



TUGAS AKHIR - SF141501

Estimasi Kecepatan Gelombang Geser (V_s)
Melalui Inversi Kurva *Horizontal to Vertical*
Spectrum Ratio Pada Jalur Sesar Grindulu

MUHAMMAD AZMI CAESARDI
NRP 01111440000100

Dosen Pembimbing
Dr. Sungkono, M.Si
Firman Syaifuddin, S.Si, M.T

Departemen Fisika
Fakultas Ilmu Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018



TUGAS AKHIR - SF141501

**Estimasi Kecepatan Gelombang Geser (V_s)
Melalui Inversi Kurva *Horizontal to Vertical
Spectrum Ratio* Pada Jalur Sesar Grindulu**

**MUHAMMAD AZMI CAESARDI
NRP 01111440000100**

**Dosen Pembimbing
Dr. Sungkono, M.Si
Firman Syaifuddin, S.Si, M.T**

**Departemen Fisika
Fakultas Ilmu Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**



FINAL PROJECT - SF141501

**Estimation of Shear Wave Velocity (V_s) Using
Horizontal to Vertical Spectrum Ratio Curve
Inversion in Grindulu Fault**

**MUHAMMAD AZMI CAESARDI
NRP. 01111440000100**

**Advisor
Dr. Sungkono, M.Si
Firman Syaifuddin, S.Si, M.T**

**Department of Physics
Faculty of Science
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

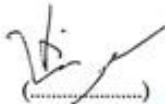
**Estimasi Kecepatan Gelombang Geser (V_s)
Melalui Inversi Kurva Horizontal to Vertical
Spectrum Ratio Pada Jalur Sesar Grindulu**

Disusun untuk memenuhi syarat kelulusan mata kuliah Tugas
Akhir Program Strata I
Departemen Fisika
Fakultas Ilmu Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
MUHAMMAD AZMI CAESARDI
NRP 01111440000100

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Dr. Sungkono, M. Si
NIP. 19850702 201404.1.002



(.....)

Firman Syaifuddin, S. Si, M.T
NIP. 19840911 201404.1.001



(.....)



**Estimasi Kecepatan Gelombang Geser (V_s) Melalui
Inversi Kurva *Horizontal to Vertical Spectrum Ratio*
Pada Jalur Sesar Grindulu**

Nama : Muhammad Azmi Caesardi
NRP : 0111144000100
Jurusan : Fisika, FIA ITS
Pembimbing : Dr. Sungkono, M. Si
Firman Syaifuddin, S. Si M.T

Abstrak

Sesar Grindulu beberapa kali menyebabkan gempa bumi di Kabupaten Pacitan. Getaran yang ditimbulkan gempa bumi dapat menyebabkan kerusakan bangunan yang tergantung pada karakteristik tanah setempat dan kondisi bangunan. Oleh karena itu, penelitian pencitraan Sesar Grindulu menggunakan kecepatan gelombang geser (V_s) perlu dilakukan. Dalam penelitian ini, nilai V_s 1D diestimasi menggunakan algoritma Monte Carlo. Selanjutnya, V_s 2D didapatkan melalui interpolasi dari beberapa V_s 1D. Analisis V_s 2D ini menunjukkan bahwa keberadaan sesar-sesar tersebut dapat teridentifikasi (sesuai dengan peta geologi). Hasil V_s 2D didukung oleh hasil analisa intepretasi kualitatif (kurva HVSR).

Kata kunci: *inversi HVSR, Sesar Grindulu, mikrotremor, Kecepatan Gelombang Geser (V_s)*

Estimation of Shear Wave Velocity (V_s) Using Horizontal to Vertical Spectrum Ratio Curve Inversion in Grindulu Fault

Name : Muhammad Azmi Caesardi
NRP : 01111440000100
Major : Physics, Faculty of Science ITS
Advisor : Dr. Sungkono, M. Si
Firman Syaifuddin, S. Si M.T

Abstract

The Grindulu fault have caused several earthquakes in Pacitan City. Vibration is caused by earthquakes can cause damage to buildings that depend on local soil characteristics and building conditions. Therefore, research on Grindulu Fault imaging using shear wave velocity (V_s) is needed. In this study, V_s 1D values have estimated using the Monte Carlo algorithm. Furthermore, V_s 2D is obtained through interpolation of several V_s 1D. The 2D V_s analysis shows that the existence of these faults can be identified (correlated to the geological map). The 2D V_s results are supported by the results of qualitative interpretation analysis (HVSr curve).

Keywords: *HVSr inversion, Sesar Grindulu, mikrotremor, Shear wave velocity (V_s)*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir sebagai syarat wajib untuk memperoleh gelar sarjana jurusan Fisika FIA ITS dengan judul:

Estimasi Kecepatan Gelombang Geser (Vs) Melalui Inversi Kurva *Horizontal to Vertical Spectrum Ratio* Pada Jalur Sesar Grindulu

Penulis menyadari dengan terselesaikannya penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Sungkono, M. Si selaku dosen pembimbing pertama yang senantiasa memberikan bimbingan, wawasan, pemantauan, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lancar
2. Bapak Firman Syaifuddin S.Si M.T selaku dosen pembimbing kedua yang dengan sabar m,enuntun penulis dalam memahami konsep intepretasi yang benar
3. Bapak Dr. rer nat Eko Minarto, selaku dosen wali yang selalu memberikan dukungan kepada penulis selama masa perkuliahan.
4. Orang tua dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan do'a serta dukungan moral dan spiritual kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Keluarga besar Bapak Amin dan Ibu Ani yang telah menganggap kami sebagai anak sendiri.
6. Sabahat – sahabat penulis yakni Kepet, Rafi, dan Rahman yang telah dengan sabar mendengarkan keluh kesah penulis dan senantiasa mendukung tanpa henti.
7. Tim TA Pacitan, yakni Haidar dan Irvan, yang telah bersama-sama menaklukan sulitnya medan Pacitan

8. Mas Imam Gazali S.T yang sudah dengan sabar mengajari penulis untuk memahami inversi HVSR menggunakan OpenHVSR
9. Teman seperjuangan yang ada di Lab. Geofisika antara lain Wildan, Cepe, Mbak Be, Bram, Silvi, Afif, Samid, dan masih banyak lagi yang telah membantu dan memotivasi dalam menyelesaikan Tugas Akhir dengan penuh suka dan duka.
10. Teman-teman Antares yang tidak bisa saya sebutkan satu-satu yang telah memberikan semangatnya kepada penulis selama kuliah hingga pengerjaan Tugas Akhir.
11. Segenap teman-teman dan adik-adik seperjuangan SM IAGI ITS Kabinet Aryasatya.
12. Penghuni setia Lab. Geofisika yakni, Mas getek, Mas Dani, Mas Ireks, Mas Mufid, Mas Yayan, Mas Adi, Mas Oman, Mas Uunk, dan Mas Fikri
13. Calon (istri) yang akan memiliki masa depan gemilang dan putra-putri cerdas bersama saya

Penulis menyadari atas keterbatasan ilmu pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki, oleh karena itu penulis menerima kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan penulisan Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan serta memberikan inspirasi bagi pembaca untuk dapat mengembangkan bidang pengembangan ilmu kebumih

Surabaya, 22 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
Abstrak	iv
Abstract	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II	5
DASAR TEORI.....	5
2.1 Struktur Geologi Regional Kabupaten Pacitan.....	5
2.2 Metode Mikrotremor	8
2.3 HVSr (Horisontal to Vertical Spectrum Ratio)	9
2.4 Inversi Kurva HVSr	12
BAB III.....	15
METODOLOGI	15
3.1 Alat dan Bahan	15
3.2 Tahapan Penelitian	16
BAB IV.....	23
HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Analisa Data Pengukuran	23
4.2 Analisa Kurva HVSr	24
4.3 Intepretasi Kualitatif	29
4.4 Inisiasi Parameter Model.....	32

4.5	Inversi Kurva HVSR	33
4.6	persebaran Kecepatan Gelombang Geser (V_s).....	36
BAB V		39
KESIMPULAN DAN SARAN		39
5.1	Kesimpulan.....	39
5.2	Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA		41
BIODATA PENULIS		43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta geologi Kabupaten Pacitan	5
Gambar 2.2 Riwayat kegunaan Kabupaten Pacitan.....	8
Gambar 2.3 Kurva HVSR.....	11
Gambar 2.4 Inversi dan pemodelan inversi	12
Gambar 2.5 Diagram alir algoritma Monte Carlo	13
Gambar 3.1 Alat-alat yang dibutuhkan.....	15
Gambar 3.2 Diagram alir.....	16
Gambar 3.3 Desain titik pengukuran.....	17
Gambar 3.4 Diagram alir metode HVSR	19
Gambar 3.5 Project OpenHVSR.....	21
Gambar 4.1 Rekaman gelombang pada titik Pc 31	23
Gambar 4.2 Rekaman gelombang Pc 31 hasil <i>filtering</i>	24
Gambar 4.3 Proses <i>windowing</i> pada titik Pc 102	25
Gambar 4.4 Kurva HVSR titik Pc 109	26
Gambar 4.5 Kurva HVSR dengan satu puncak.....	27
Gambar 4.6 Kurva HVSR dengan dua puncak.....	28
Gambar 4.7 Kurva HVSR dengan puncak lebar.....	29
Gambar 4.8 Interpretasi kualitatif Lintasan 1	30
Gambar 4.9 Interpretasi kualitatif Lintasan 2	31
Gambar 4.10 Pengaturan umum pada OpenHVSR	34
Gambar 4.11 Hasil inversi titik Pc 34	35
Gambar 4.12 Persebaran Vs 2D pada Lintasan 1	37
Gambar 4.13 Persebaran Vs 2D pada Lintasan 2	38

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter model untuk inversi.....	33
--	----

DAFTAR LAMPIRAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kabupaten Pacitan merupakan daerah perbukitan yang didominasi oleh vulkanik dan *karst*. Selain itu, di daerah ini terdapat sesar aktif, Sesar Grindulu, yang beberapa kali menyebabkan gempa bumi.

Menurut Gosar et al (2008), kerusakan bangunan karena adanya getaran gempa bumi yang melewati suatu daerah tergantung pada efek lokal (karakteristik tanah setempat) dan kondisi bangunan. Oleh karena itu, penelitian tentang karakteristik tanah bawah permukaan sangatlah penting bagi mikrozonasi dan pengembangan wilayah Kabupaten Pacitan ini untuk meminimalisir dampak kerusakan akibat gempa bumi.

Saat ini, telah banyak penelitian metode seismik yang mempelajari karakteristik tanah bawah permukaan. Salah satunya adalah mikrotremor. Mikrotremor dapat mengidentifikasi seberapa besar efek yang ditimbulkan akibat gelombang gempa bumi tanpa memerlukan informasi geologi lainnya (Nakamura, 2008).

Mikrotremor menjadi metode yang cukup populer dan banyak digunakan oleh para peneliti, dimana mikrotremor tidak membutuhkan *hard rock* (batuan keras) sebagai titik pengukuran dan mikrotremor mampu merepresentasikan tingkat amplifikasi atau penguatan dari gerakan tanah (Nakamura, 1989). Salah satu analisa data dari mikrotremor ialah HVSR (*Horizontal to Vertical Spectrum Ratio*).

Namun, penyusun gelombang dari kurva HVSR masih diperdebatkan. Bonnefoy-Claudet et al (2006) menganggap bahwa kurva HVSR terpengaruh oleh gelombang permukaan akibat adanya fenomena alam dan aktivitas manusia, sedangkan Nakamura (2000) menunjukkan bahwa kurva HVSR tersusun oleh gelombang badan yang merepresentasikan karakteristik daerah penelitian. Tetapi, Dal Moro (2010c) beranggapan bahwa kurva HVSR merupakan gabungan antara gelombang

badan (S_H , S_V , dan P) dan gelombang permukaan (Love dan Rayleigh) pada frekuensi tinggi. Hal ini diperkuat oleh García-Jerez et al (2016).

Terlepas dari semua hal tersebut, kurva HVSR dapat digunakan untuk memetakan karakteristik tanah bawah permukaan dengan cara memperkirakan besarnya nilai kecepatan gelombang geser (V_s) melalui proses inversi. Kecepatan gelombang geser (V_s) merupakan sebuah parameter penting dalam hal mengevaluasi HVSR khususnya pada lapisan sedimen yang berada di atas batuan dasar. Untuk mendapatkan besarnya kecepatan gelombang geser (V_s), kurva HVSR harus melalui sebuah proses, yakni proses inversi yang berbasis gelombang badan (Herak, 2008).

Dalam prosesnya, inversi kurva HVSR memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan metode lainnya yakni tidak memakan biaya yang besar dan tidak membutuhkan waktu yang lama layaknya penggunaan data bor (*borehole*). Selain itu, algoritma yang digunakan dalam inversi kurva HVSR ialah algoritma Monte Carlo, yang mana algoritma acak ini berfungsi untuk menghasilkan kurva yang sesuai dengan kurva HVSR hasil pengukuran. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan *software* OpenHVSR yang dikembangkan Bignardi et al (2016) dengan basis algoritma Monte Carlo.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana menghasilkan kecepatan gelombang geser (V_s) dengan menggunakan inversi mikrotremor HVSR di daerah penelitian?
2. Bagaimana menentukan area rawan terdampak gempa bumi berdasarkan karakteristik dan klasifikasi tanah di daerah penelitian?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan kecepatan gelombang geser (V_s) dengan menggunakan inversi mikrotremor HVSR di daerah penelitian.
2. Menentukan area rawan terdampak gempa bumi berdasarkan karakteristik dan klasifikasi tanah pada daerah penelitian.

1.4 Batasan Masalah

Dikarenakan lingkup penelitian terhadap topik ini cukup luas, maka perlu diberikan batasan masalah agar tidak terlalu menyimpang dari tujuan penelitian. Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

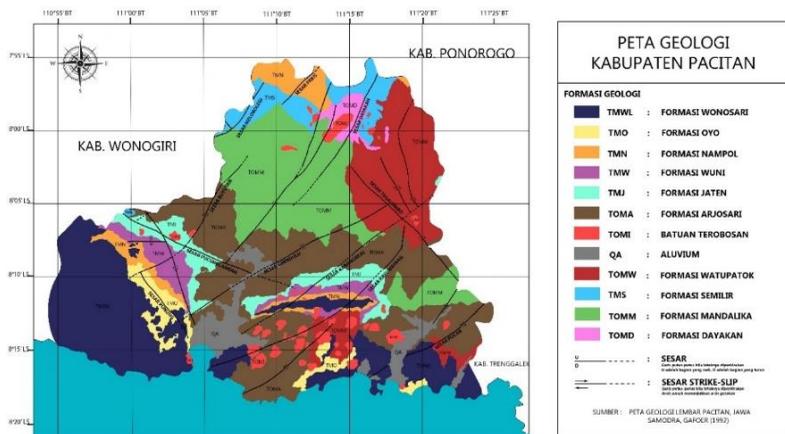
1. Pengolahan data mikrotremor pada tahap inversi menggunakan *software* OpenHVSR
2. Pengolahan data mikrotremor pada tahap pembuatan kurva HVSR menggunakan *software* Geopsy
3. Algoritma yang digunakan merupakan algoritma Monte Carlo.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Struktur Geologi Regional Kabupaten Pacitan

Secara letak geografis, Kabupaten Pacitan (Gambar 2.1) terletak di pantai selatan Pulau Jawa. Daerah ini memiliki garis pantai yang langsung berhadapan dengan Samudra Hindia. Posisi tersebut menunjukkan bahwa Kabupaten Pacitan dapat dikelompokkan ke dalam Zona Pegunungan Selatan (van Bemmelen, 1949)



Gambar 2.1 Peta geologi Kabupaten Pacitan

Zona Pegunungan Selatan membujur dari Daerah Yogyakarta sampai ke Daerah Malang Selatan dan melintang dari Zona Solo hingga ke Samudra Hindia. Zona Pegunungan Selatan memiliki tiga subzona, yakni Subzona Baturagung, Subzona Wonosari, dan Subzona Gunung Sewu. Kabupaten Pacitan sendiri masuk ke dalam Subzona Gunung Sewu. Wilayah ini umumnya tersusun oleh batuan metamorf Pra-Tersier yang muncul di beberapa tempat dan tertutup oleh batuan vulkanik dan batugamping berumur Eosen dan Oligosen-Pliosen.

2.1.1 Statigrafi Regional

Menurut Sjarifudin dan Hamidi (1992), Kabupaten Pacitan didominasi oleh vulkanik Tersier dan batugamping. Hal tersebut sangat erat hubungannya dengan formasi-formasi di Kabupaten Pacitan yang telah dijelaskan pada Gambar 2.1, yaitu Formasi Mandalika, Formasi Wuni, Formasi Wonosari, Formasi Oyo, Formasi Nampol, Formasi Jaten, Formasi Arjosari, Formasi Watupatok, Formasi Semilir, dan Formasi Dayakan.

Formasi Mandalika

Formasi Mandalika diperkirakan berumur Oligosen Akhir sampai Miosen Awal yang tersusun atas material vulkanik berupa andesit-basal, tuf dasit, latit pofir, dan riolit. Kelompok batuan penyusun Formasi Mandalika pada umumnya besar dan fragmennya sangat kasar. Formasi ini memiliki ketebalan lapisan antara 80-200 m.

Formasi Wonosari

Umur Formasi Wonosari berkisar antara Miosen Akhir hingga Pliosen. Selain itu, formasi ini tersusun oleh litologi berupa batugamping berlapis yang berwarna abu-abu keputihan dan mengandung banyak fosil semacam koral serta moluska. Formasi ini diperkirakan mempunyai hubungan selaras dengan Formasi Oyo.

Formasi Dayakan

Formasi Dayakan diperkirakan berumur Oligosen dan terdiri dari susunan batu pasir serta batu lempung.

Formasi Semilir

Formasi Semilir umumnya berupa endapan piroklastik dengan komponen dasitik yang diproduksi oleh erupsi dan diperkirakan berumur Miosen Awal.

Formasi Wuni

Formasi yang tersusun oleh batuan sejenis klastika gunung berapi dan umumnya tersebar di bagian selatan Kabupaten Pacitan.

Formasi Arjosari

Formasi Arjosari diperkirakan berumur Oligo-Miosen dan tersusun oleh berbagai macam batuan seperti konglomerat, batugamping, batu lempung dll.

Formasi Watupatok

Formasi ini biasanya tersusun atas lava koheren yang mayoritas tersebar di bagian utara dan sebagian kecil ditemukan di bagian selatan Kabupaten Pacitan.

Formasi Oyo

Formasi ini tersusun atas batupasir gampingan, kalsilitut tufan, dan konglomerat yang memiliki fragmen batugamping. Formasi ini diperkirakan terbentuk pada Miosen Akhir. Bagian atas Formasi Oyo kemungkinan memiliki hubungan menjari dan tidak selaras dengan bagian bawah dari Formasi Wonosari.

Formasi Nampol

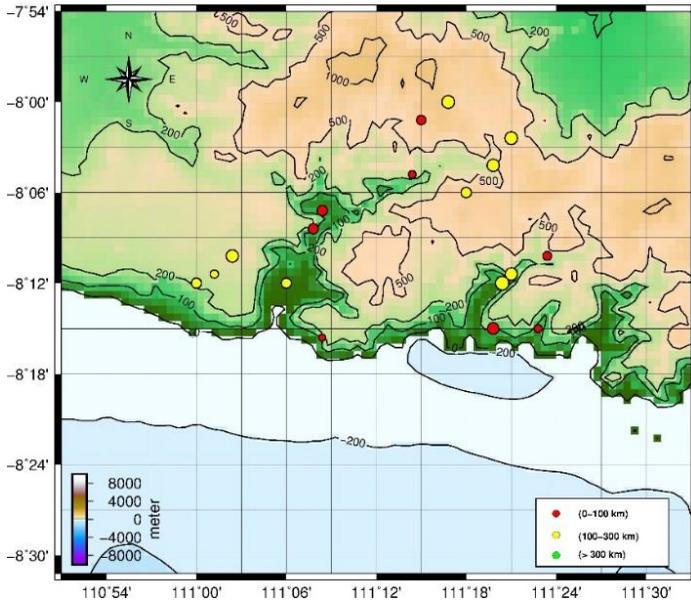
Formasi Nampol kemungkinan diendapkan pada umur Miosen Tengah dan tersusun oleh batu lempung yang banyak mengandung fragmen-fragmen koral bercabang.

Formasi Jaten

Terbentuknya Formasi Jaten diperkirakan sejak Miosen Awal dan bagian atasnya tersusun oleh batu lumpur, tuf, lignit dll.

2.1.2 Sesar/Patahan

Kabupaten Pacitan juga memiliki banyak sesar, yakni: Sesar Punung, Sesar Buyutan, Sesar Pucunglangan, Sesar Grindulu, Sesar Pakis, Sesar Dayakan, Sesar Kayuwayang, Sesar Dayakan, Sesar Tegalombo, dan Sesar Pucak. Dari sekian banyak sesar yang terdapat di Kabupaten Pacitan, Sesar Grindulu dan Sesar Pucak dapat dikategorikan sebagai sesar aktif. Melihat dari sejarahnya, kedua sesar ini pernah beberapa kali menyebabkan gempa bumi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.2. Jika ditinjau dari kondisi geologi Kabupaten Pacitan (Gambar 2.1), benar adanya jika beberapa gempa yang terjadi di wilayah ini disebabkan oleh kedua sesar tersebut karena titik munculnya gempa berada pada jalur Sesar Grindulu dan Sesar Pucak yang menerus dari selatan Kabupaten Pacitan sampai menuju ke bagian utara.



Gambar 2.2 Riwayat kegempaan Kabupaten Pacitan

2.2 Metode Mikrotremor

Mikrotremor merupakan sebuah metode geofisika yang memanfaatkan getaran alami (*ambient vibration*) yang disebabkan oleh aktivitas manusia (lalu lintas, aktivitas pabrik) dan fenomena alam (gelombang laut, getaran tanah, angin kencang). Metode ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi seberapa besar efek yang timbul di bawah permukaan akibat gelombang seismik tanpa memerlukan informasi geologi lainnya (Nakamura, 2008)

Pada frekuensi rendah (di bawah 1 Hz), sumber mikrotremor disebabkan oleh fenomena alam seperti gelombang laut, gerakan tanah, dan hembusan angin. Sedangkan pada frekuensi tinggi yakni di atas 1 Hz, sumber utamanya adalah aktivitas manusia seperti lalu lintas kendaraan dan getaran mesin industri (Takai dan Tanaka, 1961).

Frekuensi hasil pengukuran dapat digunakan untuk mengukur ketebalan sedimen. Hal ini karena frekuensi pada daerah sedimen berhubungan erat dengan kecepatan gelombang geser (V_s). Semakin tebal sedimen maka nilai frekuensi yang didapatkan semakin kecil. Hubungan ketiganya dinyatakan pada persamaan sebagai berikut:

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \quad (2.1)$$

dengan f_0 menyatakan nilai frekuensi, V_s menyatakan kecepatan gelombang geser, dan h menunjukkan ketebalan lapisan.

Metode HVSR memerlukan alat seismometer yang mampu merekam komponen vertikal (*up down*), EW (*east-west*), dan NS (*north-south*) secara simultan. Perekaman gelombang seismik oleh seismometer dapat langsung dilakukan dan tidak membutuhkan sumber buatan serta sumber gempa bumi, sebab gelombang yang direkam merupakan gelombang yang tersimpan dan timbul dari alam.

2.3 HVSR (*Horisontal to Vertical Spectral Ratio*)

Metode ini sebenarnya pertama kali diperkenalkan oleh Nogoshi dan Iragashi pada tahun 1971 yang selanjutnya dimodifikasi dan dikembangkan oleh (Nakamura, 1989). Metode HVSR merupakan metode sederhana yang dapat menggambarkan karakteristik dinamis tanah maupun struktur yang memperlihatkan hubungan perbandingan antara rasio *spectrum Fourier* dari sinyal mikrotremor komponen horisontal terhadap komponen vertikal dari gerakan permukaan (Nakamura, 1989).

Gerakan horisontal dan vertikal memiliki faktor amplifikasi pada lapisan sedimen yang bersentuhan langsung dengan batuan dasar yang dilambangkan oleh T_H dan T_V (Nakamura, 2000). Besarnya faktor amplifikasi horisontal dinyatakan:

$$T_H = \frac{SH_s}{SH_B} \quad (2.2)$$

dengan S_{HS} merupakan spektrum dari komponen gerak horisontal pada lapisan sedimen dan S_{HB} merupakan spektrum dari komponen gerak horisontal pada batuan dasar. Besarnya faktor amplifikasi vertikal dinyatakan:

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2.3)$$

dengan S_{VS} adalah spektrum dari komponen gerak vertikal pada lapisan sedimen dan S_{VB} adalah spektrum dari komponen gerak vertikal pada batuan dasar.

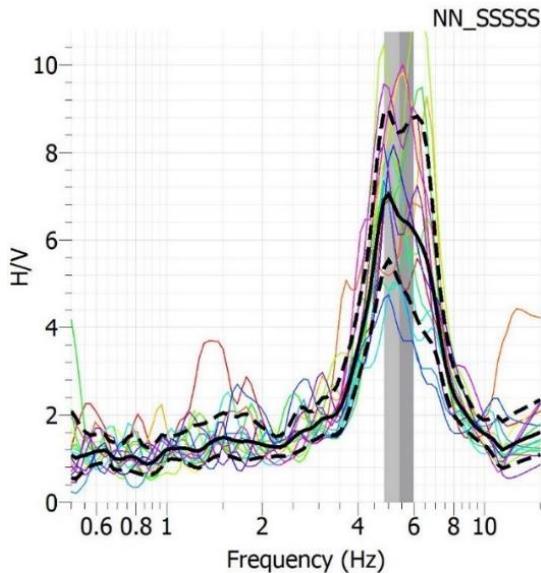
Nakamura (1989) berasumsi bahwa mikrotremor didominasi oleh gelombang geser dan mengabaikan gelombang permukaan. Hal ini membuat HVSR dianggap serupa dengan fungsi transfer antara getaran gelombang pada lapisan sedimen dan batuan dasar. Dengan kata lain, amplitudo dan puncak frekuensi HVSR merepresentasikan amplifikasi dan frekuensi setempat.

Karena rasio spektrum antara komponen horisontal dan vertikal pada batuan dasar mendekati satu, maka *noise* yang terekam pada batuan dasar akibat efek dari gelombang Rayleigh dapat dihilangkan, sehingga hanya ada pengaruh yang disebabkan oleh struktur geologi lokal (T_{SITE}). T_{SITE} menjelaskan puncak amplifikasi pada frekuensi dasar dari suatu lokasi. Oleh karena itu, besarnya nilai HVSR dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$HVSR = T_{SITE} = \frac{\sqrt{(H_{SN}(w))^2 + (H_{WE}(w))^2}}{S_{VS}} \quad (2.4)$$

dengan H_{SN} menyatakan spektrum komponen horisontal utara-selatan, H_{WE} menyatakan spektrum komponen horisontal barat-timur, dan S_{VS} menyatakan spektrum komponen vertikal.

Gambar 2.3 merupakan hasil HVSR yang mengandung arti bahwa amplitudo maksimum dari HVSR berkorelasi dengan amplifikasi (A_0), sedangkan faktor frekuensi natural (f_0) ditunjukkan oleh frekuensi yang berkorelasi dengan amplitudo HVSR yang maksimum.



Gambar 2.3 Kurva HVSR

Nilai frekuensi natural berhubungan dengan nilai kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan (Persamaan 2.1), sedangkan nilai amplifikasi berhubungan dengan tingkat deformasi (pelapukan) batuan. Untuk lebih jelasnya, nilai amplifikasi ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$A_0 = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \quad (2.4)$$

dengan A_0 menyatakan nilai amplifikasi, V_b menunjukkan kecepatan gelombang di batuan dasar, V_s menunjukkan kecepatan gelombang di lapisan sedimen, ρ_b menyatakan densitas batuan dasar, dan ρ_s menyatakan densitas lapisan sedimen

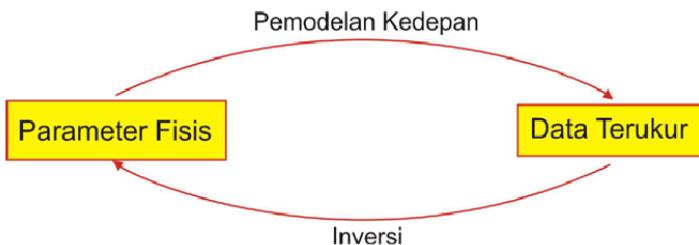
Menurut Konno dan Ohmachi (1971), gelombang Rayleigh sebagai gelombang yang mendominasi kurva HVSR. Sementara itu, Nakamura (1989) menunjukkan bahwa kurva HVSR merupakan representasi dari gelombang badan (S_V dan S_H). Namun, García-Jerez et al. (2016) menyatakan jika HVSR

merupakan gabungan antara gelombang badan dan gelombang permukaan. Meskipun hal tersebut masih diperdebatkan, metode ini dapat digunakan untuk mengestimasi nilai amplifikasi dan frekuensi natural.

2.4 Inversi Kurva HVSR

Kurva HVSR dipengaruhi oleh 6 parameter yaitu V_s , V_p , Q_s , Q_p , h , dan p (Herak, 2008). Menurut Dal Moro (2010c), kontras impedansi mempengaruhi kurva HVSR, yang mana kurva tersebut dipengaruhi oleh densitas bawah permukaan (p). Parameter Q_p memiliki efek kecil terhadap redaman gelombang pada V_s/V_p rendah (Xia et al., 2003), sedangkan Meng (2007) menunjukkan bahwa parameter Q_s berpengaruh terhadap besarnya nilai amplifikasi. Sementara itu, ketebalan lapisan (h) berbanding terbalik dengan frekuensi dominan (Nakamura, 2008). Kecepatan gelombang geser (V_s) berpengaruh besar terhadap nilai amplifikasi dan frekuensi dominan, sedangkan kecepatan gelombang P (V_p) hanya berpengaruh terhadap amplifikasi meskipun tidak sebesar V_s .

Menurut Grandis (2009), inversi diterapkan untuk mendapatkan informasi sistem fisika berdasarkan data observasi melalui penjabaran matematis. Gambar 2.4 menjelaskan bahwa inversi dapat digunakan untuk membuat kerangka matematika dalam mentransformasi data pengukuran suatu ruang model untuk mengestimasi parameter model.

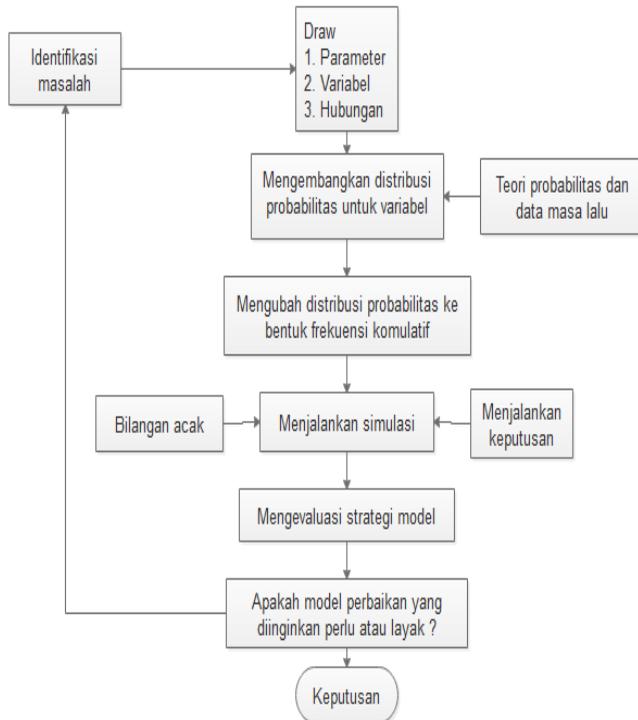


Gambar 2.4 Inversi dan pemodelan inversi

Inversi dapat digunakan dalam banyak bidang seperti pada cabang medis, elektronika, dan ilmu geofisika. Dalam

geofisika, inversi bertujuan untuk menentukan struktur bumi. Struktur bumi dapat ditentukan salah satunya dengan inversi kurva HVSR.

Menurut Herak (2008), inversi HVSR digunakan untuk menghasilkan parameter V_s bawah permukaan dengan meminimumkan fungsi objektif antara data pengukuran dan data perhitungan. Inversi kurva HVSR dalam penelitian ini menggunakan algoritma Monte Carlo. Sedangkan pemodelan kedepan yang digunakan ialah kurva HVSR berbasis gelombang badan dan/atau gelombang permukaan (*multi mode*), sebagaimana dalam Bignardi et al. (2016).



Gambar 2.5 Diagram alir algoritma Monte Carlo

Metode inversi dalam OpenHVSR menggunakan algoritma Monte Carlo, yang mana algoritma ini bekerja dengan melakukan iterasi terhadap parameter model untuk dicocokkan

dengan kurva HVSR hasil pengukuran sampai ditemukan model terbaik. Monte Carlo sering digunakan dalam hal analisa keputusan yang melibatkan beberapa parameter untuk dilakukan pertimbangan secara simultan. Algoritma ini dapat diterapkan pada banyak bidang karena didasarkan pada proses simulasi dengan pilihan kemungkinan secara acak. Dengan kata lain, algoritma Monte Carlo merupakan jenis distribusi sampling dari sebuah proses acak, meliputi penentuan distribusi probabilitas dari variabel yang diteliti dan sampel acak dari distribusi untuk mendapatkan data (Gambar 2.5)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alat dan Bahan

Peralatan untuk melakukan penelitian ini sebagaimana pada Gambar 3.1, yakni mikrotremor yang berfungsi sebagai alat ukur, kompas untuk menentukan arah, aki 12 Volt sebagai sumber listrik untuk mikrotremor, peta geologi yang berfungsi untuk mengetahui kondisi geologi pada daerah penelitian, dan multimeter untuk mengukur beda potensial pada aki. Selain itu, pada penelitian ini juga menggunakan *software Geopsy, Surfer*, dan OpenHVSr.



(a)



(b)



(c)

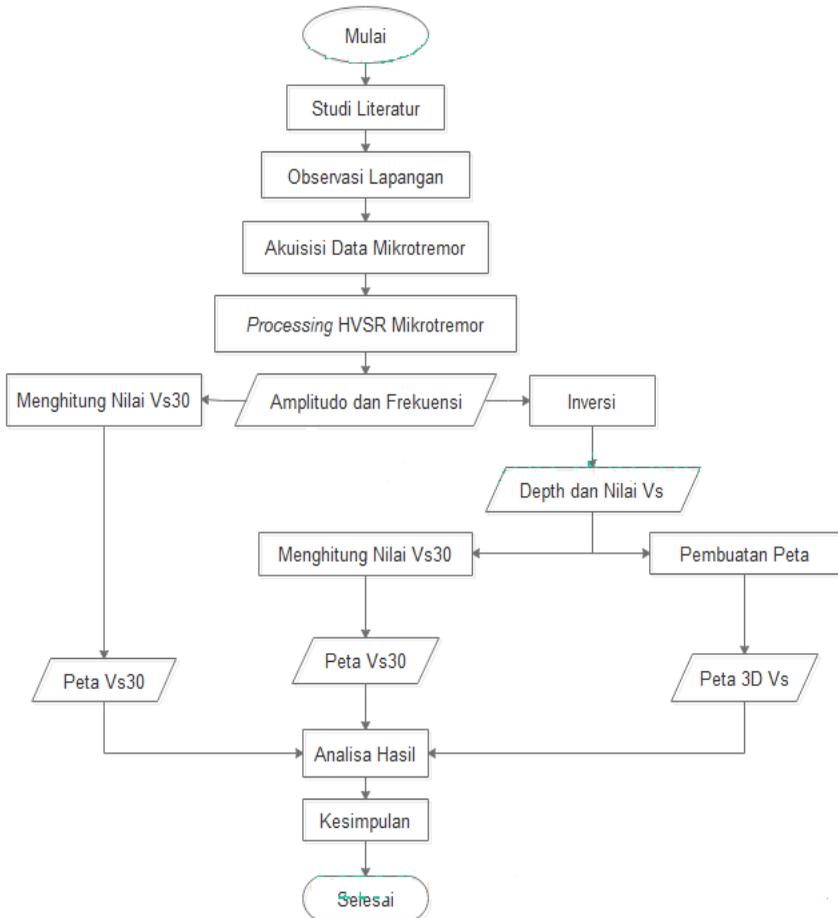


(d)

Gambar 3.1 Alat-alat yang dibutuhkan dalam penelitian: (a) mikrotremor, (b) multimeter, (c) aki 12 volt, (d) kompas

3.2 Tahapan Penelitian

Alur penelitian tugas akhir ini sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2. Gambar ini dapat dideskripsikan sebagai berikut:



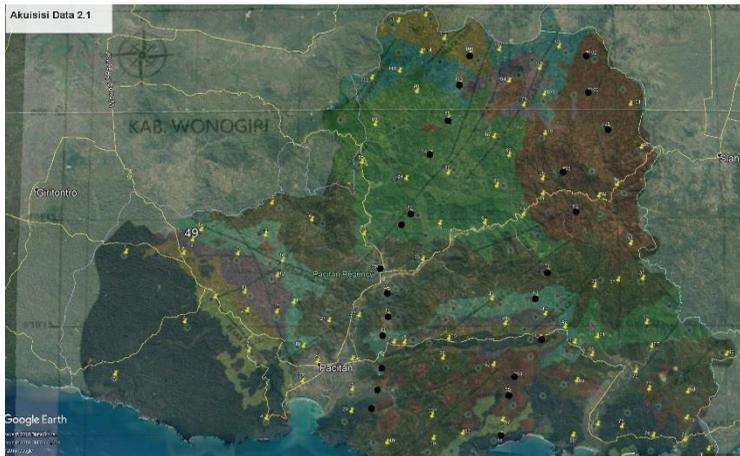
Gambar 3.2 Diagram alir

1. Tahap Persiapan

Tahap persiapan ini terdiri atas studi literatur, kegiatan observasi, dan menentukan titik yang diukur pada penelitian.

Tahapan ini berfungsi untuk mengetahui gambaran umum daerah penelitian dengan melihat keadaan riil yang ada di lapangan sekaligus membuat desain titik pengukuran (Gambar 3.3).

Desain pengukuran terdiri atas dua lintasan, dengan lintasan pertama dan kedua masing-masing terdiri dari 13 titik dan 11 titik pengukuran. Titik-titik pengukuran (titik hitam) pada lintasan tersebut memotong dugaan Sesar Grindulu agar posisi dan model Sesar Grindulu dapat diketahui.



Gambar 3.3 Desain titik pengukuran

2. Akuisisi Data Mikrotremor

Setelah tahap persiapan selesai, pengukuran mikrotremor dilakukan pada titik-titik pengukuran yang telah direncanakan. Titik-titik yang menjadi tempat pengukuran harus memiliki *noise* sekecil mungkin.

Noise yang dimaksud adalah gangguan yang berasal dari aktivitas manusia (lalu lintas kendaraan di jalan atau aktivitas pabrik) dan natural (hembusan angin). Jika titik pengukuran berada dekat dengan jalan raya atau aktivitas pabrik, maka seismometer dapat ditempatkan minimal 100 m dari pusat *noise*. Jika titik pengukuran berada pada lokasi yang

hembusan anginnya kencang, maka tanah pada titik penelitian digali untuk meletakkan sensor sebelum perekaman seismometer berlangsung.

Setelah berada pada lokasi titik yang jauh dari sumber *noise*, seismometer diposisikan menghadap ke arah Utara dengan bantuan GPS dan diletakkan pada bidang datar dengan ditandai posisi *bull eye* (penanda pada seismometer) yang berada tepat di tengah lingkaran. Setelah itu, seismometer dapat dihubungkan dengan aki 12 V untuk memulai proses pengukuran data. Proses selanjutnya ialah pengukuran data yang diukur selama 30 menit dengan frekuensi sampling 100 Hz. Hal ini sesuai dengan yang disarankan oleh SESAME (2004)

3. Pengolahan Data Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa tahap pengolahan data, yakni sebagai berikut:

a.) *Import Data*

Karena data yang didapatkan masih tersimpan mikrotremor, maka langkah awal yang harus dilakukan adalah *import* data agar data dapat diolah lebih lanjut dengan menggunakan *software* Geopsy.

b.) *Filtering*

Data yang telah di*import* ke dalam *software* Geopsy dapat dilakukan *filtering* dengan berbagai filter. Pada penelitian ini, filter yang dipilih adalah *band pass filter* 0.5-10 Hz karena filter ini mampu meloloskan frekuensi dalam rentang tertentu sesuai yang dibutuhkan mikrotremor.

c.) *HVSR Mikrotremor*

Terdapat dua data komponen horisontal EW dan NS dan satu data komponen vertikal pada HVSR. Pada Gambar 3.4, kedua data horisontal digabungkan berdasarkan kaidah Phytagoras dalam domain frekuensi. Estimasi rasio *spectrum Fourier* komponen vertikal terhadap komponen horisontal dilakukan pada metode HVSR. Proses selanjutnya adalah *smoothing* yang berfungsi untuk menghaluskan hasil keluaran dari proses

transformasi *Fourier Smoothing* yang digunakan dalam penelitian ini ialah *smoothing* dari Konno and Ohmachi (1971), yang mana *smoothing* ini cukup efektif diterapkan pada frekuensi rendah (di bawah 10 Hz). Persamaan *smoothing* Konno Ohmachi dijelaskan sebagai berikut:

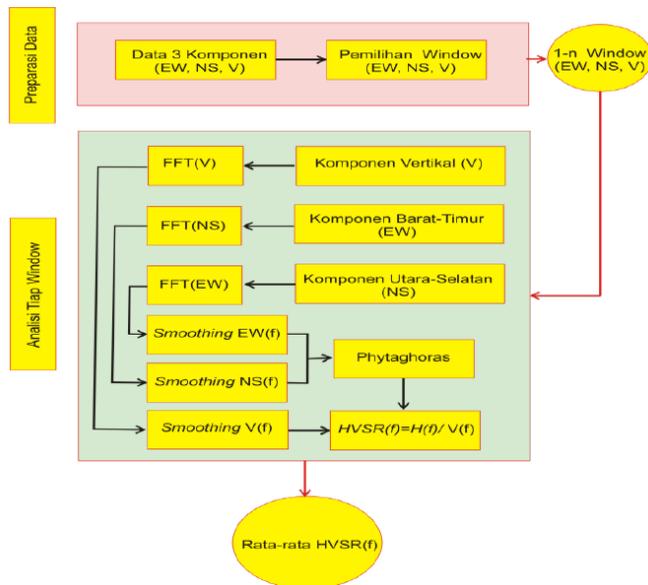
$$W_p(f) = \frac{\sin[(\log_{10}(\frac{f}{f_0})^b)]}{[(\log_{10}(\frac{f}{f_0})^b)]^4} \quad (3.1)$$

dengan $W_p(f)$ merupakan fungsi pembobotan, f menunjukkan frekuensi, f_0 menyatakan frekuensi yang dihaluskan, dan b merupakan koefisien bandwith.

Berikutnya penentuan *length window* sesuai dengan yang dianjurkan oleh SESAME (2004).

$$l = \frac{10}{f_0} \quad (3.2)$$

dengan l merupakan lebar window dan f_0 menunjukkan nilai frekuensi natural



Gambar 3.4 Diagram alir metode HVSR

d.) Intepretasi Kualitatif

Selanjutnya kurva HVSR dilakukan proses intepretasi kuatitaif dengan menggunakan *software Surfer* untuk mengetahui keberadaan patahan

e.) Inversi Kurva HVSR

Inversi dalam penelitian ini menggunakan *software* OpenHVSR berbasis algoritma Monte Carlo. Berikut langkah-langkah pengolahan inversi:

Parameter Model

Paramater model berfungsi untuk mengetahui pengaruh beberapa parameter model terhadap kurva HVSR. Pada tahap inversi, terdapat enam parameter yang dijadikan parameter model, yakni V_p , V_s , h , densitas, Q_p , dan Q_s . Untuk penghitungan nilai V_p menggunakan *Castagna Equation* sebagai berikut:

$$V_p = 1.16V_s + 1.36 \quad (3.3)$$

Untuk nilai densitas, digunakan persamaan yang dibuat oleh Dal Moro sebagai berikut:

$$\rho = 0.77 \log_{10} (V_s) + 0.15 \quad (3.4)$$

Untuk ketebalan lapisan, digunakan persamaan dari Parolai sebagai berikut:

$$h = 108f^{-1.551} \quad (3.5)$$

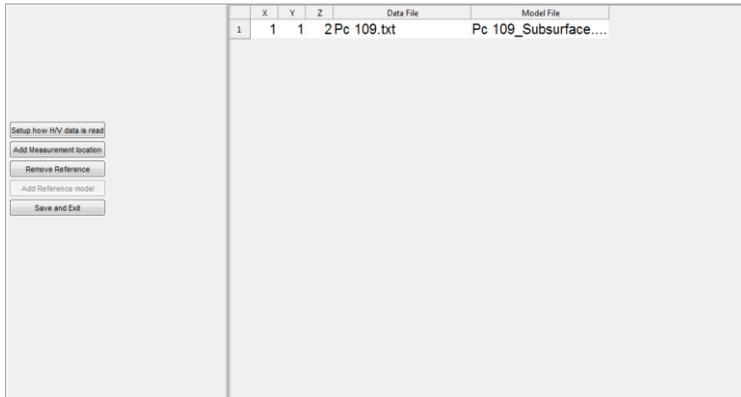
Selain itu, pengaturan *forward modelling* sangat penting juga dilakukan sebelum melakukan inversi, yang mana *forward modelling* menggunakan sebuah algoritma. Algoritma yang digunakan dalam inversi kurva HVSR ialah algoritma Monte Carlo.

$$m = \sum_i \{ [HVSR\ OBS(f_i) - HVSR\ THE(f_i)] W_i \}^2 \quad (3.6)$$

dengan OBS dan THE adalah observasi dan teori Kurva HVSR, sedangkan W_i merupakan pembobotan.

Proses OpenHVSr

Kurva HVSr dan parameter model dimasukkan dalam satu folder. Folder berisi kurva HVSr dan parameter model dipanggil dalam *file project* (Gambar 3.5).



Gambar 3.5 *Project* OpenHVSr

Pada Gambar 3.5, terdapat parameter model dan kurva HVSr hasil pengukuran yang dilakukan proses inversi. Selain itu, terdapat koordinat titik pengukuran dan elevasi. Setelah semua titik pengukuran dalam *project* selesai diinput, pilih *save and exit*. Selanjutnya, proses inversi dapat dilakukan.

f.) Perhitungan Nilai Vs

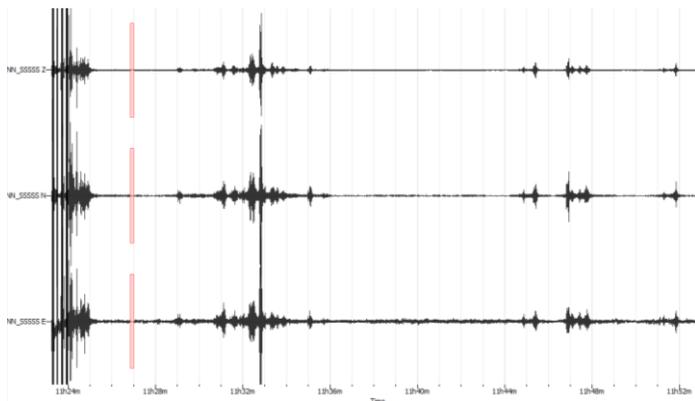
Hasil Vs dipaparkan dalam bentuk grafik, yang mana sumbu X menyatakan Vs dan sumbu Y menyatakan ketebalan lapisan. Selanjutnya, hasil Vs diplot menggunakan *software Surfer* dalam bentuk interpretasi Vs 2D

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data Pengukuran

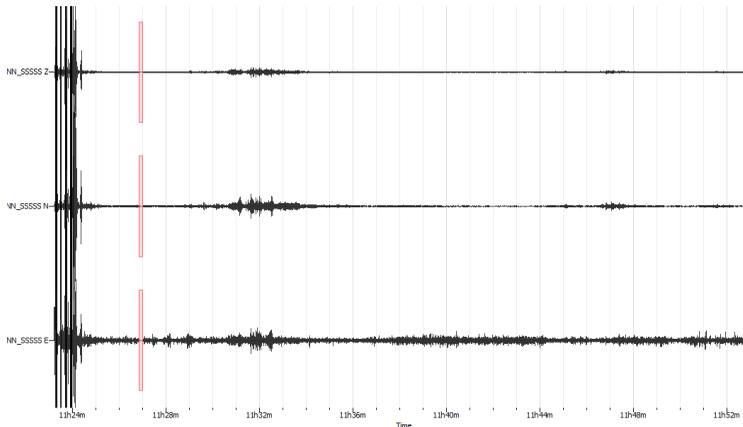
Hasil pengukuran di titik-titik ukur disajikan dalam bentuk rekaman gelombang mikrotremor dalam interval waktu, dengan durasi perekaman tiap titik dalam penelitian ini berlangsung selama 30 menit. Rekaman gelombang tersebut terdiri dari tiga komponen, yakni komponen horisontal Utara-Selatan (N), komponen horisontal Timur-Barat (E), dan komponen vertikal (Z). Contoh hasil rekaman gelombang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Rekaman gelombang pada titik Pc 31

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa terdapat beberapa *trigger* yang terekam pada hasil gelombang. *Trigger* pada hasil rekaman muncul akibat besarnya gangguan (kemungkinan aktivitas peneliti selama perekaman seismometer berlangsung) yang terdapat di lokasi pengukuran meskipun pada saat perekaman telah semaksimal mungkin menghindari dari gangguan *noise*. Oleh karena itu, bagian gelombang yang terdapat *noise* harus dibuang dengan melakukan *filtering*. Pada *software* Geopsy, terdapat beberapa jenis *Filtering* diantaranya

low pas filter, high pass filter, band pass filter, dan band reject filter. Dalam penelitian ini, filter yang digunakan adalah *band pass filter* karena filter ini mampu melewatkan sinyal gelombang dengan frekuensi dalam batas tertentu dan menolak frekuensi lain di luar frekuensi yang dikehendaki, yang mana rentang frekuensi yang dibutuhkan oleh mikrotremor berkisar 0,5-10 Hz. Rekaman gelombang hasil *filtering* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2 yang menunjukkan bahwa *trigger* telah tereliminasi dengan baik. Setelah rekaman gelombang melalui proses *filtering*, maka dapat dilakukan proses selanjutnya yakni pembuatan kurva HVSR (*Horizon to Vertical Spectrum Ratio*).



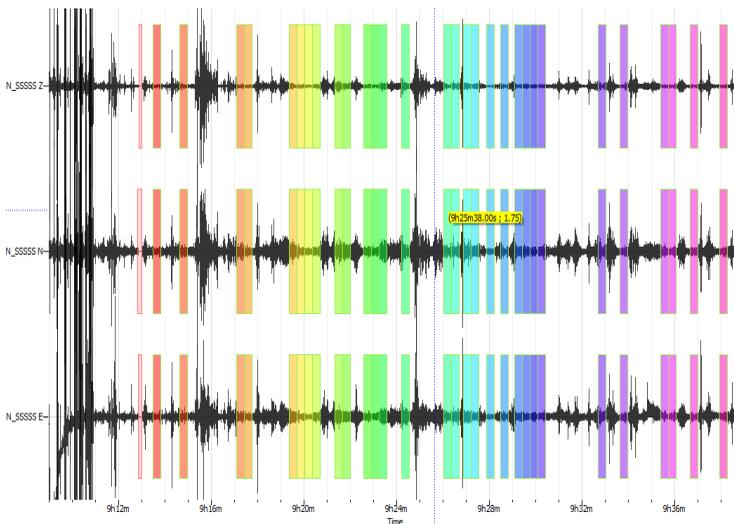
Gambar 4.2 Rekaman gelombang Pc 31 hasil *filtering*

4.2 Analisa Kurva HVSR

Tahapan awal dalam pembuatan kurva HVSR adalah proses *windowing* (Gambar 4.3). *Windowing* merupakan sebuah proses terbaginya rekaman gelombang menjadi beberapa jendela berupa kotak-kotak berwarna, dimana jumlah *window* bergantung dari gelombang yang terekam dan tentunya gelombang tersebut harus stasioner atau terhindar dari *trigger*. Semakin bagus rekaman gelombang yang diterima maka semakin banyak *window* yang terbentuk. Menurut SESAME

(2004), minimal terdapat 10 *window* yang terbentuk dalam analisis HVSR. Selain itu, lebar *window* dalam satuan satuan waktu juga harus diperhatikan. Dalam penelitian ini digunakan lebar *window* sebesar 20,00 s agar *reliable* dengan frekuensi sebesar 0,5 Hz sebagaimana ditunjukkan oleh Persamaan 3.1.

Berdasarkan Persamaan 3.1, penentuan lebar *window* bergantung pada frekuensi terkecil yang ingin didapatkan, yang mana frekuensi terkecil yang direkomendasikan sebesar 0,5 Hz (SESAME, 2004).

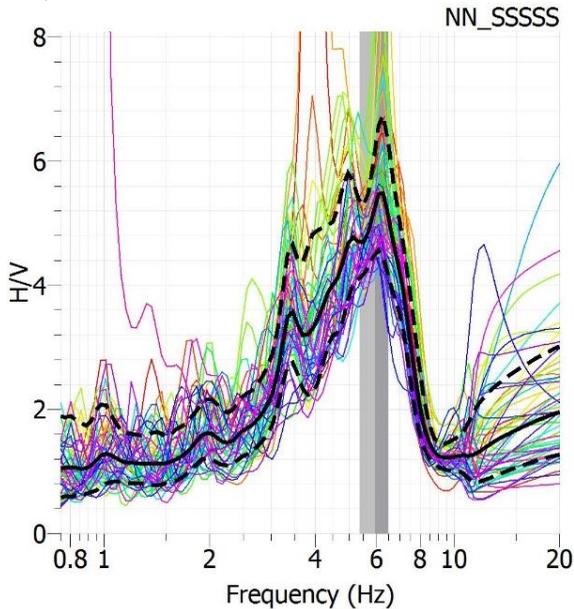


Gambar 4.3 Proses *windowing* pada titik Pc 102

Setelah itu, dilakukan analisis *fourier transform* untuk mengubah gelombang yang berdomain waktu menjadi domain frekuensi. Selanjutnya, hasil *fourier transform* diperhalus dengan menggunakan *smoothing* yang diprakarsai oleh Konno Ohmachi dengan koefisien *bandwith* 40 dan *cosine taper* 10%. *Smoothing* Konno Ohmachi digunakan dalam penelitian ini karena lebih efektif diterapkan pada variasi amplitudo dalam frekuensi rendah (< 10 Hz).

Untuk pendeteksi sinyal transient, digunakan algoritma yakni anti triggering on raw signal dengan nilai STA (*short term*

average) sebesar 1,00 s dan nilai LTA (*long term average*) sebesar 30,00 s.



Gambar 4.4 Kurva HVSR titik Pc 109

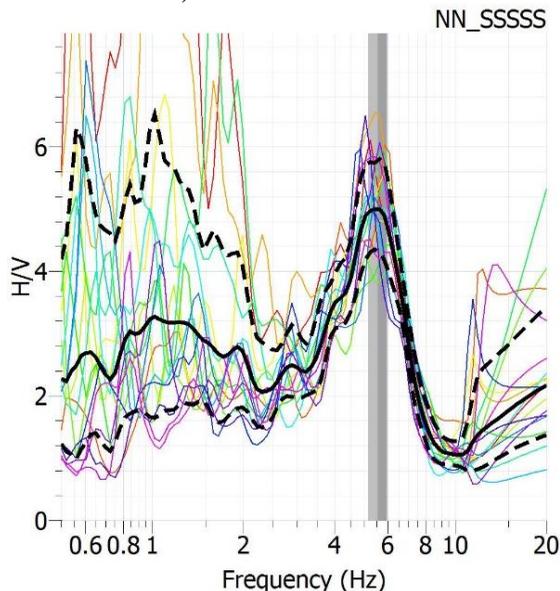
Tahap akhir dari Analisa HVSR adalah output dalam bentuk kurva HVSR. Dalam gambar tersebut, garis hitam menunjukkan data sebenarnya dan garis hitam putus-putus menunjukkan standar deviasi dari kurva HVSR tersebut. Selain itu, puncak pada kurva HVSR terbentuk akibat proses resonansi yang melibatkan amplitudo *spectrum* horisontal pada suatu frekuensi tertentu sehingga menjadi lebih besar, sedangkan *spectrum* vertikalnya tetap. Pada Gambar 4.4, nilai amplifikasi dan frekuensi dominan ditunjukkan pada daerah abu-abu, dengan nilai amplifikasinya sebesar 5,27 dan nilai frekuensi dominan sebesar 6,26 Hz. Nilai frekuensi dan amplifikasi selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1 dan 2.

Karakteristik kurva HVSR ditunjukkan dengan pola kurva HVSR, yang mana parameter yang berpengaruh pada

pola kurva HVSR adalah nilai frekuensi dominan (f_0) dan nilai amplifikasi (A_g) yang dihasilkan. Oleh karena itu, pola kurva HVSR sangat bervariasi terutama pada puncaknya. Berdasarkan topologi, kurva HVSR dibagi menjadi sebagai berikut

4.2.1 Kurva HVSR dengan satu puncak

Bentuk kurva ditampilkan dengan satu puncak tunggal yang memiliki nilai signifikan. Kurva HVSR dengan puncak tersebut terbentuk akibat adanya gelombang mengalami amplifikasi karena kontras impedansi pada suatu kedalaman. Namun, terdapat beberapa syarat agar puncak dari kurva HVSR dianggap sebagai puncak tunggal yang jelas (SESAME, 2004). Salah satu syaratnya ialah nilai amplifikasi harus di atas dua (selengkapnya dapat dilihat pada lampiran mengenai koreksi reabilitas kurva HVSR).



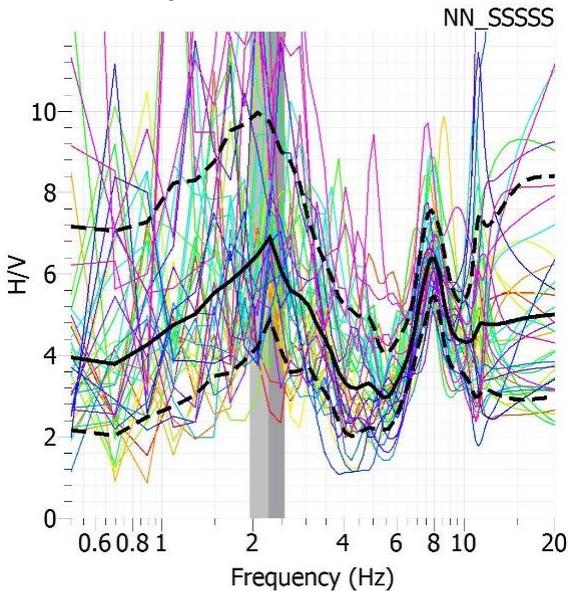
Gambar 4.5 Kurva HVSR dengan satu puncak

Kurva HVSR dengan satu puncak sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5 merupakan hasil pengukuran

pada titik Pc 113, dengan nilai amplifikasi sebesar 5,00 dan nilai frekuensi dominan sebesar 5,27.

4.2.2 Kurva HVSR dengan dua puncak

Kemungkinan kurva HVSR dengan dua puncak (Gambar 4.6) dapat terjadi akibat adanya kondisi geologi semacam perbedaan impedansi pada kedalaman tertentu, dengan sedimen pada permukaan tidak sekompak sedimen pada permukaan dibawahnya.

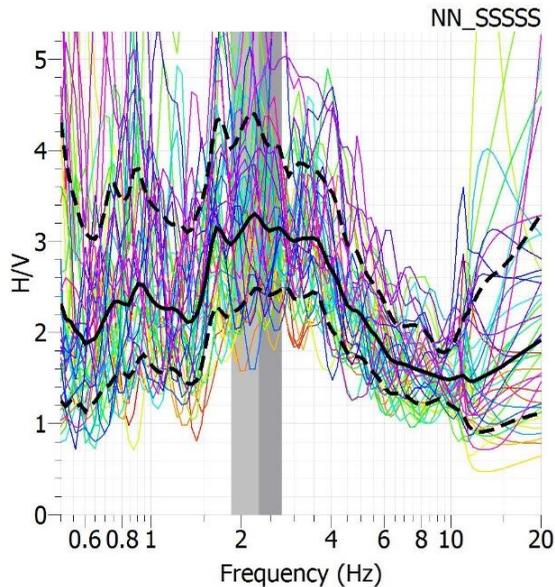


Gambar 4.6 Kurva HVSR dengan dua puncak

Apabila menemukan puncak seperti kurva HVSR diatas, opsi yang dapat dilakukan ialah membandingkan hasil kurva dengan hasil *HV rotate* dan hasil *spectrum* yang tersedia pada *software* geopsy untuk mengetahui posisi frekuensi dominan yang sebenarnya. Selain itu, dapat ditinjau juga dari kondisi geologi titik pengukuran.

4.2.3 Kurva HVSR dengan puncak lebar

Kurva HVSR dengan puncak lebar sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.7 kemungkinan adanya variasi pada struktur sedimen juga dapat mempengaruhi bentuk puncak dari kurva HVSR.



Gambar 4.7 Kurva HVSR dengan puncak lebar

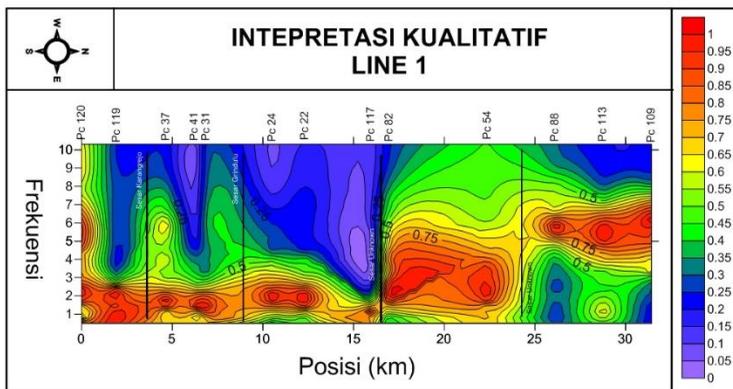
4.3 Interpretasi Kualitatif

Setelah kurva HVSR tiap titik dianalisa, maka proses selanjutnya adalah menginterpretasi kurva HVSR secara kualitatif. Interpretasi kualitatif dilakukan untuk mengamati pola data atau pola anomali yang terjadi pada daerah penelitian. Dalam penelitian ini, proses interpretasi kualitatif terdiri dari tiga parameter, yakni sumbu X yang menyatakan jarak antar titik pengukuran (dalam satuan km), sumbu Y menyatakan nilai frekuensi dominan tiap titik (dalam satuan Hz), dan sumbu Z menyatakan besarnya nilai amplifikasi tiap titik.

Dalam tahapan ini, nilai maksimal amplifikasi di semua titik bernilai satu karena melalui proses normalisasi, yang mana nilai amplifikasi dari hasil kurva HVSR dibagi dengan nilai

amplifikasi puncaknya. Proses normalisasi dilakukan karena nilai amplifikasi pada beberapa titik lebih besar dari 10 dan tidak sesuai dengan teori yang ada. Hal ini dapat terjadi kemungkinan karena yang mendominasi dari rekaman gelombang pada titik pengukuran tersebut adalah gelombang Rayleigh. Oleh karena itu, normalisasi diperbolehkan dengan tujuan mempermudah dalam hal interpretasi kualitatif.

Dengan dilakukan interpretasi kualitatif, diharapkan pola anomali semacam patahan di sepanjang jalur penelitian (Lintasan 1 dan Lintasan 2) dapat diketahui. Keberadaan patahan pada jalur penelitian dapat dilihat dari kontras nilai frekuensi natural di setiap titik pengukuran. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9.

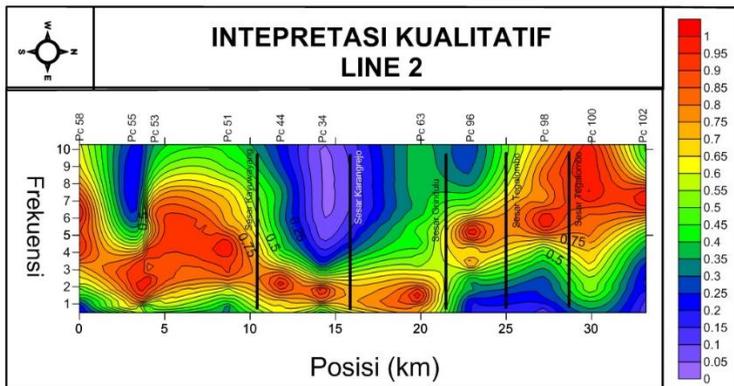


Gambar 4.8 Interpretasi kualitatif Lintasan 1

Pada Lintasan 1 yang terdiri dari 13 titik yang menunjukkan adanya kontras nilai frekuensi dominan di beberapa titik. Hal ini dapat terjadi karena kemungkinan adanya patahan di sepanjang jalur pengukuran berdasarkan Persamaan 2.1. Sebagai contoh, antara titik Pc 31 dan Pc 24 pada gambar di atas terlihat adanya anomali nilai frekuensi dominan, dimana nilai f_0 pada titik Pc 31 sebesar 1,41 Hz dan f_0 pada titik Pc 24 sebesar 1,88 Hz. Ketika dikorelasikan dengan peta geologi regional, ternyata di dekat titik Pc 31 dan Pc 24 merupakan jalur

Sesar Grindulu. Selain itu, terdapat beberapa kontras frekuensi dominan lainnya seperti di titik Pc 119 dan Pc 37 yang merupakan jalur Sesar Karangrejo, titik Pc 117 dan Pc 82 yang merupakan jalur Sesar “X”, dan titik Pc 88 serta titik Pc 88 yang merupakan jalur Sesar “X”.

Selain itu, persebaran nilai frekuensi dominan pada Lintasan 1 berkisar 1,15 Hz – 6,26 Hz. Menurut Beroya et al. (2009), distribusi nilai frekuensi dominan sangat berhubungan dengan kondisi geologi daerah penelitian. Sebagai contoh, nilai amplifikasi pada titik Pc 88, Pc 113, dan Pc 109 memiliki nilai lebih besar dari 5 Hz. Saat dikorelasikan dengan peta geologi regional, ketiga titik tersebut berada di daerah pegunungan, dengan amplifikasi pada daerah pegunungan biasanya cenderung besar. Menurut Gosar et al. (2008), salah satu parameter yang mempengaruhi nilai frekuensi dominan ialah ketebalan lapisan, dengan hubungan antara keduanya berbanding terbalik. Artinya, daerah dari ketiga titik ini dimungkinkan memiliki lapisan sedimen yang kurang tebal karena permukaannya sangat dekat dengan *bedrock*.



Gambar 4.9 Intepretasi kualitatif Lintasan 2

Pada Lintasan 2 yang terdiri dari 11 titik, kontras nilai frekuensi dominan semakin jelas terlihat. Sebagai contoh, antara titik Pc 63 dan titik Pc 96 ternyata terdapat anomali frekuensi dominan yang sangat mencolok, yang mana nilai f_0 di

titik Pc 63 sebesar 1,67 Hz dan f_0 di titik pc 96 sebesar 5,23 Hz. Dengan kondisi tersebut, sangat dimungkinkan antara dua titik tersebut terdapat patahan. Ketika dikorelasikan dengan peta geologi regional, ternyata di tengah dua titik tersebut merupakan jalur Sesar Grindulu. Selain Sesar Grindulu, terdapat pula jalur Sesar Kayuwayang diantara titik Pc 51 dan Pc 44, Sesar Karangrejo diantara titik Pc 34 dan Pc 63, dan Sesar Tegalombo diantara titik Pc 96 dan Pc 98 serta titik Pc 98 dan Pc 100.

4.4 Inisiasi Parameter Model

Menurut Martha et al. (2017), kecepatan gelombang geser di Zona Pegunungan Selatan berkisar 1800 – 3200 ms, dimana wilayah Kabupaten Pacitan termasuk ke Zona Pegunungan Selatan. Namun, kecepatan gelombang geser (V_s) tersebut hanya berlaku pada dataran tinggi saja padahal jika ditinjau dari kondisi geologinya wilayah ini juga memiliki permukaan yang didominasi oleh alluvium. Oleh karena itu, kecepatan gelombang geser (V_s) yang diatur pada parameter model ini berkisar 200 - 3200 m/s.

Menurut Greenberg (1992), Persamaan *Castagna* sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 3.2 dapat digunakan untuk memperkirakan kecepatan gelombang P (V_p). Nilai kecepatan gelombang P (V_p) bergantung dengan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) yang diinput karena semakin besar V_s maka nilai V_p akan semakin besar.

Sementara itu, untuk menghitung nilai densitas digunakan Persamaan 3.3 yang dikemukakan oleh Dal Moro (2010), sedangkan untuk memperkirakan ketebalan lapisan digunakan Persamaan 3.4 yang dibuat oleh Parolai (2002).

Dalam penelitian ini, parameter model sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1 terdiri dari enam parameter yakni, kecepatan gelombang geser (V_s), Kecepatan gelombang P (V_p), *density*, faktor quasi P (Q_p), faktor quasi S (Q_s), dan ketebalan lapisan (H).

Tabel 4.1 Parameter model untuk proses inversi (Martha et al. (2017); Parolai (2002); Dal Moro (2010); Greenberg (1992))

Vp	Vs	densitas	h	Qp	Qs
233	200	2.7	5	10	5
929	800	3.2	6	20	10
1625	1400	3.3	11	30	15
2321	2000	3.5	28	40	20
3017	2600	3.5	94	50	25
3713	3200	3.6	999	999	999

4.5 Inversi Kurva HVSR

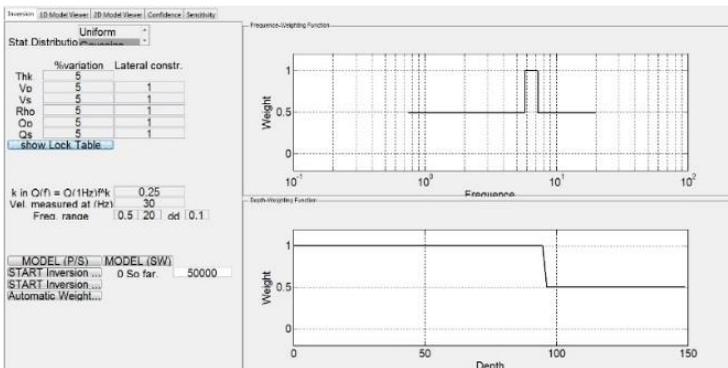
Pada umumnya, kecepatan gelombang geser (V_s) ditentukan dengan cara survei lapangan. Beberapa metode yang biasa digunakan ialah *borehole* atau data bor. Namun, cara tersebut bersifat aktif *invasif* dan membutuhkan biaya yang mahal. Selanjutnya muncul metode baru untuk mengestimasi besarnya nilai V_s dengan menggunakan mikrotremor.

Estimasi kecepatan gelombang geser (V_s) menggunakan mikrotremor dilakukan dengan melakukan inversi terhadap kurva HVSR. Inversi kurva HVSR dalam penelitian ini menggunakan *software* OpenHVSR, yang mana algoritma dalam *software* tersebut bekerja dengan cara melakukan iterasi pada parameter model untuk dicocokkan dengan kurva HVSR hasil pengukuran sampai didapatkan model terbaik. Algoritma yang digunakan pada OpenHVSR merupakan algoritma Monte Carlo sebagaimana diperlihatkan pada Persamaan 3.5.

Sebelum melakukan inversi kurva HVSR, pertama kali harus dibuat parameter model untuk dijadikan model awal selama proses inversi (Tabel 4.1). Parameter model yang dimaksud adalah inisiasi awal berupa V_p , V_s , densitas, Q_p , Q_s , dan kedalaman tiap lapisan. Selama proses inversi, parameter yang dibiarkan bebas untuk mendapatkan model terbaik ialah V_s , V_p , h , dan densitas. Sementara itu, nilai Q_p dan Q_s dianggap konstan atau tidak mengikuti perubahan model selama proses inversi. Hal ini dilakukan karena parameter yang

berpengaruh penting dalam menemukan model terbaik pada proses inversi adalah kecepatan gelombang geser (V_s) dan kedalaman lapisan (h). Setelah itu, hasil parameter model dijadikan dalam satu folder bersama data kurva HVSr.

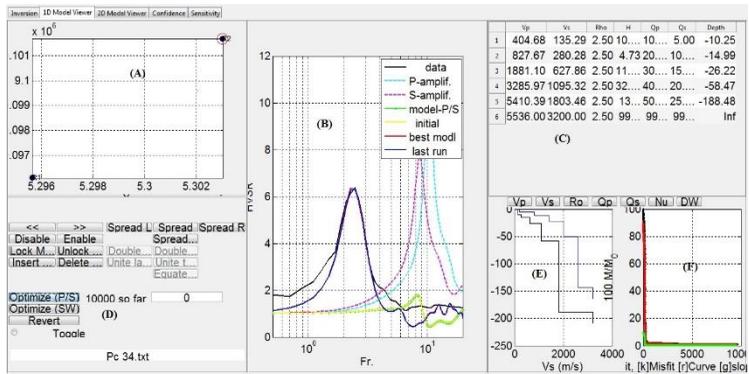
Berikutnya, pengaturan umum untuk proses inversi kurva HVSr (Gambar 4.10) dapat dilakukan setelah *project file* dibuat, yang mana *project file* sendiri terdiri atas kurva HVSr, parameter model, lat, long, dan elevasi dari titik pengukuran. Beberapa menu yang terdapat pada pengaturan umum berfungsi untuk menemukan kurva simulasi yang sesuai dengan kurva HVSr hasil pengukuran. Sebagai contoh, *show lock table* berfungsi untuk *check list* parameter mana yang bebas berubah selama iterasi dalam proses inversi berlangsung. *Frequency weighting function* yang berfungsi sebagai pembobot yang menyesuaikan dengan frekuensi dominan dari kurva HVSr.



Gambar 4.10 Pengaturan umum pada OpenHVSr

Sama halnya dengan *Frequency weighting function*, *depth weighting function* berfungsi sebagai pembobot namun untuk kedalaman. Selanjutnya, *MODEL (P/S)* lebih banyak digunakan karena mayoritas penyusun gelombang dari kurva HVSr merupakan gelombang badan, namun jika kurva HVSr yang diinput memiliki nilai amplifikasi besar (di atas 10) maka dianjurkan untuk memilih *MODEL (S/W)* karena yang

mendominasi penyusun gelombang dari kurva HVSR merupakan gelombang *Rayleigh*.



Gambar 4.11 Hasil inversi titik Pc 34

Hasil inversi kurva HVSR sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.11 dapat dilihat pada menu *ID model viewer*. Gambar 4.11 (A) memperlihatkan titik pengukuran dengan koordinat UTM. Titik yang berada di lingkaran merah merupakan titik yang ditampilkan. Pada Gambar 4.11 (B) menunjukkan hasil inversi, yang mana garis hitam merupakan data kurva HVSR hasil pengukuran, sedangkan garis merah dan garis biru merupakan garis hasil proses inversi. Garis merah biasanya berimpit dengan garis biru sebagaimana pada Gambar 4.11 dengan syarat nilai ketidakcocokan (*misfit*) di bawah 10%. Saat *misfit* di atas 10%, maka parameter model dapat diedit di fungsi Gambar 4.11 (C) sampai *best model* sesuai dan berimpit dengan data kurva HVSR. Setelah itu, *optimize (P/S)* pada Gambar 4.11 (D) dapat dipilih untuk melakukan proses iterasi sekali lagi untuk menyesuaikan hasil perubahan parameter model dari fungsi Gambar 4.11 (C) dengan data kurva HVSR. Jika kurva HVSR memiliki nilai amplifikasi besar (di atas 10) maka yang dipilih adalah *Optimize (SW)* karena penyusun dari kurva tersebut merupakan gelombang *Rayleigh*. Namun, apabila *misfit* di bawah 10% dan kurva hasil inversi sudah berimpit dengan kurva HVSR hasil pengukuran maka tidak

perlu dilakukan *optimize* pada fungsi gambar 4.11 (C). Sementara itu, Gambar 4.11 (F) menunjukkan nilai misfit selama proses inversi kurva HVSR berlangsung dan Gambar 4.11 (E) menampilkan grafik hasil inversi, yang mana sumbu X pada grafik tersebut menjelaskan kecepatan gelombang geser (V_s) dan sumbu Y yang memperlihatkan kedalaman tiap lapisan.

Pada Gambar 4.11, titik Pc 34 menghasilkan kurva hasil inversi yang cocok dengan kurva HVSR hasil pengukuran, dengan kurva hasil inversi tersebut berimpit dengan kurva HVSR. Hal ini terjadi demikian karena selama proses inversi berlangsung Pc 34 menghasilkan nilai *misfit* yang berkisar 3%. Oleh karena itu, tidak perlu dilakukan proses iterasi ulang dengan memilih tombol *optimize(P/S)*.

Menurut Dal Moro (2010), ada beberapa alasan mengapa proses inversi kurva HVSR memiliki nilai misfit besar (di atas 10%), yakni gelombang hasil pengukuran masih terdapat *noise*, yang mendominasi penyusun kurva HVSR ialah gelombang *Rayleigh* bukannya gelombang badan, dan bentuk kurva HVSR yang tidak *reliable* dan tidak sesuai dengan yang dianjurkan oleh SESAME (2004), yang mana kurva HVSR tersebut seharusnya memiliki satu puncak yang jelas.

4.6 Persebaran Kecepatan Gelombang Geser (V_s)

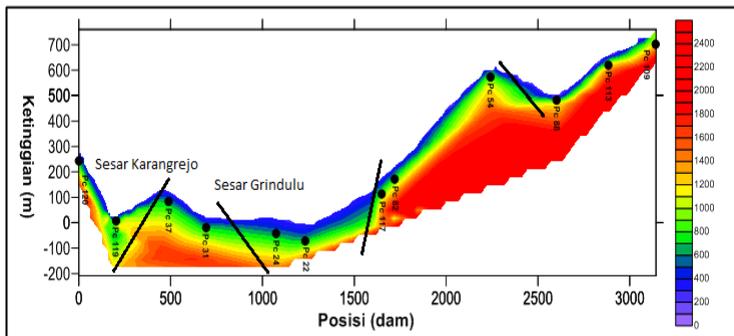
Setelah proses inversi kurva HVSR selesai, beberapa hasil kecepatan gelombang geser (V_s) diinterpolasi dengan menggunakan *software Surfer* untuk mendapatkan V_s 2D sebagaimana pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13, yang mana sumbu X menjelaskan jarak antara titik pengukuran, sumbu Y menyatakan kedalaman tiap lapisan, dan sumbu Z menggambarkan besarnya nilai kecepatan gelombang geser.

Kontras kecepatan gelombang geser (V_s) pada interpretasi V_s 2D dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan retakan atau patahan. Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan beberapa kontras V_s yang sesuai dengan keberadaan dan arah patahan sebagaimana geologi regional

yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Beberapa sesar yang teridentifikasi pada interpretasi Vs 2D, yakni Sesar Karangrejo, Sesar Kayuwayang, Sesar Tegalombo, Sesar "X", dan Sesar Grindulu. Sesar Grindulu sendiri teridentifikasi berada diantara titik Pc 31 dan Pc 24 pada Lintasan 1, sedangkan Sesar Grindulu berada diantara titik Pc 63 dan Pc 96 pada Lintasan 2. Selain itu, titik pengukuran yang berada dekat dengan jalur Sesar Grindulu cenderung memiliki ketebalan sedimen yang tebal.

Pada Gambar 4.12, Lintasan 1 menghasilkan kecepatan gelombang geser yang beragam. Contohnya yaitu titik Pc 88, Pc 109, dan Pc 113 yang memiliki ketebalan sedimen yang tipis, yang mana *bedrock*nya berada pada kedalaman 33 – 52 m. jika ditinjau dari kondisi geologi regional, titik Pc 88, Pc 113, dan Pc 109 memang berada pada dataran tinggi, yang mana biasanya dataran tinggi memiliki lapisan sedimen yang begitu tipis. Selain itu, diperkuat juga dengan nilai frekuensi dominan ketiga titik tersebut, yang mana nilai f_0 berkisar antara 5,6 – 6,2 Hz. Hal tersebut sesuai dengan teori yang menyatakan semakin besar nilai frekuensi maka ketebalan sedimen semakin tipis.

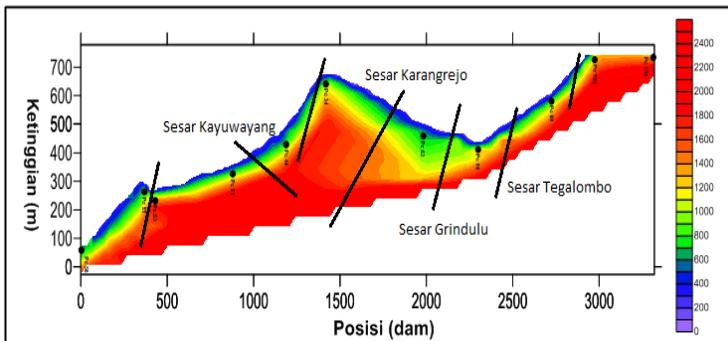
Sementara itu, titik yang berada dekat dengan Sesar Grindulu memiliki ketebalan sedimen yang sangat mencolok. Titik tersebut ialah Pc 24 dan Pc 31. Dimana Pc 31 memiliki ketebalan sedimen sebesar 67 m, sedangkan Pc 24 memiliki ketebalan sedimen di atas 100 m. Hal ini dapat terjadi kemungkinan karena pergerakan dari Sesar Grindulu.



Gambar 4.12 Persebaran Vs 2D pada Lintasan 1

Pada Lintasan 2 (Gambar 4.13), persebaran kecepatan gelombang geser (V_s) juga menunjukkan hasil yang cukup beragam. Sebagai contoh, Pc 100 dan Pc 102 memiliki ketebalan sedimen yang cukup tipis, yang mana kedalaman *bedrock* dari kedua titik tersebut sekitar 10-15 m. Jika ditinjau dari kondisi geologi, Pc 100 dan Pc 102 berada pada dataran tinggi dan biasanya pada dataran tersebut memang memiliki ketebalan sedimen yang tidak begitu tebal.

Sementara itu, titik yang berada dekat dengan Sesar Grindulu memiliki nilai V_s yang Sangat mencolok. Titik tersebut ialah Pc 63 dan Pc 96. Titik Pc 63 memiliki ketebalan sedimen sekitar 44,5 m, sedangkan titik Pc 96 memiliki ketebalan sedimen 16,43 m. Hal ini kemungkinan terjadi karena akibat dari pergerakan Sesar Grindulu. Selain itu, kedua titik tersebut memiliki frekuensi dominan yang berbeda jauh, yang mana nilai f_0 yang terdapat pada kurva HVSR Pc 63 sebesar 1,67 Hz dan f_0 yang dimiliki Pc 96 sebesar 5,23 Hz. Hal tersebut sesuai dengan teori yang menyatakan hubungan frekuensi dominan dan ketebalan lapisan berbanding terbalik, dimana semakin kecil nilai frekuensi dominan maka ketebalan sedimennya pun akan semakin besar. Selain itu, kecepatan gelombang geser (V_s) pada *bedrock* sekitar 1400 m/s.



Gambar 4.13 Persebaran V_s 2D pada Lintasan 2

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kecepatan gelombang geser (V_s) *bedrock* pada penelitian ini 1400 m/s.
2. Identifikasi keberadaan sesar diperlihatkan pada intepretasi kualitatif dan intepretasi V_s 2D.
3. Daerah yang berada dekat dengan Sesar Grindulu cenderung memiliki ketebalan sedimen yang sangat tebal, sedangkan daerah yang berada pada dataran tinggi cenderung memiliki ketebalan sedimen yang tipis.

5.2 Saran

Setelah penelitian ini selesai, didapatkan beberapa pertimbangan untuk penelitian berikutnya, yaitu: perlu adanya metode perbandingan dengan menggunakan data bor (*borehole*), penentuan lokasi pengukuran yang jauh dari gangguan *noise*, dan *trial and error* dalam tahap inversi kurva HVSR.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Beroya, M.A.A., Aydin, A., Tiglao, R., Lasala, M., 2009. Use of microtremor in liquefaction hazard mapping. *Eng. Geol.* 107, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.009>
- Bignardi, S., Mantovani, A., Abu Zeid, N., 2016. OpenHVSr: imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSr modeling and inversion. *Comput. Geosci.* 93, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.05.009>
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., Fäh, D., 2006. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophys. J. Int.* 167, 827–837. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03154.x>
- García-Jerez, A., Piña-Flores, J., Sánchez-Sesma, F.J., Luzón, F., Perton, M., 2016. A computer code for forward calculation and inversion of the H/V spectral ratio under the diffuse field assumption. *Comput. Geosci.* 97, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.016>
- Giancarlo, D.M., 2010. Insights on surface wave dispersion and HVSr: Joint analysis via Pareto optimality. *J. Appl. Geophys.* 72, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.08.004>
- Gosar, A., Stopar, R., Rošer, J., 2008. Comparative test of active and passive multichannel analysis of surface waves (MASW) methods and microtremor HVSr method 26.
- Grandis, H., 2009. *Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), Jakarta.
- GREENBERG, M.L., n.d (1992). SHEAR-WAVE VELOCITY ESTIMATION IN POROUS ROCKS: THEORETICAL FORMULATION, PRELIMINARY VERIFICATION AND APPLICATIONS' 15.
- Herak, M., 2008. ModelHVSr—A Matlab® tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. *Comput. Geosci.* 34, 1514–1526. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.009>
- Konno, K., Ohmachi, T., n.d. Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor 14.

- Martha, A.A., Cummins, P., Saygin, E., Sri Widiyantoro, Masturyono, 2017. Imaging of upper crustal structure beneath East Java–Bali, Indonesia with ambient noise tomography. *Geosci. Lett.* 4. <https://doi.org/10.1186/s40562-017-0080-9>
- Meng, J., 2007. Earthquake ground motion simulation with frequency-dependent soil properties. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 27, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.07.002>
- Nakamura, Y., 2008. On the H/V spectrum. 14b Th Word Conf. *Earthq. Eng.*
- Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Q. Rep. Railw. Tech. Res. Inst RTRI* 37, hal. 25-33.
- NAKAMURA, Y., n.d. CLEAR IDENTIFICATION OF FUNDAMENTAL IDEA OF NAKAMURA'S TECHNIQUE AND ITS APPLICATIONS 8.
- Parolai, S., 2002. New Relationships between Vs, Thickness of Sediments, and Resonance Frequency Calculated by the H/V Ratio of Seismic Noise for the Cologne Area (Germany). *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, 2521–2527. <https://doi.org/10.1785/0120010248>
- SESAME.2004.Site Effects Assesment Using Ambient Excitations. Report of the WP04 H/V Technique : Empirical Evaluation, 2004.
- Sjarifudin, M., Hamidi, S., n.d. Peta geologi lembar Blitar, Jawa.
- van Bemmelen, R., 1949. *The Geology of Indonesia*. Government Printing Office.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Tian, G., 2003. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes. *J. Appl. Geophys.* 52, 45–57. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00239-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00239-2)

BIODATA PENULIS



Muhammad Azmi Caesardi merupakan nama dari penulis. Anak dari pasangan Magribi dan Fatimah. Putra kelahiran Surabaya, tanggal 6 Desember 1993. Memulai pendidikan di TK Siti Aminah Surabaya dan SD Siti Aminah Surabaya. Melanjutkan pendidikan menengah di SMPN 22 Surabaya. Pendidikan menengah atas di SMAN 1

Surabaya Setelah itu melanjutkan di perguruan tinggi pada tahun 2014 di Jurusan Fisika ITS Hingga sekarang dengan NRP 011440000100. Selain aktif di bangku perkuliahan penulis juga aktif di beberapa organisasi mahasiswa seperti SM IAGI ITS, BEM FMIPA ITS, BEM ITS, dan HMGI Wil IV.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

1.) Data Lintasan satu

No	Titik	Koordinat		Frekuensi (Hz)	Amplifikasi
		X	Y		
1	Pc 120	515502	9089865	2.3038	6.3337
2	Pc 119	515616	9091723	2.1963	4.4893
3	Pc 37	515911	9094475	1.6474	5.9887
4	Pc 41	516688	9096080	1.4849	8.7220
5	Pc 31	516874	9096556	1.4849	8.3460
6	Pc 24	516132	9100380	1.8788	9.3681
7	Pc 22	516406	9102103	1.8788	21.6353
8	Pc 117	518880	9105488	1.1389	7.7749
9	Pc 82	518728	9106477	2.0758	26.5767
10	Pc 54	520579	9111649	2.2196	3.2570
11	Pc 88	521834	9115247	5.8480	7.4791
12	Pc 113	523027	9117619	5.6341	5.0030
13	Pc 109	523898	9120150	6.2647	5.2758

2.) Data lintasan dua

No	Titik	Koordinat		Frekuensi (Hz)	Amplifikasi
		X	Y		
1	Pc 58	526290	9088046	6.3005	5.63736
2	Pc 55	527022	9091596	1.98481	6.13676
3	Pc 53	527435	9091887	2.27273	7.54264
4	Pc 51	529565	9096099	4.24242	6.8017
5	Pc 44	529338	9099481	2.27273	6.85753
6	Pc 34	530302	9101679	2.41919	6.23899
7	Pc 63	532897	9106807	1.67267	6.82169
8	Pc 96	531895	9110311	5.22953	6.95355
9	Pc 98	535621	9113668	5.81818	7.0858
10	Pc 100	534065	9116923	7.60101	2.6739
11	Pc 102	533943	9120342	7.04567	9.79472

3.) Kriteria kurva HVSR yang disarankan SESAME

Threshold Values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 f_0	0.20 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Criteria for a reliable H/V curve

- i) $f_0 > 10 / l_w$
and
ii) $n_c(f_0) > 200$
and
iii) $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$
or $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$

Criteria for a clear H/V peak (at least 5 out of 6 criteria fulfilled)

- i) $\exists f \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$
ii) $\exists f' \in [f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f') < A_0/2$
iii) $A_0 > 2$
iv) $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
v) $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
vi) $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

- l_w = window length
- n_w = number of windows selected for the average H/V curve
- $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ = number of significant cycles
- f = current frequency
- f_{sensor} = sensor cut-off frequency
- f_0 = H/V peak frequency
- σ_f = standard deviation of H/V peak frequency ($f_0 \pm \sigma_f$)
- $\varepsilon(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
- A_0 = H/V peak amplitude at frequency f_0
- $A_{H/V}(f)$ = H/V curve amplitude at frequency f
- f = frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f) < A_0/2$
- f' = frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f') < A_0/2$
- $\sigma_A(f)$ = "standard deviation" of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
- $\sigma_{\log H/V}(f)$ = standard deviation of the $\log A_{H/V}(f)$ curve, $\sigma_{\log H/V}(f)$ is an absolute value which should be added to or subtracted from the mean $\log A_{H/V}(f)$ curve
- $\theta(f_0)$ = threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$
- $V_{S,AV}$ = average S-wave velocity of the total deposits
- $V_{S,SUR}$ = S-wave velocity of the surface layer
- h = depth to bedrock
- h_{min} = lower-bound estimate of h