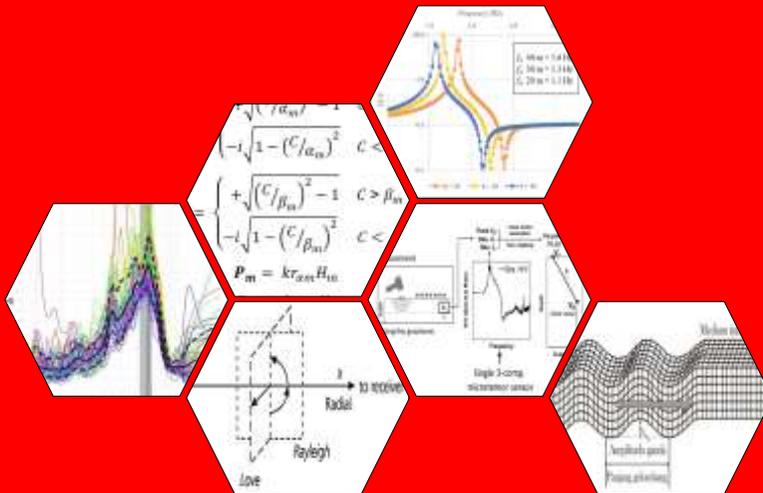


**PENENTUAN PROFIL 1D KECEPATAN GELOMBANG S
MENGUNAKAN MIKROTREMOR HVSR DAN KECEPATAN FASE
GELOMBANG RAYLEIGH DENGAN ASUMSI GRADIEN KECEPATAN
LINEAR**



**ITA PURNAMASARI
H061191049**



**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**PENENTUAN PROFIL 1D KECEPATAN GELOMBANG S
MENGUNAKAN MIKROTREMOR HVSR DAN KECEPATAN FASE
GELOMBANG RAYLEIGH DENGAN ASUMSI GRADIEN KECEPATAN
LINEAR**

ITA PURNAMASARI

H061191049



**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**PENENTUAN PROFIL 1D KECEPATAN GELOMBANG S
MENGUNAKAN MIKROTREMOR HVSR DAN KECEPATAN FASE
GELOMBANG RAYLEIGH DENGAN ASUMSI GRADIEN KECEPATAN
LINEAR**

ITA PURNAMASARI
H061191049



Skripsi

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Geofisika

Departemen Geofisika

Pada

**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

SKRIPSI

**PENENTUAN PROFIL 1D KECEPATAN GELOMBANG S
MENGUNAKAN MIKROTREMOR HVSR DAN KECEPATAN FASE
GELOMBANG RAYLEIGH DENGAN ASUMSI GRADIEN KECEPATAN
LINEAR**

ITA PURNEMASARI

H061191049

Skripsi,

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Sarjana Geofisika pada 20
September 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Pada

Departemen Geofisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:

Pembimbing Utama



Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., M.T.
NIP. 199111092019031010

Pembimbing Pertama



Andi Muhammad Pramatiadi, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 198803242022055001

Mengetahui:

Ketua Departemen Geofisika,



Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng

NIP. 196709291993031003

**PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "Penentuan Profil 1D Kecepatan Gelombang S menggunakan Mikrotremor HVSR dan Fase Kecepatan Gelombang Rayleigh dengan Asumsi Gradien Kecepatan Linear" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing utama Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., M.T dan pembimbing pertama Andi Muhammad Pramadi, ST., M.Eng., Ph.D. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicatumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 29 Juli 2024



ITA PURNAMASARI

NIM. H061191049

UCAPAN TERIMAKASIH

Alhamdulillah *rabbi'l'alamiin*, puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena dengan segala rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul "**Penentuan Profil 1D Kecepatan Gelombang S Menggunakan Mikrotremor Hvsr dan Kecepatan Fase Gelombang Rayleigh dengan Asumsi Gradien Kecepatan Linear**" Shalawat serta salam tidak luput penulis curahkan kepada Rasulullah Muhammad Shallaahu 'Alaihi Wa sallam. Sebagai Rasul dan Nabi akhir zaman yang menjadi teladan bagi Umat dalam berakhlak, berusaha dan berdoa. Penghargaan setinggi-tingginya penulis haturkan kepada **Ibu Almh. Nurjaya** selaku Ibu penulis serta **Bapak Ilhaeruddin** selaku Ayah penulis yang telah memberikan dukungan dan segala hal yang penulis butuhkan selama menjalani kehidupan perkuliahan di Universitas Hasanuddin. Selanjutnya kepada **Iwan Purnama, S.ST** dan **Ainil Purnama Sari** selaku saudara penulis yang banyak mendengarkan keluh kesah penulis dan senantiasa memberikan bantuan baik moril maupun moral kepada penulis selama ini.

Melalui bundelan skripsi ini pula, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada orang-orang yang membantu penulis menyelesaikan skripsi dan perkuliahan ini. Terimakasih kepada :

1. **Bapak Muhammad Fawzy Ismullah M., S.Si., M.T** selaku pembimbing Utama yang senantiasa memberikan ilmu, bimbingan, nasihat dan motivasi yang sangat berarti bagi penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Kepada **Bapak Andi Muhammad Pramadie, ST., M. Eng., Ph.D** selaku pembimbing Pertama penulis yang selalu memberikan ilmu, bimbingan dan motivasi serta selalu sabar mengajarkan penulis akan banyak hal selama proses pengerjaan skripsi ini. Terima kasih atas bimbingan, waktu, arahan, dan segala jenis bantuan yang Bapak-bapak berikan selama penyelesaian penelitian ini, hingga berakhir dalam sebuah tulisan Skripsi Geofisika.
2. **Bapak Syamsuddin, S.Si., M.T** selaku penguji pertama penulis yang telah memberikan koreksi dan masukan pada penelitian ini, serta senantiasa membantu penulis selama masa perkuliahan penulis. Kepada **Bapak Sabrianto Aswad, S.Si., MT** selaku penguji kedua penulis yang banyak memberikan saran dan masukan yang membuat penulis termotivasi untuk terus belajar dan berusaha pada penelitian ini. Terimakasih atas segala waktu, ilmu dan kritik yang diberikan kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.

3. Bapak **Dr. Erfan, M.Si** selaku dosen penasehat akademik penulis yang telah banyak memberikan ilmu, saran, motivasi, kesempatan untuk belajar hal baru dan bantuan bagi penulis selama menjalani perkuliahan di Geofisika Universitas Hasanuddin.
4. Bapak dan Ibu Dosen serta para staf akademik Departemen Geofisika FMIPA Unhas yang telah memberikan arahan dan nasihat akademik selama penulis berada di Universitas Hasanuddin.
5. **Anak Koridor** yakni **Patio, Devi, Mey, Cici** dan **Maul** selaku teman-teman terdekat penulis yang selalu kebersamai dikala susah dan senang, mendengarkan keluh kesah dan segala keanehan penulis selama ini. Terimakasih juga karena senantiasa secara terpaksa maupun sukarela untuk menemani mengerjakan skripsi dan membaca *draft* skripsi penulis.
6. **Teletubbies HMGF19** yakni **Akbar, Alif, Mawang, Devi, Patio** dan **Maul** selaku teman-teman Pengaderan HMGF 2019 yang selalu menjadi sumber masalah selama perkuliahan penulis, sekaligus orang-orang yang selalu membantu menyelesaikan semua masalah penulis. Terimakasih atas pengalaman berharganya, semoga kita sukses dengan beban seumur hidup ini.
7. **OTW Wisuda** yakni **Mulki, Rodjil, Nisa, Cindy** dan **Fatihah** sebagai teman *refreshing* penulis sejak maba (mahasiswa baru) hingga menjadi madona (mahasiswa donatur).
8. **Haikal, Arsyih, Sarni, Akbar, Alif, Mawang, Devi, Patio, Maul, Haidir, Kafa, Mey, Cici, Sekar, Nude, Kiya, Jack, Indah, Ayul, Fausta, Riman, Asyifah, Jinaan, Sindy, Nismul, Reika, Nanda, Caca, Haerul, William, Ikki, Nur, Muli, Meong, Cokbul, Tiara, Muji, Ashar, Mulki, Afak, Dahlia, Pipit, Suleha, Yuli, Amirul, Azizah, Dollo, Ghalib** dan **FISIKA 2019** selaku teman-teman yang telah kebersamai kehidupan berorganisasi penulis dan banyak membantu kehidupan kuliah penulis baik tugas-tugas akademik maupun *non*-akademik. Terimakasih atas segala huru hara yang hadir, semoga kita semua sukses dengan cara masing-masing.
9. **Kakak FISIKA 2018** atas segala pembelajaran, bantuan dan kenangan tak terlupakannya selama penulis menjadi 'warga' HMGF FMIPA Unhas. Kemudian terkhusus kepada **Kak Wawan, Kak Andri, Kak Iis, Kak Uci, Kak Jihan** dan **Kak Hasnan** yang sering penulis mintai bantuan dan menjadi tempat belajar penulis selama mengerjakan skripsi ini. Terimakasih karena telah memperkenalkan MASW dan Mikrotremor kepada penulis hingga akhirnya topik itulah yang menjadi skripsi penulis.
10. Adik-adik di himpunan yang sering penulis mintai bantuan. Terutama kepada **Camba, Ciklong, Rita, Naurah, Moday, Wina, Reynold, Paje, Shane, Cida, Cica, Kiki** serta adik-adik **HMGF21** lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya, semoga silaturahmi dan komunikasi tetap terjaga.

11. Tim **Bujang&Between** yakni **Mulki, Fausta, Diky, Patio, Nude, Cici, Ayul, Ferdi, Akbar, Kak Alfian**, juga **mba-mba between** yang tidak penulis ketahui namanya sebagai teman nongkrong bermanfaat penulis, tempat dan teman skripsian terbaik selama ini. Terimakasih karena berkat kalian skripsi ini selesai dengan menyenangkan.
12. Teman-teman lab padat dan SIG sebagai teman mengerjakan skripsi **Reika, Nismul, Nude, Nur, Cokbul, Maul, Patio, Ayul, Dahlia, Asyifa, Jinaan, Indah, Ismi, William, Ashar, Mulki, Mawang, Haidir, Depi** dan **Cici**. Meskipun topik kita berbeda-beda dan pada akhirnya waktu penyelesaian skripsi kita semua juga berbeda, terimakasih karena sudah saling menyebarkan semangat juga rasa malas mengerjakan skripsi. Semoga dimudahkan kawan yang belum selesai.
13. **Haidir Jibrán, William Desmond Tonapa, Nurmuslimah, S.Si** dan **Muhammad Habibullah** selaku tempat belajar penulis terkhusus pada bidang peminatan geofisika padat dan SIG. Terimakasih karena selalu membagikan pengetahuannya kepada penulis sehingga penulis bisa dimudahkan dalam mempelajari topik terkait skripsi penulis juga hal-hal seputar geofisika.
14. Seluruh **Kucing** yang pernah penulis temui dan **INFINITE** yang membuat penulis tidak pernah merasa kesepian dan selalu bahagia meskipun sedang dalam kondisi tidak baik-baik saja.

Terakhir kepada **diri sendiri** selaku pemeran utama dalam hidup penulis. Terimakasih karena senantiasa meluangkan waktu untuk menyelesaikan penelitian ini ditengah banyaknya hal-hal diluar kendali yang menghambat penulis untuk selesai. Terimakasih karena masih tetap hidup untuk sekedar minum kopi, makan mie ayam dan bermain bersama kucing. Akhir kata penulis juga mengucapkan banyak terimakasih kepada semua pihak yang tak bisa penulis sebut satu persatu yang telah membantu penulis dalam hal apapun selama menjalani perjalanan menjadi mahasiswa hingga akhirnya bisa selesai.

Makassar, 20 Juli 2024



ITA PURNAMASARI

ABSTRAK

ITA PURNAMASARI. **PENENTUAN PROFIL 1D KECEPATAN GELOMBANG S MENGGUNAKAN MIKROTREMOR HVSR DAN KECEPATAN FASE GELOMBANG RAYLEIGH DENGAN ASUMSI GRADIEN KECEPATAN LINEAR** (dibimbing oleh Muhammad Fawzy Ismullah dan Andi Muhammad Pramatiadie)

Latar Belakang. Informasi profil gelombang S diperlukan dalam analisa dan evaluasi *site effect* khususnya pada lapisan sedimen yang berada diatas batuan dasar karena dapat digunakan untuk menghitung respon struktur terhadap gempa bumi. Metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan profil gelombang S adalah metode seismik. **Tujuan.** Sebagai upaya agar pengukuran dan pengolahan data yang lebih mudah dibandingkan dengan metode *non-invasif* konvensional, representasi profil V_s dapat disederhanakan menggunakan fungsi kecepatan-kedalaman. **Metode.** Pada penelitian ini digunakan asumsi gradien kecepatan linear dengan penyederhanaan parameter menjadi hanya kecepatan gelombang permukaan, gradien kenaikan kecepatan dan ketebalan lapisan untuk memberikan representasi profil 1D V_s . Digunakan tujuh model sintetik teoritis dengan kasus lapisan yang berbeda untuk melihat penerapan dari metode yang diusulkan. Initial model V_1 , b dan h diperoleh dengan membandingkan kurva dispersi dan kurva eliptisitas antara model teoritis dan model estimasi. **Hasil.** Penelitian ini menunjukkan bahwa asumsi gradien kecepatan linear sangat baik digunakan untuk kasus gradien kecepatan power-law dengan $R = 7.39\%$ dan kasus gradien kecepatan eksponensial dengan $R = 7.57\%$. Baik digunakan untuk kasus gradien kecepatan bi-linear dengan $R = 11.83\%$, kasus tiga lapisan dengan kecepatan yang meningkat seiring dengan kedalaman dengan $R = 18.37\%$ dan kasus tiga lapisan dengan inversi lapisan kedua yang tebal dengan $R = 19.49\%$. Cukup baik digunakan dalam kasus tiga lapisan dengan inversi kecepatan pada lapisan kedua yang lunak dan kasus dua lapisan dengan kontras kecepatan yang tinggi dengan $R = 27.29\%$. **Kesimpulan.** Penelitian ini membuktikan seberapa efektif asumsi gradien kecepatan linear dalam analisis profil V_s untuk berbagai kondisi geologis dan menawarkan alternatif yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional.

Kata Kunci: Kecepatan Gelombang S, Gradien Linear, Kecepatan Fase, Eliptisitas, Profil V_s

ABSTRACT

ITA PURNAMASARI. **DETERMINATION OF 1D PROFILE OF S-WAVE VELOCITY USING HVSR MICROTREMOR AND RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY ASSUMING LINEAR VELOCITY GRADIENT** (supervised by Muhammad Fawzy Ismullah and Andi Muhammad Pramatadie)

Background. *S-wave profile information is essential in the analysis and evaluation of site effects, particularly in sedimentary layers above bedrock, as it can be used to calculate structural responses to earthquakes. The seismic method can be used to obtain S-wave profiles.* **Objective.** *To facilitate easier data measurement and processing compared to conventional non-invasive methods, the V_s profile representation can be simplified using a velocity-depth function.* **Method.** *In this research, a linear velocity gradient assumption is used, with parameter simplification to only surface wave velocity, velocity gradient, and layer thickness to provide a 1D V_s profile representation. Seven theoretical synthetic models with different layered cases are used to observe the application of the proposed method. The initial model parameters V_1 , b , and h are obtained by comparing dispersion curves and ellipticity curves between the theoretical and estimated models.* **Results.** *This study shows that the linear velocity gradient assumption is highly suitable for the power-law velocity gradient case with $R = 7.39\%$ and the exponential velocity gradient case with $R = 7.57\%$. It is also effective for the bi-linear velocity gradient case with $R = 11.83\%$, the three-layer case with increasing velocity with depth with $R = 18.37\%$, and the three-layer case with a thick second-layer inversion with $R = 19.49\%$. It is reasonably effective in the three-layer case with soft second-layer velocity inversion and the two-layer case with high-velocity contrast with $R = 27.29\%$.* **Conclusion.** *This research demonstrates how effective the linear velocity gradient assumption is in analyzing V_s profiles for various geological conditions and offers a more efficient alternative compared to conventional methods.*

Key Word: *S-Wave Velocity, Linear Gradient, Phase Velocity, Ellipticity, V_s Profile*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PENGAJUAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI Error! Bookmark not defined.	
UCAPAN TERIMAKASIH	vi
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
DAFTAR ISTILAH.....	xvi
DAFTAR LAMBANG/SINGKATAN	xvii
BAB I	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Batasan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Teori	3
BAB II	10
2.1 Data dan Perangkat Penelitian.....	10
2.2 Tahapan Penelitian	11
2.3 Bagan Alir Penelitian.....	14
BAB III	15
3.1 Nilai V_1 dan b	15
3.2 Nilai <i>Thickness</i>	19

BAB IV	25
4.1 Kesimpulan.....	25
4.2 Saran.....	26
DAFTAR PUSTAKA	27

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Klasifikasi Jenis Tanah dan Batuan Berdasarkan ASCE 2010 dan SNI 1726:2012 dalam Rusydy dkk. (2016).	3
2. Batas pencarian dari parameter model menggunakan <i>grid search</i> untuk mendapatkan profil Vs berdasarkan data kecepatan fase	15
3. Nilai V_1 dan b dengan <i>Misfit</i> Terkecil	17
4. Nilai f_0 Kurva Eliptisitas Teoritis dan f_0 Kurva Eliptisitas Estimasi.....	19
5. Perbandingan Parameter Model Profil Estimasi dengan Profil Vs Teoritis	23

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Gerak Partikel Gelombang Rayleigh.....	5
2. Kurva dispersi gelombang Rayleigh.....	6
3. Kurva HVSR Gelombang Rayleigh	7
4. Model Teoritis Sintetik	10
5. Ilustrasi Profil Vs 1D dengan Asumsi Gradien Kecepatan Linear.....	13
6. Bagan Alir Penelitian	14
7. Kontur Misfit Antara pasangan V_1 dan b dengan model teoritis	15
7. Kontur Misfit Antara pasangan V_1 dan b dengan model teoritis	16
8. Kecepatan fase model estimasi dan kecepatan fase model teoritis ...	17
8. Kecepatan fase model estimasi dan kecepatan fase model teoritis ...	18
9. Ilustrasi Hubungan Antara <i>Peak frequency</i> (f_0) dengan <i>Thickness</i> (h)	19
10. Kurva eliptisitas estimasi dan kurva eliptisitas teoritis	21
11. Profil Vs Estimasi dan Profil Vs Teoritis	21
11. Profil Vs Estimasi dan Profil Vs Teoritis	22
12. Prosedur Komputasi Pemodelan Kedepan dalam Kurva Dispersi Kecepatan Fase untuk Lapisan Berlapis	30

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Program <i>Workflow</i>	30
2. Model Teoritis Sintetik	31
3. Forward Modelling Haskell 1958.....	32

DAFTAR ISTILAH

Istilah	Arti dan Penjelasan
<i>Forward Modelling</i>	Pemodelan kedepan atau proses mendapatkan data dari model
<i>Thickness</i>	Ketebalan lapisan
Model Teoritis	<i>True Model</i> atau model sebenarnya yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini
Model Estimasi	Model yang dibuat berdasarkan asumsi gradien kecepatan linear
Profil Vs 1D	Model yang merepresentasikan kondisi geologis berdasarkan kecepatan gelombang S dan kedalaman
<i>Half-space/ Bedrock</i>	Batuan dasar atau lapisan paling bawah dari suatu lapisan
Eliptisitas	Pergerakan partikel pada suatu lapisan dalam arah horizontal dan vertikal
Densitas	Massa jenis atau ukuran kepadatan suatu lapisan
<i>Average Relative Difference (R)</i>	Rata-rata perbedaan relatif antara model estimasi dengan model teoritis
Dispersi	Perubahan kecepatan gelombang ketika mencapai batuan lapisan tertentu
<i>Fourier Transform</i>	Transformasi Fourier yakni fungsi yang digunakan untuk melakukan transformasi fungsi dari domain waktu ke domain frekuensi atau sebaliknya

DAFTAR LAMBANG/SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan Penjelasan
H_{EW}	Spektrum komponen horizontal <i>North-South</i>
H_{NS}	Spektrum komponen horizontal <i>East-West</i>
V_{UD}	Spektrum komponen vertical <i>Up-Down</i>
F_0	Frekuensi dominan
V_s	Kecepatan gelombang-S
V_1	Kecepatan gelombang permukaan
b	Gradien kenaikan kecepatan
Z_b	Kedalaman lapisan <i>bedrock</i>
V_p	Kecepatan gelombang-P
ε	Selisih kecepatan fase gelombang estimasi dengan teoritis
R	<i>Average Relative Difference</i> atau selisih antara kecepatan gelombang estimasi dengan teoritis
V_{theo}	Kecepatan gelombang teoritis
V_{obs}	Kecepatan gelombang estimasi
h	Ketebalan lapisan
Z	Kedalaman lapisan
$F(C,k)$	Fungsi matriks transfer untuk mencari kecepatan fase
J	Matriks invers pada lapisan setengah ruang
α	Parameter kecepatan gelombang P
β	Parameter kecepatan gelombang S
m	Salah satu lapisan diantara permukaan bebas dan lapisan terakhir
$n-1$	Lapisan kedua terakhir sebelum mencapai lapisan setengah ruang
n	Half-Space/ <i>Bedrock</i> merupakan lapisan terakhir yang dianggap sebagai batuan dasar
C	Kecepatan Fase
k	Bilangan gelombang

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Informasi profil gelombang S diperlukan dalam analisa dan evaluasi *site effect* khususnya pada lapisan sedimen yang berada diatas batuan dasar karena dapat digunakan untuk menghitung respon struktur tanah terhadap gempa bumi. Metode yang dapat digunakan untuk mendapatkan profil gelombang S adalah metode seismik. Pada umumnya metode seismik yang digunakan untuk karakterisasi *site* dibagi menjadi dua kategori besar yakni metode invasif dan *non-invasif*. Metode invasif merupakan metode yang membutuhkan lubang bor untuk memasukkan sensor (sumber atau penerima) ke dalam tanah, misalnya *cross-hole*, *down-hole*, dan P-S *logging* namun metode ini cukup mahal. Di sisi lain, metode *non-invasif* lebih banyak digunakan karena hanya dilakukan di permukaan dan dapat memberikan profil kecepatan gelombang S di area yang luas dengan biaya yang lebih murah daripada metode invasif (Foti dkk., 2014).

Di antara metode *non-invasif* yang tersedia, metode yang biasanya digunakan yakni pengukuran gelombang permukaan dan mikrotremor untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang S. Kecepatan gelombang S (V_s) ditentukan dari perambatan gelombang seismik yang tegak lurus terhadap arah rambat gelombangnya (Arifuddin, 2021). Dalam pengukuran gelombang permukaan, metode *Multichannel Analysis Of Surface Wave* (MASW) oleh Park dkk., (1999) adalah yang paling umum digunakan. Metode ini memanfaatkan rangkaian geofon untuk mengukur gelombang permukaan yang dihasilkan secara artifisial menggunakan sumber tumbukan atau disebut metode aktif. Sementara itu, pengukuran mikrotremor HVSr merupakan metode pasif dengan memanfaatkan gelombang yang dihasilkan dari aktivitas manusia atau alam (Okada, 2003).

Prinsip dari pengukuran survei aktif dan pasif adalah untuk mendapatkan kecepatan fase gelombang yang selanjutnya dapat dilakukan inversi untuk mendapatkan profil V_s yang diwakili oleh model berlapis horizontal atau profil V_s 1D. Survei aktif memberikan kurva dispersi dalam rentang frekuensi yang relatif tinggi kemudian survei pasif dapat memberikan informasi pada rentang frekuensi yang lebih rendah. Dengan menggabungkan kedua set data kurva ini, kurva dispersi dari *fundamental mode* dapat digunakan untuk menghasilkan informasi profil V_s dari kedalaman dangkal hingga dalam (Park dkk., 2005). Pada proses inversi untuk melakukan penentuan initial model diperlukan beberapa parameter

model yakni kecepatan gelombang P, kecepatan gelombang S, densitas, *thickness* dan jumlah lapisan. Semakin banyak jumlah lapisan maka parameter model juga akan semakin bervariasi tergantung pada banyaknya lapisan, sehingga perhitungan menjadi lebih panjang (Syamsuddin dan Assegaf, 2021).

Sebagai upaya agar pengukuran dan pengolahan data yang lebih mudah dibandingkan dengan metode non-invasif konvensional, representasi profil Vs dapat disederhanakan menggunakan fungsi kecepatan-kedalaman sehingga parameter model dapat dikurangi menjadi hanya dua parameter yakni kecepatan gelombang S permukaan dan gradien kecepatan. Penggunaan representasi profil Vs dengan fungsi kecepatan-kedalaman didasarkan pada fakta bahwa Vs dari material tanah meningkat secara bertahap seiring dengan kedalaman. Penyederhanaan parameter model telah digunakan oleh beberapa penelitian misalnya pada Scherbaum dkk., (2003) yang menggunakan kecepatan gelombang-S permukaan dan ketebalan lapisan sebagai parameter model. Kemudian penelitian oleh Wang dkk., (2018) yang membandingkan beberapa penyederhanaan parameter model mengungkapkan bahwa penggunaan peningkatan fungsi kecepatan linear lebih baik untuk digunakan. Selanjutnya oleh Pramatadie dkk., (2018) dan (2023) melakukan penelitian untuk merepresentasikan profil Vs hanya dengan mengestimasi parameter kecepatan gelombang S permukaan dan gradien kecepatan. Namun pada penelitian tersebut terdapat kesulitan dalam penentuan kedalaman batuan dasar. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengatasi kesulitan dari penelitian sebelumnya dengan menambahkan parameter *thickness* sebagai parameter model tambahan untuk memberikan representasi profil Vs yang lebih baik. Selain itu juga dilakukan tes numerik untuk melakukan evaluasi pengaplikasian dari metode yang diusulkan.

1.2 Batasan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada penentuan profil 1D kecepatan gelombang S dengan menggunakan mikrotremor HVSR dan kecepatan fase gelombang Rayleigh menggunakan asumsi gradien kecepatan linear serta melakukan tes numerik untuk mengevaluasi pengaplikasian dari metode yang diusulkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan penentuan profil 1D kecepatan gelombang S menggunakan mikrotremor HVSR dan kecepatan fase gelombang Rayleigh dengan asumsi gradien kecepatan linear.

2. Mengetahui penerapan dan akurasi metode yang diusulkan dalam mengestimasi profil 1D gelombang S berdasarkan hasil dari tes numerik.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui penerapan asumsi gradien kecepatan linear terhadap penentuan profil 1D kecepatan gelombang S menggunakan mikrotremor HVSR dan kecepatan fase gelombang Rayleigh.
2. Penelitian lanjutan dengan melakukan penambahan parameter *thickness* (h) untuk memberikan profil Vs dengan representasi yang lebih baik.

1.5 Teori

1.5.1 Gelombang Sekunder

Gelombang sekunder merupakan gelombang badan yang sering dinamakan sebagai gelombang S yang berarti *shear* atau gelombang geser. Gelombang ini adalah gelombang transversal, sehingga arah pergerakan partikel akan tegak lurus dengan arah rambat gelombang. Gelombang sekunder mempunyai kecepatan lebih lambat dari gelombang primer (Maemunah, 2018).

Dalam medium yang padat, gelombang geser menjalar dengan kecepatan antara 3-4 km/detik. Ketika menjalar di bawah permukaan, gelombang geser memberikan regangan geser pada material yang dilaluinya, sehingga dinamakan geser (Thompson dan Turk, 1997).

Gelombang geser merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan kekuatan guncangan gempa, amplifikasi tanah, likuifaksi dan pemetaan kondisi bawah permukaan untuk kebutuhan bidang rekayasa (Xia dkk., 2000). Dalam ASCE 2010 dan SNI 1726:2012, parameter Vs sudah dimasukkan dan menjadi salah satu parameter dalam menentukan pengklasifikasian jenis tanah dan batuan sebagaimana ditunjukkan oleh :

Tabel 1. Klasifikasi Jenis Tanah dan Batuan Berdasarkan ASCE 2010 dan SNI 1726:2012 dalam Rusydy dkk. (2016).

Klasifikasi Situs	Vs(m/s)	\bar{N}	S _u (kPA)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 – 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 -750	>50	≥100
SD (tanah sedang)	175-350	15-50	50-i 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50

	<p>Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 meter tanah dengan karekteristik sebagai berikut :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks Plastisitas, $PI > 20$ 2. Kadar Air, $w \geq 40\%$ 3. Kuat Geser (<i>Undrained</i>), $S_u < 25$ kPa
<p>SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik.</p>	<p>Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karekteristik berikut :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5$ m dengan Indeks Plastisitas $PI > 75$) - Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $S_u < 50$ kPa

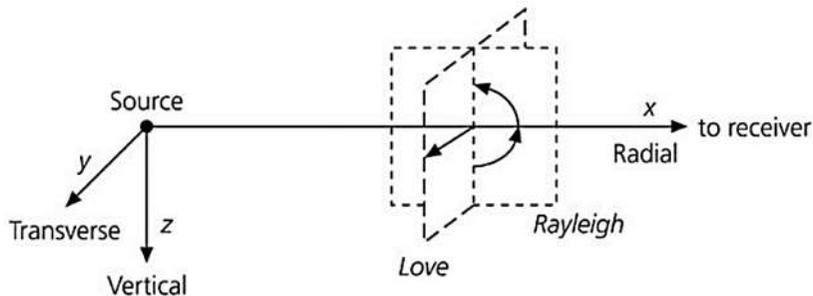
Catatan : \bar{N} = Nilai hasil tes penetrasi standar rata-rata dan S_u = Kuat geser niralir rata-rata

Kecepatan gelombang S (V_s) merupakan sifat dasar dari tanah, batuan, beton, baja, dan material teknik sipil lainnya. Pengukuran V_s untuk material tanah dapat diperoleh pada spesimen yang dipangkas di laboratorium dengan menggunakan uji kolom resonansi atau elemen penyokong, tetapi paling baik dilakukan di lapangan dengan menggunakan metode geofisika (Mayne dan Rix, 1995).

1.5.2 Gelombang Rayleigh

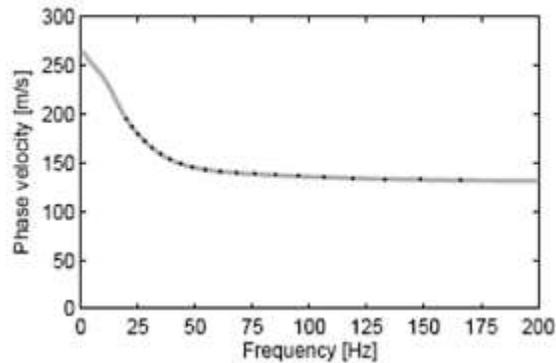
Gelombang Rayleigh (*Groundroll*) adalah gelombang yang merambat pada permukaan bumi dengan gerak partikel berbentuk elips dan arah gerak mundur seperti pada **gambar 1**. Gelombang Rayleigh yang merambat melalui medium padat yang homogen tidak terdispersi sehingga kecepatan

gelombang Rayleigh bukan merupakan fungsi dari frekuensi. Namun jika perambatan gelombang Rayleigh melewati batas lapisan material bumi, maka gelombang ini akan mengalami dispersi dan kecepatan gelombang Rayleigh bergantung terhadap frekuensi. Dimana pada frekuensi gelombang yang lebih rendah akan mencapai lapisan yang lebih dalam dibandingkan gelombang yang berfrekuensi lebih tinggi, atau dengan kata lain gelombang yang berfrekuensi lebih tinggi akan mencapai lapisan yang dekat dengan permukaan (Lowrie, 2007; Dal Moro, 2014; Foti dkk., 2014).



Gambar 1. Gerak Partikel Gelombang Rayleigh. Sumber: Das & Ramana, 2010.

Konsep utama dalam metode pengukuran dan analisis gelombang seismik permukaan adalah karakteristik dispersi geometrik kecepatan fase gelombang Rayleigh yang digunakan untuk menentukan profil tanah atau media dalam penyelidikan *sub-surface* (Rosyidi, 2015). Gelombang tersebut merambat sepanjang permukaan medium dengan kecepatan fase lebih rendah dari pada kecepatan gelombang P dan gelombang S. Amplitudo gelombang berkurang secara eksponensial terhadap kedalaman. Dalam memodelkan dispersi gelombang Rayleigh maka dibentuklah kurva dispersi gelombang Rayleigh. Kurva dispersi merupakan kurva kecepatan fase gelombang dengan frekuensi. Kecepatan sudut gelombang Rayleigh jika dibuat grafik sebagai fungsi frekuensi adalah seperti pada **gambar 2**. Kurva dispersi gelombang Rayleigh dipengaruhi oleh beberapa parameter yakni ketebalan lapisan, densitas, poisson ratio, kecepatan gelombang P dan kecepatan gelombang S. Parameter-parameter tersebut memberikan efek dispersi gelombang Rayleigh yang berbeda-beda. Namun kecepatan fase dari kurva dispersi gelombang Rayleigh dipengaruhi kuat oleh ketebalan lapisan dan kecepatan gelombang gesernya (Xia dkk., 1999; Dal Moro, 2007).



Gambar 2. Kurva dispersi gelombang Rayleigh. Sumber: Sholihan, 2010.

Berdasarkan sifat dispersi inilah gelombang Rayleigh digunakan sebagai media untuk mengevaluasi profil kekakuan bawah permukaan tanah melalui berbagai pengujian lapangan (Rosyidi, 2015). Selain itu, gelombang Rayleigh dapat membuat citra dan struktur bawah permukaan dengan mudah dan dapat diterapkan langsung pada disiplin ilmu geoteknik (Hartantyo, 2010). Gelombang Rayleigh dianggap sangat baik digunakan dalam identifikasi struktur tanah pada lapisan yang dangkal, karena dalam perambatannya mengalami pengurangan energi yang lebih rendah dari jenis gelombang seismik lainnya (Shearer, 2009).

1.5.3 Mikrotremor HVSR

Permukaan bumi selalu bergerak pada frekuensi seismik, bahkan tanpa adanya gempa bumi. Getaran konstan pada permukaan bumi ini disebut mikrogetaran atau mikrotremor (Okada, 2003). Mikrotremor merupakan getaran lingkungan (*ambient vibration*) yang berasal dari dua sumber utama, yaitu aktivitas manusia dan alam (Nakamura, 2000). Ketika mikrotremor diamati secara bersamaan di beberapa stasiun terpisah secara spasial, dicatat bahwa getaran ini tidak sepenuhnya acak dan beberapa gelombang koheren tercatat dalam data. Dengan kata lain, mikrotremor adalah kumpulan gelombang yang merambat dalam berbagai arah. Toksoz dan Lacoss (1968) secara jelas menunjukkan dari data jaringan *large-aperture seismic array* (LASA) bahwa mikrotremor adalah kumpulan getaran gelombang badan dan gelombang permukaan (Okada, 2003). Mikrotremor didominasi oleh gelombang permukaan yang dapat digunakan untuk menentukan kurva dispersi gelombang Rayleigh tanpa memerlukan sumber buatan. Analisis mikrotremor dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectrum Ratio* (HVSR) yang merupakan salah satu cara yang paling mudah dan paling murah untuk memahami sifat struktur lapisan bawah

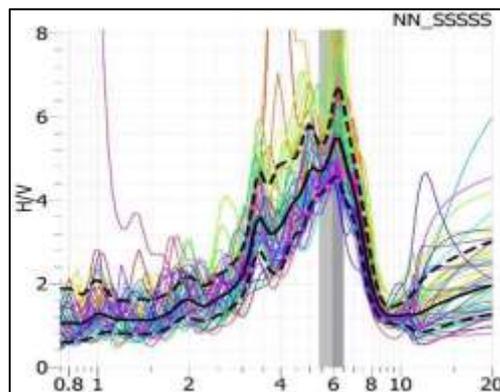
permukaan tanpa menyebabkan gangguan pada struktur tersebut (Cristanty, 2011).

Metode HVSR dilakukan dengan cara estimasi rasio spektrum Fourier komponen vertikal terhadap komponen horizontal. HVSR yang terekam pada tanah digunakan untuk karakterisasi geologi di daerah setempat, frekuensi natural dan amplifikasi yang berhubungan dengan parameter fisik bawah permukaan (Haeruddin dkk., 2019). Dalam metode HVSR terdapat dua data komponen horizontal (*North-South* dan *East-West*) dan satu data komponen vertikal (*Up-Down*). Penggabungan kedua data horizontal ini biasanya dilakukan berdasarkan aturan *pythagoras* dalam fungsi frekuensi, yang dinyatakan sebagai berikut (Haeruddin, dkk., 2019) :

$$R(f) = \frac{\sqrt{H_{EW}^2(f) + H_{NS}^2(f)}}{V_{UD}(f)} \quad (1)$$

Dengan, $R(f)$ adalah rasio perbandingan spektrum horizontal dengan vertikal (HVSR), $H_{NS}(f)$ adalah spektrum komponen horizontal *North-South*, $H_{EW}(f)$ adalah spektrum komponen horizontal *East-West*, dan $V_{UD}(f)$ adalah spektrum komponen vertikal *Up-Down* (Haeruddin dkk., 2019).

Setelah mendapatkan nilai H/V pada setiap frekuensi, dapat diperoleh kurva HVSR dimana sumbu horizontal adalah frekuensi dan sumbu vertikal adalah faktor amplifikasi (H/V). Bentuk kurva HVSR (**gambar 3**) yang diperoleh sangat bergantung pada kondisi lokal getaran sekitar yang terekam, yaitu rasio energi gelombang permukaan, kontribusi gelombang badan, variasi lateral properti tanah, pola sumber, perangkat akusisi dan lain-lain. Dalam keadaan ini, eliptisitas gelombang Rayleigh dapat dideteksi antara puncak frekuensi dasar dan minimum pertama pada frekuensi yang lebih tinggi (Syamsuddin dan Assegaf, 2021).



Gambar 3. Kurva HVSR Gelombang Rayleigh. Sumber: Pengolahan Data

1.5.4 Frekuensi Natural

HVSR yang terukur pada tanah bertujuan untuk karakterisasi amplifikasi dan frekuensi natural yang berkaitan dengan parameter fisik bawah permukaan (Herak, 2008). Frekuensi natural merupakan frekuensi pada puncak HVSR, yang juga merupakan nilai amplifikasi geologi setempat (SESAME, 2004). Frekuensi dominan adalah nilai frekuensi yang kerap muncul sehingga diakui sebagai nilai frekuensi natural dari lapisan batuan di wilayah tersebut sehingga nilai frekuensi dapat menunjukkan jenis dan karakteristik batuan tersebut. Hubungan antara frekuensi dominan HVSR, dengan ketebalan lapisan adalah sebagai berikut (Arimuko dkk., 2019):

$$f_0 = \frac{V_s}{4h} \quad (2)$$

Dimana f_0 merupakan frekuensi dominan, V_s merupakan kecepatan gelombang S dan h merupakan kedalaman batuan dasar (*bedrock*).

1.5.5 Transformasi Fourier

Transformasi fourier di dalam mikroseismik adalah metode yang sering digunakan untuk mendekomposisi sebuah gelombang seismik menjadi beberapa gelombang harmonik sinusoidal dengan masing-masing frekuensi tertentu. Transformasi fourier digunakan untuk merubah data domain waktu ke dalam domain frekuensi. Hal ini dilakukan karena dalam analisis HVSR perhitungan lebih mudah dalam domain frekuensi dibandingkan dengan domain waktu. Selain itu, fenomena geofisika berkaitan erat dengan frekuensi, sehingga frekuensi menjadi parameter penting dalam menjelaskan fenomena-fenomena tersebut. Transformasi Fourier dari sebuah fungsi $f(t)$ didefinisikan sebagai berikut (Park dkk., 1998):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

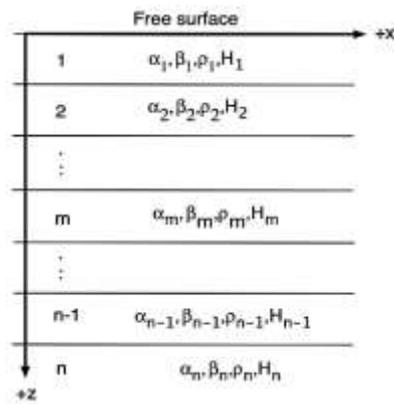
Dengan $\omega = 2\pi f$ (variabel frekuensi sudut dengan satuan radian per detik) (Yuliawati, 2019). Persamaan tersebut disebut juga sebagai forward fourier transform yang mentransformasikan sinyal domain waktu ke domain frekuensi (Park dkk., 1998).

1.5.6 Forward Modelling

Pemodelan kedepan (*forward modelling*) merupakan proses untuk menghitung respons (data teoritik atau data perhitungan) dari suatu model bawah permukaan tertentu. Perhitungan data teoritis tersebut menggunakan persamaan matematik yang diturunkan dari konsep fisika yang mendasari fenomena yang ditinjau (Grandis, 2009). Pada penelitian ini, respon atau data

teoritik berupa kecepatan fase gelombang Rayleigh diperoleh dari model bawah permukaan berupa profil kecepatan gelombang S (V_s). Kalkulasi dari kecepatan fase teoritis pada bidang berlapis horizontal ini diestimasi menggunakan metode Haskell (1953).

Karakteristik dispersi kecepatan fase gelombang Rayleigh untuk $n-1$ homogen, isotropik dan elastis pada lapisan setengah ruang (n) dipengaruhi oleh kecepatan gelombang p (α_i atau V_{p_i}), kecepatan gelombang S (β_i atau V_{s_i}), densitas (ρ_i) dan *thickness* (H_i) sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut (Saifuddin, 2019).



Gambar 4. Lapisan heterogen tanah secara vertikal dengan sumbu x- dan z+. Sumber : Saifuddin, 2019.

Propagasi gelombang Rayleigh pada bidang horizontal dengan arah x dengan kecepatan fase ($C=C(k)$) bergantung pada bilangan gelombang (k). Oleh karena itu juga bergantung pada frekuensi, dimana frekuensi diberikan oleh persamaan $f = Ck/2\pi$. Pada perhitungan kurva dispersi kita mencari kecepatan fase untuk setiap bilangan gelombang dan frekuensi yang berbeda. Prosedur komputasi umum yang digunakan untuk estimasi kecepatan fase teoritis adalah mencari nilai nol dari perhitungan karakteristik ($F(C,k)$) yang dijabarkan pada lampiran 3.

BAB II

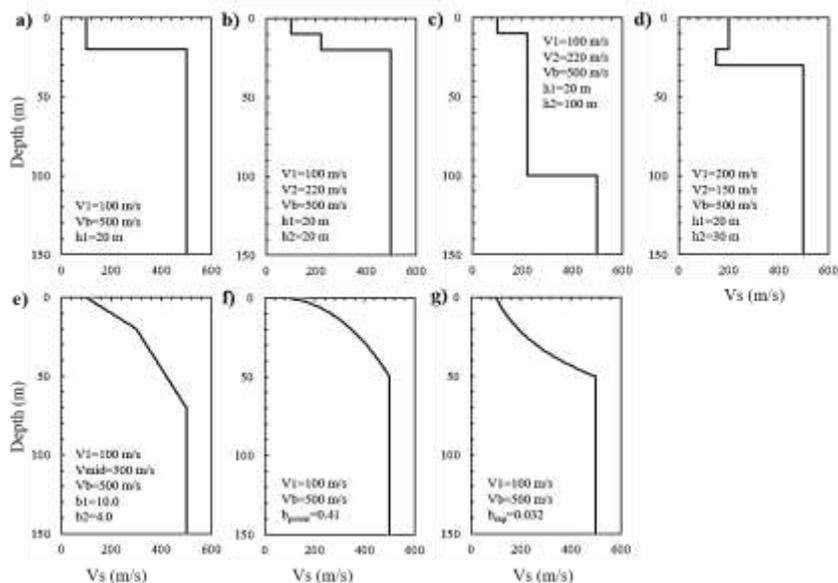
METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Data dan Perangkat Penelitian

2.1.1 Data Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan data sintetik model teoritis dengan representasi profil V_s yang berbeda, yaitu sebagai berikut :

- 1) Profil dua lapisan dengan kontras kecepatan tinggi
- 2) Profil tiga lapisan dengan kecepatan yang meningkat seiring kedalaman
- 3) Profil tiga lapisan yang mengandung lapisan kedua yang tebal
- 4) Profil tiga lapisan dengan inversi kecepatan pada lapisan kedua yang lunak
- 5) Profil yang diwakili oleh dua gradien kecepatan linear (yaitu, model *bi-linear*)
- 6) Profil dengan gradien kecepatan *power-law*
- 7) Profil dengan gradien kecepatan eksponensial



Gambar 5. Model Teoritis Sintetik. Sumber: Pramatadie, 2018.

2.1.2 Perangkat Penelitian

Adapun perangkat yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat laptop yang didalamnya telah terpasang beberapa aplikasi berupa Cygwinx64 sebagai terminal untuk menjalankan fortran dan Notepad++ untuk membuat program, serta Microsoft Office Excel dan Surfer untuk melakukan plot profil kecepatan gelombang S.

2.2 Tahapan Penelitian

2.2.1 Tahapan Persiapan

Tahapan persiapan dalam penelitian ini berupa studi literatur dengan mengumpulkan bahan bacaan sebagai referensi mengenai gelombang geser atau gelombang S, mikrotremor HVSR, gelombang Rayleigh dan sejenisnya yang mendukung metode penelitian ini.

2.2.2 Prosedur Pengolahan data

Adapun prosedur pengolahan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan Profil 1D Vs

a) Profil Vs Teoritis (*True Model*)

Pada tahap ini terlebih dahulu dilakukan pemodelan profil Vs teoritis dengan tujuh representasi profil yang berbeda sesuai dengan data yang dimaksudkan pada data penelitian sub bab 2.1.1. Selanjutnya melakukan *forward modelling* pada masing-masing model untuk memperoleh kecepatan fase gelombang teoritis sintetik dan eliptisitas gelombang Rayleigh teoritis sintetik dari ketujuh model yang ada.

b) Profil Vs Estimasi

Pada penelitian ini kecepatan gelombang S dari profil Vs estimasi diasumsikan meningkat secara linear dari permukaan ke lapisan bawah, yang dinyatakan sebagaimana persamaan berikut (Pramatadie dkk., 2018):

$$V_{S(z)} = V_1 + bz \quad (4)$$

$$Z_B = \frac{V_B - V_1}{b} \quad (5)$$

Dengan $V_{S(z)}$ merupakan kecepatan gelombang S pada kedalaman z , V_1 merupakan kecepatan gelombang S permukaan, V_b adalah kecepatan gelombang pada lapisan *bedrock*, Z_B adalah kedalaman *bedrock*, dan b merupakan gradien kenaikan kecepatan gelombang S dengan kedalaman z . Pada tahap ini dilakukan *input* nilai estimasi V_1 , b dan V_b sehingga parameter V_P dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Kitsunezaki dkk., 1990):

$$V_P = 1,11V_S + 1290 \quad (6)$$

Untuk mendapatkan kecepatan fase dan eliptisitas gelombang Rayleigh dari masing-masing model estimasi maka dilakukan pemodelan kedepan (*forward modelling*).

2. Penentuan Profil Vs 1D dengan Asumsi Gradien Kecepatan Linear

Pada tahap ini dilakukan perhitungan nilai misfit antara data estimasi dengan data teoritis menggunakan persamaan berikut:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (C_{obs}(f_i) - C_{theo}(f_i))^2\right) / n} \quad (7)$$

Dengan ε adalah *misfit*, $C_{obs}(f_i)$ dan $C_{theo}(f_i)$ merupakan kecepatan fase gelombang estimasi dan teoritis pada frekuensi i , kemudian n adalah jumlah data. Persamaan ini digunakan untuk mendapatkan rentang nilai misfit antara data estimasi dengan data teoritis yang selanjutnya akan digunakan untuk menentukan profil estimasi yang paling cocok dengan profil teoritis melalui tahapan berikut:

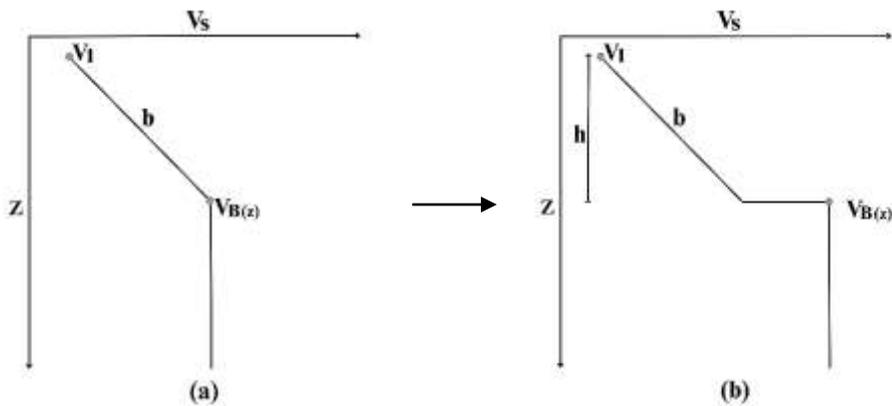
a) Penentuan V_1 dan b

Pada tahap ini digunakan metode *grid search* dengan mengestimasi nilai V_1 dan b yang terlebih dahulu dibuat batas rentang pencarian nilainya, yakni menentukan nilai minimum dan maksimum dari V_1 dan b (V_{1min} , V_{1maks} , b_{min} , b_{maks}) dan peningkatan nilainya (ΔV_1 dan Δb). Setelah itu dilakukan pemodelan kedepan untuk mendapatkan kecepatan fase dan frekuensi dari model estimasi yang selanjutnya dibuat menjadi grafik kurva dispersi. Untuk setiap model estimasi yang telah dibuat dengan rentang batas pencarian nilai V_1 dan b yang diatur dalam *grid search*, digunakan **persamaan 7** untuk menghitung selisih antara kecepatan fase model estimasi dengan kecepatan fase model teoritis, atau *misfit* antara kurva dispersi estimasi dengan kurva dispersi teoritis. Selanjutnya dibuat kontur antara kombinasi nilai V_1 dan b dengan nilai *misfit*-nya menggunakan *software surfer* untuk mencari pasangan V_1 dan b dengan nilai *misfit* terkecil. Kemudian profil dengan nilai *misfit* terkecil itulah yang akan digunakan sebagai initial nilai V_1 dan b .

b) Penentuan *thickness*

Setelah mendapatkan estimasi nilai V_1 dan b sebagai initial model selanjutnya melakukan estimasi nilai *thickness* (h). Estimasi nilai h dilakukan dengan menentukan batas rentang pencarian nilai estimasinya yakni nilai maksimum (h_{max}), minimum (h_{min}) dan peningkatan nilainya (Δh). Setelah itu akan diperoleh banyak kombinasi pasangan V_1 - b dan h yang selanjutnya dilakukan pemodelan kedepan untuk memperoleh eliptisitas gelombang Rayleigh-nya. Kemudian dilakukan pencocokan antara eliptisitas gelombang estimasi dengan eliptisitas gelombang teoritis berdasarkan nilai *peak frequency* (f_0) dari masing-masing model.

Pada penelitian ini yang membedakan dengan penelitian sebelumnya adalah tahapan penentuan *thickness*. Dengan menambahkan parameter ketebalan lapisan maka representasi profil V_s yang ditampilkan akan lebih baik karena dapat memberikan estimasi kedalaman batuan dasar, sebagaimana ditunjukkan pada **gambar 6**. Pada **gambar 6(a)** nilai V_s akan terus meningkat secara linear bergantung pada nilai b hingga mencapai kecepatan gelombang S pada batuan dasar (V_b), sementara pada **gambar 6(b)** dengan adanya parameter *thickness* (h) maka peningkatan V_s akan berhenti ketika mencapai nilai h sehingga estimasi kedalaman batuan dasarnya dapat diketahui.



Gambar 6. Ilustrasi Profil V_s 1D dengan Asumsi Gradien Kecepatan Linear (a) Penelitian sebelumnya (b) Penelitian saat ini.

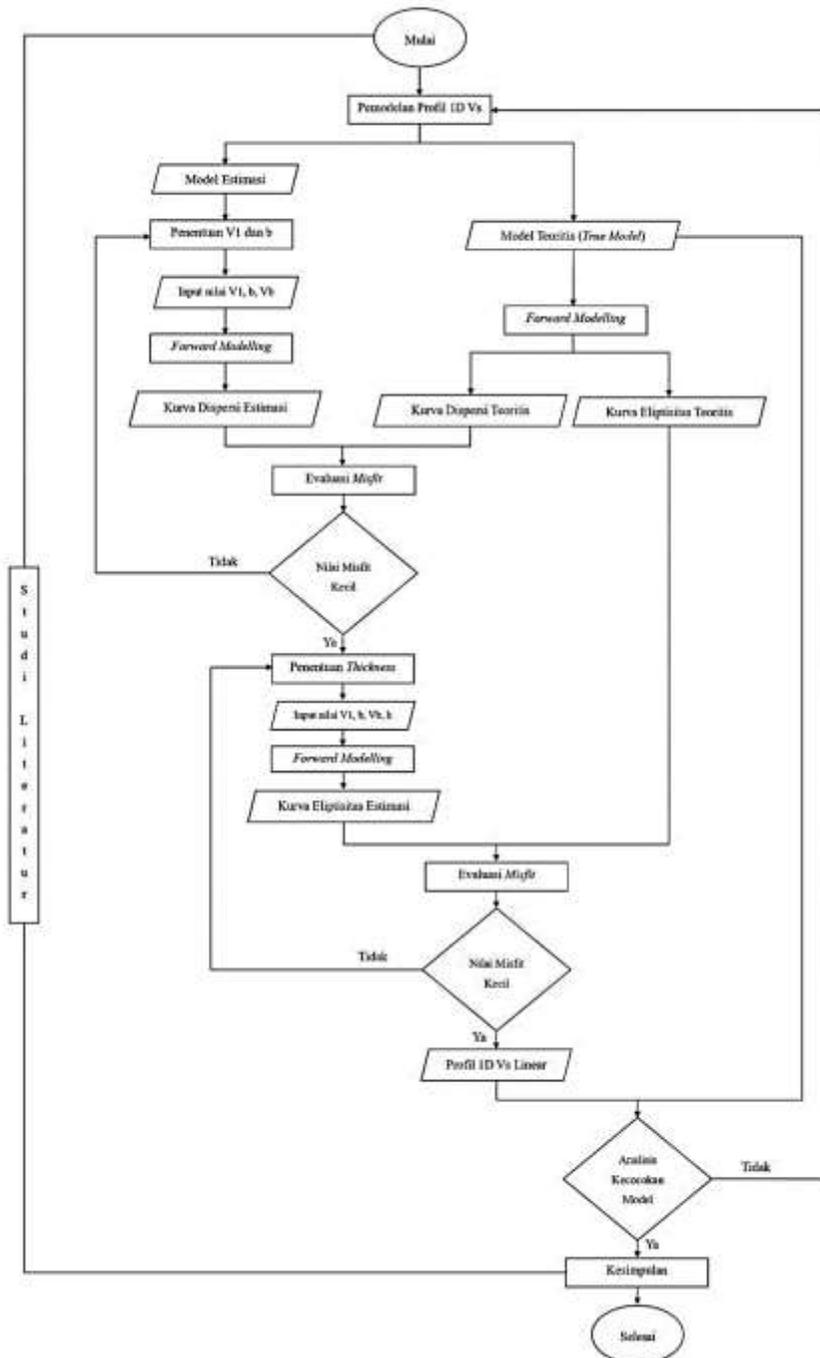
3. Analisis Kecocokan Model

Untuk mengkonfirmasi kesesuaian asumsi peningkatan kecepatan secara linear dengan model sebenarnya (model teoritis) maka dilakukan analisis kesesuaian model dengan membandingkan profil V_s estimasi dengan profil V_s teoritis, kemudian melakukan perhitungan *average relative difference* (R) menggunakan persamaan berikut (Xia dkk., 2000):

$$R = \frac{100}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{|V_{theo_k} - V_{obs_s}|}{V_{theo_k}} \right) \quad (8)$$

Berdasarkan nilai R yang diperoleh dari **persamaan 8** oleh Xia dkk., (2000) mengategorikan nilai R menjadi sangat baik untuk $R < 10\%$, kemudian kategori baik untuk nilai R di rentang $10\% - 20\%$ dan kategori cukup baik jika nilai $R > 20\%$.

2.3 Bagan Alir Penelitian



Gambar 7. Bagan Alir Penelitian