

*Skripsi Geofisika*

**DISTRIBUSI KECEPATAN GELOMBANG GESER RATA-RATA HINGGA  
KEDALAMAN 30 METER (VS30) MENGGUNAKAN METODE  
MIKROTREMOR DI AREA LIKUIFAKSI TANAH, PETOBO, PALU,  
SULAWESI TENGAH**



**OLEH:**

**MUHAMMAD SYAIFULLAH  
H061181310**

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

**2023**

**HALAMAN JUDUL**

**DISTRIBUSI KECEPATAN GELOMBANG GESER RATA-RATA  
HINGGA KEDALAMAN 30 METER ( $V_s30$ ) MENGGUNAKAN METODE  
MIKROTREMOR DI AREA LIKUIFAKSI TANAH, PETOBO, PALU,  
SULAWESI TENGAH**

**SKRIPSI**

*Diajukan Kepada Departemen Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu  
Pengetahuan Alam untuk Memenuhi Sebagian Prasyarat guna Memperoleh  
Gelar Sarjana Sains*

**OLEH:  
MUHAMMAD SYAIFULLAH  
H061181310**

**DEPARTEMEN GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2023**

HALAMAN PENGESAHAN

DISTRIBUSI KECEPATAN GELOMBANG GESER RATA-RATA HINGGA  
KEDALAMAN 30 METER ( $V_s30$ ) MENGGUNAKAN METODE MIKROTREMOR DI  
AREA LIKUIFAKSI TANAH, PETOBO, PALU SULAWESI

Disusun dan Diajukan oleh:

**MUHAMMAD SYAIFULLAH**

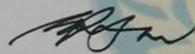
**H061181310**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian Studi Program Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin pada tanggal *24 Januari 2023* dan dinyatakan memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pertama,



**Dr. Erfan, M.Si**  
NIP. 19670903200112100

**Andi Muhamad Pramatiadi, ST., M.Eng., Ph.D.**  
NIP. 198803242022055001

Disetujui,  
Ketua Departemen Geofisika



**Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng**  
NIP. 196709291993031003

## PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Syaifullah

NIM : H061181310

Departemen : Geofisika

Judul Skripsi : DISTRIBUSI KECEPATAN GELOMBANG GESER RATA-RATA HINGGA KEDALAMAN 30 METER ( $V_{s30}$ ) MENGGUNAKAN METODE MIKROTREMOR DI AREA LIKUIFAKSI TANAH, PETOBO, PALU, SULAWESI TENGAH

Menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar hasil karya sendiri dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas Hasanuddin atau Lembaga Penelitian lain kecuali kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang sudah lazim digunakan, karya tulis ini merupakan murni dari gagasan penelitian saya sendiri, kecuali arahan dari Tim Pembimbing dan masukan Tim Penguji.

Makassar, 20 Januari 2023

Yang membuat pernyataan



Muhammad Syaifullah

## ABSTRAK

Kelurahan Petobo, Kota Palu, Sulawesi Tengah merupakan wilayah terdampak likuifaksi tanah akibat bencana gempa bumi pada 28 September 2018, yang dipicu oleh sesar aktif Palu Koro. Dampak dari bencana tersebut menimbulkan kerusakan pada sejumlah bangunan dan menelan banyak korban jiwa. Kerentanan dan fenomena likuifaksi tanah merupakan kajian yang berhubungan dengan kekuatan tanah. Metode geofisika yaitu Mikrotremor dapat dimanfaatkan untuk mengetahui kekuatan tanah melalui kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ), dalam hal ini menganalisis nilai  $V_{s30}$  (kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter) untuk selanjutnya memetakan sebaran nilai  $V_{s30}$  di area penelitian. Hasil rekaman peralatan mikrotremor berupa sinyal dalam domain waktu (dua komponen horizontal dan satu vertikal) selanjutnya dianalisis menggunakan metode HVTFA (*Horizontal to Vertical Time Frequency Analysis*) untuk inversi eliptisitas gelombang Rayleigh dalam rangka memperoleh nilai  $V_s$ , yang kemudian divalidasi dengan nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) yang diperoleh melalui metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Merujuk pada klasifikasi situs, SNI 1726, hasil pengukuran dari 33 titik menggunakan mikrotremor menunjukkan nilai kecepatan gelombang geser pada daerah penelitian diklasifikasikan ke dalam dua tipe tanah, yaitu: tipe tanah D (tanah sedang) dengan nilai  $V_{s30}$  berkisar antara 177.5127 – 327.2934 m/s dan tipe tanah E (tanah lunak) dengan nilai  $V_{s30}$  berkisar antara 163.9426 – 163.6285 m/s. Hasil tersebut bersesuaian dengan nilai frekuensi dominan yang didapatkan. Dari peta sebaran nilai  $V_{s30}$  pada area penelitian menunjukkan bahwa tanah lunak terdapat pada 2 titik pengukuran, yaitu: PTB 18 dan PTB 31, sedangkan 31 titik pengukuran lainnya termasuk ke dalam tipe tanah sedang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi kepada *stakeholder* terkait kondisi tanah bawah permukaan setelah terjadinya likuifaksi dan juga dapat menjadi acuan pemerintah setempat dalam upaya mitigasi bencana pada Kelurahan Petobo, Kota Palu, Sulawesi Tengah.

**Kata kunci:** Petobo, Mikrotremor,  $V_{s30}$ , HVTFA, HVSR, Klasifikasi Situs

## **ABSTRACT**

*Soil liquefaction has devastated Petobo, Palu City, and Central Sulawesi as a consequence of the September 28 earthquake, which was caused by the active Palu Koro fault. The event destroyed several buildings and claimed many lives. A soil strength analysis investigates the likelihood and incidence of soil liquefaction. The geophysical technique, especially microtremor, may be used to estimate soil strength by measuring the value of  $V_{S30}$  (shear wave velocity to a depth of 30 meters) to further study the distribution of  $V_{S30}$  in the search area. The time domain signals recorded by the microtremor equipment (two horizontal and one vertical component) were then analyzed using the HVTFA method for Rayleigh wave ellipticity inversion to obtain the  $V_s$  value, which was then validated with the dominant frequency value ( $f_0$ ) obtained by the HVSR method (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). The shear wave velocity values in the research region are categorized into two kinds of soil, namely soil type D (medium soil) with a  $V_{S30}$  value ranging from 177.5127 to 327.2934 m/s and soil type E (soft soil) with a  $V_{S30}$  value ranging from 163.9426 to 163.6285 m/s. These results are consistent with the dominant frequency values reported. The map of the distribution of  $V_{S30}$  values in the study area shows that soft soil is found at two measurement stations, PTB 18 and PTB 31, and medium soil is found at the other 31 measurement spots. The study results are expected to provide stakeholders with information on the state of the subsurface soil after liquefaction and to serve as a reference for the local government in disaster mitigation initiatives in Petobo Village, Palu City, and Central Sulawesi.*

**Keywords:** *Petobo, Microtremor,  $V_{S30}$ , HVTFA, HVSR, Site Classification*

## KATA PENGANTAR

السَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ

**Alhamdulillahirabbil'amin**, Segala puji bagi Allah SWT, atas segala rahmat dan hidayah yang telah diberikan kepada penulis. Salam dan doa semoga senantiasa tercurahkan kepada panutan seluruh alam baginda Muhammad SAW yang membawa dan membimbing umatnya menuju jalan yang di ridhoi Allah SWT, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul **“Distribusi Kecepatan Gelombang Geser Rata-Rata Hingga Kedalaman 30 Meter (Vs30) Menggunakan Metode Mikrotremor Di Area Likuifaksi Tanah, Petobo, Palu, Sulawesi Tengah”**, sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) Jurusan Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak mungkin terselesaikan tanpa adanya dukungan, bantuan, bimbingan, dan nasehat dari berbagai pihak selama penyusunan skripsi ini. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih setulus-tulusnya kepada:

1. Kedua orangtua penulis, Ayahanda **Ismail** dan Ibunda **Pahira** yang selalu memberikan kasih sayang, doa, nasehat dan kesabarannya yang luar biasa dalam setiap langkah hidup penulis, mereka merupakan anugerah terbesar dalam hidup penulis. Penulis berharap dapat menjadi anak yang dibanggakan. Ibu **Nahira** dan Bapak **Alm.Malia** yang telah merawat penulis terimakasih atas dukungannya juga hingga saat ini dan ucapan terimakasih kepada Saudara

Penulis **Muhammad Ihsan** telah mendukung segala keputusan yang penulis ambil dan selalu mengerti kondisi penulis.

2. Bapak **Dr.Erfan, M.Si** selaku dosen pembimbing utama dan bapak **Andi Muhammad Pramatadie, ST.,M.Eng.,Ph.D** selaku pembimbing pertama. Terimakasih telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, pengarahan, arahan, motivasi,serta dorongan yang sangat berharga bagi penulis mulai penyusunan proposal penelitian hingga perampungan menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak **Muhammad Fawzy Ismullah, S.Si.,MT** dan ibu **Makharani S.Si.,M.Si** selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, koreksi dan arahan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi dengan baik.
4. Bapak **Alm Dr. Paharuddin, M.Si** dan bapak **Dr. Samsu Arif, M.Si** selaku Pembimbing Akademik penulis yang senantiasa memberikan kritik dan masukan selama penulis mengenyam pendidikan di Universitas Hasanuddin. Terima Kasih atas segala harapan dan ilmu yang diberikan, sehingga penulis termotivasi untuk bisa menyelesaikan studi dengan baik.
5. Bapak **Sofian S.Si** selaku Pembimbing Kedua. Terima kasih atas kebaikan hati untuk tidak pernah lelah menanggapi penulis menyelesaikan skripsi ini.
6. Bapak **Hendrik Leopatty S.Si** selaku pembimbing lapangan penulis yang senantiasa memberikan kesempatan untuk melaksanakan tugas akhir dan kerja praktik juga terimakasih atas kebaikan dan pengalaman yang diceritakan selama disana.

7. **Stasiun BMKG Kelas 1 Palu.** Terimakasih atas kesediaanya menerima penulis melaksanakan Kerja Praktik dan Tugas Akhir di tempat ini. Ucapan terimakasih terkhusus kepada **Pak ahmad, kak Marizka dan kak Cholid** yang telah membimbing dan menemani penulis melakukan pengambilan data di lapangan.
8. Bapak dan Ibu para **Staf akademik Departemen Geofisika dan Dekanat FMIPA Unhas.** Ucapan terimakasih yang telah memberikan arahan, membantu penulis pada pengurusan administrasi dan nasihat akademik selama penulis mengenyam pendidikan di Universitas Hasanuddin.
9. **Tim Kerja Praktik dan Tugas Akhir (Andri dan Yusril).** Terimakasih untuk segala bantuan dan dukunganya selama melewati perjalanan yg begitu panjang hingga sampai di titik ini.
10. **Teman-teman Himafi 2018 "Satukan Tekad Taklukkan Waktu",** adalah tempat menuliskan sebagian kisah besar penulis, perjalanan pahit ataupun indah beserta kenangannya, begitupun perasaan damai yang selalu menghargai penulis. Terimakasih saudara tak sedarah yang terjalin hingga saat ini (**Dede, Andri, Hasnan, Rahmat, Agung, Sarwan, Fian, Wawan, Yusuf, Komang, Heral, Uci, Masdar, Yusran, Yansen, Yusril, Azlan, Syahrul, Fauzaan, Anto, Indra, Hadi, Syafaat, Indah, Wilda, Marni, Fya, Irma, Inul, Iis, Aini, Sri, Jihan, Jojo, Wilda, Fhaika, Mute, Nilam, Kiki, Juni, Eve, Ayu, Ocha, Windi, Sheren, Dhea, Yen, Nisa, Ilmi, Dena, Nunu, Vika, Yesi, Geby, Wibu, Feni, Milda, Suci, Risda, Fiskah, Fina, Syana, Uli, Fatim, Sari, Cunni, Yuni, Cica, Hayati, Aqila, Angela, Azmi, dan Aulia**).

11. **Pengurus KMP Unhas** terkhusus **bidang pengaderan dan pendidikan 2019/2020**. Suasana dan keluarga besar disini adalah tempat yang mengingatkan penulis dengan kampung halaman. Ucapan terimakasih adalah kata terbaik untuk bertemu keluarga ini.
12. **Pengurus HMGF FMIPA Unhas** terkhusus kepada **Bidang pengaderan 2020/2021**. Terimakasih dedikasi maksimal dan loyalitas hingga akhir untuk menyelesaikan mandat kepengurusan dengan kerja keras. Terimakasih atas segala upaya kalian selama ini.
13. **Pengurus BEM FMIPA Unhas 2021/2022** khususnya pada **bidang pengaderan**. Merupakan suatu kehormatan menjadi bagian dari cerita kepengurusan ini. Ada begitu banyak yang penulis pelajari semoga kelak semuanya bermanfaat. Terima kasih untuk semua bantuanya.
14. Kanda-kanda dan Adinda **Himafi FMIPA Unhas, HMGF FMIPA Unhas, Himastat FMIPA Unhas, Himbio FMIPA Unhas, Himatika FMIPA Unhas, HMK FMIPA Unhas dan KM FMIPA Unhas**. Terima kasih untuk setiap pelajaran kehidupan yang diberikan, cerita KMF adalah "Takkan Pudar" bagi penulis.
15. **Pengurus SPE Unhas SC 2021/2022** terkhusus divisi **HRD (*Human Resource Development*)**. Terimakasih untuk orang-orang nya, pengalaman, dan pencapaian luar biasa penulis selama menjadi bagian dari keluarga ini.
16. **Pengurus HMGI Wilayah V 2020/2021** terkhusus **divisi Internal**. Terimakasih atas rumah kecil yang memberikan arti besar bagi hidup penulis. Terimakasih untuk segala kerja kerasnya kawan.

17. **Teman posko KKN 107 Galesong Selatan** khususnya kepada teman dari **posko Sawakong squad**. Terimakasih untuk momen selama kurang lebih 1 bulan. Belajar banyak banyak tentang arti kebaikan, ketulusan, keikhlasan, kebersamaan ,dan kedewasaanya juga dalam berpikir.
18. **Tim Kampus Mengajar III SD Inpres Rappojawa**, Terimakasih pengalaman yang luar biasa, kembali ke sekolah dengan status yang berbeda adalah hal yang sangat sulit terjadi lagi.
19. Semua pihak yang tidak mampu penulis sebutkan satu persatu, yang telah banyak memberi bantuan dan kemudahan dalam proses penulisan ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini sangat jauh dari kesempurnaan dikarenakan keterbatasan kemampuan yang dimiliki oleh penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan berbagai kritik dan saran yang bersifat membangun demi kebaikan skripsi ini dan tentunya juga untuk kebaikan penulis sendiri. Akhir kata semoga Allah SWT memberi segala kebaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuanya baik secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna terutama bagi penulis dan pihak-pihak terkait pada umumnya. Semoga Allah SWT senantiasa melimpahkan Rahmat dan Hidayah-Nya, Amin.

***Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh***

Makassar, 19 Januari 2023  
Penulis,

(Muhammad Syaifullah)

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xvi</b>
<b>BAB I.....</b>	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	5
I.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	6
I.4 Tujuan Penelitian .....	6
<b>BAB II .....</b>	<b>7</b>
II.1 Geologi Regional dan Tektonik Wilayah Penelitian .....	7
II.2 Stratigrafi Wilayah Penelitian .....	9
II.3 Gelombang Seismik.....	10
II.3 Gempa Bumi.....	15
II.4 Likuifaksi Tanah.....	16
II.5 Mikrotremor .....	18

II.6 Mikrozonasi Mikrotremor .....	20
II. 7 Karakterisasi Site Berdasarkan Parameter HVSR ( <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> ).....	21
II. 8 Metode HVTFA ( <i>Horizontal to Vertical Time Frequency Analysis</i> ) .....	22
II.9 Kecepatan Gelombang Geser Rata-rata Hingga Kedalaman 30 m ( $V_{s30}$ ).....	28
II.10 Penelitian Terdahulu.....	30
<b>BAB III.....</b>	<b>32</b>
III. 1 Lokasi dan Waktu Penelitian .....	32
II.2 Alat dan Bahan .....	33
III.3 Prosedur Penelitian.....	37
III.4 Bagan Alir Penelitian .....	41
<b>BAB IV .....</b>	<b>42</b>
IV.1 Analisis Data.....	42
IV.2 Korelasi Nilai VS Antar Titik .....	45
IV.3 Nilai Kecepatan Gelombang Geser Rata-rata Hingga Kedalaman 30 m ( $V_{s30}$ ).....	52
IV.4 Sebaran nilai Kecepatan Gelombang Geser Rata-rata Hingga Kedalaman 30 m ( $V_{s30}$ ) .....	55
<b>BAB V.....</b>	<b>59</b>
V.1 Kesimpulan.....	59
V.2 Saran.....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>61</b>
<b><u>LAMPIRAN.....</u></b>	<b><u>68</u></b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Sebaran batuan penyusun wilayah Lembah Palu (Thein et al., 2014).....	9
<b>Gambar 2. 2</b>	Gelombang Badan dan Gelombang Permukaan (Arintalofa et al., 2020) ...	11
<b>Gambar 2. 3</b>	Gerak gelombang primer (P) (Elnashai & Sarno, 2008).....	12
<b>Gambar 2. 4</b>	Ilustrasi gerak gelombang Sekunder (S) (Elnashai & Sarno, 2008).....	13
<b>Gambar 2. 5</b>	Gelombang Rayleigh (Elnashai & Sarno, 2008).....	14
<b>Gambar 2. 6</b>	Gelombang Love (Elnashai & Sarno, 2008).....	15
<b>Gambar 2. 7</b>	Peta zona kerentanan likuifaksi di Indonesia (Buana et al., 2019).....	18
<b>Gambar 2. 8</b>	Sinyal perekam mikrotremor pada site PTB_01.....	19
<b>Gambar 2. 9</b>	Kurva HVSR yang memberikan informasi nilai frekuensi dominan (F0) dan nilai faktor amplifikasi .....	21
<b>Gambar 2. 10</b>	Tampilan Geopsy parameter HVTFa dan sinyal (Fäh et al., 2009) .....	24
<b>Gambar 2. 11</b>	Hasil Inversi kurva Elapstisitas (Jerez et al., 2019).....	28
<b>Gambar 3. 1</b>	Peta lokasi penelitian .....	32
<b>Gambar 3. 2</b>	<i>Digital Portable Seismograph</i> .....	34
<b>Gambar 3. 3</b>	Seismometer tipe DS-4A.....	34
<b>Gambar 3. 4</b>	GPS.....	34
<b>Gambar 3. 5</b>	GPS Garmin Monterra.....	34
<b>Gambar 3. 6</b>	Kabel Penghubung <i>digitizer</i> ke seismometer.....	34
<b>Gambar 3. 7</b>	Kabel Penghubung <i>digitizer</i> ke laptop .....	35
<b>Gambar 3. 8</b>	Kompas Geologi.....	35
<b>Gambar 3. 9</b>	Laptop.....	35
<b>Gambar 3. 10</b>	Patok Besi .....	35
<b>Gambar 3. 11</b>	Lembar Akuisisi .....	36
<b>Gambar 4. 1</b>	Data sinyal rekaman mikrotremor pada site PTB_01 .....	42
<b>Gambar 4. 2</b>	Kurva eliptisitas observasi dan kurva eliptisitas model fundamental .....	44
<b>Gambar 4. 3</b>	<i>Ground profile</i> hasil inversi kurva eliptisitas dengan misfit terkecil pada site PTB_13 .....	45
<b>Gambar 4. 4</b>	Tampilan Line pada peta lokasi penelitian .....	46
<b>Gambar 4. 5</b>	Hubungan Vs dan Frekuensi Dominan antar titik di Line 1 .....	47
<b>Gambar 4. 6</b>	Hubungan Vs dan frekuensi Dominan antar titik di Line 2 .....	48
<b>Gambar 4. 7</b>	Hubungan Vs dan Frekuensi Dominan antar titik di Line 3.....	49
<b>Gambar 4. 8</b>	Hubungan Vs dan Frekuensi Dominan antar titik di Line 4.....	50

**Gambar 4. 9** Hubungan Vs dan Frekuensi Dominan antar titik di Line 5 .....51  
**Gambar 4. 10** Peta sebaran nilai Vs30 Kelurahan Petobo, Kota Palu Sulawesi Tengah 55

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Parameter Vs30 berdasarkan penyelidikan oleh laboratorium SNI 1726, Badan Standarisasi Nasional (Sunardi et al., 2018).....	29
<b>Tabel 4. 1</b> Nilai Vs30 pada masing-masing akuisis lapangan .....	53
<b>Tabel 4. 2</b> Klasifikasi nilai Vs30 hasil inversi kurva eliptisitas .....	54

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **I.1 Latar Belakang**

Menurut UNISDR (*United Nations International Strategy for Disaster Reduction*) sebuah badan PBB untuk Strategi Internasional Pengurangan Risiko Bencana. Indonesia ditetapkan sebagai negara yang paling rawan bencana alam di dunia. Berbagai bencana alam mulai gempa bumi, tsunami, letusan gunung berapi, banjir dantanah longsor rawan terjadi di Indonesia. Bahkan untuk beberapa jenis bencana alam, Indonesia menduduki peringkat pertama dalam paparan terhadap penduduk atau jumlah manusia yang menjadi korban meninggal akibat bencana alam. Inilah yang menjadikan Indonesia sebagai negara dengan resiko dan dampak bencana alam tertinggi di dunia (Madjid, 2018). Sementara itu, sepanjang 1 Januari hingga 26 Agustus 2022 Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mencatat, total 1.902 bencana alam telah melanda Indonesia. Salah satu bencana alam yang paling sering terjadi di Indonesia adalah gempa bumi. Badan Metereologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) mengungkapkan bahwa setiap hari Indonesia diguncang gempa, baik skala kecil hingga besar. Banyaknya gempa yang terjadi diakibatkan tatanan geologi Indonesia yang berada dalam pertemuan lempeng dunia yang sangat aktif bergerak yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Indo-Australia serta satu Lempeng Mikro Filipina. Oleh karena itu, wilayah Indonesia baik di darat maupun dilaut sangatlah rawan terhadap bencana alam seperti gempa-gempa tektonik sampai tsunami (Patya et al., 2018)

Kota Palu, ibu kota Provinsi Sulawesi Tengah merupakan salah satu daerah rawan

gempa di Indonesia. Wilayah Sulawesi Tengah telah mengalami 22 kali kejadian gempa bumi merusak sejak tahun 1910 hingga 2018 (Purnama, 2019). Wilayah Sulawesi Tengah terletak dekat dengan sumber gempa bumi yang berada di darat dan di laut. Sumber gempa bumi di laut berasal dari penunjaman zona subduksi di Sulawesi Utara, sedangkan sumber gempa bumi di darat bersumber dari beberapa Sesar aktif di daratan Sulawesi Tengah, salah satunya adalah Sesar Palu Koro (Nurdin et al., 2022). Hal ini membuat daerah Sulawesi Tengah, terutama di area Sesar Palu Koro memiliki resiko tinggi terhadap gempa dan bencana-bencana alam lain yang berhubungan dengan gempa seperti tsunami dan likuifaksi (Maulana & Prasetyo, 2019).

Gempa bumi berkekuatan Mw 7,4 dengan jarak 26 km Utara Donggala pada kedalaman 10 km terjadi pada 28 September 2018. Gempa tersebut berdampak besar bagi Kota Palu yang memicu tsunami dan likuifaksi (Badan Geologi, 2018). Kerusakan–kerusakan yang timbul akibat gempa bumi diantaranya kerusakan pada bangunan di atas tanah dan kerusakan lingkungan fisik pada permukaan dalam tanah yang menjadi jenuh sehingga mengalami likuifaksi. Likuifaksi merupakan salah satu bahaya yang ditimbulkan dari gempa bumi, berupa fenomena hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran gempa bumi terutama pada tanah berpasir. Bencana likuifaksi yang terjadi di Kota Palu khususnya kelurahan di Petobo merugikan masyarakat secara fisik dan sangat krusial dampaknya baik dari segi infrastruktur, sarana publik maupun hilangnya permukiman warga setempat (Kustiana et al., 2020). Bencana likuifaksi sebenarnya telah pernah diantisipasi Widyaningrum (2012) dalam penyelidikan potensi likuifaksi di kawasan ini.

Kelurahan Petobo terdiri dari lapisan tanah berpasir, mempunyai muka air tanah dangkal < 12 m serta berpotensi terhadap terjadinya likuifaksi.

Potensi likuifaksi di suatu wilayah umumnya dapat diidentifikasi dan dianalisa. Desain struktur bangunan hendaknya memperhatikan sifat dinamis dan kondisi lokal tanah. Sehingga diperlukan adanya rencana mitigasi untuk meminimalkan kerugian akibat gempa bumi. Sebagai upaya mitigasi bencana pasca liquifaksi, mikrozonasi seismik atau pembuatan peta bahaya seismik lokal sangat diperlukan dalam meminimalisir kerusakan di wilayah dengan potensi resiko gempa bumi. Proses perencanaan bangunan tahan gempa sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi lapisan batuan serta lokasi yang menjadi pusat untuk mendirikan bangunan. Menurut Wibowo et al. (2018) suatu wilayah dengan kondisi geologi yang sama dapat memiliki respon yang berbeda terhadap efek getaran tanah. Hal ini bergantung pada karakteristik lapisan batuan penyusun formasi di wilayah itu. Ditinjau dari formasi batuan penyusun wilayah KotaPalu dan sekitarnya didominasi satuan litologi aluvium dengan komposisi tanah penyusun berupa tanah berpasir yang jenuh air (Badan Geologi, 2018). Nurrahmi et al. (2015) menyebutkan litologi yang lebih lunak mempunyai resiko yang lebih tinggi terhadap guncangan gempa bumi, karena akan mengalami penguatan (amplifikasi) gelombang yang lebih besar dibandingkan dengan batuan yang lebih keras atau padat. Penentuan pembesaran gelombang dapat ditentukan melalui klasifikasi jenis batuan berdasarkan data batuan pada kedalaman hingga 30 m dan lapisan-lapisan batuan hingga kedalaman 30 m menggunakan nilai  $V_s 30$  (Kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter).

Sebagaimana diungkapkan oleh Roser dan Gosar (2010), nilai  $V_{S30}$  dapat dipergunakan dalam penentuan standar bangunan tahan gempa. Hal ini merupakan tahap dasar yang diperlukan untuk mengurangi resiko bencana gempa bumi, yang kiranya menjadi tinjauan Pemerintah Daerah dalam mengatur tata ruang wilayah pembangunan yang dapat dilakukan kedepannya. Penerapan  $V_{S30}$  lainnya telah dilakukan oleh Hendra et al (2019) dalam menentukan karakteristik lapisan bawah permukaan menggunakan variasi kecepatan rambat gelombang melalui metode mikrotremor. Penelitian tersebut dilakukan di Kecamatan Palu Selatan, Kecamatan Palu Barat dan Kecamatan Palu Timur dengan merekam penjalaran gelombang yang terjadi di bawah permukaan. Dalam pernyataannya daerah penelitian mendominasi jenis tanah lunak dengan nilai  $V_{S30}$  215 dan 0-37,4 m/s sehingga mudah mengalami kerusakan ketika gempa terjadi.

Pendekatan dalam menentukan struktur bawah permukaan pada suatu wilayah telah banyak dilakukan menggunakan metode geofisika. Pengukuran gelombang seismik non-destruktif adalah salah satu metode geofisika yang murah, tidak memakan waktu lama, namun dapat memperoleh hasil yang akurat. Dua di antaranya menggunakan pengukuran mikrotremor sebagai metode pasif dan metode *Multichannel Analysis of Surface Waves*(MASW) sebagai metode aktif. Setiap metode memiliki kelemahannya. Mikrotremor tidak dapat digunakan dengan baik untuk mengarakterisasi tanah permukaan karena data yang diperoleh berupa gelombang alami bumi sehingga rentan terpengaruh oleh *noise* atau gelombang pada permukaan yang tidak diinginkan, seperti angin dangelombang laut ataupun aktivitas manusia seperti mesin pabrik, lalu lintas dan sebagainya. Sementara itu,

MASW tidak dapat digunakan dengan baik untuk mengarakterisasi tanah yang relatif dalam karena keterbatasan penetrasi. Mikrotremor ataupun MASW jika dibandingkan pada proses akuisisi terdapat perbedaan signifikan. Mikrotremor dapat dilakukan di wilayah padat penduduk karena akuisisinya mudah dilakukan tanpa memerlukan area lapang seperti dalam akuisisi data metode MASW. Selain itu dari segi tenaga dan waktu sangat diuntungkan dikarenakan cukup merekam getaran alamibawah permukaan tanpa memerlukan sumber aktif dibandingkan metode geofisika lainnya. Berbeda dengan survei MASW yang memerlukan persiapan lama dalam hal akuisisinya karena perlu pemasangan susunan *geophone* dan perekaman sumber yang berulang. Berdasarkan hal ini, pengukuran mikrotremor sangat efisien digunakan dalam penelitian ini.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini perlu dilakukan untuk menentukan parameter mikrozonasi dan mengidentifikasi lokasi yang dianggap rentan terhadap bencana gempa pasca likuifaksi khususnya di kelurahan Petobo Kota Palu, Sulawesi Tengah. Hasil penelitian diharapkan menjadi salah satu upaya mitigasi yang dapat dilakukan untuk mengurangi resiko kerusakan yang diakibatkan oleh gempa bumi.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana profil nilai Kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ) di area terlikuifaksi Petobo?

2. Bagaimana sebaran nilai Kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter ( $V_{S30}$ ) di area terlikuifaksi Petobo?

### **I.3 Ruang Lingkup Penelitian**

Penelitian ini dibatasi pada penggunaan metode mikrotremor menggunakan data primer yang meliputi akuisisi data, processing dan interpretasi data. Penelitian ini ditekankan pada analisis inversi kurva eliptisitas dengan metode HVTFA untuk memperoleh profil  $V_s$  yang nantinya digunakan untuk mengetahui sebaran nilai  $V_{S30}$  berupa peta di daerah penelitian. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi kepada masyarakat terkait kondisi tanah bawah permukaan pasca terjadinya likuifaksi juga sebagai acuan pemerintah setempat dalam upaya mitigasi bencana seperti pembangunan infrastruktur dan penetapan daerah layak huni di Kelurahan Petobo, Kota Palu, Sulawesi Tengah. Selain itu akademisi maupun instansi dapat menjadikan penelitian ini sebagai literatur pendukung dalam memulai dan mengembangkan penelitiannya.

### **I.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan dan menganalisis nilai  $V_{S30}$  (Kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter) di area terlikuifaksi Petobo.
2. Membuat peta sebaran nilai  $V_{S30}$  (Kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 meter) di area terlikuifaksi Petobo.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **II.1 Geologi Regional dan Tektonik Wilayah Penelitian**

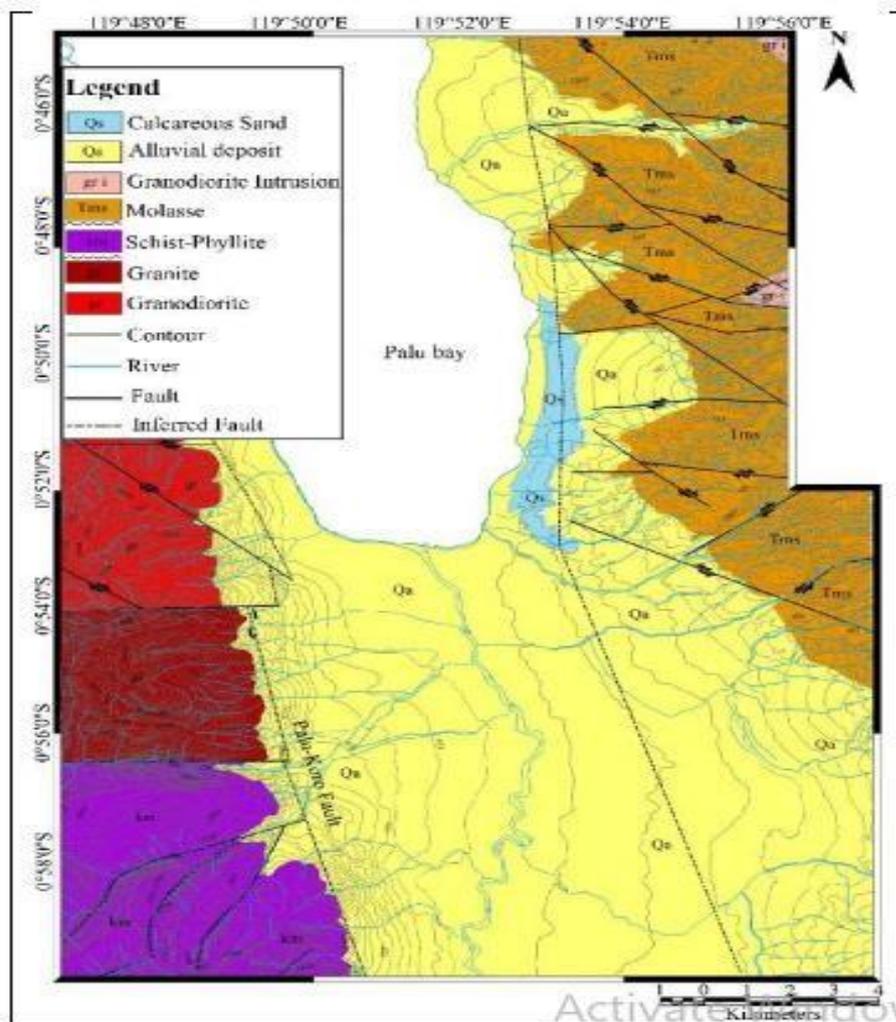
Secara tektonik, struktur dan sejarah perkembangannya, Pulau Sulawesi dibagi dalam empat mintakat geologi yaitu Busur Vulkanik Sulawesi Barat, kontinental kerak Banggai Sula, oseanik kerak Sulawesi Timur dan kompleks metamorf Sulawesi Tengah. Keempat mintakat tersebut dipisahkan oleh batas-batas tektonik yang saling mempengaruhi satu sama lain (Kaharuddin et al., 2011). Berdasarkan hasil relokasi gempa regional di wilayah Sulawesi Tengah dan sekitarnya menunjukkan seismisitas yang tinggi di sekitar sesar Palu Koro dan Matano dengan kedalaman 3-28 km. Gempa terbanyak terjadi di tengah sesar Palu Koro atau di wilayah Kota Palu. Sesar Palu Koro merupakan struktur utama Pulau Sulawesi serta merupakan sesar terpanjang yang ada di Pulau Sulawesi yang memanjang dari Sulawesi bagian tengah hingga Selat Karimata. Hal ini menyebabkan Kota Palu dikenal sebagai salah satu daerah rawan gempa di Indonesia. Sesar Palu Koro merupakan akibat dari peristiwa benturan ketiga lempeng tektonik, Struktur geologi daerah ini terdiri dari perlapisan, kekar, lipatan minor dan sesar (Badan Geologi, 2018).

Kelurahan Petobo secara administratif terletak di wilayah Kecamatan Palu Selatan, Kota Palu Sulawesi Tengah yang memiliki luas wilayah 10,40 Km<sup>2</sup> /1.040 Ha, dan termasuk kelurahan yang terluas di Kota Palu (Kustiana et al., 2020). Morfologi awal Petobo merupakan daerah landaian dengan kemiringan lereng 3° – 4° di sekitar bagian hulu saluran irigasi dan semakin landai ke arah hilir sekitar 2° – 3°. Litologi

pada bagian hulu diperkirakan merupakan endapan aluvial yang belum padu dan mudah dihancurkan dengan tangan biasa. Endapan ini tersusun atas perselingan antara kerakal pasiran, pasir lanauan, dan pasir kerikilan sedangkan pada bagian atas berupa lanau pasiran. Dilansir dari kajian Tim Pusat Studi Gempa Nasional, (2018), Kota Palu terletak di Teluk Palu dilihat dari kenampakan peta topografi, dibagi menjadi tiga satuan morfologi, yaitu: satuan dataran, perbukitan, dan perbukitan terjal. Berdasarkan Peta Geologi Lembar Palu, Peta Geologi Lembar Pasangkayu dan Peta Geologi Lembar Poso. Geologi regional daerah Palu dan sekitarnya didominasi oleh endapan kuartar yang terdiri atas endapan fluvial dan alluvium.

Berdasarkan Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi Skala 1:250.000 daerah penelitian dan sekitarnya terdiri dari 2 formasi batuan, yaitu (Alluvium dan endapan pantai) yang terdiri dari kerikil, pasir, lumpur dan batu gamping koral. Alluvium ini merupakan satuan yang paling muda umurnya yang terbentuk sebagai hasil rombakan dari wilayah perbukitan yang membatasinya serta (Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms)) yang terdiri dari Konglomerat, batu lumpur dan batu gamping. Wilayah Kota Palu dan sekitarnya merupakan suatu wilayah dataran aluvial yang memanjang berarah relatif utara-selatan dan dibatasi oleh lereng dan punggung di kedua sisi lembah yang di tengah-tengah lembahnya mengalir Sungai Salo Palu. Dataran ini didominasi satuan litologi alluvium berumur Holosen yang terdiri dari lumpur, lempung, pasir, kerikil dan kerakal, secara jelas dapat dilihat pada Gambar 2.1 (Badan Geologi, 2018). Topografi wilayah Palu dan sekitarnya berada pada suatu lembah dengan ketinggian sampai dengan 500 m di

atas permukaan laut. Wilayah bagian barat yang lebih tinggi memiliki potensi rawan terhadap keruntuhan lereng. Sedangkan bagian yang merupakan pesisir pantai dan pinggir sungai Palu juga rawan terhadap bencana likuifaksi dan tsunami (LE et al., 2019).



**Gambar 2. 1** Sebaran batuan penyusun wilayah Lembah Palu (Thein et al., 2014).

## II.2 Stratigrafi Wilayah Penelitian

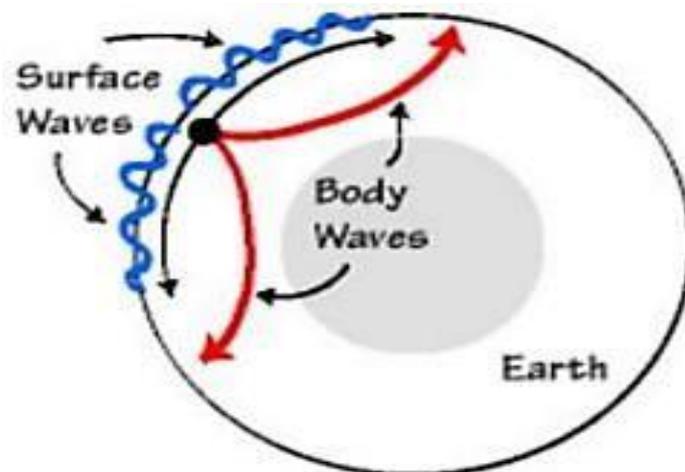
Dalam penyelidikan Widyaningrum (2012), Tatanan stratigrafi kota Palu disusun oleh tiga kelompok batuan yaitu: batuan Pra Tersier, Tersier dan Batuan Kuartar. Kelompok batuan Pra Tersier berupa batuan sedimen laut dan batuan metamorf

yang keduanya diterobos oleh kelompok batuan yang berumur Tersier yaitu batuan granit dan granodiorit, kelompok batuan Kuartar terdiri dari beberapa endapan, yaitu: endapan rombakan, endapan sungai, endapan limbah banjir, endapan alur sungai purba serta endapan kipas aluvium. Endapan pantai yang dapat berupa pasir pantai dan fragmen batuan banyak dijumpai di sekeliling teluk Palu. Secara geografis dataran Kota Palu terbentuk karena adanya proses pengangkatan (*graben*). Proses graben dapat membuat beberapa permukaan tanah terangkat cukup tinggi (membentuk bukit sampai pegunungan) seperti yang terlihat di sepanjang pantai Teluk Palu bagian barat. Wilayah Kota Palu dicirikan oleh bentuk utama berupa lembah (*graben*) dimana pusat Kota terletak di bagian tengah dari lembah tersebut. Orientasi lembah ini mengikuti arah utama jalur pegunungan di kedua sisinya, yaitu berarah relatif utara-selatan. Batuan tertua di daerah ini terdiri dari serpih, batu pasir, batu pasir malihan, filit dan batu sabak berumur Pra Tersier. Adapun batuan Tersier dijumpai berupa batuan Tersier yang terdiri dari konglomerat, batupasir dan batu lempung yang berumur Paleosen-Oligosen. Batuan pada skala waktu geologi Miosen-Pliosen, menerobos batuan tua tersebut berupa Granit dan Diorit (Badan Geologi, 2018).

### **II.3 Gelombang Seismik**

Gelombang seismik adalah gelombang elastik yang merambat dalam bumi. Gelombang ini bergantung pada sifat elastisitas dan medium dalam penjalarnya untuk merambat, Oleh karena itu adanya pergerakan dan gaya pada bumi menyebabkan batuan mengalami deformasi (Mojo et al., 2018). Bumi sebagai medium gelombang terdiri dari beberapa lapisan batuan yang antar satu lapisan

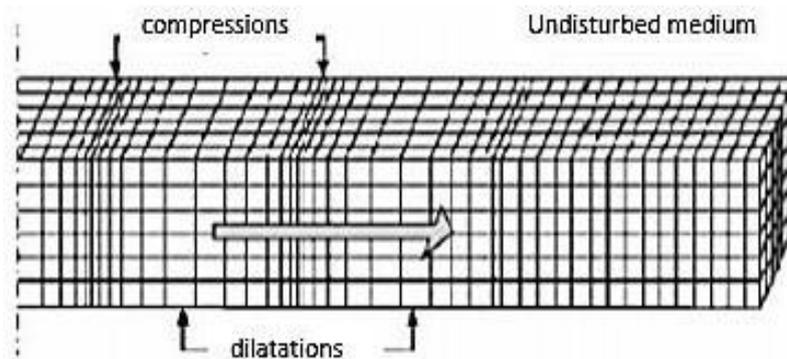
dengan lapisan lainnya mempunyai sifat fisis yang berbeda. Ketidak-kontinuan sifat medium ini menyebabkan gelombang seismik yang merambatkan sebagian energinya dan akan dipantulkan serta sebagian energi lainnya akan diteruskan ke medium di bawahnya (Hudha et al., 2014). Metode aktif dan metode pasif merupakan gelombang yang dapat ditimbulkan oleh gelombang seismik. Metode aktif adalah metode pembangkitan gelombang seismik secara aktif atau disengaja menggunakan gangguan yang dibuat oleh manusia, biasanya digunakan untuk eksplorasi. Metode pasif adalah pembangkitan gelombang akibat gangguan yang terjadi secara alamiah, contohnya gempa (Nausil et al., 2015). Gelombang seismik merupakan gelombang elastis di mana dalam penjalarnya diklasifikasikan menjadi dua kelompok, yakni gelombang badan dan gelombang permukaan (Kiswiranti, 2019). Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 gelombang badan menjalar di dalam bumi sedangkan gelombang permukaan menjalar di permukaan bumi (Arintalofa et al., 2020).



**Gambar 2. 2** Gelombang Badan & Gelombang Permukaan (Arintalofa et al., 2020).

### II.2.1 Gelombang Badan (*Body Wave*)

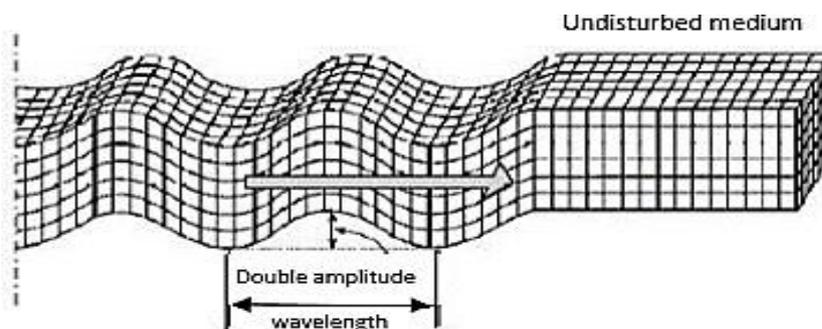
Gelombang Badan (*body wave*) merupakan gelombang yang menjalar di dalam bumi yang arah penjarannya ke segala arah sehingga disebut *free wave*. Gelombang badan ini terdiri atas gelombang primer (P) dan gelombang sekunder (S). Gelombang primer merupakan gelombang longitudinal atau gelombang kompresional, gerakan partikelnya sejajar dengan arah perambatannya. Gelombang kompresional disebut gelombang primer (P) karena kecepatannya paling tinggi diantara gelombang yang lain dan tiba pertama kali (Hamimu et al., 2017). Gelombang P mempunyai laju hingga 14 km/s melalui padatan, cairan dan gas. Karena bergerak lebih cepat dari pada gelombang S, gelombang P merupakan yang pertama tiba pada detektor gempa sehingga disebut Primer (Bormann et al., 2002). Ilustrasi gerak gelombang P dapat dilihat pada gambar 2.3.



**Gambar 2. 3** Gerak gelombang primer (P) (Elnashai & Sarno, 2008)

Gelombang shear disebut gelombang sekunder (S) karena tiba kedua setelah gelombang P. Gelombang sekunder terdiri dari dua komponen, yaitu gelombang SH dengan gerakan partikel horizontal dan gelombang SV dengan gerakan partikel vertikal (Hamimu et al., 2017). Gelombang *shear* menjalar dengan laju 3.5 km/s.

Gelombang ini memiliki kecepatan 60% lebih lambat dari gelombang P dan hanya dapat menjalar melalui padatan karena cairan dan gas tidak dapat menampung tegangan geser (Bormann et al., 2002). Ilustrasi gerak gelombang S dapat dilihat pada gambar 2.4.



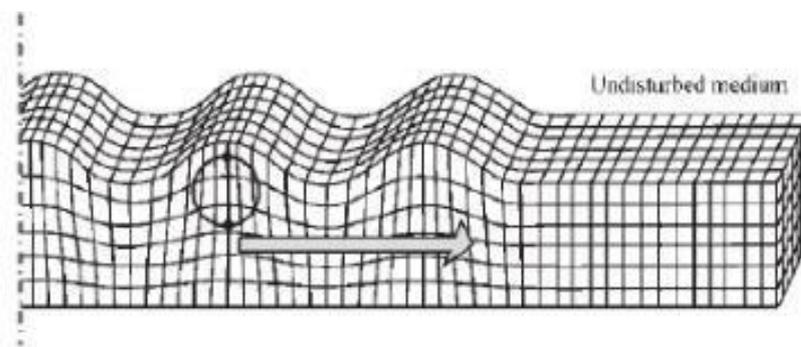
**Gambar 2. 4** Ilustrasi gerak gelombang Sekunder (S) (Elnashai & Sarno, 2008).

## II.2.2 Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang permukaan adalah gelombang seismik yang merambat di permukaan bumi tanpa adanya penyebaran energi ke dalam interior bumi. Amplitudo gelombang ini akan semakin melemah jika menjalar masuk kedalam inti bumi dan kebanyakan energi merambat pada daerah dangkal (Ariestianty et al., 2009). Gelombang permukaan menjalar lebih pelan dari gelombang badan, tapi kerusakan yang ditimbulkan lebih besar. Gelombang permukaan dibagi menjadi dua, yaitu gelombang Rayleigh dan gelombang Love (Hamimu et al., 2017).

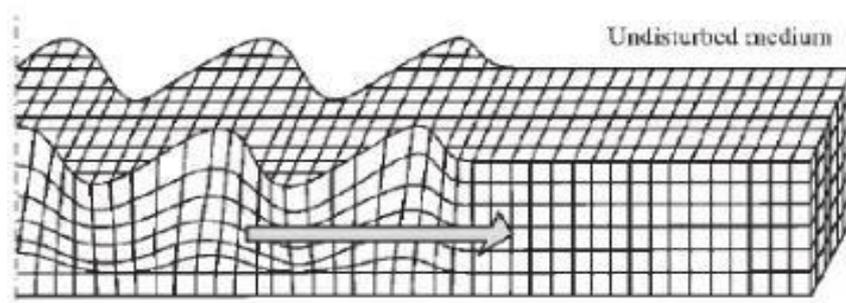
Gelombang Rayleigh adalah gelombang yang menjalar di permukaan bumi dengan pergerakan partikelnya menyerupai elips. Karena menjalar di permukaan, amplitudo gelombang Rayleigh akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman. Di dalam rekaman seismik, gelombang Rayleigh dicirikan dengan amplitude besar

dan frekuensi rendah. Gelombang Rayleigh memiliki kecepatan 2 – 4,2 km/s di dalam bumi. Arah rambatnya tegak lurus terhadap getaran dan searah bidang datar (Braile, 2006). Dikarenakan gelombang permukaan, maka sumber yang lebih dekat ke permukaan akan menimbulkan gelombang Rayleigh yang lebih kuat dibandingkan sumber yang terletak di dalam bumi (Lay & Wallace, 1995). Gelombang Rayleigh seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 merupakan gelombang permukaan yang gerakan partikel medianya merupakan kombinasi gerakan partikel yang disebabkan oleh gelombang P dan gelombang S. Dengan dispersif periode yang lebih panjang sehingga lebih cepat mencapai material yang lebih dalam dibandingkan dengan gelombang yang memiliki periode lebih pendek. Hal ini menjadikan gelombang Rayleigh sebagai alat yang sesuai menentukan struktur bawah tanah di suatu area (Syamsuddin & Assegaf, 2021). Penelitian ini menggunakan gelombang permukaan (dalam hal ini gelombang Rayleigh) untuk mendapatkan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) terhadap kedalaman. Valeria et al (2019) mengemukakan bahwa nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) dapat digunakan untuk mengetahui sifat struktur bawah permukaan, misalnya sebaran jenis batuan.



**Gambar 2. 5** Gelombang Rayleigh (Elnshasi & Sarno, 2008)

Merupakan gelombang permukaan yang menjalar dalam bentuk gelombang transversal yang merupakan gelombang S horizontal yang penjarannya parallel dengan permukaannya (Gadallah & Fisher, 2009)



**Gambar 2. 6** Gelombang Love (Elnashai & Sarno, 2008)

### **II.3 Gempa Bumi**

Gempa bumi adalah peristiwa bergetar atau bergoncangnya bumi karena pergerakan/pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Pergerakan tiba-tiba dari lapisan batuan di dalam bumi menghasilkan energi yang menyebar ke segala arah berupa gelombang seismik. Ketika gelombang ini mencapai permukaan bumi, getarannya dapat merusak segala sesuatu di permukaan bumi. Gempa bumi yang mempunyai pengaruh yang sangat besar adalah gempa tektonik. Hal yang perlu diketahui adalah besarnya frekuensi yang terjadi, energi yang dibebaskan dan luas pengaruhnya terhadap pergerakan lempeng tektonik. Gempa tektonik dapat menimbulkan pergeseran sepanjang bidang sesar dengan kisaran 1-10 m dan umumnya 0,2-0,8 m (Hidayat & Santoso, 1997).

Sulawesi tengah khususnya Kota Palu terletak pada kompleks zona sesar pertemuan lempeng Pasifik, Indo-Australia dan lempeng Eurasia. Dari perhitungan terhadap

pergerakan patahan Palu Koro diperoleh data kisaran pergerakan lempeng, yaitu  $35 \pm 8$  mm/tahun. Sejarah gempa bumi di bagian tengah Sulawesi telah tercatat sejak abad ke-19, diantaranya tahun 1968: 6,7 SR, 1993: 5,8 SR dan 2005 6,2:SR (Sunarjo et al., 2012). Pada 14 Agustus 1968 terjadi gempa bumi berkekuatan Mw 7,4 yang menghasilkan tsunami besar dan menenggelamkan Pulau Tuguan. Pada tahun 2012 juga terjadi gempa yang menimbulkan efek kerusakan tinggi. Kejadian tsunami pun terulang pada gempa Palu 28 September 2018 dengan Magnitudo 7.4, hingga memicu terjadinya likuifaksi (LE et al., 2019).

Menurut klasifikasi zona gempa Indonesia, gempa yang terjadi di wilayah Palu termasuk dalam tipe zona perubahan (*transform zone*) yaitu gempa yang diakibatkan karena dua lempeng tektonik bergerak saling menggeser satu sama lain (*slide each other*), sejajar namun berlawanan arah. Keduanya tidak saling memberai maupun saling menumpu. Gempa yang terjadi pada zona ini merupakan gempa pada kerak dangkal (*shallow crustal earthquakes*) yang diakibatkan oleh Sesar Palu Koro dan Sesar Matano. Tingkat resiko gempa bumi yang tinggi di kota Palu ini selain karena berdekatan dengan sesar aktif Palu Koro, juga karena sebagian kotanya terletak di atas sesar Palu Koro (Sunarjo et al., 2012).

#### **II.4 Likuifaksi Tanah**

Likuifaksi adalah sebuah peristiwa perubahan kondisi tanah dari keadaan padat (*solid*) menjadi cairan (*liquid*). Likuifaksi sering dijumpai pada kejadian gempa bumi dimanagetaran gempa yang merambat pada deposit tanah dalam waktu yang singkat mengakibatkan massa tanah mengalami transisi dari keadaan padat menjadi

keadaan cair (Hakam, 2020). Fenomena likuifaksi ini hanya terjadi pada wilayah yang struktur tanahnya bersifat jenuh, yang sebelumnya terjadi gempa bumi disertai guncangan yang sangat dahsyat, maka wilayah yang struktur tanahnya berpasir akan mengalami fenomena likuifaksi. Ini dikarenakan sifat tanah yang sangat baik dalam mengalirkan air di dalam lapisan sehingga mengakibatkan lapisan tersebut menjadi jenuh dan akhirnya amblas ke bawah, hal itu dapat terjadi karena sebelumnya di wilayah itu terjadi gempa bumi karena adanya gelombang seismik yang dihasilkan dari gempa yang dapat merusak struktur lapisan suatu tanah (Housner, 1985).

Pada saat mengalami getaran, air pori memberikan suatu tekanan di partikel-partikel tanah sehingga mempengaruhi kepadatan dari tanah tersebut. Sebelum terjadinya gempa bumi, tekanan air pada suatu tanah relatif rendah. Namun setelah menerima getaran, tekanan air dalam tanah meningkat, sehingga dapat menggerakkan partikel-partikel tanah dengan mudah. Setelah digerakkan oleh air, maka partikel tanah tidak memiliki lagi kekuatan atau daya dukung, sehingga daya dukung tanah sepenuhnya berasal dari tegangan air pori (Minaet al., 2018). Menurut Zhang (2019) ada beberapa faktor yang menjadi penyebab terjadinya peristiwa likuifaksi:

- Faktor internal, terdapat dua faktor yaitu karakteristik tanah dan karakteristik air. Pada karakteristik tanah, kepadatan tanah kurang dari 70% maka akan terjadi likuiditas (pelunakan), tetapi semakin tebal permukaan tanah maka akan semakin sulit mencapai pelunakan, maka diperlukan lebih banyak tekanan air untuk mencapai pelunakan sedangkan karakteristik air, semakin baik kemampuan tanah, maka semakin sulit terjadi likuiditas. Permukaan air tanah

juga memengaruhi peristiwa likuiditas.

- Faktor eksternal, berasal dari gempa bumi, yaitu getaran gelombang, bahwa tidak semua getaran gempa bumi dapat mengakibatkan peristiwa likuifaksi, pelunakan akan terjadi jika faktor internal lebih besar yaitu semakin besar beban siklik dan semakin panjang durasi dari getarannya, maka tanah akan berada pada titik jenuh dan akan segera terjadi likuifaksi.



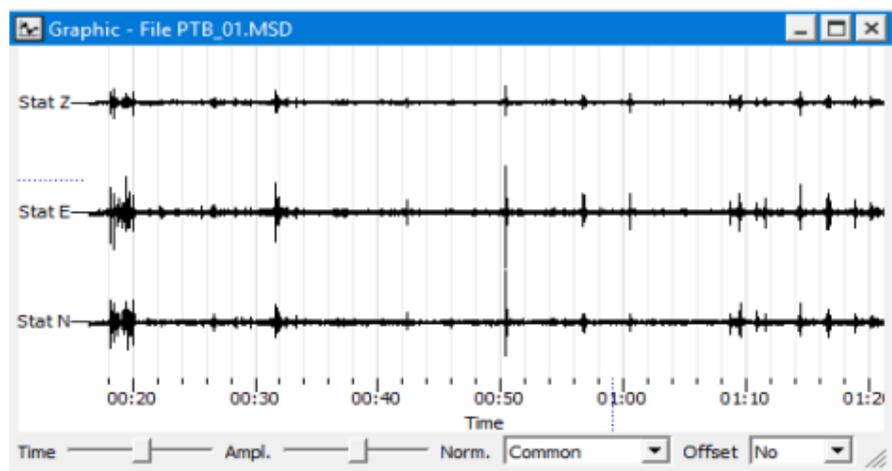
**Gambar 2. 7** Peta zona kerentanan likuifaksi di Indonesia (Buana et al., 2019)

## II.5 Mikrotremor

Mikrotremor dapat dikatakan sebagai getaran harmonik alami di bawah permukaan tanah yang terjadi secara terus menerus yang disebabkan oleh getaran mikro dan kegiatan alam lainnya di bawah permukaan tanah. Mikrotremor terdiri dari berbagai macam gelombang, baik gelombang badan maupun gelombang permukaan. Gelombang mikrotremor dapat dipakai untuk mengetahui jenis tanah (*top soil*) berdasarkan tingkat kekerasannya. Semakin kecil periode dominan tanah maka tingkatkekerasan tanah akan semakin besar, begitu pula sebaliknya apabila periode

dominan tanah semakin besar maka tanah tersebut semakin lunak (Koesuma et al., 2018).

Secara umum perekaman mikrotremor memerlukan seismometer dengan tiga komponen yang merekam komponen horizontal, NS (*north-south*), EW (*east-west*), dan vertikal (*up- down*). Komponen vertikal merekam gerak vertikal yang terdiri dari gelombang Rayleigh dan SV sedangkan komponen horizontal merekam gerak horizontal yang terdiri dari gelombang *love* dan SH. Pada perekaman mikrotremor dilakukan pengukuran secara langsung karena yang direkam yaitu gelombang yang berasal dari alam, sehingga tidak memerlukan sumber buatan (Haerudin et al., 2019).



**Gambar 2. 8** Sinyal perekam mikrotremor pada *site* PTB\_01

Setiap saat, permukaan bumi selalu bergerak pada frekuensi seismik. Getaran *ambient* konstan permukaan bumi ini disebut mikrotremor atau mikroseismik, aktifitas, mikrotremor bervariasi dari waktu ke waktu, sangat kompleks, tidak teratur, serta tidak berulang untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 2.1.

**Tabel.2 1** Klasifikasi getaran seismik berdasarkan sumbernya (Ipmawan et al., 2018)

	<i>Nature</i>	<i>Living Thing</i>
<i>Name</i>	<i>Microseismic</i>	<i>Microtremor</i>
<i>Frequency</i>	<i>0.1-0.5 to Hz</i>	<i>0.5 to 1 – 10 Hz</i>
<i>Source</i>	<i>Ocean Wave</i>	<i>Traffic, Industry, Human Activity</i>
<i>Arrival Wave</i>	<i>Surface Wave</i>	<i>Surface Wave and Body Wave</i>

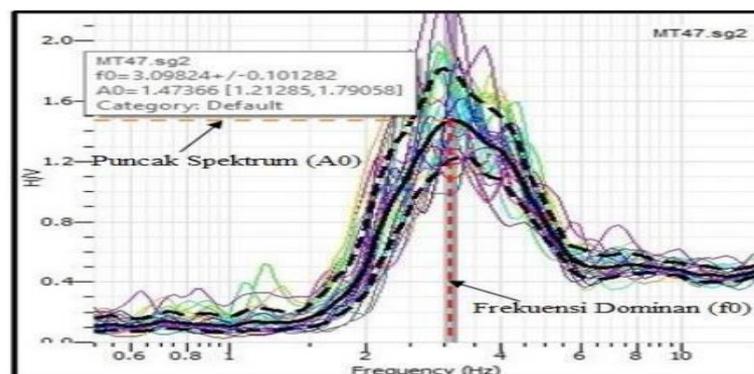
## **II.6 Mikrozonasi Mikrotremor**

Fenomena alam gempa tektonik sering terjadi di Indonesia karena letak Indonesia yang berada pada lempeng benua. Dampaknya sangat mempengaruhi suatu wilayah, kejadian ini tidak diketahui kapan datangnya, dimana tempatnya, berapa besar kekuatannya dan apa dampaknya sehingga masyarakat dianjurkan lebih waspada. Untuk itu dibutuhkan mitigasi bencana gempabumi yang dapat mengedukasi masyarakat mengenai tata guna lahan terutama dalam hal pembangunan infrastruktur. Potensi rawan gempabumi suatu daerah dapat diketahui dengan melakukan pemetaan mikrozonasi. Klasifikasi tanah permukaan merupakan salah satu faktor penting yang dapat dijadikan parameter infrastruktur bangunan tahan gempa. Pembangunan dengan rancangan konstruksi yang baik dapat dilakukan secara merata di semua lokasi namun tidak efisien. Oleh karena itu, pembangunan perlu memperhatikan peta distribusi tingkat resiko pada masing-masing daerah untuk melakukan efisiensi. Peta resiko tingkat bahaya gempabumi pada skala besar (Nasional) atau yang disebut zonasi gempa telah dibuat oleh

pemerintah dan dirilis 5 tahun sekali. Sedangkan peta resiko tingkat bahaya gempabumi dengan skala kecil seperti wilayah tingkat Kecamatan dan Kabupaten dapat disebut peta mikrozonasi (Haeruddin et al., 2019).

## II. 7 Karakterisasi Site Berdasarkan Parameter HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*)

HVSR yang terukur pada tanah bertujuan untuk melihat karakterisasi geologi setempat. Pada karakterisasi parameter HVSR terdapat dua parameter penting untuk menganalisis struktur bawah tanah, yaitu frekuensi dominan dan amplifikasi tanah. Frekuensi dominan adalah nilai frekuensi yang kerap muncul sehingga diakui sebagai nilai frekuensi dari lapisan batuan di wilayah tersebut sehingga dapat menunjukkan jenis dan karakteristik batuan tersebut (Ngadmanto et al., 2013).



**Gambar 2. 9** Kurva HVSR yang memberikan informasi nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan nilai faktor amplifikasi

Dalam penelitian ini berfokus pada penggunaan parameter frekuensi dominan sebagai data pembanding untuk memvalidasi interpretasi nilai  $V_s$  pada titik pengukuran yang dapat dilihat pada kurva HVSR dan klasifikasi frekuensi dominan. Nilai frekuensi dominan diperoleh dari sumbu horizontal puncak kurva

HVSR. Frekuensi dominan tanah dapat diperoleh menggunakan persamaan (Nakamura, 2000):

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

Dimana  $f_0$  frekuensi dominan,  $V_s$  kecepatan gelombang geser pada lapisan sedimen dan  $h$  kedalaman batuan dasar (*basement*).

## **II. 8 Metode HVTFA (*Horizontal to Vertical Time Frequency Analysis*)**

Metode HVTFA (*Horizontal to Vertical Time-Frequency Analysis*) digunakan untuk mengekstraksi kurva eliptisitas gelombang *Rayleigh* dari data mikrotremor dan meminimalkan efek gelombang *love* komponen horizontal dan gelombang *body* komponen vertikal pada kurva eliptisitas karena akan mempengaruhi komponen horizontal *Rayleigh* dari data mikrotremor. Nilai  $V_s$  didapatkan dari inversi kurva eliptisitas dengan metode HVTFA sehingga model kecepatan gelombang geser yang dihasilkan menjadi lebih reliabel. Metode ini mengubah komponen sinyal dari domain waktu menjadi sinyal dalam domain waktu-frekuensi (dalam hal ini dibentuk menjadi translation atau domain waktu dan *scale* atau domain frekuensi) menggunakan *Continous Wavelet Transform* (CWT). Metode *Continous Wavelet Transform* (CWT) merupakan salah satu perkembangan dari metode *Fourier Transform* dimana metode tersebut dapat mengidentifikasi frekuensi dan waktu yang menghasilkan frekuensi tersebut secara bersamaan sehingga metode ini dapat digunakan pada sinyal yang nonstasioner (Haf et al., 2017). Dalam metode frekuensi-waktu dari perhitungan H/V, rasio H/V tidak dihitung dari keseluruhan spektrum untuk komponen vertikal dan horizontal dari sinyal noise sekitar seperti pada metode HVSR. Sebaliknya, representasi frekuensi-

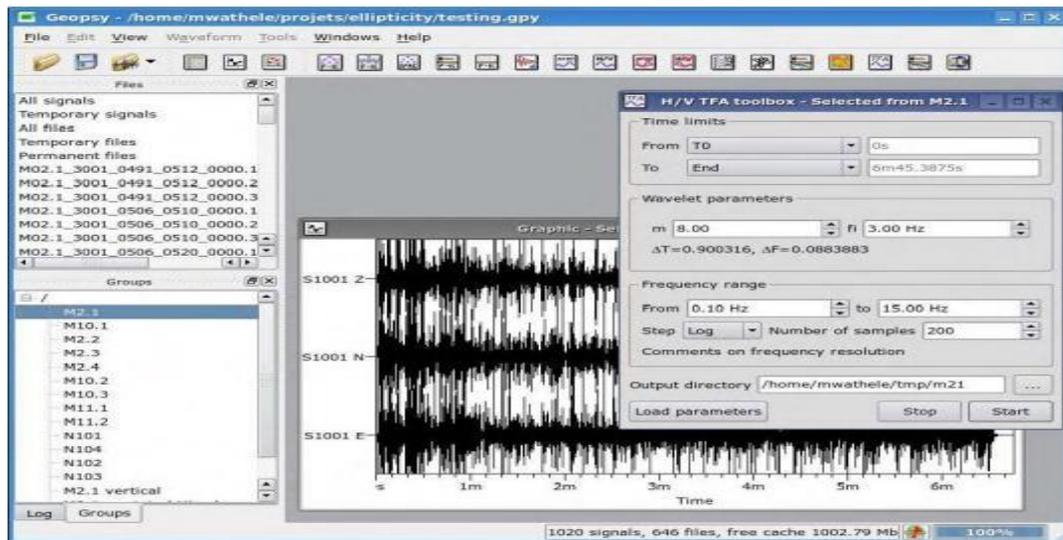
waktu dari komponen vertikal dan kedua komponen horizontal dihitung menggunakan CWT (Atashband & Esfahanizadeh, 2012). Komponen horizontal dan vertikal dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2.

$$CWT_{\{a,b\}} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.2)$$

Dimana, a adalah parameter dilatasi dan b adalah parameter translasi. Jika t adalah waktu, maka a berbanding terbalik dengan frekuensi dan b merupakan translasi dalam waktu (Sunardi et al., 2018). Dengan CWT, gelombang SV, love, dan SH dapat diminimalkan sehingga gelombang Rayleigh dapat dipertahankan karena akan digunakan untuk inversi kurva eliptisitas. Hasil inversi ini adalah pembagian kecepatan gelombang terhadap kedalaman (Knapmeyer-endrun et al., 2017). Fungsi wavelet yang digunakan dalam metode HVTFA adalah wavelet Morlet yang telah dimodifikasi dalam domain frekuensi yang berpusat pada frekuensi  $f_c$ , seperti yang ditunjukkan padapersamaan 2.3.

$$\frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \exp \left( - \left( \frac{f}{f_c} \omega_0 - \omega_0 \right)^2 m \right) \quad (2.3)$$

Dimana,  $f$  = frekuensi;  $\omega$  = parameter Morlet pertama;  $m$  = parameter Morlet kedua (Atashband and Esfahanized, 2012).



**Gambar 2. 10** Tampilan Geopsy parameter HVTFA dan sinyal (Fäh et al., 2009)

Pemilihan parameter *wavelet* menjadi penting. Nilai kecil ( $<6$ ) memberikan hasil yang baik, tetapi kurang resolusi. Sebaliknya, nilai yang terlalu tinggi ( $>50$ ) menyebabkan pemisahan pengaruh gelombang yang berbeda pada komponen horizontal tidak dapat sepenuhnya berhasil (Poggi et al., 2012). Pemilihan parameter terbaik *wavelet* morlet disarankan pada kisaran 4-16 dengan frekuensi yang digunakan adalah 0.5 – 15 Hz sedangkan untuk visualisasi kurva eliptisitas akan ditampilkan pada Max2curve yang memiliki fungsi membaca, memfilter dan menampilkan histogram dengan jumlah Nppm (*Number of peaks per minute*) yang dipilih per menit kisaran 5 atau lebih rendah sehingga dapat mengidentifikasi bagian stabil kurva eliptisitas model fundamental (Fäh et al., 2009).

### II.8.1 Eliptisitas Gelombang Rayleigh

*Array* sensor seismik dapat digunakan untuk memperkirakan kurva dispersi gelombang permukaan yang selanjutnya dapat di inversi sehingga diperoleh struktur kecepatan gelombang geser hingga batuan dasar. Namun demikian, pengukuran semacam ini masih relatif membutuhkan waktu yang lebih lama, disamping kendala infrastruktur yang membatasi dan juga lokasi penempatan array sensor seismik itu sendiri. Salah satu metode alternatif yang lebih sederhana dapat diterapkan dengan memanfaatkan eliptisitas gelombang *Rayleigh* yang dapat diukur dengan menggunakan sensor seismik tunggal (single mikrotremor). Eliptisitas gelombang Rayleigh telah digunakan pada tahun 1969 untuk menentukan struktur bawah permukaan. Metode tersebut mengasumsikan bahwa gelombang permukaan mendominasi data mikrotremor dan bentuk kurva H/V sebagian besar didominasi oleh eliptisitas gelombang *Rayleigh*. Gerak partikel medium ketika dilewati oleh gelombang ini berbentuk elips dimana merupakan kombinasi dari gerak partikel gelombang P dan SV. Gerakan partikel horizontal dan vertikal inilah yang disebut eliptisitas gelombang Rayleigh (Sunardi et al., 2018). Pada penelitian ini, kurva eliptisitas dapat digunakan untuk memperoleh parameter kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) pada site pengukuran melalui proses inversi. Penyelesaian proses inversi bergantung pada penentuan nilai parameter yang mendekati nilai data observasi melalui iterasi atau pengulangan. Keakuratan proses ini dapat dilihat dari nilai error (misfit). Semakin kecil nilai misfit dari proses iterasi maka profil kecepatan gelombang geser akan semakin baik (Syafitri et al., 2022).

## II.8.2 Inversi Kurva Eliptisitas

Untuk memperkirakan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) dapat dilakukan dengan berbagai metode antara lain dengan pengeboran (*borehole*). Alternatif lainnya adalah dengan memanfaatkan metode *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW). Namun demikian, *borehole* memerlukan biaya yang relatif mahal dan MASW memakan waktu yang cukup lama. Tahun 2008 Herak memperkenalkan teknik Inversi untuk memperkirakan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) menggunakan inversi gelombang *Rayleigh* (*Inverse modelling*). Metode ini memperkirakan nilai numerik model parameter berdasarkan data hasil observasi (menggunakan model tertentu, serta melakukan pencocokan untuk mencari parameter model yang menghasilkan model yang cocok dengan data pengamatan. inversi gelombang *Rayleigh* adalah pemodelan yang dilakukan untuk memodelkan struktur bawah permukaan (Sunardi et al., 2017).

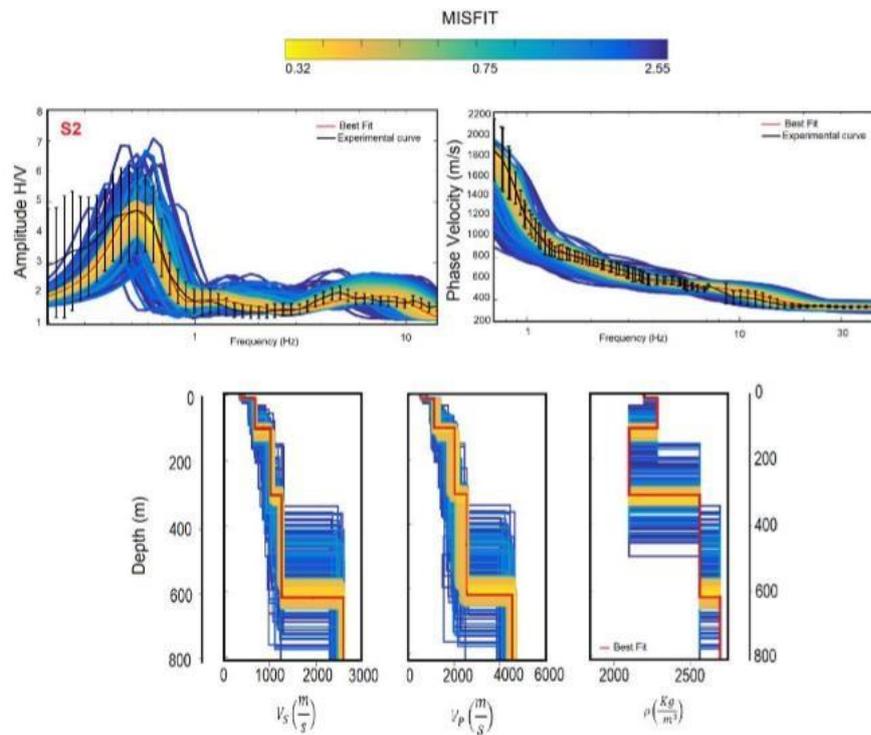
Inversi kurva eliptisitas gelombang *Rayleigh* dilakukan untuk memperoleh parameter fisis, berupa kedalaman lapisan bawah permukaan, kecepatan gelombang primer, dan kecepatan gelombang geser (Fadhilah et al., 2022). Kurva RWE (*Rayleigh wave ellipticity*) teoritis dihitung untuk setiap model tanah yang dihasilkan dan kemudian dibandingkan dengan kurva eksperimental dengan parameter misfit, yang menunjukkan seberapa dekat kurva yang dihitung dengan kurva eksperimental. Model yang dihasilkan, didapatkan variasi nilai  $V_p$ ,  $V_s$  dan  $\rho$  terhadap kedalaman. Misfit antara puncak frekuensi observasi dan yang dimodelkan dituliskan dalam persamaan berikut (Layadi et al., 2018):

$$Misfit = \frac{(f)_{observed} - (f)_{modelled}}{(df)_{observed}} \quad (2.4)$$

dengan  $(f)_{observed}$  merupakan puncak frekuensi observasi  $(df)_{observed}$  merupakan standar deviasi yang sesuai, dan  $(f)_{modelled}$  merupakan puncak frekuensi dari model fundamental *Rayleigh wave ellipticity*. Parameter input mencerminkan karakteristik dinamis dari sifat fisis tanah di wilayah penelitian seperti  $V_p$ ,  $V_s$ , *Poisson's ratio*, dan *density* yang berpengaruh dalam proses iterasi pencocokan di tiap titik pengukuran mikrotremor. Proses inversi didasarkan pada teknik *Monte Carlo* atau *conditional neighbourhood algorithm*. Dari model awal terbangun, perhitungan misfit bersesuaian dilakukan dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$Misfit = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{D_i M_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (2.5)$$

dengan  $N$  adalah jumlah titik data,  $D_i$  adalah data hasil inversi,  $M_i$  adalah model struktur tanah, dan  $\sigma_i$  adalah standar deviasi dari data hasil inversi dengan  $1 \leq i \leq N$ . Model profil yang diperoleh dapat dilihat pada gambar 2.9. Jika nilai misfit yang dihasilkan masih tinggi ( $>1$ ) maka perlu dilakukan perubahan pada parameter model awal. Misfit dengan nilai terendah ( $0 \leq misfit \leq 1$ ) akan digunakan sebagai model terbaik (Sunardi et al., 2018).



**Gambar 2. 11** Hasil Inversi kurva Elaptisitas (Jerez et al., 2019).

Pada gambar 2.11, menjelaskan mengenai inversi kurva eliptisitas dan kurva teoritis dengan model yang diuji diberi warna sesuai dengan nilai misfitnya. Hasil inversi dengan misfit yang paling mendekati kurva eliptisitas disorot dengan warna merah sedangkan warna lainnya keseluruhan dari misfit yang didapatkan. Setelah memperoleh nilai misfit terkecil pada profil  $V_s$ , selanjutnya akan dirata-ratakan untuk menentukan nilai  $V_{s30}$  dalam menggambarkan kondisi tanah pada site pengukuran (Jerez et al., 2019).

## II.9 Kecepatan Gelombang Geser Rata-rata Hingga Kedalaman 30 m ( $V_{s30}$ )

$V_{s30}$  merupakan kecepatan gelombang geser suatu lapisan tanah hingga kedalaman 30m dari permukaan tanah. Menurut Rošer & Gosar (2010) nilai  $V_{s30}$  ini dapat

dipergunakan dalam penentuan standar bangunan tahan gempa, menentukan klasifikasi berdasarkan kekuatan getaran gempa bumi akibat efek lokal serta digunakan untuk keperluan dalam perancangan bangunan tahan gempa. Menurut Wangsadinata (2006),  $V_{s30}$  merupakan data penting dan paling banyak digunakan dalam survei geofisika untuk menentukan karakteristik struktur bawah permukaan hingga kedalaman 30 m. Hanya lapisan-lapisan batuan sampai kedalaman 30 meter saja yang menentukan pembesaran gelombang gempa (Talumepe et al., 2019). Nilai  $V_{s30}$  diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.6 (Rusydi et al., 2018).

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{v_i} \right)} \quad (2.6)$$

Dengan,  $h_i$  adalah ketebalan lapisan sedimen (m),  $v_i$  adalah kecepatan gelombang geser (m/s)  $i$  adalah indeks per lapisan dan  $N$  adalah jumlah lapisan di atas kedalaman 30 m.

**Tabel 2. 2** Parameter  $V_{s30}$  berdasarkan penyelidikan oleh laboratorium SNI 1726, Badan Standarisasi Nasional (Sunardi et al., 2018)

Tipe	Klasifikasi Site	$V_{s30}$ (m/s)
SA	Batuan Keras	>1500
SB	Batuan	750-1500
SC	Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak	350-750
SD	Tanah Sedang	175-350
SE	Tanah Lunak	<175

## II.10 Penelitian Terdahulu

Sebagai daerah yang secara administrasi terletak di Kota Palu. Akibat yang ditimbulkan dari likuifaksi berdampak besar di Kelurahan Petobo, Kerusakan meliputi areasekitar 158 Ha dengan keliling 6,58 km (Tim Pusat Studi Gempa Nasional 2018).

Penerapan metode mikrotremor menggunakan  $V_{s30}$  dalam menyelidiki struktur bawahpermukaan di wilayah yang rentan gempa bumi telah pernah dilakukan oleh beberapapeneliti sebelumnya di Sulawesi Tengah, khususnya di Kota Palu. Adapun yang menjadi perbedaan dalam penelitian ini menggunakan metode HVTFA dari data mikrotremor yang didapatkan di tiap titik pengukuran, sedangkan beberapa peneliti sebelumnya menggunakan metode Inversi HVSR untuk memperoleh nilai  $V_{s30}$ , diantaranya:

1. Yulianur et al. (2020) menggunakan metode HVSR dalam peneletianya di kelurahan Petobo sebanyak 14 titik pengukuran pasca likuifaksi 2018, dalam penelitian ini menunjukkan lapisan kritis untuk terlikuifaksi adalah lapisan paling atas dari 4 sampai 6 m dibawah muka tanah dengan kecepatan gelombang geser kurang dari 200 m/s.
2. Hendra et al. (2019) dalam menentukan karakteristik lapisan bawah permukaan menggunakan variasi kecepatan rambat gelombang melalui metode mikrotremor di Kecamatan Palu Selatan, Kecamatan Palu Barat dan Kecamatan Palu Timur. Berdasarkan hasil kecepatan gelombang geser hingga kedalaman 30 m diperoleh nilai  $V_{s30}$  215 dan 0-37,4 m/s dengan tipe batuan D yaitu jenis tanah sedang.

3. Gustono et al. (2021) dari hasil pengukuran mikrotremor sebanyak 67 lokasi menunjukkan bahwa wilayah Palu, Sulawesi Tengah memiliki kriteria tanah sedang dan tanah lunak dengan nilai  $V_{s30}$  berkisar antara 140 – 190 m/s.