jejak) langkah kaki, mobil lewat, motor lewat) tingkatkan durasi pengukuran untuk memberikan jendela yang cukup untuk analisis setelah gangguan tersebut hilang. | |

D. Teknik Analisis Data

1. *Cutting* sinyal mikrotremor menggunakan *software* Geopsy.

Data hasil pengukuran mikrotremor yang tersimpan dalam format .MSD kemudian dilakukan proses *cutting* atau pemilihan sinyal tanpa *noise* secara manual menggunakan *software* Geopsy. Kriteria sinyal tanpa *noise* yaitu sinyal dengan amplitudo gelombang 0,1 μm sampai 1 μm . Sinyal hasil *cutting* kemudian disimpan dalam format .hv sebelum diubah ke dalam format .xls menggunakan *Command Prompt*. Contoh *cutting* sinyal pada titik D36 ditunjukkan pada Gambar 15.

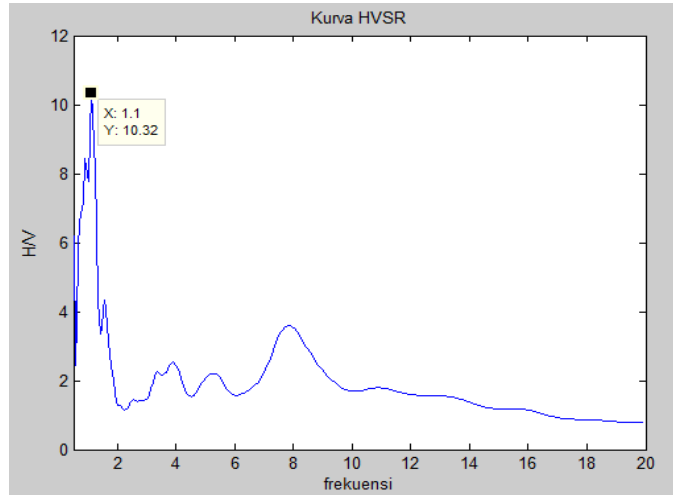


Gambar 15. Contoh *cutting* sinyal pada titik D36.

2. Menganalisis sinyal mikrotremor dengan *Fast Fourier Transform* (FFT).

Hasil *cutting* sinyal mikrotremor yang terdiri dari komponen sinyal horizontal dan komponen vertikal kemudian dianalisis dengan FFT menggunakan Matlab R2010a. Pengolahan di Matlab R2010a meliputi proses *smoothing Konno & Ohmachi* yang bertujuan untuk memperhalus spektrum sinyalnya. Kemudian hasil *smoothing* tersebut dianalisis menggunakan metode

HVSR sehingga dihasilkan kurva H/V sebagai fungsi frekuensi dan rasio H/V seperti ditunjukkan Gambar 16.



Gambar 16. Kurva H/V hasil analisis di Matlab R2010a.

Selanjutnya menganalisis kurva H/V berdasarkan kriteria *reliable* yang harus terpenuhi sesuai yang disarankan oleh *SESAME European Research Project* sebagai berikut:

- 1) Jika *peak* pada kurva H/V terlihat jelas, nilai frekuensi dominan (f_g) harus lebih besar dari $10/l_w$. Dengan l_w adalah panjang *window* yaitu 20 sekon.
- 2) Nilai *number of cycles* (n_c) harus lebih besar dari $l_w n_w f_g$ dengan n_w adalah jumlah *window*.
- 3) a. Jika nilai f_g lebih dari 0,5 Hz, nilai standar deviasi (σ_A) harus lebih kecil dari 2 untuk nilai f_g antara $0,5f_g < f_g < 2f_g$.
b. Jika nilai f_g kurang dari 0,5 Hz, nilai standar deviasi (σ_A) harus lebih kecil dari 3 untuk nilai f_g antara $0,5f_g < f_g < 2f_g$.

Kriteria *clear peak* kurva H/V adalah sebagai berikut:

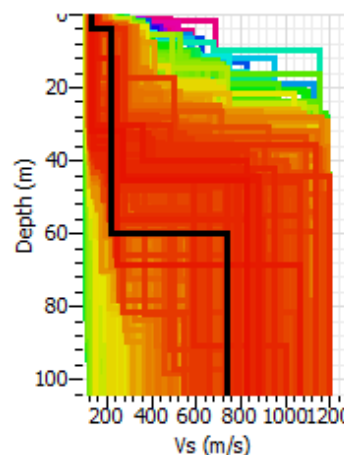
- 1) Terdapat satu frekuensi (f^-) dengan nilai antara $\frac{1}{4}f_g$ sampai f_g yang memiliki nilai $A_{H/V} < \frac{1}{2}f_g$.
- 2) Terdapat frekuensi lain (f^+) dengan nilai antara f_g sampai $\frac{1}{4}f_g$ yang memiliki nilai $A_{H/V} < \frac{1}{2}f_g$.
- 3) Nilai faktor amplifikasi harus lebih dari 2 atau $A_g > 2$.
- 4) *Peak* dari kurva H/V nilai standar deviasinya (σ_A) harus berada pada frekuensi yang sama atau masih dalam batas toleransi 5%.
- 5) Nilai *peak* standar deviasi (σ_f) harus kurang dari batas ambang nilai *threshold* $\varepsilon(f_g)$ yang ditunjukkan pada Tabel 5.
- 6) Nilai $\sigma_A(f_g)$ harus kurang dari batas ambang nilai f_g .

Tabel 5. Nilai *threshold* untuk σ_A dan $\sigma_f(f_g)$ (SESAME, 2004).

| <i>Frequency range</i> [Hz] | < 0,2 | 0,2 – 0,5 | 0,5 – 1,0 | 1,0 – 2,0 | > 2,0 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_g)$ [Hz] | $0,25 f_g$ | $0,20 f_g$ | $0,15 f_g$ | $0,10 f_g$ | $0,05 f_g$ |
| $\theta(f_g)$ for $\sigma_A(f_g)$. | 3,0 | 2,5 | 2,0 | 1,78 | 1,58 |
| $\log \theta(f_g)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_g)$ | 1,48 | 1,40 | 1,30 | 0,25 | 0,20 |

3. Menganalisis kurva H/V menggunakan metode *ellipticity curve*

Hasil analisis kurva H/V digunakan sebagai input data pada pemodelan *ground profiles* dengan metode *ellipticity curve* menggunakan program Dinver pada *software* Geopsy. Metode *ellipticity curve* ini menghasilkan *ground profiles* nilai kecepatan gelombang S (V_s) dan kedalaman (*depth*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17. Nilai V_s yang diperoleh sangat bergantung pada nilai input parameter model awal yang menggambarkan karakteristik *site* atau geologi daerah penelitian seperti nilai kecepatan gelombang P (V_p), *Poisson's Ratio*, nilai kecepatan gelombang S (V_s), dan densitas atau massa jenis batuan. Model dengan nilai *misfit* terendah ($0 < misfit < 1$) digunakan sebagai kriteria model terbaik.



Gambar 17. *Ground profiles* nilai kecepatan gelombang S (V_s) dan kedalaman (*depth*).

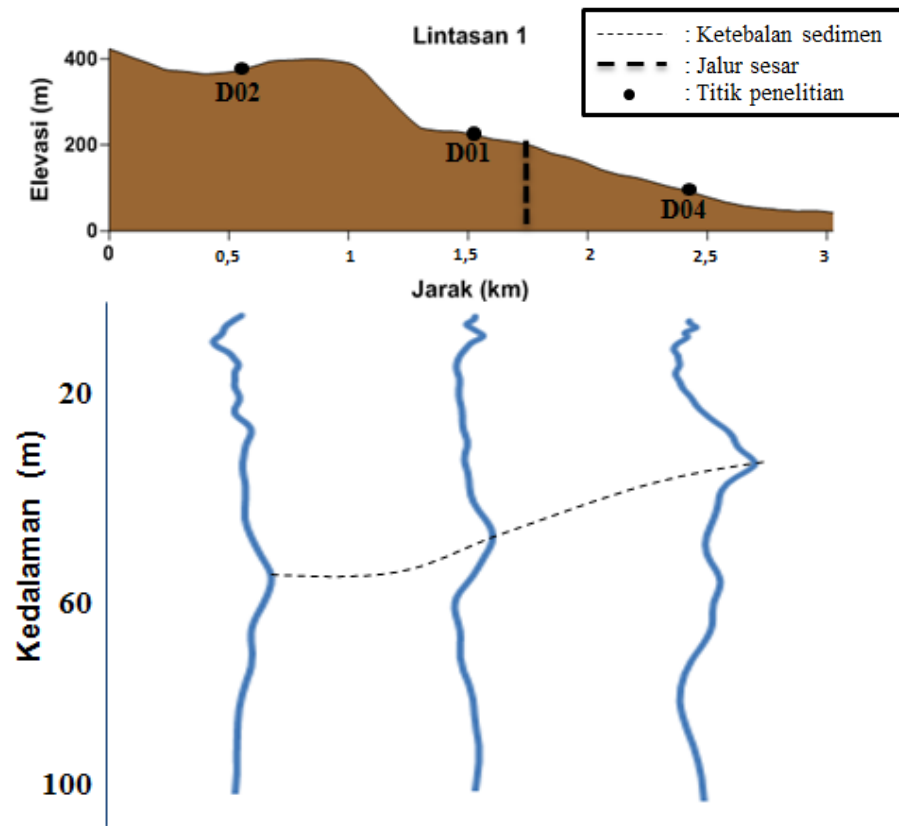
Banyaknya garis warna yang ditampilkan pada Gambar 17 menunjukkan iterasi dari pemodelan kurva untuk nilai *misfit* yang berbeda. Garis hitam menunjukkan model kurva dengan *misfit* terendah yang digunakan untuk menganalisis nilai V_s per lapisannya.

4. Pemodelan ketebalan lapisan sedimen dan nilai faktor amplifikasi

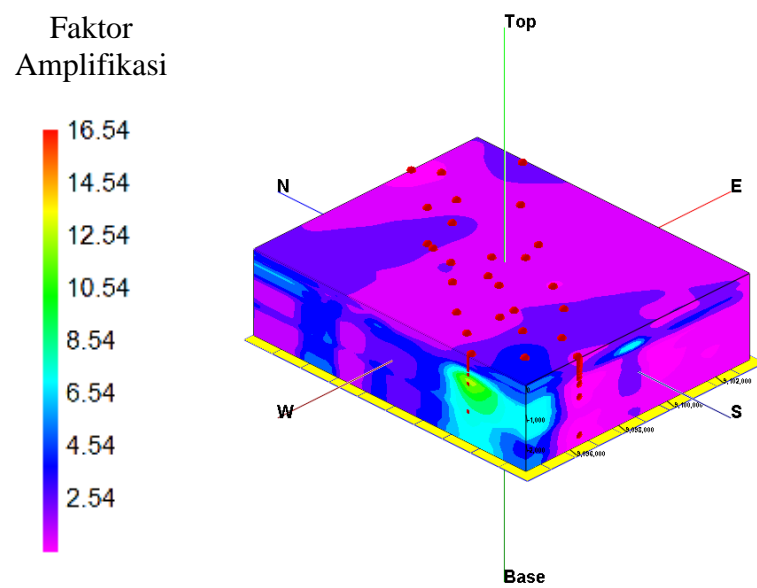
Data nilai kecepatan gelombang S (V_s) pada sedimen lunak dari *ground profiles* V_s kemudian digunakan untuk memperoleh nilai ketebalan (H) dari sedimen lunak menggunakan formula seperti pada persamaan (39). Dengan H adalah tebal lapisan sedimen, V_s adalah kecepatan gelombang S, dan f_g adalah frekuensi dominan.

Nilai ketebalan dari sedimen lunak tersebut digunakan untuk pemodelan yang ditunjukkan dengan puncak spektrum hubungan antara parameter faktor amplifikasi dan kedalaman *bedrock* yang merepresentasikan ketebalan lapisan sedimen. Jika setiap spektrum dalam satu lintasan pengamatan disejajarkan secara vertikal maka akan terbentuk penampang menyerupai penampang seismik (Wibowo *et al.*, 2018b). Penggambaran lintasan penampang seismik ditunjukkan pada Gambar 18.

Nilai ketebalan lapisan sedimen juga digunakan sebagai input data untuk melakukan pemodelan 3D di Rockwork15 yang hasilnya ditampilkan pada Gambar 19. Pemodelan 3D bertujuan untuk mengetahui persebaran nilai faktor amplifikasi pada daerah penelitian yang diinterpretasikan berdasarkan ketebalan lapisan sedimen di setiap formasi geologi.



Gambar 18. Lintasan penampang seismik pada lintasan 1.

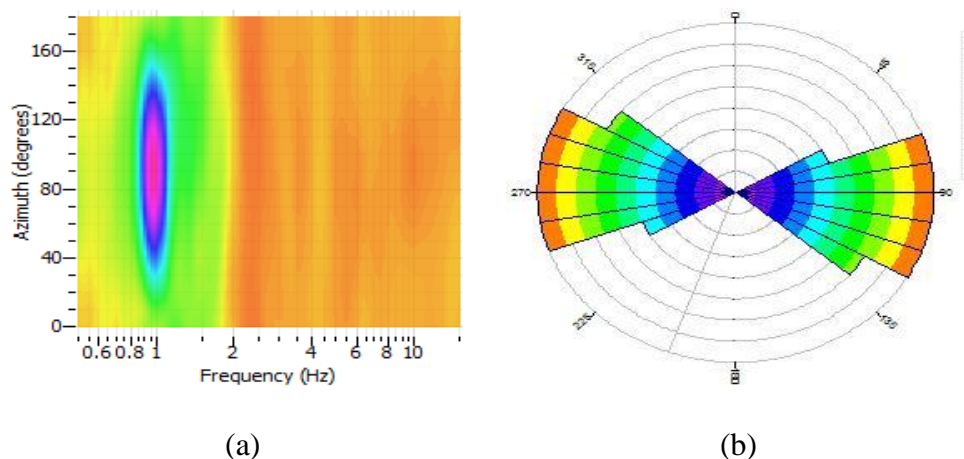


Gambar 19. Model 3D ketebalan lapisan sedimen dan faktor amplifikasi.

5. Pemodelan orientasi Sesar Grindulu

Sinyal mikrotremor hasil pengukuran yang berupa komponen vertikal dan komponen horizontal dalam domain waktu kemudian dianalisis menggunakan metode HVSr. Analisis dilakukan menggunakan *software* Geopsy untuk mengetahui arah gerakan tanah dengan menggabungkan hasil analisis HVSr dan perhitungan sudut polarisasi pada komponen horizontal (Pischiutta *et al.*, 2017). Hasil analisis tersebut berupa spektrum H/V sebagai fungsi frekuensi untuk sumbu x dan sudut *azimuth* arah sumber datang gelombang seismik untuk sumbu y .

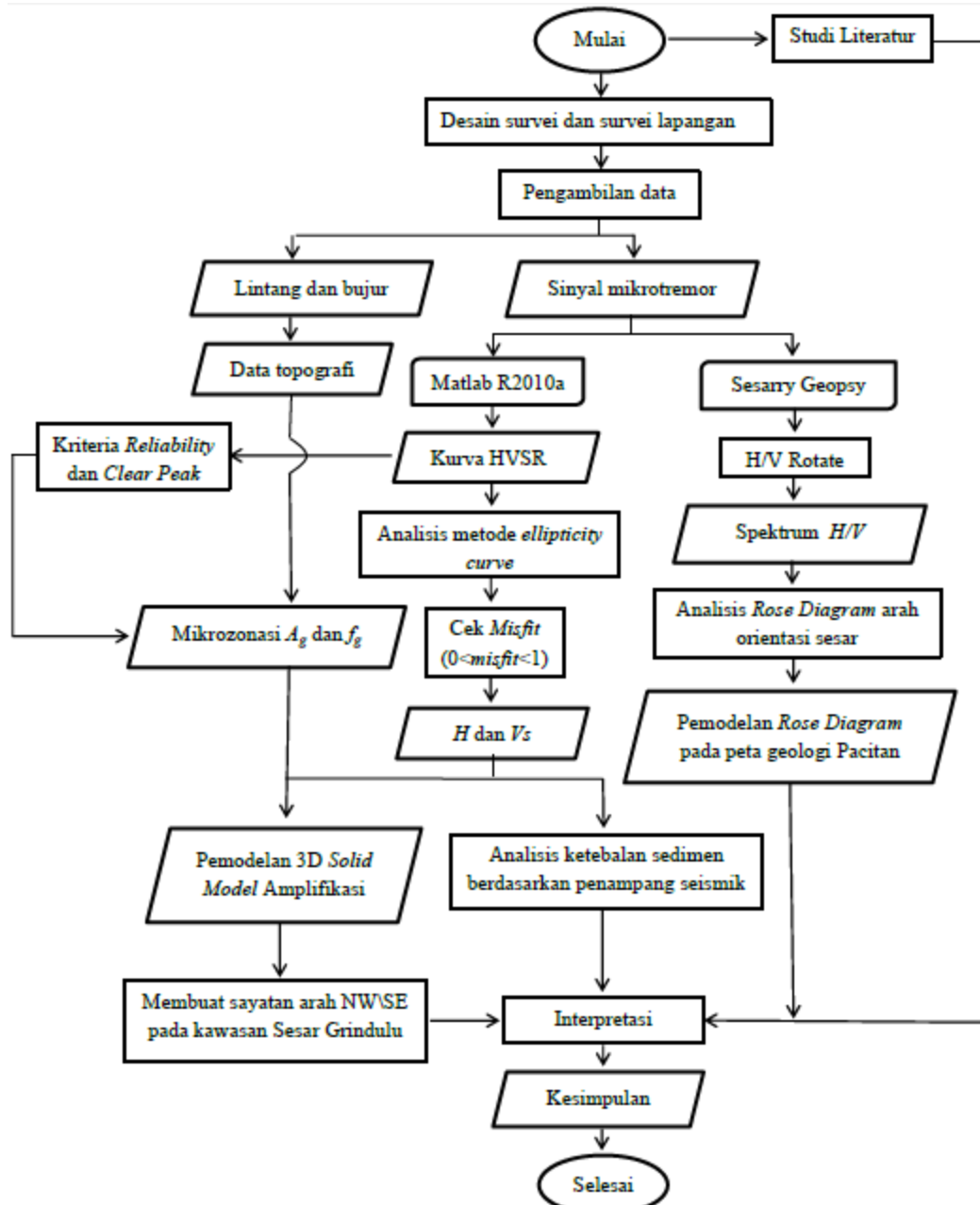
Data hasil analisis HVSr berupa spektrum H/V digunakan sebagai input pemodelan *rose diagram* di *software* Rockwork15. Hasil pemodelan *rose diagram* merepresentasikan polarisasi horizontal dari gerakan tanah pada setiap titik yang diukur dari koordinat utara sebagai acuannya kemudian di *plot* dengan dimensi diperkecil sesuai dengan nilai puncak amplifikasi kurva H/V . Hasil pemodelannya ditampilkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Pemodelan orientasi Sesar Grindulu (a) Spektrum H/V
(b) *Rose diagram* arah orientasi sesar.

E. Diagram Alir Penelitian

Adapun langkah kerja pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 21.



Gambar 21. Diagram alir penelitian.

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan parameter frekuensi dominan (f_g) dan faktor amplifikasi (A_g) yang digunakan untuk menganalisis karakteristik geologi daerah penelitian terhadap potensi gempa bumi yang divisualisasikan dalam mikrozonasi gempa bumi, model penampang seismik, dan *rose diagram* arah sumber datang gelombang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu sebagai berikut.

A. Mikrozonasi Gempa Bumi

1. Mikrozonasi nilai frekuensi dominan (f_g)

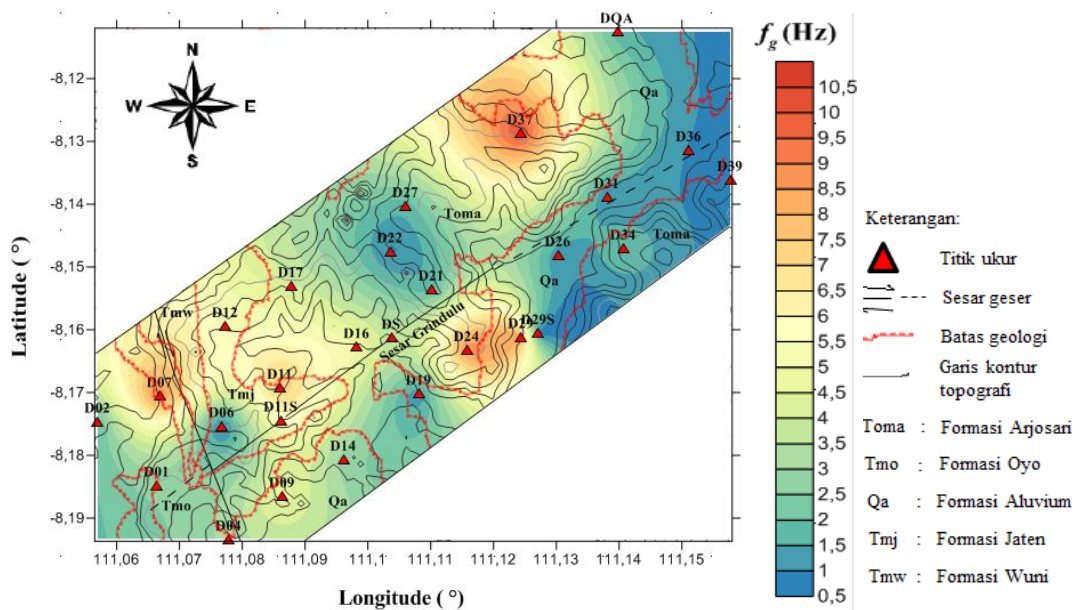
Mikrozonasi dilakukan dengan tujuan untuk memetakan daerah potensi gempa bumi di kawasan jalur Sesar Grindulu berdasarkan persebaran nilai frekuensi dominan (f_g). Nilai tersebut dapat mencerminkan karakteristik geologi daerah penelitian berdasarkan respon terhadap gempa bumi, sehingga tinggi rendahnya nilai frekuensi dominan bergantung pada kondisi struktur bawah permukaan di kawasan jalur Sesar Grindulu. Nilai frekuensi dominan berkaitan dengan kedalaman bidang pantul di bawah permukaan, dimana bidang pantul tersebut merupakan batas antara lapisan sedimen dengan batuan keras (*bedrock*). Dapat diartikan semakin kecil nilai frekuensi dominan (periode gelombang yang panjang) maka semakin dalam bidang pantul gelombang Rayleigh yang terbentuk atau menunjukkan semakin tebal

lapisan sedimennya, dan sebaliknya semakin tinggi nilai frekuensi dominan maka semakin kecil bidang pantul gelombang Rayleigh yang terbentuk atau menunjukkan semakin tipis lapisan sedimennya.

Mikrozonasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan data topografi. Data topografi di daerah penelitian dikorelasi dengan ketebalan lapisan sedimen. Daerah yang berada pada topografi dataran tinggi atau perbukitan memiliki lapisan sedimen tipis, sebaliknya daerah yang berada pada topografi dataran rendah atau cekungan memiliki lapisan sedimen tebal. Dataran rendah memiliki lapisan sedimen tebal dikarenakan terbentuk dari hasil proses deformasi batuan di daerah perbukitan yang terbawa oleh arus sungai dari dataran tinggi kemudian terendapkan menuju dataran rendah, sehingga daerah yang memiliki topografi dataran rendah lebih berisiko mengalami penguatan gelombang saat terjadi gempa bumi dibandingkan daerah perbukitan. Penguatan gelombang seismik yang terjadi pada daerah dataran rendah dengan penyusun lapisan sedimen tebal berupa material lunak cenderung memiliki kelembaman untuk merespon gelombang sekunder, sehingga frekuensi predominannya akan mengecil dan gelombang sekunder membutuhkan waktu cukup lama untuk melewati material lunak tersebut yang dapat mempengaruhi cepat rambat gelombang sekunder (V_s) (Kurniawati, 2016).

Data topografi diperoleh dari *plotting* titik penelitian di *software* Google Earth kemudian dikonversi menggunakan program TCX Converter sehingga diperoleh data ketinggian (*altitude*). Gambar 22 menunjukkan persebaran titik penelitian di kawasan jalur Sesar Grindulu yang terdapat pada Formasi

Berdasarkan mikrozonasi yang ditunjukkan pada Gambar 23, persebaran frekuensi dominan (f_g) di kawasan jalur Sesar Grindulu bernilai antara 0,55 Hz sampai 10,5 Hz yang ditunjukkan dengan kontur warna biru tua untuk nilai terendah hingga kontur warna merah untuk nilai tertinggi. Apabila mengacu pada klasifikasi tanah menurut Kanai pada Tabel 1 disebutkan bahwa nilai $f_g < 2,5$ Hz termasuk dalam klasifikasi tanah Tipe I yang tersusun oleh batuan aluvial hasil sedimentasi delta, *top soil*, dan lumpur. Nilai f_g yang rendah yaitu $< 2,5$ Hz banyak terdapat di Dataran Aluvial Sungai Grindulu tepatnya berada pada Formasi Aluvium (Qa) antara lain titik D19, D29S, D26, D31, D36, dan DQA.



Gambar 23. Mikrozonasi nilai frekuensi dominan (f_g), topografi dan geologi di kawasan jalur Sesar Grindulu.

Nilai frekuensi dominan yang rendah ini mencerminkan karakteristik geologi pada titik ukur di Dataran Aluvial Sungai Grindulu berupa lapisan sedimen yang tebal. Sunardi *et al.* (2012) menyatakan bahwa frekuensi dominan di sekitar jalur sungai bernilai rendah, dikarenakan berhubungan dengan morfologi tanggul alam dan dataran banjir. Meskipun nilai f_g pada titik ukur di dataran aluvial sekitar Sungai Grindulu rendah, namun terdapat juga beberapa titik ukur dengan nilai f_g sedang hingga tinggi yaitu 2,75 Hz; 4,75 Hz; dan 8,5 Hz pada titik D09, D14, dan D29. Hal ini terkait karakteristik geologi di titik tersebut yang diduga tersusun oleh batuan keras berupa sisipan breksi gunung api dari penyusun Formasi Arjosari (Toma) yang permukaannya tertutup oleh lapisan sedimen tebal hingga tipis.

Pada Formasi Arjosari (Toma) terdapat 11 titik ukur yang memiliki variasi nilai frekuensi dominan rendah hingga tinggi dari 0,7 Hz sampai 10,5 Hz

yaitu titik D04, D16, DS, D17, D21, D22, D24, D27, D34, D37, dan D39. Formasi Arjosari tersusun oleh material konglomerat, batupasir, batulempung, batugamping, napal pasir, dan bersisipan dengan breksi gunung api (Samodra *et al.*, 1992). Mengacu pada klasifikasi tanah menurut Kanai, sebagian besar titik ukur yang berada pada Formasi Arjosari termasuk kategori Tipe I antara lain titik D21, D22, D27, D34, dan D39.

Nilai f_g yang rendah diduga karena terdapat sedimen tebal hasil sedimentasi batuan keras yang tersusun oleh butir pasir dan butir lempung yang memiliki densitas (massa jenis) batuan rendah sehingga memiliki struktur permukaan tanah cenderung tidak stabil. Selain itu, terdapat beberapa titik ukur yang termasuk dalam klasifikasi tanah Tipe III ($2,5 \text{ Hz} < f_g < 4 \text{ Hz}$) yaitu titik DS dan D04, sedangkan titik D16 dan D17 termasuk dalam klasifikasi tanah Tipe IV Jenis I ($4 \text{ Hz} < f_g < 10 \text{ Hz}$). Klasifikasi tanah Tipe III dan Tipe IV Jenis I tersusun oleh batuan aluvial yang terdiri dari *sandy gravel*, *sandy hard clay*, dan *loam* dengan variasi ketebalan sedimen berturut-turut yaitu sedimen tebal dan sedimen menengah. Adapun titik ukur D24 dan D37 termasuk dalam klasifikasi tanah Tipe IV Jenis II ($6,7 \text{ Hz} < f_g < 20 \text{ Hz}$) dengan penyusun lapisannya berupa hasil pelapukan batuan tersier berumur tua yang terdiri dari *hard sandy*, dan *gravel* dengan dominasi batuan keras yang tertutup oleh sedimen tipis pada permukaannya.

Formasi Jaten (Tmj) memiliki nilai frekuensi dominan tinggi antara lain pada titik D11S dan D12 yang termasuk dalam klasifikasi tanah Tipe IV Jenis I. Adapun titik D11 memiliki nilai f_g sebesar 7,5 Hz dan termasuk dalam

klasifikasi tanah Tipe IV Jenis II yang tersusun oleh batuan keras dengan sedimen tipis di permukaan. Namun, terdapat titik ukur dengan nilai f_g rendah yaitu 0,55 Hz di titik D06. Rendahnya nilai f_g pada titik tersebut diduga karena mengalami deformasi batuan cukup intensif, sehingga terdapat sedimen tebal di permukaan yang terendapkan di lokasi titik tersebut.

Formasi Oyo (Tmo) terdiri dari dua titik ukur yaitu D02 dan D01 yang memiliki nilai frekuensi dominan masing-masing 1,95 Hz dan 2,7 Hz dan termasuk dalam klasifikasi tanah Tipe I dan Tipe III dengan variasi ketebalan lapisan sedimen di permukaan berturut-turut yaitu sangat tebal dan tebal atau mencapai ketebalan sedimen 10 meter hingga 30 meter.

Pada Formasi Wuni (Tmw) terdapat titik D07 yang memiliki nilai frekuensi dominan relatif tinggi yaitu 9,1 Hz dan termasuk dalam klasifikasi tanah Tipe IV Jenis II. Penyusun Formasi Wuni adalah material breksi gunung api, tuf, batupasir tufan (Samodra *et al.*, 1992). Nilai f_g di titik D07 tinggi dikarenakan terdapat dominasi batuan keras penyusun Formasi Wuni yaitu batuan breksi gunung api yang banyak terdapat di sekitar lokasi titik pengukuran seperti ditampilkan pada Gambar 24.

Berdasarkan mikrozonasi nilai f_g pada Gambar 23, variasi nilai f_g di setiap formasi geologi menunjukkan persebaran nilai f_g rendah di kawasan jalur Sesar Grindulu dimana sebagian besar terletak di daerah dengan kondisi topografi dataran rendah berupa cekungan. Namun terdapat juga beberapa titik dengan nilai f_g rendah yang terletak di daerah perbukitan seperti di titik D22 dan D39. Nilai f_g di kawasan jalur Sesar Grindulu tidak hanya dipengaruhi

oleh kondisi topografinya, tetapi juga dipengaruhi oleh tingkat deformasi batuan pada masing-masing formasi geologi.



Gambar 24. Batuan breksi gunung api di titik D07.

2. Mikrozonasi nilai faktor amplifikasi (A_g).

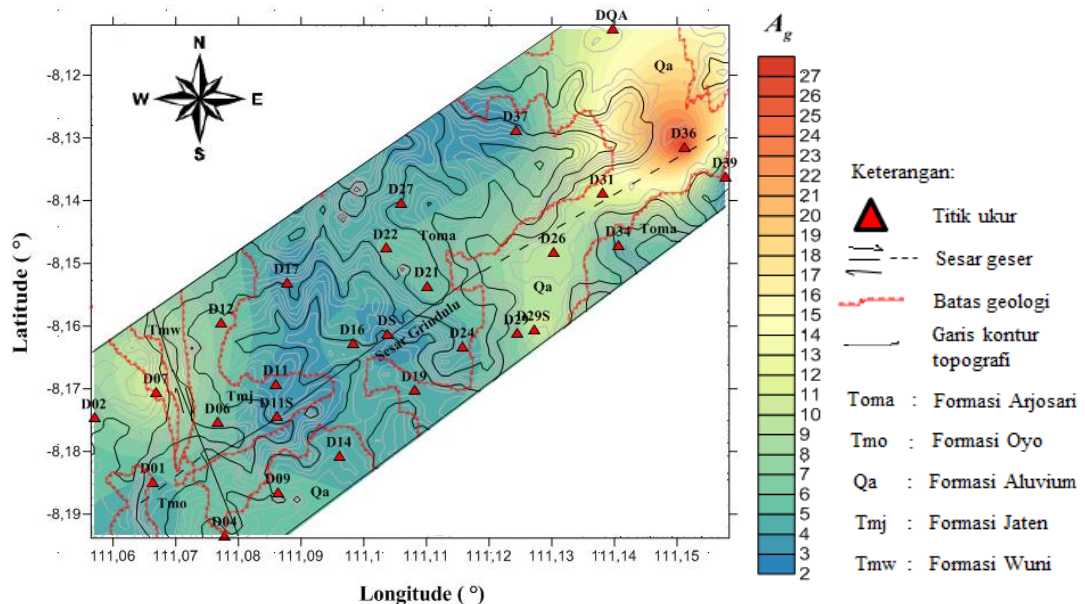
Menurut Sutrisno *et al.* (2013), faktor amplifikasi merupakan faktor penguatan gelombang seismik yang menjalar pada lapisan sedimen di permukaan tanah. Nilai faktor amplifikasi dipengaruhi oleh geologi penyusun di daerah penelitian. Apabila daerah tersebut tersusun oleh sedimen lunak (pasir, pasir lanauan, gambut), maka dimungkinkan akan mengalami penguatan gelombang seismik yang relatif besar, sehingga daerah tersebut memiliki risiko mengalami kerusakan yang cukup berarti. Marjiyono (dalam Efendi, 2017) telah membagi zona risiko kerusakan terhadap potensi gempa bumi berdasarkan nilai faktor amplifikasinya (A_g) yaitu nilai A_g yang berkisar antara 0 sampai 3 dikategorikan zona risiko kerusakan rendah, nilai A_g antara 3 sampai 6 dikategorikan zona risiko kerusakan sedang, nilai A_g antara 6

sampai 9 dikategorikan zona risiko kerusakan tinggi, dan nilai A_g lebih dari 9 dikategorikan zona risiko kerusakan sangat tinggi. Zonasi ini akan menjadi acuan bagi penulis untuk menginterpretasi nilai A_g pada masing-masing formasi geologi.

Mikrozonasi pada Gambar 25 menunjukkan persebaran nilai faktor amplifikasi di kawasan jalur Sesar Grindulu yang memiliki rentang antara 2,85 sampai 27,15. Pada Formasi Aluvium didapatkan nilai A_g dari 4,54 sampai 27,15 dan termasuk kategori zona risiko kerusakan dari sedang sampai sangat tinggi dengan nilai A_g tertinggi yaitu di titik D36. Pada batuan yang sama, nilai amplifikasi dapat bervariasi sesuai dengan tingkat deformasi dan pelapukan pada batuan tersebut (Arifin *et al.*, 2014). Dalam hal ini, nilai A_g di titik D36 yang sangat tinggi mengindikasikan bahwa di daerah tersebut tersusun oleh sedimen tebal hasil dari proses deformasi dan pelapukan batuan yang berlangsung cukup intensif.

Pada Formasi Arjosari didapatkan nilai A_g terendah 2,85 (titik D39) dan 5,67 (titik D04). Apabila mengacu pada zonasi risiko tingkat kerusakan menurut Marjiyono, Formasi Arjosari termasuk dalam kategori zona risiko kerusakan dari rendah sampai sedang. Pada Formasi Jaten didapatkan nilai A_g terendah 3,02 (titik D11S) dan tertinggi 6,55 (titik D12) dan termasuk kategori zona risiko kerusakan dari sedang sampai tinggi. Pada Formasi Oyo didapatkan nilai A_g masing-masing 4,61 dan 6,42 yang termasuk kategori zona risiko kerusakan berturut-turut yaitu sedang dan tinggi. Pada Formasi

Wuni didapatkan nilai A_g yaitu 11,39 dan termasuk kategori zona risiko kerusakan sangat tinggi.



Gambar 25. Mikrozonasi nilai faktor amplifikasi (A_g), topografi dan geologi di kawasan jalur Sesar Grindulu.

Menurut Nakamura (2000), parameter faktor amplifikasi yang dapat merusak bangunan yaitu bernilai lebih dari 3 dan berasosiasi dengan frekuensi dominan relatif rendah ($f_g < 2,5$ Hz). Ditinjau dari persebaran nilai A_g kawasan jalur Sesar Grindulu dapat dikategorikan sebagai daerah yang dimungkinkan mengalami penguatan gelombang saat terjadi gempa bumi. Namun, kerusakan cukup berarti yang ditimbulkan apabila terjadi gempa bumi terletak pada titik D02, D06, D19, D21, D22, D26, D27, D29S, D31, D34, D36, dan DQA yang sebagian besar dari titik tersebut terletak di Dataran Aluvial Sungai Grindulu. Nilai A_g lebih dari 3 tersebar merata di kawasan jalur Sesar Grindulu kecuali di titik D39 dan DS yang memiliki nilai A_g kurang dari 3.

Persebaran nilai faktor amplifikasi di kawasan jalur Sesar Grindulu tidak dipengaruhi oleh kondisi topografinya. Nilai A_g relatif tinggi tidak hanya terdapat di daerah cekungan dengan dominasi sedimen lunak, namun juga terdapat di beberapa titik yang terletak di daerah perbukitan, antara lain di titik D12. Berdasarkan observasi di lapangan, titik D12 merupakan daerah rawan gerakan tanah yang dampaknya telah dirasakan oleh masyarakat setempat seperti keretakan pada dinding bangunan dan terjadi deformasi batuan di daerah perbukitan. Dampak yang ditimbulkan akibat gerakan tanah di titik D12 ditampilkan pada Gambar 26.

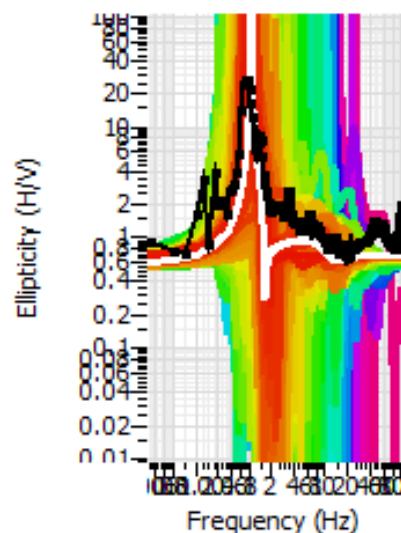
Selain parameter frekuensi dominan dan faktor amplifikasi, struktur bawah permukaan kawasan jalur Sesar Grindulu dapat diketahui dari parameter kecepatan gelombang S yang diperoleh dari analisis *ground profiles* menggunakan metode *ellipticity curve*.



Gambar 26. Dampak gerakan tanah di titik D12 (a) keretakan pada dinding bangunan (b) deformasi batuan.

B. *Ellipticity Curve* dan *Ground Profiles* V_s

Metode *ellipticity curve* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui nilai kecepatan gelombang S setiap lapisan di bawah permukaan (*ground profiles*) berdasarkan kurva H/V hasil analisis HVSR sebagai input model awal. Metode ini menggunakan beberapa parameter yang dijadikan sebagai inisialisasi awal yaitu kecepatan gelombang S (V_s), kecepatan gelombang P (V_p), *Poisson's Ratio*, dan densitas batuan. Input nilai parameter tersebut disesuaikan dengan kondisi geologi pada masing-masing formasi di kawasan jalur Sesar Grindulu sebagai berikut: nilai V_s antara 100 m/s sampai 3000 m/s, nilai V_p antara 200 m/s sampai 5000 m/s, *Poisson's Ratio* bernilai antara 0,2 sampai 0,5 dan densitas batuan bernilai antara 1200 kg/m³ sampai 2500 kg/m³. Setelah dimasukkan nilai parameter tersebut pada program Dinver, kemudian diperoleh kurva dari metode *ellipticity curve* yang ditunjukkan pada Gambar 27.



Gambar 27. Kurva dari metode *ellipticity curve* di kawasan jalur Sesar Grindulu.

Spektrum warna pada kurva menunjukkan variasi nilai *misfit*. *Misfit* terendah ditunjukkan oleh warna putih sedangkan nilai *misfit* tertinggi ditunjukkan oleh warna ungu. Spektrum warna hitam pada kurva menunjukkan kurva *H/V* sebagai model referensi. *Ellipticity curve* merupakan kurva yang merepresentasikan data dari nilai frekuensi dan nilai eliptisitas gelombang Rayleigh yang digunakan untuk analisis *ground profiles* V_s setiap lapisan pada masing-masing formasi (Patimah, 2017). Hasil analisis *ground profiles* dilakukan menggunakan klasifikasi *site* berdasarkan nilai V_s pada setiap lapisan yang mengacu pada hasil penyelidikan tanah dan laboratorium SNI 1726 (Badan Standarisasi Nasional, 2012).

Hasil analisis *ground profiles* di kawasan jalur Sesar Grindulu menunjukkan persebaran nilai kecepatan gelombang S pada masing-masing formasi relatif beragam. Nilai V_s dihasilkan dari pemodelan *ground profiles* menggunakan 3 *layer* (lapisan) material pada setiap titik lokasi pengukuran. Setiap lapisan material menginterpretasikan karakteristik geologi pada masing-masing formasi, yaitu lapisan pertama menginterpretasikan lapisan penutup atau tanah, lapisan kedua menginterpretasikan lapisan sedimen, dan lapisan ketiga menginterpretasikan batuan dasar. Menurut Wibowo *et al.* (2018a), ketebalan setiap lapisan material pada masing-masing formasi memiliki karakter yang berbeda, formasi yang terbentuk dari hasil proses pengendapan memiliki lapisan tanah dan sedimen yang lebih tebal dibandingkan dengan formasi yang terbentuk dari aktivitas pengangkatan atau

gunung api. Hal ini sesuai dengan hasil interpretasi karakteristik geologi di kawasan jalur Sesar Grindulu.

Karakteristik geologi di kawasan jalur Sesar Grindulu berdasarkan Tabel 6 menunjukkan variasi nilai V_s pada lapisan pertama yaitu dari 134,83 m/s sampai 569,09 m/s. Pada Formasi Aluvium lapisan penutupnya memiliki nilai V_s dari 134,83 m/s sampai 359,97 m/s yang terdiri dari material tanah lunak, tanah sedang, dan tanah keras. Pada Formasi Arjosari lapisan penutupnya memiliki nilai V_s dari 315,06 m/s sampai 503,47 m/s yang terdiri dari material tanah sedang dan tanah keras. Pada Formasi Jaten lapisan penutupnya memiliki nilai V_s dari 364,77 m/s sampai 569,09 m/s yang terdiri dari tanah keras dan batuan lunak. Pada Formasi Oyo lapisan penutupnya memiliki nilai V_s masing-masing 289,28 m/s dan 372,88 m/s secara berturut-turut terdiri dari material tanah sedang dan tanah keras. Kemudian pada Formasi Wuni lapisan penutupnya memiliki nilai V_s yaitu 416,39 m/s yang terdiri dari material tanah keras dan batuan lunak.

Karakteristik geologi di kawasan jalur Sesar Grindulu pada lapisan kedua menunjukkan nilai V_s dari 215,25 m/s sampai 1288,27 m/s yang terdiri dari tanah sedang, tanah keras, batuan lunak, dan batuan. Lapisan kedua yang menginterpretasikan lapisan sedimen dengan nilai $V_s < 750$ m/s terdapat di titik D26 dan titik D36 pada Formasi Aluvium, kemudian titik D02 pada Formasi Oyo.

Tabel 6. Hasil klasifikasi *site* berdasarkan nilai kecepatan gelombang S (V_s).

| Titik | Titik Koordinat | | V_s (m/s) | | | Formasi Geologi | Klasifikasi <i>site</i> SNI 1726-2012 | | |
|-------|-----------------|-----------|-------------|------------|-------------|-----------------|--|------------|-------------|
| | Lintang (°) | Bujur (°) | Lapisan I | Lapisan II | Lapisan III | | Lapisan I | Lapisan II | Lapisan III |
| D01 | -8.184 | 111.067 | 372,88 | 1165,25 | 2525,77 | Tmo | SC | SB | SA |
| D02 | -8.174 | 111.056 | 289,28 | 745,39 | 1491,54 | Tmo | SD | SC | SB |
| D04 | -8.193 | 111.077 | 372,51 | 1129,70 | 2722,39 | Toma | SC | SB | SA |
| D16 | -8.162 | 111.098 | 503,47 | 1288,26 | 2677,61 | Toma | SC | SB | SA |
| DS | -8.161 | 111.103 | 369,17 | 959,86 | 1718,98 | Toma | SC | SB | SA |
| D17 | -8.153 | 111.087 | 351,33 | 864,59 | 1759,69 | Toma | SC | SB | SA |
| D21 | -8.153 | 111.110 | 315,06 | 1113,35 | 2682,99 | Toma | SD | SB | SA |
| D22 | -8.147 | 111.103 | 349,23 | 853,43 | 1450,97 | Toma | SD | SB | SB |
| D24 | -8.163 | 111.115 | 324,00 | 841,57 | 1726,60 | Toma | SD | SB | SA |
| D27 | -8.140 | 111.106 | 440,80 | 1112,25 | 2529,35 | Toma | SC | SB | SA |
| D34 | -8.147 | 111.140 | 364,56 | 1014,52 | 1763,19 | Toma | SC | SB | SA |
| D37 | -8.128 | 111.124 | 494,01 | 1288,27 | 2709,96 | Toma | SC | SB | SA |
| D39 | -8.136 | 111.157 | 366,38 | 951,66 | 1677,27 | Toma | SC | SB | SA |
| D06 | -8.175 | 111.076 | 364,77 | 932,45 | 1841,72 | Tmj | SC | SB | SA |
| D11 | -8.169 | 111.086 | 494,78 | 1154,82 | 2369,26 | Tmj | SC | SB | SA |
| D11S | -8.174 | 111.086 | 569,09 | 1450,39 | 2755,26 | Tmj | SC | SB | SA |
| D12 | -8.159 | 111.077 | 434,92 | 1118,46 | 2161,12 | Tmj | SC | SB | SA |
| D07 | -8.170 | 111.066 | 416,39 | 1123,40 | 2718,08 | Tmw | SC | SB | SA |
| D09 | -8.186 | 111.086 | 334,64 | 875,31 | 1612,05 | Qa | SD | SB | SA |
| D14 | -8.180 | 111.096 | 354,61 | 866,61 | 1767,34 | Qa | SC | SB | SA |
| D19 | -8.170 | 111.108 | 343,80 | 894,75 | 1813,86 | Qa | SD | SB | SA |
| D29 | -8.161 | 111.124 | 326,93 | 844,95 | 2909,25 | Qa | SD | SB | SA |

| | | | | | | | | | |
|------|--------|---------|--------|--------|---------|----|-----------|-----------|-----------|
| D29S | -8.160 | 111.127 | 341,46 | 830,29 | 1448,77 | Qa | <i>SD</i> | <i>SB</i> | <i>SB</i> |
| D26 | -8.148 | 111.130 | 208,82 | 418,26 | 823,68 | Qa | <i>SD</i> | <i>SC</i> | <i>SB</i> |
| D31 | -8.138 | 111.138 | 292,84 | 730,83 | 1181,98 | Qa | <i>SD</i> | <i>SC</i> | <i>SB</i> |
| D36 | -8.131 | 111.151 | 134,83 | 215,25 | 738,17 | Qa | <i>SD</i> | <i>SD</i> | <i>SC</i> |
| DQA | -8.112 | 111.139 | 359,97 | 911,01 | 1794,03 | Qa | <i>SC</i> | <i>SB</i> | <i>SA</i> |

Keterangan:

SA = batuan keras

SC = tanah keras sangat padat dan batuan lunak

SE = tanah lunak

SB = batuan

SD = tanah sedang

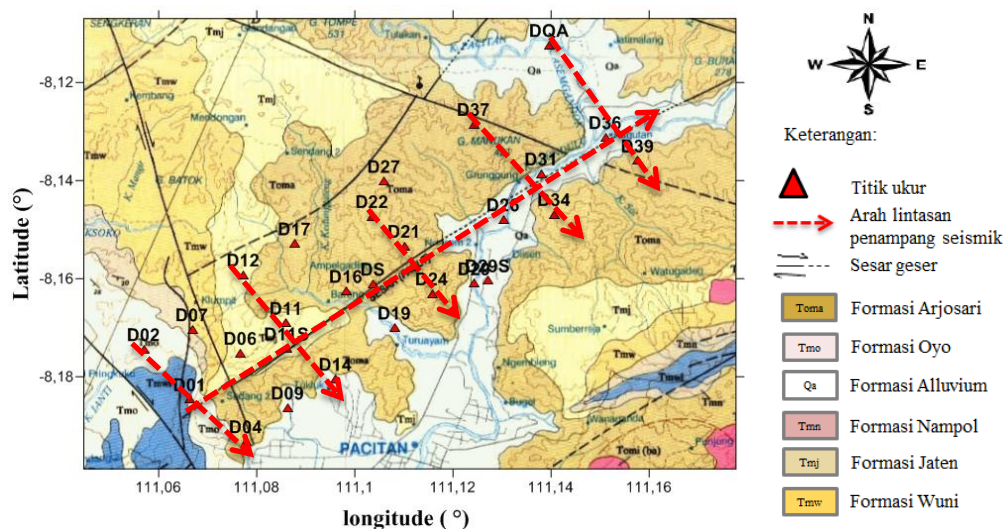
Karakteristik geologi di kawasan jalur Sesar Grindulu pada lapisan ketiga menunjukkan nilai V_s dari 738,17 m/s sampai 2909,25 m/s yang terdiri dari batuan lunak hingga batuan keras. Lapisan ketiga yang menginterpretasikan batuan dasar berupa batuan keras tersebar merata pada masing-masing formasi, namun terdapat titik ukur yang dikategorikan batuan dasar berupa batuan lunak yaitu titik D36 yang terletak di Dataran Aluvial Sungai Grindulu. Jika masing-masing lapisan di titik D36 dikorelasikan dengan lapisan sedimen yang bernilai $V_s < 750$ m/s, maka titik D36 diinterpretasikan berupa material sedimen lunak tebal. Hasil analisis nilai V_s pada lapisan sedimen kemudian digunakan untuk mengetahui ketebalan dari lapisan sedimen di kawasan jalur Sesar Grindulu yang ditunjukkan oleh model penampang seismik.

C. Penampang Seismik

Ketebalan lapisan sedimen pada penelitian ini diperoleh dari perhitungan berdasarkan persamaan (39). Nilai ketebalan lapisan sedimen (H) ditentukan oleh parameter kecepatan gelombang S (V_s) dan frekuensi dominan (f_g) dari kurva H/V . Karakterisasi ketebalan lapisan sedimen dapat diidentifikasi menggunakan model penampang seismik. Model tersebut merepresentasikan kedalaman *bedrock* yang berkorelasi dengan ketebalan lapisan sedimen dan faktor amplifikasi pada setiap titik penelitian serta profil topografi yang digunakan untuk melihat ketebalan lapisan sedimen dari permukaan.

Identifikasi ketebalan lapisan sedimen dilakukan hingga kedalaman 100 meter berdasarkan 6 lintasan penampang seismik yang meliputi titik penelitian

di kawasan jalur Sesar Grindulu seperti pada Gambar 28. Lintasan tersebut dibuat sejajar dan memotong terhadap jalur Sesar Grindulu. Setiap lintasan terdiri dari pola penampang seismik yang menunjukkan karakteristik geologi pada masing-masing titik. Pola penampang seismik yang memperlihatkan puncak (*peak*) secara jelas dan tegas menunjukkan karakteristik geologi berupa lapisan sedimen tebal dan berada pada topografi dataran rendah. Sebaliknya, pola penampang seismik yang tidak memperlihatkan puncak (*peak*) secara jelas dan tegas hingga *flat* menunjukkan karakteristik geologi berupa lapisan sedimen tipis dan berada pada topografi perbukitan.



Gambar 28. Lintasan penampang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu.

Pada Gambar 29(a), lintasan 1 yang melalui titik D02, D01, dan D04 memiliki variasi ketebalan lapisan sedimen dari 34 meter sampai 58 meter. Variasi ketebalan lapisan sedimen ini tercermin dari pola penampang seismik dimana ketebalan lapisan sedimen pada titik D02 dan D01 tidak menunjukkan perubahan yang signifikan, namun ketebalannya menurun saat melintasi titik D04. Perubahan pola penampang seismik di antara titik D01 dan D04

terindikasi memotong jalur Sesar Grindulu yang ditunjukkan dengan garis hitam putus-putus.

Lintasan 2 pada Gambar 29(b) yang melalui titik D12, D11, dan D14 memiliki variasi ketebalan lapisan sedimen dari 7 meter sampai 44 meter. Berdasarkan profil topografinya, lintasan tersebut melintasi daerah perbukitan Pringkuku yang berada pada Formasi Jaten dan Dataran Aluvial pada Formasi Aluvium. Pola penampang seismik yang terbentuk pada lintasan tersebut menunjukkan karakteristik geologi di kawasan tersebut berkorelasi dengan keberadaan jalur sesar di dekat titik D11.

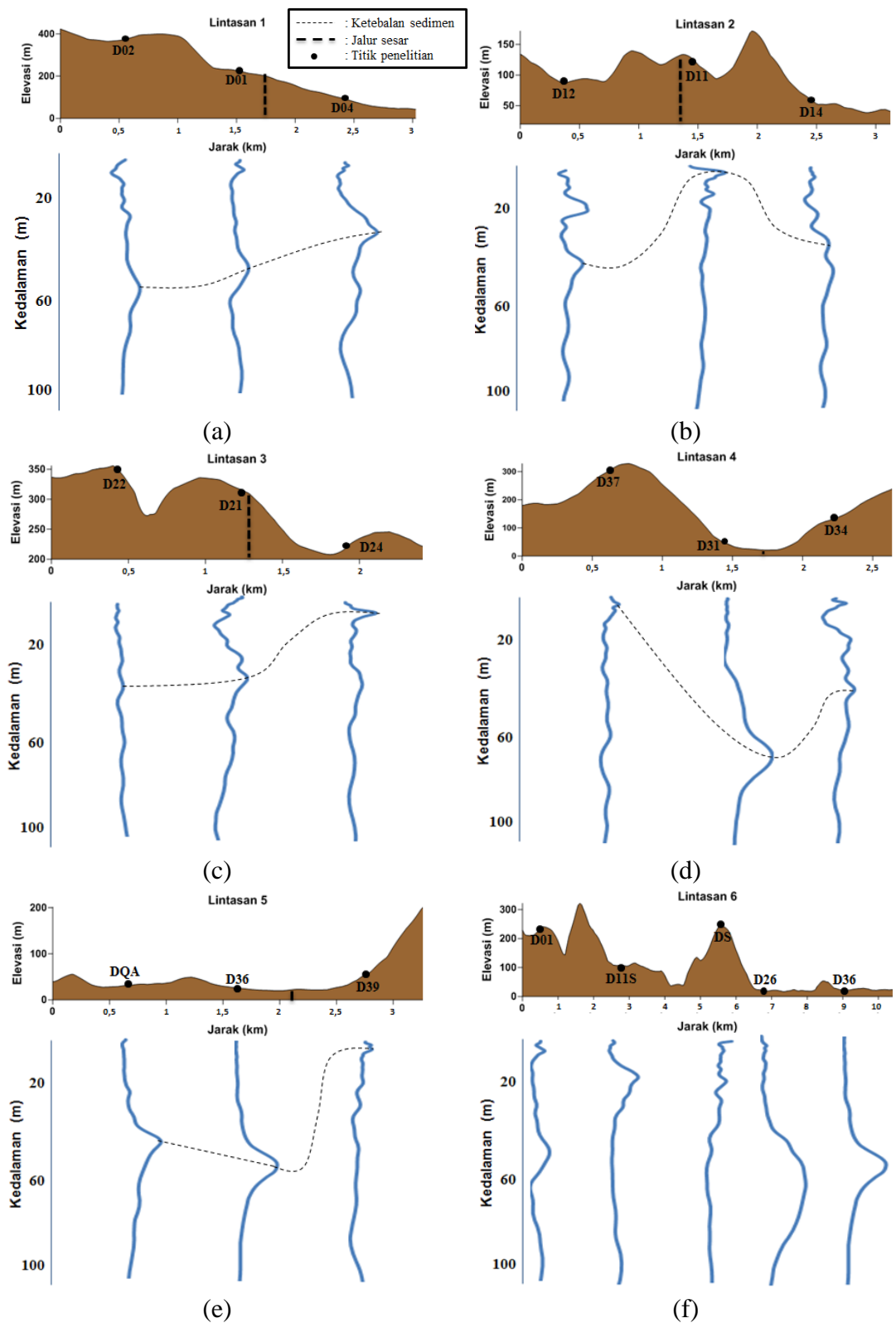
Lintasan 3 pada Gambar 29(c) yang terdiri dari titik D22, D21, dan D24 berada pada formasi geologi yang sama yaitu Formasi Arjosari yang memiliki variasi ketebalan lapisan sedimen dari 11 meter sampai 41 meter. Profil topografi yang tergambar menunjukkan kawasan tersebut berada di daerah perbukitan. Hal ini tercermin dari pola penampang seismik yang tidak menunjukkan puncak yang jelas, namun terbentuk pola penampang seismik di antara titik D21 dan D24 yang terindikasi memotong jalur sesar.

Selanjutnya, lintasan 4 pada Gambar 29(d) memiliki variasi ketebalan lapisan sedimen dari 9 meter sampai 66 meter. Variasi tersebut ditunjukkan dengan pola penampang seismik berbentuk cekungan yang melintasi daerah Dataran Aluvial Sungai Grindulu yang berbatasan dengan daerah perbukitan Arjosari di sisi barat dan timur. Lintasan tersebut diinterpretasikan memotong jalur Sesar Grindulu yang tercermin dari pola puncak penampang yang menunjukkan kontrol struktur di kawasan tersebut. Lintasan ini memiliki nilai

faktor amplifikasi relatif tinggi yaitu antara 3,05 sampai 12,10. Hal ini membuat daerah di Dataran Aluvial Sungai Grindulu berpotensi mengalami amplifikasi ketika terjadi gempa bumi dan memiliki risiko kerusakan bangunan relatif tinggi dibandingkan daerah perbukitan.

Berdasarkan pola penampang seismik pada lintasan 5 yang ditunjukkan oleh Gambar 29(e), kontrol struktur yang terbentuk pada lintasan tersebut berkorelasi dengan jalur sesar yang berada di Dataran Aluvial Sungai Grindulu pada Formasi Aluvium. Hal ini ditunjukkan dengan puncak penampang seismik yang jelas di titik DQA dan D36. Variasi ketebalan lapisan sedimen di kawasan tersebut yaitu dari 46 meter sampai 54 meter dan memiliki faktor penguatan (amplifikasi) yang relatif tinggi dari 12,52 sampai 27,15 sehingga termasuk dalam kategori kawasan rawan terhadap bahaya gempa bumi.

Lintasan 6 pada Gambar 29(f) merupakan lintasan yang dibuat sejajar dengan jalur Sesar Grindulu. Lintasan tersebut melintasi Formasi Oyo, Formasi Arjosari, dan Formasi Aluvium. Terdapat pola batas struktur geologi yang membedakan antar formasi tersebut. Namun belum dapat dipastikan korelasi batas struktur tersebut dengan keberadaan jalur Sesar Grindulu. Variasi ketebalan lapisan sedimen pada lintasan ini yaitu dari 21 meter sampai 61 meter dengan ketebalan lapisan sedimen tertinggi berada pada Formasi Aluvium.



Gambar 29. Model penampang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu
 (a) Lintasan 1 (b) Lintasan 2 (c) Lintasan 3 (d) Lintasan 4
 (e) Lintasan 5 (f) Lintasan 6.

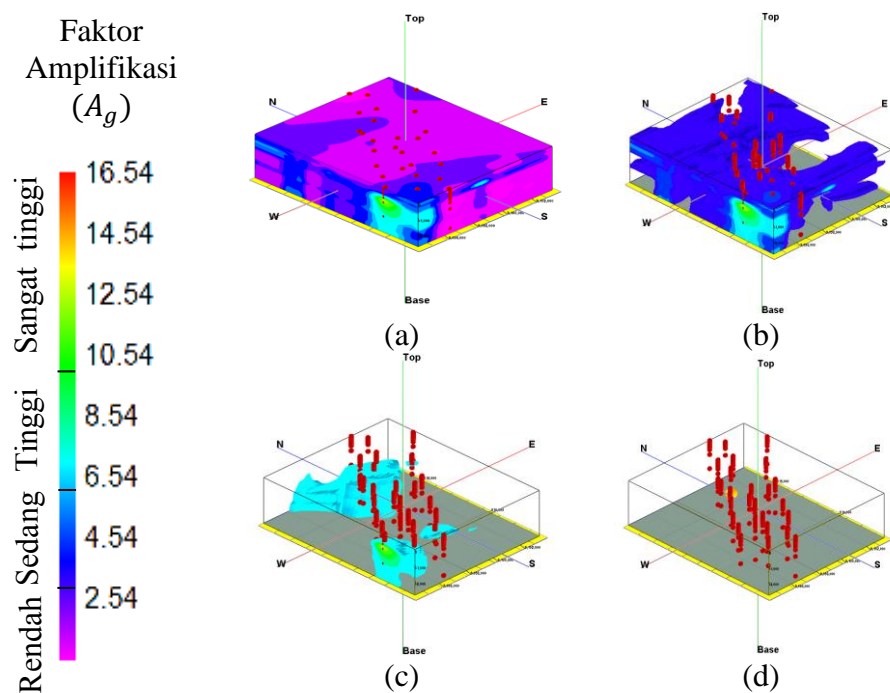
Menurut Marjiyono (2016), besarnya nilai faktor amplifikasi suatu wilayah sangat dipengaruhi oleh kontras impedansi (densitas batuan dikalikan kecepatan gelombang S) antara lapisan sedimen permukaan dan lapisan batuan di bawahnya. Semakin besar nilai kontras impedansinya, maka nilai faktor penguatan gelombangnya semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian di kawasan jalur Sesar Grindulu bahwa daerah yang memiliki risiko kerusakan terhadap bahaya gempa bumi berada di Dataran Aluvial Sungai Grindulu karena tersusun oleh material sedimen lunak tebal yang memiliki nilai V_s relatif rendah, sehingga dimungkinkan mengalami penguatan gelombang gempa bumi relatif tinggi.

D. *Solid Model* Amplifikasi

Solid model amplifikasi merupakan model 3D yang merepresentasikan parameter faktor amplifikasi dan ketebalan lapisan sedimen berdasarkan hasil pengukuran pada setiap titik di kawasan jalur Sesar Grindulu. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa parameter tersebut berkorelasi dengan tingkat risiko kerusakan bangunan terhadap potensi gempa bumi di daerah penelitian yang terbagi dalam beberapa zona. Zonasi risiko kerusakan bangunan terhadap potensi gempa bumi berdasarkan model 3D persebaran nilai faktor amplifikasi yang diperoleh berdasarkan interpolasi *iso-surface* ditampilkan pada Gambar 30.

Gambar 30(a) menunjukkan model 3D *full* persebaran nilai A_g di daerah penelitian. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, klasifikasi nilai A_g di

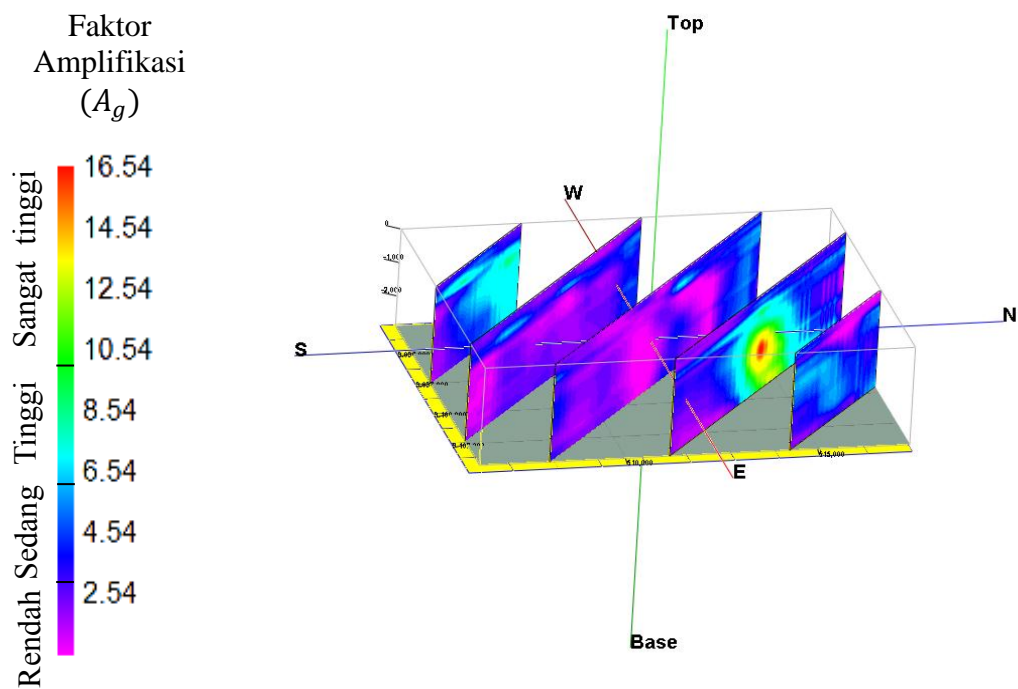
kawasan jalur Sesar Grindulu dilakukan berdasarkan zonasi tingkat risiko kerusakan menurut Marjiyono (dalam Efendi, 2017). Gambar 30(b) menunjukkan bahwa persebaran nilai A_g dari 3 sampai 9 tersebar hampir di seluruh daerah penelitian kecuali sebagian daerah di sisi selatan, timur, barat, baratlaut, dan timurlaut yang memiliki tingkat risiko kerusakan dari sedang hingga tinggi.



Gambar 30. Model 3D zonasi persebaran faktor amplifikasi di kawasan jalur Sesar Grindulu (a) Model 3D *full* nilai A_g (b) Model 3D nilai A_g 3 sampai 9 (c) Model 3D nilai A_g 6 sampai 9 (d) Model 3D nilai A_g lebih dari 9.

Gambar 30(c) menunjukkan bahwa persebaran nilai A_g dari 6 sampai 9 berada di sisi baratlaut dan utara dengan tingkat risiko kerusakan tinggi, sedangkan Gambar 30(d) menunjukkan bahwa persebaran nilai A_g lebih dari 9 hanya terdapat pada sebagian sisi utara yang merupakan daerah Dataran Aluvial Sungai Grindulu yang didominasi material sedimen lunak dan tebal,

sehingga daerah tersebut memiliki tingkat risiko kerusakan sangat tinggi. Hal ini juga sesuai dengan model sayatan nilai faktor amplifikasi dan ketebalan lapisan sedimen yang berorientasi *North-West* dan *South-East* seperti ditunjukkan pada Gambar 31. Persebaran nilai faktor amplifikasi tertinggi terdapat di sisi utara kawasan jalur Sesar Grindulu pada zona Dataran Aluvial Sungai Grindulu, sehingga daerah tersebut sangat berisiko terhadap potensi penguatan gelombang gempa bumi.

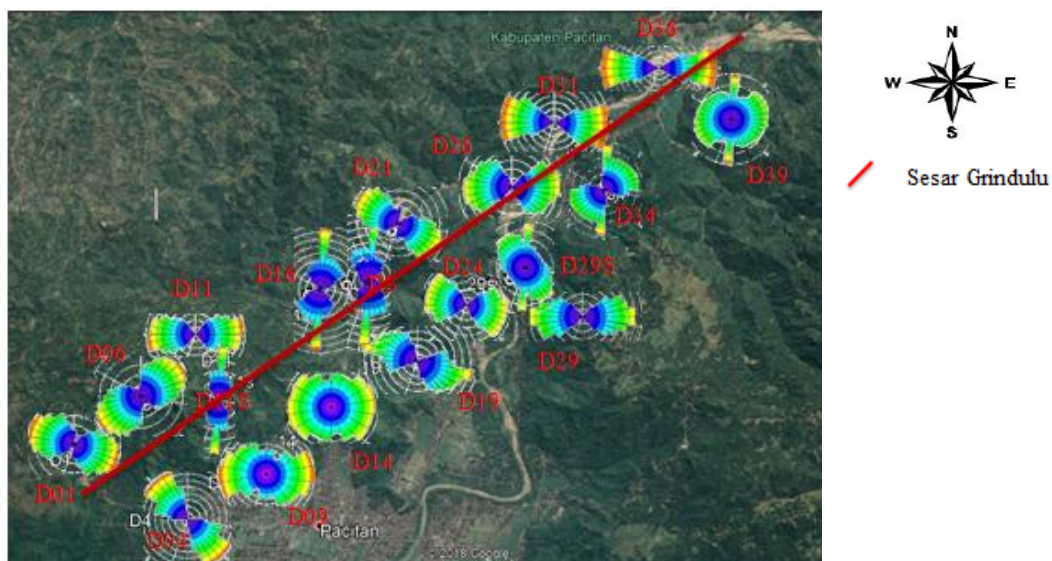


Gambar 31. Model sayatan persebaran faktor amplifikasi di kawasan jalur Sesar Grindulu.

E. *Rose Diagram*

Pada pengukuran mikrotremor didapatkan 3 komponen sinyal dalam domain waktu yang terdiri dari komponen horizontal arah timur-barat, komponen horizontal arah utara-selatan, dan komponen vertikal. Analisis sinyal dalam domain waktu dilakukan menggunakan *software* Geopsy,

sehingga didapatkan spektrum H/V yang merepresentasikan nilai frekuensi dan sudut *azimuth* (arah gelombang seismik) yang ditinjau dari arah komponen sinyal horizontal, karena gelombang datang lebih dominan dari arah horizontal daripada arah vertikalnya. Namun dari spektrum H/V yang diperoleh belum dapat diinterpretasikan, sehingga untuk mempermudah interpretasi arah sumber datang gelombang seismik diperlukan pemodelan *rose diagram* pada *software* Rockwork15. Model *rose diagram* merupakan representasi hasil polarisasi arah gelombang seismik yang ditinjau dari titik koordinat utara sebagai acuan.



Gambar 32. Persebaran arah gelombang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu.

Penelitian ini hanya memfokuskan pada titik pengukuran yang berjarak ± 1 km dari jalur Sesar Grindulu. Masing-masing titik pengukuran menunjukkan variasi arah sumber datang gelombang seismik seperti yang ditampilkan pada Gambar 32. Pischiutta *et al.* (2017) melalui hasil penelitiannya telah

menyimpulkan bahwa orientasi atau arah sumber datang gelombang seismik rata-rata tegak lurus terhadap jalur sesarnya. Ditinjau dari hasil analisis *rose diagram* arah sumber datang gelombang seismik, persebaran arah sumber datang gelombang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu pada setiap titik pengukuran mikrotremor tidak tegak lurus terhadap jalur sesarnya, melainkan rata-rata mengarah pada keberadaan jalur sesarnya. Namun terdapat beberapa titik yang tidak menunjukkan orientasinya terhadap Sesar Grindulu diantaranya, titik D06 dan D09 yang memiliki orientasi terhadap jalur sesar minor. Secara umum, hal ini menginterpretasikan bahwa dimungkinkan keberadaan Sesar Grindulu sesuai dengan jalur yang tergambar pada peta geologi lembar Pacitan seperti yang ditunjukkan pada Lampiran 4.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan interpretasi dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai frekuensi dominan (f_g) di kawasan jalur Sesar Grindulu bervariasi antara 0,55 Hz sampai 10,5 Hz. Nilai terendah yaitu 0,55 Hz terletak pada Formasi Oyo yang memiliki topografi dataran tinggi atau perbukitan, sedangkan nilai tertinggi yaitu 10,5 Hz terletak pada Formasi Arjosari yang juga memiliki topografi dataran tinggi atau perbukitan. Nilai faktor amplifikasi (A_g) di kawasan jalur Sesar Grindulu terendah yaitu 2,85 terletak pada Formasi Arjosari dengan topografi perbukitan, untuk nilai A_g tertinggi yaitu 27,15 terletak pada Formasi Aluvium dengan topografi Dataran Aluvial Sungai Grindulu. Variasi nilai f_g dan nilai A_g di kawasan jalur Sesar Grindulu tidak hanya dipengaruhi oleh topografinya, namun juga dipengaruhi oleh tingkat deformasi batuan pada setiap titik lokasi pengukuran.
2. Nilai kecepatan gelombang S (V_s) di kawasan jalur Sesar Grindulu memiliki rentang antara 134,83 m/s sampai 2909,25 m/s. Ketebalan lapisan sedimen berdasarkan penampang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu bernilai 7 meter sampai 66 meter. Daerah yang memiliki lapisan

sedimen tebal lebih dari 50 meter terletak pada Dataran Aluvial Sungai Grindulu.

3. Arah sumber datang gelombang seismik di kawasan jalur Sesar Grindulu rata-rata mengarah pada keberadaan jalur sesarnya. Hal ini menginterpretasikan bahwa dimungkinkan keberadaan Sesar Grindulu sesuai dengan jalur yang tergambar pada peta geologi lembar Pacitan.

B. SARAN

Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk memperkecil jarak (spasi) antar titik pengambilan data, memperluas daerah penelitian di sepanjang jalur Sesar Grindulu, dan menyertakan data bor sebagai bahan validasi untuk mendapatkan hasil penelitian yang akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, C.I., Magetsari, N.A., dan Purwanto, H.S. 2003. Analisis Dinamik Tegasan Purba Pada Satuan Batuan Paleogon-Neogon di Daerah Pacitan dan Sekitarnya, Provinsi Jawa Timur Ditinjau dari Studi Sesar Minor dan Kekar Tektonik. *PROC. ITB Sains & Tek* 2(35A). Institut Teknologi Bandung: 111-127.
- Arai, H., and Tokimatsu, K. 2005. S-Wave Velocity Profilling by Joint Inversion of Microtremor Dispersion Curve and Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(5). 1766-1778.
- Arifin, S.S., Mulyatno, B.S., Marjiyono, dan Setianegara, R. Penentuan Zona Rawan Guncangan Bencana Gempa Bumi Berdasarkan Analisis Nilai Amplifikasi HVSR Mikrotremor dan Analisis Periode Dominan Daerah Liwa dan Sekitarnya. 2014. *Jurnal Geofisika Eksplorasi* 2(1). Universitas Lampung: 30-40.
- Badan Standarisasi Nasional (SNI) 1726. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa dan Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung*. Jakarta.
- Efendi, Yusuf. 2017. *Profilling Kecepatan Gelombang Geser (V_s) dan Mikrozonasi Kota Surabaya Menggunakan Inversi HVSR*. Skripsi. FT. Lampung: Universitas Lampung.
- Elnashai, A. S., and Sarno, L. D. 2008. *Fundamental of Earthquake Engineering. Second Edition*. UK: John Wiley & Sons.
- Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M., Castro, R.R., Monachesi, G., and Contrì, P. 2004. Structure, Soil-Structure Response and Effects of Damage Based on Observations of Horizontal-to-Spectral ratios of Microtremors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 487-495.
- Hardaningrum, O., Sulaeman, C., dan Supriyana, E. 2016. Zonasi Rawan Bencana Gempa Bumi Malang Berdasarkan Analisis Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR). *Prosiding Seminar Nasional MIPA 2016 di Jatinangor pada 27-28 Oktober*. 170-175.
- Hastuti, E.W.D. 2009. Hubungan Antara Paleosubduksi Terhadap Proses Mineralisasi di Daerah Ponorogo dan Sekitarnya. *Makalah*. Jurusan Teknik Pertambangan. Universitas Sriwijaya: Palembang.
- Hidayat, E., Kumoro, Y., Raharjo, P.D., dan Puswanto, E. 2012. *Kajian Tektonik Aktif Pada Patahan Grindulu Untuk Mendukung Mitigasi Bencana Gempa*

Bumi dan Gerakan Tanah di Wilayah Pacitan. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

Hidayat, S., Cari, Warnana, D. D., dan Koesuma, S. 2017. Aplikasi Metode *Horizontal to Spectral Ratio* Pada Perhitungan Frekuensi Natural dan Amplitudo HVSR. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXXI HFI Jateng & DIY*. 18 Maret 2017. 105-109.

Hobiger, M. 2011. *Polarization of Surface Waves: Characterization, Inversion and Application to seismic Hazard Assessment*. France: Universite de Grenoble.

Indrianti, Y.W., Susilo, A., dan Gustaf, H. 2013. *Pemodelan Konfigurasi Batuan Dasar dan Struktur Geologi Bawah Permukaan Menggunakan Data Anomali Gravitasi di Daerah Pacitan-Arjosari-Tegalombo, Jawa Timur*. Jurusan Fisika. Universitas Brawijaya.

Ismawati, T. 2011. Mekanisme Fokus Gempa Bumi Mentawai 25 Oktober 2010. *Skripsi*. FST. Jakarta: UIN Syarif Hidayatullah.

Kanai, K. 1983. *Seismology in Engineering*. Japan: University of Tokyo Press.

Kumala, S.A. dan Wahyudi. 2016. Analisis Nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) Untuk Seluruh Wilayah Kabupaten dan Kota di Jawa Timur. *INERSIA* 1(XII). Universitas Gadjah Mada: 37-43.

Kurniawati, Ika. 2016. Analisis Mikrotremor untuk Mikrozonasi Indeks Seismik di Kawasan Jalur Sesar Sungai Oyo Yogyakarta. *Skripsi*. FMIPA. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.

Lachet, C., and Bard, P-Yves. 1994. Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *J. Phys. Earth*. 377-397.

Lowrie, W. 2007. *Fundamental of Geophysics. Second Edition*. New York: Cambrigde University Press.

Marjiyono. 2016. Potensi Penguatan Gelombang Gempa Bumi oleh Sedimen Permukaan Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi* 7(3). Pusat Survei Geologi: 135-144.

Mirzaoglu, M., and Dykmen, U., 2003. Application of Microtremors to Seismics Microzoning Procedure. *Journal of the Balkan Geophysical Society* 6(3). 143-156.

Nakamura, Y. 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Inst. (RTRI)* 30. 25–33.

- Nakamura, Y., 2000. *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications*. Japan: System and Data Reserch.
- Nakamura, Y. 2008. On the H/V Spectrum. *The 14th World Conference on earthquake Engineering*. October 12-17, Beijing, China.
- Ngadmanto, D., Susilanto, P., Nurdyian, B., Pakpahan, S., dan Masturyono. 2013. Efek Tapak Lokal Daerah Kerusakan Akibat Gempa Bumi Bogor 9 September 2012. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 14(3). 109-116.
- Nurdyianto, B., Hartanto, E., Ngadmanto, D., Sunardi, B., dan Susilanto, P. 2011. Penentuan Tingkat Kekerasan Batuan Menggunakan Metode Seismik Refraksi. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 12(3). 211-220.
- Parera, A. F. T., Bunaga, I.G.K.S., dan Yusuf, M. 2015. Pemodelan Tiga Dimensi Anomali Gravitasi dan Identifikasi Sesar Lokal Dalam Penentuan Jenis Sesar di Daerah Pacitan. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E Journal)* Vol. IV. Universitas Negeri Jakarta: 45-48.
- Park, T. H., 2010. *Introduction to Digital Signal Processing*. Singapore: World Scientific.
- Patimah, Siti. 2017. Analisis Litologi Bawah Permukaan Berdasarkan *Ground Profiles* Kecepatan Gelombang Geser dengan Metode *Ellipticity Curve* di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarnno Kabupaten Klaten. *Skripsi*. FMIPA. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Pipkin, B. W. 1977. *Laboratory Exercise in Oceanography*. San Fransisco : W.H. Freeman and Company.
- Pischiutta, M., Salvini, F., Fletcher, J., Rovelli, A., and Ben-Zion, Y. 2012. Horizontal Polarization of Ground Motion in the Hayward Fault Zone at Fremont, California: Dominant Fault-High-Angle Polarization and Fault Induced Cracks. *Geophysical Journal International*. 1255-1272.
- Pischiutta, M., Fondriest, M., Demurtas, M., Magnoni, F., Toro, G.D., and Rovelli, A. 2017. Structural Control on The Directional Amplification of Seismic Noise (Campo Imperatore, Central Italy). *Earth and Planetary Science Letter* 471. 10-18.
- Plummer, C. C., Carlson, D. H., and Hammersley, L. 2016. *Physical Geology. Fifteenth Edition*. New York: Mc Graw Hill Education.
- Pratiwi, S., Legowo, B., Koesuma, S. 2017. Penentuan Tingkat Kerawanan Gempa Bumi Menggunakan Metode Refraksi Mikrotremor di Kota Surakarta. *Indonesian Journal of Applied Physics* 7(1). 59-65.
- Proakis, J.G., and Manolakis, D.G. 1996. *Digital Signal Processing. Third Edition*. New Jersey: Prentice Hall.

- Samodra, H., Gafoer, S., dan Tjokrosapoetro, S., 1992. *Peta Geologi Lembar Pacitan, Jawa, skala 1:100.000*. Pusat Penelitian Pengembangan Geologi: Bandung.
- SESAME. 2004. *Guidelines For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations*. Europe: SESAME European Research Project.
- Shearer, P. M. 2009. *Introduction to Seismology. Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Sunardi, B., Daryono, Arifin, J., Susilanto, P., Ngadmanto, D., Nurdianto, B., dan Sulastri. 2012. Kajian Potensi Bahaya Gempa Bumi Daerah Sumbawa Berdasarkan Efek Tapak Lokal. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika* 13(2). BMKG: 131-137.
- Sungkono dan Santoso, B.J. 2011. Karakteristik Kurva *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*: Kajian Literatur dan Pemodelan. *Jurnal Neutrino* 4(1). Institut Teknologi Surabaya: 1-15.
- Sunarjo, Gunawan, M. T., dan Pribadi, S. 2012. *Gempa Bumi Indonesia*. Jakarta: BMKG.
- Sutrisno, W.T., Santoso, B.J., Warnana, D.D. 2013. *Profiling Kecepatan Gelombang Geser (V_s) Menggunakan Inversi Spektrum HVSr*. *Jurnal Teknik Pomits* 1(1). ITS: 1-6.
- Syamsoel, H. 2013. *Peta KRB-RPB-BPBD Kabupaten Pacitan*. Diakses dari <http://bpbd.pacitankab.go.id/peta-krb-rpb/> pada tanggal 31 Mei 2018 pukul 10.00 WIB.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics. Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Thompson, G.R.R., and Turk, J. 1997. *Introduction to Physical Geology*. Brooks Cole, Pp.
- Wibowo, N.B., Sembri, J.N., Darmawan, D., Sumardi, Y., Afriliani, F., dan Mahmudah, S. 2018a. Interpretasi Lapisan Sedimen Berdasarkan *Ground Profile V_s* dengan Pengukuran Mikrotremor di Kecamatan Pacitan. *Indonesian Journal of Applied Physics* 8(1). 32-42.
- Wibowo, N.B., Sembri, J.N., Darmawan, D., dan Sumardi, Y. 2018b. Interpretasi Ketebalan Lapisan Sedimen Berdasarkan Penampang Seismik Kurva *H/V* di Kota Pacitan Jawa Timur. *Buletin BMKG* 8(8). BMKG Wilayah II: 21-30.

Yulistiani. 2017. Potensi Likuifaksi Berdasarkan Nilai *Ground Shear Strain* (GSS) di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten Jawa Tengah. *Skripsi*. FMIPA. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.

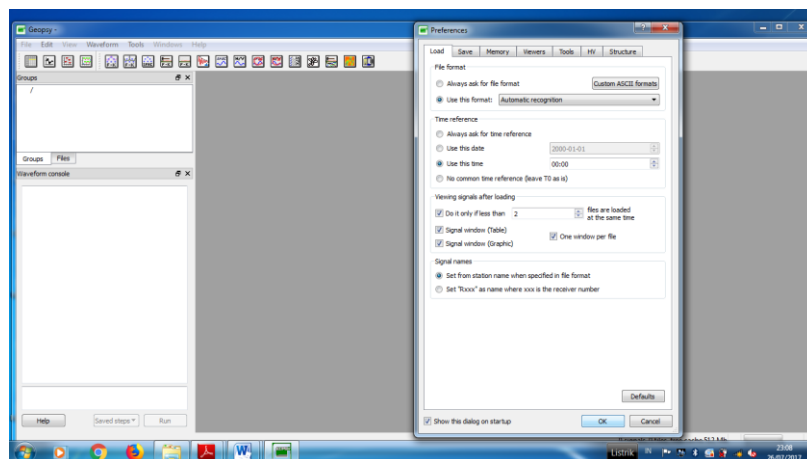
LAMPIRAN 1

TAHAPAN PENGOLAHAN SINYAL MIKROTREMOR

A. Menganalisis Kurva *H/V* Menggunakan *Software* Geopsy.

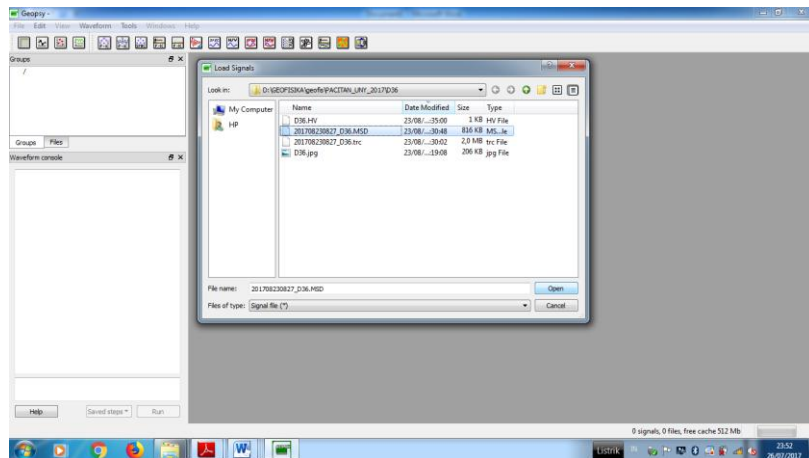
Berikut langkah-langkahnya:

1. Membuka *icon software* Geopsy dengan mengklik kanan → *Run* → *Yes*, maka akan muncul tampilan seperti di bawah.

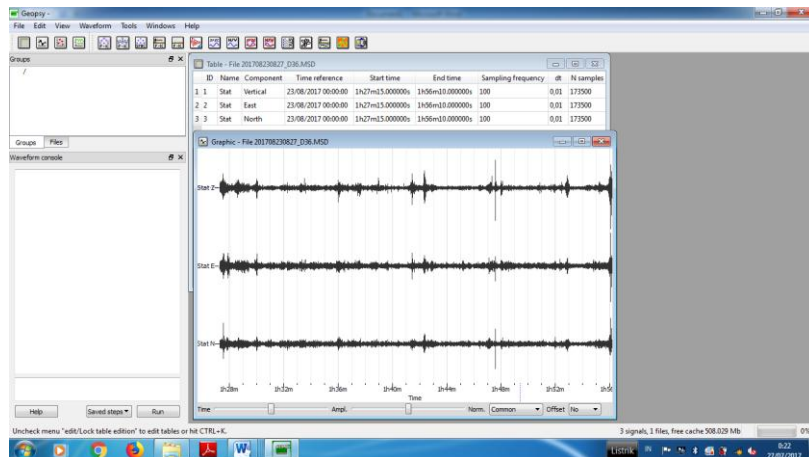


Gambar L1. Tampilan awal pada *software* Geopsy.

2. Mengklik pilihan OK pada jendela *Preferences*.
3. Memilih menu *File* → *Import Signal*, maka akan muncul tampilan jendela *Load Signal*. Selanjutnya pilih *file* sinyal mikrotremor dalam format .MSD lalu *Open* dan muncul tampilan seperti Gambar L2.
4. Tampilan *file* sinyal mikrotremor dalam format .MSD yang telah dibuka seperti pada Gambar L3 menunjukkan adanya tiga komponen sinyal yang terdiri dari komponen sinyal vertikal (SHZ), komponen sinyal horizontal arah barat-timur (SHE), dan komponen sinyal horizontal arah utara-selatan (SHN).



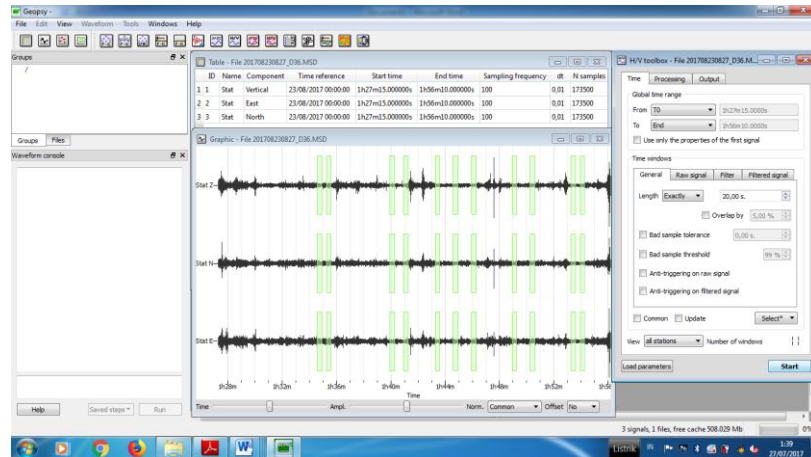
Gambar L2. Tampilan input *file* .MSD sinyal mikrotremor.



Gambar L3. Tampilan dari komponen sinyal mikrotremor.

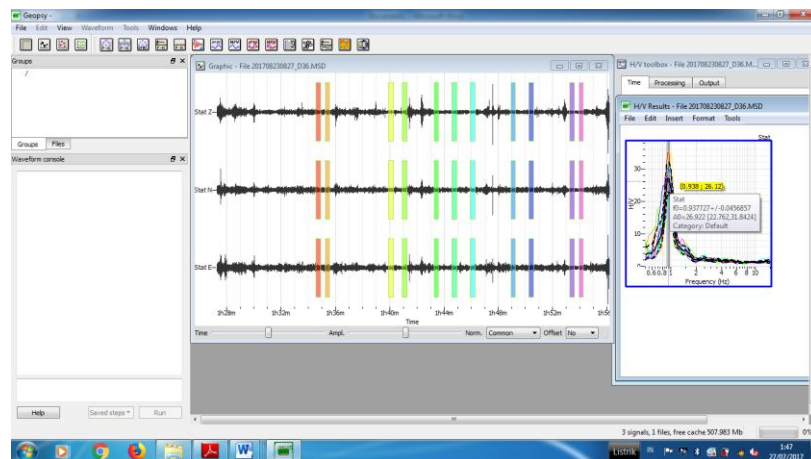
- Memilih menu *H/V* maka akan muncul jendela *H/V toolbox* yang terdiri dari menu *Time*, *Processing*, dan *Output*. Pada menu *Time* terdapat *Time windows* yang terdiri dari submenu *General*, kemudian menentukan *length windows* yaitu sebesar 20 sekon. Pada menu *Processing* digunakan *Parameters Smoothing types Konno & Ohmachi* dan *Horizontal component* menggunakan *Total horizontal energy*. *Output Frequency Sampling* yang digunakan sebesar 0,50 Hz sampai 15,00 Hz dan *number sampling* 100. Selanjutnya memilih *Select* → *Add*, untuk memilih sinyal

tanpa *noise*. *Number window* yang dipilih minimal 10 seperti yang ditunjukkan pada Gambar L4. Kemudian mengklik *Start*.



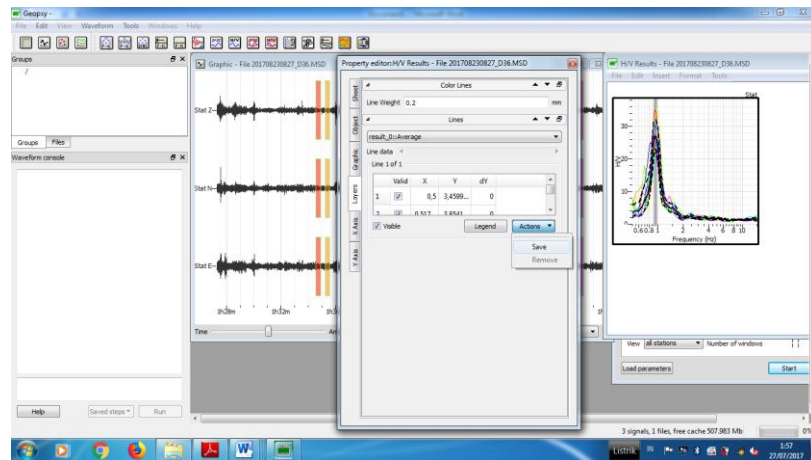
Gambar L4. Pemilihan sinyal mikrotremor tanpa *noise* atau *cutting*.

6. Maka akan menghasilkan kurva *H/V* hubungan antara frekuensi terhadap faktor amplifikasinya seperti Gambar L5.



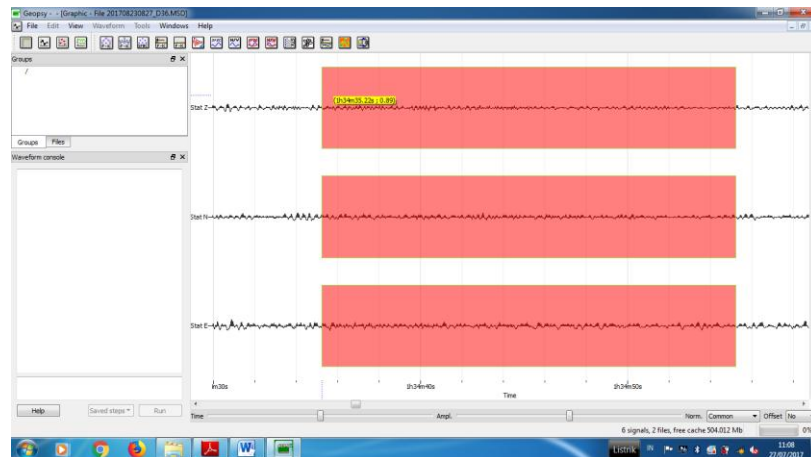
Gambar L5. Kurva *H/V* hasil analisis HVSr.

7. Untuk menyimpan kurva *H/V*, klik kanan pada area kurva, lalu memilih *Properties* → *layers* → *Action*, seperti ditunjukkan pada Gambar L6. Selanjutnya memilih menu *Save*, dan simpan dalam format *.hv* pada satu folder untuk tiap titik.



Gambar L6. Tampilan proses menyimpan kurva H/V .

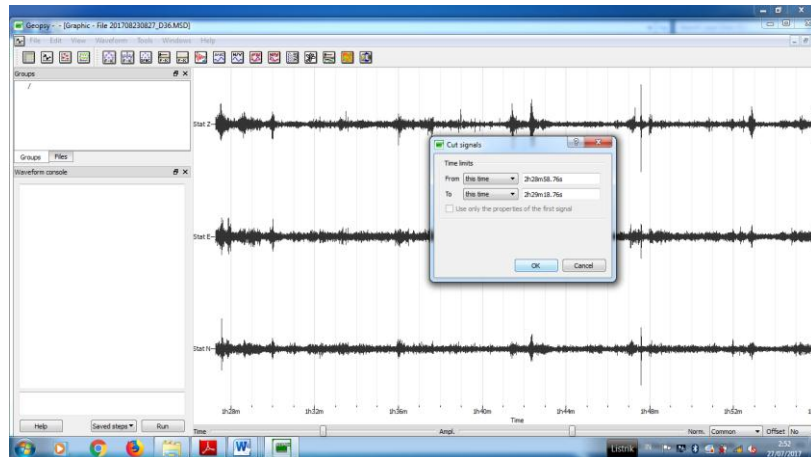
8. Untuk proses *cutting* data secara *per-windowing* caranya yaitu mengklik kanan lalu *Zoom* pada *number windows* pertama maka akan menghasilkan tampilan seperti Gambar L7 kemudian mencatat waktu tiap satu *windowing* dengan *length window* sebesar 20 sekond.



Gambar L7. Hasil perbesaran sinyal mikrotremor setiap *window*.

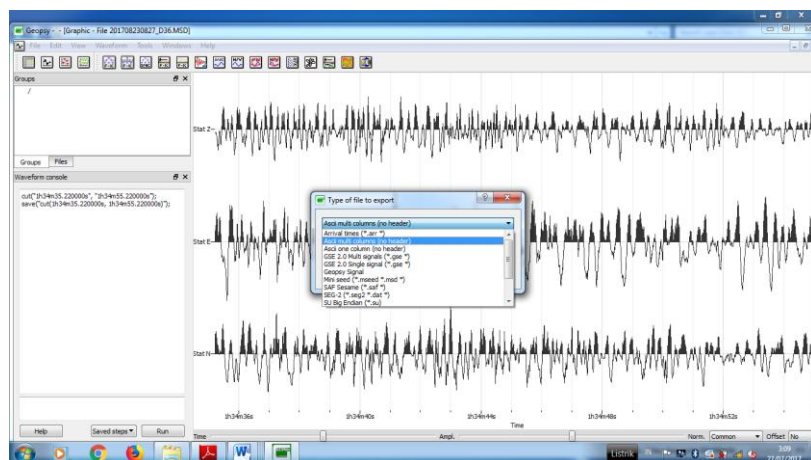
9. Kemudian *Close* pada jendela *Grafik-File* sinyal mikrotremor, selanjutnya mengulangi langkah 3 lalu mengklik menu *Waveform* → *Cut*, maka akan muncul jendela *cut signal* seperti Gambar L8. Memilih *time limits*-nya

pada *this time* untuk menginput durasi waktu tiap satu *windowing* selama 20 sekon lalu mengklik OK.



Gambar L8. Tampilan input *cutting signal* pada jendela *time limits*.

10. Untuk menyimpan hasil *cutting* yaitu memilih menu *File* → *Export* → *Ascii multi columns* → lalu OK, seperti pada Gambar L9. Selanjutnya menyimpan hasil cutting dengan nama *file* berupa angka misalnya “1” dan seterusnya sesuai banyaknya *number windows*, kemudian meletakkan pada satu folder untuk tiap titik ukur dan melakukan langkah-langkah di atas untuk *number windows* selanjutnya.

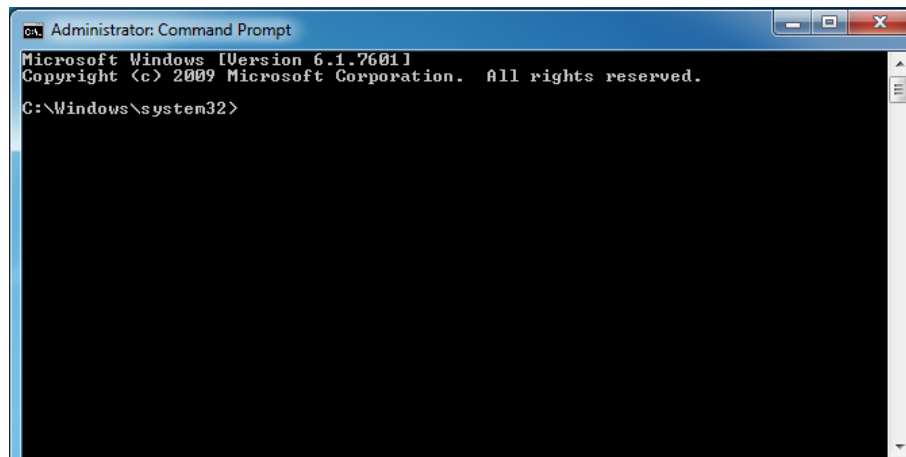


Gambar L9. Tampilan penyimpanan hasil *cutting*.

B. Menganalisis Kurva *H/V* menggunakan *Software* Matlab R2010a.

Adapun tujuan dari analisis kurva *H/V* menggunakan *Software* Matlab R2010a adalah untuk membandingkan hasil kurva *H/V* dari pengolahan Geopsy. Namun sebelum olah data di Matlab R2010a, langkah-langkah yang harus dilakukan yaitu:

1. Menggabungkan *file* hasil *cutting* menggunakan *Command Prompt* dengan mengklik menu *Start* kemudian pilih *icon Command Prompt* → *Run* → *YES*. Sehingga akan muncul tampilan jendela seperti Gambar L10.



Gambar L10. Tampilan awal pada jendela *Command Prompt*.

2. Kemudian tulis perintah untuk menggabungkan *file* dengan urutan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar L11 sebagai berikut:
 - a. Menetik *local disk adress* tempat penyimpanan folder yaitu menetik (D) diikuti tanda (:) kemudian *Enter*.
 - b. Menetik *cd* (spasi) nama folder lalu menekan *Enter*.
 - c. Menetik *copy/b* (spasi) $1+2+3+....+n$ (spasi) *filename.xls* kemudian diakhiri menekan tombol *Enter*, *n* merupakan banyaknya *number windows*.

```

Administrator: Command Prompt
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Windows\system32>D:
D:\>cd Pengolahan Data Skripsi\Cutting 1\19
D:\Pengolahan Data Skripsi\cutting 1\19>copy/b 1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11+12 19fix.
xls
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
1 file(s) copied.
D:\Pengolahan Data Skripsi\cutting 1\19>

```

Gambar L11. Pemrograman untuk menggabungkan *file* hasil *cutting*.

3. Membuka *file* yang telah digabung dalam format .xls pada Microsoft Excel 2010 maka akan muncul tampilan pada Gambar L12.

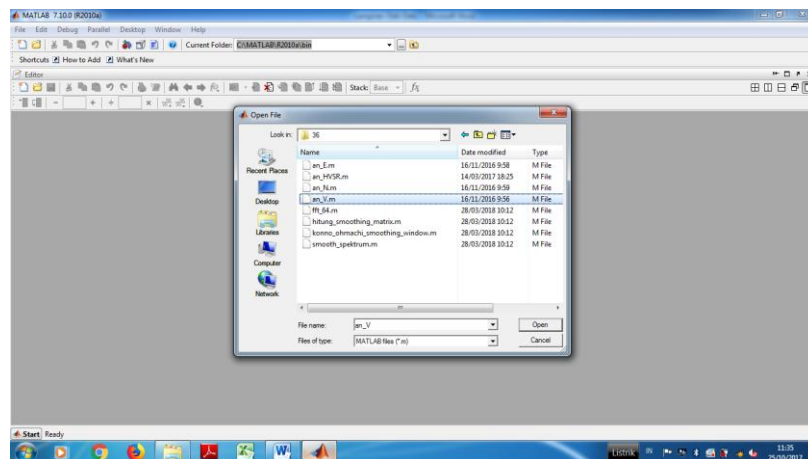
| | A | B | C |
|----|-------|-------|------|
| 1 | -71 | 195 | 1604 |
| 2 | -220 | 741 | 1357 |
| 3 | -296 | 1088 | 1554 |
| 4 | -236 | 1415 | 1523 |
| 5 | -282 | 1711 | 1381 |
| 6 | -512 | 1996 | 1090 |
| 7 | -709 | 1911 | 846 |
| 8 | -860 | 1474 | 662 |
| 9 | -1050 | 906 | 615 |
| 10 | -1318 | 426 | 559 |
| 11 | -1409 | 232 | 461 |
| 12 | -1099 | 365 | 311 |
| 13 | -613 | 665 | 175 |
| 14 | -236 | 1153 | 37 |
| 15 | -125 | 1586 | -27 |
| 16 | -143 | 1667 | 55 |
| 17 | -253 | 1510 | 170 |
| 18 | -602 | 1393 | 262 |
| 19 | -973 | 1141 | 169 |
| 20 | -1037 | 497 | 49 |
| 21 | -729 | -233 | 138 |
| 22 | -264 | -611 | 492 |
| 23 | 211 | -1055 | 960 |
| 24 | 731 | -957 | 1347 |
| 25 | 1022 | -990 | 1710 |

Gambar L12. Tampilan *file* hasil *cutting* yang telah digabung.

4. Gambar L12 menunjukkan bahwa ada tiga komponen sinyal mikrotremor yang terdiri dari komponen sinyal Vertikal (SHZ) yang diwakili kolom A, dan dua komponen sinyal Horizontal yaitu arah barat-timur (SHE) yang diwakili kolom B serta komponen sinyal Horizontal arah utara-selatan (SHN) pada kolom C. Kemudian menyimpan ketiga komponen sinyal

tersebut secara terpisah dengan format .xls. Nama *file* V.xls untuk komponen SHZ, E.xls untuk komponen SHE, dan N.xls untuk komponen SHN.

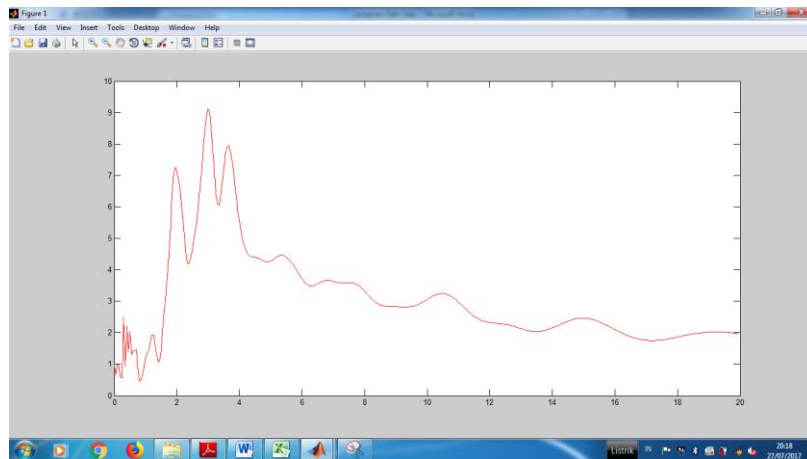
5. Menganalisis komponen sinyal mikrotremor dengan *Fast Fourier Transform* (FFT) menggunakan program *radix* yaitu *smoothing Konno & Ohmachi*, *FFT_64*, dan program utama analisis sinyal (V, E, N, dan HVSR) yang disimpan dalam satu folder dengan ketiga *file* komponen sinyal mikrotremor setiap titik ukur.
6. Untuk menganalisis sinyal mikrotremor menggunakan program *radix* pada *Software Matlab R2010a* berikut langkah-langkahnya:
 - a. Mengklik kanan pada icon Matlab R2010a → *Run* → *YES*.
 - b. Memilih menu *File* → *Open*, membuka program utama analisis sinyal berupa *file* dalam format .m ditunjukkan pada Gambar L13.



Gambar L13. Input data format .m pada Matlab R2010a.

- c. *Script input* Matlab R2010a ditunjukkan pada Lampiran 2. Untuk program utama analisis sinyal mikrotremor disesuaikan dengan *filename* dan format penyimpanannya seperti V.xls dan untuk input

matriks potongan data *window* sama dengan $(n-1)$. n merupakan banyaknya *number windows*. Kemudian memilih *Run* pada jendela *Editor* maka akan muncul spektrum sinyalnya seperti Gambar L14.



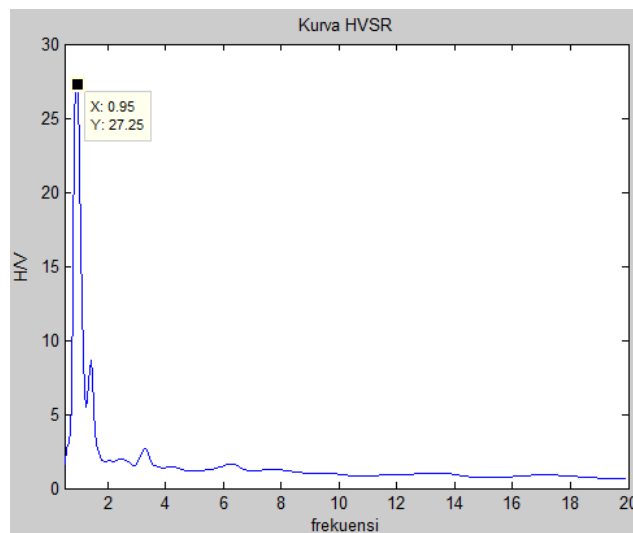
Gambar L14. Spektrum sinyal mikrotremor hasil FFT.

d. Kemudian memilih menu *Dekstop* → *Workspace* → *Slit* maka akan muncul nilai-nilai spektrum *sinyal* dari hasil FFT kemudian *copy paste* ke Microsoft Excel 2010 seperti berikut:

| | A | B | C | D |
|----|----------|----------|----------|----------|
| 1 | SHZ | SHE | SHN | HVSX |
| 2 | 0,978836 | 0,585818 | 0,62545 | 0,60101 |
| 3 | 0,655779 | 0,189116 | 0,37962 | 0,501539 |
| 4 | 1,090111 | 0,469195 | 0,581275 | 0,788335 |
| 5 | 0,948834 | 0,60286 | 0,346727 | 0,733114 |
| 6 | 0,581262 | 0,855005 | 0,392673 | 1,619439 |
| 7 | 0,571171 | 1,784538 | 0,877847 | 3,415089 |
| 8 | 2,504024 | 2,036219 | 0,5902 | 0,904232 |
| 9 | 0,91135 | 2,645284 | 2,431119 | 3,859026 |
| 10 | 2,203791 | 2,278566 | 3,707247 | 1,974532 |
| 11 | 1,375613 | 1,590907 | 2,522434 | 2,171643 |
| 12 | 2,024841 | 2,550566 | 2,125344 | 1,639641 |
| 13 | 1,30507 | 2,827818 | 2,043767 | 2,673467 |
| 14 | 1,421036 | 1,926448 | 3,501743 | 2,812508 |
| 15 | 1,456769 | 3,329687 | 2,833729 | 3,043115 |
| 16 | 1,457817 | 5,048874 | 2,58536 | 3,891502 |
| 17 | 0,926333 | 3,5488 | 4,093576 | 5,848529 |
| 18 | 0,471231 | 4,090836 | 5,58525 | 14,6439 |
| 19 | 0,466238 | 7,650138 | 8,783173 | 24,9858 |
| 20 | 0,640388 | 14,1305 | 9,818412 | 26,86747 |
| 21 | 0,911444 | 22,39727 | 10,7274 | 27,24659 |
| 22 | 1,182095 | 23,46567 | 11,03861 | 21,91821 |
| 23 | 1,345189 | 18,81255 | 10,08178 | 16,53775 |
| 24 | 1,441156 | 18,20245 | 7,991509 | 12,53583 |
| 25 | 1,673723 | 13,53324 | 6,458225 | 8,959215 |

Gambar L15. Nilai FFT untuk ketiga komponen sinyal mikrotremor.

7. Untuk memperoleh kurva H/V menggunakan analisis Matlab R2010a maka *copy paste* nilai HVSR yang diperoleh melalui perhitungan matematis ke Microsoft Excel 2010 dengan *filename* HVSR.xls.
8. Membuka program pemanggil HVSR.m pada Matlab R2010a kemudian *run* maka akan muncul kurva H/V terlihat pada Gambar L16.
9. Untuk menyimpan nilai-nilai frekuensi dan amplifikasi dari kurva H/V yaitu dengan membuka menu *Dekstop* → *Workspace*, kemudian mengklik dua kali pada variabel f (nilai frekuensi) dan variabel x (nilai rasio kurva H/V) selanjutnya *copy paste* ke *notepad* dan simpan dalam format .hv.



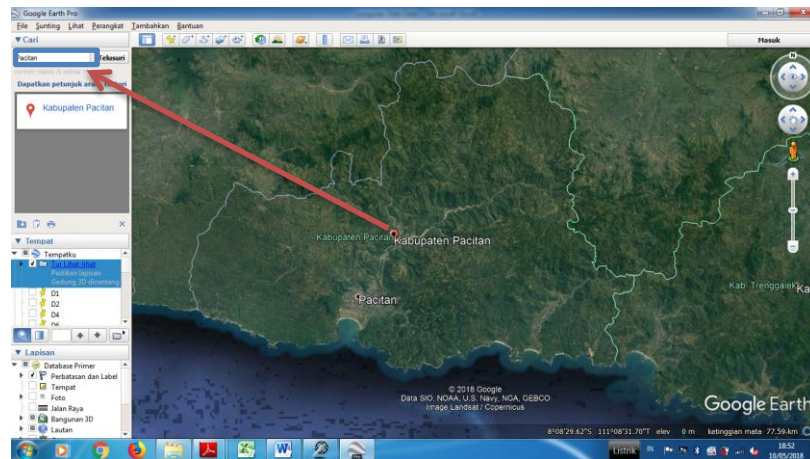
Gambar L16. Kurva H/V hasil analisis di Matlab R2010a.

C. Program Google Earth Pro dan TCX Converter Versi 2.0.32

Google Earth Pro digunakan untuk mengetahui topografi daerah penelitian, sedangkan TCX Converter digunakan untuk mengkonversi data dari Google Earth Pro dalam format .kml ke dalam format .csv. Berikut langkah-langkahnya:

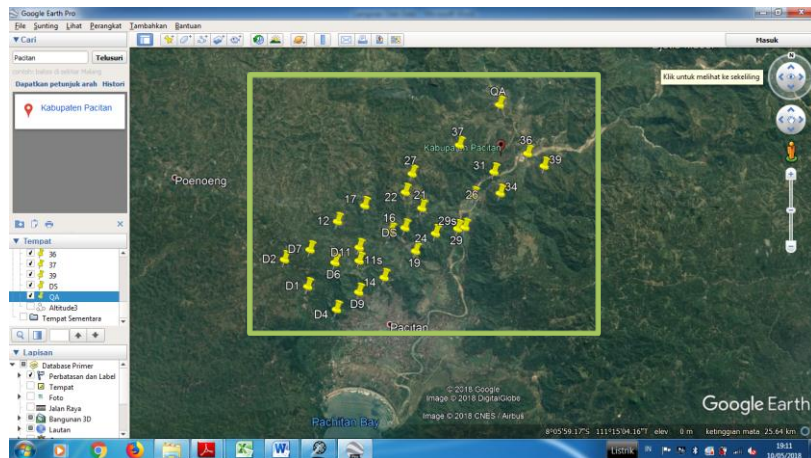
1. Membuat topografi titik penelitian pada Google Earth Pro.

- a. Membuka *icon* Google Earth dengan mengklik kanan → *Run* → *YES*.
- b. Mengetik nama tempat dalam kotak pencarian contohnya “Pacitan”, maka akan muncul tampilan pada Gambar L17.

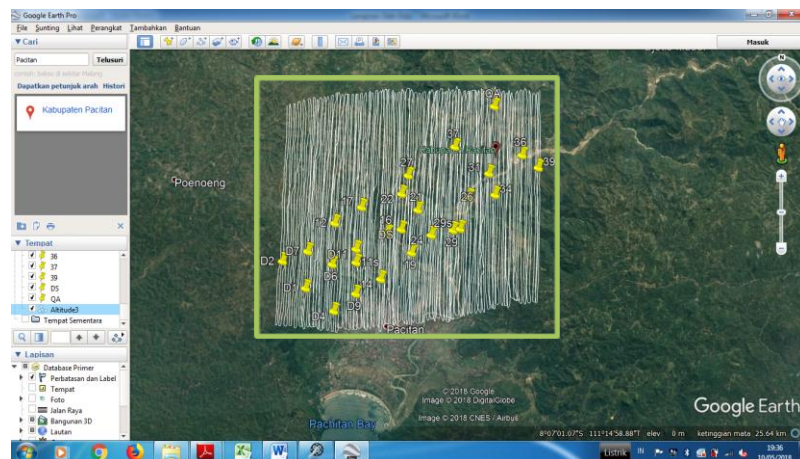


Gambar L17. Tampilan obyek pada Google Earth.

- c. Untuk *plotting* titik penelitian pada Google Earth maka pilih menu Tambahkan → Penanda letak, kemudian memasukkan titik koordinat *longitude latitude* lalu OK, maka akan muncul seperti Gambar L18.
- d. Untuk membuat topografi daerah penelitian yaitu dengan membuat jalur persebaran titik-titik secara vertikal atau horizontal tanpa terputus yang melingkupi daerah penelitian dengan cara memilih menu Tambahkan → Jalur → OK, maka akan terlihat pada Gambar L19.
- e. Untuk menyimpan jalur yang telah dibuat yaitu mengklik kanan pada kotak tempat kemudian simpan dalam format *.kml* misalnya *altitude.kml*.

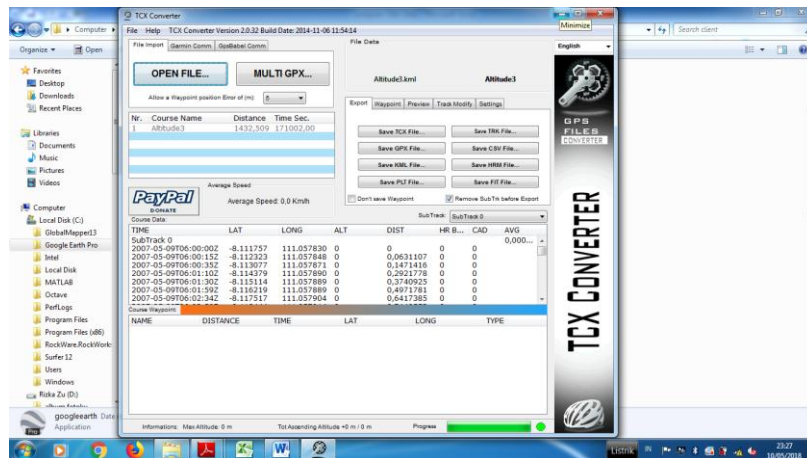


Gambar L18. *Plotting* titik ukur.



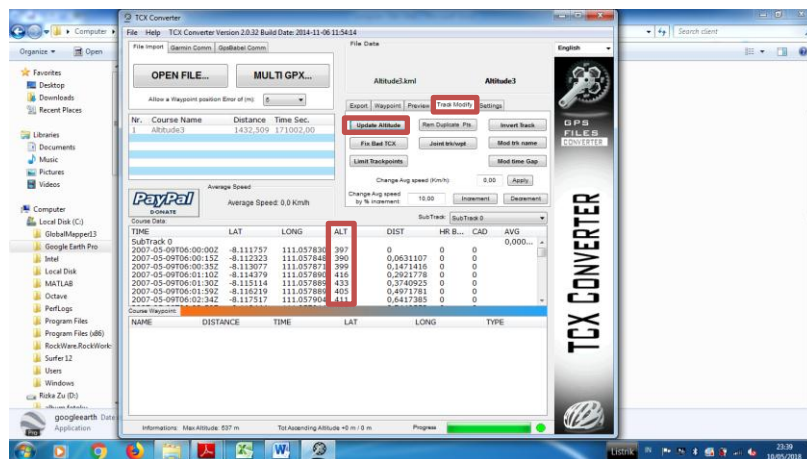
Gambar L19. Jalur titik daerah penelitian.

2. Untuk mengkonversi data hasil *plotting* Google Earth di TCX Converter adalah sebagai berikut:
 - a. Membuka *icon* TCX Converter dengan mengklik kanan → *Run* → *YES*.
 - b. Memilih menu *File Import* → *Open File* untuk membuka *file* dalam format *.kml* maka akan muncul Gambar L20.



Gambar L20. Tampilan data format .kml pada TCX Converter.

- c. Kemudian memilih *Track Modify* → *Update Altitude*. Selama proses *update altitude* pastikan untuk terhubung pada jaringan internet dan tunggu sampai *progress* pada kotak hijaunya penuh. Setelah *update altitude* selesai nampak seperti yang ditunjukkan pada Gambar L21.



Gambar L21. Tampilan *Update Altitude*.

- d. Untuk menyimpan data *update altitude* yaitu memilih *Export* → *Save CSV File*. Kemudian membuka data dalam format .csv pada Microsoft Excel 2010 seperti pada Gambar L22. Data *latitude*, *longitude*, dan *altitude* yang digunakan untuk pemodelan topografi.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U |
|----|-----------|-----------|----------|----------|------|----------|-----|------|---------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | UNIX TIME | LAT | LONG | ALT | DIST | HR | CAD | TEMP | POWER | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11176 | 111.0578 | 397 | 0 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11232 | 111.0578 | 390 | 0.063111 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 3 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11308 | 111.0579 | 399 | 0.147342 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 4 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11458 | 111.0579 | 438 | 0.292178 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 5 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11511 | 111.0579 | 433 | 0.374093 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 6 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11622 | 111.0579 | 405 | 0.497178 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 7 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11752 | 111.0579 | 411 | 0.641799 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 8 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11844 | 111.0579 | 437 | 0.748055 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 9 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.11992 | 111.0579 | 407 | 0.809832 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 10 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12066 | 111.0579 | 399 | 0.992111 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 11 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12203 | 111.0579 | 399 | 1.033585 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 12 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12234 | 111.058 | 445 | 1.17884 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 13 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12345 | 111.058 | 460 | 1.303 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 14 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12382 | 111.058 | 448 | 1.343502 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 15 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12471 | 111.0579 | 429 | 1.443124 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 16 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12609 | 111.0578 | 411 | 1.603348 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 17 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12722 | 111.0578 | 398 | 1.72349 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 18 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.12812 | 111.0578 | 376 | 1.823466 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 19 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.1292 | 111.0577 | 397 | 1.943978 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 20 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.13047 | 111.0577 | 338 | 2.085343 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 21 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.13102 | 111.0577 | 338 | 2.146671 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 22 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.1324 | 111.0577 | 353 | 2.393564 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 23 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.13398 | 111.0577 | 353 | 2.475885 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |
| 24 | 1.18E+09 | 2007-05-0 | -8.13508 | 111.0575 | 354 | 2.600805 | 0 | 0 | No Data | No Data | | | | | | | | | | | |

Gambar L22. Tampilan data format .csv pada Microsoft Excel 2010.

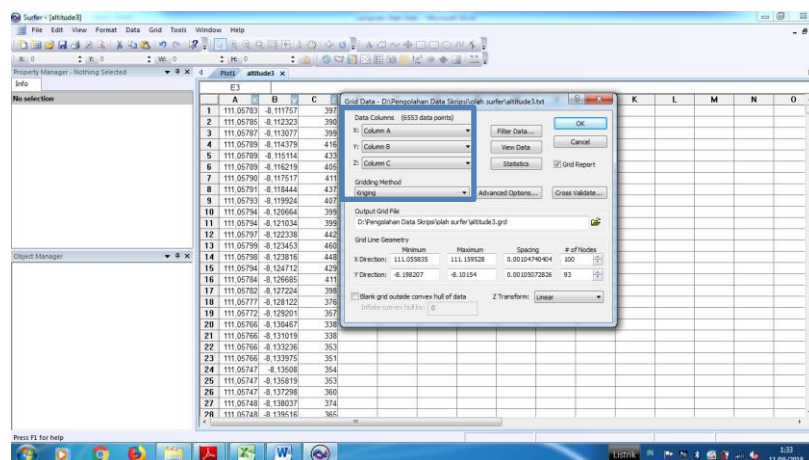
D. Membuat Mikrozonasi Topografi, Frekuensi Predominan, dan Faktor Amplifikasi pada Surfer12.

1. Membuka *icon* Surfer12 → *Run* → *YES*.
2. Memilih menu *File* → *New* → *Worksheet*. Menginput data *longitude* pada kolom A, *latitude* pada kolom B, dan kolom C untuk *altitude* sebagai berikut.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
|----|-----------|-----------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 111.05783 | -8.111757 | 397 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 111.05785 | -8.112323 | 390 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 111.05787 | -8.113077 | 399 | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 111.05789 | -8.114379 | 436 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 111.05789 | -8.115114 | 433 | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 111.05789 | -8.116219 | 405 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 111.05790 | -8.117517 | 411 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 111.05791 | -8.118444 | 437 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 111.05793 | -8.119924 | 407 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 111.05794 | -8.120654 | 399 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 111.05794 | -8.121034 | 399 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 111.05797 | -8.122338 | 442 | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 111.05799 | -8.123453 | 440 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 111.05798 | -8.123816 | 440 | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 111.05794 | -8.124712 | 429 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 111.05784 | -8.126885 | 411 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 111.05782 | -8.127224 | 398 | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 111.05777 | -8.128122 | 376 | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 111.05772 | -8.129201 | 367 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 111.05766 | -8.130467 | 338 | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 111.05766 | -8.131019 | 338 | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 111.05766 | -8.132336 | 353 | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 111.05766 | -8.133975 | 351 | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 111.05747 | -8.13508 | 364 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 111.05747 | -8.135819 | 353 | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 111.05747 | -8.137298 | 360 | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 111.05748 | -8.138037 | 374 | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 111.05748 | -8.138516 | 365 | | | | | | | | | | | | |

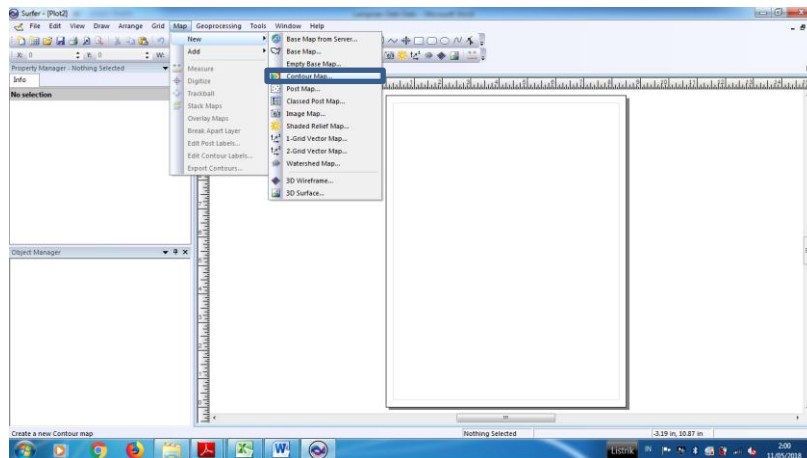
Gambar L23. Input data pada Surfer12.

3. Kemudian menyimpan data dalam format .txt dan melakukan langkah-langkah di atas untuk menginput data frekuensi dominan, faktor amplifikasi, dan titik data.
4. Untuk *grid* data maka lakukan langkah-langkah berikut:
 - a. Memilih menu *Grid* → *Data* → *Open* untuk membuka data pilih dalam format .txt.
 - b. Kemudian akan muncul jendela *Grid Data* pada Gambar L24. Cek *data columns* pastikan penempatan masing-masing variabel *input* datanya benar lalu memilih *Gridding Method* misalnya “*Krigging*” kemudian mengklik OK.
 - c. Menyimpan data hasil *grid* dalam format .grd.



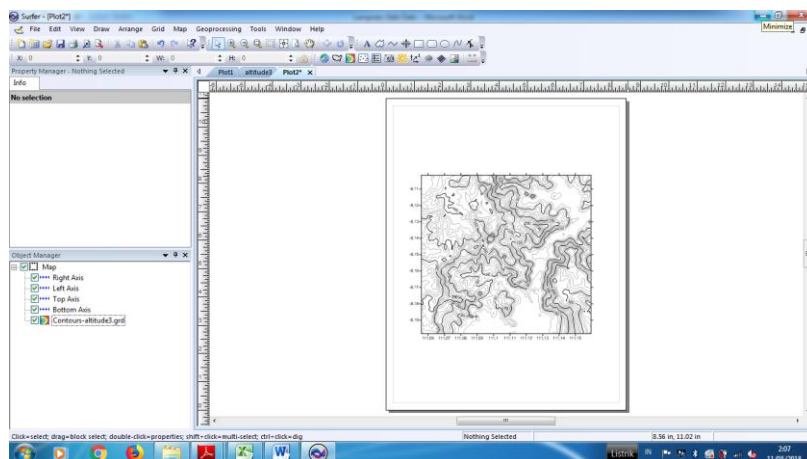
Gambar L24. Tampilan jendela *Grid Data*.

5. Untuk *plotting* topografi dan frekuensi dominan adalah sebagai berikut:
 - a. Memilih menu *File* → *New* → *Plot*.
 - b. Memilih *Map* → *New* → *Contour Map* seperti pada Gambar L25.



Gambar L25. Tampilan awal *plot* topografi.

- c. Kemudian *Open file* data dalam format *.grd* akan muncul tampilan sebagai berikut.

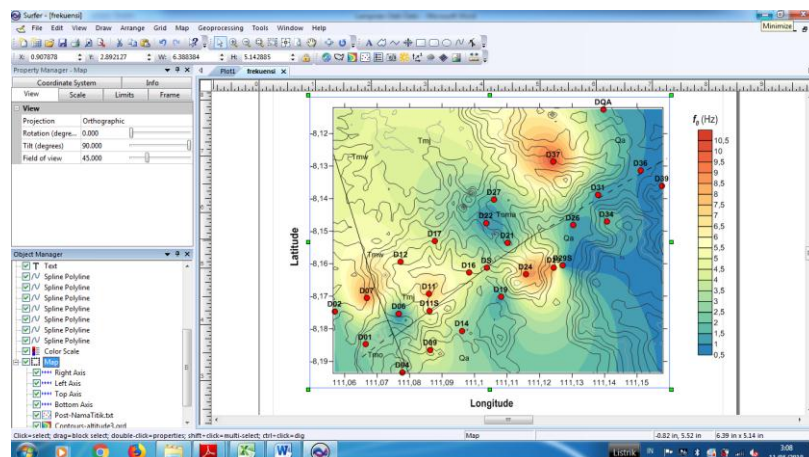


Gambar L26. Tampilan mikrozonasi topografi.

6. Untuk menggabungkan mikrozonasi antara topografi dan frekuensi dominan yaitu mengulangi seperti langkah 5 kemudian *Ctrl+A* → *Map* → *Overlay Maps*.
7. Kemudian untuk mengisi warna dan kontur pada mikrozonasi, klik dua kali pada area mikrozonasi lalu akan muncul kotak *Property Manager*.

Selanjutnya, mengklik *map contour frequency* pada *Object Manager* kemudian *checklist fill contour*, *fill color*, dan *color scale*.

8. Untuk menyatukan warna dan kontur pada mikrozonasi topografi dan frekuensi yaitu men-*drag map contour* frekuensi kemudian *drop* pada *map contour* topografinya.
9. Untuk menambahkan titik data pada mikrozonasi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar L27 adalah sebagai berikut:
 - a. Memilih *Map* → *New* → *Post Map*.
 - b. Mengulangi langkah 1 sampai 3 untuk membuka *file* data dalam format *.txt* tanpa di-*grid* kemudian mengulangi langkah 6.
 - c. Untuk memunculkan nama titiknya maka pilih *Labels* pada *Property Manager* → *Worksheet Columns*.



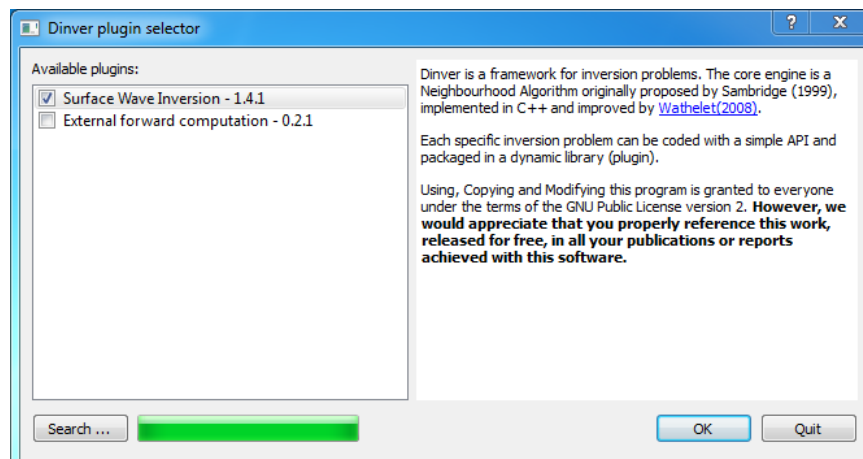
Gambar L27. Hasil mikrozonasi kontur topografi dan frekuensi dominan.

10. Menyimpan hasil mikrozonasi kontur dalam format *.srf*.
11. Melakukan langkah-langkah di atas untuk mikrozonasi topografi dan faktor amplifikasi.

E. Menganalisis Kurva H/V dengan Pemodelan *Ellipticity Curve* menggunakan Dinver.

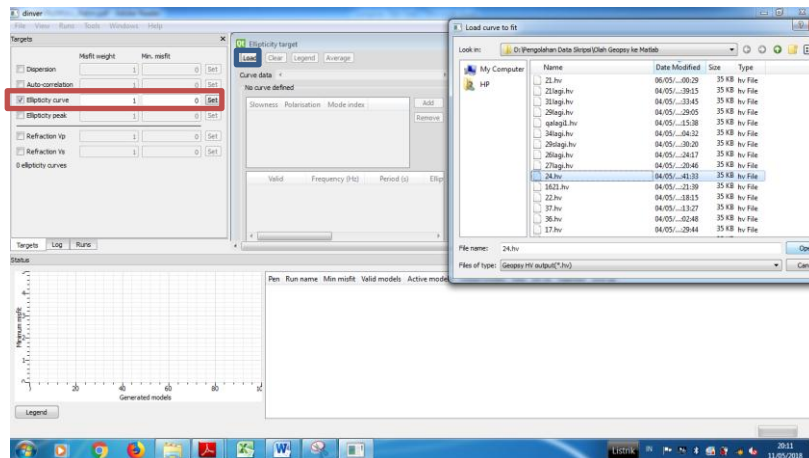
Adapun tujuan dari analisis kurva H/V menggunakan Dinver adalah untuk mengetahui *ground profile* V_s hasil dari pemodelan *ellipticity curve* yang digunakan untuk membuat penampang seismik berdasarkan nilai V_s dan kedalaman (*depth*), dengan cara sebagai berikut:

1. Membuka *icon* Dinver dengan mengklik kanan \rightarrow *Run* \rightarrow *YES* seperti pada Gambar L28.



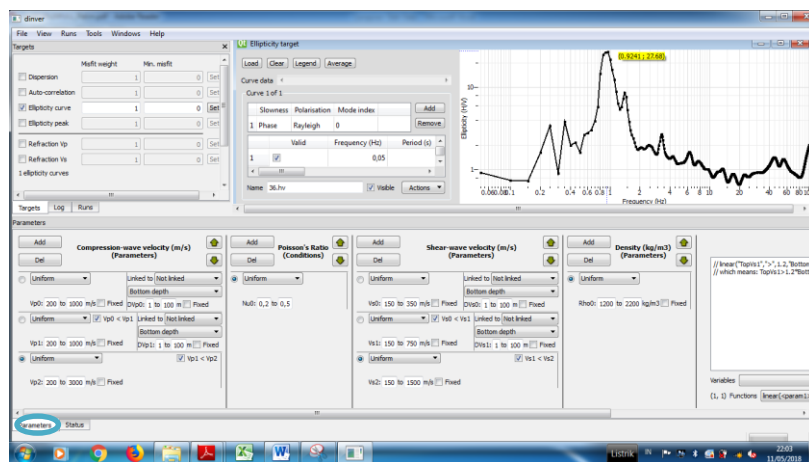
Gambar L28. Tampilan awal Dinver.

2. Memilih OK. Kemudian centang pilihan *Ellipticity Curve* pada kotak *Target* lalu mengklik *Set* \rightarrow *Load*, akan muncul kotak *load curve to fit* dan input *file* data dalam format .hv hasil analisis kurva H/V dari Matlab R2010a seperti pada Gambar L29 kemudian *Open*.



Gambar L29. Input *file* format .hv pada Dinver.

3. Kemudian memilih OK pada kotak *Load Curve* maka akan muncul kurva *H/V*. Untuk input data maka memilih menu *Tools* → *Parameters* maka akan muncul kotak *Parameters* di pojok kiri kemudian klik.

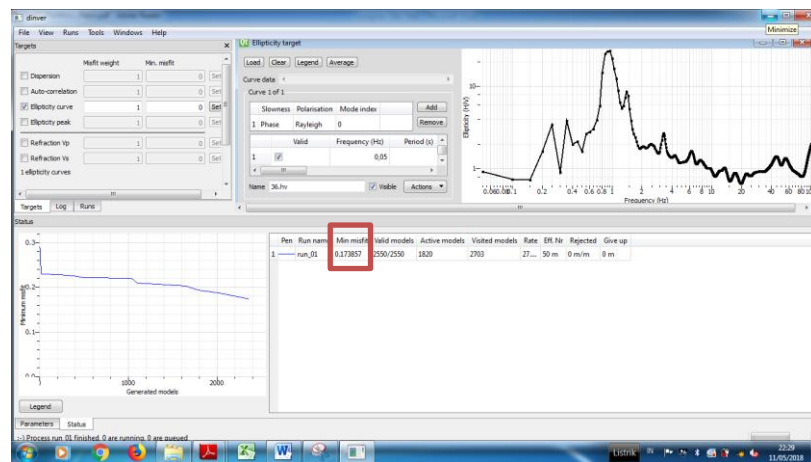


Gambar L30. Input *Parameters* pada Dinver.

4. Pada kotak *Parameters* terdapat empat komponen input data yang terdiri dari *Compression-wave velocity*, *Poisson's Ratio*, *Shear-wave velocity*, dan *Density*. Input data pada komponen-komponen di atas seperti pada Gambar L30 harus disesuaikan dengan banyaknya *layer* (lapisan) yang

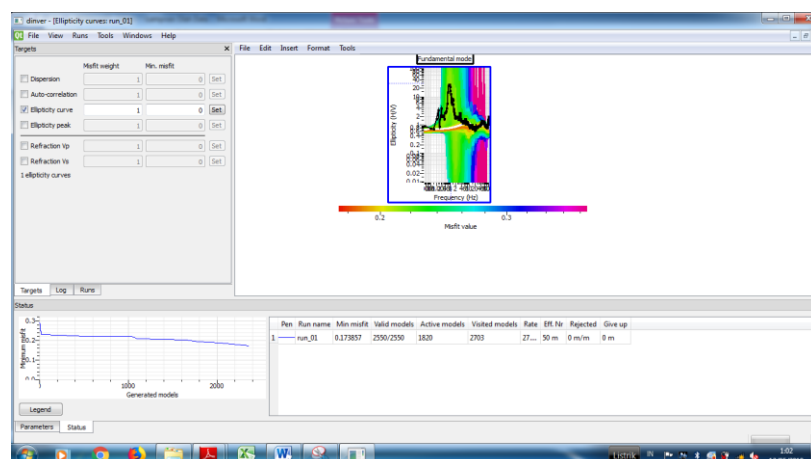
dibutuhkan untuk interpretasi *ground profiles* yaitu dengan memperhatikan karakteristik geologi serta kondisi di lapangan.

5. Kemudian memilih menu *Runs* → *Add* → *Status* untuk mengetahui nilai *misfit*-nya tunggu sampai proses perhitungan *misfit*-nya berhenti dan hasilnya terlihat pada gambar L31.



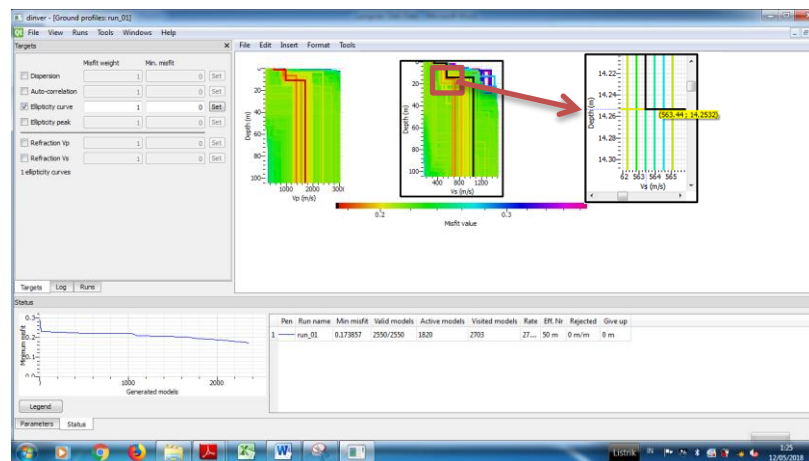
Gambar L31. *Misfit* hasil *running* data.

6. Memilih menu *View* → *Ellipticity* untuk melihat hasil analisis kurvanya seperti pada Gambar L32.



L32. Hasil analisis *Ellipticity Curve*.

7. Kemudian untuk melihat hasil pemodelan *ground profiles* maka memilih menu *View* → *Ground Profile*.
8. Hasil analisis dari *ground profiles* adalah nilai V_s dan kedalaman (*depth*), untuk mengetahui masing-masing dari nilai parameternya maka mengklik kanan pada area kurva lalu *Zoom* pada pojok batas antar *layer* (lapisan) seperti ditunjukkan oleh Gambar L33. Kemudian mencatat nilai V_s dan *depth*-nya untuk masing-masing *layer*.



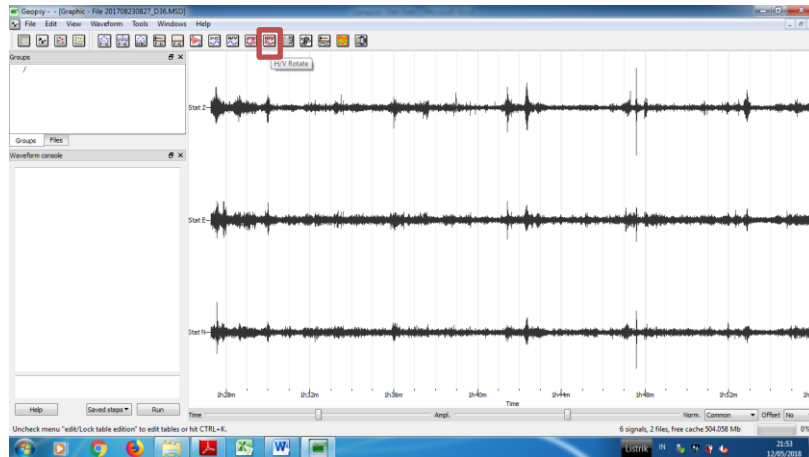
Gambar L33. Nilai V_s dan *depth* pada *ground profile*.

F. Menganalisis Arah Orientasi Sesar dengan Metode H/V Rotate.

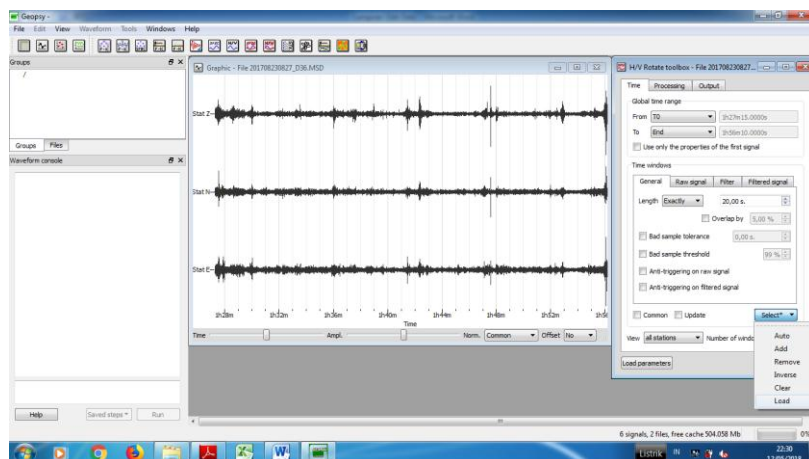
Berikut langkah-langkahnya:

1. Membuka *icon* Geopsy dengan mengklik kanan → *Run* → *YES*.
2. Memilih menu *File* → *Import data* → *Open* untuk membuka *file* data dalam format *.MSD*.
3. Memilih H/V Rotate pada *toolbar* seperti yang ditampilkan pada Gambar L34.
4. Kemudian akan muncul *H/V Rotate Toolbox*, pastikan parameter pada *Time*, *Processing*, dan *Output*-nya disesuaikan dengan analisis kurva *H/V*

lalu memilih *Select* → *Load* → *Open* untuk membuka *file* data dalam format .log seperti pada Gambar L35 dan akhiri dengan mengklik *Start*.

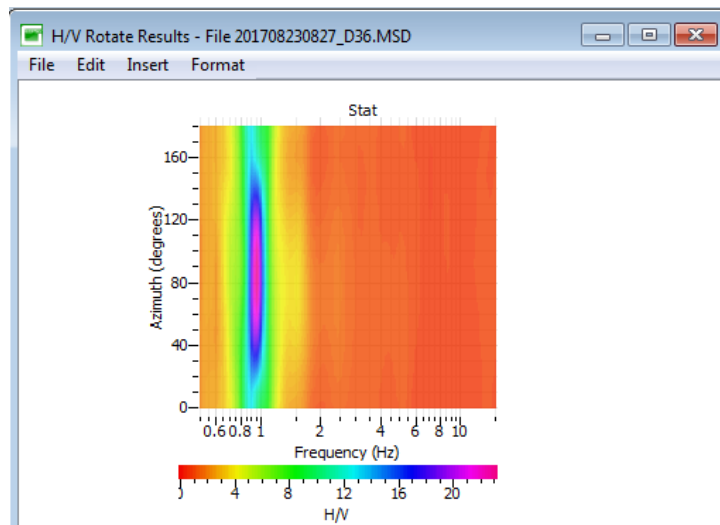


Gambar L34. Tampilan *import data* H/V Rotate.



Gambar L35. Tampilan input data .log.

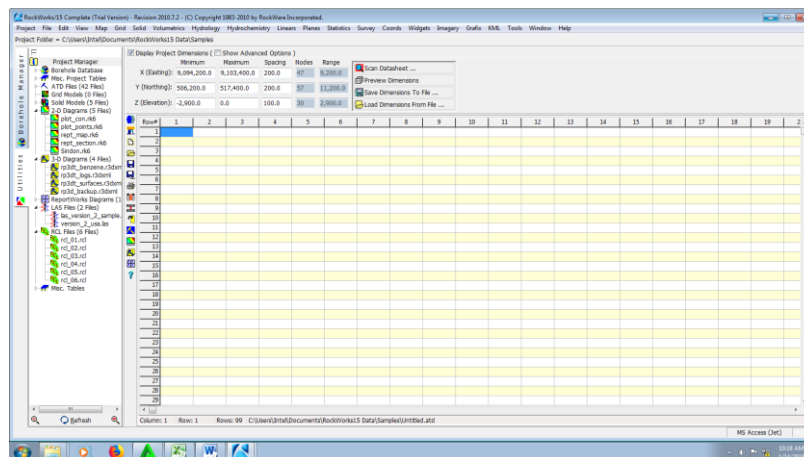
5. Maka akan muncul spektrum *H/V* sebagai fungsi frekuensi dan sudut *azimuth* seperti pada Gambar L36.
6. Untuk menyimpan spektrum *H/V* maka mengklik kanan pada area kontur → *Export values* → *Save*, menyimpan dalam format .hv.



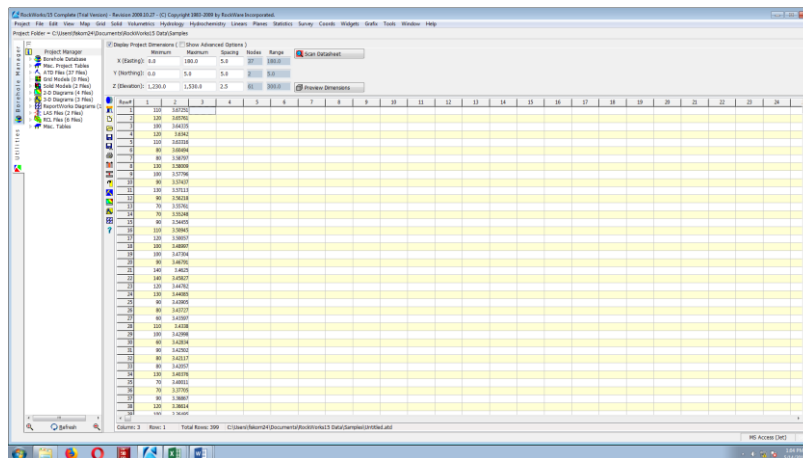
G. Membuat Pemodelan 2D Arah Orientasi Sesar.

Adapun langkah-langkah kerjanya sebagai berikut:

1. Membuka *icon* Rockwork15 dengan mengklik kanan → *Run* → *YES*.
Kemudian memilih *Utilities* seperti pada Gambar L37.

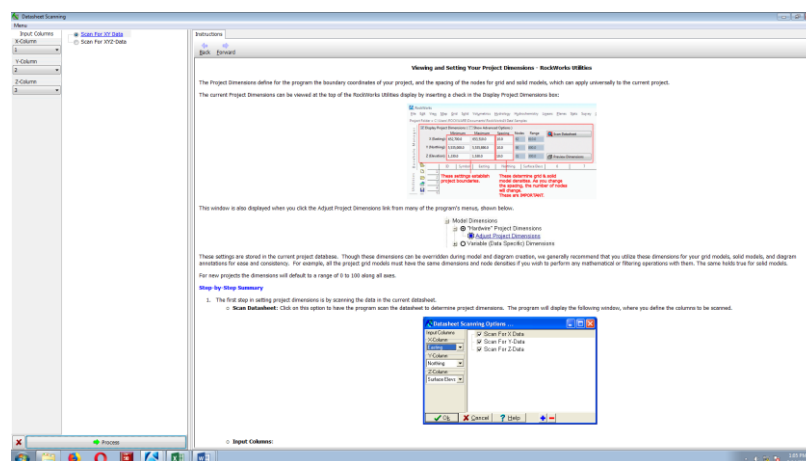


2. Menginput data dalam format .hv hasil analisis *H/V Rotate* yang telah disalin dari Microsoft Excel 2010 sebagai berikut.



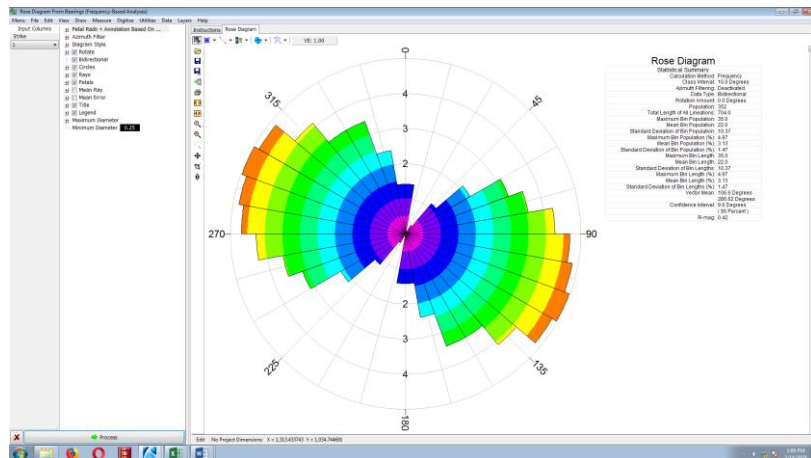
Gambar L38. Input data .hv pada Rockwork15.

3. Kemudian *Scan Datasheet* → *Scan for X-Y Data* → *Process* seperti pada Gambar L39.



Gambar L39. Tampilan *scan* data.

4. Memilih menu *Linears* → *Rose Diagram* → *From Bearings* kemudian mengklik *Process* maka akan muncul hasilnya pada Gambar L40.
5. Memilih *File* → *Export* dalam format .JPEG untuk menyimpan hasilnya.



Gambar L40. *Rose diagram* hasil pemodelan arah orientasi besar.

H. Membuat Pemodelan 3D *Solid Model* Persebaran Faktor Amplifikasi

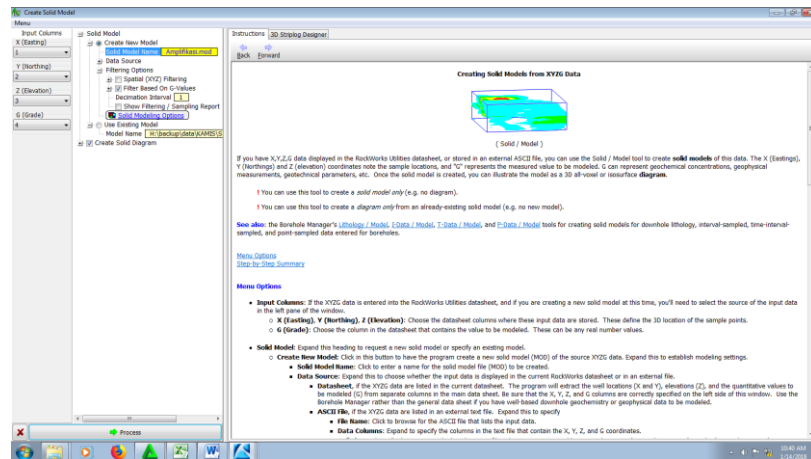
(A_g)

1. Membuka *icon* Rockwork15 dengan mengklik kanan \rightarrow Run \rightarrow YES.
2. Memilih *Utilities* untuk menginput data yang disalin dari Microsoft Excel 2010. Adapun data yang diinput berupa *latitude*, *longitude*, kedalaman (*depth*), dan faktor amplifikasi (A_g) pada masing-masing kolom secara berurutan kemudian *Save* dalam format .atd.
3. Memilih *Scan Datasheet* \rightarrow *Scan for XYZ-Data* \rightarrow *Process*.

| Row# | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------|---------|---------|--------------------|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 9895272 | 1077121 | -1084.423582457082 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

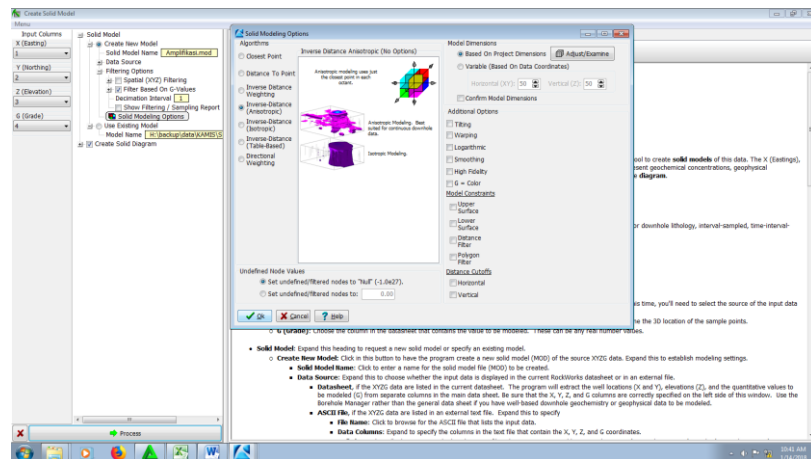
Gambar L41. Tampilan input data pada *data sheet*.

4. Memilih menu *Solid* → *Model*. Kemudian mengklik *Solid Model* → *Create New Model* untuk membuat pemodelan baru lalu memilih *Solid Model Name*. Sebelumnya simpan file dalam format *.mod*.



Gambar L42. Tampilan menu pada pembuatan model baru.

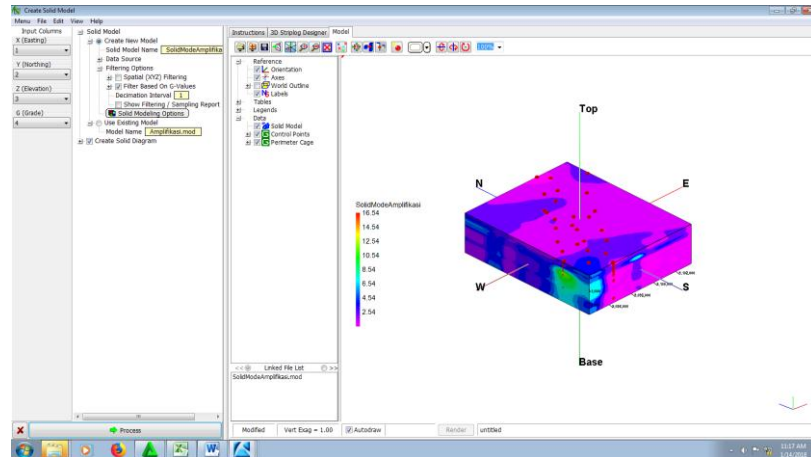
5. Memilih *Solid Modeling Option* → *Smoothing* → *OK* dan akhiri dengan mengklik *Process*.



Gambar L43. Tampilan menu untuk pemilihan model 3D.

6. Kemudian akan muncul pemodelan 3D *solid model amplification* seperti pada Gambar L44.

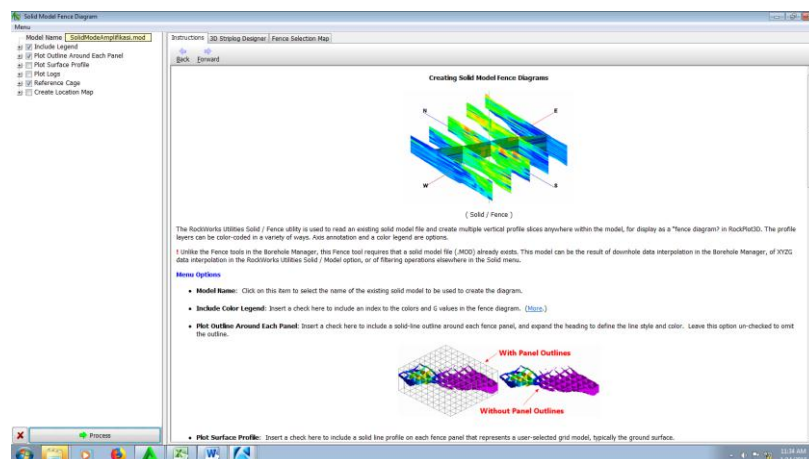
- Memilih menu *File* → *Export* dalam format .JPEG untuk menyimpan hasil pemodelannya.



Gambar L44. Hasil pemodelan 3D *solid model amplification*.

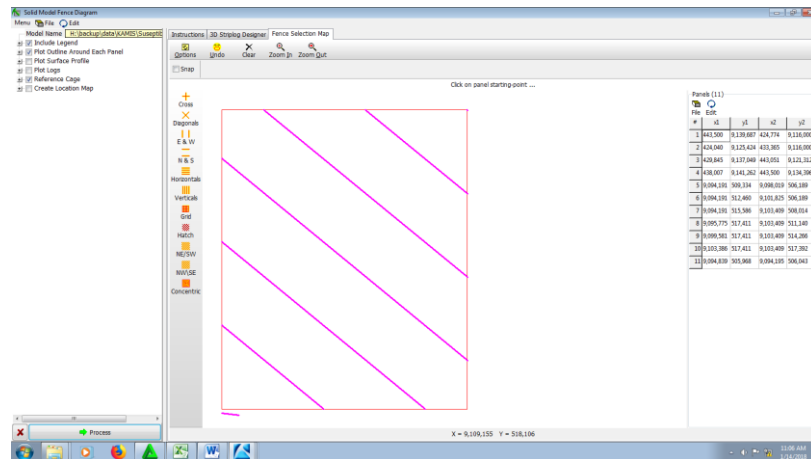
I. Membuat Pemodelan Sayatan Persebaran Faktor Amplifikasi pada Kawasan Sesar.

- Mengulangi langkah 1 sampai langkah 3 pada perintah H.
- Memilih menu *Solid* → *Fence* kemudian akan muncul sebagai berikut



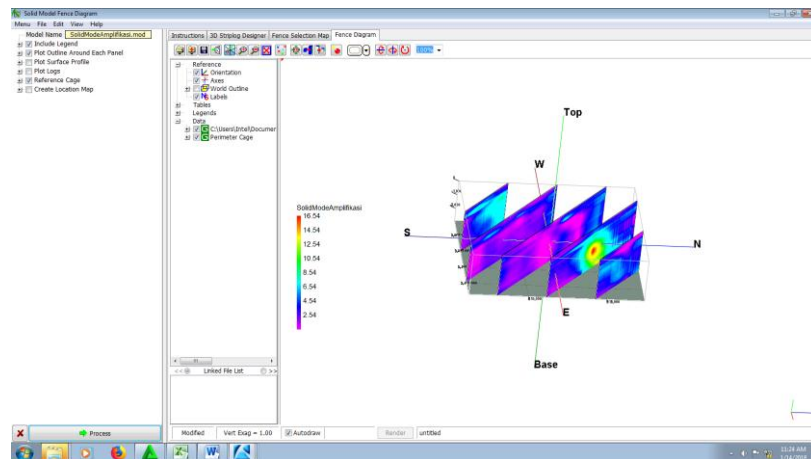
Gambar L45. Tampilan submenu pada *Fence*.

- Kemudian memilih *Fence Selection Map* lalu memilih model sayatan NW\SE → *Process* seperti Gambar L46. Untuk input data *solid model amplification* (.mod) yaitu mengklik *Model Name*.



Gambar L46. Tampilan model sayatan NW\SE.

- Maka akan muncul pemodelan sayatan pada kawasan sesar untuk faktor amplifikasinya sebagai berikut.



Gambar L47. Model sayatan faktor amplifikasi pada kawasan sesar.

- Memilih menu *File* → *Export* untuk menyimpan data dalam format .JPEG.

LAMPIRAN 2

PEMROGRAMAN MATLAB R2010a

A. Program Utama Analisis Komponen Sinyal Mikrotremor

```
clc; clear all;clf;
%=====Komponen
Z=====
x=xlsread('V.xls');
P=2000;          %panjang window

PW=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];      %Matriks potongan
data window
jumlah_window=length(PW);

for i=1:length(PW);
    s=0;
    W=x((PW(i)*P)+1:(PW(i)+1)*P);
    [hasil_fft]=fft_64(W);
    s = s + hasil_fft;
end

S=s/jumlah_window;

fs=100;
N=length(W);
k=0:1:(N-1);
fx=(fs/N)*k';

f=fx';
St=S';

%=====
Smoothingnya=====
b=40;
[S1]=smooth_spektrum(St,f,b);

S1t=S1';

%=====Plotnya=====
=====
%plot(f(1:400),St(1:400),'b'); hold on;
plot(f(1:400),S1(1:400),'r');
```

B. Program *Fast Fourier Tranform* (FFT).

```
function [hasil]=fft_64(W)    %W adalah sinyal input
N=length(W);    %Jumlah data sinyal
r=64;    %radix 64
k=0⊗N/r)-1;
n=0:N-1;

%=====FFT RADIX 64=====
z1=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r)/N)*W(r*k+1)';
z2=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+1)/N)*W(r*k+2)';
z3=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+2)/N)*W(r*k+3)';
z4=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+3)/N)*W(r*k+4)';
z5=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+4)/N)*W(r*k+5)';
z6=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+5)/N)*W(r*k+6)';
z7=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+6)/N)*W(r*k+7)';
z8=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+7)/N)*W(r*k+8)';
z9=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+8)/N)*W(r*k+9)';
z10=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+9)/N)*W(r*k+10)';
z11=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+10)/N)*W(r*k+11)';
z12=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+11)/N)*W(r*k+12)';
z13=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+12)/N)*W(r*k+13)';
z14=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+13)/N)*W(r*k+14)';
z15=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+14)/N)*W(r*k+15)';
z16=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+15)/N)*W(r*k+16)';
z17=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+16)/N)*W(r*k+17)';
z18=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+17)/N)*W(r*k+18)';
z19=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+18)/N)*W(r*k+19)';
z20=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+19)/N)*W(r*k+20)';
z21=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+20)/N)*W(r*k+21)';
z22=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+21)/N)*W(r*k+22)';
z23=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+22)/N)*W(r*k+23)';
z24=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+23)/N)*W(r*k+24)';
z25=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+24)/N)*W(r*k+25)';
z26=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+25)/N)*W(r*k+26)';
z27=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+26)/N)*W(r*k+27)';
z28=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+27)/N)*W(r*k+28)';
z29=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+28)/N)*W(r*k+29)';
z30=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+29)/N)*W(r*k+30)';
z31=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+30)/N)*W(r*k+31)';
z32=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+31)/N)*W(r*k+32)';
z33=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+32)/N)*W(r*k+33)';
z34=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+33)/N)*W(r*k+34)';
z35=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+34)/N)*W(r*k+35)';
z36=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+35)/N)*W(r*k+36)';
z37=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+36)/N)*W(r*k+37)';
z38=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+37)/N)*W(r*k+38)';
```

```

z39=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+38)/N)*W(r*k+39)';
z40=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+39)/N)*W(r*k+40)';
z41=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+40)/N)*W(r*k+41)';
z42=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+41)/N)*W(r*k+42)';
z43=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+42)/N)*W(r*k+43)';
z44=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+43)/N)*W(r*k+44)';
z45=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+44)/N)*W(r*k+45)';
z46=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+45)/N)*W(r*k+46)';
z47=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+46)/N)*W(r*k+47)';
z48=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+47)/N)*W(r*k+48)';
z49=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+48)/N)*W(r*k+49)';
z50=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+49)/N)*W(r*k+50)';
z51=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+50)/N)*W(r*k+51)';
z52=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+51)/N)*W(r*k+52)';
z53=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+52)/N)*W(r*k+53)';
z54=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+53)/N)*W(r*k+54)';
z55=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+54)/N)*W(r*k+55)';
z56=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+55)/N)*W(r*k+56)';
z57=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+56)/N)*W(r*k+57)';
z58=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+57)/N)*W(r*k+58)';
z59=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+58)/N)*W(r*k+59)';
z60=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+59)/N)*W(r*k+60)';
z61=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+60)/N)*W(r*k+61)';
z62=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+61)/N)*W(r*k+62)';
z63=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+62)/N)*W(r*k+63)';
z64=exp(-1i*2*pi*n'*(k*r+63)/N)*W(r*k+64)';

z=z1+z2+z3+z4+z5+z6+z7+z8+z9+z10+z11+z12+z13+z14+z15
+z16+z17+z18+z19+z20+z21+z22+z23+z24+z25+z26+z27+z28
+z29+z30+z31+z32+z33+z34+z35+z36+z37+z38+z39+z40+z41
+z42+z43+z44+z45+z46+z47+z48+z49+z50+z51+z52+z53+z54
+z55+z56+z57+z58+z59+z60+z61+z62+z63+z64;

hasil=abs(2*z/N);
end

```

C. Program *Smoothing Konno & Ohmachi*

```
function [smooth_window]=konno_ohmachi_smoothing_window(f,f_c,b)
    %f == matrix frekuensi
    %fc == center frequency
    %b == konno-ohmachi bandwidth
    l=length(f);
    %apabila f_c=0 buat matriks 0 sepanjang l,
    kecuali suku pertama yg
    bernilai 1
    if f_c==0
        smooth_window=zeros(1,l);
        smooth_window(1)=1;

    smooth_window=smooth_window/sum(smooth_window);
    else

    smooth_window=(sin(b*log10(f./f_c))./(b*log10(f./f_c)
    )).^4;

        %mengganti inf dengan 1
        posisi_fc= f==f_c;
        smooth_window(posisi_fc)=1;
        %mengganti NaN dengan 0
        posisi_NaN= isnan(smooth_window);
        smooth_window(posisi_NaN)=0;

    smooth_window=smooth_window/sum(smooth_window);
    end
end
```

```
function
[smooth_matrix]=hitung_smoothing_matrix(f,b)
    %f adalah matriks frekuensi
    %b adalah bandwidth Konno-Ohmachi
    %smooth_matrix berdimensi length(f) x length(f)
    l=length(f);
    smooth_matrix=[];
    for j=1:l:l
        f_c=f(j);

        [smooth_window]=konno_ohmachi_smoothing_window(f,f_c
        ,b);
        smooth_matrix=[smooth_matrix smooth_window'];
    end
end
```

```
function [spektrum_baru]=smooth_spektrum(S,f,b)
[smooth_matrix]=hitung_smoothing_matrix(f,b);
spektrum_baru=S*smooth_matrix;
end
```

D. Program *Plotting* Kurva HVSR

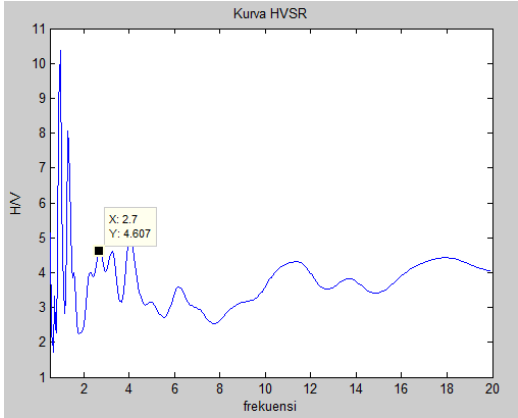
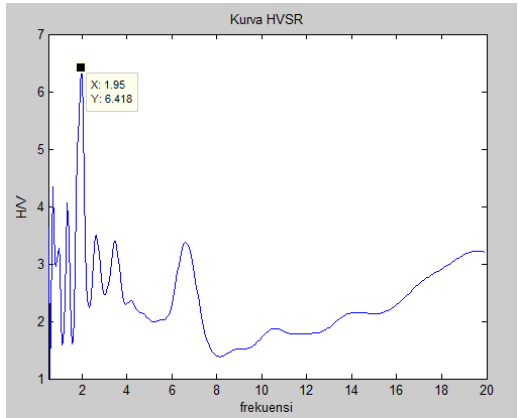
```
clc; clear all;clf;
x=xlsread('HVSR.xlsx');
fs=100;
N=length(x);
k=0:1:(N-1);
f=(fs/N)*k';

plot(f(1:400),x(1:400));
title('Kurva HVSR');
xlabel('frekuensi'); ylabel('H/V');
xlim([0.5 20]);
```

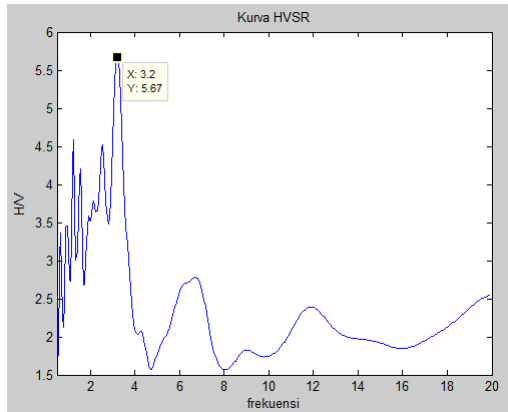

LAMPIRAN 3

HASIL PENGOLAHAN DATA

A. Kriteria Kurva H/V

| Titik D01 | |
|---|--|
|  | $f_g = 2,7$ $A_g = 4,607$ Kriteria <i>Reliable</i> i) $2,7 > 0,5$ ii) $648 > 200$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i) $4,102 < 2,303$ ii) $3,371 < 2,303$ iii) $4,607 > 2$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,07 < 0,67$ vi) $0,8 < 3,0$ |
| Titik D02 | |
|  | $f_g = 1,95$ $A_g = 6,418$ Kriteria <i>Reliable</i> i) $1,95 > 0,5$ ii) $468 > 200$ iii) $1,1 < 2,0$ Kriteria <i>Clear peak</i> i) $3,126 < 3,209$ ii) $2,600 < 3,209$ iii) $6,418 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,06 < 0,48$ vi) $1,1 < 3,0$ |

Titik D04



$$f_g = 3,2$$

$$A_g = 5,67$$

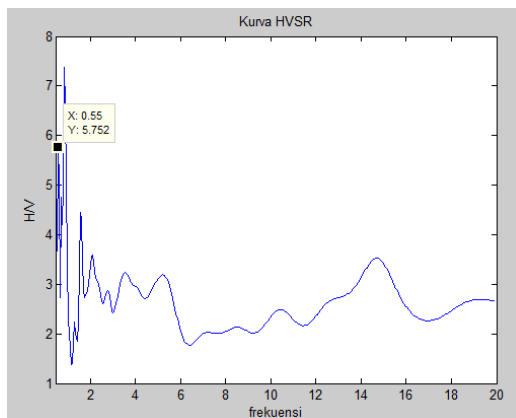
Kriteria *Reliable*

- i) $3,2 > 0,5$
- ii) $768 > 200$
- iii) $1,09 < 2,0$

Kriteria *Clear Peak*

- i) $3,741 > 2,835$
- ii) $1,995 < 2,835$
- iii) $5,67 > 2$
- iv) $0,12 < 0,8$
- v) $1,09 < 3$

Titik D06



$$f_g = 0,55$$

$$A_g = 5,752$$

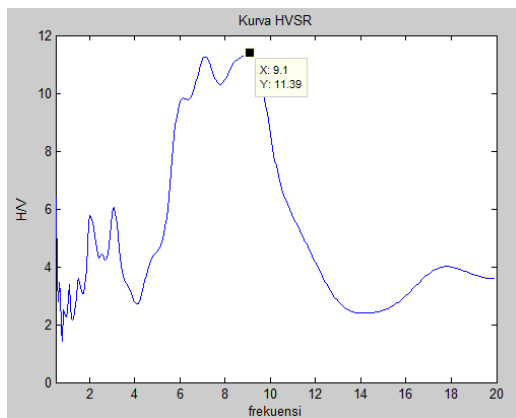
Kriteria *Reliable*

- i) $0,55 > 0,5$
- ii) $220 > 200$
- iii) $1,7 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i) $3,913 > 2,876$
- ii) $3,355 > 2,876$
- iii) $5,752 > 2$
- iv) Terpenuhi
- v) $0,05 < 0,13$
- vi) $1,7 < 3,0$

Titik D07



$$f_g = 9,1$$

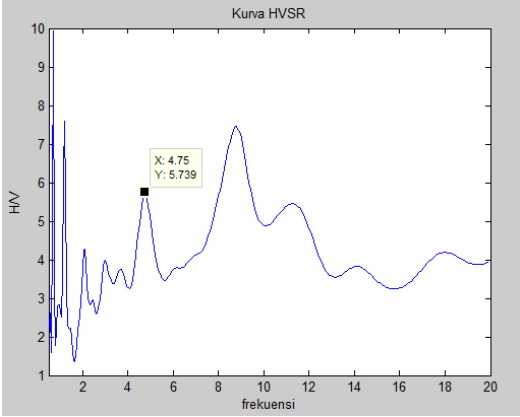
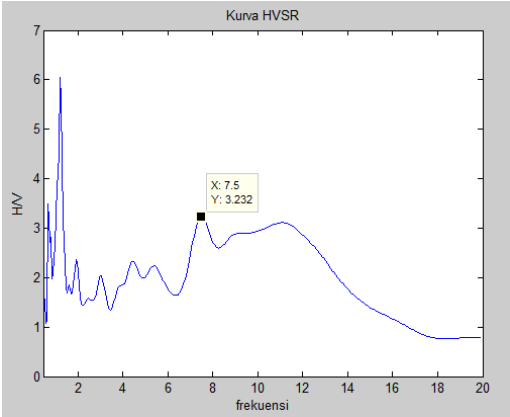
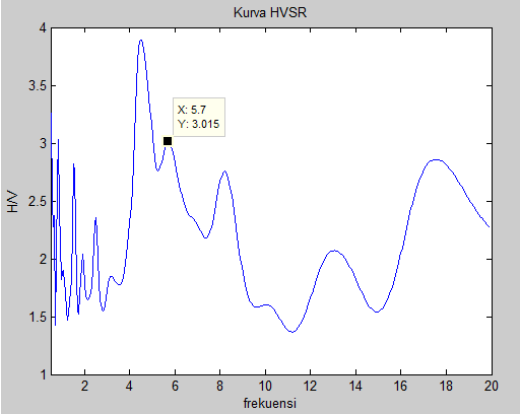
$$A_g = 11,39$$

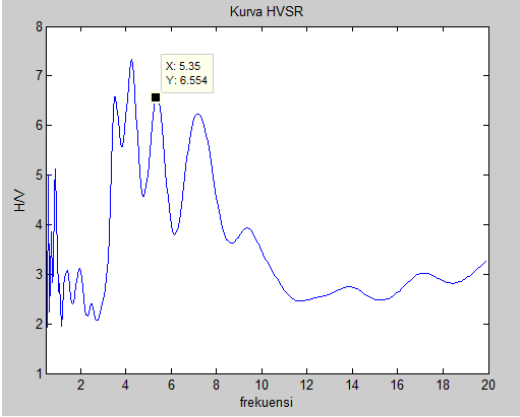
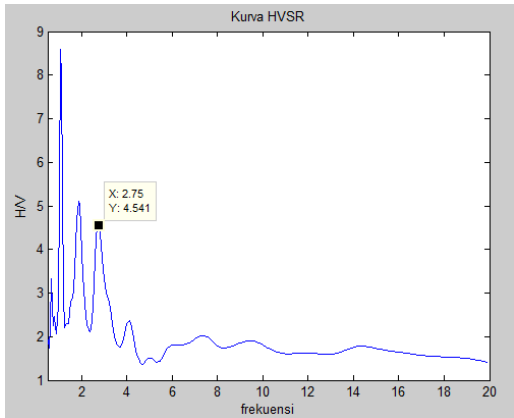
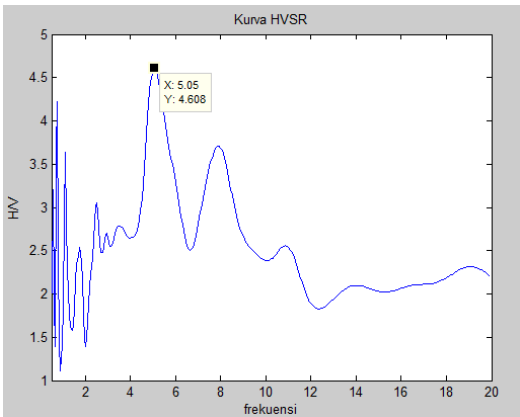
Kriteria *Reliable*

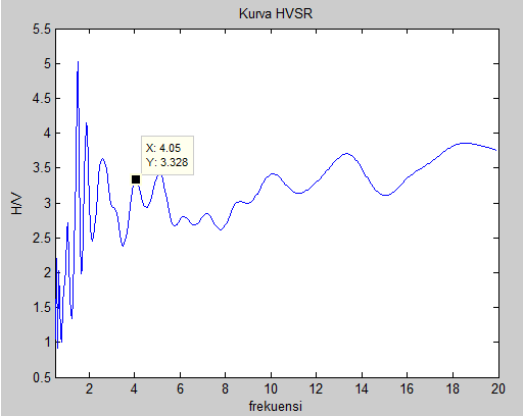
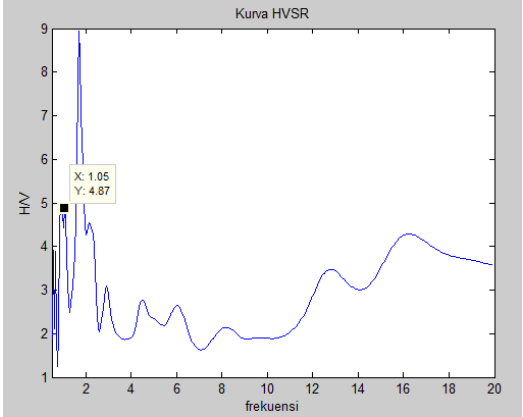
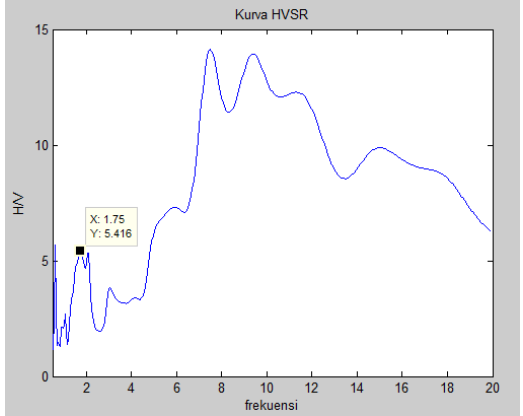
- i) $9,1 > 0,5$
- ii) $2184 > 200$
- iii) $3,3 > 2$

Kriteria *Clear Peak*

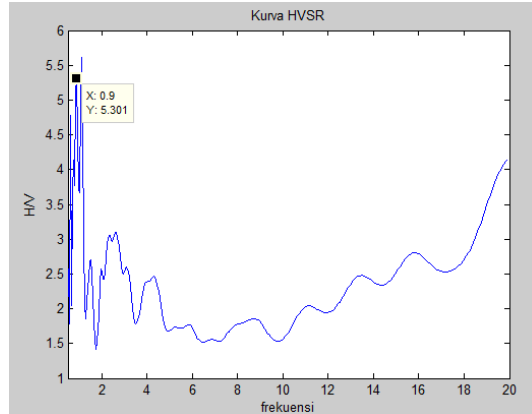
- i) $7,470 > 5,695$
- ii) $3,386 < 5,695$
- iii) $11,39 > 2$
- iv) Tidak Terpenuhi
- v) $0,28 < 2,27$
- vi) $3,3 > 3,0$

| Titik D09 | |
|---|---|
|  | $f_g = 4,75$ $A_g = 5,739$ Kriteria <i>Reliable</i> i) $4,75 > 0,5$ ii) $1235 > 200$ iii) $1,3 > 2$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i) $3,482 > 2,869$ ii) $4,420 < 2,869$ iii) $5,379 > 2$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,16 < 1,18$ vi) $1,3 < 3,0$ |
| Titik D11 | |
|  | $f_g = 7,5$ $A_g = 3,232$ Kriteria <i>Reliable</i> i) $7,5 > 0,5$ ii) $1800 > 200$ iii) $0,5 > 2$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i) $1,978 > 1,616$ ii) $1,397 < 1,616$ iii) $3,232 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,25 < 1,87$ vi) $0,5 < 3,0$ |
| Titik D11S | |
|  | $f_g = 5,7$ $A_g = 3,015$ Kriteria <i>Reliable</i> i) $5,7 > 0,5$ ii) $1368 > 200$ iii) $0,6 > 2$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i) $2,397 > 1,507$ ii) $2,099 > 1,507$ iii) $3,015 > 2$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,19 < 1,42$ vi) $0,6 < 3,0$ |

| Titik D12 | |
|--|--|
|  <p>Kurva HVS</p> <p>Y-axis: HV (1 to 8) X-axis: frekuensi (1 to 20)</p> <p>Peak: X: 5.35, Y: 6.554</p> | $f_g = 5,35$ $A_g = 6,554$ Kriteria Reliable <ul style="list-style-type: none"> i) $5,35 > 0,5$ ii) $1284 > 200$ iii) $1,28 < 2$ Kriteria Clear Peak <ul style="list-style-type: none"> i) $4,285 > 3,277$ ii) $3,371 < 3,277$ iii) $6,554 < 2$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,15 < 1,33$ vi) $1,28 < 3,0$ |
| Titik D14 | |
|  <p>Kurva HVS</p> <p>Y-axis: HV (1 to 9) X-axis: frekuensi (1 to 20)</p> <p>Peak: X: 2.75, Y: 4.541</p> | $f_g = 2,75$ $A_g = 4,541$ Kriteria Reliable <ul style="list-style-type: none"> i) $2,75 > 0,5$ ii) $715 > 200$ iii) $1,01 < 2$ Kriteria Clear Peak <ul style="list-style-type: none"> i) $3,439 > 2,270$ ii) $1,906 < 2,270$ iii) $4,541 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,10 < 0,68$ vi) $1,01 < 3,0$ |
| Titik D16 | |
|  <p>Kurva HVS</p> <p>Y-axis: HV (1 to 5) X-axis: frekuensi (1 to 20)</p> <p>Peak: X: 5.05, Y: 4.608</p> | $f_g = 5,05$ $A_g = 4,608$ Kriteria Reliable <ul style="list-style-type: none"> i) $5,05 > 0,5$ ii) $1212 > 200$ iii) $0,6 < 2$ Kriteria Clear Peak <ul style="list-style-type: none"> i) $2,709 > 2,304$ ii) $2,477 > 2,304$ iii) $4,608 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,16 < 1,26$ vi) $0,6 < 3,0$ |

| Titik D17 | |
|---|---|
|  <p>Kurva HVS</p> <p>Y-axis: HV (0.5 to 5.5) X-axis: frekuensi (0 to 20)</p> <p>Peak data: X: 4.05, Y: 3.328</p> | <p>$f_g = 4,05$ $A_g = 3,328$</p> <p>Kriteria <i>Reliable</i></p> <ul style="list-style-type: none"> i) $4,05 > 0,5$ ii) $1053 > 200$ iii) $0,3 < 2$ <p>Kriteria <i>Clear Peak</i></p> <ul style="list-style-type: none"> i) $2,930 > 1,664$ ii) $3,153 > 1,664$ iii) $3,328 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,13 < 1,01$ vi) $0,3 < 3,0$ |
| Titik D19 | |
|  <p>Kurva HVS</p> <p>Y-axis: HV (1 to 9) X-axis: frekuensi (0 to 20)</p> <p>Peak data: X: 1.05, Y: 4.87</p> | <p>$f_g = 1,05$ $A_g = 4,87$</p> <p>Kriteria <i>Reliable</i></p> <ul style="list-style-type: none"> i) $1,05 > 0,5$ ii) $252 > 200$ iii) $1,8 < 2$ <p>Kriteria <i>Clear Peak</i></p> <ul style="list-style-type: none"> i) $2,993 > 2,435$ ii) $3,297 > 2,435$ iii) $4,87 > 2$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,05 < 0,26$ vi) $1,8 < 3,0$ |
| Titik D21 | |
|  <p>Kurva HVS</p> <p>Y-axis: HV (0 to 15) X-axis: frekuensi (0 to 20)</p> <p>Peak data: X: 1.75, Y: 5.416</p> | <p>$f_g = 1,75$ $A_g = 5,416$</p> <p>Kriteria <i>Reliable</i></p> <ul style="list-style-type: none"> i) $1,75 > 0,5$ ii) $490 > 200$ iii) $1,2 < 2,0$ <p>Kriteria <i>Clear Peak</i></p> <ul style="list-style-type: none"> i) $2,883 > 2,708$ ii) $5,074 > 2,708$ iii) $5,416 > 2$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,05 < 0,43$ vi) $1,2 < 3,0$ |

Titik D22



$$f_g = 0,9$$

$$A_g = 5,301$$

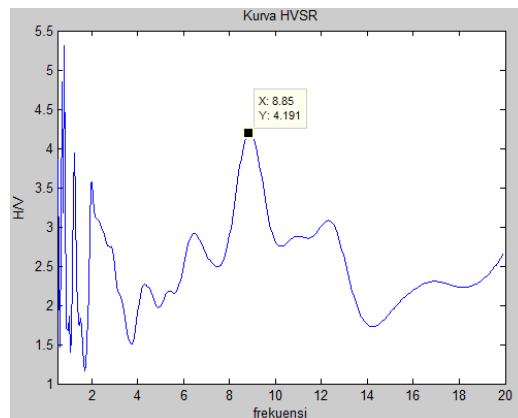
Kriteria *Reliable*

- i) $0,9 > 0,5$
- ii) $252 > 200$
- iii) $1,2 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i) $3,230 > 2,650$
- ii) $2,674 > 2,650$
- iii) $5,301 > 2$
- iv) Terpenuhi
- v) $0,05 < 0,22$
- vi) $1,2 < 3,0$

Titik D24



$$f_g = 8,85$$

$$A_g = 4,191$$

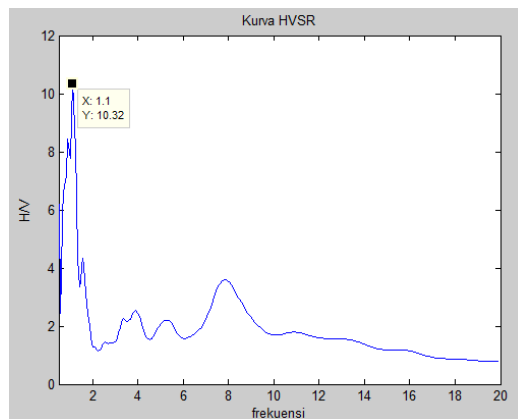
Kriteria *Reliable*

- i) $8,85 > 0,5$
- ii) $2145 > 200$
- iii) $0,5 < 2,0$

Kriteria *Clear Peak*

- i) $2,558 > 2,095$
- ii) $3,060 > 2,095$
- iii) $4,191 > 2$
- iv) Terpenuhi
- v) $0,28 < 2,21$
- vi) $0,5 < 3,0$

Titik D26



$$f_g = 1,1$$

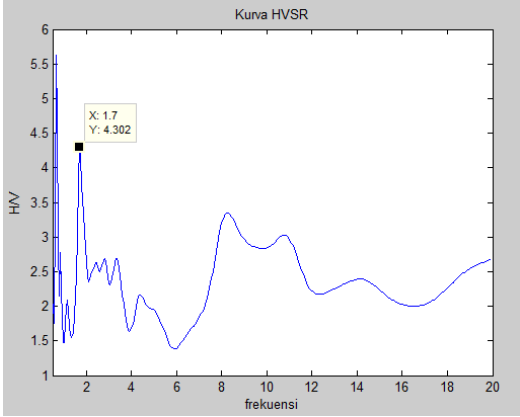
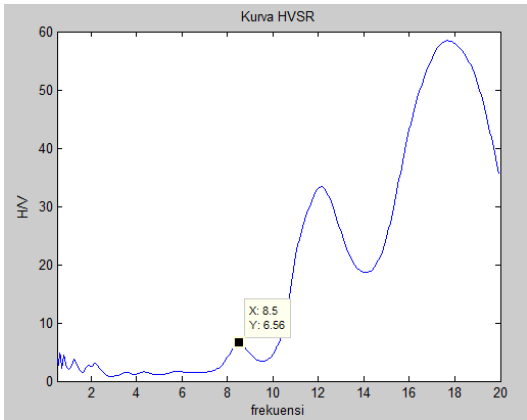
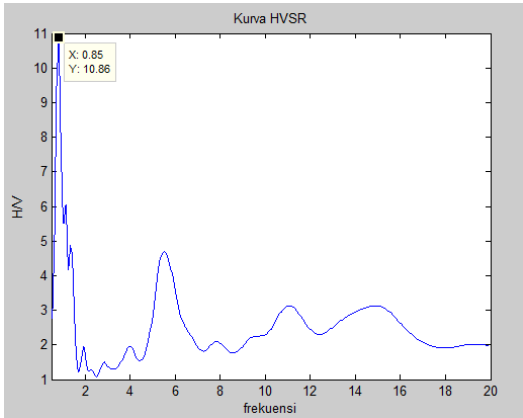
$$A_g = 10,32$$

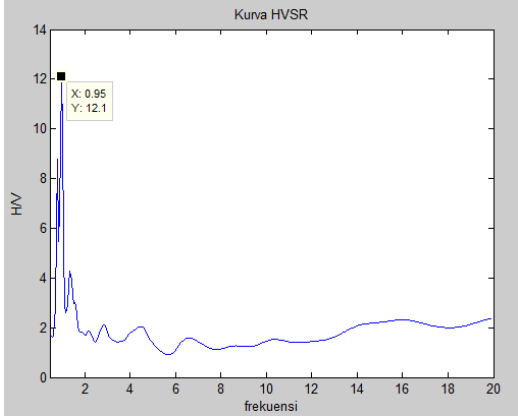
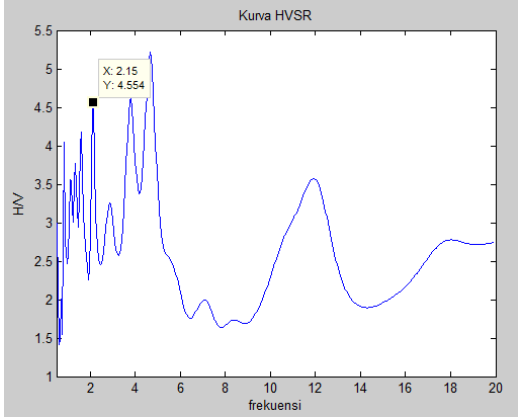
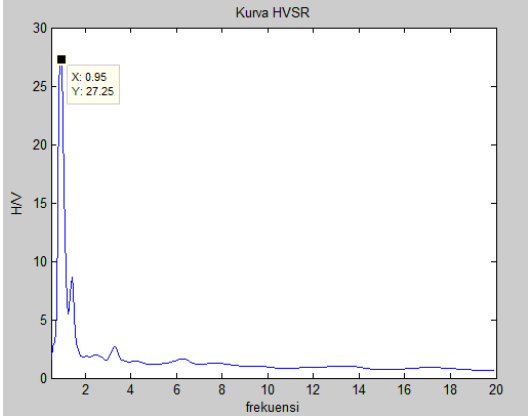
Kriteria *Reliable*

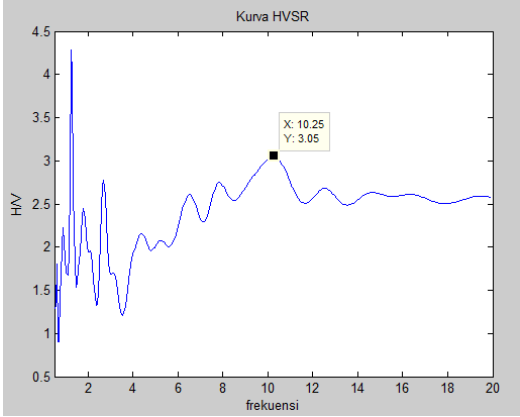
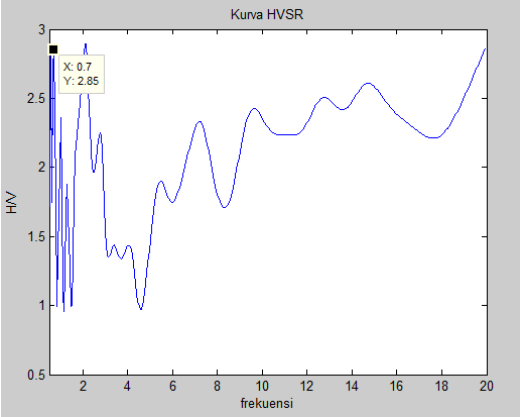
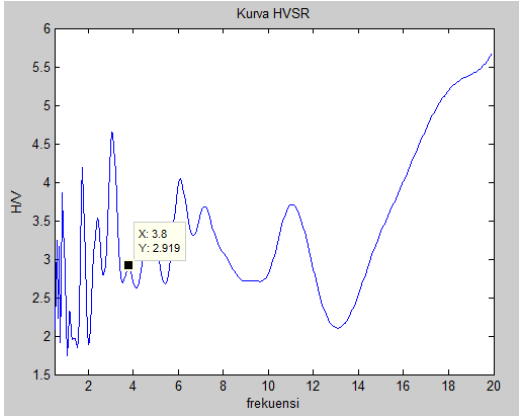
- i) $1,1 > 0,5$
- ii) $286 > 200$
- iii) $2,8 > 2,0$

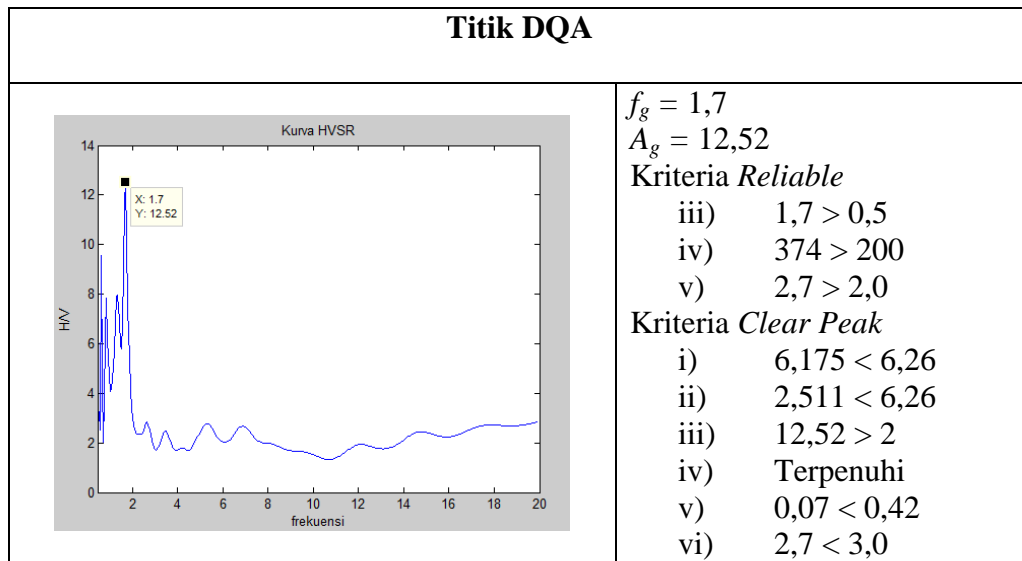
Kriteria *Clear Peak*

- i) $6,114 > 5,16$
- ii) $2,559 > 5,16$
- iii) $10,32 > 2$
- iv) Terpenuhi
- v) $0,06 < 0,27$
- vi) $2,8 < 3,0$

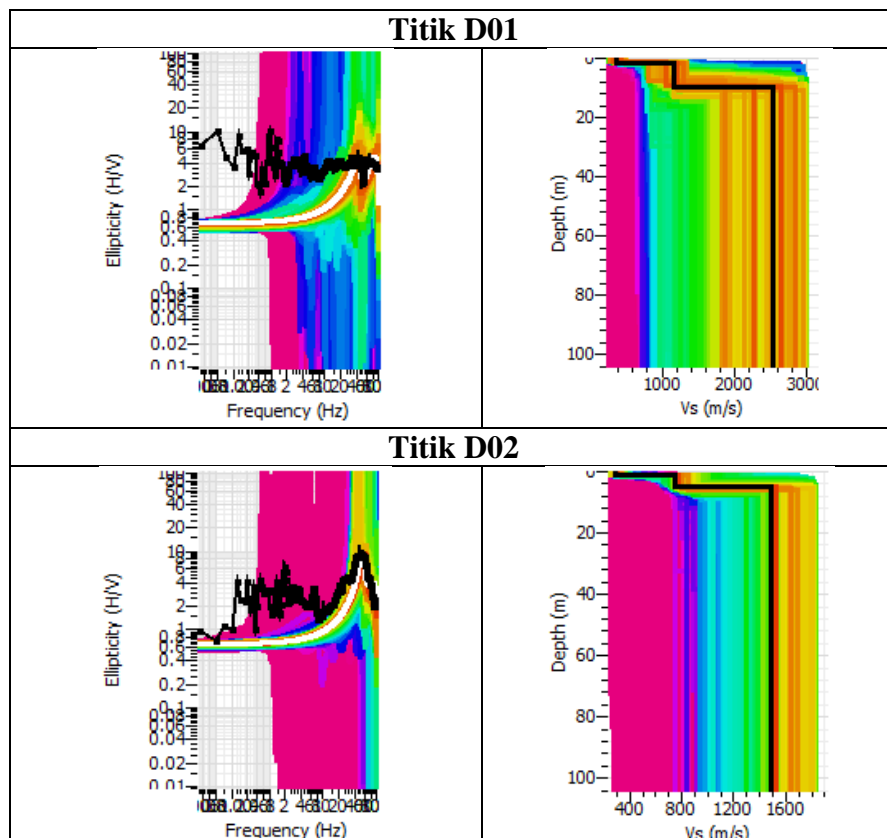
| TitikD27 | |
|---|--|
|  | $f_g = 1,7$ $A_g = 4,302$ Kriteria Reliable i) $1,7 > 0,5$ ii) $408 > 200$ iii) $0,6 < 2,0$ Kriteria Clear Peak i) $2,434 > 2,151$ ii) $2,095 > 2,151$ iii) $4,302 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,07 < 0,42$ vi) $0,6 < 3,0$ |
| Titik D29 | |
|  | $f_g = 8,5$ $A_g = 6,56$ Kriteria Reliable i) $8,5 > 0,5$ ii) $2040 > 200$ iii) $15,5 > 2,0$ Kriteria Clear Peak i) $1,899 < 3,28$ ii) $16,081 > 23,28$ iii) $6,56 > 2$ iv) - v) $0,25 < 2,12$ vi) $10,9 > 3,0$ |
| Titik D29S | |
|  | $f_g = 0,85$ $A_g = 10,86$ Kriteria Reliable i) $0,85 > 0,5$ ii) $204 > 200$ iii) $2,7 < 2,0$ Kriteria Clear Peak i) $6,002 > 5,43$ ii) $2,535 < 5,43$ iii) $10,86 > 2,0$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,05 < 0,21$ vi) $2,7 > 3,0$ |

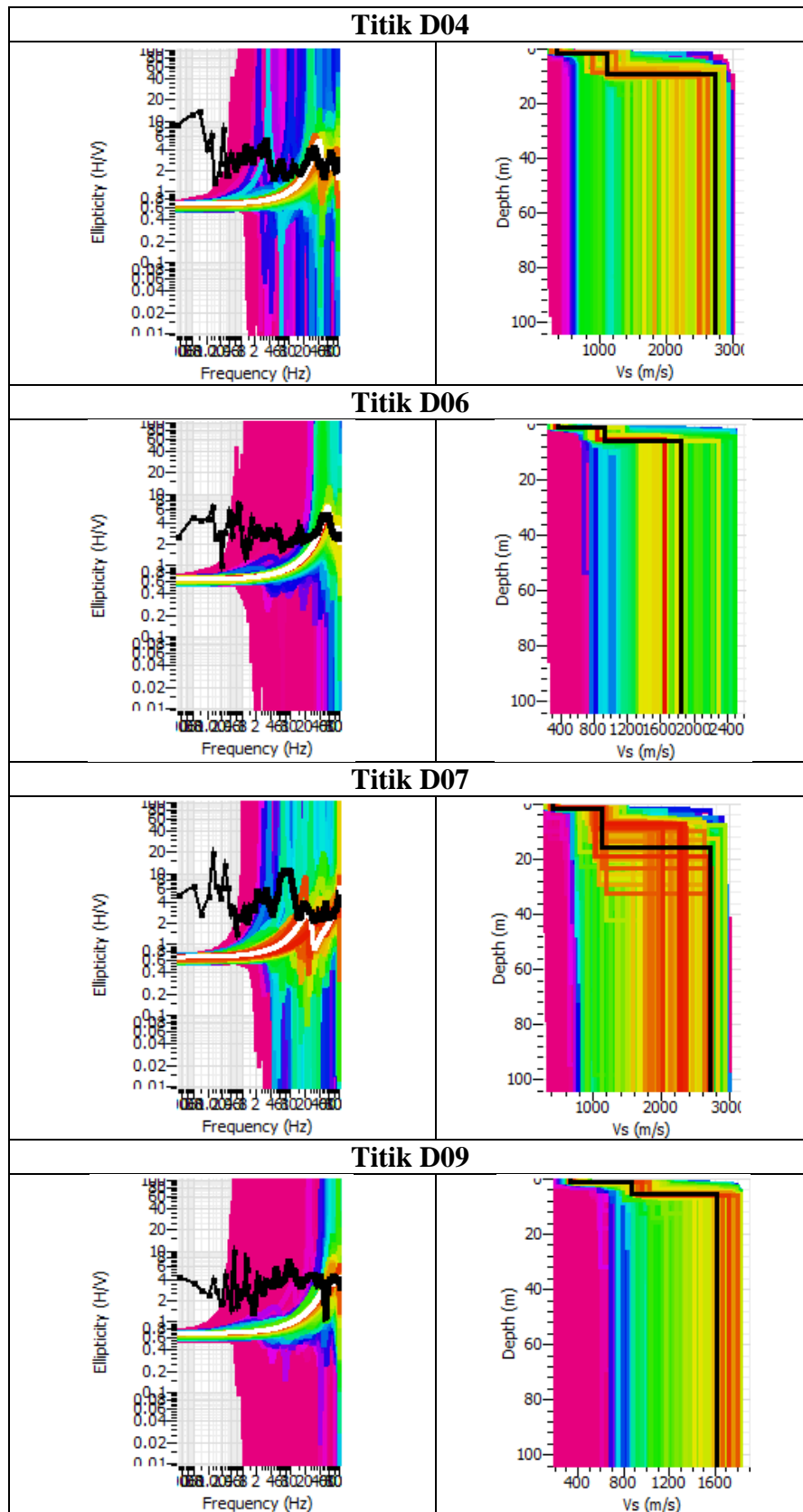
| Titik D31 | |
|---|--|
|  | $f_g = 0,95$ $A_g = 12,1$ Kriteria <i>Reliable</i> i) $0,95 > 0,5$ ii) $209 > 200$ iii) $2,6 > 2,0$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i) $4,453 < 6,05$ ii) $2,363 < 6,05$ iii) $12,1 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,28 < 0,23$ vi) $2,6 < 3,0$ |
| Titik D34 | |
|  | $f_g = 2,15$ $A_g = 4,554$ Kriteria <i>Reliable</i> i) $2,15 > 0,5$ ii) $559 > 200$ iii) $0,6 < 2,0$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i) $3,015 > 2,277$ ii) $2,697 > 2,277$ iii) $4,554 > 2,0$ iv) Terpenuhi v) $0,09 < 0,53$ vi) $0,6 < 3,0$ |
| Titik D36 | |
|  | $f_g = 0,95$ $A_g = 27,25$ Kriteria <i>Reliable</i> i) $0,95 > 0,5$ ii) $209 > 200$ iii) $7,9 > 2,0$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i) $7,975 < 13,625$ ii) $3,879 < 13,625$ iii) $27,25 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,05 < 0,23$ vi) $7,9 > 3,0$ |

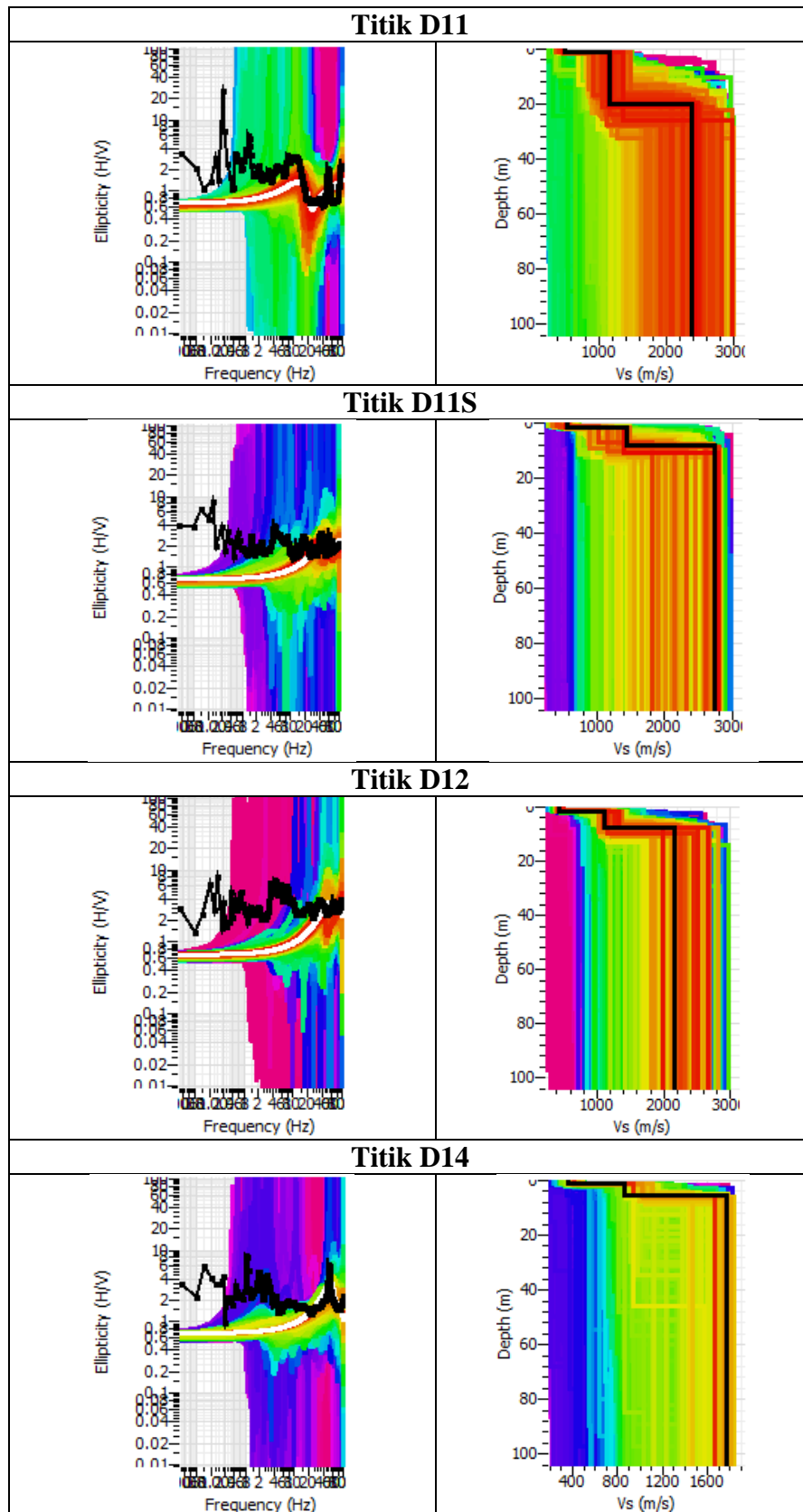
| Titik D37 | |
|---|---|
|  | $f_g = 10,25$ $A_g = 3,05$ Kriteria Reliable i) $10,25 > 0,5$ ii) $2665 > 200$ iii) $0,2 < 2,0$ Kriteria Clear Peak i) $2,325 > 1,525$ ii) $2,503 > 1,525$ iii) $3,05 > 2$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,33 < 2,56$ vi) $0,2 < 3,0$ |
| Titik D39 | |
|  | $f_g = 0,7$ $A_g = 2,85$ Kriteria Reliable i) $0,7 > 0,5$ ii) $210 > 200$ iii) $0,6 < 2,0$ Kriteria Clear Peak i) $3,036 > 1,425$ ii) $2,017 > 1,425$ iii) $2,85 > 2$ iv) Terpenuhi v) $0,05 < 0,17$ vi) $0,6 < 3,0$ |
| Titik Dsesar | |
|  | $f_g = 3,8$ $A_g = 2,919$ Kriteria Reliable i) $3,8 > 0,5$ ii) $988 > 200$ iii) $0,5 < 2,0$ Kriteria Clear Peak i) $2,933 > 1,459$ ii) $3,012 > 1,459$ iii) $0,5 > 2$ iv) Tidak Terpenuhi v) $0,13 < 0,95$ vi) $0,5 < 3,0$ |

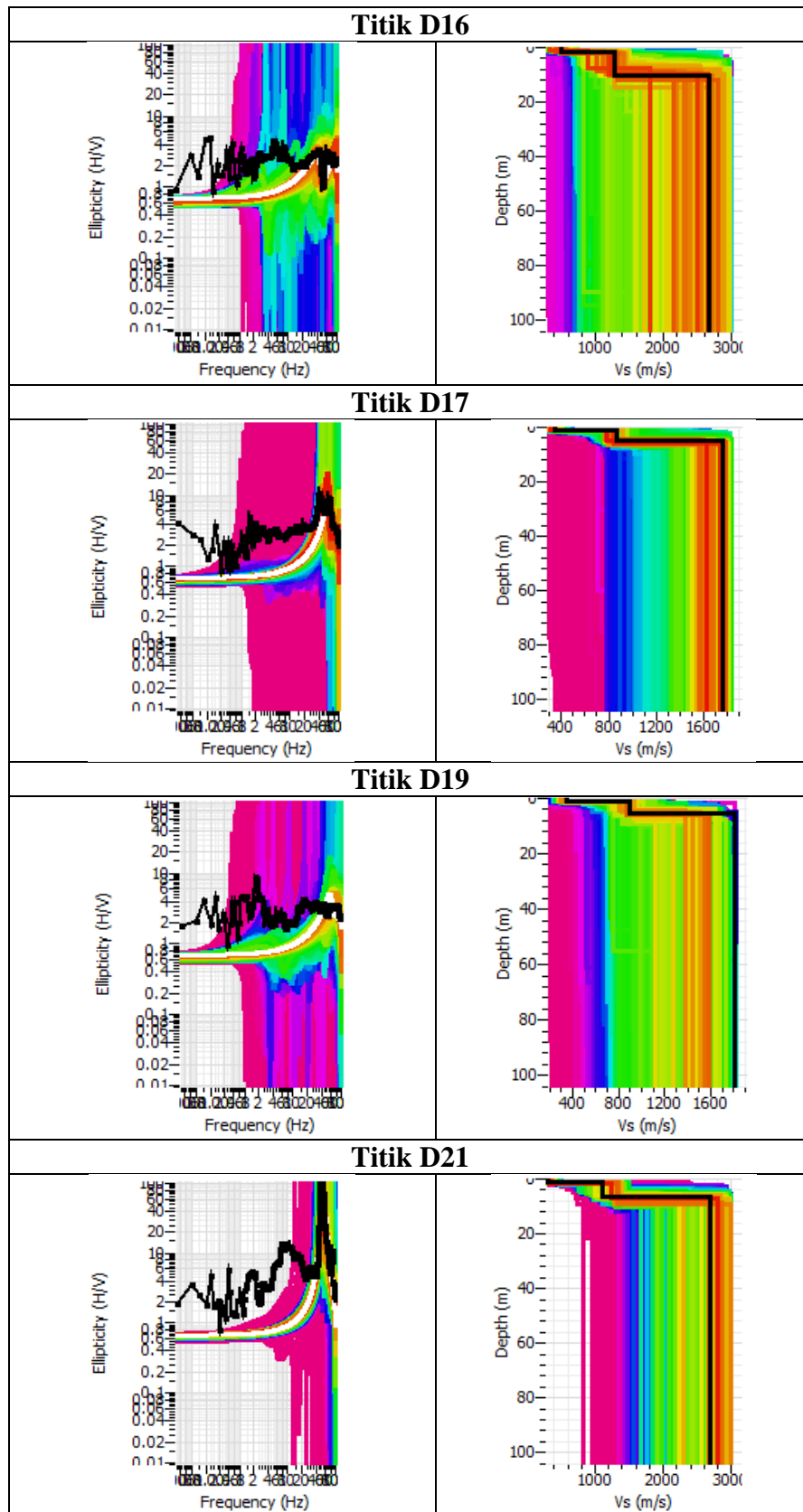


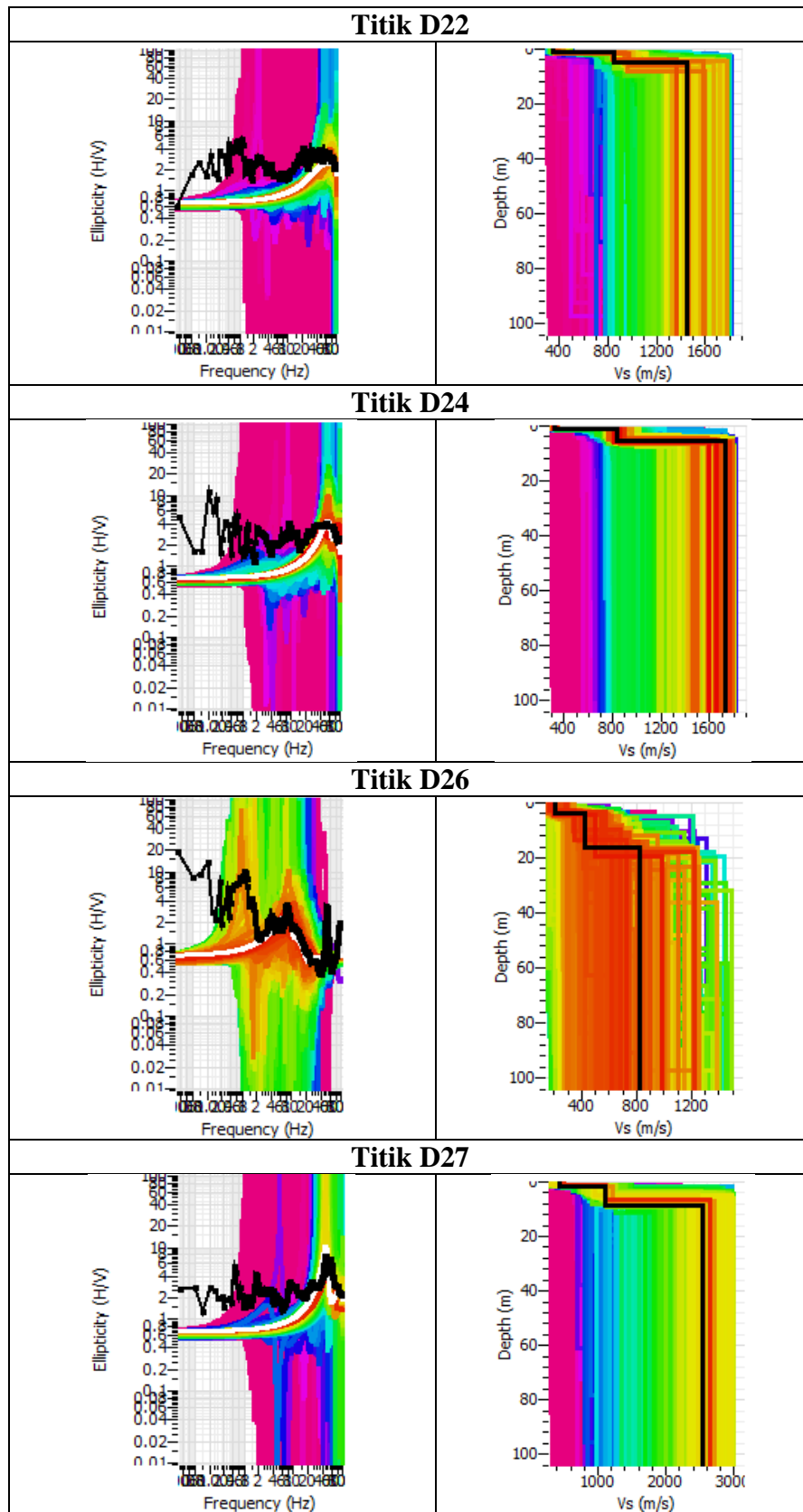
A. Ellipticity Curve dan Ground Profiles Kecepatan Gelombang S (V_s)

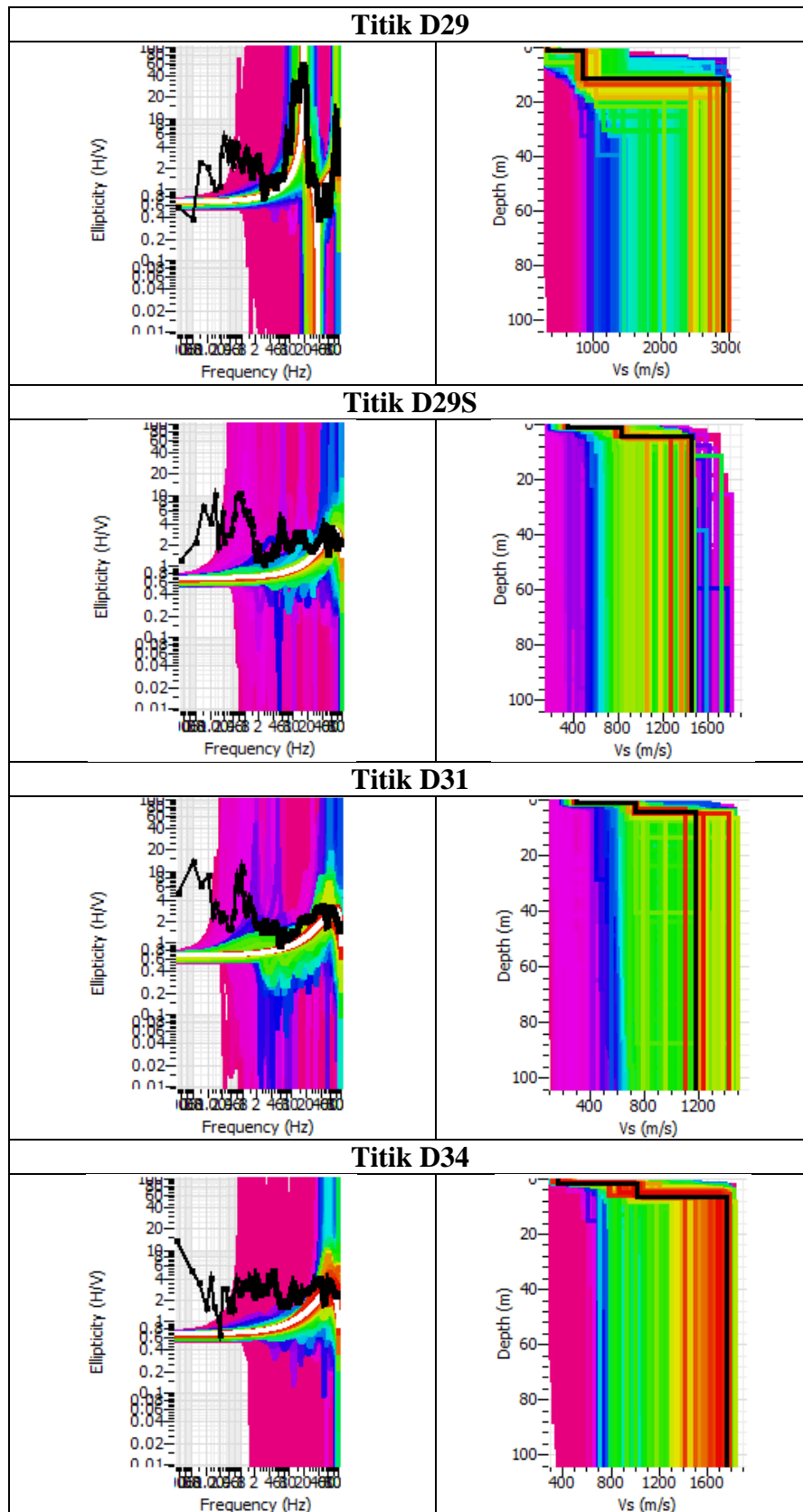


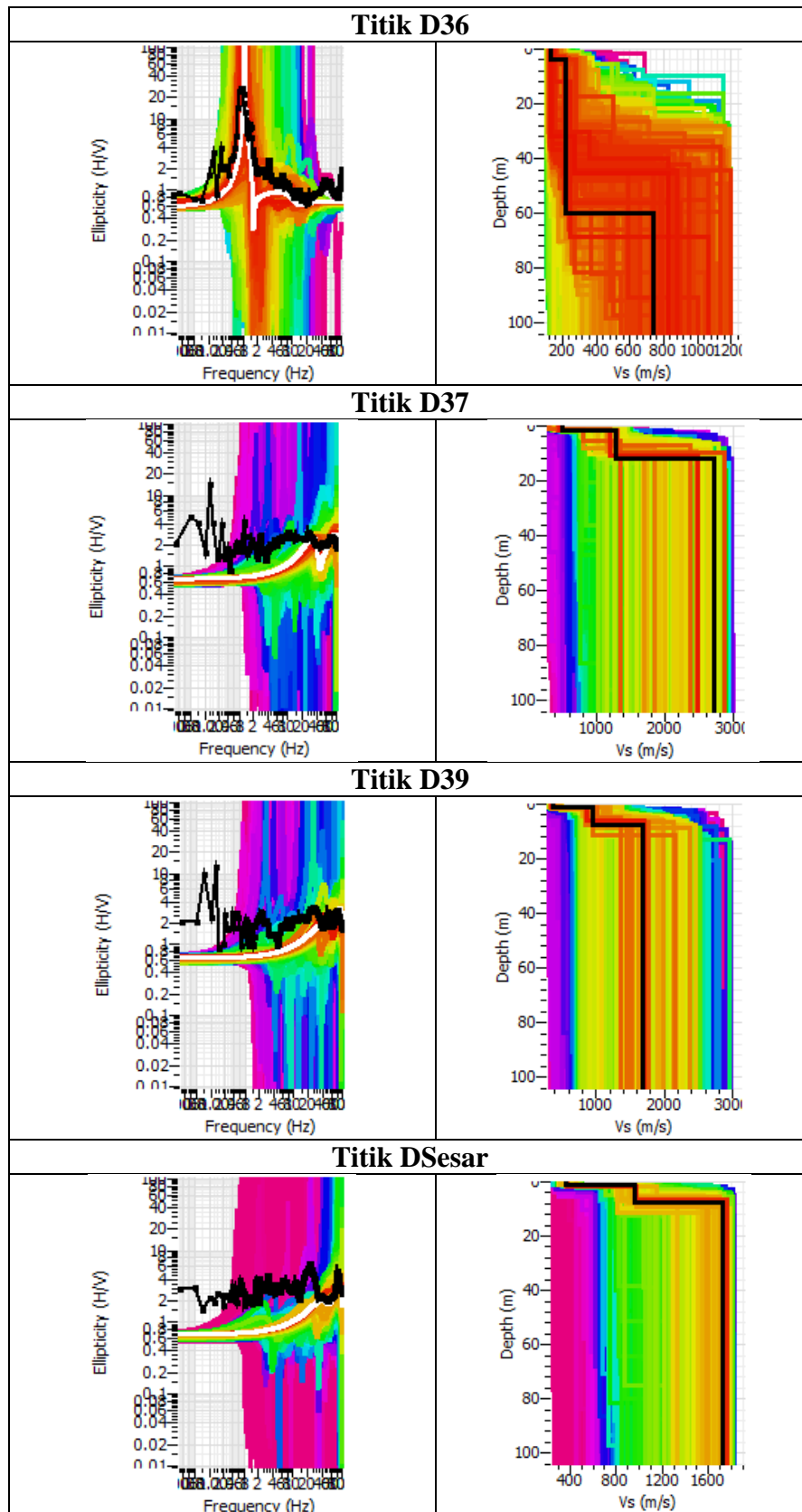


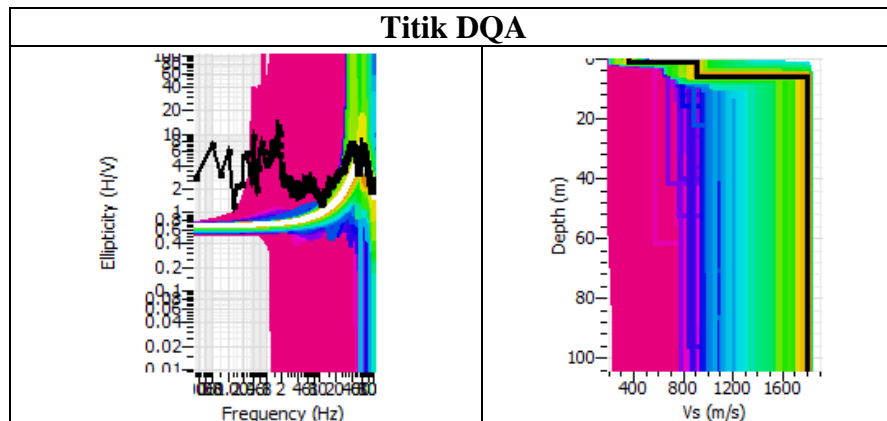




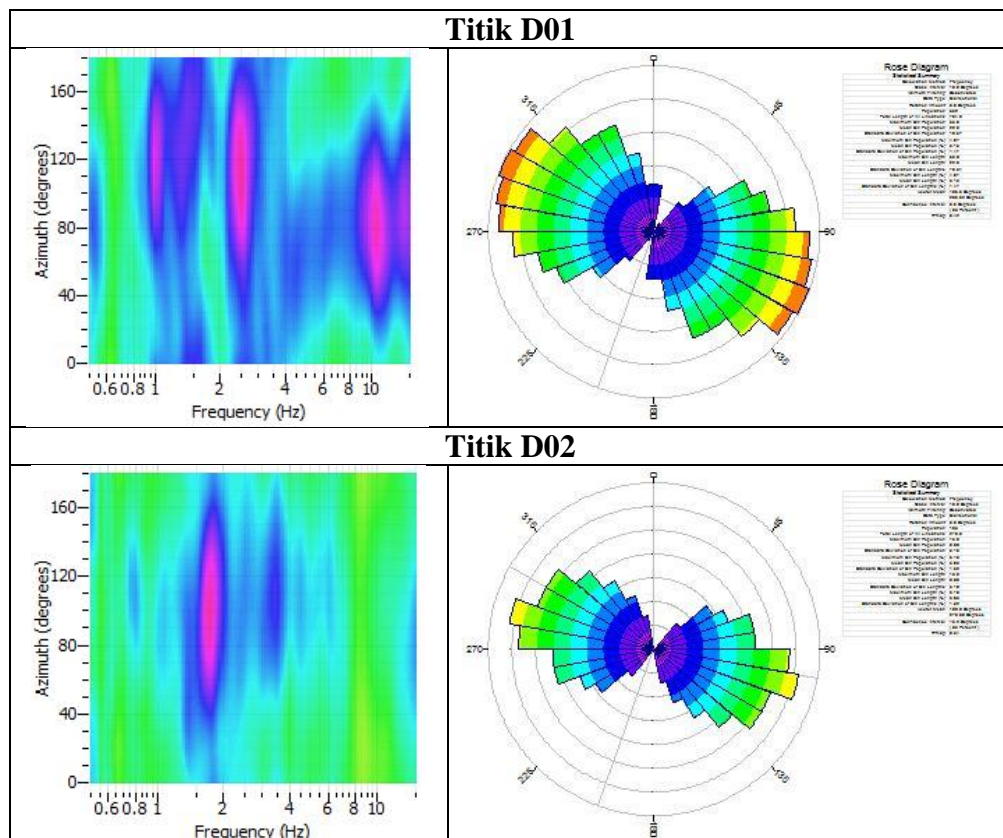




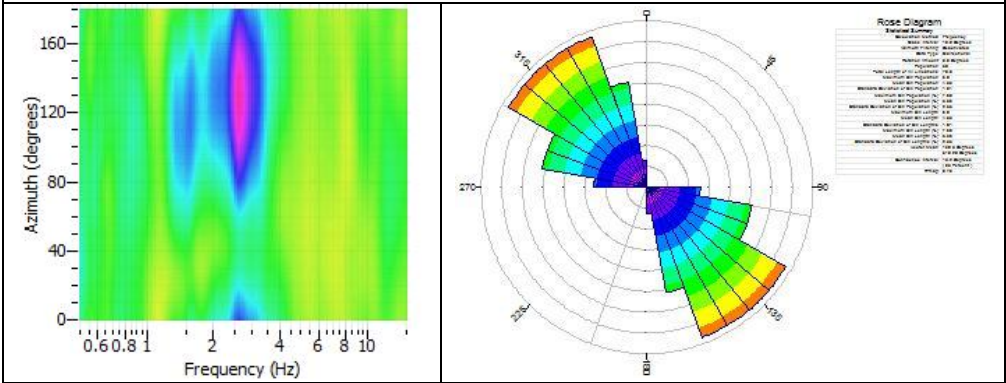




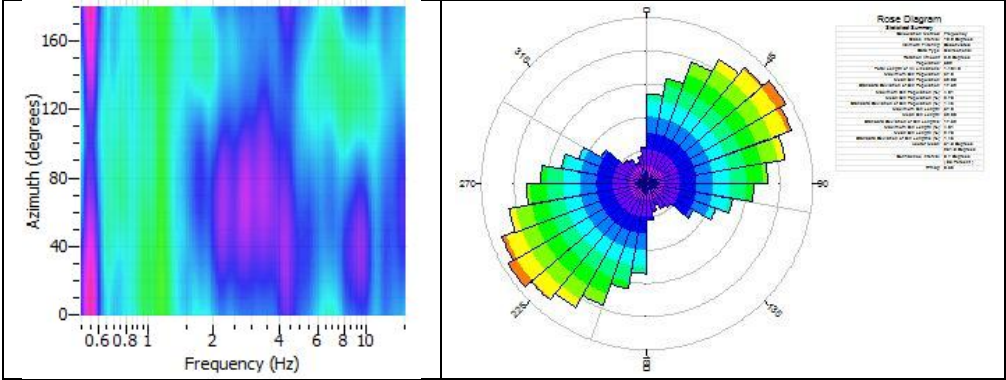
A. Spektrum H/V dan *Rose Diagram*



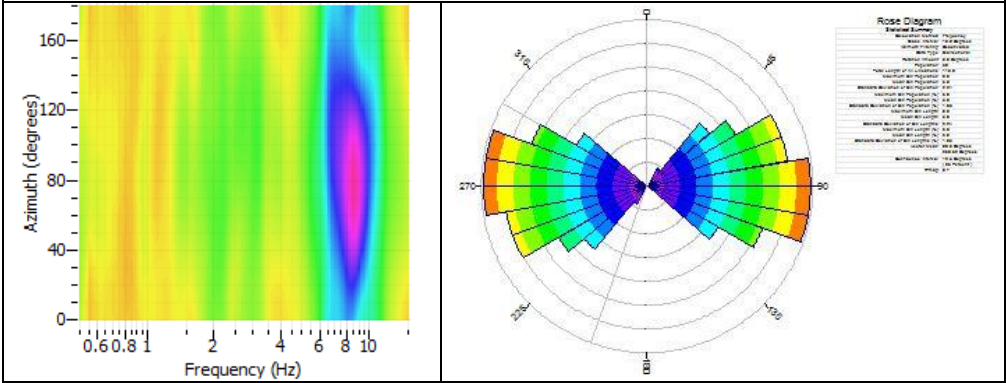
Titik D04



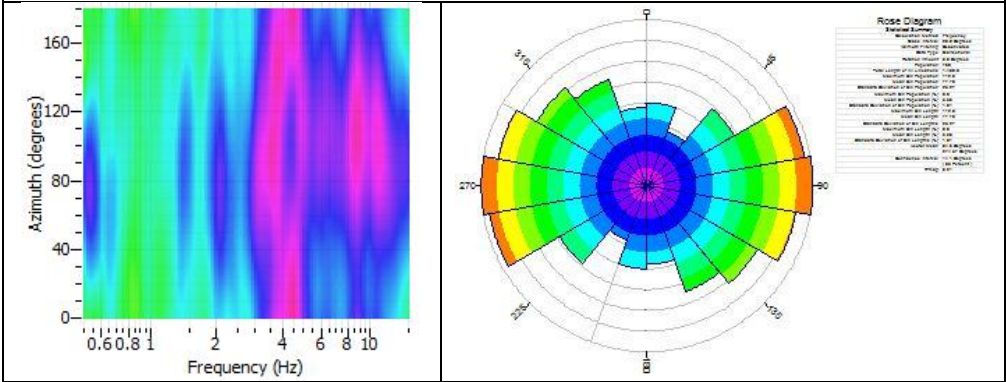
| |
|-----------|
| Titik D06 |
|-----------|

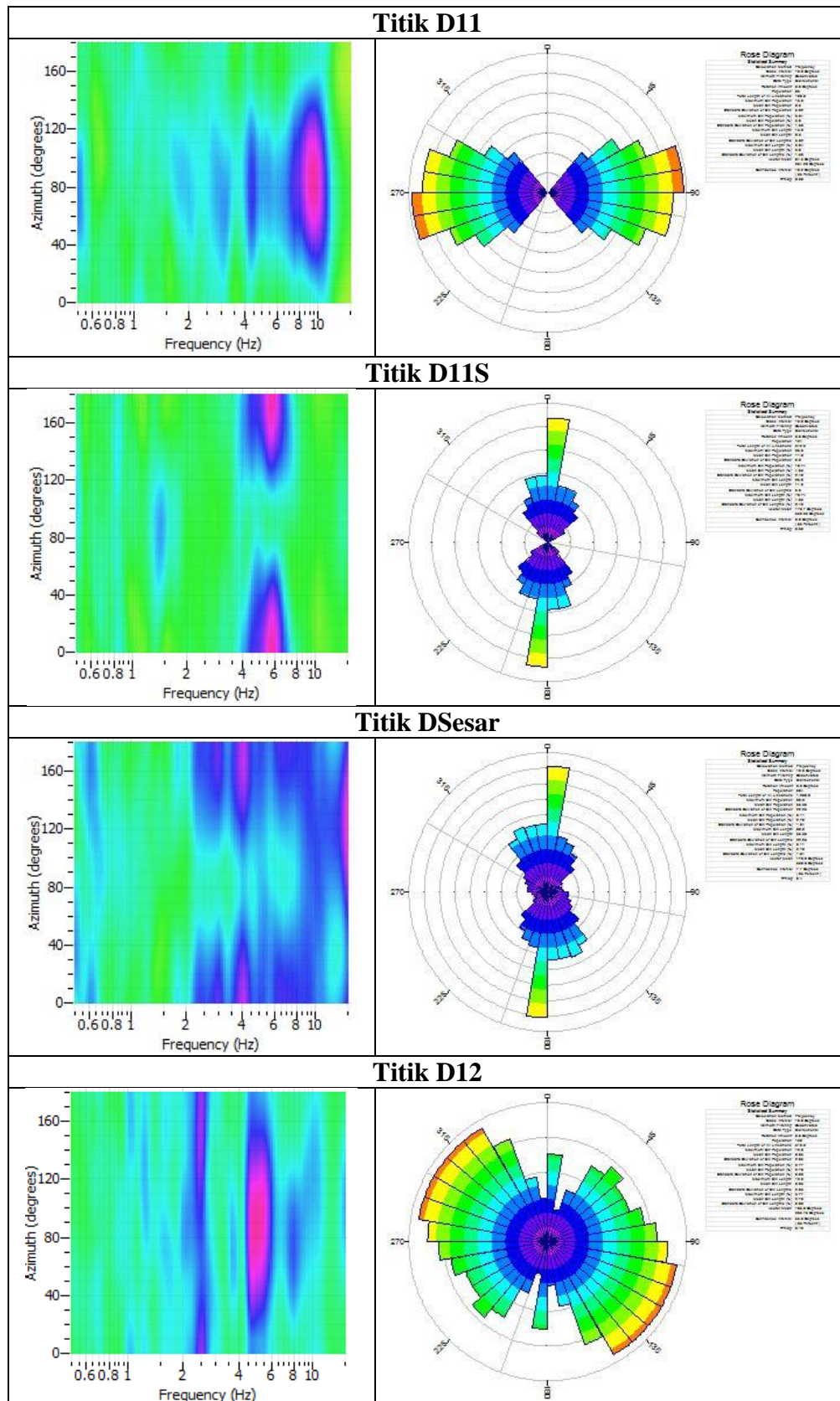


Titik D07



| |
|-----------|
| Titik D09 |
|-----------|





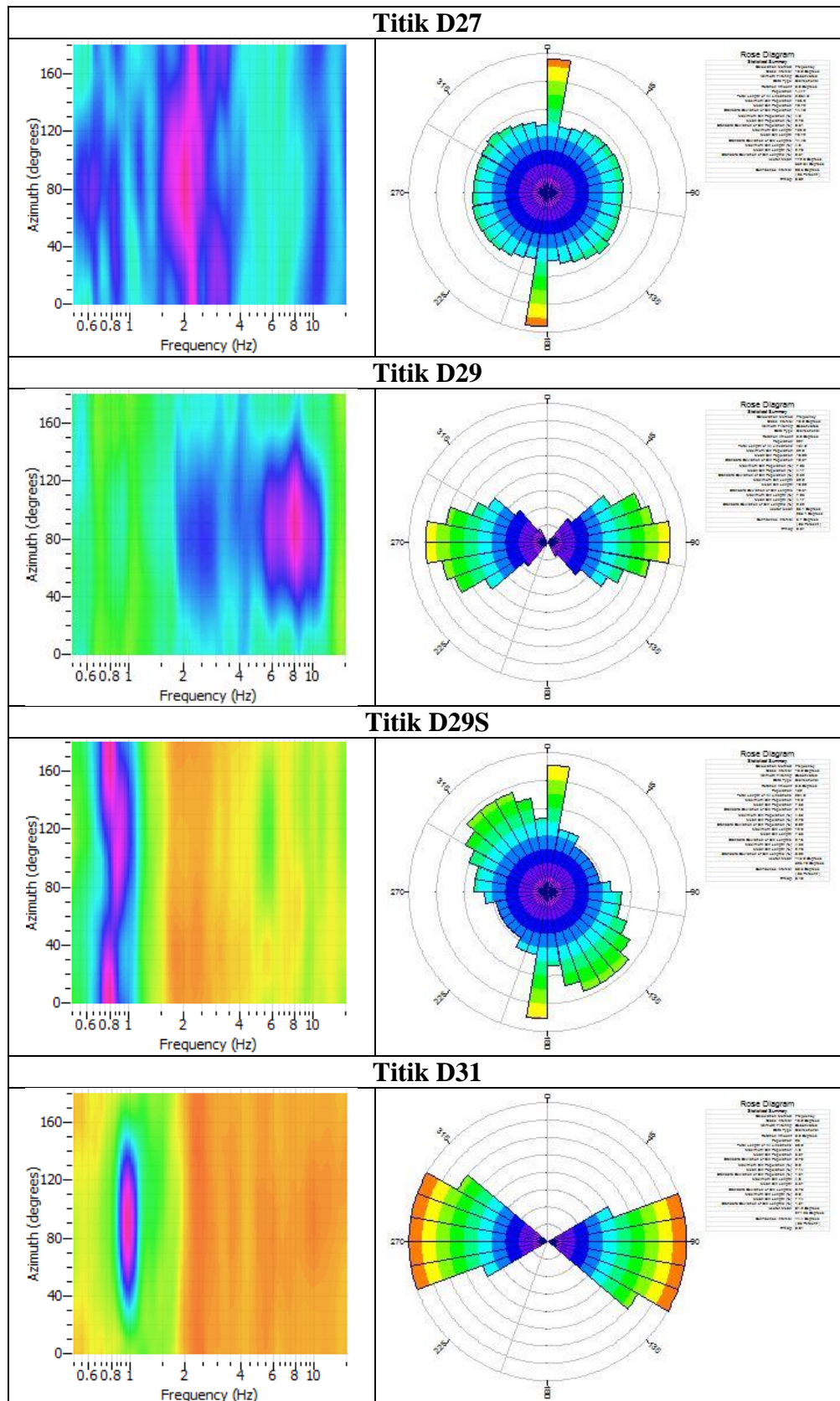


Figure 1: Spectrogram and Rose Diagram for Titik D34

The figure consists of two panels. The left panel is a spectrogram showing Azimuth (degrees) on the y-axis (0 to 160) and Frequency (Hz) on the x-axis (0.6 to 10). The right panel is a Rose Diagram showing the distribution of azimuth angles across frequency bands. The Rose Diagram includes a legend for 'Rose Diagram' and 'Statistical Summary'.

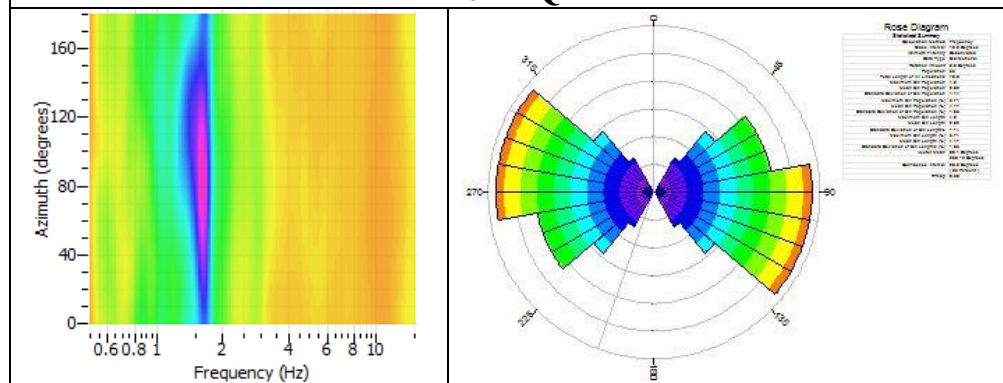
Statistical Summary:

| Statistical Summary | Value |
|---------------------|----------------------|
| Maximum Azimuth | 160 degrees |
| Minimum Azimuth | 0 degrees |
| Azimuth Range | 160 degrees |
| Azimuth Mean | 80 degrees |
| Azimuth Std Dev | 40 degrees |
| Azimuth Variance | 1600 degrees squared |
| Azimuth Skewness | 0.000000 |
| Azimuth Kurtosis | 0.000000 |
| Azimuth Max | 160 degrees |
| Azimuth Min | 0 degrees |
| Azimuth Avg | 80 degrees |
| Azimuth Std | 40 degrees |
| Azimuth Var | 1600 degrees squared |
| Azimuth Skew | 0.000000 |
| Azimuth Kurt | 0.000000 |
| Azimuth Max | 160 degrees |
| Azimuth Min | 0 degrees |
| Azimuth Avg | 80 degrees |
| Azimuth Std | 40 degrees |
| Azimuth Var | 1600 degrees squared |
| Azimuth Skew | 0.000000 |
| Azimuth Kurt | 0.000000 |

The figure consists of two plots. The left plot is a heatmap showing the frequency dependence of the azimuthal angle. The x-axis is Frequency (Hz) on a logarithmic scale from 0.6 to 10. The y-axis is Azimuth (degrees) from 0 to 160. The color scale ranges from 0.6 (blue) to 1.0 (red). A prominent vertical band of high values (red/orange) is centered around 0.8 Hz, with a slight dip around 1.2 Hz. The right plot is a Rose Diagram showing the distribution of azimuthal angles across frequency bands. The x-axis is Frequency (Hz) on a logarithmic scale from 0.6 to 10. The y-axis is Azimuth (degrees) from 0 to 160. The color scale ranges from 0.6 (blue) to 1.0 (red). The diagram shows two main lobes of high values (red/orange) centered around 0.8 Hz and 1.2 Hz, with a dip around 1.2 Hz. The right plot also includes a table of data for the Rose Diagram.

The figure consists of two plots. The left plot is a 2D color map showing the azimuthal angle (in degrees) as a function of frequency (in Hz) and another parameter (likely time or position, though not explicitly labeled). The x-axis is labeled 'Frequency (Hz)' and ranges from 0.6 to 10. The y-axis is labeled 'Azimuth (degrees)' and ranges from 0 to 160. The color map shows a complex, wavy pattern of colors (blue, green, yellow, orange, red, purple) representing different azimuthal angles. The right plot is a Rose Diagram (polar plot) showing the distribution of azimuthal angles across frequencies. The radial axis represents the frequency (0.6 to 10 Hz), and the angular axis represents the azimuthal angle (0 to 360 degrees). The color map in the Rose Diagram corresponds to the same color scale as the left plot. A legend on the right side of the Rose Diagram provides a color-coded key for the azimuthal angle values, ranging from 0 to 360 degrees.

Titik DQA



PETA GEOLOGI REGIONAL PACITAN



LAMPIRAN 5

CHECKLIST PENGAMBILAN DATA

| SESAME H/V User Guidelines | | | | | | | | | | 20/03/15 | | MEASUREMENT FIELD SHEET | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|-----------------------|--|--------------------|--|------------|--|-----------------------------------|--|--|--|--|--|-----------------------|--|--------------------|--|-------|--|------------|--|----------|--|
| DATE | | HOUR | | PLACE | | | | | | | | DATE | | HOUR | | PLACE | | | | | | | | | | | |
| OPERATOR | | | | GPS TYPE and # | | | | | | | | OPERATOR | | | | GPS TYPE and # | | | | | | | | | | | |
| LATITUDE | | LONGITUDE | | | | ALTITUDE | | | | | | | | LATITUDE | | LONGITUDE | | | | ALTITUDE | | | | | | | |
| STATION TYPE | | SENSOR TYPE | | | | | | | | | | | | STATION TYPE | | SENSOR TYPE | | | | | | | | | | | |
| STATION # | | SENSOR # | | | | DISK # | | | | | | | | STATION # | | SENSOR # | | | | DISK # | | | | | | | |
| FILE NAME | | | | POINT # | | | | | | | | FILE NAME | | | | POINT # | | | | | | | | | | | |
| GAIN | | SAMPL. FREQ. | | Hz | | REC. DURATION | | minutes seconds | | | | GAIN | | SAMPL. FREQ. | | Hz | | REC. DURATION | | minutes seconds | | | | | | | |
| WEATHER | | WIND | | <input type="checkbox"/> none <input type="checkbox"/> weak (5m/s) <input type="checkbox"/> medium <input type="checkbox"/> strong | | Measurement (if any): | | | | | | WEATHER | | WIND | | <input type="checkbox"/> none <input type="checkbox"/> weak (5m/s) <input type="checkbox"/> medium <input type="checkbox"/> strong | | Measurement (if any): | | | | | | | | | |
| CONDITIONS | | RAIN | | <input type="checkbox"/> none <input type="checkbox"/> weak <input type="checkbox"/> medium <input type="checkbox"/> strong | | Measurement (if any): | | | | | | CONDITIONS | | RAIN | | <input type="checkbox"/> none <input type="checkbox"/> weak <input type="checkbox"/> medium <input type="checkbox"/> strong | | Measurement (if any): | | | | | | | | | |
| | | Temperature (approx): | | | | Remarks: | | | | | | | | Temperature (approx): | | | | Remarks: | | | | | | | | | |
| GROUND | | <input type="checkbox"/> earth (Chalk) <input type="checkbox"/> dirt | | <input type="checkbox"/> gravel <input type="checkbox"/> sand <input type="checkbox"/> rock <input type="checkbox"/> grass = (Chalk) <input type="checkbox"/> dirt | | | | | | | | GROUND | | <input type="checkbox"/> earth (Chalk) <input type="checkbox"/> dirt | | <input type="checkbox"/> gravel <input type="checkbox"/> sand <input type="checkbox"/> rock <input type="checkbox"/> grass = (Chalk) <input type="checkbox"/> dirt | | | | | | | | | | | |
| TYPE | | <input type="checkbox"/> asphalt <input type="checkbox"/> cement <input type="checkbox"/> concrete <input type="checkbox"/> paved <input type="checkbox"/> other | | | | | | | | | | TYPE | | <input type="checkbox"/> asphalt <input type="checkbox"/> cement <input type="checkbox"/> concrete <input type="checkbox"/> paved <input type="checkbox"/> other | | | | | | | | | | | | | |
| | | <input type="checkbox"/> dry soil <input type="checkbox"/> wet soil | | Remarks: | | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> dry soil <input type="checkbox"/> wet soil | | Remarks: | | | | | | | | | | | |
| ARTIFICIAL GROUND-SENSOR COUPLING | | <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes, type | | | | | | | | | | ARTIFICIAL GROUND-SENSOR COUPLING | | <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes, type | | | | | | | | | | | | | |
| BUILDING DENSITY | | <input type="checkbox"/> none <input type="checkbox"/> scattered <input type="checkbox"/> dense <input type="checkbox"/> other, type | | | | | | | | | | BUILDING DENSITY | | <input type="checkbox"/> none <input type="checkbox"/> scattered <input type="checkbox"/> dense <input type="checkbox"/> other, type | | | | | | | | | | | | | |
| TRANSECTS | | car | | bicy | | motor | | heavy | | very heavy | | distance | | TRANSECTS | | car | | bicy | | motor | | heavy | | very heavy | | distance | |
| cars | | | | | | | | | | | | | | cars | | | | | | | | | | | | | |
| trucks | | | | | | | | | | | | | | trucks | | | | | | | | | | | | | |
| pedestrians | | | | | | | | | | | | | | pedestrians | | | | | | | | | | | | | |
| other | | | | | | | | | | | | | | other | | | | | | | | | | | | | |
| MONOCHROMATIC NOISE SOURCES (factories, works, pumps, trees, ...) | | <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes, type | | | | | | | | | | | | MONOCHROMATIC NOISE SOURCES (factories, works, pumps, trees, ...) | | <input type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes, type | | | | | | | | | | | |
| NEARBY STRUCTURES (towers, poles, buildings, bridges, underground structures, ...) | | | | | | | | | | | | | | NEARBY STRUCTURES (towers, poles, buildings, bridges, underground structures, ...) | | | | | | | | | | | | | |
| OBSERVATIONS | | | | | | | | | | | | | | OBSERVATIONS | | | | | | | | | | | | | |
| FREQUENCY: (if measured in the field) | | | | | | | | | | | | | | FREQUENCY: (if measured in the field) | | | | | | | | | | | | | |

LAMPIRAN 6
DOKUMENTASI LAPANGAN

