

**ANALISIS LITOLOGI BAWAH PERMUKAAN BERDASARKAN
GROUND PROFILES KECEPATAN GELOMBANG GESEN DENGAN
METODE ELLIPTICITY CURVE DI KECAMATAN PRAMBANAN DAN
KECAMATAN GANTIWARNO KABUPATEN KLATEN**

SKRIPSI

**Diajukan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan Guna Memperoleh Gelar Sarjana
Sains**



**Oleh :
SITI PATIMAH
NIM. 13306141016**

**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
2017**

PERSETUJUAN

Skripsi yang berjudul “**ANALISIS LITOLOGI BAWAH PERMUKAAN BERDASARKAN GROUND PROFILES KECEPATAN GELOMBANG GESER DENGAN METODE ELLIPTICITY CURVE DI KECAMATAN PRAMBANAN DAN KECAMATAN GANTIWARNO KABUPATEN KLATEN**” yang disusun oleh Siti Patimah, NIM 13306141016 ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diujikan.



Nugroho Budi Wibowo, M.Si
NIP. 19840223 200801 1 011

Denny Darmawan, M.Sc.
NIP. 19791202 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir Skripsi

**ANALISIS LITOLOGI BAWAH PERMUKAAN BERDASARKAN
GROUND PROFILES KECEPATAN GELOMBANG GESER DENGAN
METODE ELLIPTICITY CURVE DI KECAMATAN PRAMBANAN DAN
KECAMATAN GANTIWARNO KABUPATEN KLATEN**

Disusun oleh:

Siti Patimah

NIM 13306141016

Telah di pertahankan di depan Tim Penguji Tugas Akhir Skripsi Program Studi
Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri

Yogyakarta pada 26 Oktober 2017

Nama	Tanda Tangan	Tanggal	21 - 11 - 2017	
Ketua Penguji/Pembimbing I				
<u>Denny Darmawan, M.Sc.</u>	16 - 11 - 2017			
Sekretaris/Pembimbing II				
<u>Dr. Restu Widiatmono, M.Si.</u>	16 - 11 - 2017			
Penguji				

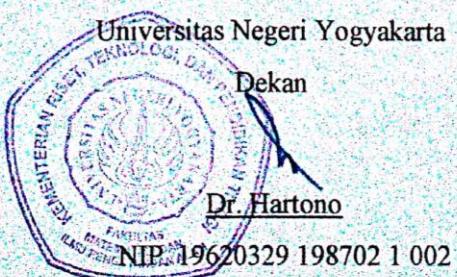
Yogyakarta, 22 November 2017

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Dekan

Dr. Hartono



SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Siti Patimah

NIM : 13306141016

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Judul Skripsi : Analisis Litologi Bawah Permukaan Berdasarkan *Ground Profiles* Kecepatan Gelombang Geser dengan Metode *Ellipticity Curve* Di Kecamatan Prambanan Dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten

Menyatakan bahwa karya tulis ini merupakan hasil 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 saya tidak benar, sepenuhnya merupakan tanggung jawab saya.

Yogyakarta, November 2017

Yang Menyatakan,

Siti Patimah
NIM 13306141016

MOTTO

Laa tahzan innallaha ma'anaa.

I am not failed, I just tried thousand executions that haven't succeeded yet.

**Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia
amat baik bagimu dan boleh jadi pula kamu
menyukai sesuatu, padahal ia amat buruk bagimu.
Allah mengetahui sedang kamu tidak mengetahui
(Al-Baqarah : 216)**

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya ini saya persembahkan untuk:

1. Bapakku (Maman Saepurahman) dan Umiku (Titin) yang tak henti-hentinya memberikan *support*, serta do'a yang tulus untuk mendoakan kesuksesanku di setiap doanya serta sebagai penyemangat hidup yang paling tulus.
2. Kakakku (Siti Aisyah) dan Adikku (Muhammad Arrasyidin Albar) yang sangat saya cintai, Terimakasih untuk do'a serta dukungan yang selalu tersalur bagai air yang tak pernah berhenti.
3. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta, sebagai guru dan tempat belajar saya selama 4 tahun ini.
4. Keluarga besar Program Studi Fisika angkatan 2013, khususnya keluarga Fisika B 2013 yang selalu menjadi pemacu semangat satu sama lain, serta semua bantuan yang tak bisa dihitung.
5. Seluruh Keluarga Mahasiswa FMIPA 2013 yang telah berjuang bersama-sama sampai sejauh ini.
6. Saya sendiri Siti Patimah Mahasiswi Program Studi Fisika tahun 2013 yang selalu berusaha kuat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb,

Segala puji kehadirat Allah SWT atas segala rahmat-Nya sehingga penulisan skripsi dengan judul “Analisis Litologi Bawah Permukaan berdasarkan *Ground Profiles* Kecepatan Gelombang Geser dengan metode *Ellipticity Curve* di Kecamatan Prambanan, dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten” ini dapat terselesaikan dengan baik

Penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya 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 penelitian ini sehingga penelitian dapat terlaksana.
3. Bapak Yusman Wiyatmo, M. Si selaku Ketua Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY yang telah membantu dalam hal administrasi skripsi ini.
4. Bapak Nur Kadarisman, M. Si selaku Ketua Program Studi Fisika UNY yang telah memberi izin dalam pelaksanaan skripsi ini.
5. Bapak Nugroho Budi Wibowo, M. Si., selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan dengan sabar, tekun,

dan selalu ikhlas meluangkan waktu di sela-sela kesibukan dan istirahat, sehingga skripsi ini bisa terselesaikan dengan baik.

6. Bapak Denny Darmawan, M.Sc., selaku dosen pembimbing II yang telah membimbing serta banyak memberi banyak saran, semangat, nasihat, dan ilmu yang banyak bagi penulis, terimakasih untuk semangatnya selalu.
7. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika yang telah mengizinkan melakukan penelitian ini.
8. Seluruh dosen, dan staff program studi fisika FMIPA UNY yang telah banyak membantu selama kuliah dan penelitian berlangsung.
9. Sahabat CII (Yulistiani, Adetia, Dea, Iin, dan Khariza) yang selalu ada.
10. Tim Srikandi Geofisika UNY 2013 (Zahroh Utami, Rini Anggita, Gina Adilla, Yulistiani, dan Khariza N.M) yang rela dan mau berjuang bersama hingga saat ini.
11. Geofisika UNY 2012 (Mbak Yustina, Mbak Umi, Mas Arif, Mbak Meita dkk) yang selalu membantu dan meluangkan waktu hingga skripsi ini bisa diselesaikan.
12. Adik-adikku Indri Liani, Riska Perdiana Wati, dan Melda Citra Dewi teruskan perjuangan kalian.
13. Riski, Bagas, Zainal, Bayu yang sudah membantu dalam pengambilan data terimakasih atas bantuan dan semangatnya.
14. Serta semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang telah banyak membantu dalam penyusunan tugas akhir ini, baik secara langsung maupun tak langsung.

Tak ada kata yang dapat penulisucapkan selain ucapan terima kasih banyak. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu kritik serta saran yang membangun sangat penulis harapkan dalam penyempurnaan tugas akhir ini, dan semoga bisa memberikan manfaat bagi masyarakat dan perkembangan ilmu pengetahuan.

Wassalamualaikum Wr. Wb,

Yogyakarta, ----- 2017

Penulis,

Siti Patimah

**ANALISIS LITOLOGI BAWAH PERMUKAAN BERDASARKAN
GROUND PROFILES KECEPATAN GELOMBANG GESER DENGAN
METODE *ELLIPTICITY CURVE* DI KECAMATAN PRAMBANAN DAN
KECAMATAN GANTIWARNO KABUPATEN KLATEN**

Oleh
SITI PATIMAH

13306141016

ABSTRAK

Penelitian tentang analisis litologi bawah permukaan telah dilakukan di wilayah Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno, Kabupaten Klaten. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai kecepatan gelombang geser dari pemodelan *ground profiles* menggunakan metode *ellipticity curve*, dan untuk menentukan litologi bawah permukaan.

Penelitian ini dilakukan di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten pada koordinat geografis $7^{\circ}42'43,392''$ LS – $7^{\circ}47'45,519''$ LS dan $110^{\circ}29' 21,450''$ BT – $110^{\circ}37'3,214''$ BT sebanyak 30 titik penelitian dengan jarak antar titik sejauh 2 km. Sinyal mikrotremor dianalisis menggunakan metode HVSR sehingga diperoleh data berupa frekuensi predominan dan faktor amplifikasi yang disajikan dalam bentuk kurva H/V. Data tersebut kemudian menjadi *input* pada metode *ellipticity curve* untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) hasil pemodelan *ground profiles*, dengan menggunakan beberapa parameter input sebagai *inisialisasi* harga awal seperti kecepatan gelombang S (V_s), kecepatan gelombang P (V_p), kerapatan batuan, dan *Poisson ratio*.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa litologi bawah permukaan di daerah penelitian terbagi menjadi tiga zona yang diklasifikasikan berdasarkan pada formasi di titik penelitian, zona I (Formasi Merapi Muda) sebanyak 23 titik pengukuran, zona II (Formasi Kebobutak) sebanyak 6 titik pengukuran, dan zona III (Formasi Semilir) sebanyak 1 titik pengukuran. Nilai V_s pada layer pertama di zona I bernilai antara 50,15 m/s hingga 274 m/s dan pada layer terakhir bernilai antara 414 m/s hingga 1657 m/s. Pada zona II nilai V_s pada layer pertama bernilai antara 50,75 m/s hingga 203,42 m/s dan layer terakhir bernilai antara 1035,36 m/s hingga 1555,08 m/s. Zona III memiliki nilai V_s sebesar 52,09 m/s dan layer terakhir memiliki nilai V_s sebesar 1744,5 m/s. Litologi daerah penelitian didominasi oleh abu dan *tuff* yang tebal pada zona Formasi Merapi Muda, konglomerat dan aglomerat pada zona Formasi Kebobutak, lempung, dasit dan andesit pada zona Formasi Semilir. Analisa litologi memperlihatkan bahwa Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno adalah wilayah yang mempunyai potensi bahaya kerusakan yang cukup parah, karena didominasi oleh tanah lunak yang cukup tebal.

Kata kunci: *ellipticity curve*, *ground profiles*, kecepatan gelombang geser, litologi bawah permukaan

**SUBSURFACE LITHOLOGY ANALYSIS BASED ON SHEAR WAVE
VELOCITY GROUND PROFILES USING ELLIPTICITY CURVE
METHOD IN PRAMBANAN AND GANTIWARNO SUBDISTRICT OF
KLATEN REGENCY**

By

SITI PATIMAH

13306141016

ABSTRACT

The research on subsurface lithology analysis of Prambanan and Gantiwarno Subdistrict at Klaten Regency has been conducted. The aims of this study were to determine the value of shear wave velocity from ground profiles modelling using ellipticity curve method and to determine the subsurface lithology of the research area.

The area of this research located at Prambanan and Gantiwarno Subdistrict in Klaten Regency at geographical coordinate $7^{\circ} 42'43.392\text{''}$ S - $7^{\circ} 47'45.519\text{''}$ S and $110^{\circ}29'21.450\text{''}$ E - $110^{\circ}37'3.214\text{''}$ E. Microtremor signals were recorded from 30 locations at the research site. Microtremor signals were analyzed using HVSR method, to get the predominant frequency and amplification from the H/V curve. The H/V curve data has been used as of the input for ellipticity curve method, and yield the shear wave velocity (V_s) from its ground profiles modelling using several initial value parameters i.e. S wave velocity (V_s), P wave velocity (V_p), density, and Poisson ratio.

The results showed that the surface lithology in the area were divided into three zones that can be classified based on its geological formation, as follows zone I (Merapi Muda Formation) consists of 23 measurement points, zone II (Kebobutak Formation) consists of 6 measurement points, and zone III (Semilir Formation) consists of 1 measurement point. The determined V_s value on the first layer in zone I are ranging from 50.15 m/s to 274 m/s, and from 414 m/s to 1657 m/s for the last layer. Zone II has V_s value on the first layer are ranging from 50.75 m/s to 203.42 m/s on the first layer and for the last layer are ranging 1035.36 m/s to 1555.08 m/s. Zone III has V_s value of 52.09 m/s and the last layer has V_s value of 1744.5 m/s. It can be concluded that the lithology of the research area were dominated by thick ash and tuff at the Merapi Muda formation zone, conglomerates and agglomerates at the Kebobutak formation zone, clay, dasit, and andesit at the Semilir formation zone. Based on the lithology of its constituents, Prambanan and Gantiwarno Subdistrict have a high damage risk possibility since they were dominated by thick layer of soft soil.

Keyword: ellipticity curve, ground profiles, shear wave velocity, subsurface lithology

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	x
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii

BAB I

PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah.....	7
C. Batasan Masalah	8
D. Rumusan Masalah	8
E. Tujuan Penelitian	9
F. Manfaat Penelitian	9

BAB II

DASAR TEORI.....	10
A. Gempa Bumi.....	10
1. Penyebab Terjadinya Gempa Bumi	10
2. Mekanisme Gempa Bumi	12
B. Gelombang Seismik.....	13
1. Gelombang Badan (<i>Body Wave</i>).....	17
2. Gelombang Permukaan (<i>Surface Wave</i>)	19

C. Mikrotremor.....	22
D. Metode HVSR dan <i>Ellipticity Curve</i>	25
E. Litologi.....	32
F. Kondisi Geologi Daerah Penelitian.....	35
G. Kerangka Berpikir	39
BAB III	
METODE PENELITIAN.....	41
A. Waktu dan Tempat Penelitian	41
B. Instrumen Penelitian	41
C. Teknik Pengambilan Data.....	46
D. Teknik Analisis Data	51
E. Diagram Alir penelitian	55
BAB IV	
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	56
A. Karakteristik dan Interpretasi Kurva H/V	56
1. <i>Clear Peak</i>	56
2. <i>Flat H/V curve</i>	57
3. <i>Unclear Low Frequency Peak</i>	58
B. <i>Ellipticity Curve</i>	59
C. <i>Ground Profiles Vs</i> dan Litologi Bawah Permukaan.	60
BAB V	
KESIMPULAN DAN SARAN	72
A. KESIMPULAN	72
B. Saran	73
DAFTAR PUSTAKA	74
LAMPIRAN.....	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Peta Geologi Kabupaten Klaten	1
Gambar 2. Lempeng Tektonik Dunia.....	11
Gambar 3. Ilustrasi Gerakan Lempeng Bumi	12
Gambar 4. Ilustrasi teori kekenyalan elastik	13
Gambar 5. Komponen Tegangan dan Analisis Tekanan Dua Dimensi	14
Gambar 6. Gelombang badan dan gelombang permukaan	17
Gambar 7. Gelombang P	18
Gambar 8.Gelombang S	19
Gambar 9. Gelombang <i>Rayleigh</i>	20
Gambar 10. Gelombang Love	21
Gambar 11. Contoh Sinyal Mikrotremor	23
Gambar 12. Peta Administrasi Kecamatan Prambanan	36
Gambar 13. Peta Administrasi Kecamatan Gantiwarno	37
Gambar 14. Skema Pengambilan Data.....	46
Gambar 15. Desain Survei Pengambilan Data.....	47
Gambar 16. Titik Pengukuran Sinyal Mikrotremor	48
Gambar 17. Kurva H/V sebagai fungsi frekuensi dan faktor amplifikasi.....	51
Gambar 18. <i>Ellipticity curve</i> dan <i>Ground profile Vs</i>	52
Gambar 19. Pemodelan <i>borehole multilog</i>	54
Gambar 20. Pemodelan litologi 3D.....	54
Gambar 21. Diagram Alir Penelitian	55
Gambar 22. Kurva H/V berbentuk <i>clear peak</i>	57
Gambar 23. Kurva H/V berbentuk <i>Flat H/V curve</i>	57
Gambar 24. Kurva H/V berbentuk <i>Unclear Low Frequency Peak</i>	58
Gambar 25. Kurva dari metode <i>ellipticity curve</i> pada titik 44	60
Gambar 26. <i>Ground Profiles Vs</i> dengan variasi lapisan.....	61
Gambar 27. <i>Multilog</i> 3D Zona I Formasi Merapi Muda bagian Utara	65
Gambar 28. <i>Multilog</i> 3D Zona I Formasi Merapi Muda bagian Selatan	65
Gambar 29. Tampilan <i>Multilog</i> 3D Zona II Formasi Kebobutak	66

Gambar 30. Tampilan <i>Multilog</i> 3D Zona III Formasi Semilir.....	67
Gambar 31. Pemodelan 3D orientasi hadap Utara, Selatan, Barat dan Timur...	68
Gambar 32. Model 3D berdasarkan klasifikasi jenis tanah menurut SNI.....	70
Gambar 33. Sayatan persebaran kecepatan gelombang geser.....	71

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Indeks Rawan Bencana Indonesia Provinsi Jawa Tengah	3
Tabel 2. Harga Poisson ratio dari batuan sedimen.....	31
Tabel 3. Nilai Variasi Densitas Batuan	32
Tabel 4. Tabel Klasifikasi Site Berdasarkan Nilai Vs Hasil Penyelidikan Tanah dan Laboratorium SNI 1726	34
Tabel 5. Data kecepatan gelombang primer pada beberapa medium.....	34
Tabel 6. Data nilai V_s pada beberapa jenis batuan.	34
Tabel 7. Persyaratan teknis survei mikrotremor di lapangan.	49
Tabel 8. Pengelompokan Titik Pengukuran berdasarkan Formasi Geologi	63
Tabel 9. Interpretasi nilai V_s pada Formasi Merapi Muda	64
Tabel 10. Interpretasi nilai V_s pada Formasi Kebobutak	64
Tabel 11. Interpretasi nilai V_s pada Formasi Semilir	60

DAFTAR LAMPIRAN

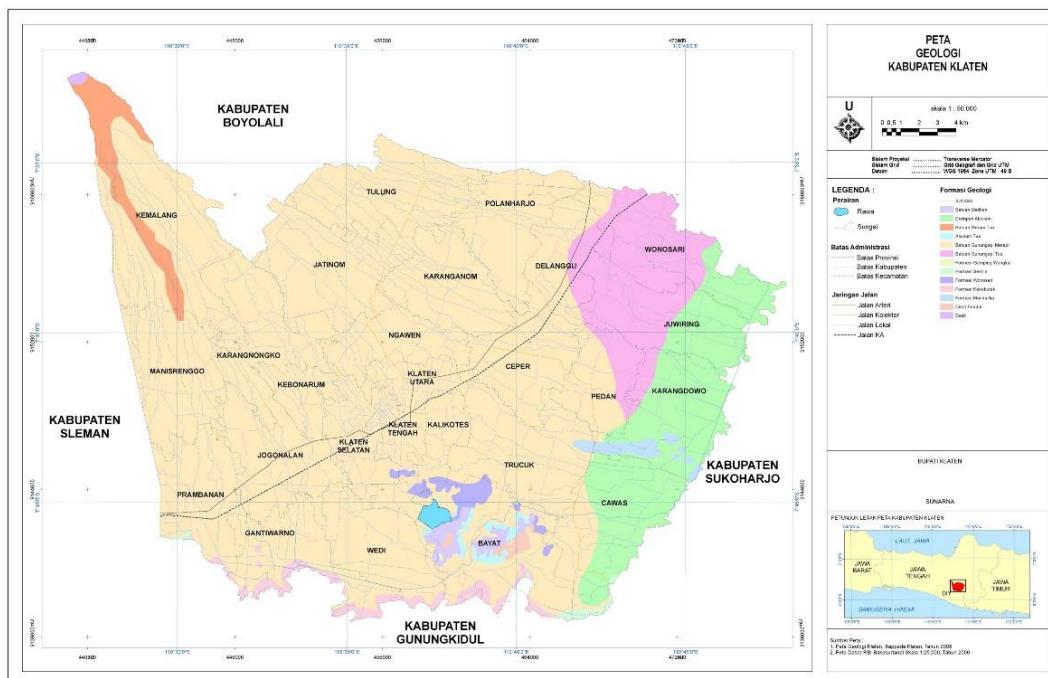
Lampiran 1. Kurva <i>ellipticity curve</i> dan model <i>ground profiles</i>	76
Lampiran 2. Kriteria Kurva H/V	86
Lampiran 3. Tahap-tahap pengolahan data	97
Lampiran 4. Pemodelan data log titik penelitian	115
Lampiran 5. Tabel pembacaan hasil nilai V_s , dan litologi dari hasil pemodelan <i>ground profiles</i>	130
Lampiran 6. Dokumentasi pengambilan data.....	136
Lampiran 7. Peta geologi daerah penelitian	137

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kabupaten Klaten merupakan bagian dari Provinsi Jawa Tengah yang letaknya berada di bagian selatan Provinsi Jawa Tengah. Secara geografis Kabupaten Klaten terletak antara $7^{\circ}42'43,392''$ LS – $7^{\circ}47'45,519''$ LS dan $110^{\circ}29'21,450''$ BT – $110^{\circ}37'3,214''$ BT dan memiliki ketinggian antara 100-400 m di atas permukaan laut. Kabupaten Klaten di sebelah utara berbatasan dengan Kabupaten Boyolali, dan dibatasi oleh Gunung Merapi yang terkadang menunjukkan aktivitas vulkaniknya, sedangkan di bagian selatan berbatasan dengan Kabupaten Gunung Kidul yang berada dekat dengan zona subduksi lempeng bumi.



Gambar 1. Peta Geologi Kabupaten Klaten (Pemkab Klaten, 2011)

Dilihat dari peta geologi (Gambar 1), Kabupaten Klaten merupakan daerah dengan kondisi geologi yang sebagian besar berupa batuan Gunung Merapi Muda atau disebut Formasi Merapi Muda, sedikit endapan alluvium, batuan Merapi Tua, dan sebagian kecil Formasi Wonosari, Formasi Semilir dan Formasi Kebobutak. Formasi Merapi Muda umumnya memiliki litologi penyusun berupa material hasil aktivitas Gunung Merapi Muda yaitu *tuff*, aglomerat, breksi serta leleran lava. Suatu wilayah yang memiliki kondisi geologi berupa *tuff* mempunyai potensi bahaya lebih besar terhadap efek getaran tanah akibat amplifikasi dan interaksi getaran tanahnya (Nakamura, 2000). Selain itu, Kabupaten Klaten berada dekat dengan jalur sesar aktif Opak yang berdasarkan peta geologi memanjang dari wilayah Bantul Yogyakarta hingga perbatasan Kecamatan Prambanan Kabupaten Sleman dengan Kecamatan Prambanan Kabupaten Klaten, sehingga besar kemungkinan wilayah ini dapat terkena dampak gempa bumi yang diakibatkan oleh sesar aktif tersebut (Raharjo, 1995).

Data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (2013) dalam Indeks Rawan Bencana menyatakan bahwa Kabupaten Klaten berada pada peringkat 19 secara nasional dengan status kelas rawan yang tinggi. Data Indeks Rawan Bencana Indonesia (IRBI) Provinsi Jawa Tengah ditunjukkan pada Tabel 1. Dari tabel tersebut dapat ditunjukkan bahwa Kabupaten Klaten masuk ke dalam kelas daerah rawan bencana yang tinggi dengan wilayah yang berdekatan dengan wilayah DI Yogyakarta.

Tabel 1. Indeks Rawan Bencana Indonesia Provinsi Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta (BNPB, 2013)

No	Kabupaten	Skor	Kelas Rawan	Peringkat Nasional
1	Bantul	187	Tinggi	5
2	Gunung Kidul	158	Tinggi	8
3	Sleman	154	Tinggi	9
4	Blora	150	Tinggi	11
5	Temanggung	143	Tinggi	12
6	Wonogiri	126	Tinggi	15
7	Kota Yogyakarta	125	Tinggi	18
8	Klaten	123	Tinggi	19
9	Kota Magelang	108	Tinggi	21
10	Sukoharjo	93	Sedang	28

Gempa bumi adalah salah satu bencana yang sering terjadi di Indonesia.

Aktivitas gempa bumi yang tinggi di Indonesia khususnya Pulau Jawa terjadi karena tunjaman ke utara Lempeng Australia di bawah Lempeng Eurasia. Pertemuan antar lempeng tersebut mengakibatkan terbentuknya daerah penunjaman (subduksi) yang memiliki aktivitas seismik yang tinggi.

Salah satu contoh gempa bumi berkekuatan cukup besar adalah gempa bumi tanggal 27 Mei 2006 di Yogyakarta dan sekitarnya meliputi daerah Bantul, Kulonprogo, Gunung Kidul, Sleman, Solo, Karanganyar, Klaten, dan Prambanan, dengan episentrum gempa bumi berada sekitar 25 km di sebelah Tenggara Yogyakarta dengan kedalaman 17,1 km di bawah permukaan laut (Abidin dkk, 2009). Kabupaten Klaten khususnya Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno adalah dua dari 26 kecamatan di Kabupaten Klaten yang terkena

dampak cukup parah akibat bencana gempa bumi pada Mei 2006 silam, yaitu sebanyak 7292 rumah roboh dengan jumlah korban jiwa sebanyak 331 orang di Kecamatan Gantiwarno, dan sebanyak 4401 rumah roboh dengan jumlah korban jiwa sebanyak 196 orang di Kecamatan Prambanan. (BAPPEDA Kabupaten Klaten, 2006).

Tingkat kerusakan dan bahaya gempa bumi sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal atau efek tapak lokal, kasus fenomena tapak lokal yang pernah terjadi yaitu gempa bumi pada Mei 2006 silam di Daerah Istimewa Yogyakarta dengan magnitudo yang relatif kecil namun mengakibatkan lebih dari 6.000 orang meninggal dunia dan 1.000.000 orang kehilangan tempat tinggal (Sunardi, 2012). Suatu wilayah dengan kondisi geologi yang sama pun akan mempunyai respon yang berbeda terhadap efek getaran tanah tergantung pada sifat serta karakteristik penyusun litologi pada formasi tersebut fenomena ini disebut *site effect* atau *site amplification* (Novianita, 2009).

Daryono (2011) dalam penelitiannya tentang indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor di zona Graben Bantul menyatakan bahwa indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain material penyusun, ketebalan sedimen dan kedalaman muka air tanah. Material penyusun suatu wilayah sangat berkaitan dengan kondisi litologi suatu wilayah. Litologi merupakan sifat atau ciri dari bebatuan, yang terdiri dari struktur, warna, komposisi mineral, ukuran butir dan tata letak bahan-bahan pembentuknya. Kondisi litologi bawah permukaan yang lebih lunak cenderung akan memberikan respon periode getaran yang panjang (frekuensi rendah) dan mempunyai resiko yang lebih tinggi bila digoncang

gelombang gempa bumi karena akan mengalami penguatan yang lebih besar dibandingkan dengan batuan yang lebih kompak, oleh sebab itu litologi berupa batuan lunak akan memiliki nilai indeks kerentanan seismik yang lebih tinggi dibandingkan dengan litologi berupa batuan keras.

Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno bila dilihat dari kondisi geologi merupakan salah satu daerah yang rawan terhadap bencana, khususnya bencana gempa bumi, oleh karena itu diperlukan kajian yang berkaitan dengan upaya mitigasi bencana gempa bumi. Salah satu kajian yang bisa dilakukan yaitu dengan cara memetakan daerah yang memiliki potensi kerusakan yang cukup besar terhadap gempa bumi berdasarkan analisis kecepatan gelombang geser (V_s). Kecepatan gelombang geser (V_s) merupakan salah satu gelombang badan (*body wave*) yang arah simpangannya tegak lurus terhadap arah rambatnya, nilai kecepatan gelombang geser merupakan salah satu parameter untuk megetahui kondisi tanah serta memperkirakan bahaya gerakan tanah secara spesifik. Hal ini dilakukan karena kerusakan akibat gempa bumi tidak hanya disebabkan oleh jauh dekatnya lokasi dengan pusat gempa, tetapi disebabkan oleh beberapa faktor lain seperti kondisi lokal (formasi geologi, maupun kondisi litologi bawah permukaan atau struktur penyusun pada formasi geologi) daerah tersebut. Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) merupakan salah satu parameter yang bisa digunakan untuk menginterpretasikan kondisi bawah permukaan suatu wilayah (Kanli, 2011).

Penentuan nilai V_s (kecepatan gelombang geser) untuk kedalaman tanah tertentu dapat menggunakan metode *borehole* karena memberi informasi yang cukup baik, namun membutuhkan biaya yang lebih mahal serta waktu yang cukup

lama. Selain itu, terdapat beberapa metode lain yang dapat digunakan yaitu seperti metode MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) dan SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*) kedua metode ini merupakan metode yang memanfaatkan gelombang permukaan, terutama perambatan horizontal metode gelombang *Rayleigh* secara langsung dari sumber ke penerima. Kelebihan dari kedua metode tersebut sama seperti metode *borehole* yaitu informasi yang didapatkan cukup akurat, namun membutuhkan lahan yang luas untuk proses pengambilan data, karena memerlukan bentangan tali yang cukup panjang. Alternatif lain penentuan nilai V_s yaitu dengan cara pengukuran sinyal mikrotremor yang diinversikan menggunakan metode *ellipticity curve* atau disebut pula pemodelan ke belakang (*inverse modelling*), metode ini merupakan metode yang digunakan untuk menentukan parameter fisis tanah dari model yang telah didapatkan (kurva H/V) dari pengukuran mikrotremor.

Mikrotremor adalah getaran tanah selain gempa bumi, bisa merupakan getaran akibat aktivitas manusia maupun aktivitas alami dari bumi sendiri. Hasil yang didapatkan dari metode ini yaitu nilai kecepatan gelombang geser yang dapat digunakan untuk analisis profil bawah permukaan suatu wilayah tanpa harus dilakukan pengeboran. Metode *ellipticity curve* dalam teknik kegempaan digunakan untuk menentukan kecepatan gelombang geser (V_s) dari kondisi geologi wilayah dan kedalaman dari suatu lapisan, metode *ellipticity curve* merupakan metode yang menggunakan inversi dari gelombang *Rayleigh* hasil pengukuran seismik (Hogiber, 2011). Metode ini digunakan untuk mendapatkan parameter nilai kecepatan gelombang geser (V_s) di titik pengukuran mikrotremor, nilai V_s untuk

setiap jenis batuan memiliki nilai yang berbeda, sehingga nilai V_s bisa menjadi salah satu parameter yang digunakan untuk analisis litologi struktur bawah permukaan.

Penelitian-penelitian yang berkaitan dengan analisis litologi bawah permukaan di antaranya dilakukan oleh Novianita pada tahun 2009 yang meneliti tentang struktur lapisan bawah permukaan menggunakan metode *ellipticity curve* di Yogyakarta, dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa pada sisi barat daya dan barat laut di Yogyakarta telah terjadi fase penutupan sedimen (klosur) dengan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) antara 2250 m/s sampai 1350 m/s, dan penelitian litostratigrafi dan sedimentasi Formasi Kebo dan Formasi Butak di Pegunungan Baturagung Jawa Tengah bagian Selatan yang dilakukan oleh Surono pada tahun 2008 dengan hasil yang didapatkan yaitu batuan pada Formasi Butak terendapkan pada suatu cekungan laut dalam hingga dangkal yang diisi batuan gunung api, dibandingkan dengan bagian bawah Formasi Kebo. Penelitian tentang analisis litologi bawah permukaan berdasarkan *ground profiles* (profil bawah permukaan) suatu wilayah dari hasil interpretasi nilai kecepatan gelombang geser (V_s) dengan metode *ellipticity curve* belum pernah dilakukan sebelumnya baik di Kecamatan Prambanan maupun Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten.

B. Identifikasi Masalah

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

1. Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno mengalami banyak kerusakan bangunan akibat gempabumi Yogyakarta yang bersumber di Kabupaten Bantul pada tanggal 27 Mei 2006 pukul 05:55 WIB dengan skala 6,3

Mw pada kedalaman hiposenter 12 km dengan pusat gempa 7,961°LS – 110,446°BT.

2. Informasi terkait kondisi litologi bawah permukaan belum diketahui, ditunjukkan dengan tidak adanya informasi data bor di Kecamatan Gantiwarno dan Kecamatan Prambanan.
3. Belum adanya penelitian tentang analisis litologi bawah permukaan di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiworo Kabupaten Klaten.

C. Batasan Masalah

Ruang lingkup masalah yang diamati pada penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan data mikrotremor berada pada koordinat geografis 7°42'43,392" LS – 7°47'45,519" LS dan 110°29' 21,450" BT – 110°37'3,214" BT.
2. Pengambilan data mikrotremor mengacu pada aturan yang ditetapkan oleh SESAME *European Research Project* (SESAME, 2004).
3. Data mikrotremor pada Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno diambil secara langsung sebanyak 30 titik dengan jarak antar titik dua km.

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka dapat ditentukan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai kecepatan gelombang geser (V_s) dari setiap lapisan pada struktur bawah permukaan di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten?

2. Bagaimana litologi bawah permukaan berdasarkan *ground profiles* kecepatan gelombang geser (V_s) dengan metode *ellipticity curve* di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten?
3. Bagaimana hubungan kondisi litologi bawah permukaan dengan potensi tingkat kerusakan di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) dari setiap lapisan pada struktur bawah permukaan di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten.
2. Menentukan litologi bawah permukaan berdasarkan *ground profiles* kecepatan gelombang geser (V_s) dengan metode *ellipticity curve*.
3. Mengetahui potensi tingkat kerusakan yang terjadi di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno akibat dari kondisi litologi bawah permukaannya.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi dan gambaran terkait kondisi litologi bawah permukaan di Kecamatan Gantiwarno dan Kecamatan Prambanan Kabupaten Klaten.
2. Dapat dimanfaatkan sebagai literatur pendukung dalam mendesain tata ruang dan dasar pembangunan Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten berbasis mitigasi bencana gempa bumi.
3. Sebagai bahan masukan dan referensi bagi penelitian selanjutnya.

BAB II

DASAR TEORI

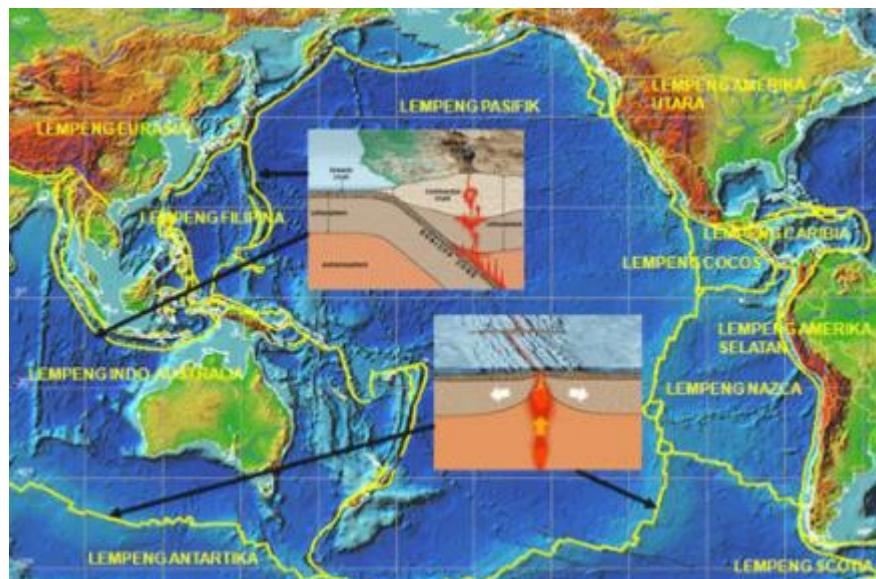
A. Gempa Bumi

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Akumulasi energi penyebab terjadinya gempa bumi dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan kemudian dipancarkan ke segala arah dalam bentuk gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi (BMKG, 2015). Selain itu gempa bumi juga dapat diakibatkan oleh aktivitas gunung berapi, tanah longsor, dan meteor yang menumbuk bumi.

1. Penyebab Terjadinya Gempa Bumi

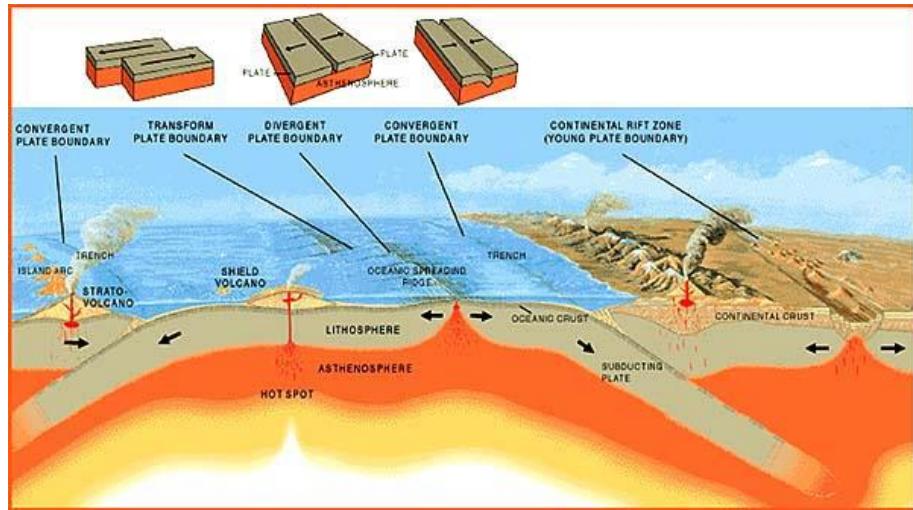
Teori lempeng tektonik menyatakan, permukaan bumi terbagi atas kira-kira 20 pecahan besar yang disebut lempeng dengan ketebalan sekitar 70 km. Ketebalan lempeng kira-kira hampir sama dengan litosfer yang merupakan kulit terluar bumi yang padat, terdiri dari kerak dan selubung atas. Lempengnya bersifat kaku dan bergerak di atas astenosfer yang cair dan panas. Oleh karena itu, lempeng tektonik ini bebas untuk bergerak dan saling berinteraksi satu sama lain. Daerah perbatasan lempeng-lempeng tektonik merupakan tempat-tempat yang memiliki kondisi tektonik yang aktif, yang menyebabkan gempa bumi, gunung berapi, dan

pembentukan dataran tinggi (BMKG, 2015). Gambar lempeng tektonik dunia ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lempeng Tektonik Dunia (BMKG, 2015)

Ada tiga kemungkinan pergerakan lempeng tektonik relatif terhadap lempeng lainnya, yaitu kedua lempeng saling menjauhi (*divergen*), saling mendekati (*konvergen*) dan saling geser (*transform*) (Widodo, 2012). Gerakan ini umumnya berlangsung lambat dan tidak dapat dirasakan oleh manusia, namun terukur sebesar 0 cm sampai 15 cm per tahun. Gerakan lempeng ini pun kadang macet dan saling mengunci, sehingga terjadi pengumpulan energi yang berlangsung terus menerus sampai pada suatu saat batuan pada lempeng tektonik tersebut tidak lagi kuat menahan gerakan tersebut sehingga terjadi pelepasan mendadak yang kita kenal sebagai gempa bumi (Thomson, 2006). Ilustrasi gerakan lempeng bumi ditunjukkan pada Gambar 3.



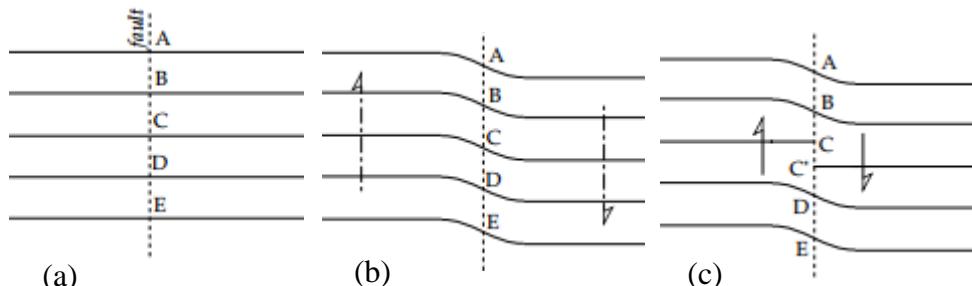
Gambar 3. Ilustrasi Gerakan Lempeng Bumi (Thomson, 2006)

2. Mekanisme Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran tanah yang ditimbulkan oleh lewatnya gelombang seismik yang dipancarkan oleh suatu sumber energi elastik yang dilepaskan secara tiba-tiba. Pelepasan energi elastik tersebut terjadi pada saat batuan di lokasi sumber gempa tidak mampu menahan gaya yang ditimbulkan oleh gerak relatif antar blok batuan, sehingga daya tahan batuan menentukan besaran kekuatan gempa.

Teori yang dapat menjelaskan tentang energi elastik yang dapat diterima adalah pergeseran sesar dan teori kekenyalan elastis (*elastic rebound theory*) dari Reid pada tahun 1906. Teori ini menjelaskan jika permukaan bidang sesar saling ber gesekan, maka batuan akan mengalami deformasi (perubahan wujud). Jika perubahan tersebut melampaui batas elastisitas atau regangannya, maka batuan

akan patah (*rupture*) dan akan kembali ke bentuk asalnya (*rebound*). Ilustrasi dari teori kekenyalan elastis ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Ilustrasi teori kekenyalan elastik (Lowrie, 2007)

Gambar 4 menjelaskan bahwa penambahan energi *strain* secara bertahap digambarkan oleh perkembangan dari Gambar 4a ke 4b. Gambar 4a menunjukkan pada keadaan awal dengan bagian A dan B merupakan batuan kompak yang dicirikan dengan garis-garis (yang sebenarnya tidak ada) yang menyambung. Karena ada gaya yang bekerja pada batuan tersebut, maka pada bagian kiri akan ke atas dan pada bagian kanan ke bawah (Gambar 4b), sehingga terjadi deformasi pada batuan tersebut. Sifat elastik batuan akan menyebabkan garis-garis tadi ikut terbawa oleh gaya yang bekerja dan terjadilah pembengkokan. Akhirnya batuan yang mengalami deformasi tidak dapat lagi menahan akumulasi *stress* yang melampaui batas elastisitas batuan sehingga batuan pecah menjadi dua bagian yang dicirikan dengan adanya garis yang tidak menyambung (Gambar 4c). Semakin tinggi kekuatan batuan dalam menahan *stress* maka semakin besar pula energi yang dilepaskan (Lowrie, 2007).

B. Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan gelombang mekanik yang merambat di dalam bumi, sehingga pada penjalarannya gelombang seismik memerlukan

medium untuk merambat (Young dan Freedman, 2003). Gelombang seismik biasanya disebabkan karena adanya deformasi struktur di bawah bumi akibat adanya tekanan ataupun tarikan karena sifat keelastisan kerak bumi. Proses tersebut biasanya berupa aktivitas vulkanik, ledakan buatan maupun gempa bumi. Gelombang seismik disebut juga gelombang elastik yang membawa energi kemudian menjalar ke segala arah di seluruh bagian bumi. Disebut gelombang elastik karena osilasi partikel-partikel medium terjadi akibat dari interaksi antara gradien *stress* melawan gaya-gaya elastik.

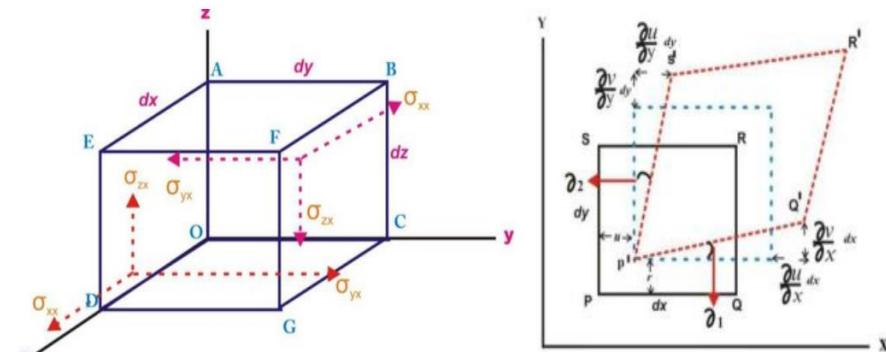
Gelombang seismik pada keadaan tidak teredam dapat dinyatakan dengan persamaan (1) (Aster, 2011):

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

dengan

$$\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2)$$

ψ adalah suatu fungsi gelombang yang direalisasikan sebagai usikan yang menjalar, v adalah kecepatan (m/s), t adalah waktu (s). Jika ditinjau sebuah elemen kecil volume dengan tegangannya berada pada dua permukaan yang tegak lurus terhadap sumbu x , maka komponen-komponen tegangannya ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Komponen Tegangan dan Analisis Tekanan Dua Dimensi (Telford, 2004)

Dalam bentuk tiga dimensi, komponen perpindahan titik P (x , y , dan z) ditulis dengan P (u , v , dan w), sehingga regangan normal ditunjukkan oleh persamaan (3), regangan geser oleh persamaan (4), sedangkan komponen regangan pada benda yang mengalami perpindahan secara rotasional ditunjukkan oleh persamaan (5).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \varepsilon_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (4)$$

$$\theta_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad \theta_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right); \quad \theta_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (5)$$

Perubahan dimensi yang disebabkan oleh *strain* normal akan mengakibatkan perubahan volume. Perubahan volume per satuan volume disebut dilatasi θ (Telford, 2004).

$$\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (6)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan yang menimbulkan pergeseran sederhana disebut modulus rigiditas dan dinyatakan dalam persamaan (7). Hubungan antara konstanta elastik pada medium homogen isotropik membentuk persamaan (8).

$$\mu = \frac{\text{Tegangan geser}}{\text{regangan}} = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (8)$$

dengan λ adalah konstanta Lame, σ adalah tegangan, ε adalah regangan dan μ menyatakan hambatan regangan geser. Persamaan rambat gelombang P dan S dapat diturunkan dari Hukum Hooke yang menyatakan hubungan tegangan (gaya per satuan luas) dan regangan (perubahan dimensi) sebagai

$$\sigma_{ii} = \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_{ii}; i = x, y, z \quad (9)$$

$$\sigma_{ij} = \mu\varepsilon_{ij}; j = x, y, z \text{ dan } i \neq j \quad (10)$$

Komponen-komponen tegangan di atas disebut gaya tiap satuan volume benda pada bidang x yang memiliki arah pada sumbu x , y , dan z . Total gaya pada sumbu x yang terjadi pada benda (medium) berbentuk kubus adalah:

$$F = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (11)$$

dengan $dx dy dz$ adalah satuan volume kubus. Menurut Hukum II Newton, gaya adalah perkalian antara massa (m) dan percepatannya (a). Apabila dikaitkan dengan persamaan densitas benda $\rho = m/V$, maka

$$F = ma = \rho V a = \rho(dx dy dz) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (12)$$

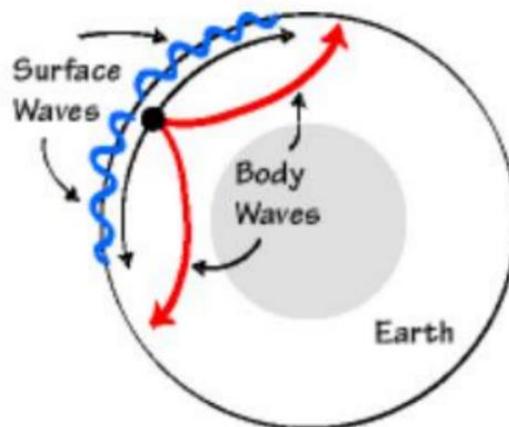
Gelombang seismik merambat pada suatu medium ke segala arah. Secara tiga dimensi arah perambatan gelombang dinyatakan dengan sumbu x , y , dan z dengan menggunakan definisi gaya F , sehingga persamaan (12) menjadi bentuk diferensial seperti pada persamaan (13).

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) = (\lambda' + \mu) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = (\lambda' + 2\mu) \nabla^2 \theta$$

$$\frac{\rho}{(\lambda' + 2\mu)} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \nabla^2 \theta \quad (13)$$

Gelombang seismik dibedakan menjadi dua jenis, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Seperti ditunjukkan pada Gambar 6, gelombang badan menjalar di dalam bumi sedangkan gelombang permukaan menjalar di permukaan bumi.



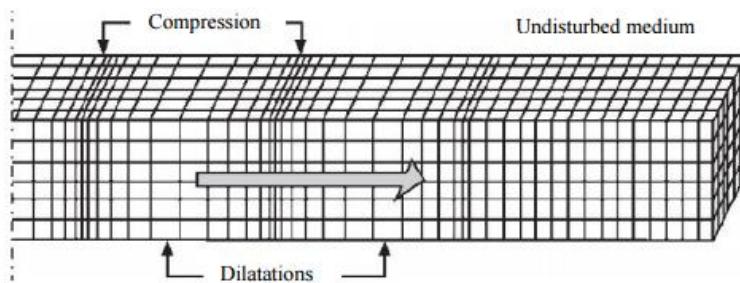
Gambar 6. Gelombang badan dan gelombang permukaan (Ammon, 2005)

1. Gelombang Badan (*Body Wave*)

Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah perambatannya ke seluruh bagian di dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjalarannya, gelombang ini dapat dibedakan menjadi gelombang P dan gelombang S.

a. Gelombang Primer (P)

Gelombang P seperti ditunjukkan pada Gambar 7 merupakan gelombang longitudinal, karena simpangannya sejajar dengan arah penjalarannya. Gelombang P dapat melewati semua medium dengan arah getarnya ke depan dan ke belakang sehingga materi yang dilaluinya mengalami tekanan dan peregangan. Gelombang P dapat menjalar pada semua medium baik padat, cair, maupun gas.



Gambar 7. Gelombang P (Elnashai dan Sarno, 2008)

Kecepatan penjalaran gelombang P dapat dikemukakan dengan persamaan (Elnashai dan Sarno, 2008) :

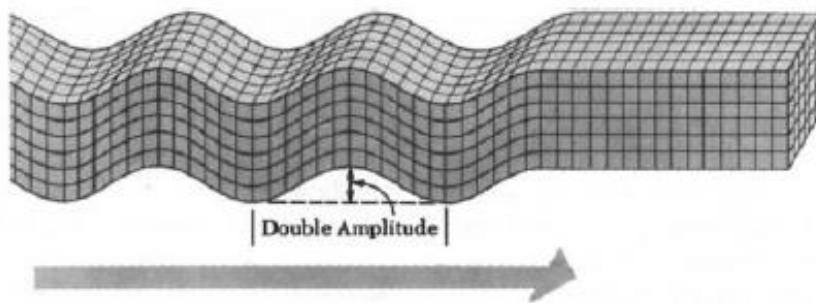
$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (14)$$

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

b. Gelombang Sekunder (S)

Gelombang S atau gelombang transversal (*shear wave*) adalah salah satu gelombang badan (*body wave*) yang memiliki simpangan tegak lurus terhadap arah rambatnya seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Gelombang ini waktunya tiba setelah gelombang P, sehingga gelombang tercatat setelah gelombang P pada *seismograph*. Gelombang ini hanya merambat pada medium padat dan tidak dapat

merambat pada fluida sehingga pada inti bumi bagian luar tidak dapat terdeteksi sedangkan pada inti bagian dalam mampu dilewati. Nilai kecepatan gelombang S (V_s) adalah dari 3 km/s hingga 4 km/s di kerak bumi, lebih dari 4,5 km/s di dalam mantel bumi, dan 2,5 hingga 3,0 km/s di dalam inti bumi.



Gambar 8.Gelombang S (Elnashai dan Sarno, 2008)

Kecepatan gelombang S dapat diperlihatkan dengan persamaan (Dentith, 2014):

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (15)$$

dengan μ adalah rigiditas atau modulus geser (N/m^2) dan ρ adalah densitas (kg/m^3)

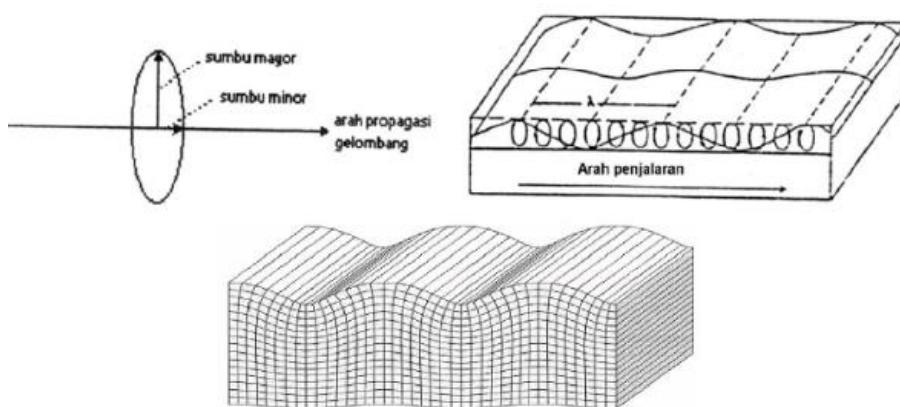
2. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang permukaan merambat di permukaan bumi. Amplitudo gelombang ini akan semakin melemah jika semakin menjalar masuk ke dalam inti bumi. Gelombang permukaan merupakan salah satu gelombang seismik selain gelombang badan. Berdasarkan pada sifat gerakan partikel media elastik, gelombang permukaan merupakan gelombang yang kompleks dengan frekuensi rendah dan amplitudo besar, yang menjalar akibat adanya efek *free surface* dimana

terdapat perbedaan sifat elastik (Susilawati, 2008). Jenis dari gelombang permukaan ada dua yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *Love*.

a. Gelombang *Rayleigh*

Gelombang *Rayleigh* diperkenalkan oleh Lord Rayleigh pada tahun 1885. Gelombang *Rayleigh* merambat pada permukaan bebas medium berlapis maupun homogen. Gelombang *Rayleigh* seperti ditunjukkan pada Gambar 9 merupakan gelombang permukaan yang gerakan partikel medianya merupakan kombinasi gerakan partikel yang disebabkan oleh gelombang P dan gelombang S. Orbit gerakan partikelnya merupakan gerakan *elliptic* dengan sumbu mayor ellips tegak lurus dengan permukaan dan arah penjalarannya (Telford dkk, 2004) yang memiliki kecepatan (V_R) dari 2,0 km/s hingga 4,2 km/s. Gelombang *Rayleigh* adalah gelombang yang dispersif dengan periode yang lebih panjang sehingga lebih cepat mencapai material yang lebih dalam dibandingkan dengan gelombang yang memiliki periode pendek. Hal ini menjadikan gelombang *Rayleigh* sebagai alat yang sesuai untuk menentukan struktur bawah tanah di suatu area.

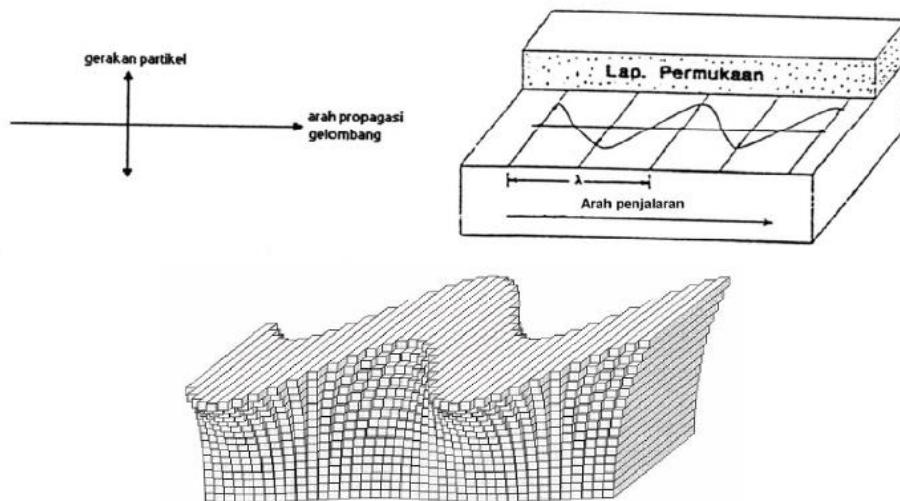


Gambar 9. Gelombang *Rayleigh* (Hidayati, 2010)

b. Gelombang *Love*

Gelombang *Love* diperkenalkan oleh A.E.H Love, seorang ahli matematika dari Inggris pada tahun 1911. Gelombang *Love* merambat pada permukaan bebas medium berlapis yang penjalarannya paralel dengan permukaannya (Gadallah dan Fisher, 2009). Gelombang *Love* adalah gelombang permukaan yang menyebabkan tanah mengalami pergeseran pada arah horizontal. Gelombang *Love* merupakan gelombang transversal dengan kecepatan gelombang ini di permukaan bumi (V_L) adalah dari 2,0 km/s hingga 4,4 km/s (Hidayati, 2010).

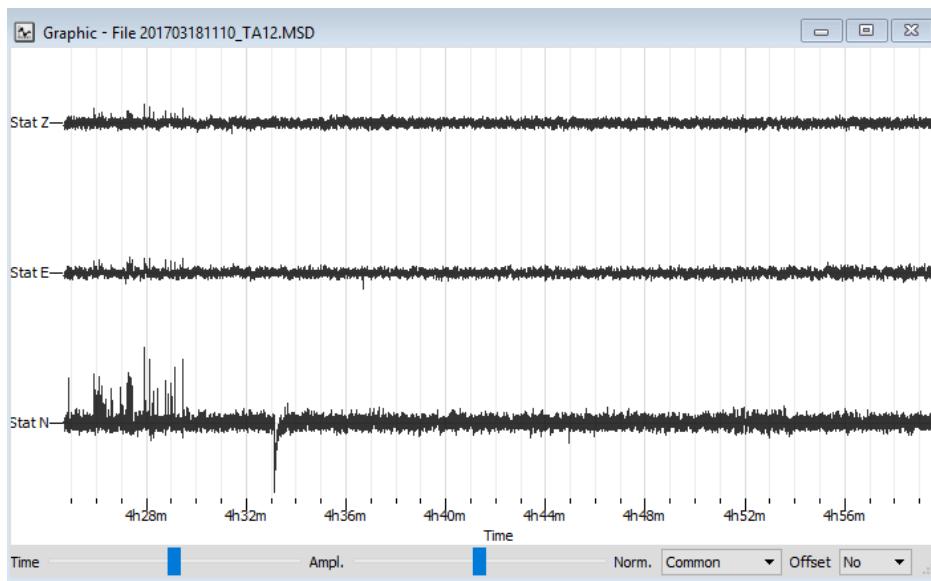
Gelombang *Love* mirip dengan gelombang S yang tidak memiliki perpindahan vertikal dan hanya terpolarisasi secara horizontal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Gelombang ini terbentuk akibat interferensi konstruktif dari pantulan-pantulan gelombang seismik pada permukaan bebas dan tidak dapat merambat di medium cair. Gelombang ini bergerak lebih cepat daripada *Rayleigh*.



Gambar 10. Gelombang *Love* (Hidayati, 2010)

C. Mikrotremor

Mikrotremor adalah getaran alami dari tanah dengan amplitudo rendah dan terus menerus yang bersumber dari berbagai macam getaran seperti lalu lintas, angin, aktivitas manusia dan lain-lain (Kanai, 1983). Lang dan Schwarz (2004) menjelaskan bahwa mikrotremor merupakan *noise* dengan periode pendek yang berasal dari sumber artifisial. Gelombang ini bersumber dari segala arah yang saling beresonansi. Mikrotremor dapat juga diartikan sebagai getaran harmonik alami tanah yang terjadi secara terus menerus, terjebak di lapisan sedimen permukaan dan terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi yang tetap, disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah dan kegiatan alam lainnya. Karakteristik mikrotremor mencerminkan karakteristik batuan di suatu daerah. Penelitian mikrotremor juga banyak dilakukan pada studi struktur tanah (*soil investigation*) untuk mengetahui keadaan bawah permukaan tanah. Menurut Ibrahim dan Subardjo (2005), mikrotremor terjadi karena getaran akibat orang berjalan, getaran mobil, getaran mesin pabrik, getaran angin, gelombang laut atau getaran alamiah dari tanah. Sinyal mikrotremor terdiri dari tiga komponen yaitu dua komponen horizontal (Barat-Timur, Utara-Selatan) dan satu komponen vertikal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Tampilan hasil Pengukuran Sinyal Mikrotremor di Dusun Pereng, Kecamatan Prambanan, Kabupaten Klaten pada tanggal 19 Maret 2017

Gambar 11 menunjukkan bahwa mikrotremor merupakan sinyal yang terdiri dari dua komponen horizontal yang ditunjukkan oleh spektrum stat E (Barat-Timur), dan spektrum stat N (Utara-Selatan) serta satu komponen vertikal yang ditunjukkan oleh spektrum stat Z. Mikrotremor didominasi oleh gelombang permukaan yang dapat digunakan dalam teknik kegempaan. Dalam kajian teknik kegempaan, litologi yang lebih lunak mempunyai resiko yang lebih tinggi bila diguncang gelombang gempa bumi, karena akan mengalami penguatan gelombang yang lebih besar dibandingkan dengan batuan yang lebih kompak. Hasil pengukuran mikrotremor di lapangan berupa data getaran tanah dalam fungsi waktu (Sudrajat, 2017).

Mikrotremor merupakan getaran tanah dengan amplitudo pergeseran sekitar $0,1 \mu$ sampai $1\mu\text{m}$ dan amplitudo kecepatan $0,001 \text{ cm/s}$ hingga $0,01 \text{ cm/s}$. Mikrotremor diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan rentang periodenya.

Jenis pertama adalah mikrotremor periode pendek dengan periode kurang dari 1 detik dan keadaan ini terkait dengan struktur bawah permukaan yang dangkal dengan ketebalan beberapa puluh meter. Jenis kedua adalah mikrotremor periode panjang dengan periode lebih dari 1 detik. Keadaan ini terkait dengan struktur tanah yang lebih dalam dan menunjukkan dasar dari batuan keras (Mirzaoglu dan Dykmen, 2003). Observasi mikrotremor dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik lapisan tanah berdasarkan frekuensi predominannya dan faktor penguatan gelombangnya (amplifikasi).

Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan. Nilai faktor penguatan (amplifikasi) tanah berkaitan dengan perbandingan kontras impedansi lapisan permukaan dengan lapisan di bawahnya. Amplifikasi berbanding lurus dengan nilai perbandingan spektral horizontal dan vertikalnya (H/V) dari gelombang mikrotremor. Nilai amplifikasi bisa bertambah jika batuan telah mengalami deformasi (Marjiyono, 2010).

Sejak Omori mengamati mikrotremor untuk pertama kalinya tahun 1908, banyak ahli seismologi dan insinyur teknik gempa bumi yang menyelidiki mikrotremor baik dari segi ilmiah maupun terapannya. Kegunaan dari survei mikrotremor di antaranya:

1. Untuk mengklasifikasikan jenis tanah berdasarkan frekuensi predominan yang nilainya spesifik untuk tiap jenis tanah.

2. Mikrotremor tidak hanya digunakan sebagai alat untuk mengantisipasi sifat gerakan gempa bumi tetapi juga untuk membuktikan koefisien gaya yang telah ditetapkan dalam perencanaan bangunan tahan gempa.
3. Menjelaskan struktur bawah permukaan tanah di tempat survei mikrotremor dilakukan.

D. Metode HVSR dan *Ellipticity Curve*

HVSR adalah salah satu metode untuk menentukan karakteristik tanah dan batuan bawah permukaan di titik penelitian, dengan diperolehnya kurva H/V sebagai fungsi nilai frekuensi predominan dan faktor penguatan gelombang (amplifikasi) maka jenis tanah dan kedalaman suatu batuan dapat diketahui. Metode ini adalah metode yang sederhana, namun hasil yang didapatkan untuk mengetahui kondisi tanah masih bersifat umum.

Nakamura (1989) mengembangkan konsep bahwa amplitudo dan frekuensi puncak HVSR merepresentasikan amplifikasi dan frekuensi lokasi (*site*) setempat, *site effect* terjadi akibat keberadaan lapisan tanah lunak yang menempati setengah cekungan dari batuan dasar. Dalam kondisi ini ada empat komponen gerakan yang terlibat, yaitu komponen gerak horizontal dan vertikal di batuan dasar dan komponen gerak horizontal dan vertikal di permukaan (Arifti, 2014). Faktor amplifikasi dari gerakan horizontal dan vertikal di permukaan tanah sedimen berdasarkan pada gerakan seismik di permukaan tanah yang bersentuhan langsung dengan batuan dasar di area cekungan dilambangkan dengan T_H dan T_V (Nakamura, 2000).

Site effect (T_{SITE}) pada permukaan lapisan sedimen, biasanya digambarkan dengan cara membandingkan faktor amplifikasi dari gerakan horizontal vertikal pada permukaan tanah sedimen (Daryono *et. al.*, 2009).

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} \quad (16)$$

Besarnya faktor amplifikasi horizontal T_H adalah:

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (17)$$

dengan S_{HS} adalah spektrum sinyal dari komponen horizontal di permukaan tanah, dan S_{HB} adalah spektrum dari komponen gerak horizontal pada dasar lapisan tanah.

Besarnya faktor amplifikasi vertikal T_V adalah:

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (18)$$

dengan S_{VS} adalah spektrum dari komponen gerak vertikal di permukaan tanah, dan S_{VB} adalah spektrum dari komponen gerak vertikal pada dasar lapisan tanah.

Gelombang *Rayleigh* mendominasi data mikrotremor dibanding beberapa jenis gelombang yang lain. Pengaruh gelombang *Rayleigh* pada rekaman mikrotremor memiliki besar yang sama untuk komponen vertikal dan horizontal saat rentang frekuensi 0,2 Hz – 20,0 Hz, sehingga rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati satu.

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1 \quad (19)$$

Apabila dibulatkan menjadi

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} = 1 \text{ atau } \frac{S_{VB}}{S_{HB}} = 1 \quad (20)$$

Karena rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati nilai satu, maka persamaan tersebut menjadi dasar perhitungan rasio spektrum mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya, sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan

$$HVSR = \sqrt{\frac{(A_{(U-S)}(f))^2 + (A_{(B-T)}(f))^2}{(A_{(v)}(f))}}$$

dengan $A_{(U-S)}(f)$ adalah nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen utara-selatan, $A_{(B-T)}(f)$ adalah nilai amplitudo spektrum frekuensi komponen barat-timur, dan $A_{(v)}(f)$ adalah amplitudo spektrum frekuensi komponen vertikal.

Nakamura (1998) menunjukkan bahwa HVSR adalah metode yang dapat digunakan untuk menginterpretasikan karakteristik tanah seperti jenis tanah dan ketebalan lapisan sedimen pada suatu wilayah yang diperoleh dari interpretasi kurva H/V sebagai fungsi frekuensi predominan dan faktor amplifikasinya. Metode ini masih bersifat umum apabila digunakan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan suatu wilayah secara lebih spesifik karena hasil yang didapatkan hanya berupa karakteristik jenis tanah dan ketebalan lapisan sedimen saja. Oleh karena itu dikembangkan suatu metode oleh Herak (2008) yaitu berupa metode pemodelan ke belakang (*inverse modelling*). *Inverse modelling* merupakan suatu metode untuk memperkirakan nilai numerik model parameter berdasarkan data hasil observasi

menggunakan model tertentu, serta melakukan pencocokan data (*data fitting*) untuk mencari parameter model yang menghasilkan model yang cocok (*fit*) dengan data pengamatan. Salah satu metode dari pemodelan ke belakang adalah metode *ellipticity curve*.

Metode *ellipticity curve* dipengaruhi oleh beberapa parameter input yang digunakan sebagai inisialisasi harga awal dari sifat fisis tanah di wilayah penelitian seperti V_s , V_p , ρ , dan σ yang menunjukkan keunikan setiap jenis tanah. Metode ini digunakan untuk mendapatkan parameter kecepatan gelombang geser permukaan (V_s) di titik pengukuran mikrotremor. Penentuan kondisi tanah atau batuan tidak hanya mengenai sifat fisis batuan saja. Metode *ellipticity curve* atau *inverse modelling* adalah metode untuk mengekstrak sifat-sifat fisis bawah permukaan yang tidak bisa ditentukan oleh metode HVSR.

Dispersi gelombang *Rayleigh* (*forward modelling*) adalah pemodelan yang dilakukan untuk menentukan parameter-parameter medium seperti kecepatan gelombang geser (V_s), sedangkan inversi gelombang *Rayleigh* (*inverse modelling*) adalah pemodelan yang dilakukan untuk memodelkan struktur bawah permukaan. Inversi gelombang *Rayleigh* adalah suatu proses yang dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter elastis kurva dispersi (*ellipticity curve*) yang tidak diketahui sebelumnya. Penyelesaian dari proses inversi bergantung pada kemampuan untuk menentukan harga parameter yang mendekati harga data eksperimen dengan cara melakukan pengulangan (iterasi). Tingkat keakuratan dari proses ini dapat dilihat dari *error (misfit)* semakin kecil nilai *error* dari proses iterasi maka profil kecepatan gelombang geser yang diperoleh akan semakin baik. Metode

ellipticity curve memiliki beberapa parameter yang harus ditentukan nilai awalnya untuk menentukan model bawah permukaan. Parameter tersebut meliputi kecepatan gelombang S (V_s), kecepatan gelombang P (V_p), *poisson ratio* dan kerapatan batuan.

1. *Poisson Ratio* (σ)

Poisson ratio adalah konstanta elastisitas yang dimiliki oleh setiap material yang dapat digunakan menjadi salah satu parameter untuk dapat mengetahui kondisi material atau tanah di suatu wilayah. Sebuah material yang diberikan gaya satu arah, ditarik maupun ditekan, akan mengalami perubahan bentuk. Selain perubahan bentuk ke arah gaya yang diberikan, *Poisson ratio* juga dapat dikatakan sebagai sifat elastisitas batuan yang mengindikasikan tingkat rekanan (*fracturing*) pada batuan tersebut yang mana nilai *Poisson ratio* akan lebih tinggi dari kondisi normal pada batuan yang terisi cairan (Manzella, 1990). *Poisson Ratio* bisa didefinisikan sebagai rasio negatif antara *strain longitudinal* (*strain horizontal*) dan *strain axial* (*strain vertikal*), seperti ditunjukkan pada persamaan (22).

$$\sigma = - \frac{E_h}{E_v} \quad (22)$$

dengan σ adalah *Poisson ratio*, E_h adalah *strain longitudinal* (*strain horizontal*), dan E_v adalah *strain axial* (*strain vertikal*).

Hubungan *Poisson ratio* dengan modulus elastik dan modulus geser secara matematis dapat dirumuskan seperti persamaan (23) (Telford, 1992).

$$\sigma = \frac{3k - 2\mu}{6k + 2\mu} \quad (23)$$

Kecepatan gelombang P (V_p) dan S (V_s) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (24) dan persamaan (25) dapat ditulis sebagai fungsi dari dua sifat modulus di atas dengan menuliskan kembali sifat modulus dari fungsi V_p dan V_s

$$\mu = V_s^2 \rho \quad (24)$$

$$k = \rho V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \rho \quad (25)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (24) dan persamaan (25) ke dalam persamaan (23) maka dapat dituliskan seperti persamaan (26).

$$\sigma = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]} \quad (26)$$

Poisson ratio akan bernilai 0 jika nilai $\left(\frac{V_p}{V_s}\right) = \sqrt{2}$, dan *Poisson ratio* sangat penting untuk mengenali kandungan fluida dalam batuan, misalnya seperti air, minyak maupun gas yang dapat dimanifestasikan dalam perbedaan nilai *Poisson ratio* (Munadi dan Suprajitno, 1993). Apabila harga σ dan V_p dapat ditentukan dengan akurat, maka jenis batuan dan kandungannya dapat diperkirakan dari permukaan. Nilai *Poisson ratio* untuk material berbeda ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Harga *Poisson ratio* dari batuan sedimen (Ostander, 1984)

Jenis Batuan	<i>Poisson Ratio</i>
Lempung Green River	0,22 – 0,30
Sedimen Laut Dangkal	0,45 – 0,50
Sedimen Consolidated :	
Tersaturasi Brine	0,20 – 0,30
Tersaturasi Gas	0,01 – 0,14
Batuan Pasir Sintetik :	
Tersaturasi Brine	0,41
Tersaturasi Gas	0,10
Batuan Pasir Otawa :	
Tersaturasi Brine	0,41
Tersaturasi Gas	0,10

2. Densitas

Densitas atau kerapatan batuan umumnya bertambah dengan bertambahnya kedalaman karena dengan bertambahnya kedalaman, tekanan hidrostatik juga semakin bertambah besar. Semakin besarnya tekanan menyebabkan batuan mengalami kompresi sehingga semakin rapat lapisan suatu batuan yang menyebabkan semakin besar densitas batuan.

Besarnya densitas suatu batuan juga bergantung pada besarnya porositas suatu batuan. Semakin besar porositas suatu batuan mengindikasikan semakin besar pula massa suatu batuan yang hilang atau rongga batuan makin besar. Hal ini menyebabkan densitas batuan semakin berkurang (Setiawan, 2008).

Hubungan antara densitas dengan kecepatan perambatan gelombang dalam batuan dirumuskan oleh Gardner (Sheriff dan Geldart, 1995), seperti ditunjukkan pada persamaan (27).

$$\rho = aV^{\frac{1}{4}} \quad (27)$$

dengan ρ adalah densitas (gr/cm^3) , a adalah konstanta yang besarnya 0,31 dan V adalah kecepatan (m/s).

Dengan menggunakan hukum Gardner ini dapat diketahui bahwa besarnya cepat rambat gelombang seismik dari formasi batuan sebanding dengan pangkat empat dari besarnya densitas batuan atau dengan kata lain semakin besar densitas suatu formasi batuan maka semakin besar cepat rambat gelombang dalam batuan tersebut. Nilai variasi densitas tiap batuan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Variasi Densitas Batuan (Telford dkk, 2004)

Jenis Batuan	Batas (Mg/m^3)	Jenis Batuan	Batas (Mg/m^3)	Jenis Batuan	Batas (Mg/m^3)
Batuan Sedimen		Batuan Metamorf		Batuan Beku	
<i>Aluvium</i>	1,96-2,00	<i>Schist</i>	2,39-2,90	<i>Riolit</i>	2,35-2,70
<i>Clay</i>	1,63-2,60	<i>Gneiss</i>	2,59-3,00	<i>Granit</i>	2,50-2,81
<i>Gravel</i>	1,70-2,40	<i>Phylite</i>	2,68-2,80	<i>Andesit</i>	2,40-2,80
<i>Silt</i>	1,40-1,93	<i>Slate</i>	2,70-2,90	<i>Synite</i>	2,60-2,95
<i>Soil</i>	1,80-2,20	<i>Granulite</i>	2,52-2,70	<i>Basalt</i>	2,70-3,30
<i>Sand</i>	1,20-2,40	<i>Amphibolite</i>	2,90-3,04	<i>Gabro</i>	2,70-3,30
<i>Sandstone</i>	1,61-2,76	<i>Eclogite</i>	3,20-3,54		
<i>Shale</i>	1,77-3,20				
<i>Limestone</i>	1,93-2,90				

Parameter kecepatan gelombang S (V_s) dan kecepatan gelombang P (V_p) telah dijelaskan pada sub bab gelombang badan pada bab sebelumnya.

E. Litologi

Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia, istilah litologi mengacu pada ilmu batuan yang berkenaan dengan sifat fisik, kimia, dan strukturnya. Litologi juga diartikan sebagai deskripsi batuan pada singkapan berdasarkan karakteristiknya, seperti: warna, komposisi mineral, ukuran butir sinonim dan petrografi (Bates dan Jackson, 1985). Setiap batuan memiliki bentuk, kekerasan, kasar dan halusnya

permukaan yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan oleh materi penyusun batuan yang berbeda.

Litologi merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kecepatan gelombang seismik. Jenis batuan yang berbeda akan menunjukkan *range* nilai kecepatan yang berbeda. Setiap lapisan batuan memiliki tingkat kekerasan yang berbeda-beda. Tingkat kekerasan yang berbeda-beda ini yang menyebabkan perbedaan kemampuan suatu batuan untuk mengembalikan bentuk dan ukuran seperti semula ketika diberikan gaya padanya. Elastisitas batuan yang berbeda-beda inilah yang menyebabkan gelombang merambat melalui lapisan batuan dengan kecepatan yang berbeda-beda (Setiawan, 2008).

Terdapat berbagai macam jenis batuan yang ada di bumi, misalnya batuan sedimen dan batuan *bedrock*. Batuan sedimen adalah batuan yang terbentuk sebagai hasil pemanjangan endapan yang berupa bahan lepas, yang terbentuk dari akumulasi material hasil perombakan batuan yang sudah ada sebelumnya atau hasil aktivitas kimia maupun organisme yang diendapkan pada permukaan bumi yang kemudian mengalami pembatuan (Pettjohn, *et al.*, 1975). Sedangkan *bedrock* disebut juga dengan batuan dasar dengan lapisan tanah yang paling keras. *Bedrock* biasanya berada di dasar suatu lapisan batuan. Batuan atau material yang bersifat lunak akan mempunyai nilai V_s yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan batuan keras, karena nilai kecepatan gelombang gesernya berbanding lurus dengan densitas batuan. Tabel klasifikasi material berdasarkan nilai V_s dan v_p ditunjukkan pada Tabel 4, 5, dan 6.

Tabel 4. Tabel Klasifikasi Site Berdasarkan Nilai V_s Hasil Penyelidikan Tanah dan Laboratorium SNI 1726 (Badan Standarisasi Nasional, 2010)

Klasifikasi Site	Kecepatan gelombang geser V_s (m/s)
Batuan Keras	$V_s \geq 1500$
Batuan	$750 < V_s \leq 1500$
Tanah sangat padat dan Batuan Lunak	$350 < V_s \leq 750$
Tanah Sedang	$175 < V_s \leq 350$
Tanah Lunak	$V_s < 175$

Tabel 5. Data kecepatan gelombang primer pada beberapa medium (Burger, 1992)

Batuan	Variasi v_p (m/s)
Tanah	250 – 600
Pasir	200 – 1000
Pasir tersaturasi	800 – 2200
Pasir dan kerikil	4921 – 6561
Lempung	1000 – 2500
Endapan lempung	3281 – 8202

Tabel 6. Data nilai Vs pada beberapa jenis batuan (Daryono, 2011)

Material	Kecepatan Gelombang Geser v_s (m/s)
Beton	2000
Granit	3500-380
Dolerit	2960-3450
Andesit	2440-3500
Basal	3600-3700
Lempung	380-1000

F. Kondisi Geologi Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno

Daerah penelitian terletak di dua kecamatan yaitu Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten.

a. Kecamatan Prambanan

Kecamatan Prambanan adalah sebuah kecamatan di Kabupaten Klaten, Jawa Tengah. Sebelah barat kecamatan ini berbatasan dengan Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Kecamatan ini juga berbatasan dengan Kecamatan Gantiwarno di sebelah timur, berbatasan dengan Kecamatan Gayamharjo Kabupaten Sleman di sebelah selatan dan berbatasan dengan Kecamatan Manisrenggo di sebelah utara. Luas wilayah Kecamatan Prambanan adalah 24,43 km², dengan jumlah penduduk sebanyak 46161 jiwa yang dibagi menjadi 11823 kepala keluarga (BAPPEDA Kabupaten Klaten, 2006).

Secara administratif Kecamatan Prambanan terdiri dari 16 desa yaitu Desa Joho, Desa Kokosan, Desa Kebondalem Lor, Desa Randusari, Desa Brajan, Desa Bugisan, Desa Brajan, Desa Kemudo, Desa Geneng, Desa Sanggrahan, Desa Taji, Desa Tlogo, Desa Kebondalem Kidul, Desa Pereng, Desa Kotesan, Desa Cukan, dan Desa Sengon seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Berdasarkan satuan formasi, litologi Kecamatan Prambanan tersusun atas Formasi Merapi Muda dengan sedikit Formasi Kebobutak, dan Formasi Semilir di bagian selatan (Pemkab Klaten, 2011).



Gambar 12. Peta Administrasi Kecamatan Prambanan (Pemkab Klaten, 2011)

b. Kecamatan Gantiwarno

Kecamatan Gantiwarno adalah sebuah kecamatan di Kabupaten Klaten, Jawa Tengah yang berbatasan dengan Kabupaten Gunung Kidul di sebelah selatan, Kecamatan Wedi di sebelah timur, Kecamatan Prambanan di sebelah barat, dan Kecamatan Jogonalan di bagian utara. Luas wilayah Kecamatan Gantiwarno yaitu 251,64 km², dengan jumlah penduduk sebanyak 40743 jiwa yang dibagi menjadi 15062 kepala keluarga (BAPPEDA Kabupaten Klaten, 2006).

Secara administratif Kecamatan Gantiwarno terdiri dari 16 desa yaitu Desa Muruh, Desa Baturan, Desa Mlese, Desa Ceporan, Desa Tuwangsan, Desa Jabung, Desa Mutihan, Desa Sawit, Desa Geneng, Desa Gesikan, Desa Katekan, Desa Kerten, Desa Ngandong, Desa Kragilan, Desa Jogoprayan, Desa Karangturi, dan Desa Gentan seperti ditunjukkan pada Gambar 13. Berdasarkan satuan formasi, litologi Kecamatan Prambanan tersusun atas Formasi Merapi Muda dengan sedikit Formasi Kebobutak tersebar di sebagian wilayah selatan (Pemkab Klaten, 2011).



Gambar 13. Peta Administrasi Kecamatan Gantiwarno (Pemkab Klaten, 2011)

c. Stratigrafi Daerah Penelitian

Stratigrafi adalah sejarah, komposisi, dan umur relatif serta distribusi perlapisan tanah dan interpretasi lapisan-lapisan batuan untuk menjelaskan sejarah bumi. Dari hasil perbandingan atau korelasi antar lapisan yang berbeda dapat dikembangkan lebih lanjut studi mengenai litologi (litostratigrafi), kandungan fosil (biostratigrafi), dan umur relatif maupun absolutnya (kronostratigrafi). Stratigrafi umumnya digunakan untuk mengetahui luas penyebaran lapisan batuan.

1. Formasi Merapi Muda

Endapan Merapi Muda merupakan hasil rombakan dari breksi gunung api yang terdiri dari *tuff*, abu, breksi, agglomerat dan leleran lava tak terpisahkan. Berbeda dengan Merapi Tua yang telah aktif semenjak akhir Pleistosen Akhir, Merapi Muda aktif semenjak tahun 1006. Untuk litologi Merapi Muda cenderung bersifat *intermediate*. Untuk morfologinya, Merapi Muda yang terletak di sebelah barat memiliki pola kontur radial yang menunjukkan gunungapi stadia muda, belum menunjukkan erosi lanjut.

2. Formasi Kebobutak

Formasi ini pada bagian bawah sebagai *Kebo Beds* yang terdiri atas serpihan batu pasir, konglomerat halus, dengan sisipan retas-lempeng (*sill*) diabas, kemudian *Butak Beds* yang menindih selaras *Kebo Beds*, disusun oleh agglomerat berselingan dengan batu pasir dan serpih. Formasi Kebobutak terbentuk pada Miosen Awal hingga Miosen Tengah (Bothe, 1929).

3. Formasi Semilir

Formasi Semilor terdiri dari perselingan antara breksi dan *tuff*, breksi batu apung, *dasit* dan *andesit* serta batu lempung tufan (Raharjo, *et al.*, 1995). Di beberapa tempat di bagian atas terdapat beberapa lensa tipis lignit dan fosil kayu. Di bagian atas menunjukkan penyebaran ekstensif dari *grain-flow sediment*. Bagian ini diinterpretasikan sebagai endapan terestrial. Berdasarkan penentuan umur dengan jejak belah pada Sirkon di breksi batuapung menunjukkan umur 17,0 juta tahun atau akhir Miosen Awal.

G. Kerangka Berpikir

Wilayah penelitian merupakan wilayah dengan potensi kerusakan yang cukup besar akibat gempa Yogyakarta pada 2006 silam, seperti data yang ditunjukkan dari BAPEDA Kabupaten Klaten dengan angka korban jiwa dan rumah roboh yang cukup tinggi di wilayah tersebut. Sehingga perlu dilakukan suatu kajian dengan cara memetakan potensi kerusakan yang disebabkan oleh kondisi geologinya.

Data yang diperoleh dari penelitian di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno berupa sinyal mikrotremor. Pengolahan sinyal mikrotremor dilakukan menggunakan metode HVSR, dengan *software sessaray geopsy*. Hasil yang diperoleh berupa kurva H/V, kemudian data berupa frekuensi predominan dan faktor amplifikasi yang disajikan dalam bentuk kurva H/V tersebut menjadi input dalam metode *ellipticity curve*, yang dipengaruhi oleh beberapa parameter input sebagai *inisialisasi* model, parameter input berpengaruh dalam proses *iterasi matching curve* atau pendekatan model dengan keadaan sebenarnya, semakin dekat nilai *inisialisasi* dengan kondisi lapangan pada wilayah penelitian maka model yang dihasilkan akan semakin baik. Parameter input tersebut terdiri dari nilai kecepatan

gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), *Poisson ratio* (σ), dan massa jenis batuan (ρ), maka akan diperoleh nilai V_s (kecepatan gelombang geser) dari pemodelan *ground profiles*. Nilai V_s yang didapatkan dari pemodelan *ground profiles* tersebut kemudian diinterpretasikan dengan litologi penyusun pada setiap formasi geologi daerah penelitian, dengan mengacu pada peta geologi Kabupaten Klaten serta tabel klasifikasi *site* berdasarkan SNI yang sudah ada. Selanjutnya hasil interpretasi nilai kecepatan gelombang geser tersebut dimodelkan secara 2 dimensi maupun 3 dimensi menggunakan *software Rockwork 15*, pemodelan ini dilakukan untuk mempermudah visualisasi litologi bawah permukaan pada setiap titik pengukuran.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Pengukuran sinyal mikrotremor dilaksanakan pada tanggal 12-13, dan 18-19 Maret 2017. Sebelum melakukan pengukuran sinyal mikrotremor dilakukan studi pustaka, diskusi, dan survei lapangan terlebih dahulu pada bulan Oktober 2016 sampai bulan Februari 2017. Pengambilan data primer berupa pengukuran sinyal mikrotremor secara langsung di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno dengan luas wilayah sebesar 500 km^2 sebanyak 30 titik lokasi pengukuran dengan jarak antar titik sejauh dua km. Sinyal mikrotremor yang diambil berada pada wilayah yang terletak pada koordinat geografis $7^\circ 42' 43,392''$ LS – $7^\circ 47' 45,519''$ LS dan $110^\circ 29' 21,450''$ BT – $110^\circ 37' 3,214''$ BT.

B. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat lunak merupakan bahan yang berhubungan dengan olah data menggunakan komputer.

1. Perangkat lunak:

- a. *Software Sesarray Geopsy* versi 2.9.1 dari *geopsy.org* untuk mengolah data berupa sinyal mikrotremor sehingga memperoleh kurva H/V sebagai fungsi frekuensi predominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0).
- b. Program *Dinver* pada *Software Sesarray Geopsy* versi 2.9.1 dari *geopsy.org* untuk menganalisis kurva H/V menggunakan metode *ellipticity curve* (inversi gelombang *Rayleigh*).
- c. *Software Surfer 10* dari Golden Software.*inc* untuk membuat desain survei dan desain pengambilan data
- d. *Software Rockwork 15* dari Rockware ® untuk *modelling* dan visualisasi litologi bawah permukaan pada titik penelitian secara 2D maupun 3D.
- e. *Software Google Earth* untuk memperkirakan kondisi lokasi penelitian dan menentukan titik pengambilan data sekaligus membuat desain survei.
- f. *Software Global Mapper 13* dari Blue Marble Geographics untuk memasukkan titik koordinat penelitian ke GPS, menggabungkan peta, dan mengubah format .kmz agar peta ataupun titik koordinat dapat dibuka pada *Google Earth*.

2. Perangkat keras:

Perangkat keras yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Laptop merk Lenovo seri 6400 dengan prosesor pentium 2020m, i3-3110m, i5-3230m untuk merekam data mikrotremor yang dihubungkan dengan *Digital Portable Seismograph* tipe TDL-303S.



Laptop

b. *Digital Portable Seismograph* tipe TDL-303S merek Taide.

Seismograph adalah instrumen yang digunakan sebagai alat perekam sinyal seismik. Aplikasi peralatan ini adalah sebagai alat perekam data mikrotremor untuk mendukung penelitian di bidang mitigasi bencana gempabumi (BMKG, 2015). *Digital Portable Seismograph* terdiri dari beberapa perangkat seperti seismometer, *digitizer*, kabel penghubung, dan antena GPS.

1. Seismometer tipe TDV-23S merek Taide.

Seismometer merupakan instrumen berupa sensor yang dapat merespon getaran tanah dan menangkap sinyal yang dapat direkam oleh *seismograph*. Seismometer memiliki tiga detektor untuk mendeteksi getaran tanah. Ketiga detektor tersebut terletak di bagian bawah seismometer (Damarla dan Ufford, 2007).



Seismometer tipe TDV-23S merek Taide.

2. *Digitizer* digunakan untuk mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital.



Digitizer

3. Satu set kabel penghubung untuk menghubungkan sensor ke laptop dan sensor ke *Digital Portable Seismograph*.



Kabel penghubung

4. Antena GPS yang terhubung dengan *Digital Portable Seismograph* dan berfungsi menerima data lokasi serta waktu dari satelit.



Antena GPS

- c. *Global Positioning System* (GPS) merk Garmin tipe 78S sebagai pemandu yang digunakan untuk menentukan posisi pada setiap titik penelitian, dan untuk menandai koordinat lokasi.



GPS portable

- d. Kompas untuk menentukan arah utara sebelum pemasangan alat.



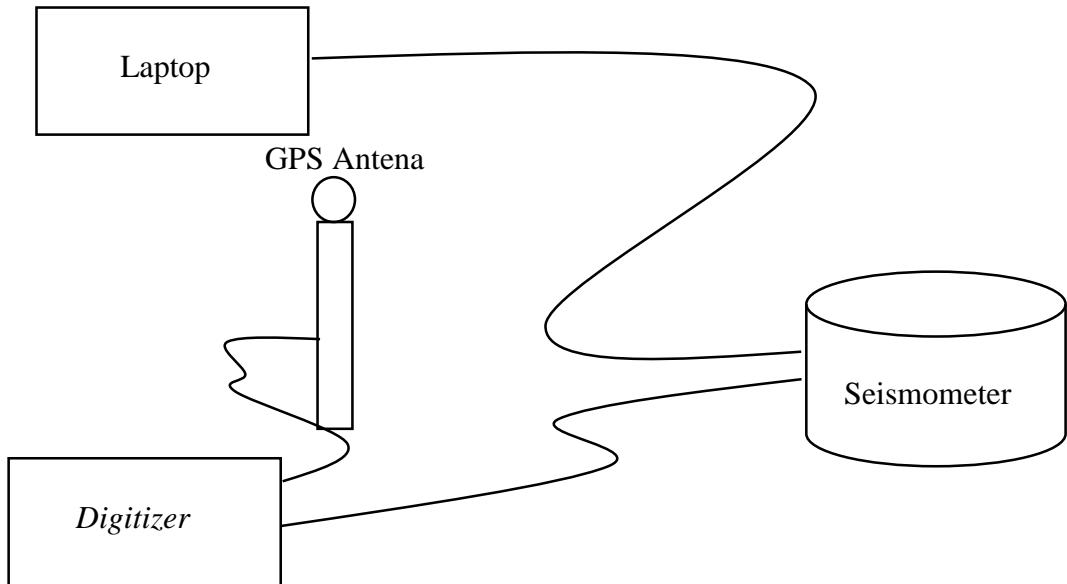
Kompas

- e. Peta geologi regional Surakarta, peta regional Yogyakarta, peta wilayah penelitian format shp daerah penelitian dan peta administrasi Kabupaten Klaten sebagai bahan pembuatan desain survei dan bahan analisis geologi.

- f. *Paving* untuk menempatkan sensor agar sensor berada di posisi yang datar atau rata.

- g. Cetok untuk meratakan tanah sebelum meletakkan sensor.

- h. Kamera ponsel merk Lenovo a6000 untuk dokumentasi.



Gambar 14. Skema Pengambilan Data

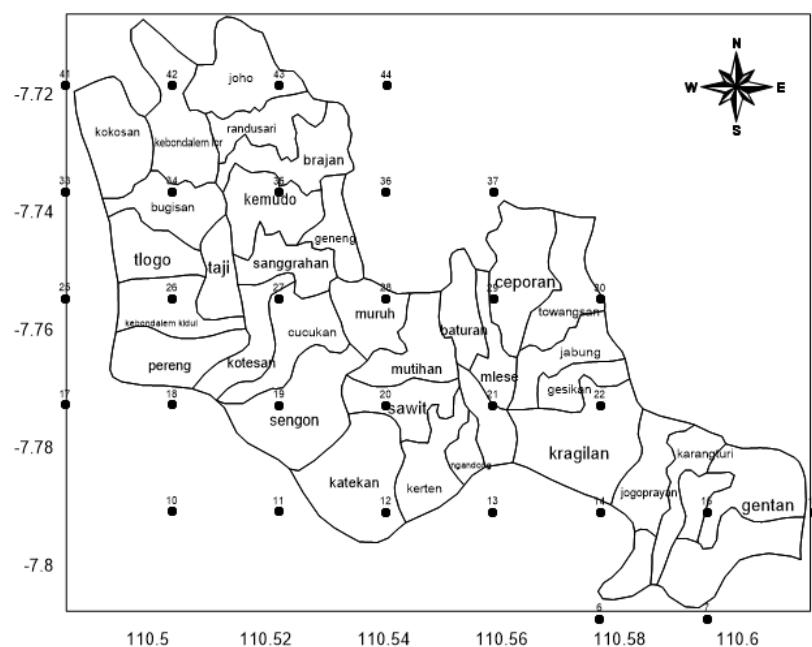
C. Teknik Pengambilan Data

1. Tahap Desain Survei dan Koordinat Pengambilan Data.

Pada tahap ini dilakukan survei lapangan ke daerah penelitian yaitu Kabupaten Klaten untuk melihat kondisi dan mencari informasi terkait kondisi daerah penelitian pasca gempa Yogyakarta tahun 2006. Setelah itu membuat peta desain survei dengan jarak spasi sejauh dua km. Hal ini bertujuan agar pengambilan data dapat mencakup dan mewakili kawasan Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno yang terdiri dari tiga formasi geologi, sehingga ditetapkan terdapat 30 titik penelitian.

Pembuatan desain survei yang akan digunakan untuk pengambilan data diawali dengan penentuan batas koordinat menggunakan *software Global Mapper13*, kemudian dibuat titik koordinat menggunakan *Microsoft Excel*, dengan format file teks (*.txt) file koordinat juga dibuka dengan *software Global*

Mapper13, agar dapat kembali disimpan dalam format .kmz/.kml, sehingga memudahkan untuk digunakan pada *software Google Earth*. Titik koordinat yang telah dibuat dalam desain survei seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15 kemudian dimasukkan dalam GPS yang berfungsi sebagai navigator untuk menemukan titik yang dituju.

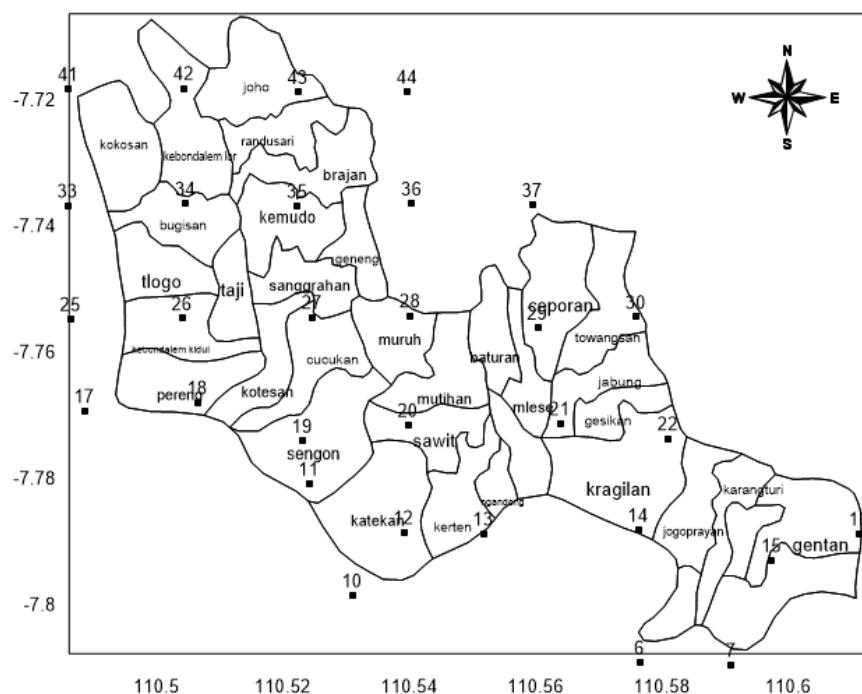


Gambar 15. Desain Survei titik Pengambilan Data Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno.

2. Survei lokasi

Setelah desain survei selesai ditentukan, selanjutnya dilakukan survei lokasi pengambilan data mikrotremor. Survei lokasi dilakukan untuk mengetahui keadaan lokasi dan medan yang harus dilalui pada saat pengambilan data sehingga dapat mengefisienkan waktu saat pengambilan data. Beberapa persyaratan pengukuran serta teknis pemilihan lokasi dan teknik pengambilan data mikrotremor ditetapkan oleh SESAME *European Research Project* yang ditunjukkan pada Tabel 7.

Dengan menggunakan Tabel 7 sebagai acuan, terdapat beberapa titik survei lapangan yang mengalami pergeseran dari yang telah ditentukan sebelumnya. Hal ini dikarenakan kondisi lapangan yang berada di bawah jurang dan tebing, selain itu titik yang tidak bisa digunakan untuk peletakan alat seperti pematang sawah yang terlalu sempit, kondisi tanah terlalu basah, jalan raya, maupun dalam rumah warga, sehingga desain survei awal berubah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Titik Pengukuran Sinyal Mikrotremor di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno

Tabel 7. Persyaratan teknis survei mikrotremor di lapangan (SESAME, 2004).

Jenis parameter	Saran yang dianjurkan	
Durasi pencatatan	<i>fg</i> minimum yang diharapkan (Hz)	Durasi pencatatan minimum yang disarankan (menit)
	0,2	30
	0,5	20
	1	10
	2	5
	5	3
	10	2
<i>Coupling soil-sensor</i> alami (insitu)	<ol style="list-style-type: none"> Tempatkan sensor langsung pada permukaan tanah Hindari menempatkan sensor seismograf pada permukaan tanah lunak (lumpur, semak-semak) atau tanah lunak setelah hujan. 	
<i>Coupling soil-sensor</i> buatan atau artifisial	<ol style="list-style-type: none"> Hindari lempengan yang terbuat dari material lunak seperti karet atau busa. Pada kemiringan yang curam di mana sulit mendapatkan kedataran sensor yang baik, pasang sensor dalam timbunan pasir atau wadah yang diisi pasir. 	
Keberadaan bangunan atau pohon	<ol style="list-style-type: none"> Hindari pengukuran dekat dengan bangunan, gedung bertingkat, dan pohon yang tinggi, jika tiupan angin di atas ± 5 m/detik. Kondisi ini sangat mempengaruhi hasil analisa HVSR yang ditunjukkan dengan kemunculan frekuensi rendah pada kurva. Hindari pengukuran di lokasi tempat parkiran, pipa air dan gorong-gorong. 	
Kondisi Cuaca	<ol style="list-style-type: none"> Angin: Lindungi sensor dari angin (lebih cepat dari 5 m/s). Hujan: Hindari pengukuran pada saat hujan lebat. Hujan ringan tidak memberikan gangguan berarti. Suhu: Mengecek kondisi sensor dan mengikuti instruksi pabrik. 	
Gangguan	<ol style="list-style-type: none"> Sumber monokromatik: hindari pengukuran mikrotremor dekat dengan mesin, industri, pompa air, generator yang sedang beroperasi. 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. 	

3. Pengukuran sinyal mikrotremor pada setiap titik lokasi

Pengukuran sinyal mikrotremor menggunakan *sampling* frekuensi sebesar 100 Hz dilakukan di setiap titik lokasi selama 30 menit dengan mengacu pada durasi pengukuran yang disarankan oleh *SESAME*. Mengacu pada acuan baku serta persyaratan teknis pengukuran sinyal mikrotremor yang ditunjukkan pada Tabel 7 terdapat beberapa titik yang begeser dari titik awal pada peta desain survei, hal ini dikarenakan titik awal yang berdekatan dengan bangunan, gedung bertingkat, pohon tinggi, sungai dan saluran air. Dilakukannya pergeseran titik tersebut agar pengambilan data yang dilakukan dapat memenuhi persyaratan yang disarankan oleh *SESAME*.

Data-data yang diperoleh tersimpan secara otomatis di dalam *datalogger* (*digitizer*), yang terekam dalam 3 komponen, yaitu komponen vertikal (*Up and Down*), horizontal *North-South*, dan horizontal *East-West*. Data tersebut dapat secara langsung ditampilkan pada laptop dengan menggunakan *software Monost*.

Pengukuran yang dilakukan di setiap titik rata-rata berlangsung selama 30 menit sampai 45 menit. Sinyal mikrotremor merupakan sinyal dengan amplitudo gelombang antara 0,1 μm sampai 0,5 μm . Sinyal mikrotremor yang didapatkan dari pengukuran tersebut kemudian dilakukan proses *windowing* yaitu proses pemilihan sinyal tanpa *noise*, panjang *window* yang disarankan oleh *SESAME* yaitu minimal sebanyak 10 *window*. Oleh karena itu semakin lama durasi pengambilan data maka data yang diperoleh akan semakin baik, seperti pada titik 26 durasi pengukuran dilakukan selama 1 jam . Hal ini dilakukan karena titik 26 berada di dekat Jalan

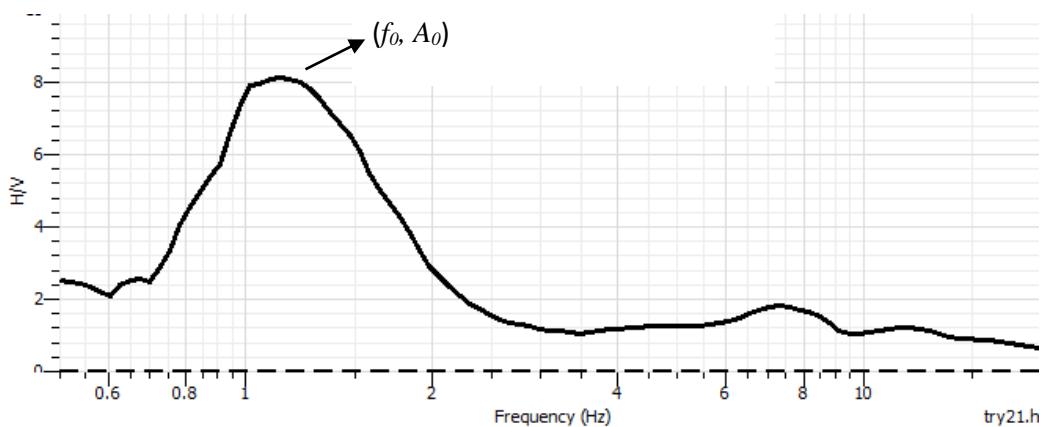
Raya Jogja–Solo yang sangat ramai, sehingga durasi pengukuran dilakukan lebih lama agar mendapatkan data yang cukup baik untuk dianalisis.

D. Teknik Analisis Data

Langkah kerja analisis data penelitian ini adalah:

1. Menganalisis sinyal mentah mikrotremor

Setelah mendapatkan sinyal mikrotremor yaitu dilakukan proses *windowing* yaitu proses pemilihan sinyal tanpa *noise* menggunakan perangkat lunak *Sesarray Geopsy* sehingga dihasilkan nilai frekuensi predominan (f_o) dan faktor amplifikasi (A_o) dari kurva HVSR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Kurva H/V sebagai fungsi frekuensi dan faktor amplifikasi

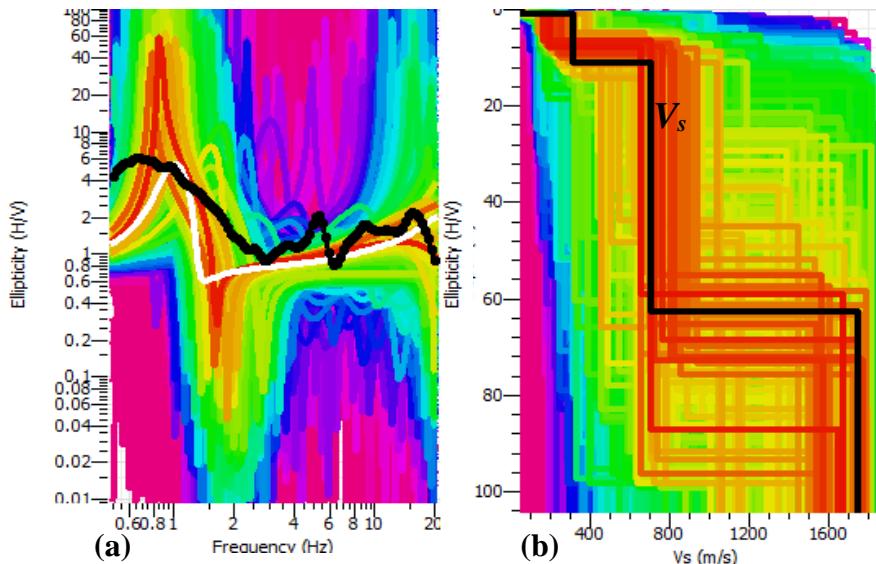
2. Menganalisis kurva H/V menggunakan metode *ellipticity curve*.

Spektrum sinyal mikrotremor dari pengolahan data menggunakan perangkat lunak *Sesarray Geopsy* disimpan dalam format .hv. Kurva tersebut digunakan sebagai input *ellipticity curve* (inversi gelombang *rayleigh*) menggunakan program *dinver* pada *software sesarray geopsy*. Nilai V_s yang diperoleh sangat bergantung pada nilai parameter model awal yang menggambarkan karakteristik *site* di daerah

tersebut seperti nilai kecepatan gelombang P (V_p), kecepatan gelombang S (V_s), *Poisson Ratio*, dan massa jenis (densitas) batuan. Parameter tersebut disesuaikan dengan kondisi litologi bawah permukaan pada setiap formasi geologi yang digunakan sebagai tempat pengukuran sinyal mikrotremor, dengan mengacu pada peta geologi Kabupaten Klaten. Hasil dari model tersebut berupa *ground profiles* kecepatan gelombang geser (S). Model dengan nilai *misfit* (ketidakcocokan) terendah ($0 \leq \text{misfit} < 1$) akan digunakan sebagai model terbaik. Perhitungan *misfit* dengan metode *monte-carlo* ditunjukkan pada persamaan 23 (Hogiber, 2011).

$$\text{misfit} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i - M_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (23)$$

dengan N adalah titik data, D_i adalah data hasil inversi, dan M_i adalah model struktur tanah dan σ_i adalah standar deviasi dari data hasil inversi. Hasil analisis menggunakan *software dinver* ditunjukkan pada Gambar 18.



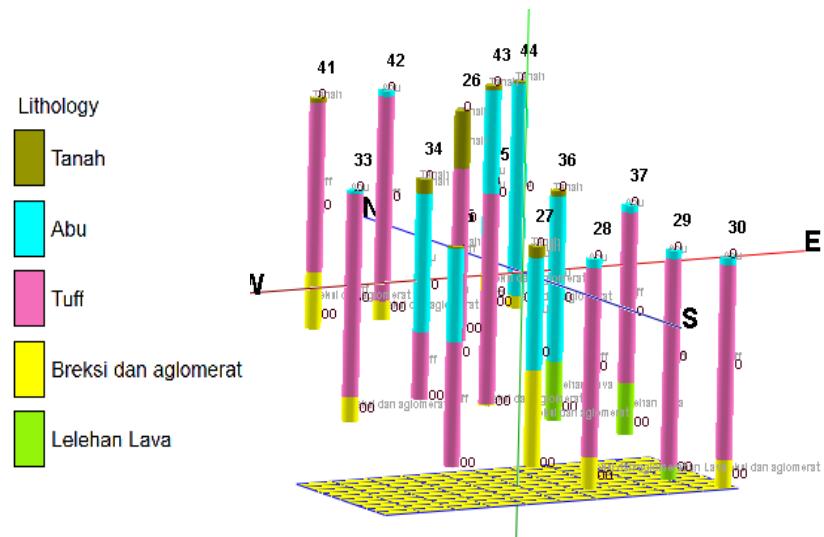
Gambar 18. (a) *Ellipticity curve* dengan garis hitam adalah model terbaik (b) *ground profiles* V_s

Gambar 18 (a) menunjukkan contoh dari *ellipticity curve* pada titik penelitian warna pada gambar menunjukkan kurva model yang dihasilkan dari proses *iterasi* model dengan nilai *misfit* yang berbeda, sedangkan garis hitam menunjukkan kurva H/V sebagai kurva model input pada metode *ellipticity curve*, dan garis putih menunjukkan model kurva dengan nilai *misfit* terendah. Hasil yang diperoleh dari metode ini yaitu berupa nilai frekuensi dan inversi dari nilai H/V yang disajikan dalam bentuk kurva eliptisitas (*ellipticity curve*), selanjutnya data tersebut digunakan sebagai awal untuk pemodelan *ground profiles* seperti yang ditunjukkan pada gambar 18 (b). Sama halnya dengan gambar 18 (a) warna pada gambar menunjukkan model *ground profiles* dengan nilai *misfit* yang berbeda, garis hitam menunjukkan model dengan *misfit* terendah, kemudian dari model tersebut akan diperoleh nilai kecepatan gelombang geser serta kedalaman per lapisannya.

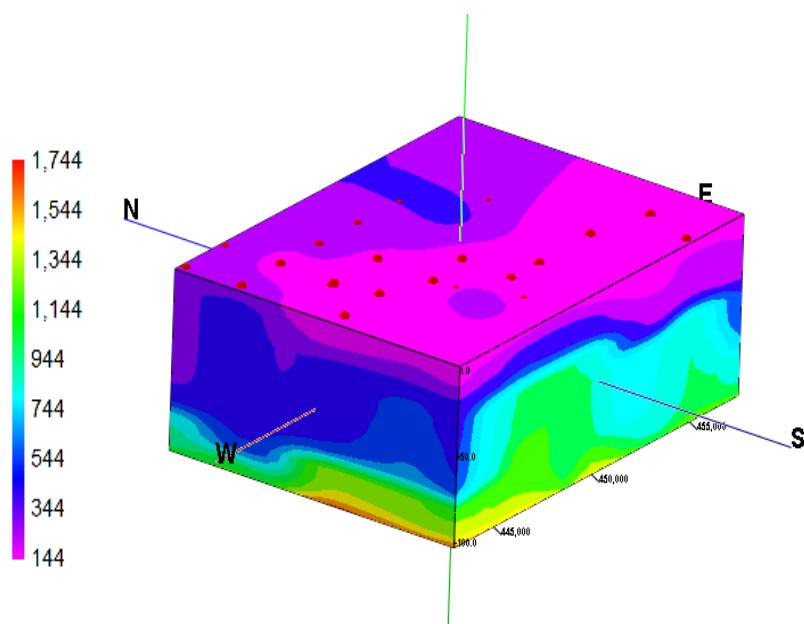
3. Pemodelan litologi bawah permukaan menggunakan *software Rockwork 15*.

Data nilai kecepatan gelombang geser (V_s) serta kedalaman hasil dari *ground profiles* V_s menggunakan metode *ellipticity curve* kemudian digunakan untuk melakukan pemodelan menggunakan *software Rockwork 15*. Model yang diperoleh akan mempermudah visualisasi litologi bawah permukaan pada titik penelitian. Dilakukan beberapa pemodelan struktur bawah permukaan, seperti pemodelan *multilog* 3D agar mengetahui litologi bawah permukaan dalam tampilan *borehole*, pemodelan ini bertujuan untuk mempermudah visualisasi litologi seperti kedalaman dan jenis tanah pada setiap titik pengukuran seperti ditunjukkan pada Gambar 19 dan pemodelan 3D agar mengetahui persebaran nilai

V_s pada wilayah penelitian yang telah diinterpretasikan berdasarkan litologi pada setiap formasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20.



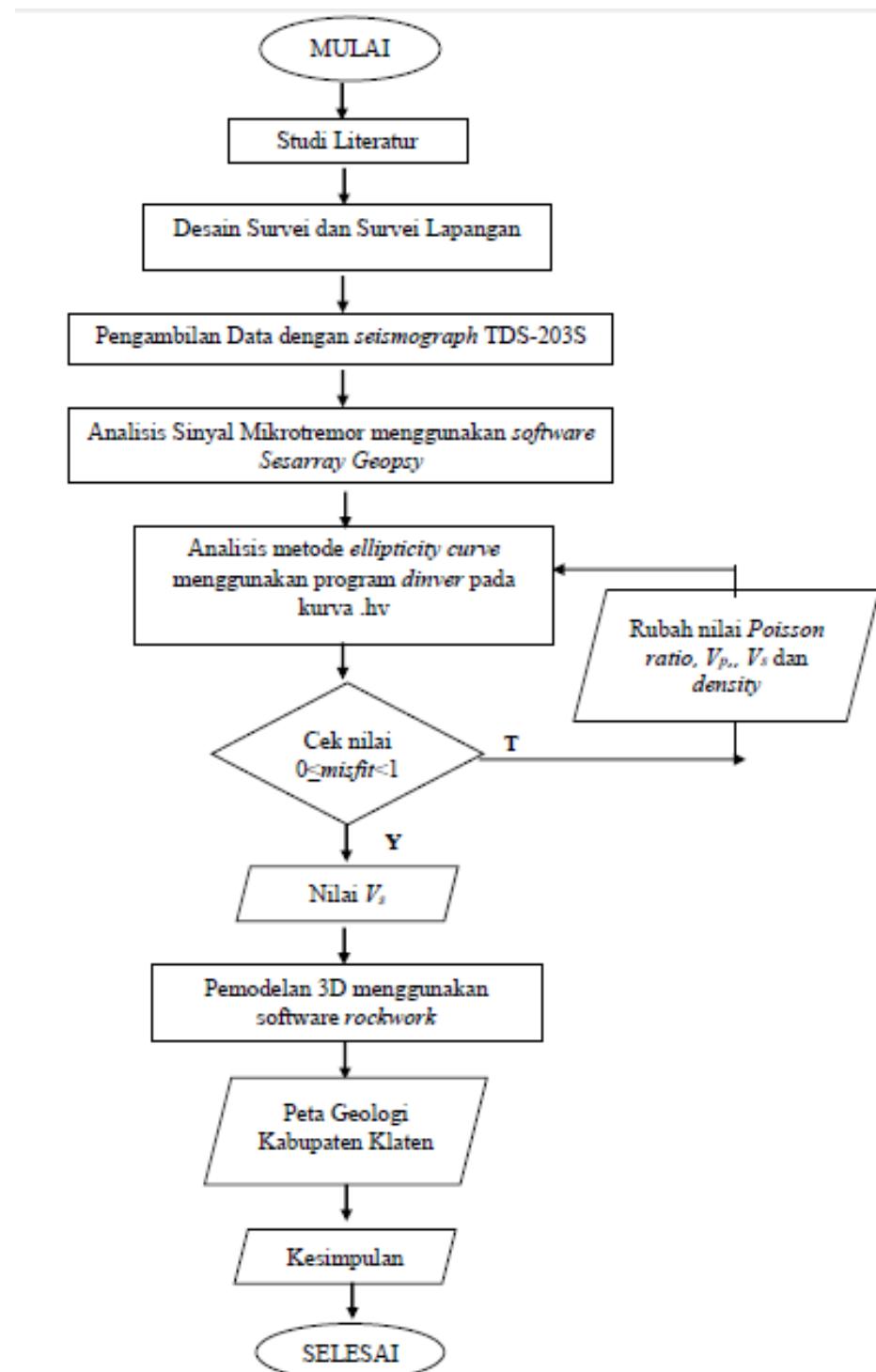
Gambar 19. Pemodelan borehole multilog.



Gambar 20. Pemodelan litologi 3D

E. Diagram Alir penelitian

Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 21. Diagram Alir Penelitian

BAB IV

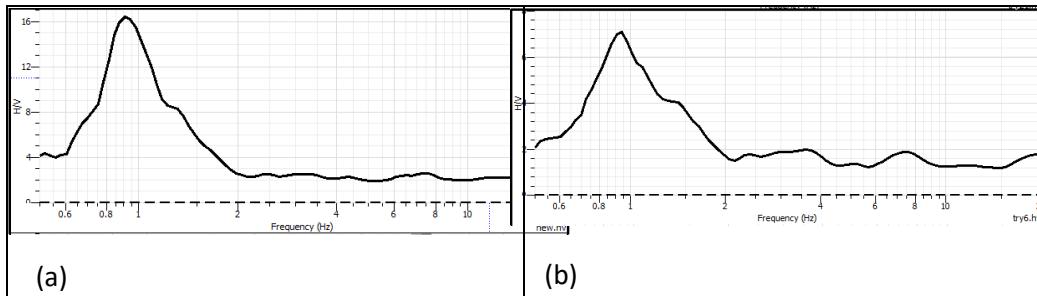
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik dan Interpretasi Kurva H/V

Kurva H/V memiliki kriteria yang merujuk pada standar yang ditetapkan oleh *SESAME European Research Project*, yang berupa kriteria *reliable* dan *clear peak* (SESAME, 2004). Informasi yang diperoleh dari kurva H/V merepresentasikan kondisi geologi setempat dalam bentuk parameter frekuensi predominan dan faktor amplifikasi. Terdapat beberapa interpretasi bentuk kurva H/V dan hubungannya terhadap karakteristik geologi lokal di daerah penelitian seperti *clear peak*, *flat H/V curve*, dan *unclear low frequency peak*. Secara teoritis nilai frekuensi predominan tanah merupakan cerminan kondisi fisik tanah tersebut. Tanah atau batuan lunak akan mempunyai periode getaran yang panjang dan begitu juga sebaliknya, oleh karena itu batuan lunak memiliki nilai frekuensi predominan yang relatif rendah. Sedangkan penguatan gelombang sangat dipengaruhi oleh ketebalan sedimen dan litologi penyusun di daerah penelitian

1. *Clear Peak*

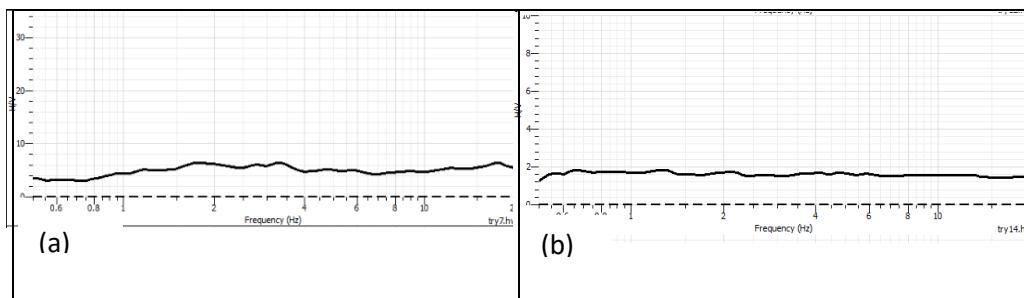
Clear peak adalah kondisi kurva H/V yang menunjukkan puncak tunggal yang jelas. Pada penelitian ini kondisi *clear peak* terjadi pada titik 15, 17, 19, 20, dan 21. Nilai f_0 dan A_0 dapat dilihat dengan mudah dari puncak *peak* yang terlihat jelas pada kurva ini. Contoh dari kondisi kurva H/V berbentuk *clear peak* ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22. (a) Kurva H/V berbentuk *clear peak* pada titik 15 (b) Kurva H/Vberbentuk *clear peak* pada titik 21

2. Flat H/V curve

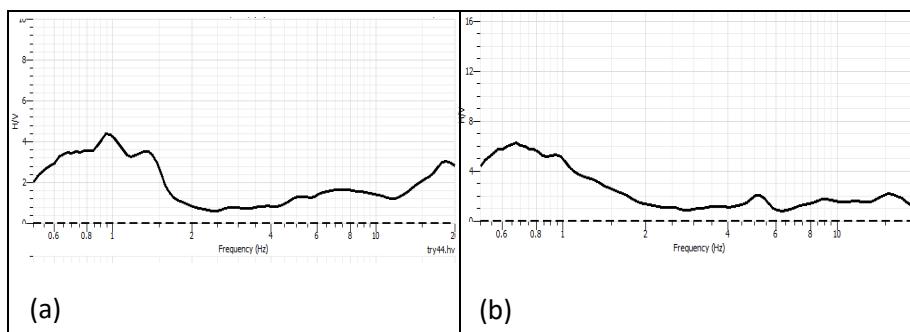
Kondisi ini terjadi jika nilai H/V tidak memiliki *peak*. Hal ini disebabkan oleh struktur tanah yang tidak memiliki kontras impedansi. Karakteristik tanah pada jenis ini cenderung kaku (endapan pasir yang dalam) yang terletak di atas suatu *bedrock* yang tidak diketahui kedalamannya. Kondisi ini terjadi pada titik 6, 7, 12, 14, 15, 18, 28, 29, 30, 33, 34, dan 35. Pada jenis karakteristik kurva ini nilai f_0 dan A_0 tidak bisa terlihat jelas karena tampilan kurva tidak memperlihatkan *peak* yang jelas. Penentuan f_0 pada kurva tipe ini adalah f_0 yang memiliki nilai A_0 tertinggi dengan nilai stdev A_0 yang paling kecil. Nilai stdev A_0 diperoleh dari nilai maximum dan minimum A_0 pada titik f_0 tertentu. Contoh kurva berbentuk *flat H/V curve* ditunjukkan pada Gambar 23.



Gambar 23. (a) Kurva H/V berbentuk *Flat H/V curve* pada titik 6 (b) Kurva H/Vberbentuk *clear peak* pada titik 12

3. Unclear Low Frequency Peak

Kondisi *unclear low frequency peak* didapatkan jika nilai f_0 kurang dari 1 Hz yaitu pada titik 16, 19, 22, 25, 26, 36, 37, 41, dan 44. Pada kondisi ini didapatkan *peak* frekuensi rendah yang tidak begitu jelas. Kasus seperti ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain daerah tersebut memiliki frekuensi predominan yang rendah dan kontras impedansi dengan lapisan di bawahnya yang rendah, pengaruh dari angin ketika pengukuran, khususnya pada kondisi pengukuran yang tidak optimal. Sama seperti kondisi pada jenis kurva *flat H/V curve*, jenis kurva ini juga tidak ada *peak* yang jelas sehingga nilai f_0 dan A_0 dapat ditentukan dari standar deviasi terendah antara nilai *average* dan nilai *maximum* dan *minimum* nya Contoh kurva H/V berbentuk *unclear low frequency peak* terjadi pada titik 16, 19, 22, 25, 26, 36, 37, 41, dan 44 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 24.



Gambar 24. (a) Kurva H/V berbentuk *Unclear Low Frequency Peak* pada titik 41 (b) Kurva H/V berbentuk *clear peak* pada titik 44

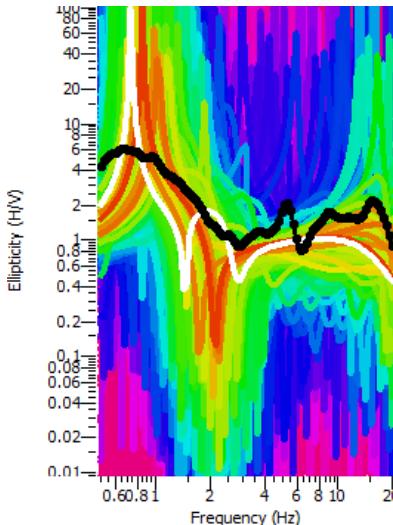
Keberagaman nilai f_0 dan A_0 bergantung pada jenis dan karakteristik tanah pada titik pengukuran. Nilai f_0 menunjukkan dari karakteristik tanah tersebut tergolong dalam jenis tanah lunak, atau batuan lunak. Sedangkan nilai A_0 menunjukkan ketebalan dari jenis tanah tersebut. Selanjutnya sifat fisis dan

karakteristik tanah secara spesifik pada titik pengukuran dapat diketahui dari parameter kecepatan gelombang geser (V_s) yang diperoleh dari pemodelan *ground profiles* pada metode *ellipticity curve*.

B. Ellipticity Curve

Metode *ellipticity curve* merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengetahui struktur bawah permukaan (*ground profiles*) berdasarkan kurva H/V hasil pengukuran mikrotremor sebagai input model awal. Metode ini sangat ditentukan oleh beberapa parameter sebagai inisialisasi model awal. Parameter yang dijadikan sebagai inisialisasi awal pada analisis metode *ellipticity curve* yaitu V_s (kecepatan gelombang S), V_p (kecepatan gelombang P), *Poisson ratio*, dan massa jenis (densitas) batuan. Nilai parameter tersebut disesuaikan dengan kondisi pada formasi geologi di wilayah penelitian sebagai berikut: nilai *Poisson ratio* yang digunakan sebagai inisialisasi awal pada metode ini berkisar antara 0,2 sampai 0,5 (Ostander, 1984), nilai kecepatan gelombang S (V_s) bernilai antara 50 m/s sampai 2000 m/s, nilai kecepatan gelombang P (V_p) bernilai antara 200 m/s sampai 5000 m/s dan untuk massa jenis (kerapatan) batuan bernilai antara 1500 kg/m³ sampai 2000 kg/m³.

Penelitian ini menggunakan model lapisan sebanyak 3 lapisan (*layer*), 4 lapisan (*layer*), dan 5 lapisan (*layer*). Banyaknya lapisan dibuat berdasarkan pada informasi geologi di lokasi penelitian yang memiliki kondisi litologi relatif seragam. Kurva dari metode *ellipticity curve* ditunjukkan pada Gambar 25.



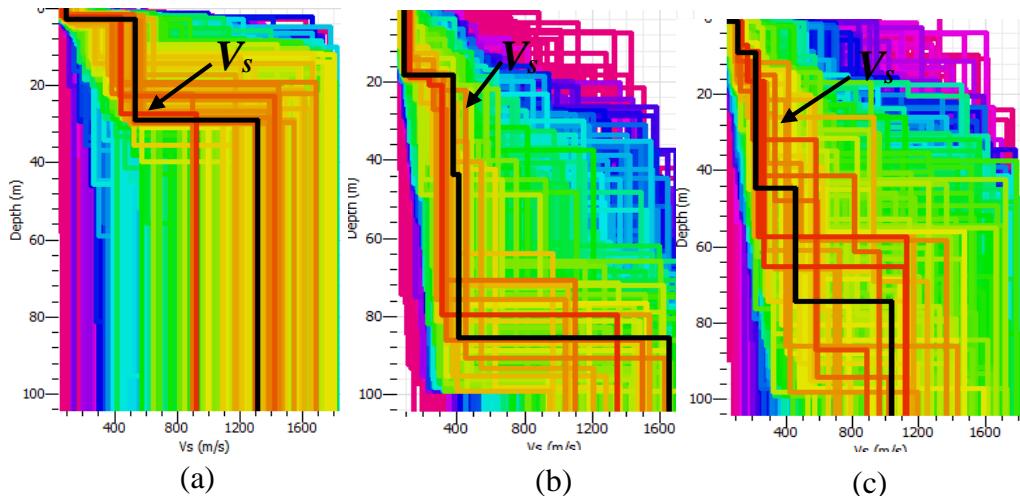
Gambar 25. Kurva dari metode *Ellipticity Curve* Desa Kaliworo, Kabupaten Klaten, Jawa Tengah, Indonesia

Beberapa macam warna garis pada kurva menunjukkan beberapa model kurva dengan nilai *misfit* yang beragam. Kurva dengan garis hitam menunjukkan kurva H/V sebagai model referensi untuk metode *ellipticity curve*, dan kurva dengan garis putih menunjukkan kurva hasil dari metode *ellipticity curve* dengan nilai *misfit* terkecil. Kurva pada *ellipticity curve* merupakan kurva yang merepresentasikan data dari nilai frekuensi dan nilai eliptisitas gelombang *Rayleigh* yang kemudian bisa digunakan untuk analisis *ground profiles* V_s dari titik pengukuran. Warna lain yang ditunjukkan oleh spektrum warna merah hingga ungu menunjukkan beberapa model dengan nilai *misfit* terkecil hingga terbesar.

C. *Ground Profiles* V_s dan Litologi Bawah Permukaan.

Nilai V_s pada *ground profiles* memiliki nilai yang bervariasi untuk setiap lapisannya. *Ground profiles* V_s dihasilkan dengan membuat 3 hingga 5 lapisan material dengan kedalaman 100 meter di setiap lokasi pengukuran. Penentuan

banyaknya lapisan bergantung pada susunan litologi pada formasi geologi yang hamper sama.



Gambar 26. *Ground Profiles* V_s dengan variasi lapisan (a) *ground profiles* V_s 3 lapisan (b) *ground profiles* V_s 4 lapisan(c) *ground profiles* V_s 5 lapisan

Pada Gambar 26 ditunjukkan beberapa contoh *ground profiles* V_s hasil penelitian dengan jumlah lapisan yang berbeda pada setiap titik pengukuran yaitu 3 lapisan, 4 lapisan, dan 5 lapisan. Gambar 26(a) adalah pemodelan *ground profiles* pada titik 6, Gambar 26(b) adalah *ground profiles* V_s pada titik 19, dan Gambar 26(c) adalah *ground profiles* V_s pada titik 21. Pada lapisan pertama di masing-masing pemodelan *ground profiles* dari kedalaman 0 sampai 5 meter memiliki nilai V_s yang relatif sama, yaitu dengan nilai antara 50 m/s hingga 274 m/s. Profil kecepatan gelombang geser yang dihasilkan pada setiap lintasan menunjukkan perbedaan jenis batuan atau material bawah permukaan. Batuan atau material yang bersifat lunak akan mempunyai nilai V_s yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan batuan keras, karena nilai kecepatan gelombang geser berbanding lurus dengan densitas batuan. Semakin kecil densitas (kerapatan) batuan tersebut maka

akan semakin kecil nilai kecepatan gelombang gesernya seperti yang ditunjukkan pada persamaan 22. Oleh karena itu nilai V_s menjadi salah satu cara yang memudahkan peneliti dalam pembacaan litologi bawah permukaan dan mengklasifikasikan jenis batuan berdasarkan nilai V_s .

Menurut tabel klasifikasi *site* berdasarkan nilai V_s hasil penyelidikan tanah dan laboratorium SNI 1726 (Badan Standarisasi Nasional, 2010), sifat batuan diklasifikasikan menjadi 5 jenis, yaitu untuk jenis batuan keras memiliki nilai $V_s \geq 1500$ m/s, untuk jenis batuan memiliki nilai V_s antara 750 sampai 1500 m/s, untuk jenis batuan lunak dan tanah sangat padat memiliki nilai V_s antara 350 sampai 750 m/s, untuk tanah sedang memiliki nilai V_s antara 175 sampai 350 m/s, dan untuk jenis tanah lunak memiliki nilai V_s kurang dari 175 m/s.

Titik penelitian selanjutnya dilakukan pengelompokan berdasarkan formasi geologi di daerah penelitian, hal ini dilakukan agar mempermudah visualisasi litologi bawah permukaannya serta persebaran litologinya pada masing-masing formasi geologi. Oleh karena itu titik penelitian terbagi menjadi 3 zona yaitu zona I (Formasi Merapi Muda) yang berjumlah 23 titik pengukuran, zona II (Formasi Kebobutak) yang berjumlah 6 titik pengukuran, dan zona III (Formasi Semilir) berjumlah 1 titik pengukuran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8, kemudian nilai kecepatan gelombang geser pada titik penelitian yang didapatkan dari hasil *ground profiles* V_s dengan metode *ellipticity curve* tersebut diinterpretasikan dengan litologi penyusun pada setiap formasi geologi daerah penelitian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 9, 10, dan 11.

Tabel 8. Pengelompokan Titik Pengukuran berdasarkan Formasi Geologi di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten

Zona	Jumlah Titik Pengukuran	Titik Pengukuran	Formasi Geologi	Litologi penyusun formasi (Raharjo, et al., 1995)
I	23	19, 25, 26, 34, 43, 20, 21, 27, 28, 29, 35, 44, 17, 15, 12, 36, 37, 41, 42, 16, 22, 33, 30	Merapi Muda	<i>tuff</i> , abu, breksi, aglomerat dan leleran lava tak terpisahkan
II	6	6, 7, 10, 11, 13, 14	Kebobutak	serpihan batu pasir, konglomerat halus, dengan sisipan retas-lempeng (<i>sill</i>), aglomerat berselingan dengan batu pasir pada Formasi Kebobutak pasir dan serpih
III	1	18	Semilir	breksi dan <i>tuff</i> , breksi batu apung, <i>tuff</i> dasit dan <i>tuff</i> andesit serta batu lempung tufan

Tabel 10. Interpretasi nilai V_s dengan litologi penyusun pada Formasi Merapi Muda

V_s (m/s)	Kedalaman (meter)	Litologi	Klasifikasi site berdasarkan SNI
<175	0 – 50	Tanah	Tanah Lunak
175 - 350	0 – 50	Abu	Tanah Sedang
350 - 750	0 – 80	<i>Tuff</i>	Batuan Lunak
750 - 1500	10 – 100	Breksi dan Aglomerat	Batuan
>1500	50 – 100	Leleran Lava	Batuan Keras

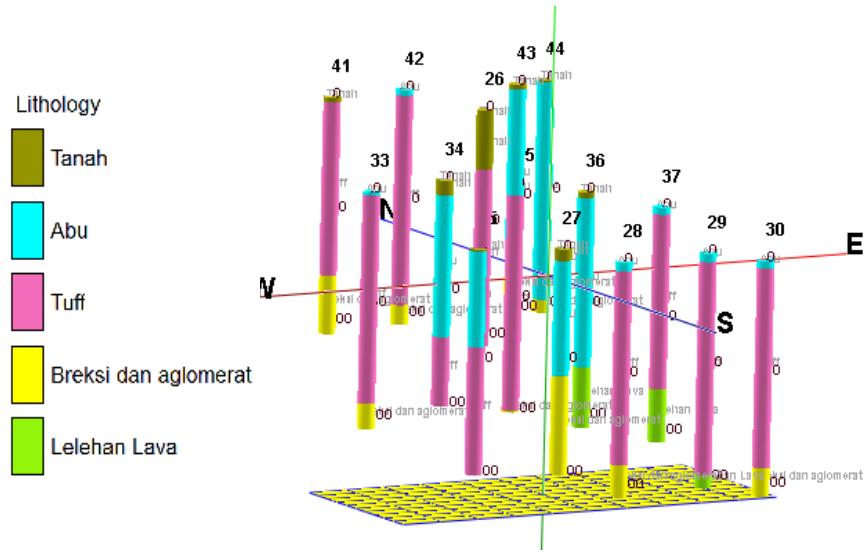
Tabel 10. Interpretasi nilai V_s dengan litologi penyusun pada Formasi Kebobutak

V_s (m/s)	Kedalaman (meter)	Litologi	Klasifikasi <i>site</i> berdasarkan SNI
<175- 350	0 – 50	Tanah	Tanah Lunak
350 - 750	0 – 80	Batu Lempung	Batuan Lunak
750 - 1500	10 – 100	Breksi dan Batu Apung	Batuan
>1500	50 – 100	<i>Dasit</i> dan <i>andesit</i>	Batuan Keras

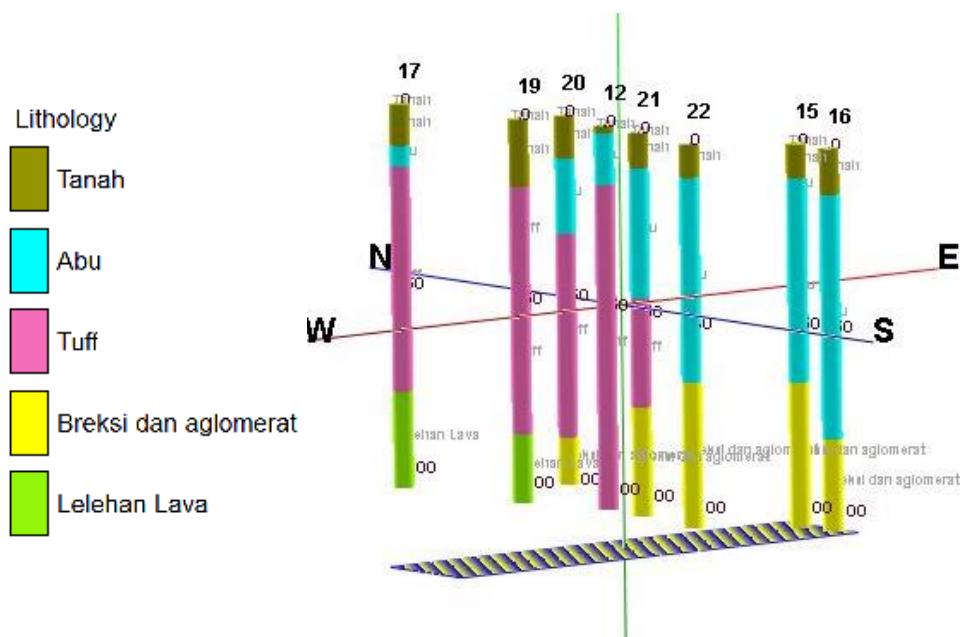
Tabel 11. Interpretasi nilai V_s dengan litologi penyusun pada Formasi Semilir

V_s (m/s)	Kedalaman (meter)	Litologi	Klasifikasi <i>site</i> berdasarkan SNI
<175	0 – 50	Tanah	Tanah Lunak
175 – 350	0 – 50	Batu Pasir	Tanah Sedang
350 – 750	0 – 80	Konglomerat Halus	Batuan Lunak
750 – 1500	10 – 100	Agglomerat	Batuan
>1500	50 – 100	<i>Sill</i> (Batuan Beku)	Batuan Keras

Pemodelan tiga dimensi litologi bawah permukaan zona I Formasi Merapi Muda pada daerah penelitian dapat ditunjukkan pada Gambar 27 dan 28.



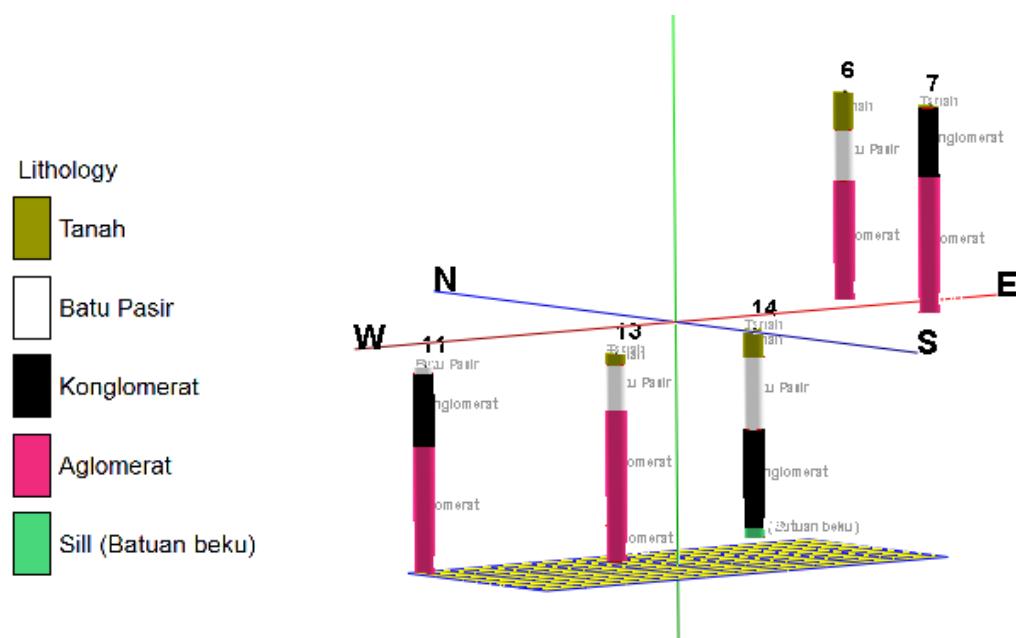
Gambar 27. Tampilan *Multilog* 3D Zona I Formasi Merapi Muda bagian Utara



Gambar 28. Tampilan *Multilog* 3D Zona I Formasi Merapi Muda bagian Selatan

Zona I mencakup wilayah yang berada pada Formasi Merapi Muda di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten. Gambar 27 menunjukkan bahwa sisi Utara pada formasi ini secara keseluruhan tertutupi oleh abu dengan kedalaman 0 sampai 1 meter. Lapisan bawahnya didominasi oleh *tuff*

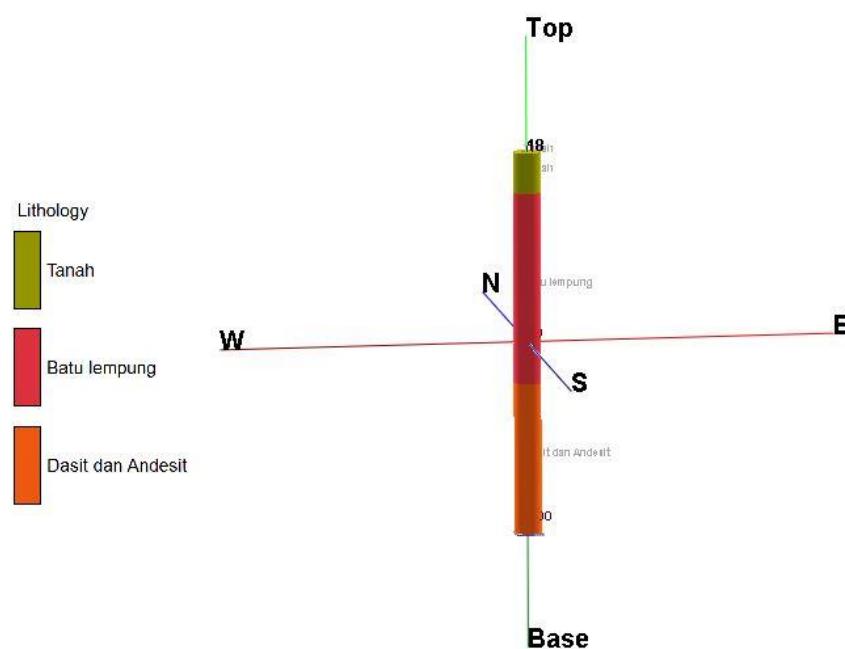
dengan kedalaman yang cukup dalam dari kedalaman 10 meter sampai 80 meter meskipun ada beberapa wilayah di sisi Utara yang didominasi oleh abu. Kemudian untuk sisi Selatan pada zona I seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28 keseluruhan titik tertutupi oleh tanah dari kedalaman 0 meter sampai 5 meter. Lapisan di bawahnya didominasi oleh abu dan *tuff* dari kedalaman 20 sampai 70 meter dan lapisan akhir dengan sedikit material bresi dan aglomerat pada 5 titik penelitian. Dengan demikian sebagian besar wilayah penelitian pada zona I tersusun oleh material abu dan *tuff* yang cukup tebal dengan distribusi nilai kecepatan gelombang geser (V_s) antara 50,15 m/s sampai 274,01 m/s pada *layer* pertama, dan 414,45 m/s sampai 1628,28 m/s untuk *layer* terakhir.



Gambar 29. Tampilan *Multilog* 3D Zona II Formasi Kebobutak

Zona II mencakup wilayah yang berada pada Formasi Kebobutak di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten. Gambar 29

menunjukkan bahwa pada zona II memiliki variasi litologi penyusun yang didominasi oleh lapisan batuan konglomerat dan aglomerat. Keseluruhan daerah ini tertutupi oleh lapisan tanah yang tidak terlalu tebal pada kedalaman 0 meter sampai 5 meter. Lapisan di bawahnya dilapisi oleh batuan pasir pada beberapa titik dengan kedalaman 5 meter sampai 10 meter. Berdasarkan model ini sebagian besar wilayah penelitian pada zona II tersusun oleh material konglomerat dan aglomerat yang cukup tebal dengan distribusi nilai kecepatan gelombang geser (V_s) antara 50,75 m/s sampai 203,42 m/s pada *layer* pertama, dan 1035,36 m/s sampai 1555,08 m/s untuk *layer* terakhir.

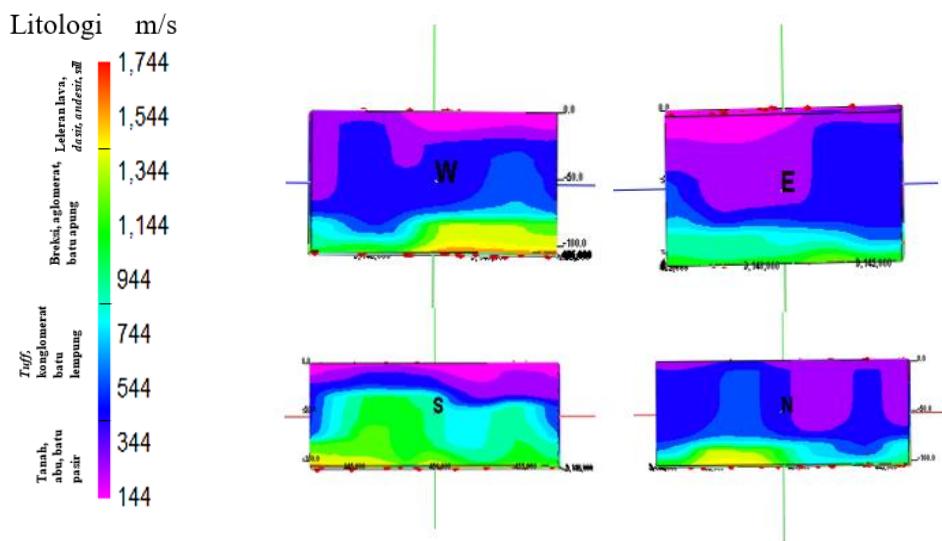


Gambar 30. Tampilan Multilog 3D Zona III Formasi Semilir

Zona III mencakup wilayah yang berada pada Formasi Semilir di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten. Dari Gambar 30 menunjukkan bahwa pada zona ini didominasi oleh *tuff* pada kedalaman 10 meter

sampai 50 meter dan batuan lempung di bagian dasar, dengan sedikit material tanah pada kedalaman 0 meter sampai 10 meter, sehingga sebagian besar wilayah penelitian pada zona ini tersusun oleh batu lempung yang cukup tebal dengan distribusi nilai kecepatan gelombang geser (V_s) bernilai 52,09 m/s pada *layer* pertama, dan 1744 m/s pada *layer* terakhir.

Pemodelan 3D wilayah penelitian bertujuan untuk memudahkan visualisasi serta interpretasi litologi bawah permukaan berdasarkan nilai V_s yang didapatkan dari pemodelan *ground profiles*. Pemodelan 3D didapat dengan menggunakan interpolasi iso-surface yang ditunjukkan pada Gambar 31.

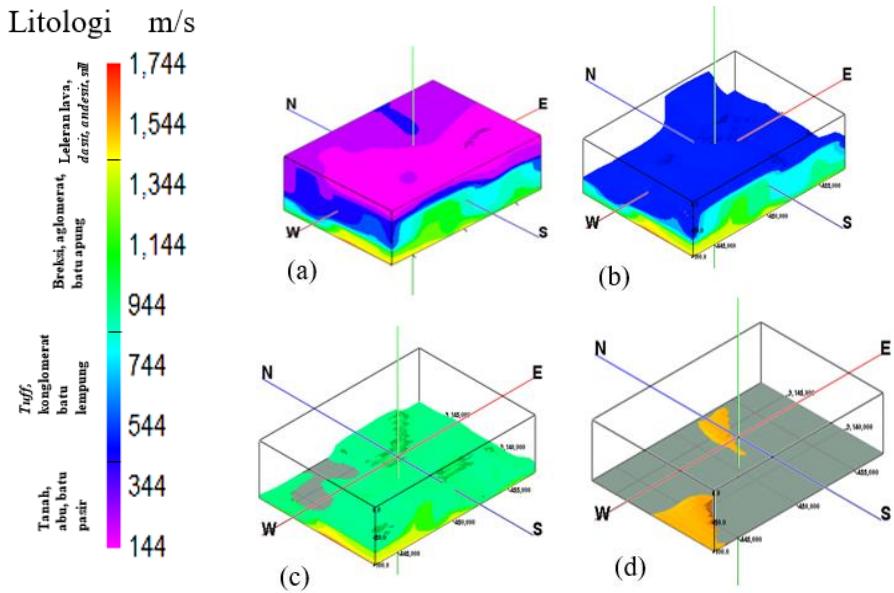


Gambar 31. Pemodelan 3D orientasi hadap Utara, Selatan, Barat dan Timur

Pada pemodelan 3D nilai V_s hasil metode *ellipticity curve* tersebut dapat terlihat bahwa lapisan tanah, abu, dan batuan pasir memiliki nilai V_s antara <175 m/s hingga 350 m/s yang diwakili oleh spektrum warna ungu dengan lapisan yang cukup tebal pada sisi Timur, Barat, dan Utara yang berada pada Formasi Merapi Muda, kemudian material *tuff* konglomerat, dan batuan lempung memiliki nilai V_s

antara 350 m/s sampai 750 m/s yang diwakili oleh spektrum warna biru yang cukup tebal pada sisi Timur, Barat, dan Utara yang berada pada Formasi Merapi Muda juga, dan untuk material breksi, aglomerat, dan batu apung memiliki nilai V_s dengan rentang nilai antara 750 m/s sampai 1500 m/s yang diwakili oleh spektrum warna hijau, dengan persebaran material yang cukup tebal didominasi di wilayah selatan titik penelitian, yaitu yang berada di sekitar wilayah zona II Formasi Kebobutak, dan untuk material keras seperti leleran lava, *dasit*, *andesit* dan *sill* memiliki nilai V_s antara 1500 m/s sampai >1500 m/s diwakili dengan spektrum warna kuning hingga merah.

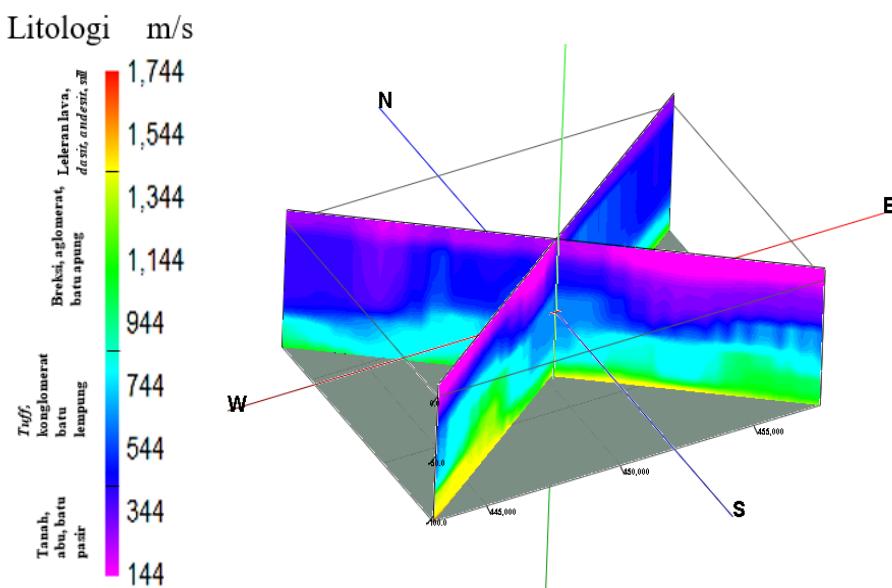
Berdasarkan model 3D tersebut, persebaran batuan cukup merata di permukaan dengan ketebalan lapisan yang cukup tebal jika dilihat dari berbagai sisi, untuk nilai V_s paling tinggi dengan nilai 1744 m/s diwakili oleh spektrum warna merah yang hanya muncul sangat sedikit di lapisan akhir. Litologi dengan klasifikasi nilai V_s ditunjukkan pada Gambar 32.



Gambar 32. Model 3D berdasarkan klasifikasi jenis tanah menurut RSNI 1726(2010)
 (a) model 3D *full* litologi (b) model 3D tanpa lapisan tanah (c) model
 3D tanpa lapisan tanah dan batuan lunak (d) model 3D batuan keras

Gambar 32(a) menunjukkan model 3D *full* litologi di daerah penelitian. Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa spektrum warna pada model menunjukkan interpretasi litologi dengan nilai V_s . Gambar 32(b) menunjukkan jika material tanah, abu, dan batuan pasir yang disayat atau dihilangkan dari model maka akan terlihat bahwa persebaran *tuff* dan batuan konglomerat menyebar dengan ketebalan yang berbeda. Pada sisi Barat dan Timur material lapisan ini cenderung lebih tipis. Gambar 32(c) menunjukkan persebaran material breksi, aglomerat, dan batu apur dengan persebaran material yang cukup tebal yaitu pada sisi Timur dan Barat, pada sisi Utara terlihat bahwa material sangat tipis bahkan untuk sisi Barat Laut tidak terlihat. Hal ini sesuai dengan analisis *multilog* 3D pada wilayah Utara yang didominasi oleh Formasi Merapi Muda, yaitu didominasi oleh material *tuff*

dan abu dengan sedikit material breksi dan aglomerat. Sedangkan Gambar 32(d) menunjukkan persebaran batuan di bagian dasar penelitian yang terdiri atas leleran lava, *dasit*, *andesit*, dan *sill*. Pada sisi Utara batuan merupakan leleran lava yang menjadi penyusun litologi pada titik 37 yang berada di daerah Kalikebo, kemudian untuk sisi Barat Daya batuan merupakan *dasit* dan *andesit* yang berada pada titik 18.



Gambar 33. Sayatan persebaran kecepatan gelombang geser

Pada Gambar 33 dapat terlihat hasil pemodelan 3D yang telah dilakukan sayatan *x-cross*. Pada sisi Barat Daya dan Tenggara terlihat litologi berupa tanah lunak hingga batuan lunak terlihat cukup tebal yang ditunjukkan oleh spektrum warna ungu hingga biru tua. Oleh karena itu besar kemungkinan wilayah penelitian yaitu Kacamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno mengalami potensi bahaya kerusakan yang cukup besar dari kondisi litologi penyusun formasi geologinya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai kecepatan gelombang geser permukaan (V_s) pada lokasi penelitian relatif seragam. Untuk zona I (Formasi Merapi Muda) dari 23 titik pengukuran persebaran nilai V_s pada *layer* pertama memiliki rentang nilai antara 50,15 m/s sampai 274 m/s dan untuk *layer* terakhir memiliki nilai V_s antara 414 m/s sampai 1657 m/s. Zona II (Formasi Semilir) yang berjumlah 1 titik pengukuran memiliki nilai V_s pada *layer* pertama sebesar 52,09 m/s dan *layer* terakhir memiliki nilai V_s sebesar 1744,5 m/s. Kemudian untuk zona III (Formasi Kebobutak) dengan jumlah titik pengukuran sebanyak 6 titik pengukuran persebaran nilai V_s pada *layer* pertama memiliki rentang nilai antara 50,75 m/s sampai 203,42 m/s dan untuk *layer* terakhir memiliki nilai V_s antara 1035,36 m/s sampai 1555,08 m/s.
2. Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten memiliki litologi penyusun struktur bawah permukaan yang didominasi oleh abu dan *tuff* yang tebal pada zona Formasi Merapi Muda, konglomerat dan aglomerat yang cukup tebal pada zona Formasi Kebobutak, *dasit andesit* dan batu lempung pada zona Formasi Semilir.

3. Analisa litologi memperlihatkan bahwa Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno adalah wilayah yang mempunyai potensi bahaya kerusakan yang cukup parah, karena didominasi oleh material tanah lunak yang cukup tebal.

B. Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk mencari data bor yang berada di wilayah tersebut agar litologi bawah permukaan yang dihasilkan lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z., dkk. 2009. *Deformasi Koseismik dan Pascaseismik Gempa Yogyakarta 2006 dari Hasil Survei GPS*. Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 4 No. 4 hal. 275-284
- Ammon, Charles J. (2005). *An Introduction to Earthquakes*. Pennsylvania: PennState Department of Geosciences
- Aster, Rick. (2011). *The Seismic Wave Equation*. New Mexico: New Mexico Institute of Mining and Technology
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2013). *Data Indeks Rawan Bencana Provinsi Jawa Tengah*. Diakses dari <http://bnpb.go.id/uploads/migration/pubs/441.pdf> pada tanggal 10 Maret 2017, jam 23.15 WIB
- Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG). (2015). *Pengertian Gempa Bumi*. Diakses dari <http://balai3.denpasar.bmkg.go.id/tentang-gempa> pada tanggal 03 Mei 2017, jam 14.38 WIB.
- Badan Standarisasi Nasional (SNI) 1726. (2010). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa dan Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung*. Jakarta
- BAPPEDA. (2006). *Data Bencana Kabupaten Klaten 2009-2013*. Klaten.
- Bates, R. L. dan Jackson, J. A., (1987). *Glossary of Geology*. American Geological Institute.
- Bothe, A.CH.G., (1929), *Jiwo Hills and Soutern Range*, Excurcion Guide. IVth Pacific Sci. Cong. Bandung.
- Burger, H.R. (1992). *Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface*. Englewood Cliffs. NJ
- Damarla, Raju and David Ufford. (2007). *Personnel Detection Using Ground Sensors*. US: US Army Research Laboratory
- Daryono. (2011). *Indeks Kerentanan Seismic Berdasarkan Mikrotremor Pada Setiap Satuan Bentuk Lahan Di Zona Graben Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta*. Disertasi, Fakultas Geografi: Universitas Gadjah Mada.
- Dentith, Michael and Stephen Mudge. (2014). *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. New York: Cambridge University Press

- Energi dan Sumber Daya Manusia (ESDM). (2015). *Pengenalan gempa bumi*. Diakses dari https://www.esdm.go.id/assets/media/content/Pengenalan_Gempa_Bumi.pdf pada tanggal 03 Mei 2017, jam 18.22 WIB.
- Elnashai, S.A. dan Sarno, D.L.,(2008), *Fundamental of Earthquake Engineering*. Hongkong: Wiley.
- Gadallah, R.M., & Fisher, R. (2009). *Exploration Geophysics*. Berlin: Springer.
- Geofisika ITB. (2017), Studi Seismik Hazard & Analisis Resiko dengan Pendekatan Probabilitas di Pulau Jawa. Bandung: Teknik Geofisika.
- Hidayati, S. (2010). *Pengenalan Seismologi Gunungapi. Diklat Pelaksana Pemula Pengamat Gunungapi Baru*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.
- Hogiber, M. (2011). *Polarization Of Surface Waves : Characterization, Inversion and Application to Seismic Hazard Assessment*. France: University of Grenoble.
- Ibrahim, Gunawan dan Subardjo. (2005). *Pengetahuan Seismologi*. Jakarta: Badan Meteorologi dan Geofisika.
- Imam Gazali. (2017). *Estimasi Kecepatan Gelombang Geser (Vs) berdasarkan Inversi Mikrotremor Spectrum Horizontal To Vertical Spectral Ratio (HVSR) Studi Kasus: Tanah Longsor Desa Olak Alen, Blitar*. Skripsi. Departemen Teknik Geofisika: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Institut Teknologi Surabaya (ITS). (2016). *Gelombang Seismik* Diakses dari http://repository.its.ac.id/3612/1/1112100105-Undergraduate_Theses.pdf pada tanggal 04 Mei 2017, jam 22.35 WIB.
- Kanli, A. (2011).*Surface Wave Analysis for Site Effect Evaluation*. US: University of California Santa Barbara
- Kanai, K., (1983). *Engineering Seismology*. Japan: University of Tokyo Press.
- Katili, J.A. (1963). *Geologi*. Michigan: Departemen Urusan Research Nasional
- Kusumawati, N. (2014). *Analisis Struktur Lapisan Tanah Berdasarkan Ketebalan Sedimen Dan Identifikasi Resiko Gempabumi Di Kabupaten Kulon Progo Menggunakan Mikrotremor*. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta

Lang, D.H., and Schwarz, J., (2004), *Instrumental Subsoil Clasification of Californian Strong Ground Motion Site Based on Single Measurments*, Volume 1,pp.6.

Lowrie, William. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. New York: Cambridge University Press

Manzella, A.,(1990). *Geophysical Methods in Geothermal Exploration*. Pisa, Italy: Italian National Research Council International Institute for Geothermal Research.

Marjiyono. (2010). *Estimasi Karakteristik Dinamika Tanah dari Data Mikrotremor*. Tesis. Bandung: Program Studi Geofisika Terapan, ITB Bandung

Mirzaoglu, M., and Dykmen, U., (2003). *Application of microtremors to seismic microzoning procedure*. Balkan: Journal of the Balkan Geophysical, Vol. 6, No. 3

Munadi dan Suprajitno. (1993). *AVO dan Eksplorasi Gas*, Lembaran publikasi LEMIGAS, No.1, 1993, 3-13.

Nakamura, Y. (2000). *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's Technique and its application*. Japan: System and data research.

Nandi. (2006). *Vulkanisme*. Bandung: Universitas Pendidikan Bandung

Nandi. (2006). *Gempa Bumi*. Bandung: Universitas Pendidikan Bandung

Novianita, A. (2009). *Penggunaan Microtremor Ellipticity Curve Untuk Menentukan Struktur Lapisan Bawah Permukaan Di Daerah Yogyakarta*. Skripsi. Jurusan Fisika: Universitas Diponegoro

Ostrander, W.J. (1984). *Plane Wave Reflection Coefficients for Gas Sands at Nonnormal Angles of Incidence*, Geophysics, 49, 1637-1648.

Pemerintah Kabupaten Klaten. (2011). *Geografi dan Topografi Kabupaten Klaten*. Diakses dari <http://klatenkab.go.id/geografi-dan-topografi-kabupaten-klaten/> pada tanggal 10 Maret 2017, jam 21.34 WIB.

Pemerintah Kabupaten Klaten. (2011). *Peta Kabupaten Klaten*. Diakses dari <http://klatenkab.go.id/peta-kabupaten-klaten/> pada tanggal 11 Maret 2017, jam 10.49 WIB.

Pettijohn, F.J., Potter, P.E., dan Siever, R., (1987), *Sand and Sandstones*, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 553h.

Prakash, S. (1981), "Dynamic Earth Pressures," *State of the Art Report - International Conference on Recent Advances on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, Vol. III, pp. 993-1020

Reid, H.F. (1906). *The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission*, Vol.2. Washington, D.C: Carnegie Institution of Washington

Raharjo, Wartono, Sukandarrumidi, H.M.D. Rosidi. (1995). *Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa*. Direktorat Geologi, Departemen Pertambangan Republik Indonesia.

Satriawan, M. 2007. *Kuliah Fisika Dasar Teknik Sipil 2007: Getaran dan Gelombang*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada

Seed, H. B. and Schnabel, P. B., (1972). *Soil and Geological Effects on Site Response During Earthquakes. Proc. of First International Conf. on Microzonation for Safer Construction – Research and Application*, vol. I, pp 61-74.

Sheriff, R.E. and Geldart, L.P., (1995). *Exploration Seismology* Cambridge University Press, Second Edition

SESAME. 2004. *Guidelines For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations*. Europe: SESAME European research project.

Setiawan, Budi. (2008). *Pemetaan Tingkat Kekerasan Batuan Menggunakan Metode Seismik Refraksi*. Universitas Indonesia: Departemen Geofisika

Sudibyakto. (2000). *Kajian dan Mitigasi Bencana Gempabumi*. Yogyakarta: Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.

Sungkono. (2011). *Karakterisasi Kurva Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio: Kajian Literatur dan Permodelan*. Surabaya: Jurnal Neutrino Vol.4, No.1. Oktober 2011

Surono. (2008). *Litostratigrafi dan Sedimentasi Formasi Kebo dan Formasi Butak di Pegunungan Baturagung, Jawa Tengah Bagian Selatan*, Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 3 No. 4, h.183-193.

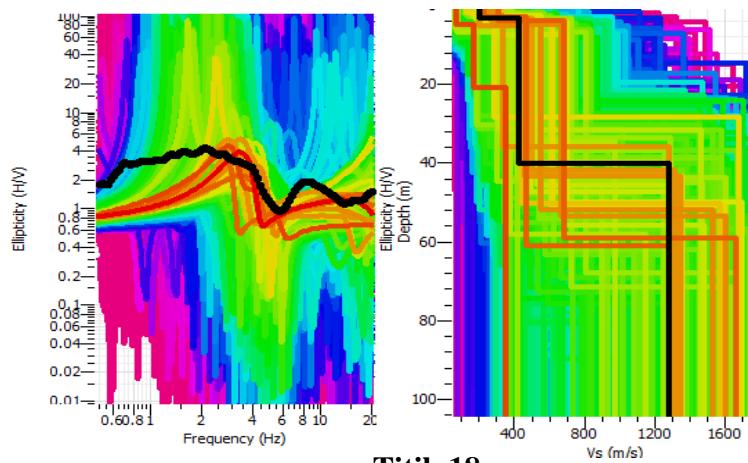
- Susilawati. (2008). *Penerapan Penjalaran Gelombang Seismik Gempa pada Penelaahan Struktur Bagian dalam Bumi*. Sumatera Utara: Universitas Sumatera Utara.
- Sutrisno. (2013). *Profiling Kecepatan Gelombang Geser (Vs) menggunakan Inversi Spektrum Horizontal-to-Spectral Ratio (HVSR)*. Surabaya: Jurnal Teknik Pomits Vol. 1, No. 1,(2013)
- Thomson. (2006). *Geology of the Oceans*. Utah: Brooks/Cole Publishing Company.
- Telford, W.M. et al. (2004). *Apiled Geophysics, Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Wibowo, N. B. 2015. *Rasio Model Vs30 berdasarkan Data Mikrotremor USGS di Kecamatan Jetis Kabupaten Bantul*. Yogyakarta: Jurnal Sains Dasar 2017 6 (1)
- Widodo, P. (2012). *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar
- Young & Freedman. (2003). *Fisika Universitas Jilid I*. Jakarta: Erlangga.
- Yoshizawa, K. & Kennett, B.L.N. (2002). *Determination of the influence zone for surface wave paths*, Geophys. J. Int., 149: 440-453.

LAMPIRAN

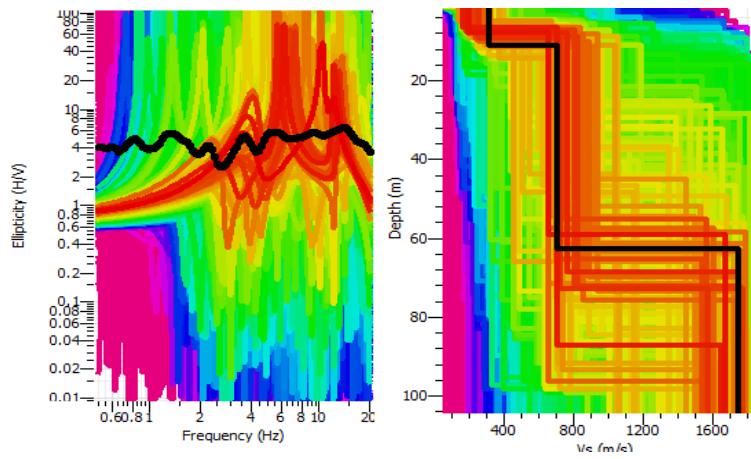
LAMPIRAN 1

KURVA ELLIPTICITY CURVE DAN GROUND PROFILES V_s

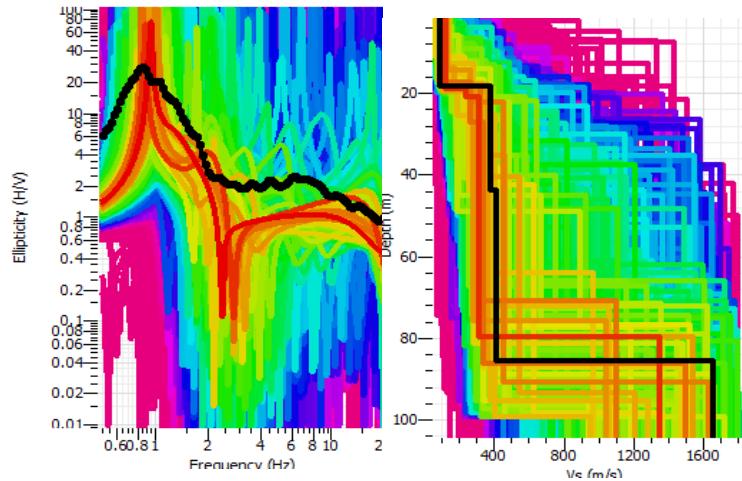
Titik 11



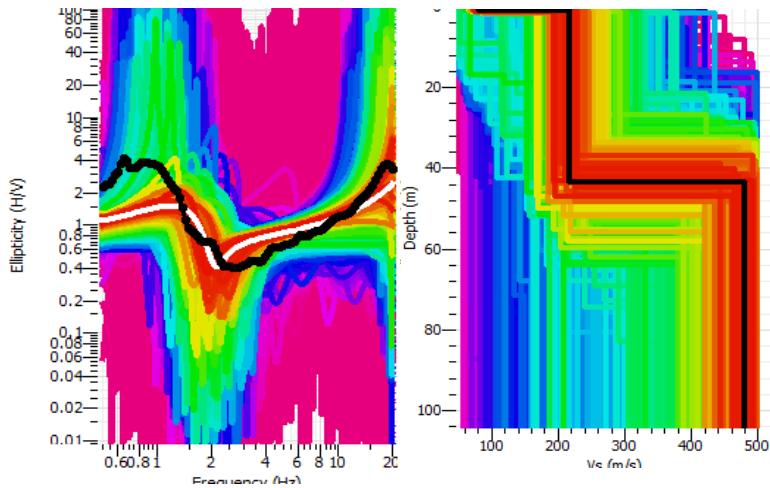
Titik 18



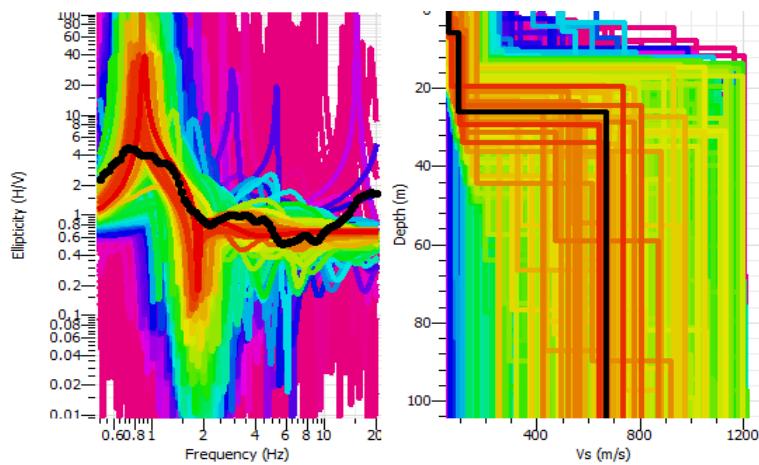
Titik 19



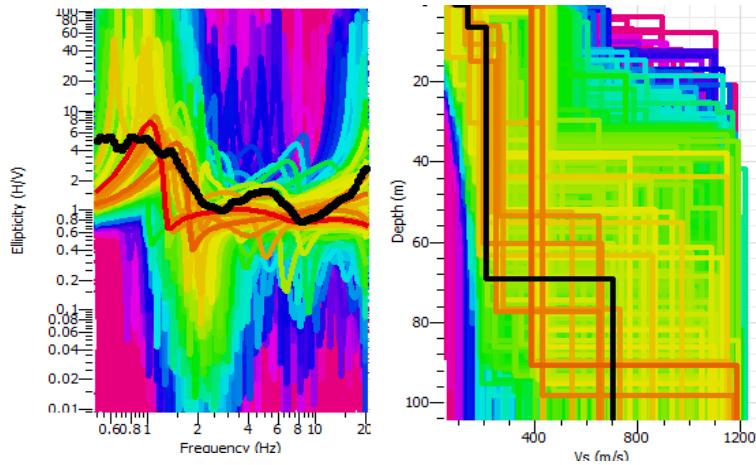
Titik 25



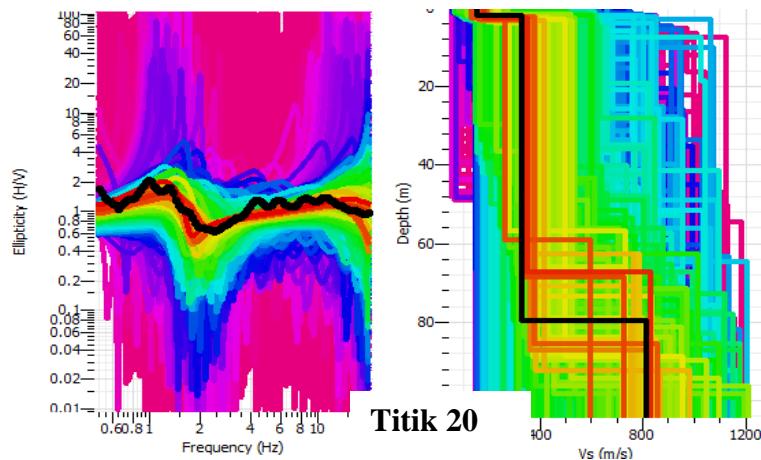
Titik 26



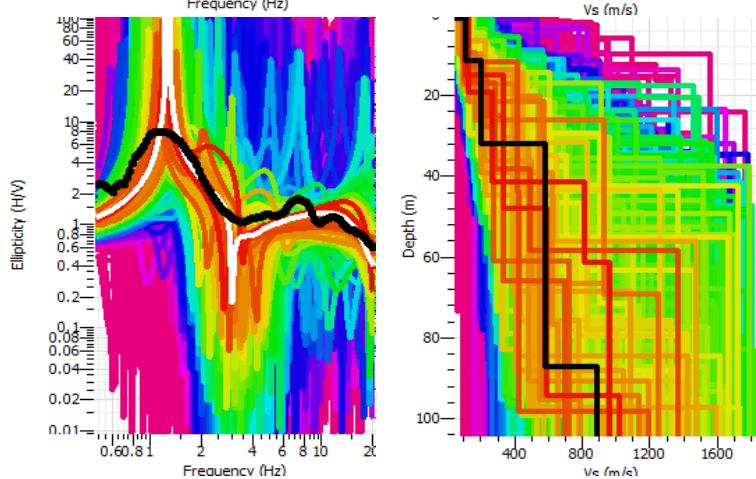
Titik 34



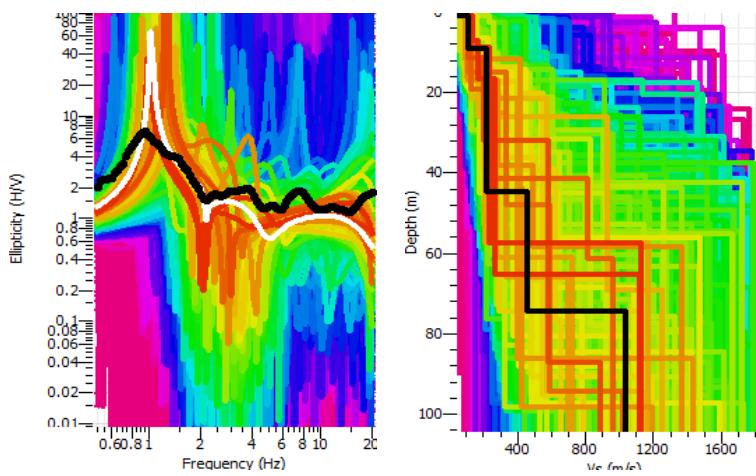
Titik 43



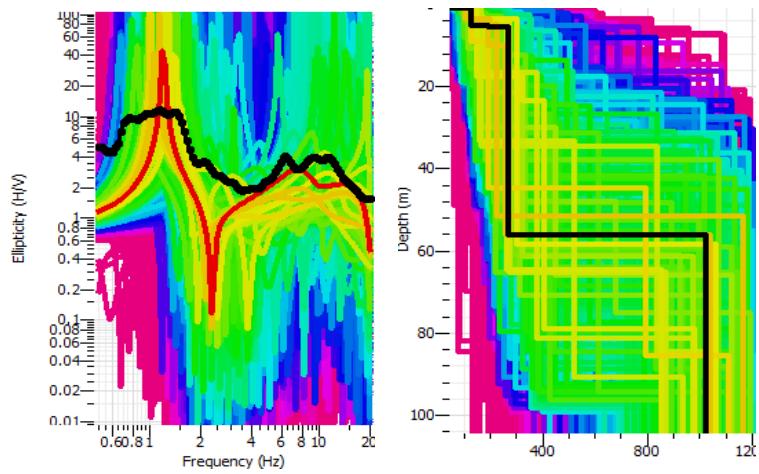
Titik 20



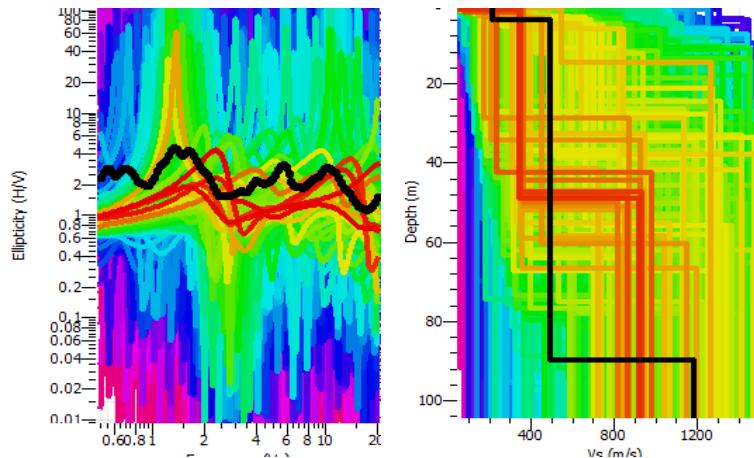
Titik 21



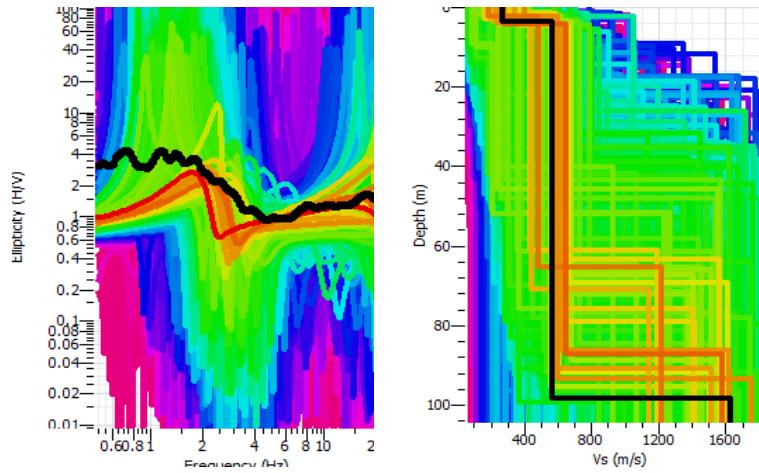
Titik 27



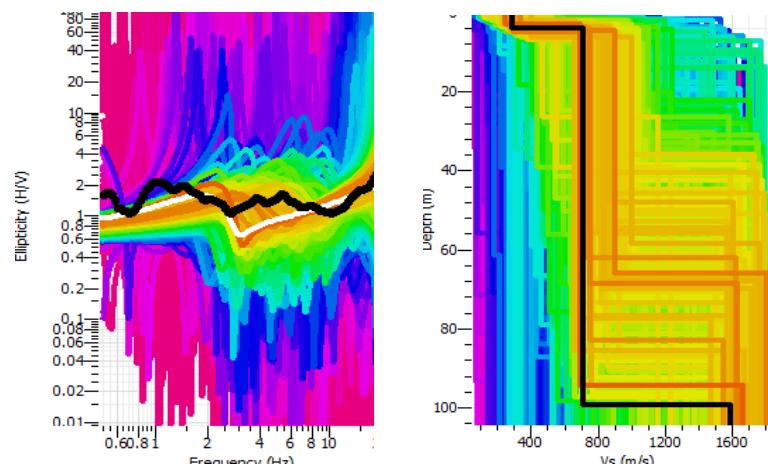
Titik 28



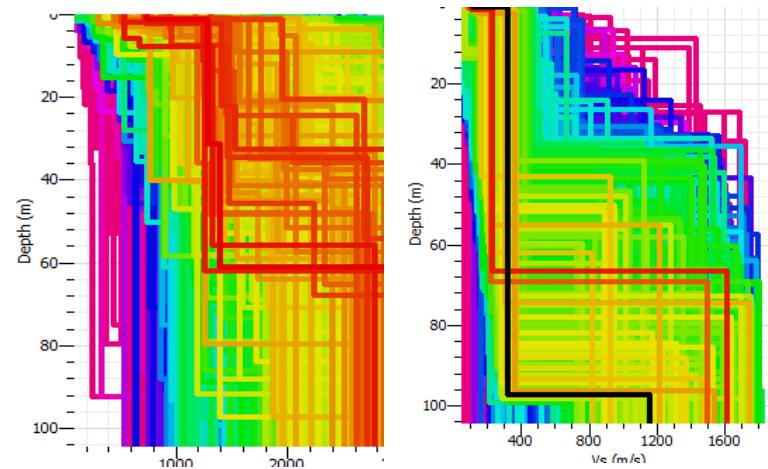
Titik 29



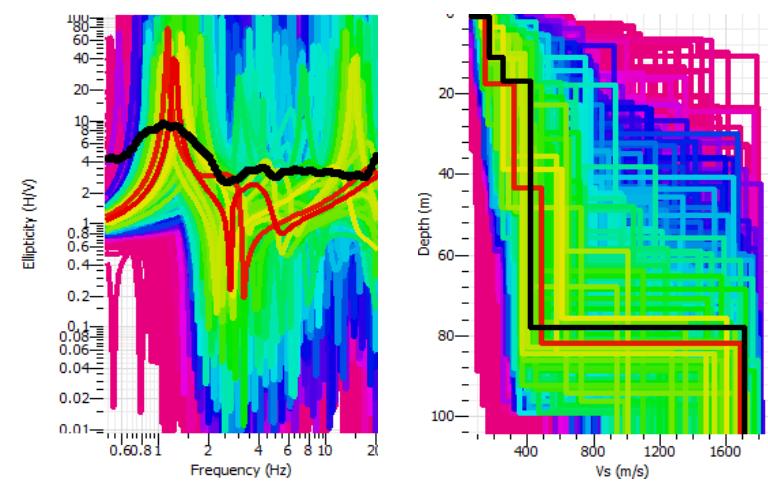
Titik 35



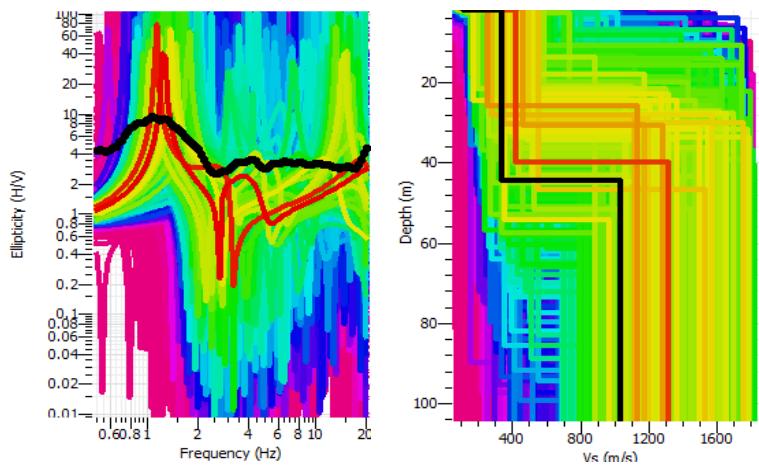
Titik 44



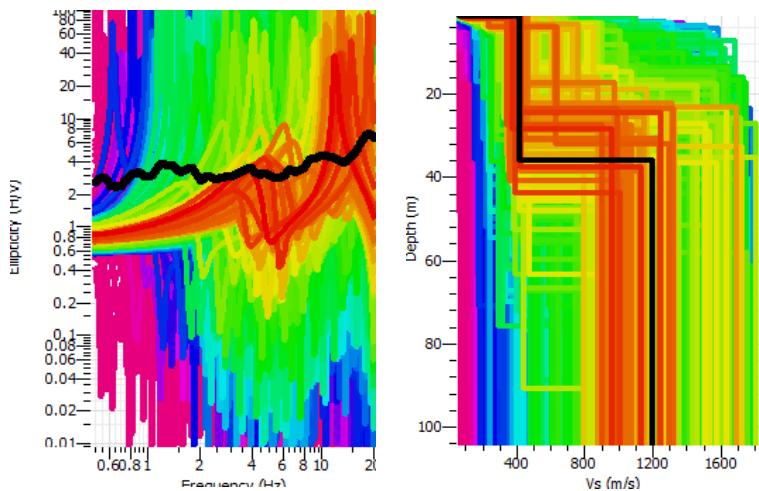
Titik 17



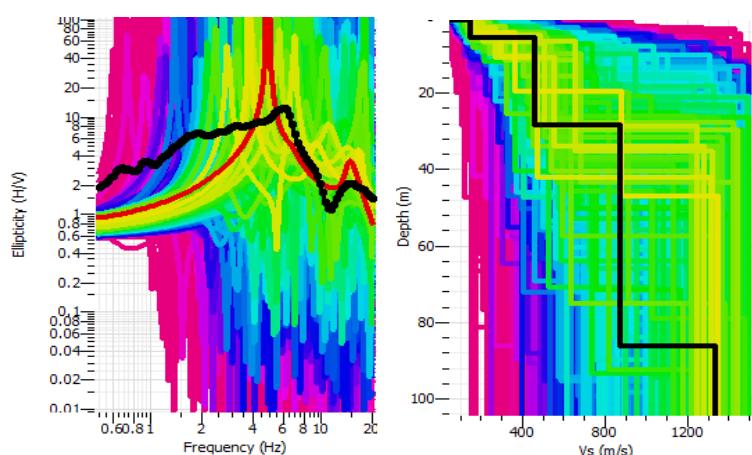
Titik 6



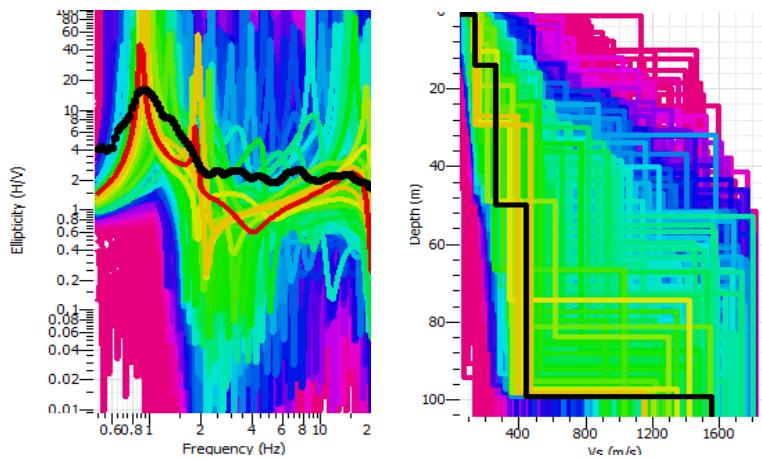
Titik 7



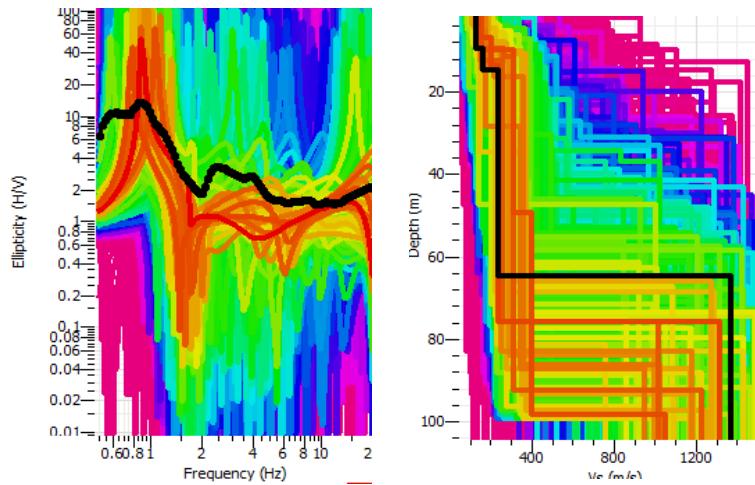
Titik 13



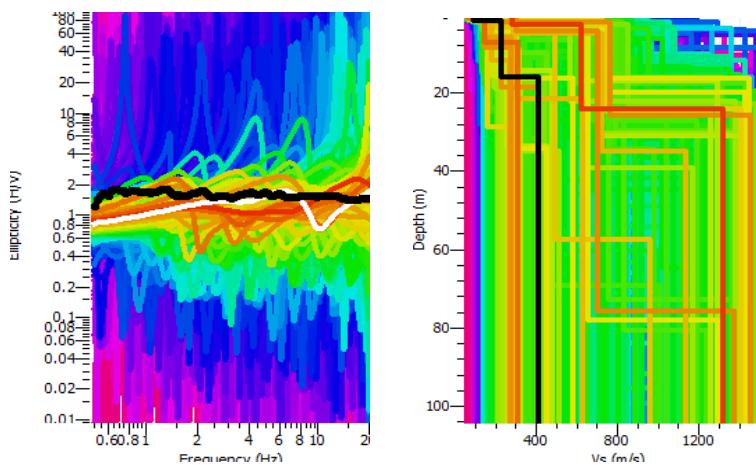
Titik 14



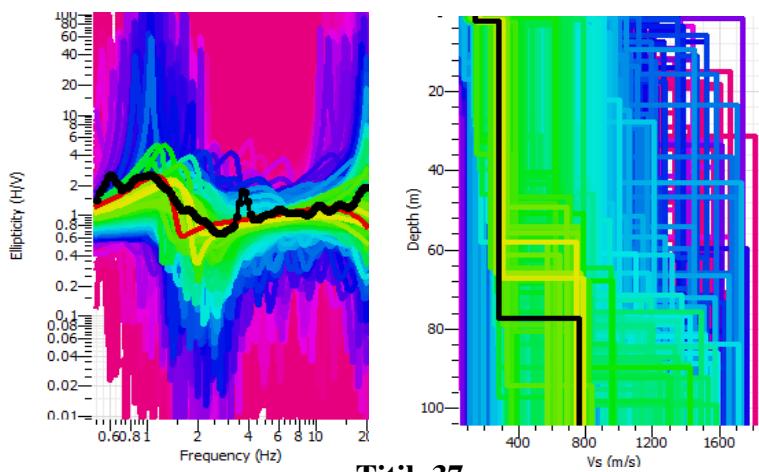
Titik 15



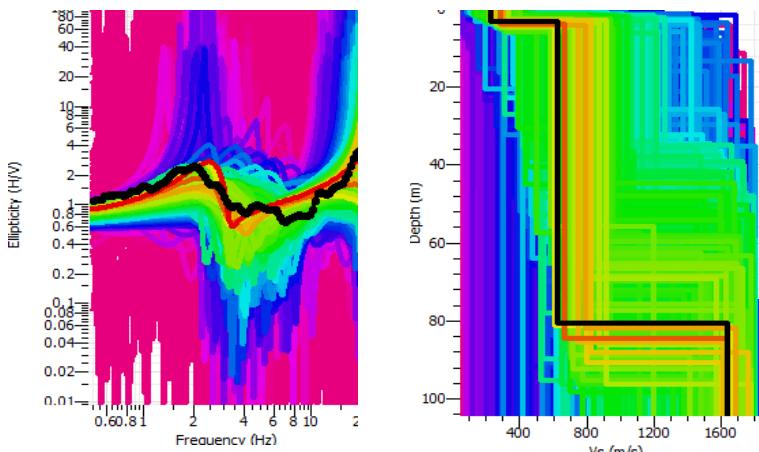
Titik 12



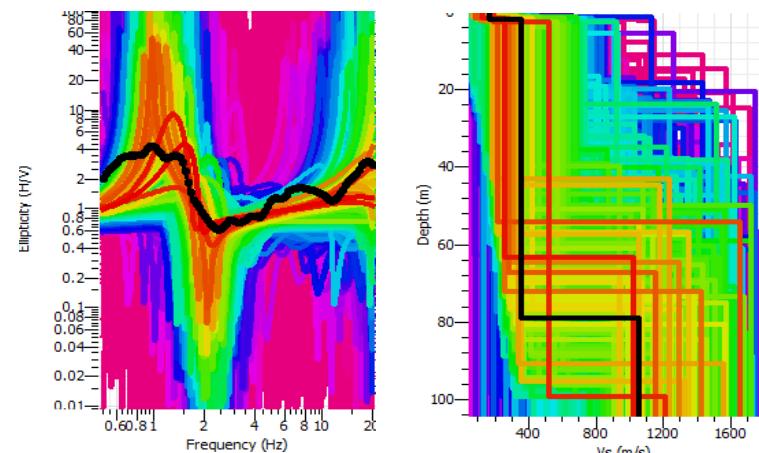
Titik 36



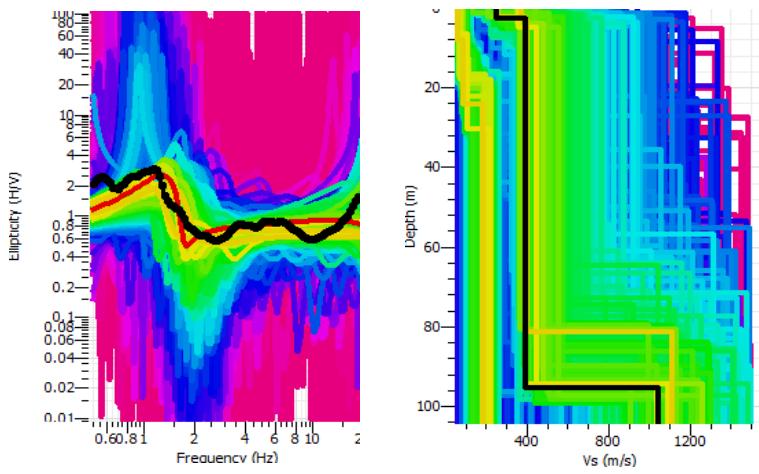
Titik 37



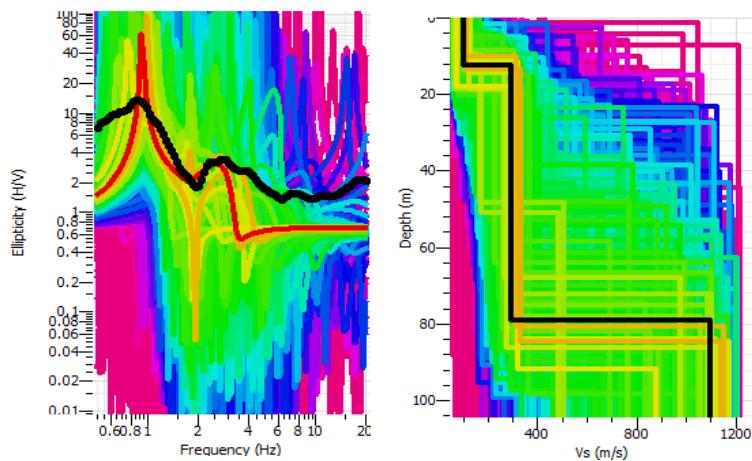
Titik 41



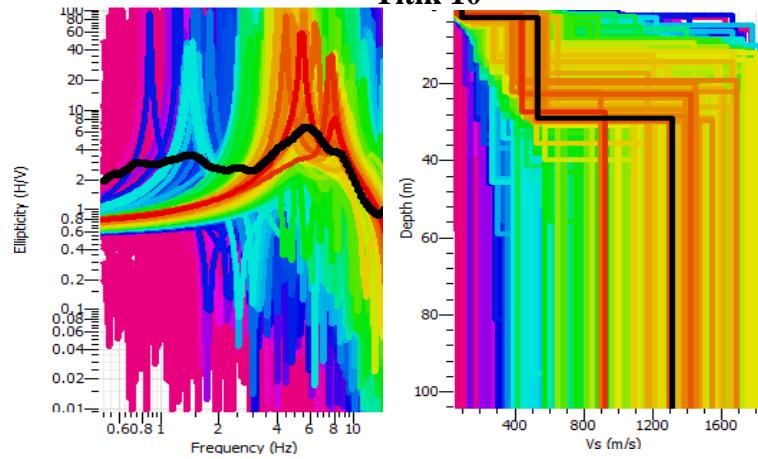
Titik 42



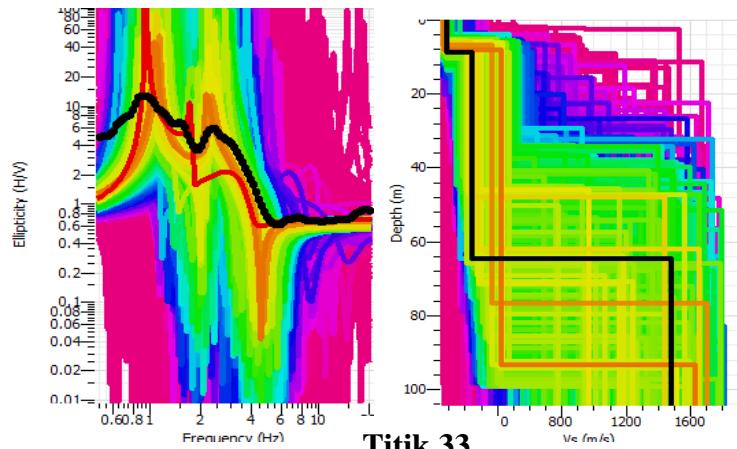
Titik 16



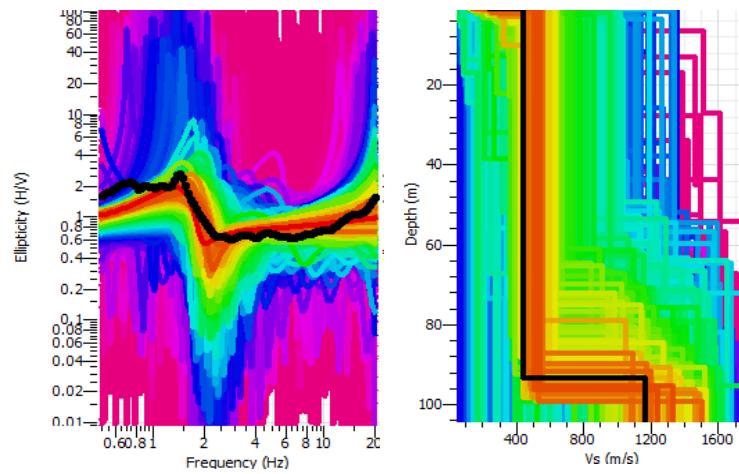
Titik 10



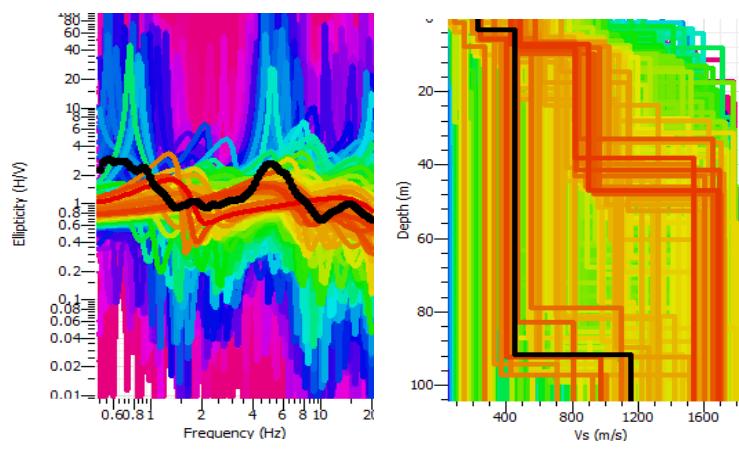
Titik 22



Titik 33



Titik 30

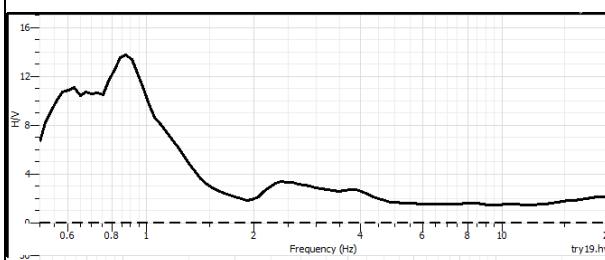


LAMPIRAN 2

KRITERIA KURVA H/V

Titik 12	$f_0 = 1.26$ $A_0 = 1.44$ Kriteria Reliabel i. $1,26 > 0,5$ ii. $740.99 > 200$ iii. $0,537 < 2$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i. $1,375 < 1,625$ ii. $1,459 < 1,625$ iii. $3,52 > 2$ iv. Terpenuhi v. $0,035 < 0,12$ vi. $0,537 < 1,78$
Titik 15	$f_0 = 0.907588$ $A_0 = 11.3798$ Kriteria Reliable i. $0.907588 > 0,5$ ii. $411.857 > 200$ iii. $0.513 > 2$ Kriteria <i>Clear Peak</i> i. $2,241 < 1,487$ ii. $2,45 < 1,487$ iii. $11.3798 > 2$ i. Tidak terpenuhi iv. $- < 0,5575$ v. $0.513 < 3$

Titik 16



Unclear Low Frequency

$$f_0 = 0.874392$$

$$A_0 = 9.0645$$

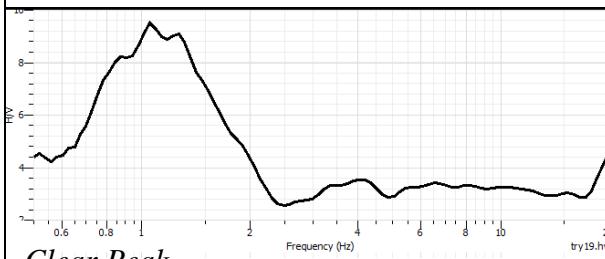
Kriteria Reliable

- i. $0.874392 > 0,5$
- ii. $3195,8 > 200$
- iii. $1,002656 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $4,227685 < 2,3825$
- ii. $1,418106 < 2,3825$
- iii. $4,765 > 2$
- iv. Terpenuhi
- v. $0,122474 < 0,725$
- vi. $1,002656 < 3$

Titik 17



Clear Peak

$$f_0 = 2,25$$

$$A_0 = 6,105$$

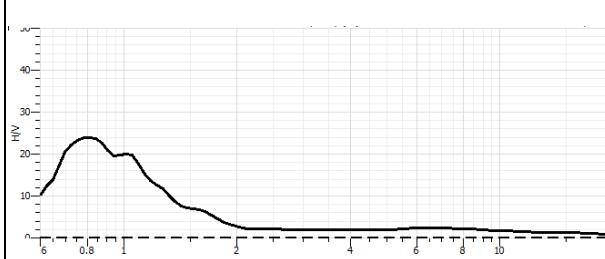
Kriteria Reliabel

- i. $2,25 > 0,5$
- ii. $1725 > 200$
- iii. $0,7455 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $5,22 < 3,012$
- ii. $3,915 < 3,012$
- iii. $6,024 > 2$
- iv. Terpenuhi
- v. $0,1224 < 0,1875$
- vi. $0,7455 < 1,58$

Titik 19



Clear Peak

$$f_0 = 1,25$$

$$A_0 = 6,105$$

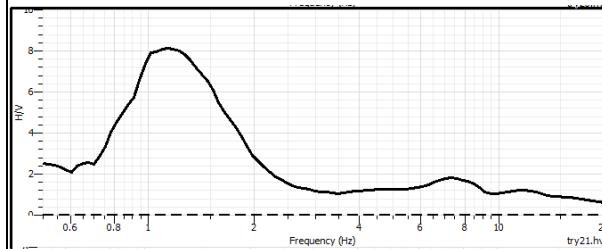
Kriteria Reliable

- i. $1,25 > 0,5$
- ii. $1344 > 200$
- iii. $1,974144377 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $7,575729 < 2,145$
- ii. $1,582833 < 2,145$
- iii. $4,29 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $0,108012 < 0,7$
- vi. $1,974144377 < 3$

Titik 20



Clear Peak

$$f_0 = 1.13497$$

$$A_0 = 5.10704$$

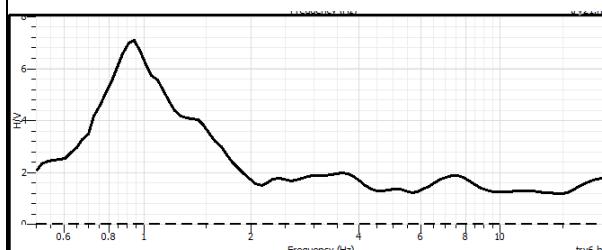
Kriteria Reliabel

- i. $1.13497 > 0,5$
- ii. $288 > 200$
- iii. $1,638 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $4,016 < 3,6945$
- ii. $2,4805 < 3,6945$
- iii. $7,389 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $0,05 < 0,12$
- vi. $1,638 < 1,78$

Titik 21



Clear Peak

$$f_0 = 0.942044$$

$$A_0 = 5.18591$$

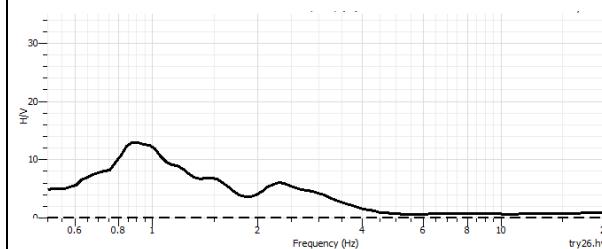
Kriteria Reliabel

- i. $0.942044 > 0,5$
- ii. $264 > 200$
- iii. $1,975 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $4,885 < 3,8205$
- ii. $2,3242 < 3,8205$
- iii. $7,641 > 2$
- iv. Terpenuhi
- v. $0,05 < 0,11$
- vi. $1,975 < 1,78$

Titik 22



Unclear Low Frequency

$$f_0 = 0.874392$$

$$A_0 = 8.77138$$

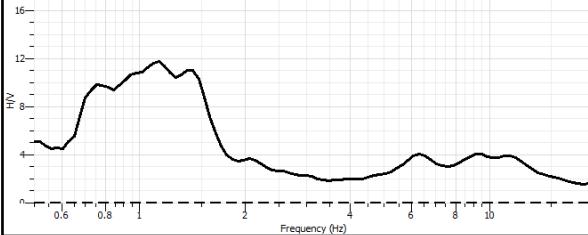
Kriteria Reliable

- i. $0.874392 > 0,5$
- ii. $945 > 200$
- iii. $3,2135 < 2$

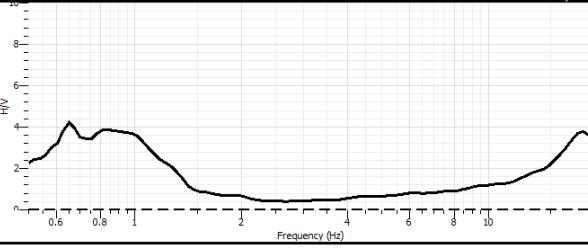
Kriteria *Clear Peak*

- i. $8,94117 < 4,505$
- ii. $1,81036 < 4,505$
- iii. $9,01 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $0,07905 < 0,1175$
- vi. $3,2135 < 1,58$

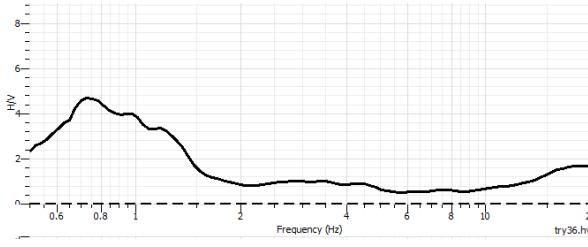
Titik 27

 <p><i>Unclear Low Frequency</i></p>	$f_0 = 1.13497$ $A_0 = 7.10683$ Kriteria Reliabel <ul style="list-style-type: none"> i. $1.13497 > 0,5$ ii. $208 > 200$ iii. $0,98165 < 2$ Kriteria Clear Peak <ul style="list-style-type: none"> i. $5,682427 < 2,8575$ ii. $3,0934 < 2,8575$ iii. $5,715 > 2$ iv. Tidak terpenuhi v. $0,05 < 0,12$ vi. $0,98165 < 2$
---	---

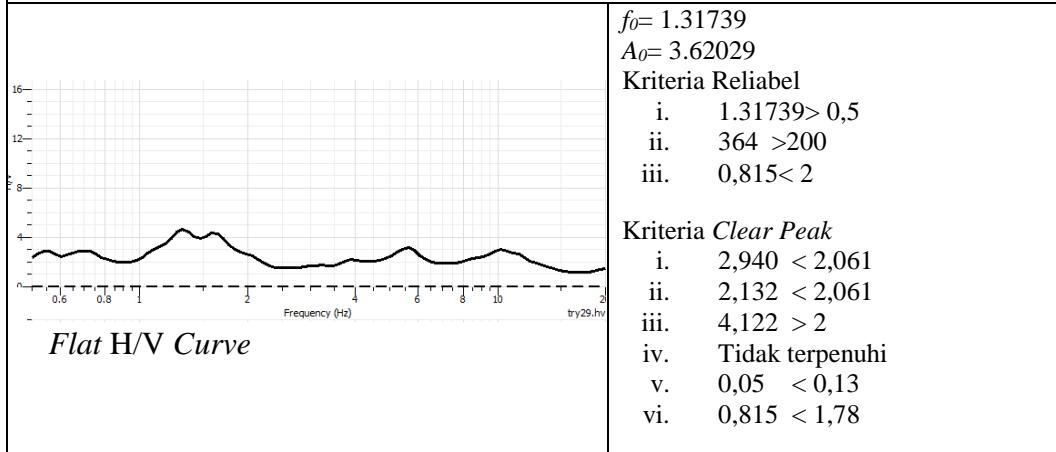
Titik 25

 <p><i>Unclear Low Frequency</i></p>	$f_0 = 0.725762$ $A_0 = 2.57347$ Kriteria Reliable <ul style="list-style-type: none"> i. $1,257 > 0,5$ ii. $330,75 > 200$ iii. $1,007358 < 2$ Kriteria Clear Peak <ul style="list-style-type: none"> i. $2,084033 < 1,724$ ii. $0,637603 < 1,724$ iii. $3,448 > 2$ iv. Tidak terpenuhi v. $- < 0,7$ vi. $1,007358 < 3$
--	---

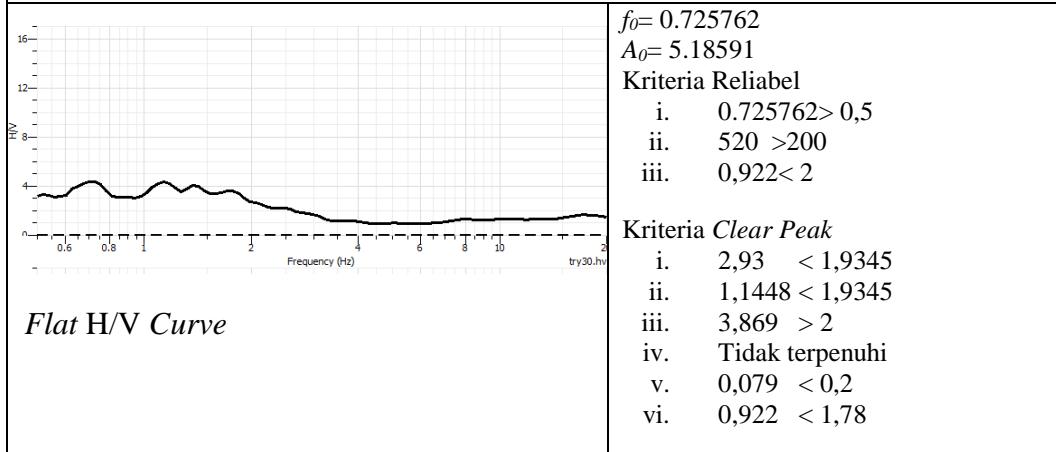
Titik 26

 <p><i>Unclear Low Frequency</i></p>	$f_0 = 0.775762$ $A_0 = 2.47347$ Kriteria Reliable <ul style="list-style-type: none"> i. $0.775762 > 0,5$ ii. $632,0196 > 200$ iii. $0,90203 < 2$ Kriteria Clear Peak <ul style="list-style-type: none"> i. $2,440779 < 2,3$ ii. $1,264535 < 2,3$ iii. $4,6 > 2$ iv. Tidak terpenuhi v. $- < 0,7$ vi. $0,90203 < 3$
---	--

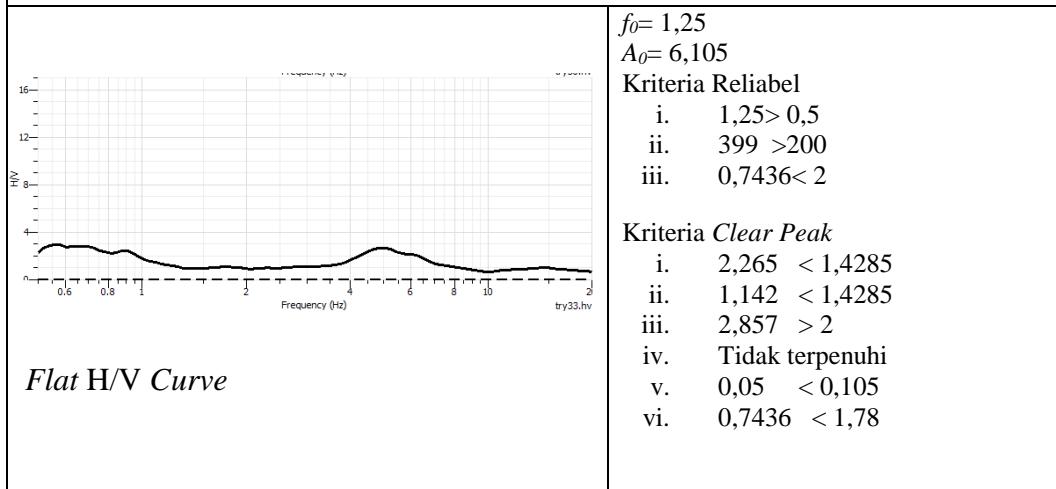
Titik 28



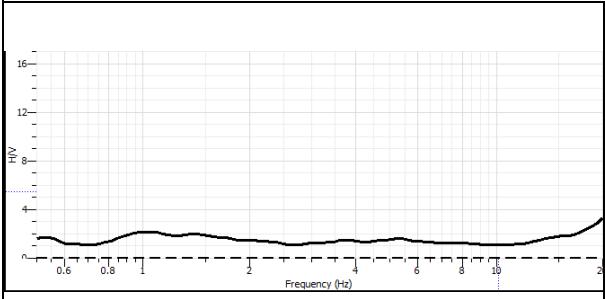
Titik 29



Titik 30



Titik 35

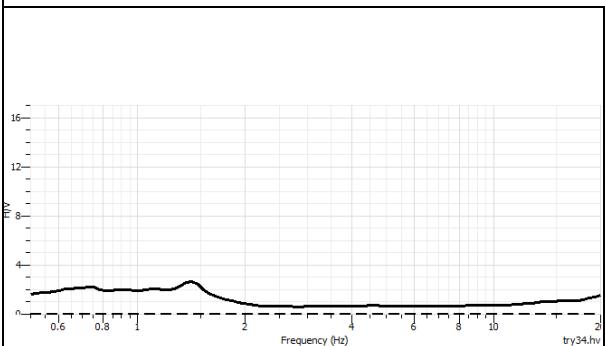


Flat H/V Curve

$f_0 = 1.01493$
 $A_0 = 5.18591$
 Kriteria Reliabel
 i. $1,25 > 0,5$
 ii. $243.5832 > 200$
 iii. $0.251514163 < 2$

Kriteria *Clear Peak*
 i. $1,6879 < 1,564$
 ii. $1,4444 < 1,564$
 iii. $3,128 > 2$
 iv. Terpenuhi
 v. $0,0353 < 0,11$
 vi. $0.251514163 < 1,78$

Titik 33

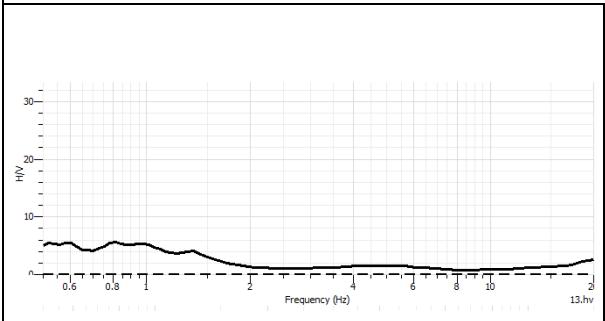


Flat H/V Curve

$f_0 = 1,05$
 $A_0 = 3,105$
 Kriteria Reliable
 i. $1,05 > 0,5$
 ii. $378 > 200$
 iii. $1,038283199 < 2$

Kriteria *Clear Peak*
 i. $1,8852515 < 2,202$
 ii. $1,151692 < 2,202$
 iii. $4,404 > 2$
 iv. Tidak terpenuhi
 v. $- < 0,7$
 vi. $1,038283199 < 3$

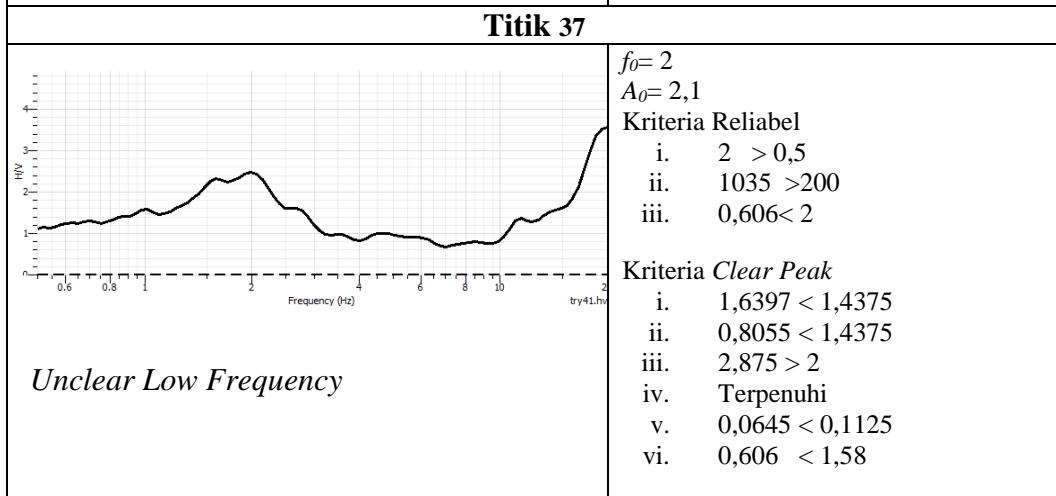
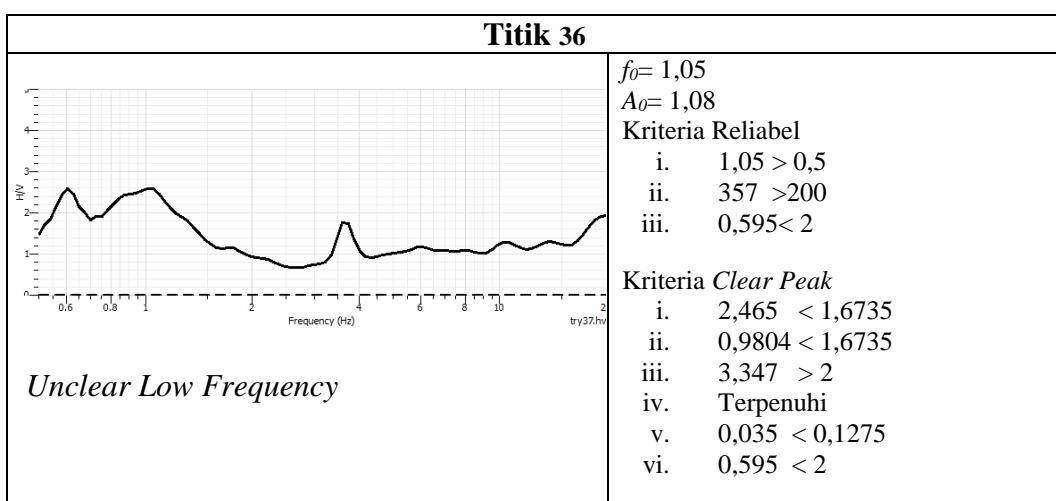
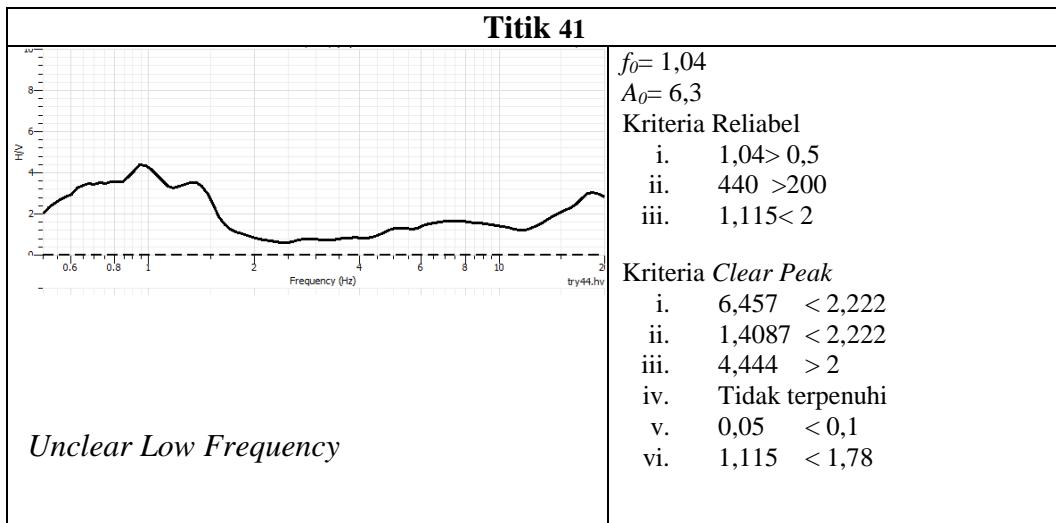
Titik 34



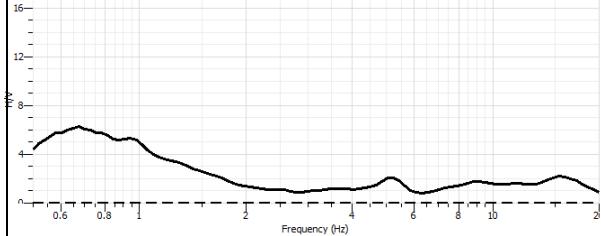
Flat H/V Curve

$f_0 = 1$
 $A_0 = 8,105$
 Kriteria Reliable
 i. $1 > 0,5$
 ii. $300 > 200$
 iii. $1,572378 < 2$

Kriteria *Clear Peak*
 i. $3,19095 < 3,0175$
 ii. $1,794373 < 3,0175$
 iii. $6,035 > 2$
 iv. Tidak terpenuhi
 v. $0,05 < 0,25$
 vi. $1,572378 <$



Titik 44



Unclear Low Frequency

$$f_0 = 0.673642$$

$$A_0 = 3.62029$$

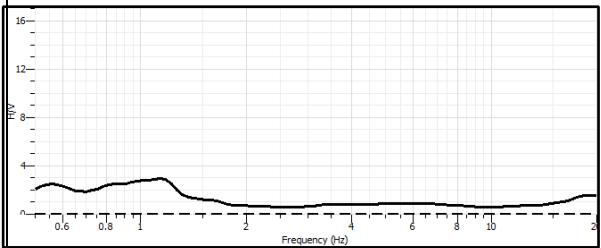
Kriteria Reliabel

- i. $0.673642 > 0,5$
- ii. $245 > 200$
- iii. $0,967685 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $3,846176 < 2,995$
- ii. $2,198323 < 2,995$
- iii. $5,99 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $0,05 < 0,175$
- vi. $0,967685 < 3$

Titik 42



Flat H/V Curve

$$f_0 = 1,25$$

$$A_0 = 6,105$$

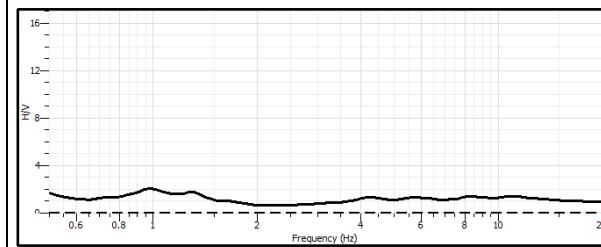
Kriteria Reliabel

- i. $1,1 > 0,5$
- ii. $440 > 200$
- iii. $1,115 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $2,7698 < 1,997$
- ii. $1,1511 < 1,997$
- iii. $3,994 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $0,05 < 0,11$
- vi. $1,115 < 1,78$

43



Flat H/V Curve

$$f_0 = 0.977808$$

$$A_0 = 1.47157$$

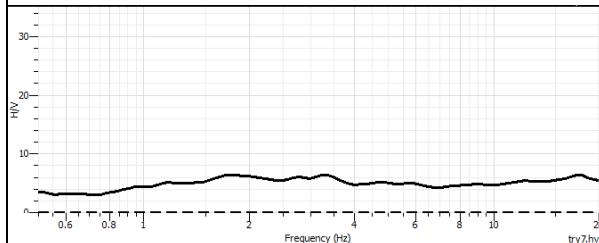
Kriteria Reliable

- i. $0.977808 > 0,5$
- ii. $274,55 > 200$
- iii. $0,300527 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $1,158861 < 0,8975$
- ii. $0,876364 < 0,8975$
- iii. $1,795 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $- < 0,7$
- vi. $0,300527 < 3$

Titik 6



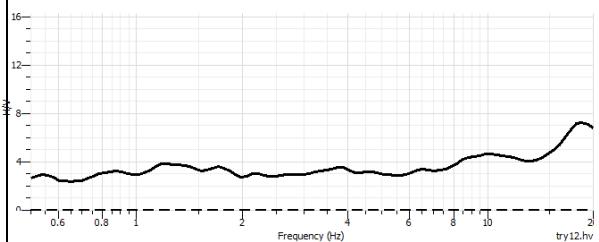
Flat H/V Curve

- $f_0 = 1.77489$
 $A_0 = 4.59287$
 i. $1.77489 > 0,5$
 ii. $1125 > 200$
 iii. $1,928322 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $4,019639 < 3,0525$
- ii. $6,58483 < 3,0525$
- iii. $6,105 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $0,06455 < 0,3125$
- vi. $1,928322 < 3$

Titik 7



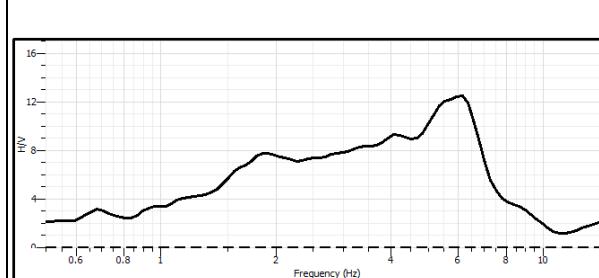
Flat H/V Curve

- $f_0 = 18.5637$
 $A_0 = 6.16662$
 Kriteria Reliable
 iv. $18.5637 > 0,5$
 v. $439,4 > 200$
 vi. $1,371185 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $3,447091 < 3,2555$
- ii. $3,239747 < 3,2555$
- iii. $6,511 > 2$
- iv. Terpenuhi
- v. $0,05 < 0,325$
- vi. $1,371185 < 3$

Titik 10



Clear Peak

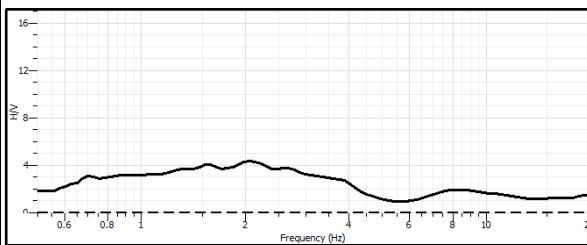
- $f_0 = 6,0$
 $A_0 = 9,4$

- Kriteria Reliabel
 i. $6,0 > 0,5$
 ii. $2436 > 200$
 iii. $1,62 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $3,7339 < 3,6545$
- ii. $2,1293 < 3,6545$
- iii. $7,309 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $0,1947 < 0,29$
- vi. $1,62 < 1,58$

Titik 11



Flat H/V Curve

$$f_0 = 1,057$$

$$A_0 = 6,3$$

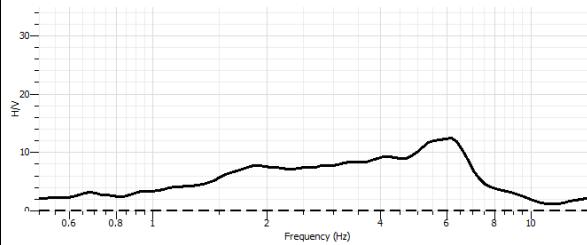
Kriteria Reliable

- i. $1,05 > 0,5$
- ii. $396,9 > 200$
- iii. $1,564623 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $3,033322 < 1,011$
- ii. $5,558224 < 1,011$
- iii. $2,022 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $- < 0,325$
- vi. $1,564623 < 3$

Titik 13



Clear Peak

$$f_0 = 6.07005$$

$$A_0 = 10.993$$

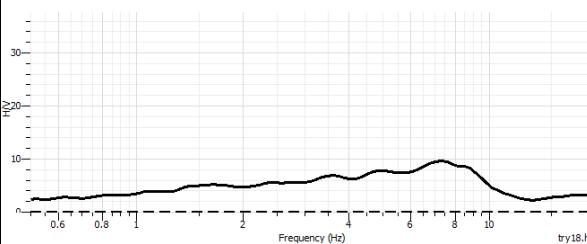
Kriteria Reliable

- i. $2,4 > 0,5$
- ii. $1728 > 200$
- iii. $1,635069 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- i. $4,050709 < 3,8065$
- ii. $7,082437 < 3,8065$
- iii. $7,613 > 2$
- iv. Tidak terpenuhi
- v. $0,093541 < 0,6$
- vi. $1,635069 < 3$

Titik 14



Flat H/V Curve

$$f_0 = 0.907588$$

$$A_0 = 11.3798$$

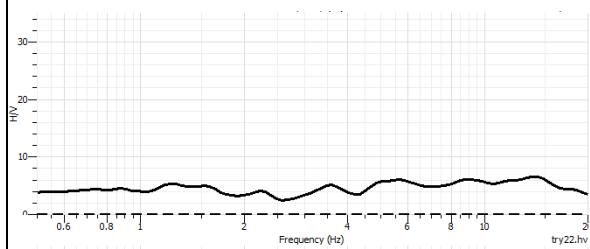
Kriteria Reliable

- i. $0.907588 > 0,5$
- ii. $411.8579889 > 200$
- iii. $3.0347958 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

- ii. $8,878764 < 4,3345$
- iii. $4,687055 < 4,3345$
- iv. $8,669 > 2$
- v. Tidak terpenuhi
- vi. $0,165831 < 1,2125$
- vii. $3.0347958 < 3$

Titik 18



Flat H/V Curve

$$f_0 = 14.3017$$

$$A_0 = 4.99839$$

Kriteria Reliable

- i. $14.3017 > 0,5$
- ii. $34295 > 200$
- iii. $0,295772 < 2$

Kriteria *Clear Peak*

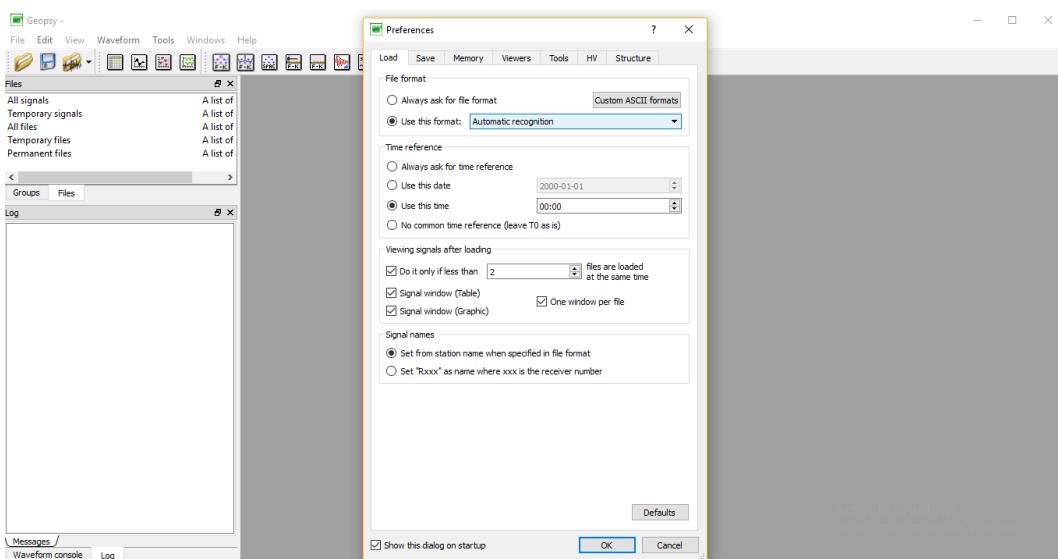
- i. $1,671701 < 2,83$
- ii. $2,900093 < 2,83$
- iii. $6,697 > 2$
- vii. Tidak terpenuhi
- iv. $- < 2,375$
- $0,295772 < 3$

LAMPIRAN 3

TAHAP-TAHAP PENGOLAHAN DATA

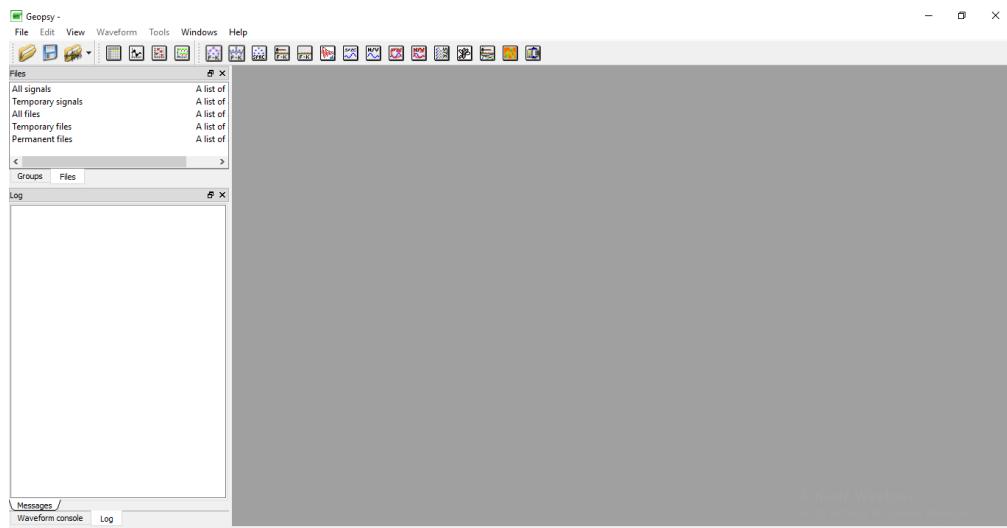
A. Menganalisis Data Mikrotremor Menggunakan *software Sesarray-Geopsy*

1. Membuka aplikasi *software Sessaray-Geopsy*, maka akan muncul:



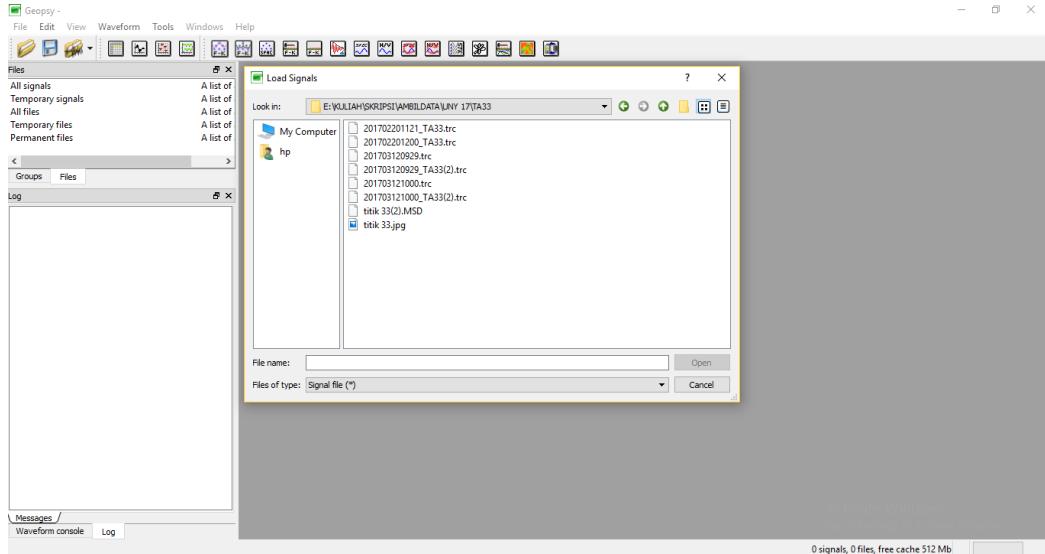
Gambar L1. Tampilan awal *software Sesaray-Geopsy*

2. Klik *Oke*, maka akan muncul:



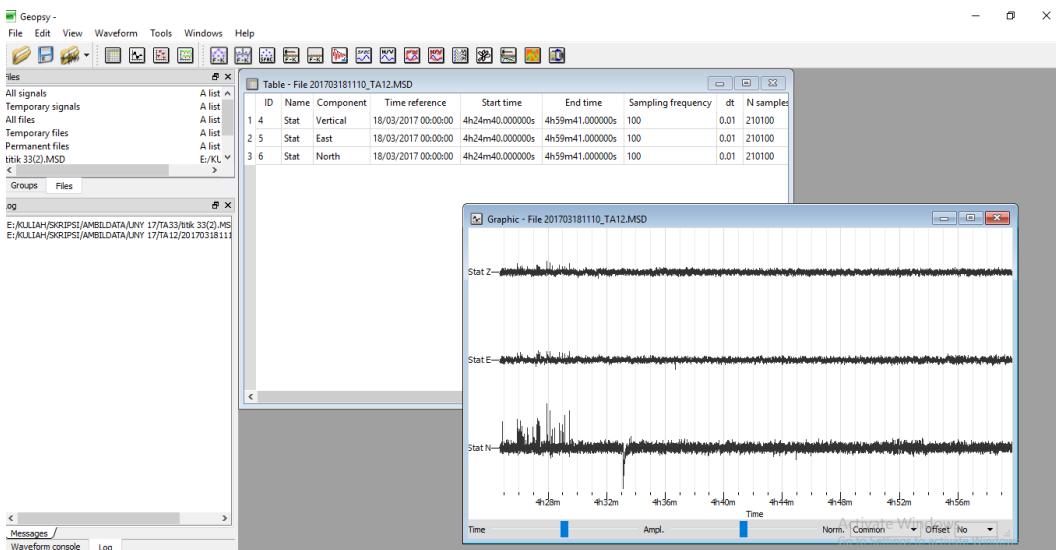
Gambar L2. Tampilan setelah memilih *Oke* pada kotak *Preferences*

3. Klik *Import Signals*, kemudian mencari file penyimpanan data titik pengukuran, dipilih bentuk MSD kemudian klik *Open*.



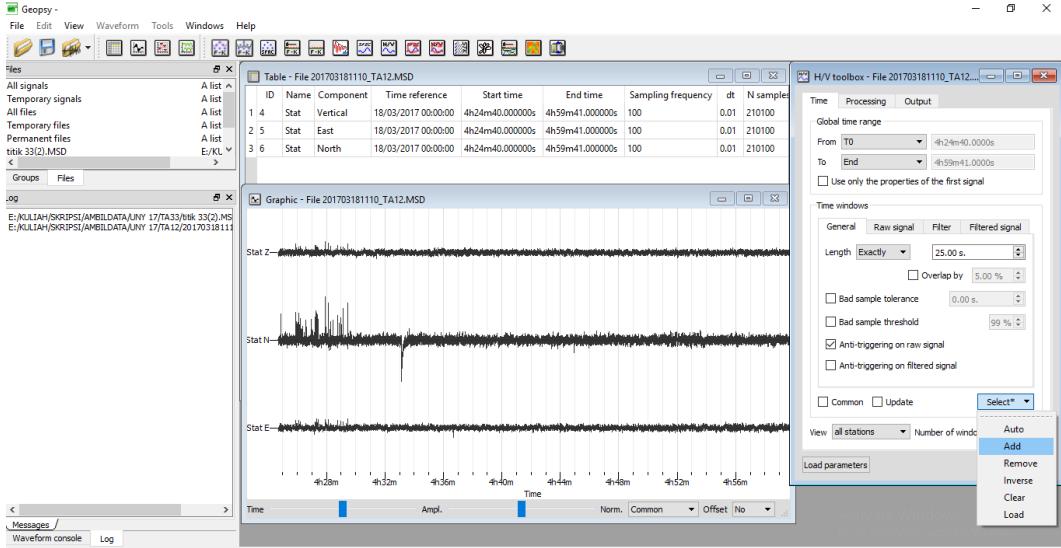
Gambar L3. Proses memilih data untuk analisis HVSR

4. Maka akan muncul gambar sebagai berikut:



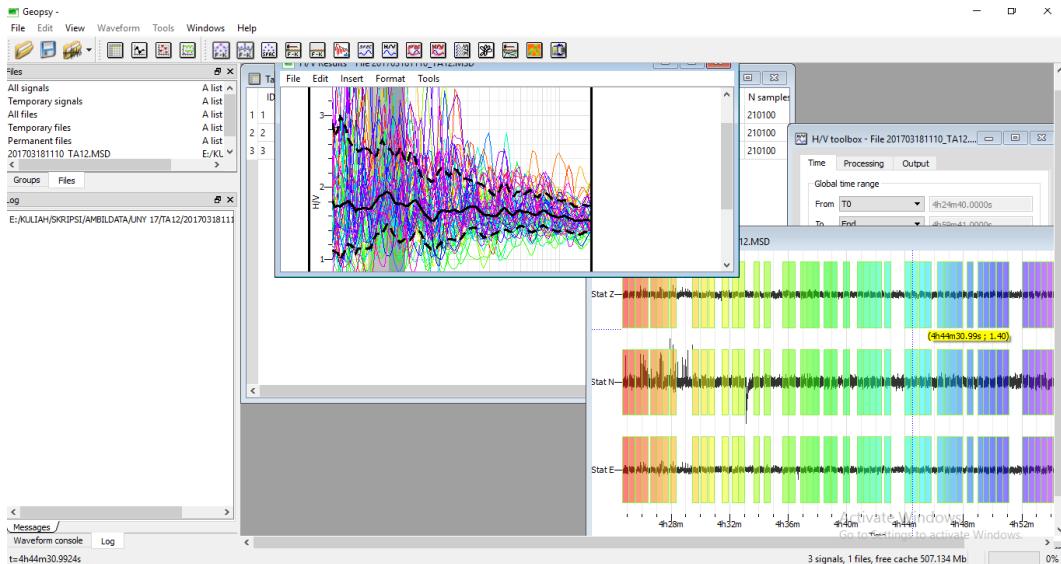
Gambar L4. Tampilan data gelombang saat analisis HVSR

5. Klik kotak H/V pada *toolbar*, maka akan muncul H/V *toolbox*. Klik *select* pada *add* kemudian pada kotak grafik dipilih *window* yang *noisenya* sedikit.



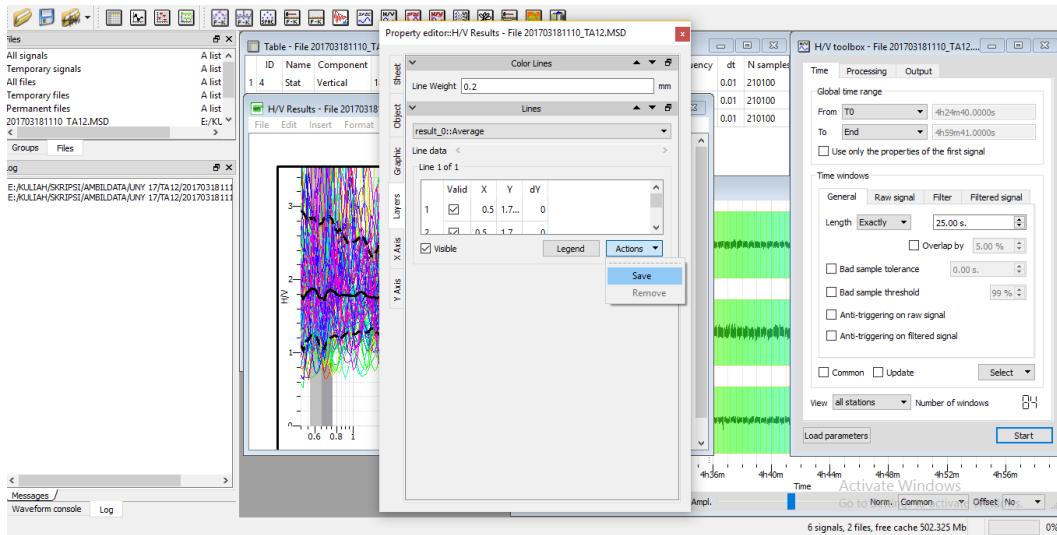
Gambar L5. Contoh rekaman data mikrotremor 3 komponen

6. Klik *Start* maka akan muncul grafik seperti gambar berikut.



Gambar L6. Tampilan hasil analisis HVSR

7. Untuk menyimpan gambar klik kanan lalu pilih *properties*, maka akan muncul gambar sebagai berikut:

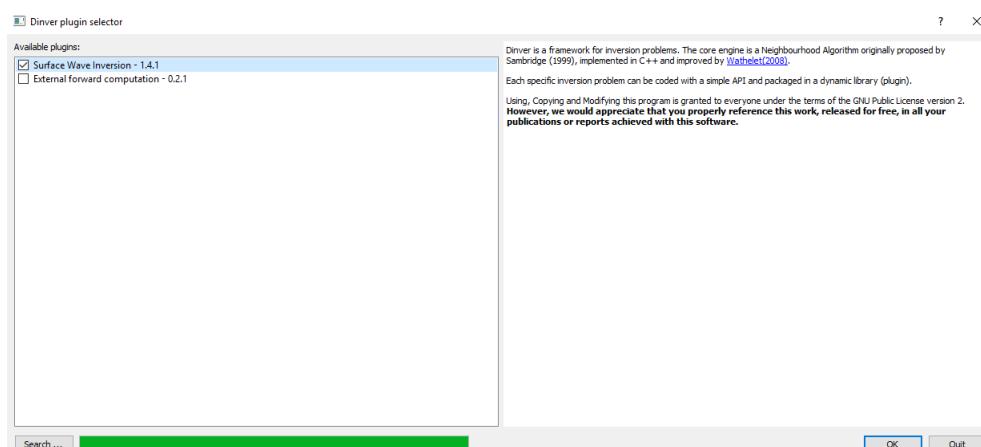


Gambar L7. Proses penyimpanan file dalam format .hv

8. Simpan file tanpa *stddev* dengan memilih *result_0:: Average* lalu klik *Actions* kemudian pilih *Save*.

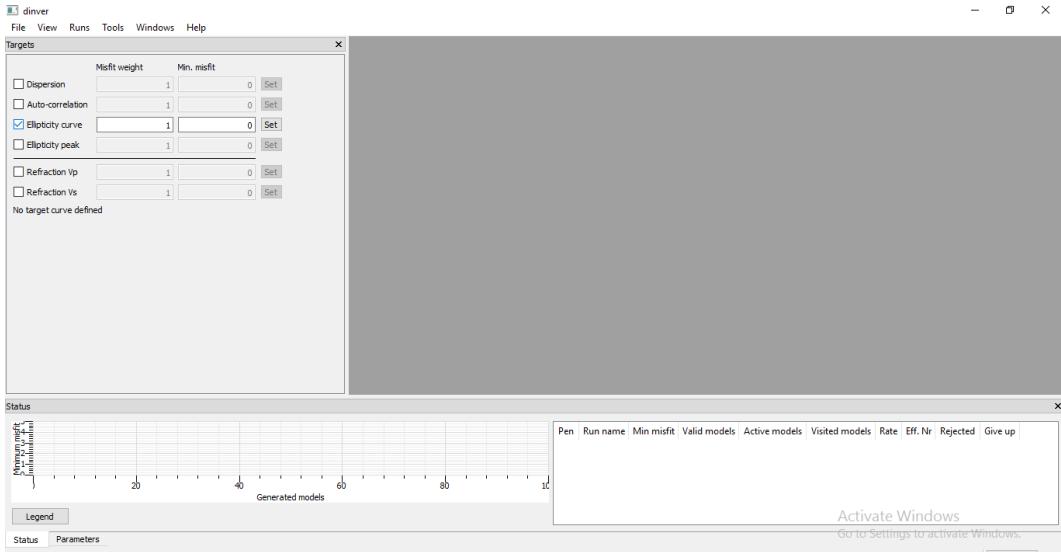
B. Menganalisis Kurva H/V dengan Metode *Ellipticity Curve* menggunakan *Dinver*

1. Membuka aplikasi *Dinver* maka akan muncul:



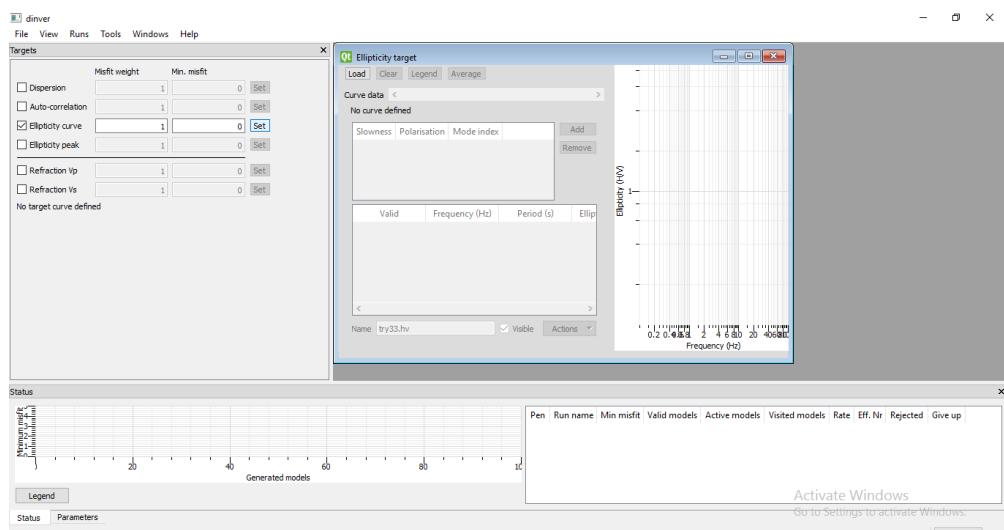
Gambar L8. Tampilan awal *Dinver*

2. Klik *OK* lalu akan muncul:



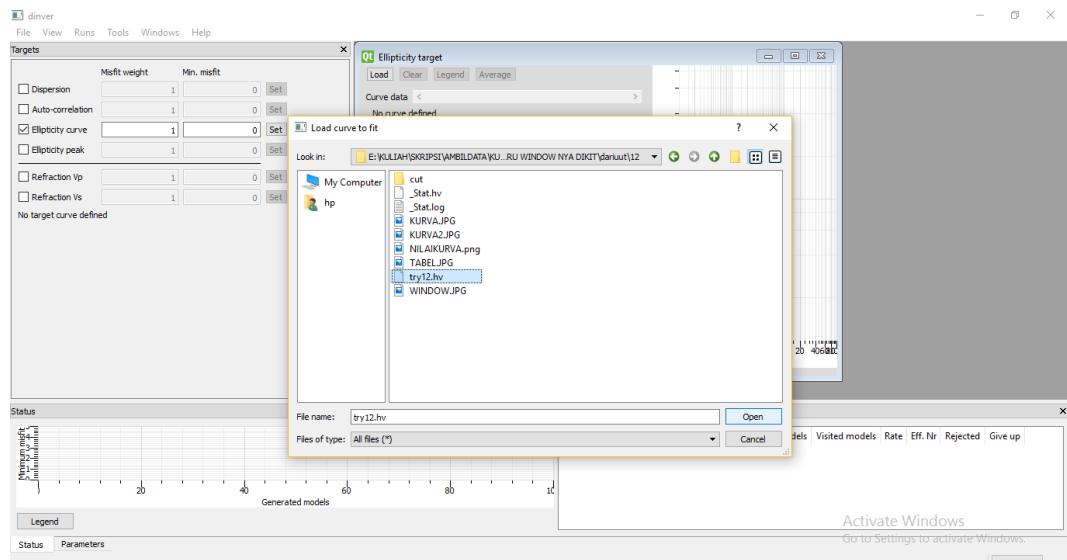
Gambar L9. Tampilan setelah memilih Ok

3. Klik (*checkbox*) kotak yang ada di sebelah kiri *ellipcity curve* lalu klik *set* maka akan muncul tampilan seperti berikut:



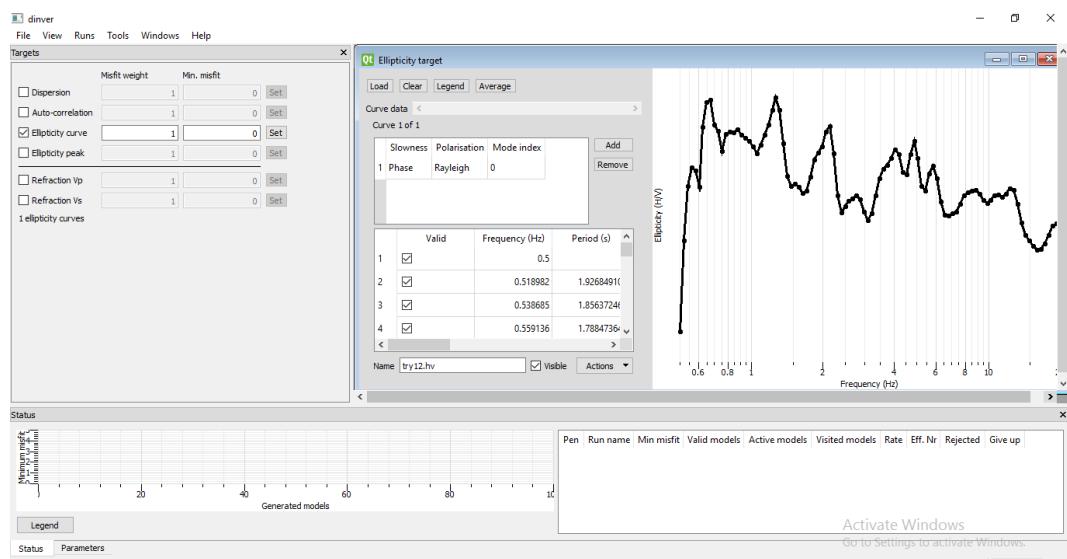
Gambar L10. Tampilan setelah klik kolom set pada baris *ellipticity curve*

4. Klik *load* pada bagian atas untuk memasukkan *input* berupa kurva H/V dalam format .hv



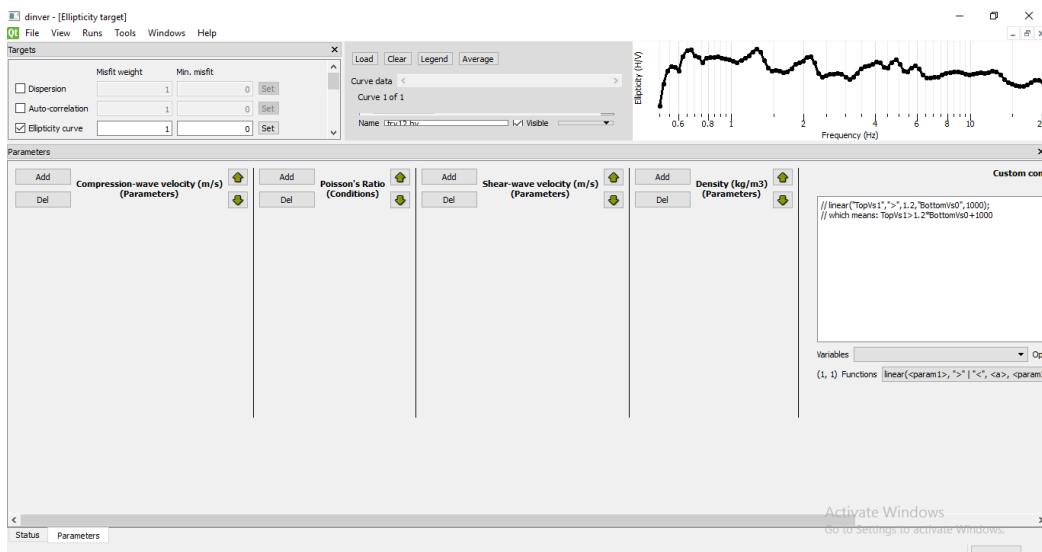
Gambar L11. Tampilan saat pemilihan kurva H/V

5. Setelah memilih kurva yang akan digunakan lalu klik *Open*, maka akan muncul tampilan sebagai berikut:



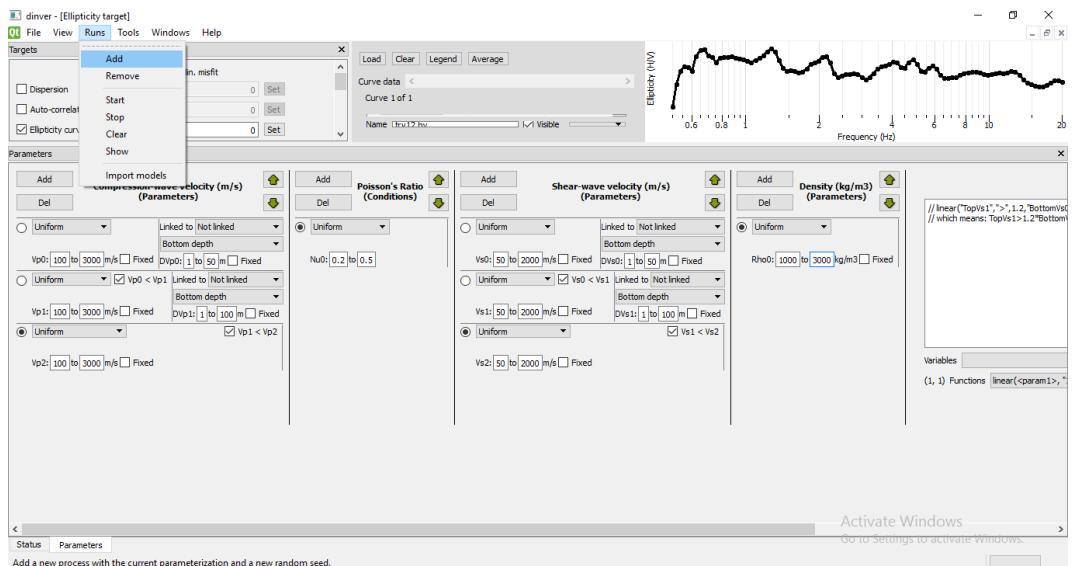
Gambar L12. Tampilan setelah memasukkan kurva H/V

6. Setelah muncul kurva H/V sebagai *input* lalu klik *parameters* pada bagian pojok kiri bawah tampilan, lalu muncul tampilan sebagai berikut:



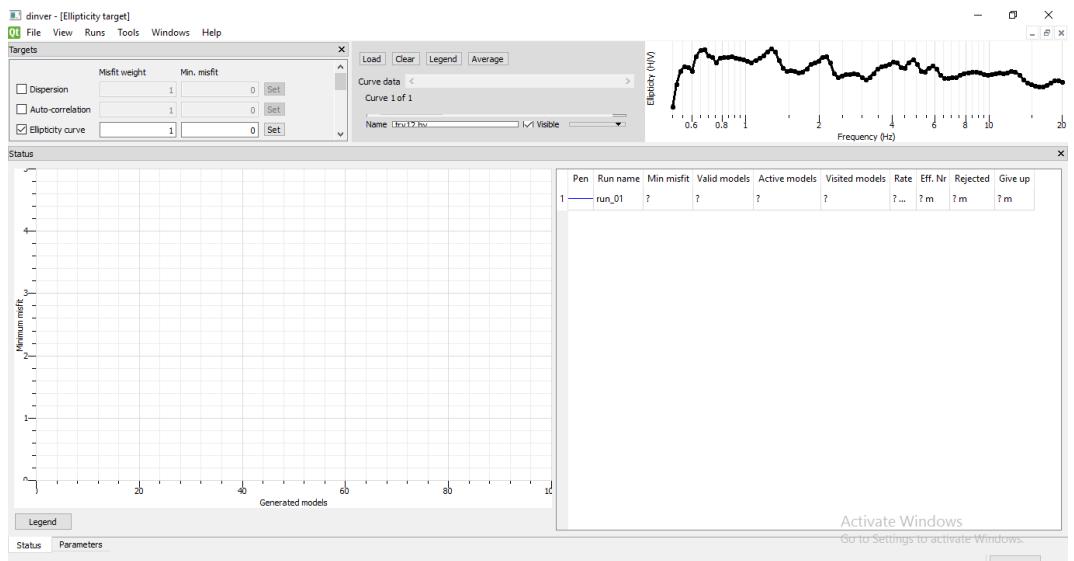
Gambar L13. Tampilan berbagai parameter pada *ellipticity curve* yang harus diisi.

7. Mengisi kolom parameter yang ada, banyaknya parameter untuk setiap jenis parameter yang ada, disesuaikan dengan banyaknya *layer* yang dibutuhkan pada interpretasi *ground profile*, untuk menambah isian parameter pada setiap parameter yaitu dengan cara mengklik *Add* pada bagian atas kolom parameter. Parameter nilai yang dimasukkan disesuaikan dengan kondisi litologi daerah penelitian, setelah semua parameter diisi maka akan muncul tampilan sebagai berikut:



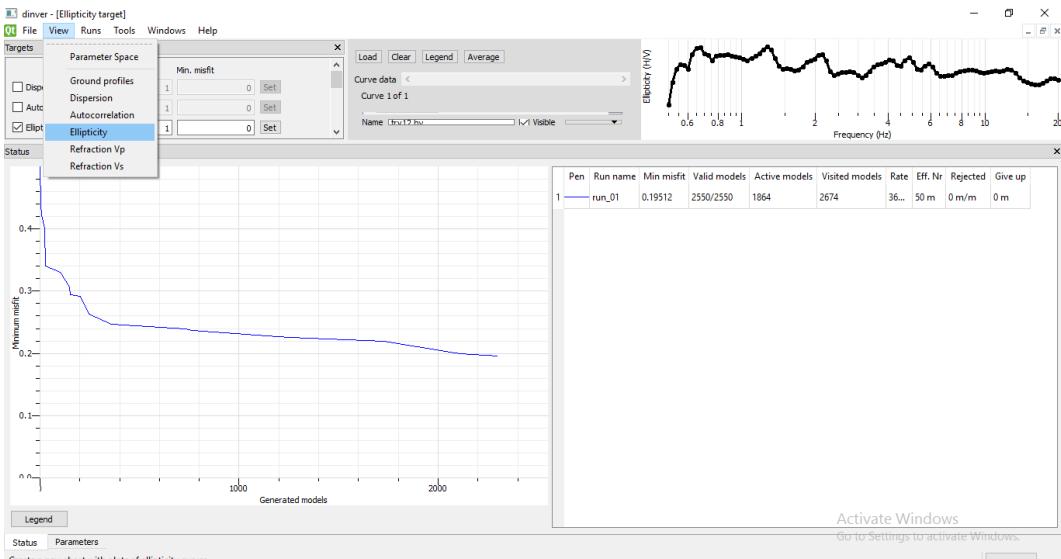
Gambar L14. Tampilan setelah semua parameter terisi

8. Klik *Runs – Add* lalu klik *status* pada bagian bawah tampilan, untuk melihat status kurva maka akan muncul tampilan sebagai berikut:



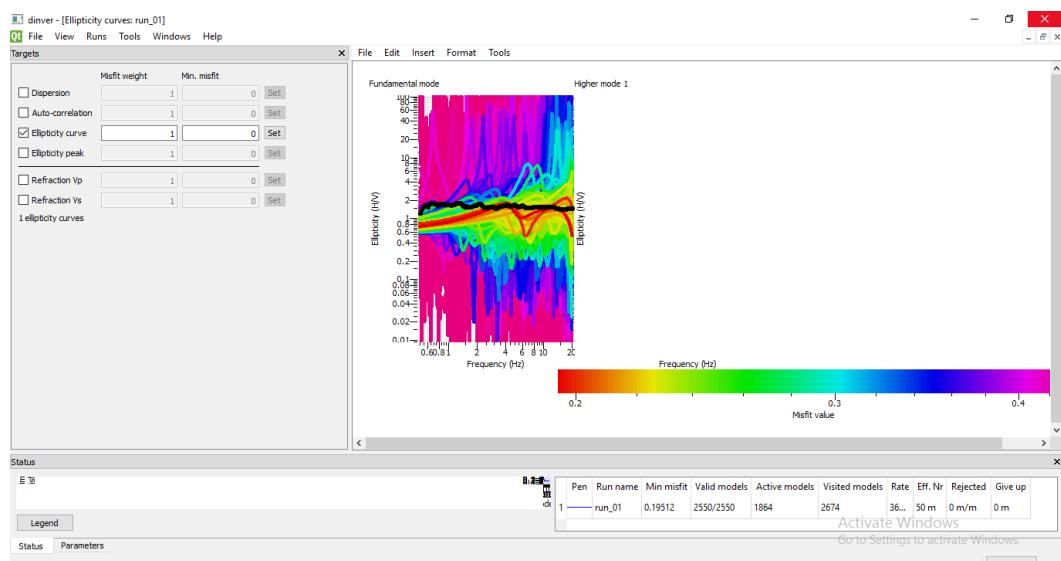
Gambar L15. Tampilan setelah memilih *Runs*

9. Klik *Runs – Start* lalu akan muncul tampilan sebagai berikut:



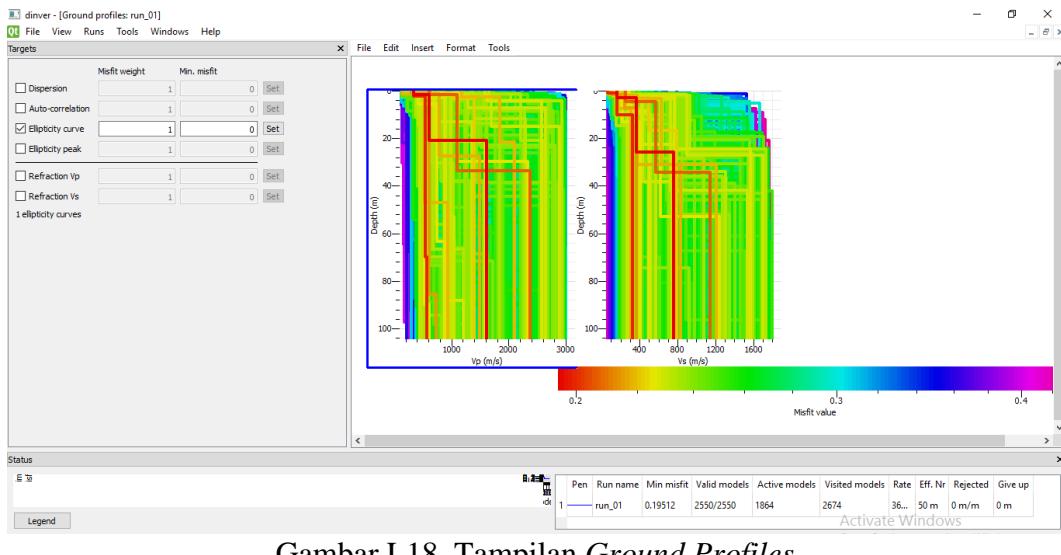
Gambar L16. Tampilan status kurva yang telah di *Runs*

10. Setelah proses berhenti, klik *View – Ellipticity* maka akan muncul tampilan sebagai berikut:



Gambar L7. Tampilan hasil *ellipticity curve* yang telah dijalankan.

11. Klik *View – Ground Profiles* untuk melihat pemodelan profil bawah permukaan

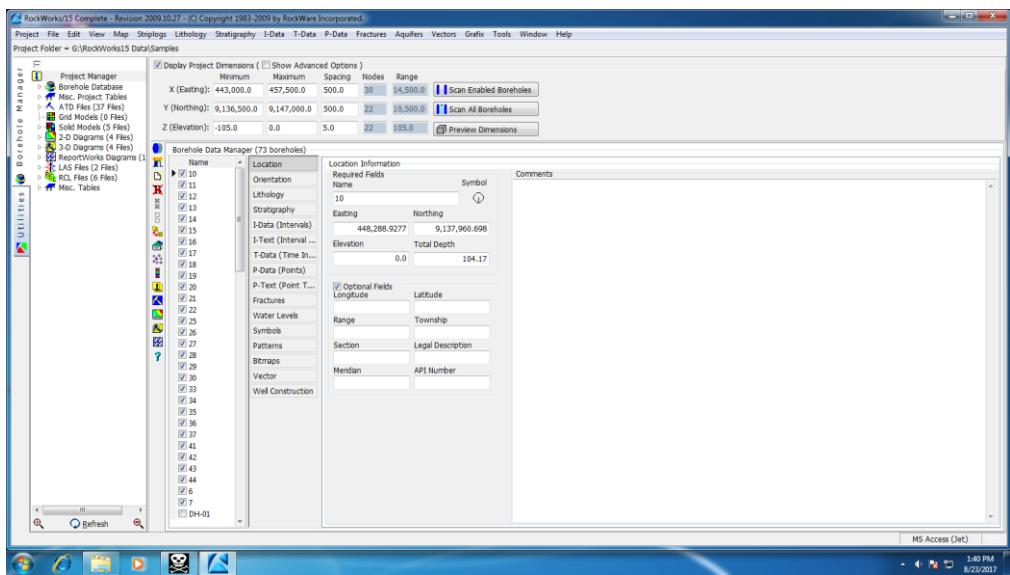


Gambar L18. Tampilan *Ground Profiles*

12. Simpan pemodelan *ground profiles* dan *ellipticity curve* dalam format png.

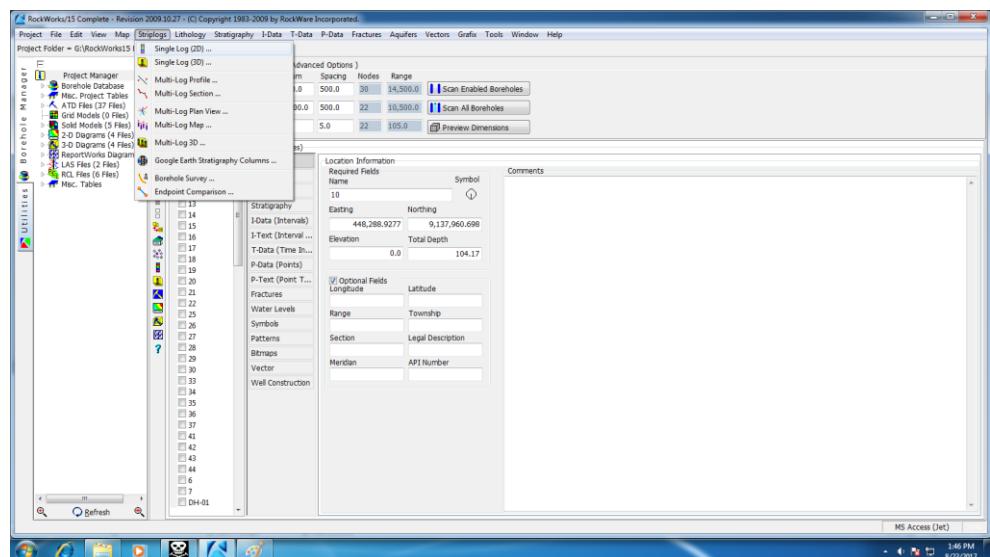
C. Membuat data bor menggunakan *software Rockwork 15*

1. Membuka *software Rockwork 15*, maka akan muncul:



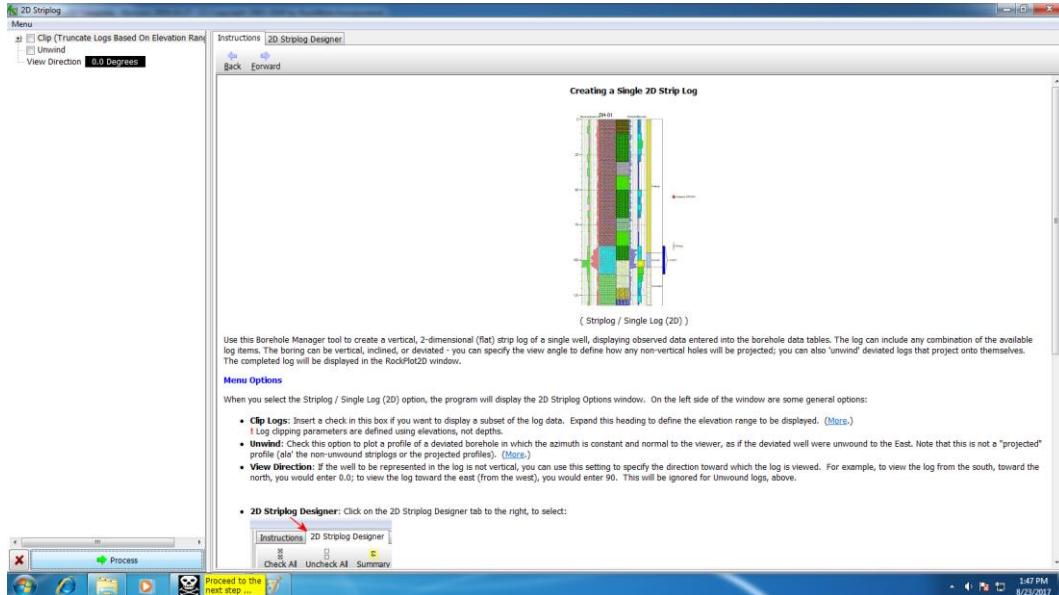
Gambar L19 Tampilan awal *software Rockwork 15*

2. Mengisi kolom *borehole* sesuai dengan data yang diperlukan seperti *location* dan *Lithology*



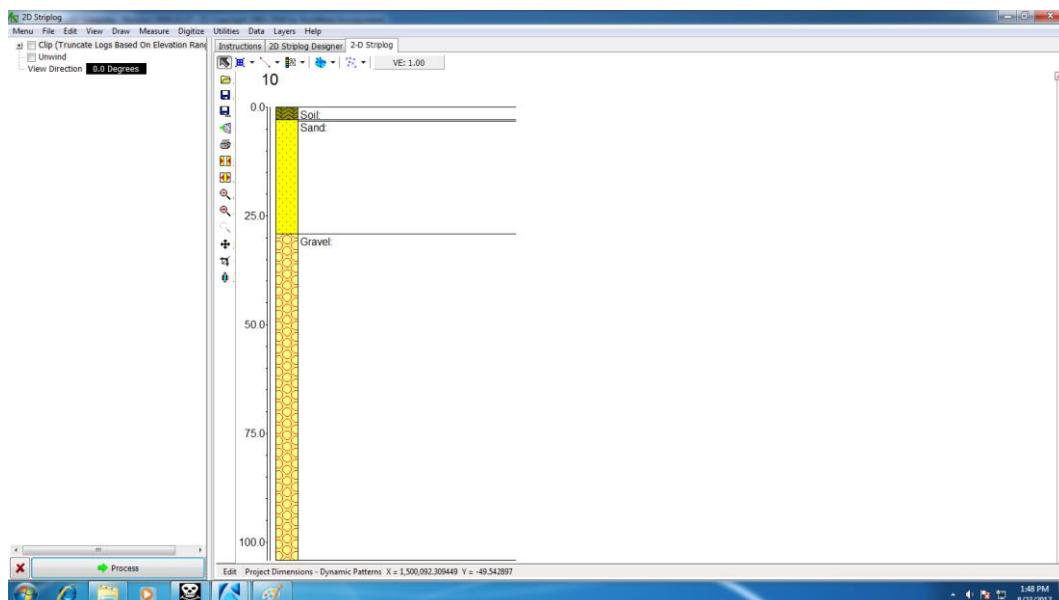
Gambar L20. Tampilan pengisian data *borehole*

3. Memilih *borehole* (misal titik 10) yang akan dibuat pemodelan data bornya, pilih *Striplog* lalu klik *Single Log (2D)*, maka akan muncul:



Gambar L221. Tampilan awal software Rockwork 15

4. Pilih *Process*, akan muncul pemodelan data bor yang diinginkan.



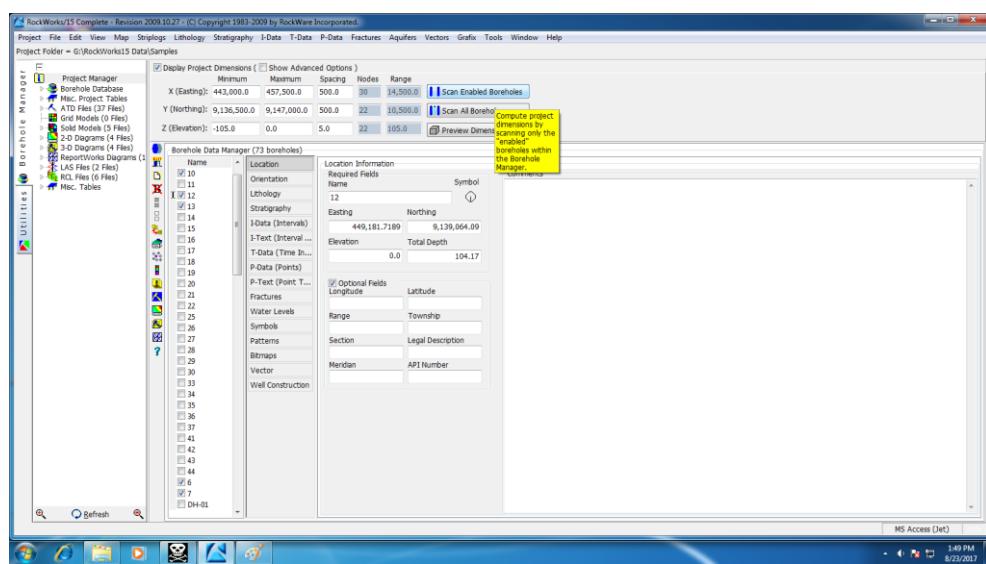
Gambar L22. Tampilan hasil pemodelan *striplog*

5. Simpan file dalam format png.

D. Membuat pemodelan tiga dimensi litologi bawah permukaan

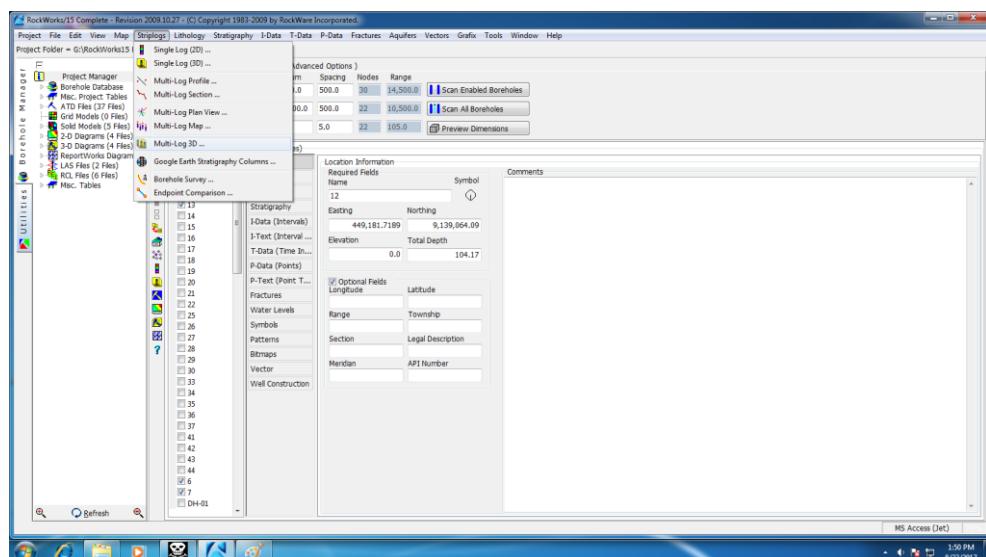
1. Setelah langkah 2 pada pembuatan data bor menggunakan *software Rockwork*

15, pilih data yang akan dibuat pemodelan litologi secara 3D, kemudian klik *scan enabled boreholes*



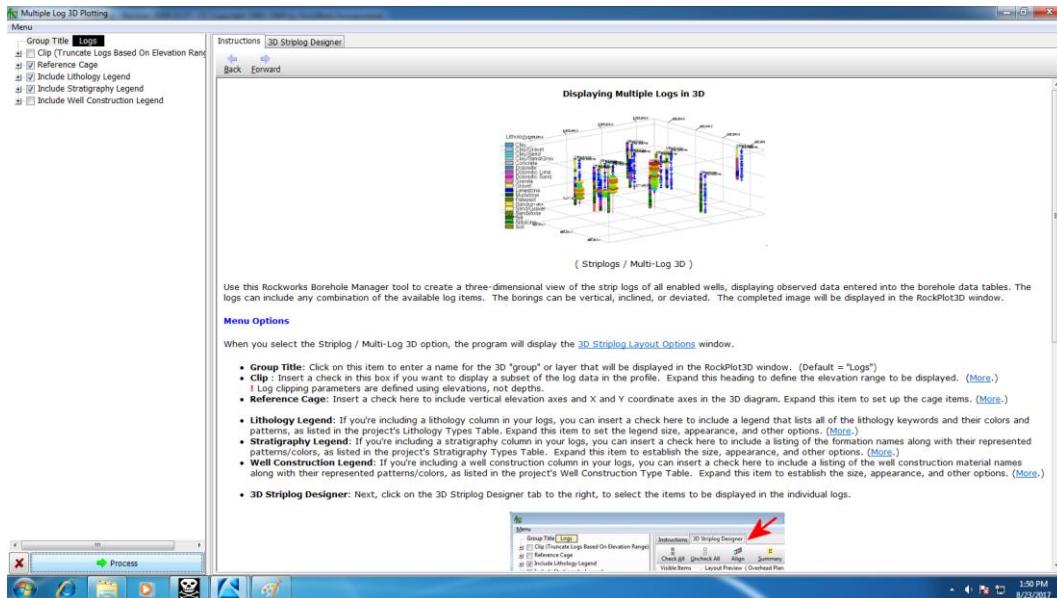
Gambar L23. Tampilan tahap pemilihan data bor yang akan digunakan

2. Klik *Striplog* pilih *Muliti Log 3D*



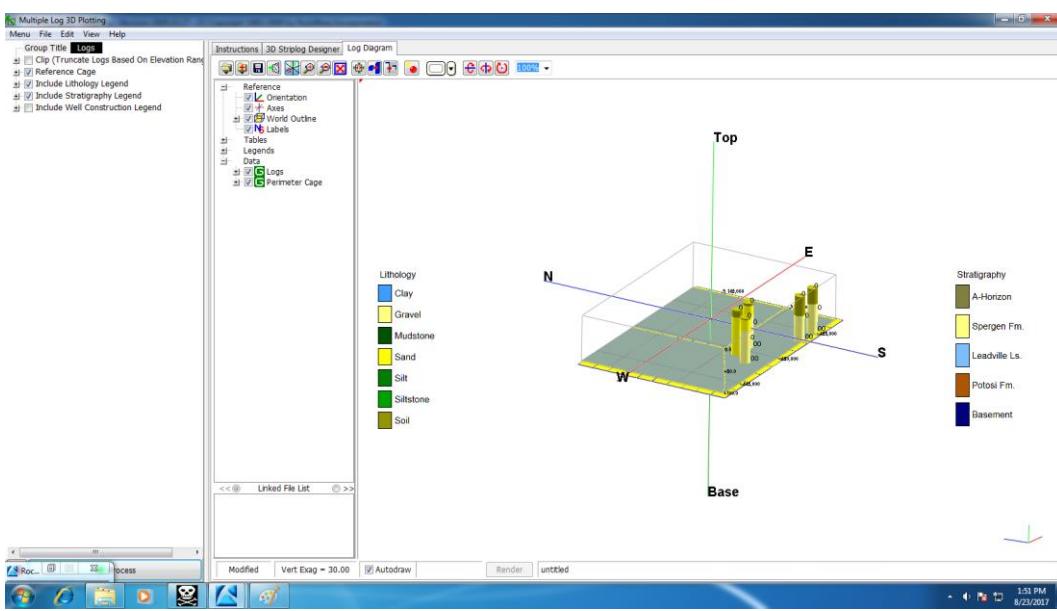
Gambar L24. Tampilan tahap awal pemodelan multilog 3D

3. Pilih Process



Gambar L25. Tampilan menu pemodelan *multilog* 3D

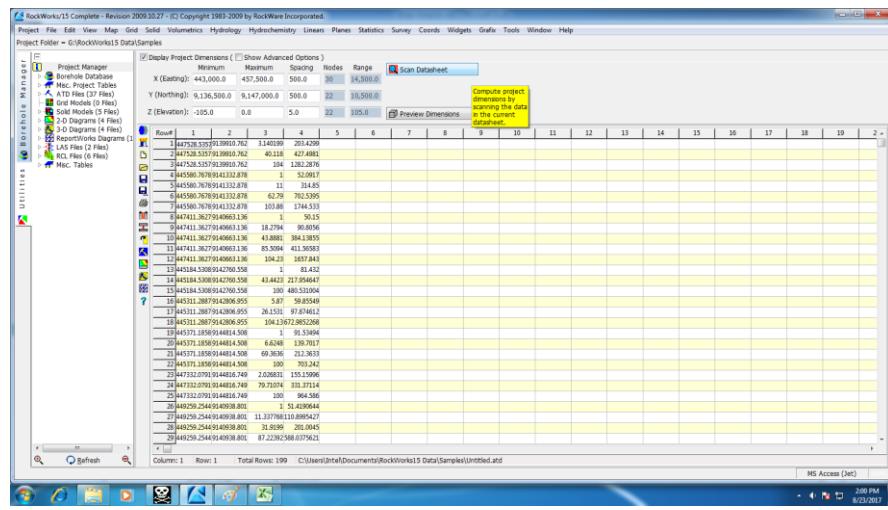
4. Akan muncul pemodelan tiga dimensi litologi bawah permukaan.



Gambar L26. Hasil Pemodelan *multilog* 3D

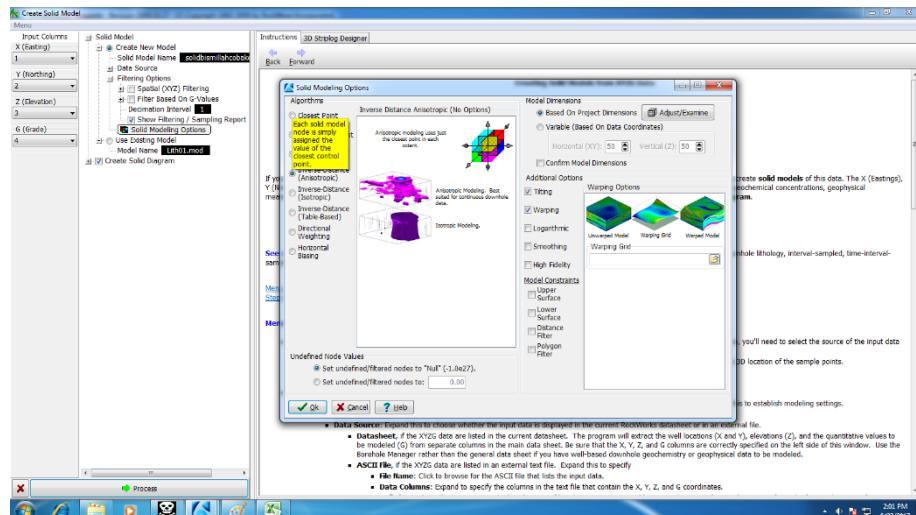
D. Membuat pemodelan tiga dimensi distribusi nilai Vs

1. Membuka software Rockwork 15 klik Utilities kemudian isi kolom 1 dengan nilai latitude, kolom 2 dengan nilai longitude, kolom 3 dengan nilai *depth* (kedalaman), dan kolom 4 dengan nilai Vs kemudian klik scan datasheet seperti berikut:



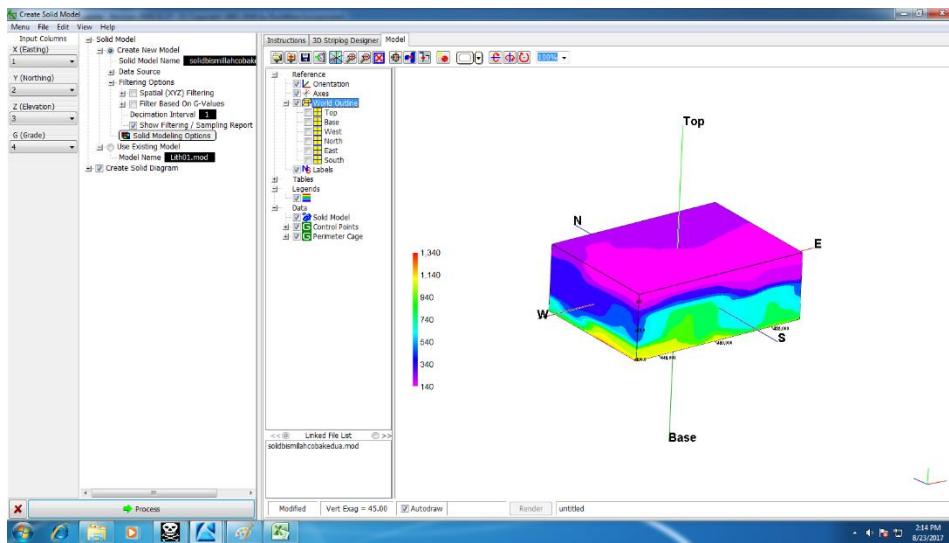
Gambar L27. Tampilan awal pengisian datasheet untuk pemodelan 3D persebaran nilai v_s

2. Klik Solid – Model – Show Filtering maka akan muncul tampilan seperti berikut:



Gambar L28. Tampilan menu setelah pemilihan model

3. Pilih *model dimensions smoothing* lalu klik *process*, maka akan muncul tampilan sebagai berikut:



Gambar L29 Tampilan model 3D persebaran v_s yang telah di proses

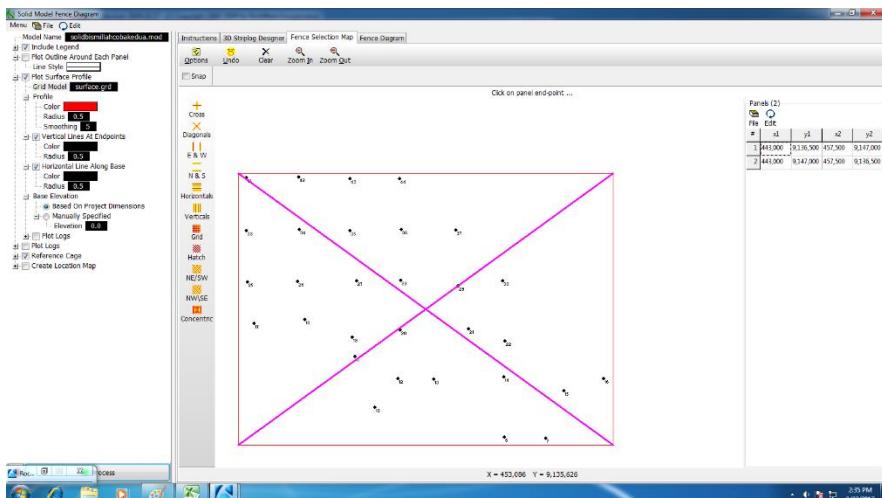
4. Simpan model dalam format RCL.

E. Membuat pemodelan sayatan persebaran kecepatan gelombang geser

1. Setelah langkah 1 pada pembuatan model tiga dimensi distribusi nilai **Vs** kemudian pilih *fence* seperti pada tampilan berikut:

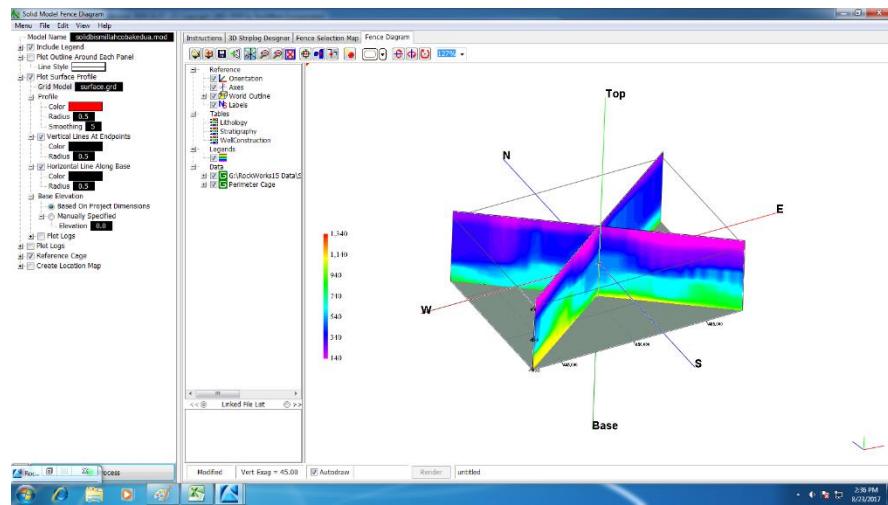
Gambar L30. Tampilan awal pemodelan sayatan persebaran nilai V_s

2. Klik *Fection – Process – Fence Selection Map* maka akan muncul tampilan seperti berikut:



Gambar L31. Tampilan pemilihan model sayatan

3. Pilih model sayatan yang diinginkan kemudian klik *process* maka akan muncul tampilan sebagai berikut:

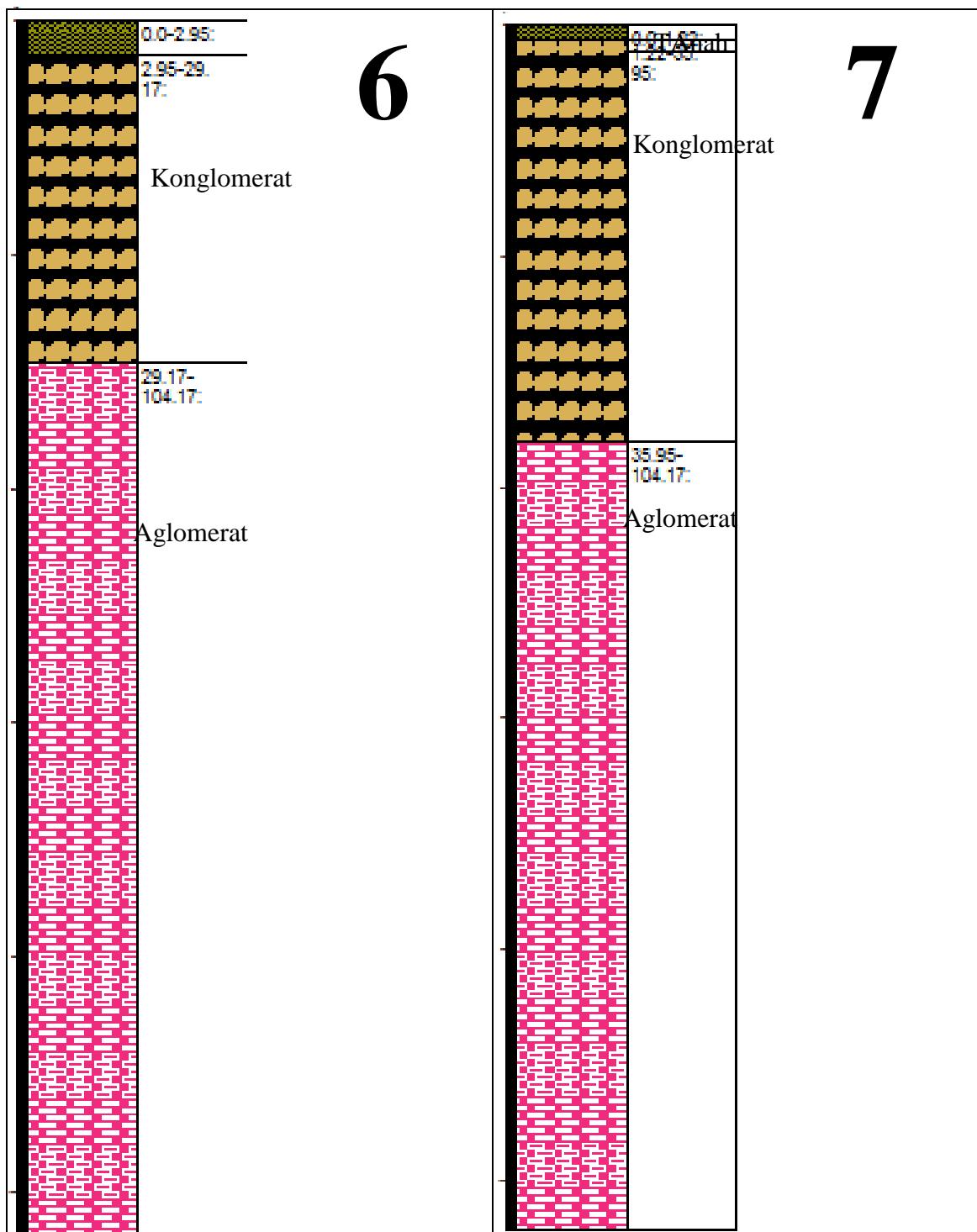


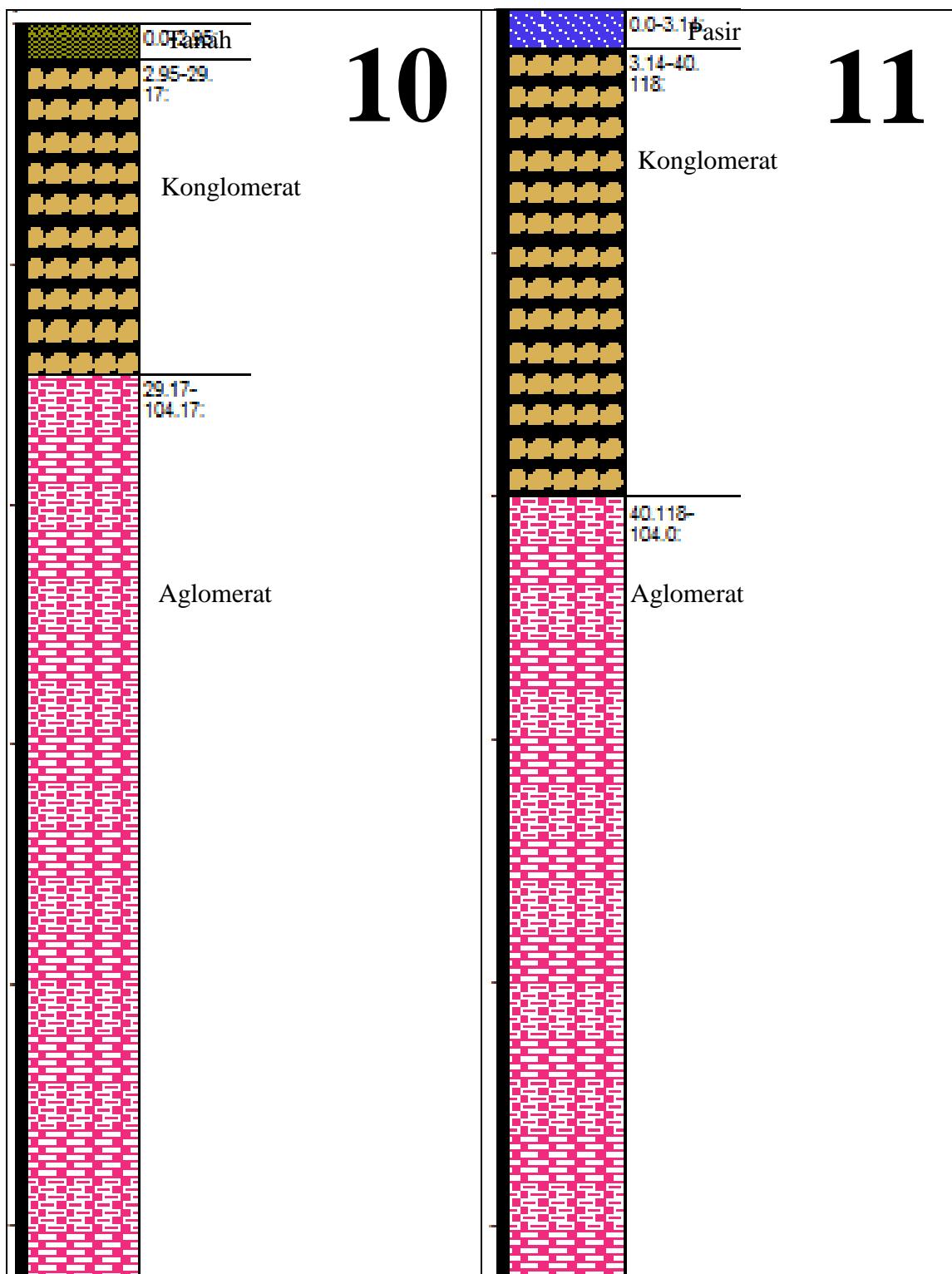
Gambar L32. Tampilan model sayatan *diagonals* yang telah diproses

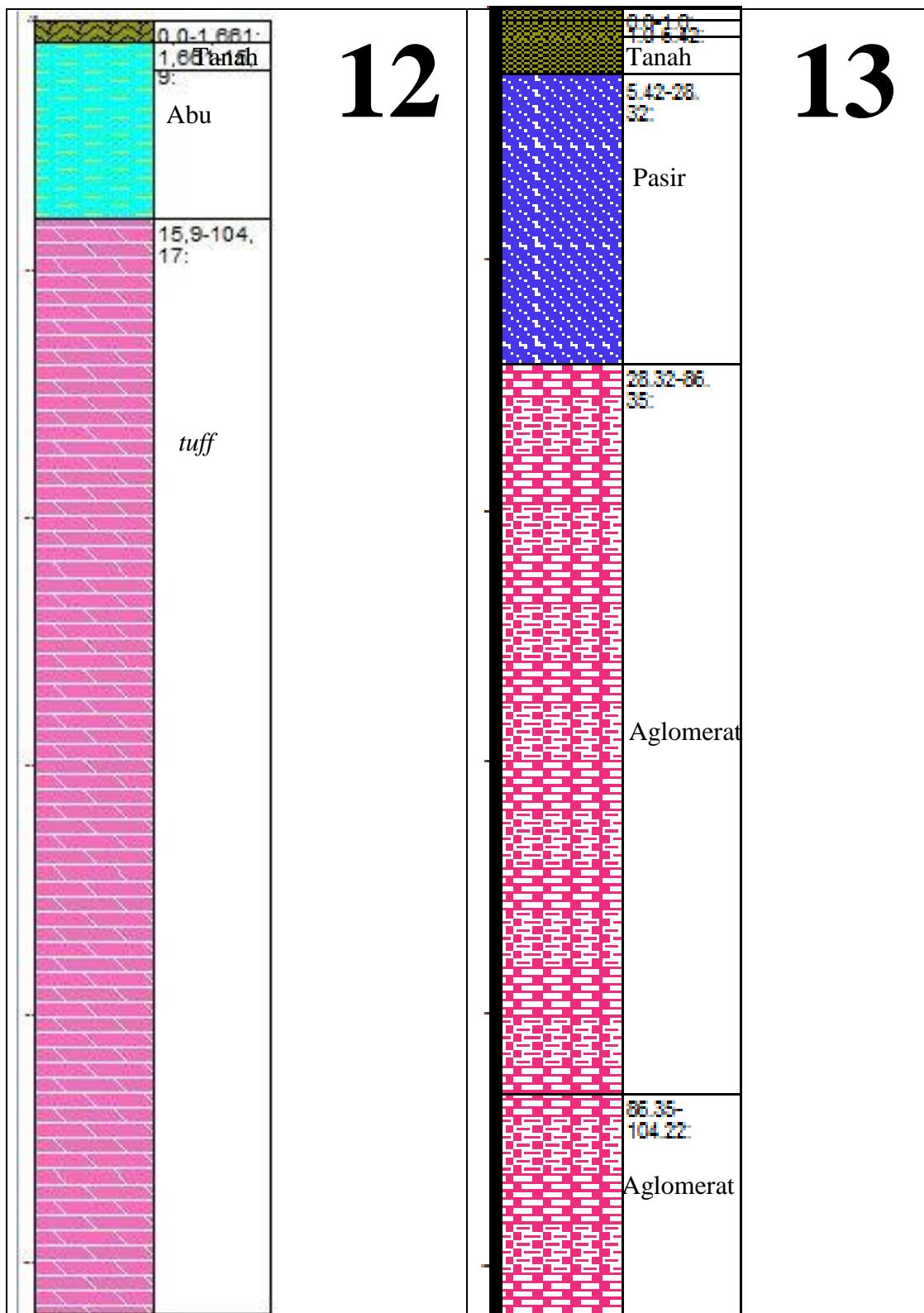
4. Simpan model sayatan dalam format RCL.

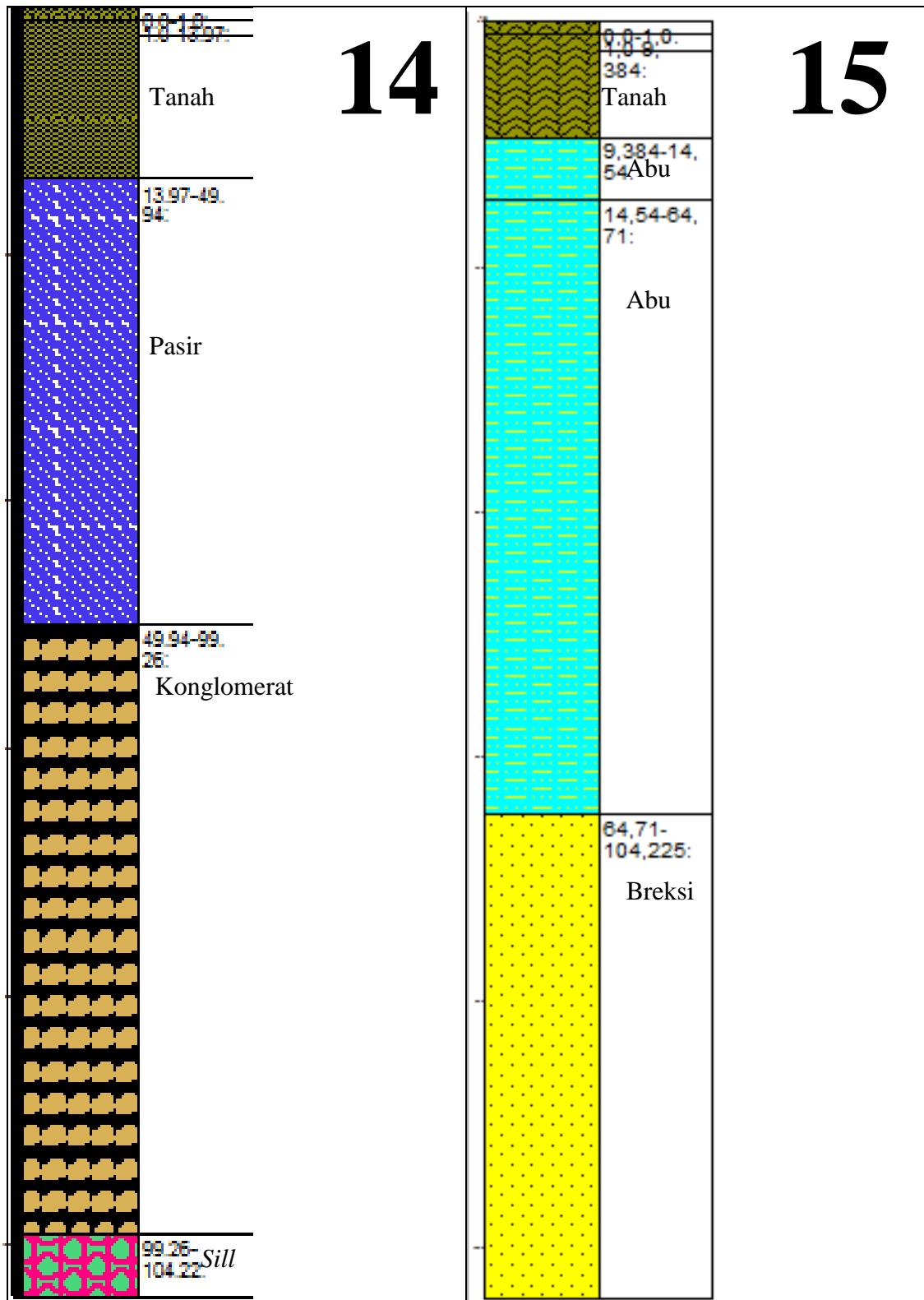
LAMPIRAN 4

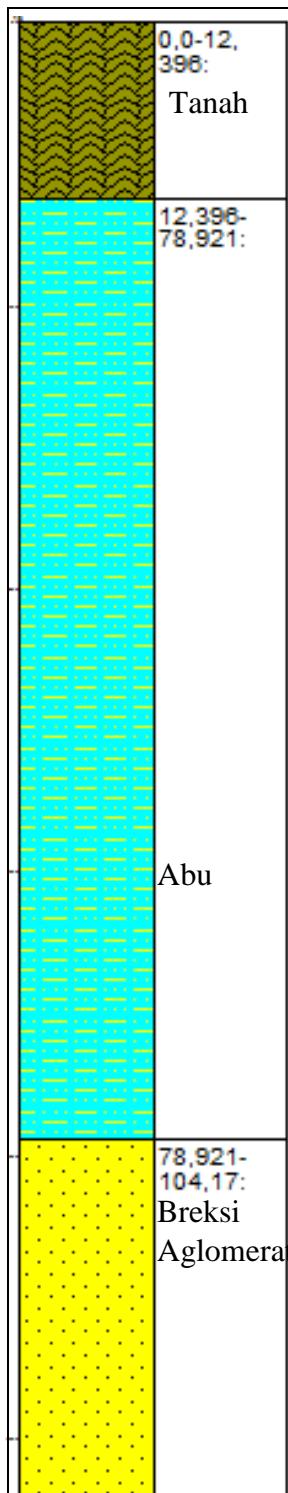
PEMODELAN DATA LOG TITIK PENELITIAN



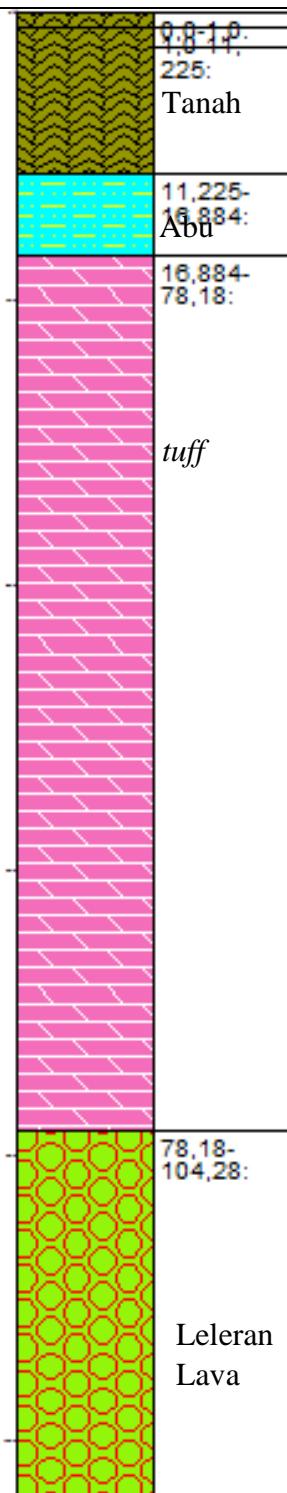






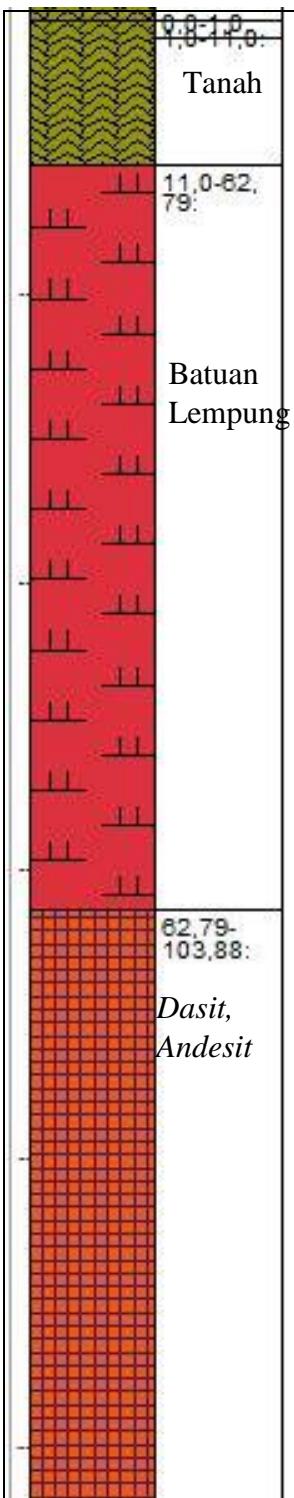


16

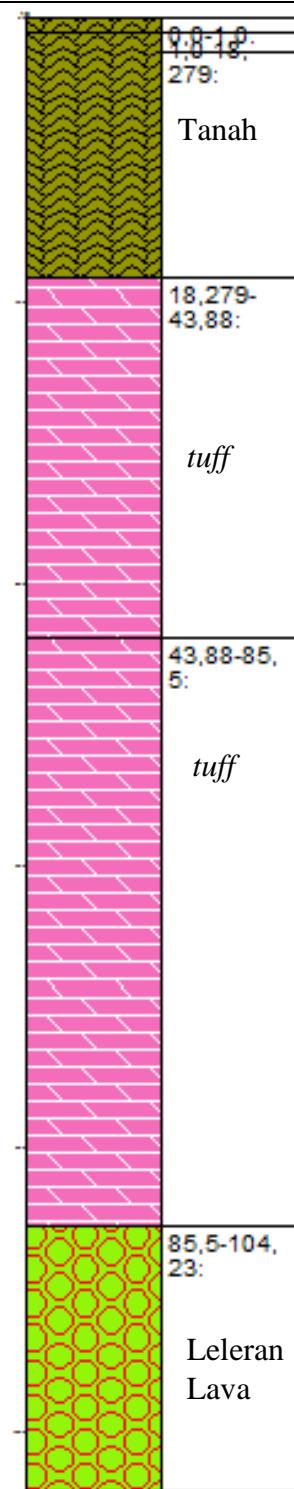


17

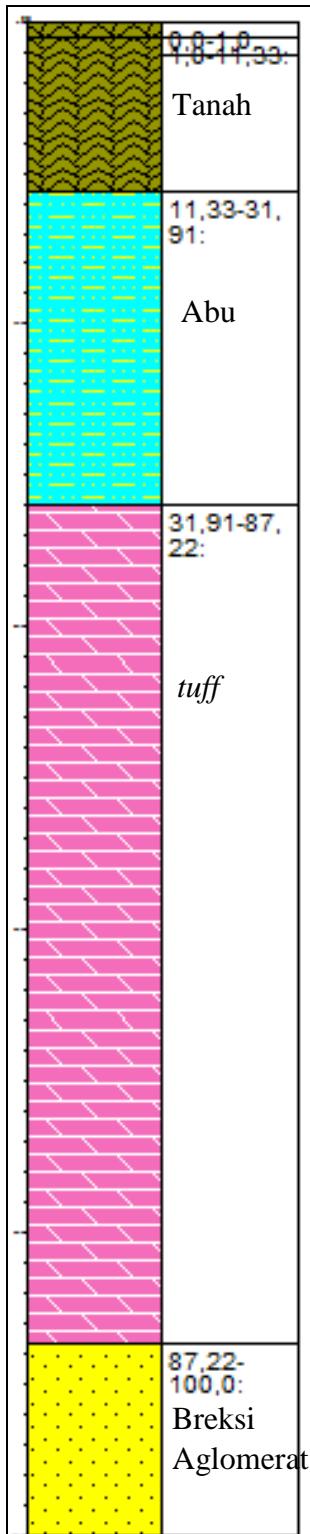
18



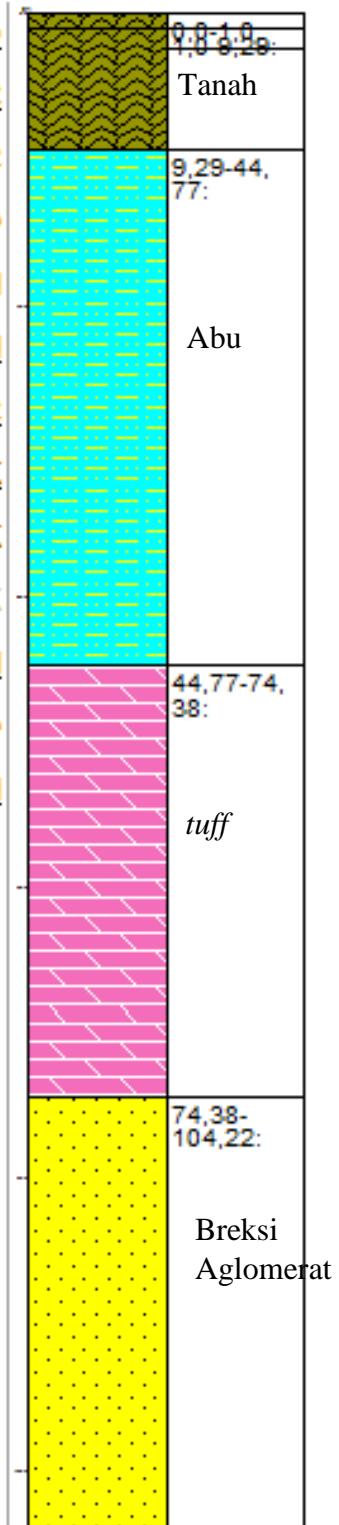
19

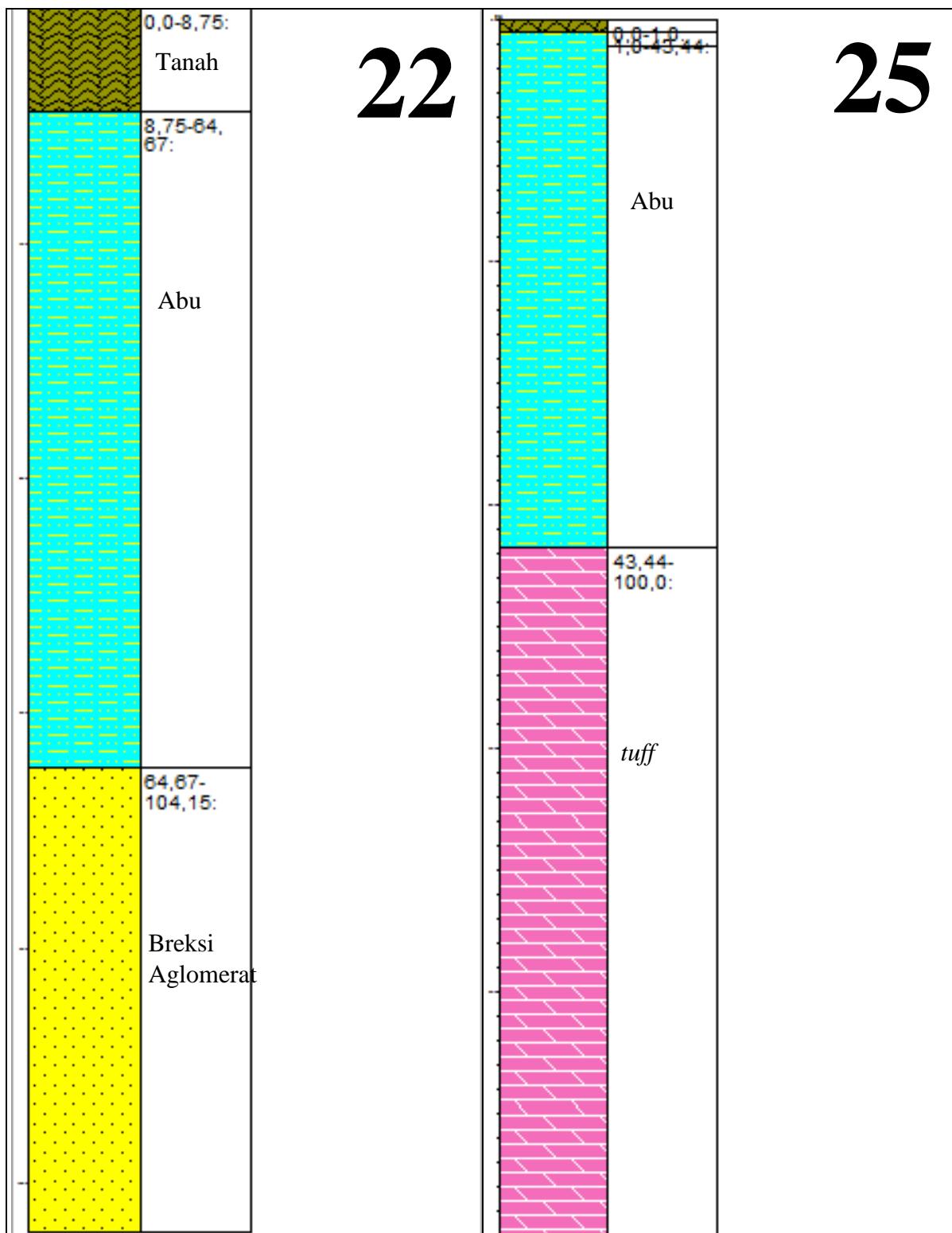


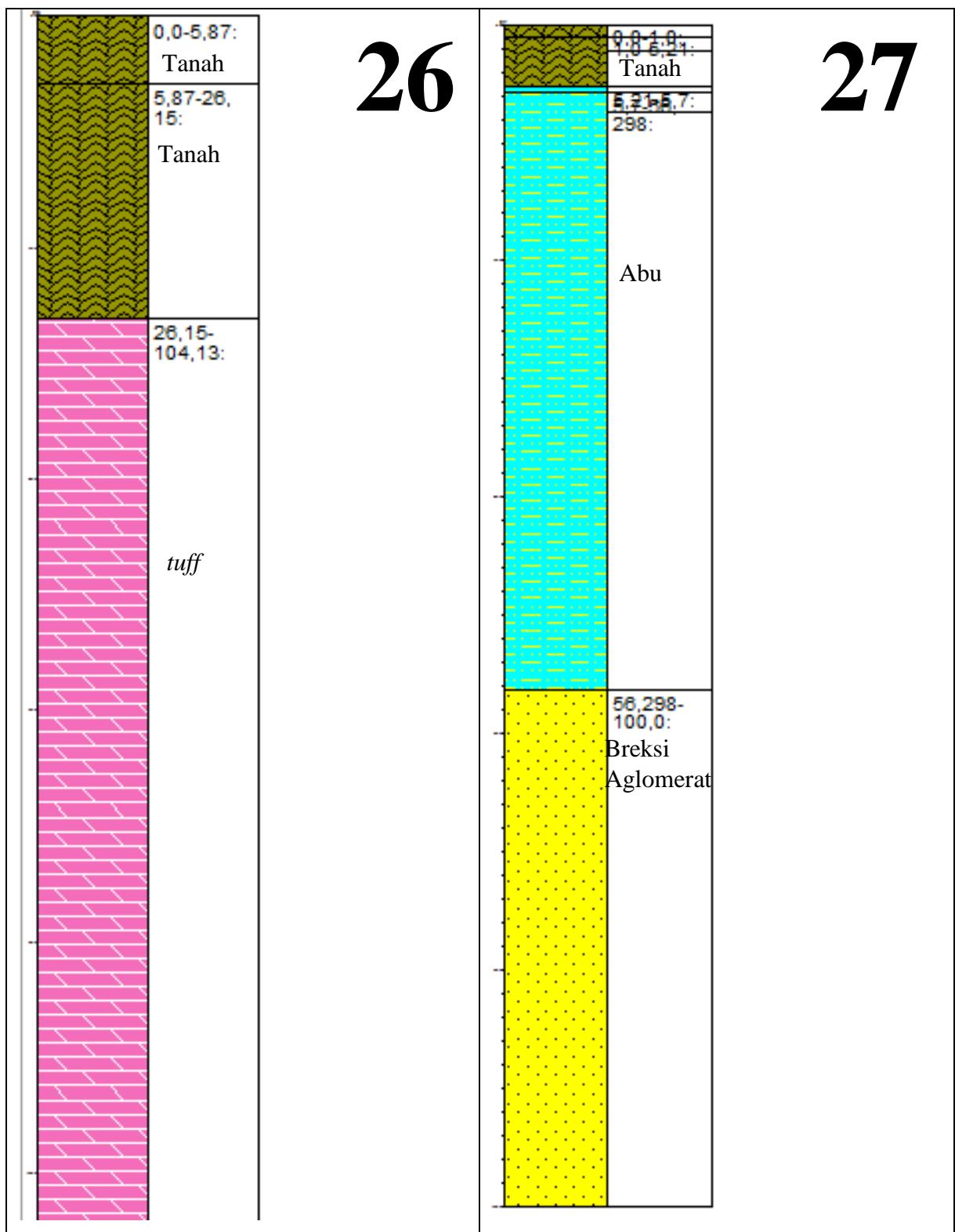
20

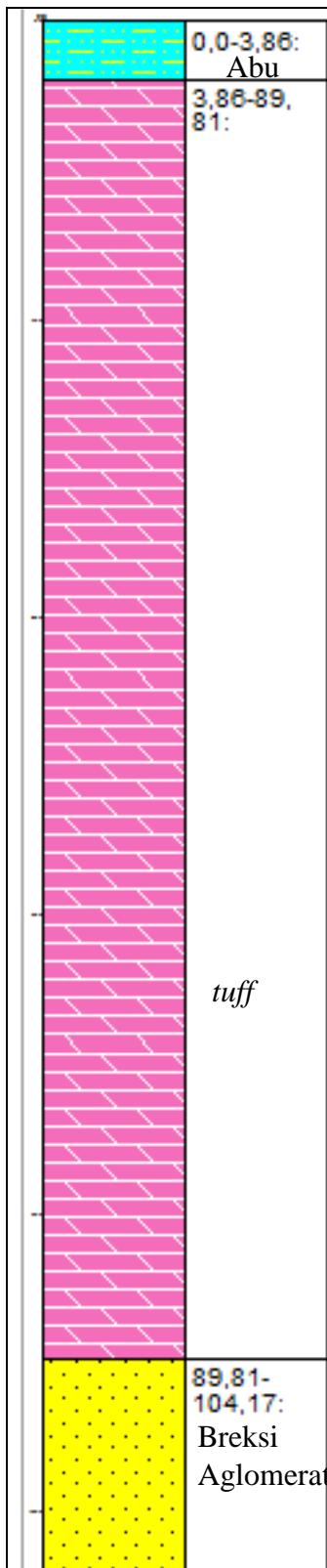


21

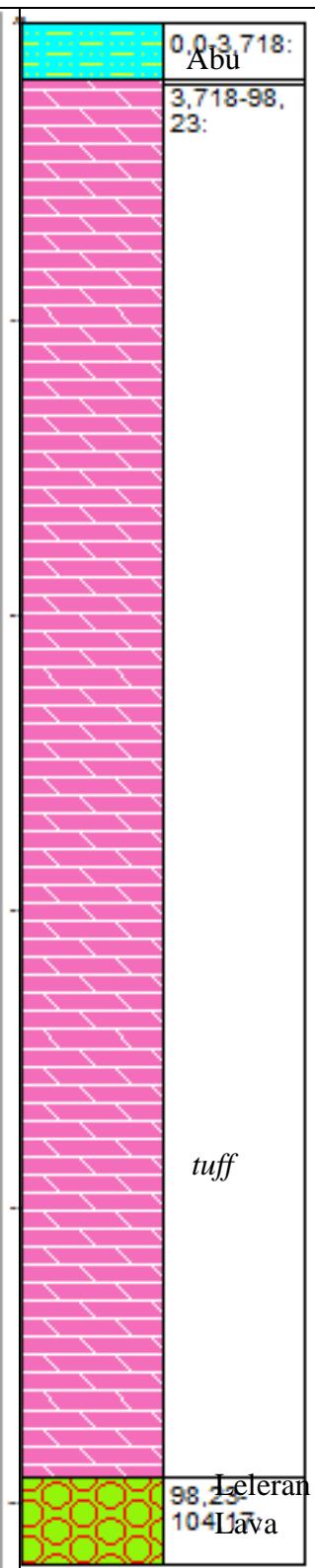




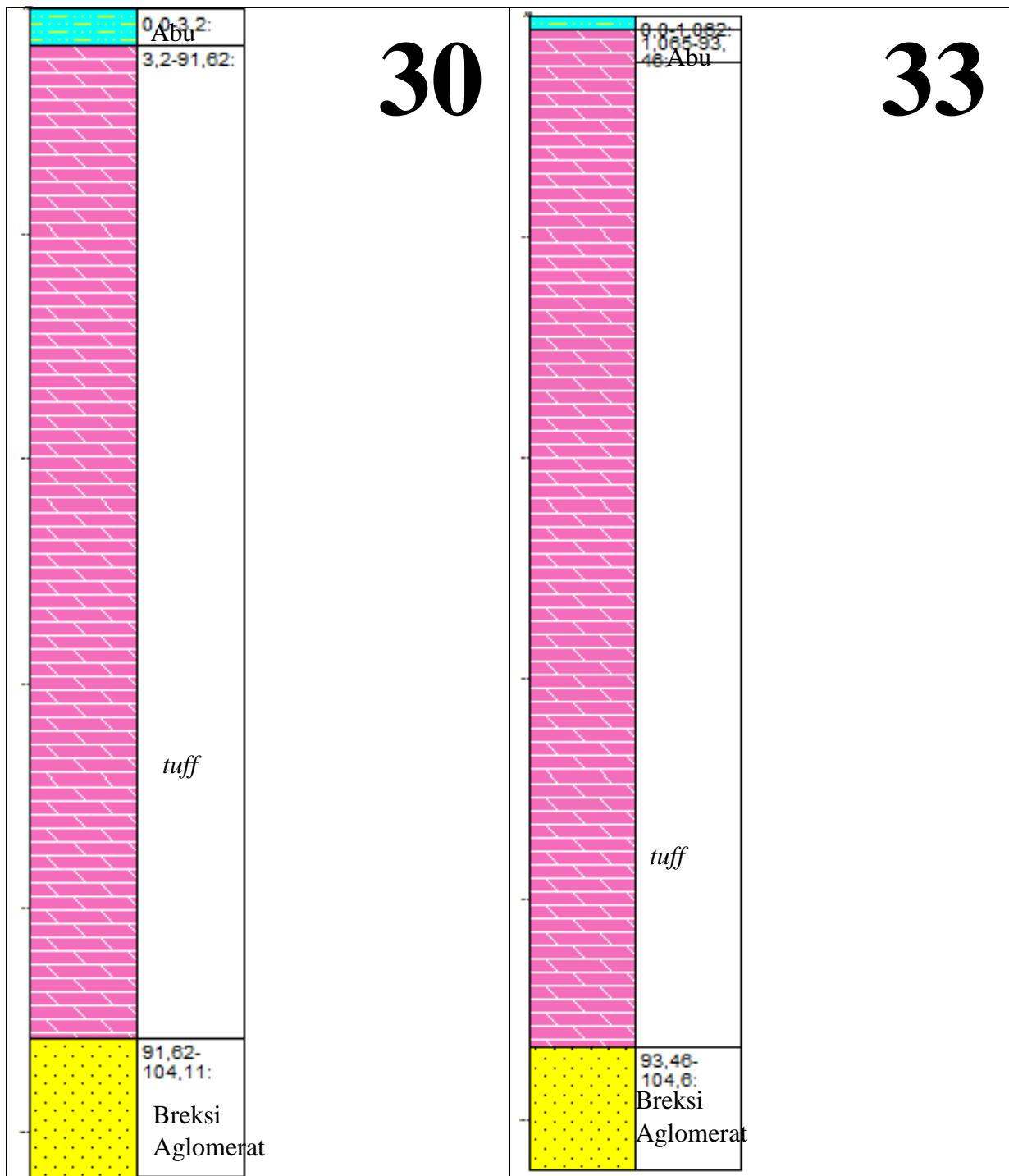


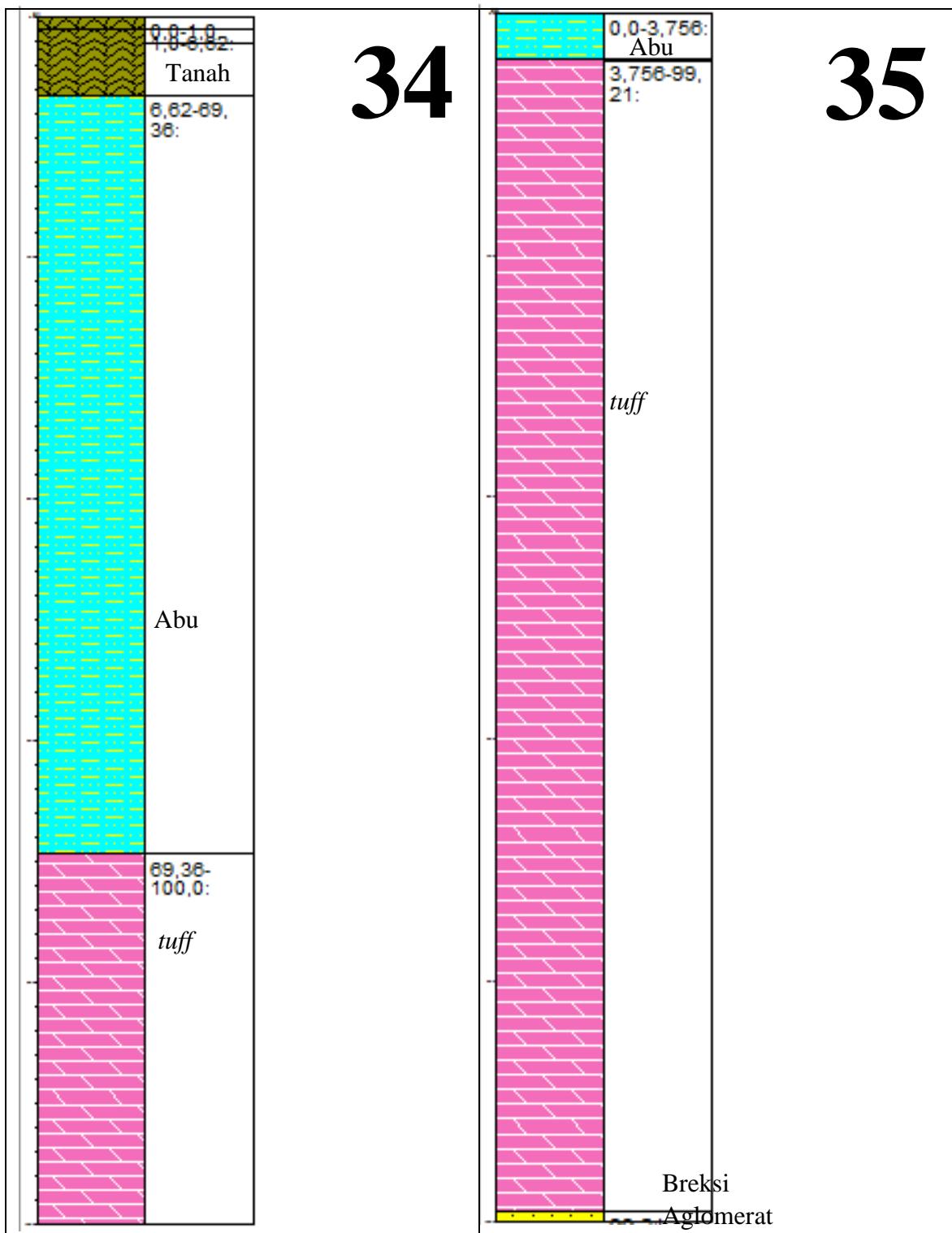


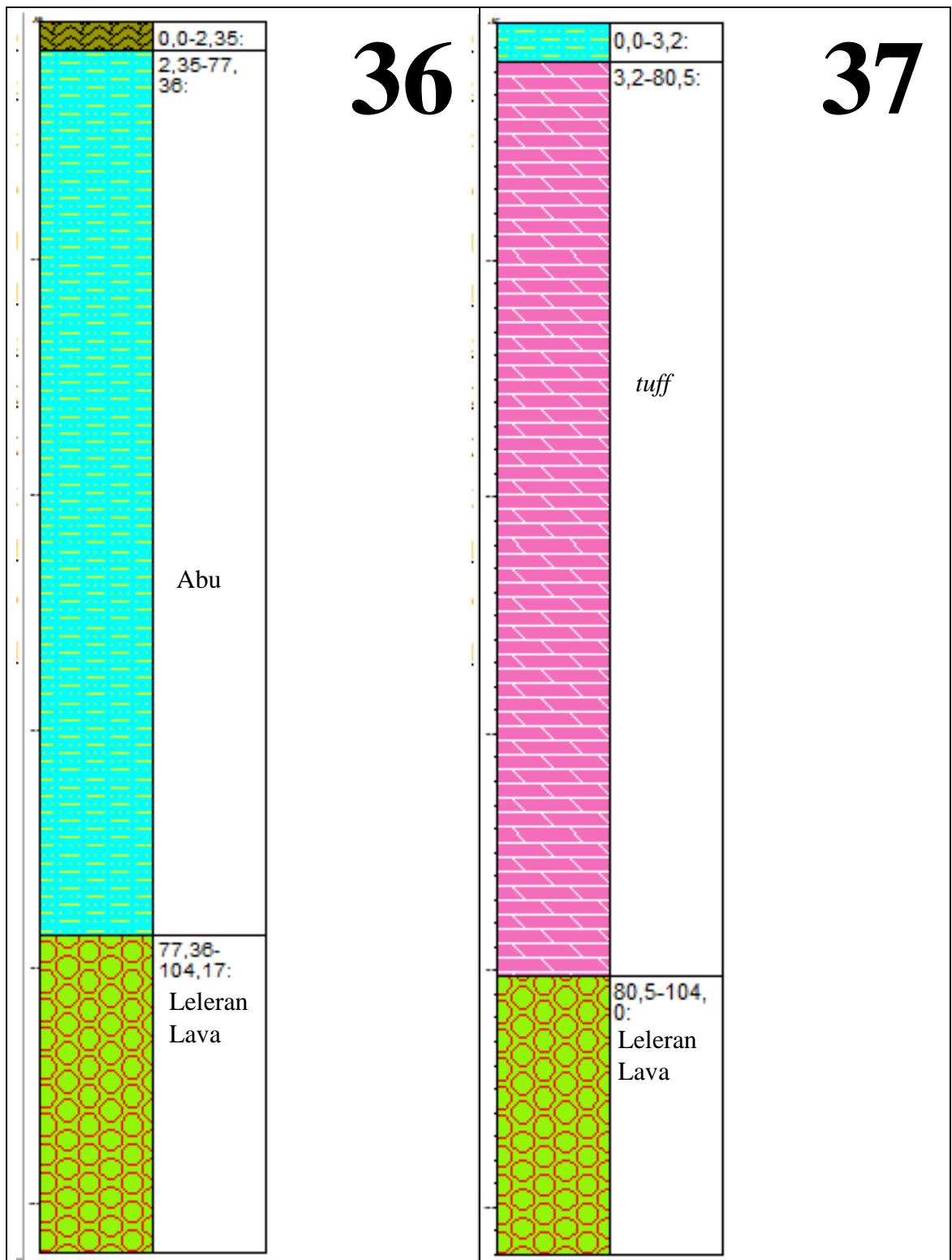
28

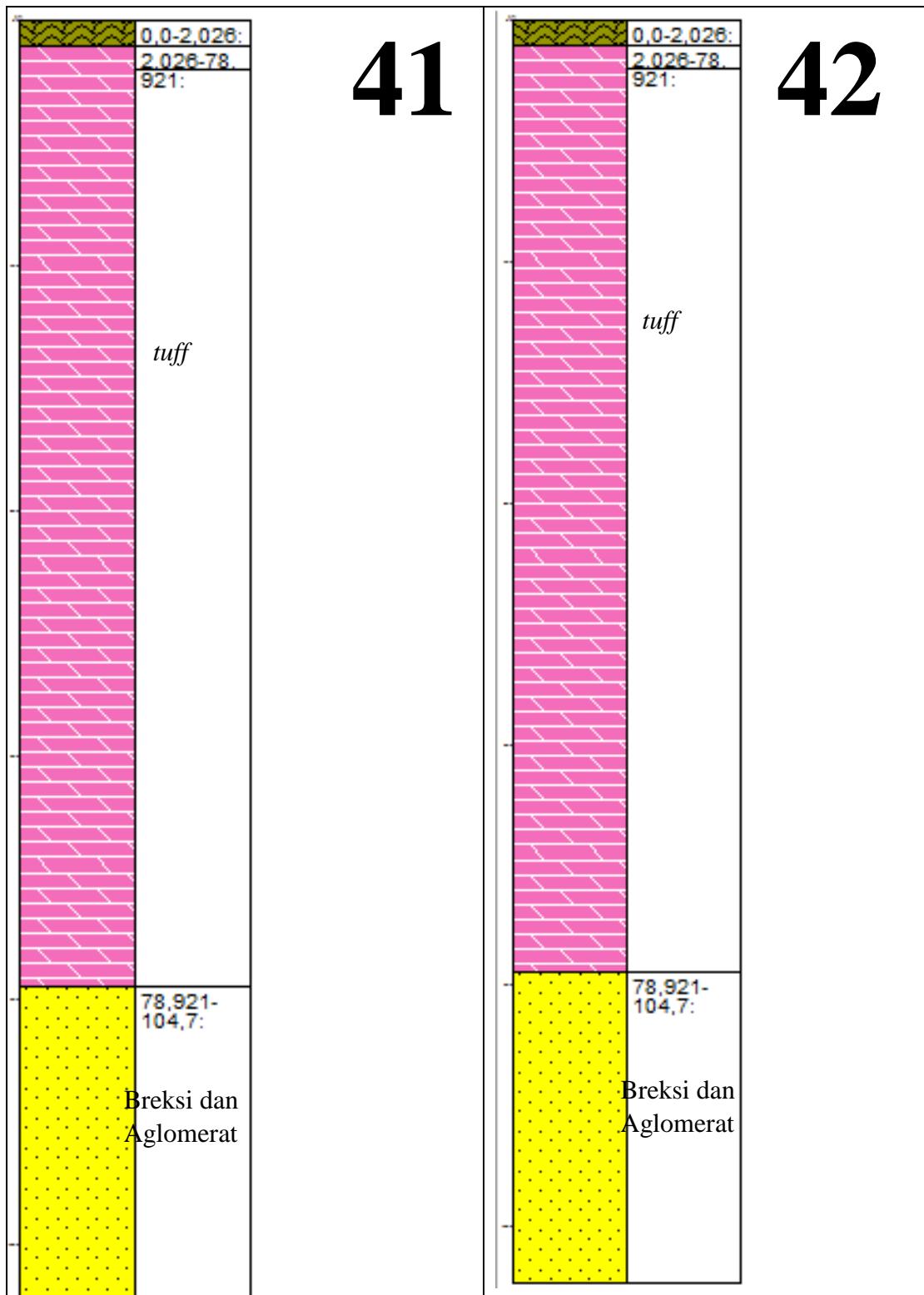


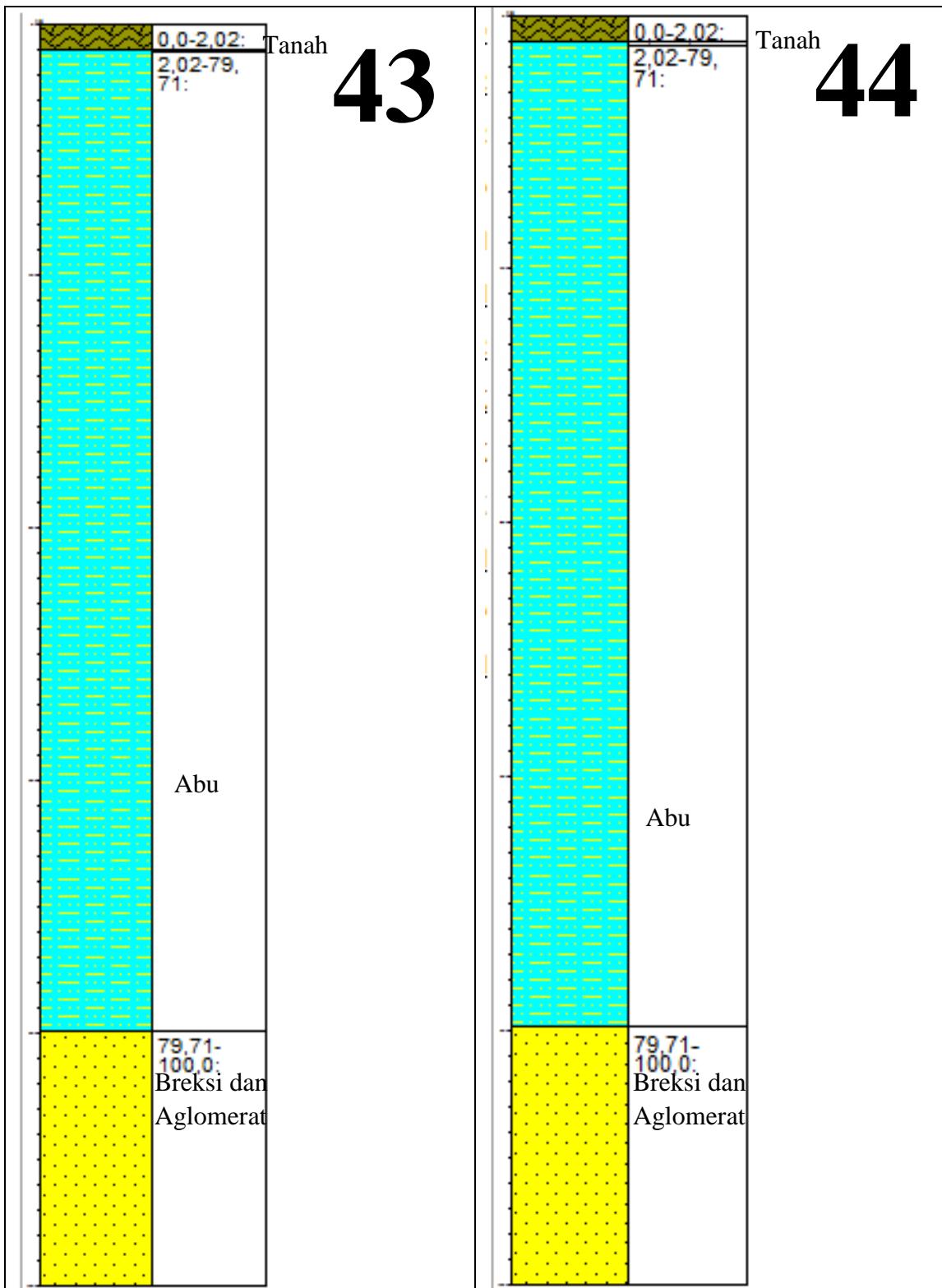
29











LAMPIRAN 5

Tabel Pembacaan Hasil Nilai V_s , dan Litologi dari Hasil Pemodelan *Ground Profiles*

TA	MISFIT	PEMBACAAN DARI GROUND PROFILES				GEOLOGI
		Depth	V_s	Litologi berdasarkan nilai V_s	Litologi	
11	0.31259	0.00 - 3.14	203.42	tanah sedang	Batu Pasir	Kebo-Butak
		3.14- 40.11	427.49	batuan lunak	Konglomerat	
		40.11 – 104.00	1282.28	batuan	Aglomerat	
18	0.4343	0.00 - 1.00	52.09	tanah lunak	Tanah	Semilir
		1.00 - 11.00	314.85	tanah sedang	Tanah	
		11.00 - 62.79	702.53	batuan lunak	Batu Lempung	
		62.79 - 103.88	1744.53	batuan keras	<i>Dasit</i> dan <i>Andesit</i>	
19	0.4292	0.00 -1.00	50.15	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		1.00 - 18.27	90.80	tanah lunak	Tanah	
		18.27 - 43.88	384.13	tanah sedang	<i>tuff</i>	
		43.88-85.50	411.56	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		85.50 - 104.23	1657.84	batuan keras	Leleran Lava	
25	0.22998	0.00 - 1.00	81.43	tanah lunak	Tanah	

		1.00 - 43.44	217.95	tanah sedang	Abu	Merapi Muda
		43.44 - 100	480.53	batuan lunak	<i>tuff</i>	
26	0.24895	0.00 - 5.87	59.85	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		5.87 - 26.15	97.87	tanah lunak	Tanah	
		26.15 - 104.13	672.98	batuan lunak	<i>tuff</i>	
34	0.28091	0.00 - 1.00	91.53	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		1.00 - 6.624	139.70	tanah lunak	Tanah	
		6.62 - 69.36	212.36	tanah sedang	Abu	
		69.36 - 100	703.24	batuan lunak	<i>tuff</i>	
43	0.08061	0.00 - 2.02	155.15	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		2.02 - 79.71	331.37	tanah sedang	Abu	
		79.71 - 100	964.58	batuan	Breksi dan Aglomerat	
20	0.25261	0.00 - 1.00	51.41	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		1.00 - 11.33	110.89	tanah lunak	Tanah	
		11.33 - 31.91	201.01	tanah sedang	Abu	
		31.91 - 87.22	588.03	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		87.22 - 100	893	batuan	Breksi dan Aglomerat	
21	0.24002	0.00 - 1.00	57.05	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		1.00 - 9.29	111.67	tanah lunak	Tanah	
		9.29 - 44.77	221.46	tanah sedang	Abu	

		44.77 - 74.38	459.85	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		74.38 - 104.22	1038.47	batuan	Breksi dan Aglomerat	
27	0.447	0.00 - 1.00	53.30	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		1.00 - 5.21	131.82	tanah lunak	Tanah	
		5.21 - 5.70	192.54	tanah sedang	Abu	
		5.70 - 56.29	269.12	tanah sedang	Abu	
		56.29 - 100	1025.06	batuan	Breksi dan Aglomerat	
28	0.3487	0.00 - 3.86	214.282	tanah sedang	Abu	Merapi Muda
		3.86 - 89.81	493.181	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		89.81 - 104.17	1187.303	batuan	Breksi dan Aglomerat	
29	0.2816	0.00 - 3.71	274.01	tanah sedang	Tanah	Merapi Muda
		3.71 - 98.23	566.68	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		98.23 - 104.17	1628.28	batuan keras	Lelehan lava	
35	0.14742	0.00 - 3.75	287.19	tanah sedang	Abu	Merapi Muda
		3.75 - 99.21	715.29	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		99.21 - 100	1051.29	batuan	Breksi dan Aglomerat	
44	0.30095	0.00 - 1.04	110.56	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		1.04 - 97.26	319.28	tanah sedang	Abu	
		97.26 - 103	1162.64	batuan	Breksi dan Aglomerat	

		0.00 - 1.00	64.51	tanah lunak	Tanah	
17	0.40649	1.00 - 11.22	169.42	tanah lunak	Tanah	
		11.22 - 16.88	225.24	tanah sedang	Abu	
		16.884 - 78.18	417.78	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		78.18- 104.2882	1715.13	batuan keras	Leleran Lava	Merapi Muda
6	0.51373	0.00 - 18.712	111.9904	tanah lunak	Tanah	
		18.712-44.315	340.38	tanah sedang	Tanah	
		44.315-104.15	1035.36	batuan	Batu Apung	kebo-butak
7	0.41427	0.00 - 1.220	60.257	tanah lunak	Tanah	
		1.220 - 35.95	418.618	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		35.95 - 104.17	1202.83	batuan	Batu Apung	Kebo- Butak
13	0.39721	0.00 - 1.00	51.883	tanah lunak	Tanah	
		1.00 - 5.42	149.37	tanah lunak	Tanah	
		5.42 - 28.32	462.16	batuan lunak	Konglomerat	
		28.32 - 86.35	872.84	batuan	Aglomerat	
		86.35 - 104.22	1336.85	batuan	<i>Sill</i>	Kebo- Butak
14	0.33126	0.00 - 1.00	50.75	tanah lunak	Tanah	
		1.00 - 13.97	137.62	tanah lunak	Tanah	
		13.97 - 49.94	259.35	tanah sedang	Batu Pasir	
		49.94 - 99.26	444.49	batuan lunak	Konglomerat	
		99.26 - 104.20	1555.08	batuan keras	<i>Sill</i>	Kebo- Butak

15	0.3906	0.00 - 1.00	53.62	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		1.00 - 9.34	131.70	tanah lunak	Tanah	
		9.384 - 14.54	160.84	tanah lunak	Tanah	
		14.54 - 64.71	234.92	tanah sedang	Abu	
		64.71 - 104.22	1366.99	batuan	Breksi dan Aglomerat	
12	0.20004	0.00 - 1.66	93.85	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		1.66-15.90	229.35	tanah sedang	Abu	
		15.90-104.17	414.45	batuan lunak	<i>tuff</i>	
36	0.12475	0.00 - 2.35	147.00	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		2.35-77.36	285.47	tanah sedang	Abu	
		77.36-104.17	1763.3	batuan	Leleran Lava	
37	0.11641	0.00 - 3.20	229.12	tanah sedang	Abu	Merapi Muda
		3.20 - 80.50	626.25	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		80.50 - 104	1638.1	batuan keras	Leleran Lava	
41	0.23639	0.00 - 2.026	167.57	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		2.026 - 78.921	359.25	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		78.921 - 104.7	1055.2	batuan	Breksi dan Aglomerat	
42	0.14361	0.00 - 2.49	251.94	tanah sedang	Abu	Merapi Muda
		2.49-95.34	390.33	batuan lunak	<i>tuff</i>	

		95.34-104.16	1046.80	batuan	Breksi dan Aglomerat	
16	0.394	0.00 - 12.39	101.86	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		12.39 - 78.92	295.34	tanah sedang	Abu	
		78.92 - 104.17	1099.35	batuan	Breksi dan Aglomerat	
10	0.36756	0.00-2.95	98.36	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		2.95-29.17	536.37	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		29.17-104.17	1316.06	batuan	Breksi dan Aglomerat	
22	0.30509	0.00 - 8.75	88.21	tanah lunak	Tanah	Merapi Muda
		8.75 - 64.67	249.43	tanah sedang	Abu	
		64.67-104.15	1480.78	batuan	Breksi dan Aglomerat	
33	0.11476	0.00 - 1.06	240.82	tanah sedang	Abu	Merapi Muda
		1.06 - 93.46	441.83	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		93.46 - 104.60	1163.80	batuan	Breksi dan Aglomerat	
30	0.23729	0.00 -3.20	226.84	tanah sedang	Abu	Merapi Muda
		3.20 - 91.62	451.20	batuan lunak	<i>tuff</i>	
		91.62 - 104.11	1156.84	batuan	Breksi dan Aglomerat	

LAMPIRAN 6

DOKUMENTASI PENGAMBILAN DATA



Gambar L33. Dokumentasi Pengambilan Data

LAMPIRAN 7

PETA GEOLOGI KLATEN

