

**PEMODELAN BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN INVERSI *HVSR* PADA  
DATA MIKROTREMOR DARI AKSELEROMETER BERBASIS ARDUINO DI  
LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**ACEP SIHABUDIN  
NPM 1715051022**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2021**

**PEMODELAN BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN INVERSI *HVSR* PADA  
DATA MIKROTREMOR DARI AKSELEROMETER BERBASIS ARDUINO DI  
LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI**

**Oleh**

**ACEP SIHABUDIN**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2021**

## ABSTRAK

# PEMODELAN BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN INVERSI *HVSR* PADA DATA MIKROTREMOR DARI AKSELEROMETER BERBASIS ARDUINO DI LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI

Oleh

**ACEP SIHABUDIN**

Panasbumi Way Ratai merupakan salah satu potensi panasbumi yang belum dieksplorasi secara terpadu. Pada tahapan tahapan eksplorasi panasbumi metode seismik pasif mampu digunakan untuk memaksimalkan hasil yang diperoleh, salah satunya adalah mikrotremor. Data mikrotremor bisa didapatkan dari pengaplikasian akselerometer berbasis Arduino guna memetakan nilai frekuensi dominan serta melakukan pemodelan inversi 3D dari kurva *HVSR* untuk melihat variasi nilai kecepatan gelombang geser.

Metode *HVSR* memperlihatkan hubungan bawah permukaan tanah dengan perbandingan rasio spektrum *Fourier* dari sinyal mikrotremor komponen horizontal terhadap vertikal yang menghasilkan nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi. Dari parameter kurva *HVSR* dilakukan pemodelan 3D dengan proses inversi *HVSR* yang menggunakan prinsip metode *Monte Carlo*.

Nilai frekuensi dominan yang didapatkan dari pengolahan mikrotremor berkisar 0.60 Hz - 3.68 Hz. Dan untuk hasil inversi *HVSR* didapatkan persebaran nilai kecepatan gelombang geser dalam bentuk model 3D dengan didominasi oleh nilai yang kurang dari 350 m/s.

Sebaran nilai frekuensi dominan pada lapangan panasbumi Way Ratai didominasi oleh klasifikasi jenis IV tipe I dan tipe II. Untuk Sebaran kecepatan gelombang geser dari penampang 3D yang didominasi lapisan tanah sedang mulai dari kedalaman 0-30 meter.

Kata kunci: mikrotremor, *HVSR*, frekuensi dominan, inversi *HVSR*, model 3D , kecepatan gelombang geser.

## **ABSTRACT**

### **UNDERGROUND MODELING USING INVERSION *HVSR* ON MICROTREMOR DATA FROM ACCELEROMETER ARDUINO BASED ON WAY RATAI GEOTHERMAL FIELD**

**By**

**ACEP SIHABUDIN**

Geothermal Way Ratai is one of the geothermal potentials that has not been explored in an integrated manner. In the stages of geothermal exploration, passive seismic methods can be used to maximize the results obtained, one of which is microtremor. Microtremor data can be obtained from the application of an Arduino-based accelerometer to map the dominant frequency value and perform 3D inversion modeling of the curve *HVSR* to see variations in the value of the shear wave velocity.

The method *HVSR* shows the subsurface relationship by comparing the ratio of the spectrum *Fourier* of the horizontal to vertical component of the microtremor signal which produces the dominant frequency and amplification factor values. From the parameters of the curve, *HVSR* 3D modeling was carried out with the inversion process *HVSR* using the principle of the Monte Carlo method.

The dominant frequency values obtained from microtremor processing ranged from 0.60 Hz - 3.68 Hz. And for the results of the inversion, the *HVSR* distribution of shear wave velocity values in the form of a 3D model is dominated by values less than 350 m/s.

The distribution of the dominant frequency values in the Way Ratai geothermal field is dominated by the classification of type IV type I and type II. For the shear wave velocity distribution from a 3D cross-section which is dominated by a medium soil layer starting from a depth of 0-30 meters.

**Keywords:** microtremor, *HVSR*, dominant frequency, inversion *HVSR*, 3D model, shear wave velocity

Judul Skripsi : **PEMODELAN BAWAH PERMUKAAN  
MENGUNAKAN INVERSI *H/VS*R PADA  
DATA MIKROTREMOR DARI  
AKSELEROMETER BERBASIS ARDUINO  
DI LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI**

Nama Mahasiswa : **Acep Sihabudin**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715051022

Program Studi : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik



Pembimbing 1

**Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.**  
NIP 19750911 200012 1002

Pembimbing 2

**Karyanto, S.Si., M.T.**  
NIP 19691230 199802 1001

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

**Karyanto, S.Si., M.T.**  
NIP 19691230 199802 1001

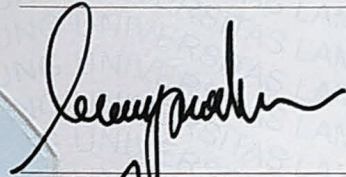
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

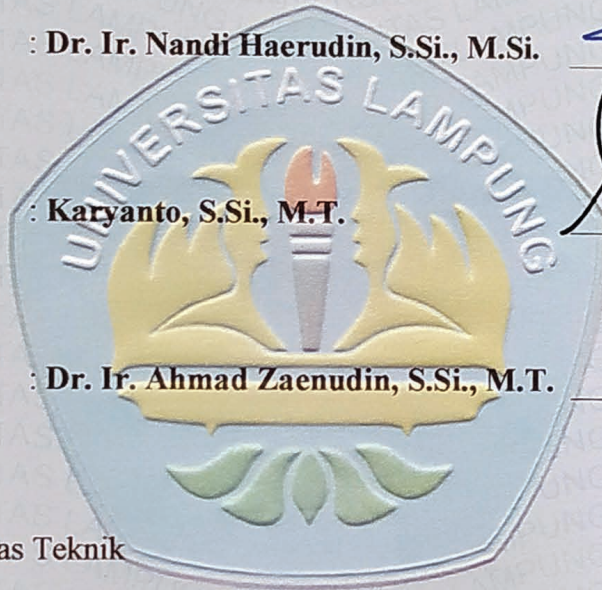
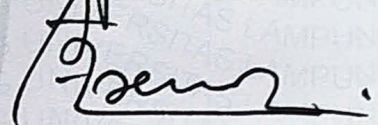
Ketua : **Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.**



Sekretaris : **Karyanto, S.Si., M.T.**



Anggota : **Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



**Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.**  
NIP 19627107 198703 1002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **23 November 2021**

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis ini bukan merupakan karya dari orang lain melainkan berdasarkan pemikiran saya sendiri, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana. Adapun kutipan tertentu dalam penulisan skripsi ini terdapat karya atau pendapat orang lain yang ditulis menurut sumbernya sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan.

Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Desember 2021



Acep Sihabudin

1715051022

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Lebak, pada tanggal 21 Agustus 1998, sebagai anak ketiga dari enam bersaudara, putra dari Bapak Udin dan Ibu Mimi. Alamat penulis berada di Kampung Parungpung RT 004 RW 002 Desa Cilangkap, Kecamatan Maja, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. Penulis beragama Islam dan berkebangsaan Indonesia. Pendidikan yang pernah ditempuh oleh penulis yaitu Sekolah Dasar di SD Negeri 2 Cilangkap hingga kelas 5, kemudian berpindah ke SD Negeri 1 Cimenteng Jaya Kabupaten Lebak diselesaikan tahun 2011, Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Cibadak Kabupaten Lebak diselesaikan tahun 2014, dan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Cibadak Kabupaten Lebak diselesaikan pada tahun 2017. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan kejenjang yang lebih tinggi yaitu dengan menempuh pendidikan di Perguruan Tinggi Negeri Universitas Lampung melalui jalur AFIRMASI DIKTI 3T.

Selama masa kuliah, penulis aktif mengikuti beberapa organisasi kampus. Pada tahun 2018, untuk tingkat Universitas penulis bergabung dengan Birohmah Universitas Lampung sebagai anggota Departemen Kajian Ilmiah Islam dan Keumatan. Berikutnya untuk tingkat Fakultas penulis bergabung dengan Fossi FT sebagai anggota Departemen Kajian Syiar Islam dan Keumatan. Ditahun yang sama, penulis juga bergabung dengan Hima TG Bhuwana Universitas Lampung sebagai anggota Bidang Sains dan Teknologi selama dua periode. Penulis juga bergabung di *Society of Exploration Geophysicist (SEG) Chapter* Universitas Lampung sebagai anggota bidang *Education* ditahun 2020.



Pada tahun 2020, penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Pekon Suka Damai, Kecamatan Air Hitam, Kabupaten Lampung Barat. Ditahun yang sama penulis melakukan Kerja Praktek di Laboratorium Teknik Geofisika mengenai Pengukuran mikrotremor menggunakan Akselerometer berbasis Arduino dengan melakukan pengukuran langsung di Lapangan Panasbumi Way Ratai yang berada di Kabupaten Pesawaran, Lampung. Hingga pada akhir studi penulis menyelesaikan pendidikan sarjana teknik pada tanggal 23 November 2021 dengan judul skripsi “**Pemodelan Bawah Permukaan Menggunakan Inversi Hvsr pada Data Mikrotremor dari Akselerometer Berbasis Arduino di Lapangan Panasbumi Way Ratai**”.

## **PERSEMBAHAN**

Dengan penuh rasa syukur, saya persembahkan skripsi ini kepada:

***Allah Subhanahu Wa Ta'ala.***

Atas berkat rahmat dan hidayah serta karunia-Nya penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.

***Kedua Orang Tuaku Tercinta  
Bapak Udin  
Umi Mimi***

Terimakasih atas semua doa-doa yang tak henti dipanjatkan, atas kasih sayang yang tak henti dicurahkan, atas segala pengorbanan yang dilakukan, atas ridha yang diberikan.

***Nenekku Tercinta  
Ibu Maryam***

Terimakasih atas doa-doa, ridha, kasih sayang serta dukungan yang tak henti-hentinya diberikan.

***Kedua Tetehku Tersayang  
Teh Dede Farida  
Teh Mutamimah***

Terimakasih atas doa dan dukungan yang selalu diberikan serta terimakasih karena telah mau direpotkan.

***Adik-adik Tersayang  
Enong Badiatus Solihah  
Abdul Basit  
Muhammad Ali Al-Baru***

Terimakasih karena telah menjadi penyemangat dalam melanjutkan impian.

***Teknik Geofisika Universitas Lampung 2017***

Terimakasih atas semua yang telah kalian berikan untuk Saya dan atas semua yang telah kalian terima dari Saya.

## **MOTTO**

*“Life is choice, better is less”*

(Acep Sihabudin)

Tiap-tiap diri bertanggung jawab atas apa yang telah diperbuatnya.

(Q.S. Al-Mudatstsir [74]:38)

## **KATA PENGANTAR**

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, segala Puji hanya milik Allah *Subhanahu Wa Ta'ala*, Yang Maha Kuasa, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah serta karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad Shalallahu Alaihi Wassalam, beserta keluarga dan segenap sahabatnya.

Skripsi dengan judul **“PEMODELAN BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN INVERSI *HVSR* PADA DATA MIKROTREMOR DARI AKSELEROMETER BERBASIS ARDUINO DI LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI”** merupakan hasil penelitian Tugas Akhir penulis di Laboratorium Teknik Geofisika Universitas Lampung sekaligus bahan dari persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik Geofisika Universitas Lampung.

Penulis pun menyadari mungkin masih terdapat kekurangan di dalam skripsi ini, sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Penulis memohon kepada Allah agar semua yang tertulis di dalam skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada siapapun, baik kalangan umum maupun akademisi untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

**Penulis**

**Acep Sihabudin**

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis haturkan kehadiran Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* Yang Maha Kuasa karena berkat rahmat dan hidayah serta karunia-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Tak lupa pula shalawat serta salam yang selalu tercurahkan kepada junjungan kita nabi besar Muhammad *Shallallahu 'alaihi wasallam* yang menjadi suri tauladan bagi kita.

Dalam penyelesaian skripsi ini, banyak pihak yang telah terlibat dan kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Karyanto, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung dan Pembimbing kedua sekaligus pembimbing akademik yang telah membimbing serta banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing pertama yang telah membimbing serta mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng. selaku pembimbing lapangan yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. selaku penguji penulis yang memberikan saran dan masukan pada skripsi ini..
6. Dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah menjadi guru selama perkuliahan dan memberikan berbagai pengalaman kepada penulis serta staf jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.

7. Kedua orang tua tercinta yang selalu menjadi kebanggaan hidup penulis Bapak Udin dan Umi Mimi yang telah banyak memberi dukungan, mencintai dan menyayangi dengan sepenuh hati.
8. Nenek terhebat Ibu Mariyam selalu memberi dukungan dan doa terbaik
9. Kedua teteh tersayang Dede Farida dan Mutamimah selalu memberikan semangat.
10. Ketiga adik tersayang Enong Badiatus Solihah, Abdul Basit dan Muhammad Ali Al-baru yang selalu memberikan semangat.
11. Keluarga Besar PPMDH dan Para Penghuni Masjid (Basri, Ryas, Ucan, Irvan, Riko, Rohim, Naufal, Ariston dan Prima)
12. Teman-teman Rantai Ceria (Bang Adli, Ryas, Ican, Bryan, Ukhty dan Kak Rambe) yang telah kebersamai selama penelitian.
13. Keluarga keduaku Teknik Geofisika 2017 yang telah memberikan motivasi dan membantu dalam penyusunan laporan ini.
14. Para penulis lain yang telah membantu memberikan inspirasi bagi saya dalam melakukan penelitian ini.
15. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Bandar Lampung, 10 Desember 2021

Acep Sihabudin

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN.....</b>	<b>vi</b>
<b>RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>vii</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>ix</b>
<b>MOTTO .....</b>	<b>x</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>UCAPAN TERIMAKASIH.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	3
1.3 Batasan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
<b>II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Daerah Penelitian .....	4

2.2 Geologi Regional Dan Stratigrafi Way Ratai.....	5
2.3 Tektonik Regional Daerah Penelitian .....	7
2.4 Sistem Panasbumi Way Ratai .....	8
2.5 Akselerometer Berbasis Arduino .....	9
<b>III TEORI DASAR .....</b>	<b>10</b>
3.1 Teori Gelombang Seismik.....	10
3.1.1 Penjelasan gelombang badan ( <i>body wave</i> ) .....	10
3.1.2 Penjelasan gelombang permukaan ( <i>surface wave</i> ) .....	12
3.2 Karakteristik Mikroseismik, <i>Microearthquake</i> dan Mikrotremor .....	13
3.3 Metode <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSZ)</i> .....	15
3.4 Frekuensi Dominan Lapisan Batuan .....	18
3.5 Program <i>OpenHVSZ</i> Sebagai <i>Software</i> Pemodelan .....	19
3.6 Inversi <i>HVSZ</i> Berdasarkan Metode <i>Monte Carlo</i> .....	20
3.7 Pengaruh Litologi terhadap Kecepatan Gelombang Geser ( <i>Vs</i> ) .....	21
<b>IV METODE PENELITIAN.....</b>	<b>22</b>
4.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	22
4.2 Alat dan Bahan Penelitian .....	22
4.3 Jadwal Penelitian .....	22
4.4 Diagram Alir Penelitian.....	24
4.5 Prosedur Penelitian .....	26
<b>V HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>27</b>
5.1 Hasil Penelitian.....	27
5.2 Pembahasan .....	30
5.2.1 Frekuensi dominan ( $f_0$ ) daerah penelitian .....	30
5.2.2 Topografi daerah penelitian .....	34
5.2.3 Persebaran nilai <i>Vs</i> daerah penelitian.....	37
5.2.4 Irisan dari Rt55-Rt60 pada penampang 3D.....	39
5.2.5 Irisan dari Rt51-Rt56 pada penampang 3D.....	40
5.2.6 Irisan dari Rt20-Rt58 pada penampang 3D.....	41
5.2.7 Irisan kedalaman 10 meter pada penampang 3D .....	42
5.2.8 Irisan kedalaman 25 meter pada penampang 3D .....	43
5.2.9 Irisan kedalaman 35 meter pada penampang 3D .....	43
<b>VI KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>45</b>
6.1 Kesimpulan .....	45
6.2 Saran .....	45
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>46</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kriteria-kriteria untuk mendapatkan kurva <i>HVSR</i> yang <i>reliable</i> .....	18
2. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan mikrotremor oleh Kanai .....	18
3. Klasifikasi site berdasarkan nilai <i>Vs</i> hasil penyelidikan tanah dan laboratorium SNI 1726.....	21
4. Tabel nilai <i>Vs</i> pada beberapa batuan oleh Daryono .....	21
5. Jadwal penelitian tugas akhir .....	23
6. Klasifikasi tanah terhadap nilai frekuensi dominan .....	32
7. Batuan pada formasi geologi daerah penelitian .....	34
8. Hasil interpretasi nilai kecepatan gelombang geser .....	38

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta letak dan lokasi penelitian .....	4
2. Peta geologi regional Way Ratai.....	6
3. Konfigurasi tektonik secara makro di Indonesia.....	7
4. Ilustrasi gerak gelombang primer.....	11
5. Ilustrasi gerak gelombang sekunder.....	11
6. Ilustrasi gerak gelombang <i>love</i> .....	12
7. Ilustrasi gerak gelombang <i>rayleigh</i> .....	13
8. Diagram alir penelitian.....	24
9. Format data yang terekam.....	28
10. Data mikrotremor hasil pengukuran .....	29
11. Kurva <i>HVSR</i> .....	29
12. Peta persebaran nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) daerah penelitian .....	31
13. Peta <i>overlay</i> nilai frekuensi dominan dengan geologi regional panasbumi Way Ratai .....	33
14. Topografi daerah penelitian .....	34
15. Peta nilai frekuensi dominan pada topografi daerah penelitian .....	36
16. Penampang 3D hasil inversi <i>HVSR</i> .....	37
17. Irisan dari Rt55-Rt60 pada penampang 3D.....	39
18. Irisan dari Rt51-Rt56 pada penampang 3D.....	40
19. Irisan dari Rt20-Rt58 pada penampang 3D.....	41
20. Irisan kedalaman 10 meter pada penampang 3D .....	42

22. Irisan kedalaman 25 meter pada penampang 3D .....	43
22. Irisan kedalaman 35 meter pada penampang 3D .....	44

# I. PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Lampung merupakan provinsi di Indonesia yang memiliki potensi energi panasbumi yang besar. Hal ini disebabkan karena provinsi Lampung sendiri dilalui oleh jalur gunungapi yang merupakan bagian dari jalur pegunungan Sirkum Mediterania, Salah satunya adalah potensi panasbumi Way Ratai. Panasbumi Way Ratai adalah salah satu potensi panasbumi yang belum dieksplorasi secara terpadu. Potensi ini diketahui dengan peninjauan langsung pada lapangan *geothermal* Way Ratai dan ditemukannya manifestasi-manifestasi yang tampak di permukaan serta bagaimana gejala dan dampaknya bagi biota yang tumbuh di sekitarnya (Suharno dkk., 2016). Berdasarkan penelitian dari perhitungan *heat loss* (Karyanto dkk., 2020) bahwasannya sumberdaya spekulatif panasbumi Way Ratai mencapai 6414 kWe atau setara dengan 6.4 MWe.

Pada eksplorasi panasbumi dilakukan berbagai tahap sampai dilakukannya produksi panasbumi, yaitu survei awal, eksplorasi, pengeboran, *quality control*, eksploitasi, dan pemanfaatannya. Dibeberapa tahap eksplorasi panasbumi tersebut seismik alam atau seismik pasif mampu digunakan untuk memaksimalkan hasil yang diperoleh, salah satunya adalah mikrotremor. Mikrotremor adalah getaran tanah yang sangat kecil dan terus menerus yang bersumber dari jenis getaran seperti lalu lintas, angin, aktivitas manusia dan lainnya (Kanai, 1983). Karakteristik mikrotremor mencerminkan karakteristik batuan di suatu daerah. Mikrotremor digunakan untuk mengetahui keadaan bawah permukaan tanah, karakteristik lapisan tanah berdasarkan parameter periode dominan dan faktor penguatan gelombang (amplifikasi).

Mikrotremor pada lapangan panasbumi digunakan untuk mendeteksi rekahan pada zona lemah. Salah satunya yaitu adanya gempa mikro untuk mendeteksi rekahan di area panasbumi yang disebabkan karena injeksi fluida, sehingga karakteristik pengisian *recharge* retakan-retakan besar dapat mempengaruhi pengisian *reservoir* secara keseluruhan. Karakteristik *recharge reservoir* ini penting diketahui untuk melakukan pemeliharaan sehingga tidak terjadi ketimpangan air dalam *reservoir* yang pada gilirannya nanti akan mengakibatkan penurunan produksi. Selain itu pengamatan gempa mikro di sistem panasbumi melokalisasi perkiraan daerah prospek panasbumi yang dapat membantu menentukan posisi bor. Namun, teknologi yang digunakan untuk mendapatkan data tersebut masih mahal dan belum bisa digunakan banyak orang (Amiruddin dkk., 2019). Mengingat sangat bermanfaatnya metode ini, maka dilakukan penelitian terkait pemanfaatan inversi *HVSR* untuk mendapatkan model bawah permukaan menggunakan data mikrotremor dari pengukuran akselerometer berbasis arduino yang lebih terjangkau pada daerah panasbumi Way Ratai.

Akselerometer berbasis Arduino merupakan instrumen yang dirancang sebagai pendeteksi mikrotremor. Akselerometer berbasis Arduino memiliki komponen utama berupa Arduino, yang merupakan *microcontroller* yang berisi suatu rangkaian elektronik memiliki suatu *chip IC (integrated circuit)* yang dapat diprogram dengan komputer melalui Arduino *IDE* dan memiliki sifat *open source*. Serta sensor akselerometer yang dapat merespon percepatan berdasarkan getaran maupun kemiringan (Amiruddin dkk., 2019).

Data yang didapat dari pengukuran menggunakan akselerometer berbasis Arduino dapat diproses agar mendapatkan kurva *HVSR*. Dari kurva *HVSR* tersebut didapatkan parameter-parameter yang menghasilkan kecepatan gelombang geser (Persada, 2021). Dari data kurva *HVSR* dapat digunakan untuk membuat model bawah permukaan dalam bentuk 3D dengan proses inversi pada *software OpenHVSR* (Bignardi dkk., 2016). Dari model 3D hasil inversi *HVSR* nantinya dilakukan pemanfaatan agar didapatkan hubungan antara model 3D bawah permukaan dengan kondisi geologi panasbumi Way Ratai.

## 1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian pada tugas akhir ini adalah :

1. Mengaplikasikan akselerometer berbasis Arduino sebagai instrumen pendeteksi mikrotremor pada lapangan panasbumi Way Ratai.
2. Memetakan nilai frekuensi dominan dari hasil pengukuran mikrotremor menggunakan akselerometer berbasis Arduino pada lapangan panasbumi Way Ratai.
3. Melakukan pemodelan inversi 3D berdasarkan kurva *HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)* untuk melihat variasi nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ).

## 1.3 Batasan Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini terbatas pada data mikrotremor dari pengaplikasian akselerometer berbasis Arduino pada lapangan panasbumi Way Ratai yang diolah menggunakan metode *HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)* lalu dilanjutkan dengan proses inversi *HVSR* menggunakan program *MATLAB* untuk mendapatkan model 3D bawah permukaan dari persebaran nilai  $V_s$  yang kemudian dilakukan interpretasi.

## 1.4 Manfaat Penelitian

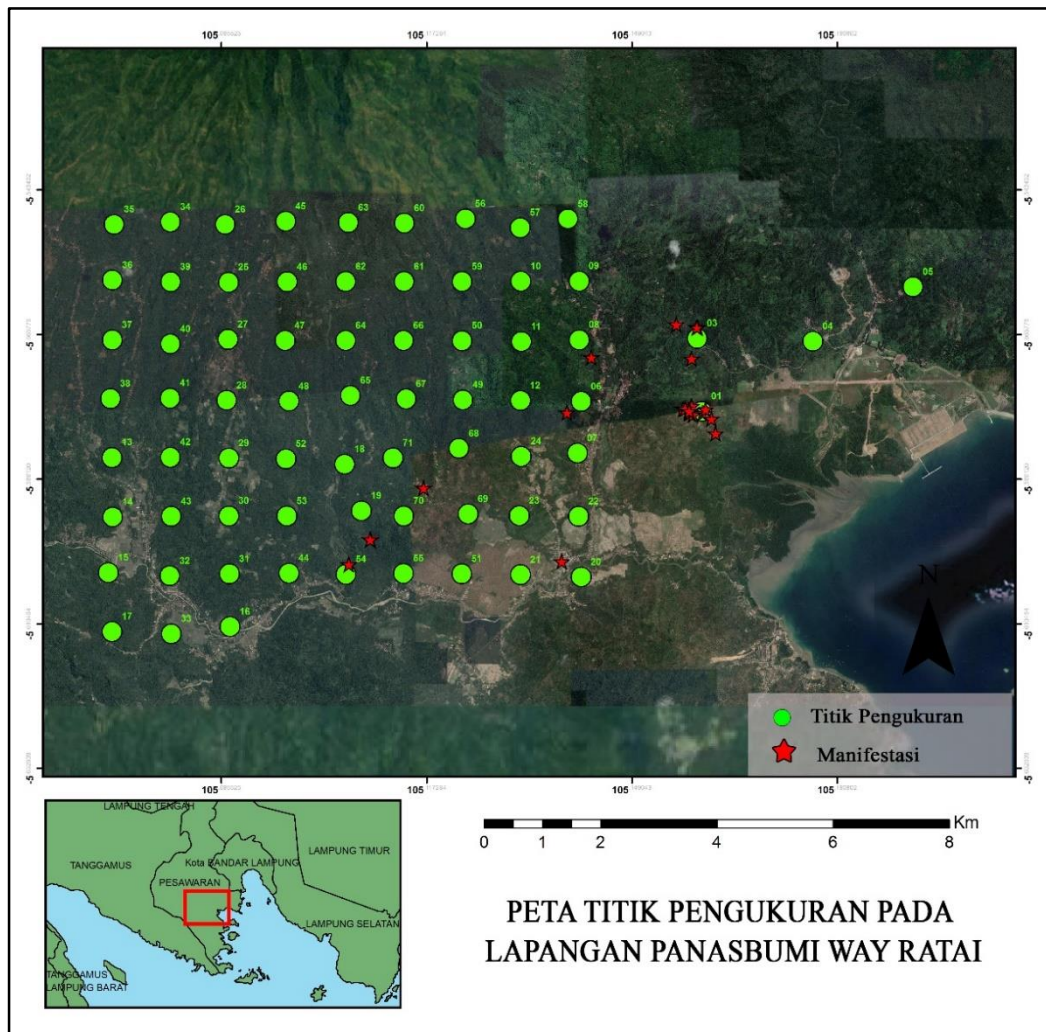
Adapun manfaat penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Didapatkan informasi guna mendukung pengembangan dari pengaplikasian akselerometer berbasis Arduino untuk mendeteksi mikrotremor pada lapangan panasbumi Way Ratai dalam pemodelan bawah permukaan
2. Data pendukung dalam pengembangan daerah panasbumi Wai Ratai

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Daerah Penelitian

Adapun daerah penelitian berada pada area lapangan panasbumi Way Ratai, Kecamatan Way Ratai serta Kecamatan Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. Berikut daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Peta letak dan lokasi penelitian

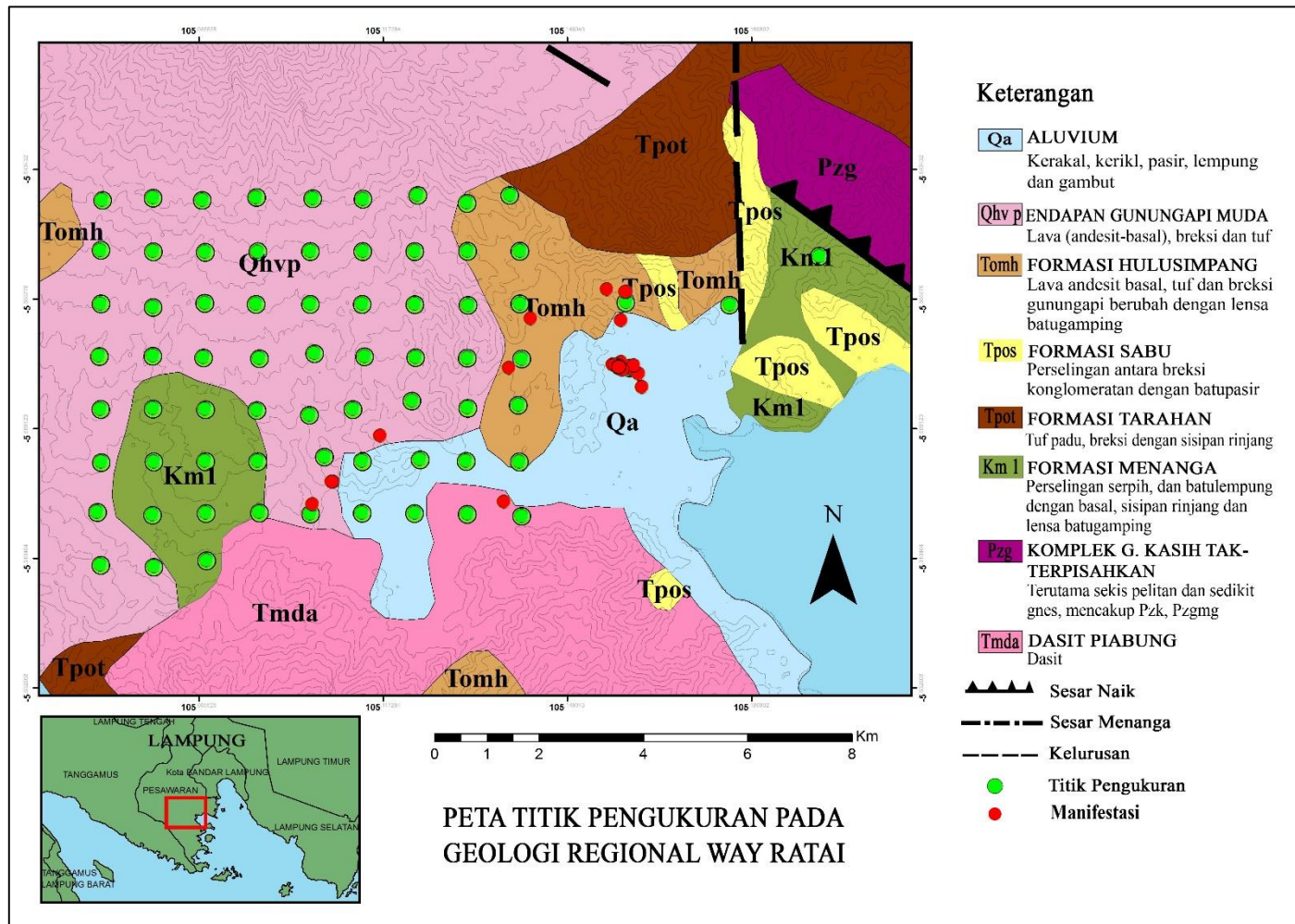
## 2.2 Geologi Regional dan Stratigrafi Way Ratai

Secara umum daerah penelitian panasbumi Way Ratai yang terletak di kabupaten Pesawaran, provinsi Lampung berada pada lembar geologi regional Tanjung Karang. Daerah penelitian ini mencakup beberapa formasi seperti formasi Gunungapi Muda, Aluvium, Hulusimpang, Sabu, Tarahan, Menanga, Dasit Piabung serta Komplek Gunung Kasih yang ditunjukkan pada **Gambar 2** yaitu peta geologi regional daerah Way Ratai.

Pada peta geologi daerah penelitian batuan didominasi oleh batuan yang merupakan produk dari Gunungapi Muda (Qhv) yang terdiri dari batuan lava (andesit-basal), breksi, dan tuff, terdapat juga Aluvium (Qa) yang terdiri atas batuan jenis batuan kerikil, pasir, lempung, dan gambut yang berumur Holosen, formasi Hulusimpang (Tomh) yang terdiri atas lava andesit basal, tuf, dan breksi gunungapi terubah dengan batugamping yang berumur Oligosen-Miosen awal, Formasi Sabu (Tpos) yang terdiri atas perselingan antara breksi konglomerat dengan batupasir berumur Paleosen-Oligosen, Formasi Tarahan (Tpot) yang terdiri dari batuan tuf padu dan breksi dengan sisipan rijang, Dasit Piabung (Tmda) terdiri dari batuan dasit, Kompleks Gunung Kasih tak terpisahkan (Pzg) formasi ini terdiri dari sekis pelitan dan sedikit gneis yang mencakup Pzk, Pzgm dan Formasi Menanga (Km) yang terdiri atas perselingan serpih, dan batulempung dengan basal, sisipan rijang, dan batugamping yang berumur Kapur awal (Mangga dkk., 1993).

Stratigrafi regional daerah ini tersusun oleh batuan-batuan dari runtunan Pra-Tersier, runtunan Tersier, runtunan Kuartar dan batuan terobosan. Runtunan Tersier terdiri dari batuan tertua adalah runtunan malihan derajat rendah-sedang, yang terdiri dari sekis, genis, pulam dan kuarsit yang termasuk kompleks Gunungkasih, kompleks Gunungkasih terdiri dari sekis, kuarsa pelitik grafitik, pualam dan sekis gampingan, kuarsit serisit, suntika migmatit, sekis amfibol dan ortogenes. Dengan asumsi bahwa penyebaran litologi ini mencerminkan keadaan geologi kompleks tersebut, memberikan dugaan kuat bahwa runtunan batuan beku malihan (Pzg) merupakan sisa-sisa busur magma Paleozoikum serta sisa-sisa runtunan sedimen malih parit atau tanah muka yang berhubungan dengan busur tersebut (Putri dkk., 2014).



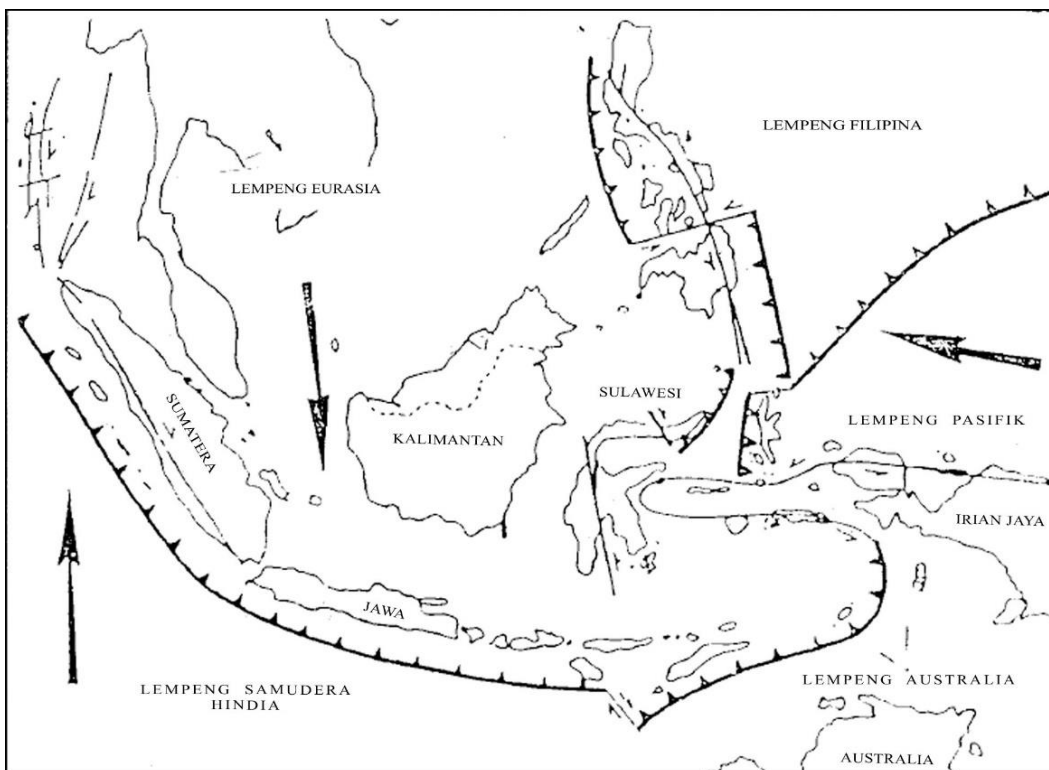


**Gambar 2.** Peta geologi regional Way Ratai (modifikasi dari Mangga dkk.,1993)

### 2.3 Tektonik Regional Daerah Penelitian

Pulau Sumatera terletak pada daerah zona tektonik aktif. Selain ditunjukkan oleh adanya zona penunjangan lempeng di bagian barat pulau, juga terdapat jalur sesar aktif dan rentetan gunung api aktif dari ujung utara Pulau Sumatera sampai daerah Selat Sunda. Pulau Sumatera terpotong oleh sesar aktif Sumatera (Semongko) dan merupakan sesar aktif terpanjang yang terdapat di Indonesia.

Tektonik di Sumatera terbentuk oleh lempeng samudra Hindia yang menunjang dari arah Barat atau barat daya kedalam pulau Sumatera di bagian Timur. Secara umum kondisi Sumatera terbentuk oleh deretan kepulauan lepas di sebelah baratnya (P. Mentawai, P. Nias dan sebagainya) yang tersusun oleh batuan sedimen tersier yang terletak di atas batuan metamorf, dan di beberapa tempat diterobos oleh batuan beku mafik dan ultra-mafik. Di sebelah timurnya terbentuk oleh cekungan busur yang terdiri dari sedimen serpih, batu gamping dan sedimen vulkanik Miosen-Pleistosen. Di tengah Pulau Sumatera terbentuk oleh busur vulkanik (*magmatic arc*) pada Pegunungan Bukit Barisan.



**Gambar 3.** Konfigurasi tektonik secara makro di Indonesia (Katili, 1973)

Pegunungan Bukit Barisan terbentuk oleh batuan sedimen berumur Mio-Pliosen yang terlipat dan terpatahkan, batuan metamorf, batuan granitic, serta terobosan batuan mafik dan vulkanik yang ditutupi oleh deretan gunung api. Gunung api tersebut terbentuk berupa deretan memanjang dan sejajar dengan garis zona penunjangan. Ke arah timur berikutnya terbentuk oleh cekungan belakang busur vulkanik (*foreland basin*) dari batuan sedimen klastik batu pasir, serpih napal, batu lempung dan batu gamping Oligosen-Pliosen. Selanjutnya sebagai inti benua terbentuk oleh batuan metamorf Pra-Tersier (Naryanto, 1997).

#### **2.4 Sistem Panasbumi Way Ratai**

Alterasi yang terdapat di permukaan dapat menggambarkan keadaan sistem panasbumi Way Ratai. Jika ditinjau dari segi hidrologi sistem panasbumi Way Ratai ditunjukkan oleh mineral hidrotermal dan *fluids inclusions*. Manifestasi berupa adanya beberapa sumur air panas dapat mengindikasikan adanya sumber panasbumi.

Proses hidrologi pada sistem panasbumi ditandai dengan adanya air hujan (*rainwater*) yang turun ke permukaan bumi kemudian akan meresap dan masuk ke dalam tanah melalui pori-pori atau saluran rongga-rongga yang ada pada butir-butir batuan. Jika kapasitas air hujan yang turun ke permukaan cukup deras, maka akan menyebabkan pori-pori butiran batuan menjadi jenuh atau terisi penuh. Bila jumlah air yang turun melebihi kapasitas yang ada, maka air akan mengalir ke tempat yang lebih rendah dari lokasi tersebut. Setiap batuan atau lapisan batuan memiliki permeabilitas atau daya serap yang berbeda tergantung dari jenis batuan tersebut. Potensi panasbumi pada daerah gunung api biasanya ditemukan struktur sesar (*fault*) dan kaldera (*caldera*) yang merupakan hasil dari aktivitas gunung ataupun proses tektonik lainnya. Kemunculan struktur tersebut bukan hanya membuka pori-pori atau rongga-rongga antar butiran yang ada, tetapi bahkan bisa menciptakan *fracture zone* yang cukup lebar dan vertikal sehingga air dapat turun ke tempat yang lebih dalam lagi dengan mudah dan sampai bertemu dengan batuan panas (*hot rock*). Air tidak lagi turun ke bawah tetapi akan bergerak menuju lapisan batuan yang masih memiliki ruang untuk dapat diisi air. Pada waktu tertentu, air kemudian terakumulasi dan terpanaskan oleh *hot rock*. Sehingga menyebabkan peningkatan temperatur air, volume serta tekanan. Pada proses ini terdapat dua wujud, yaitu yang

berwujud air panas, serta yang wujudnya berubah menjadi uap panas. Fluida panas akan menekan batuan panas yang mengelilinginya akibat dari naiknya tekanan untuk mencari jalan terobosan. Ketika fluida mendapatkan jalan yang dapat membawanya menuju arah permukaan bumi, maka dari sini akan muncul sumur-sumur air panas berupa manifestasi. Namun jika jalan untuk menerobos tidak tersedia, maka fluida panas tersebut akan tetap terperangkap di sana selamanya. Tempat fluida panas tersebut diistilahkan dengan sebutan *reservoir* panasbumi (*geothermal reservoir*). Sedangkan lapisan batuan di bagian atas yang menutupinya dinamakan sebagai *cap rock* yang bersifat impermeabel (Suharno dkk., 2016).

## 2.5 Akselerometer Berbasis Arduino

Penelitian yang dilakukan oleh Amiruddin dkk. (2019) yang bertujuan untuk membuat sistem dan program alat akselerometer yang juga direalisasikan dalam bentuk rancang bangun akselerometer berbasis Arduino, yang kemudian dilakukan validasi hasil uji pengukuran sebagai instrumen pendeteksi mikrotremor.

Rancang bangun alat akselerometer berbasis Arduino berbentuk *box* dengan ukuran 18,5 cm x 12 cm x 7 cm. Bagian alas *box* terbuat dari bahan plat besi yang dapat merambatkan getaran dengan baik dan tutup *box* terbuat dari mika. Rancang sistem elektronik dan pemrograman akselerometer berbasis Arduino dibuat dengan program yang dapat bekerja dengan efisien dari segi kecepatan dan energi yang dibutuhkan saat bekerja dengan *sampling rate* pengambilan data maksimal 500/s.

Berdasarkan hasil uji validasi alat yang dilakukan oleh Amiruddin (2019), nilai  $f_0$  dari kurva *HVSR* pada alat akselerometer berbasis Arduino disandingkan dengan hasil alat *Reftek accelerograph*, didapatkan selisih terkecil antara kedua alat pengukuran, yaitu 0,00725 Hz di titik 1 dan selisih terbesar yaitu 0,129 Hz di titik 3 Rata-rata selisih antara kedua nilai  $f_0$  pengukuran yaitu 0,037 Hz.

### **III. TEORI DASAR**

#### **3.1 Teori Gelombang Seismik**

Gelombang seismik dapat dibedakan berdasarkan tempat penjararannya yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang tubuh yaitu gelombang yang arah rambatannya masuk ke bawah permukaan bumi terdiri atas gelombang kompresional (gelombang longitudinal atau *P-wave*) dan gelombang geser (gelombang transversal atau *S-wave*). Gelombang P memiliki ciri arah gerakan partikel dalam medium searah dengan arah perambatan gelombang sedangkan gelombang S arah perambatannya tegak lurus dengan gerak partikel dalam medium. Gelombang permukaan merupakan gelombang seismik yang arah rambatannya hanya pada batas permukaan medium. Berdasarkan pada sifat gerakan partikel media elastik, gelombang permukaan merupakan gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar, yang menjalar akibat adanya efek *free surface* dimana terdapat perbedaan sifat elastis. Jenis dari gelombang permukaan ada dua yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *Love* (Telford dkk., 1976).

##### **3.1.1 Penjelasan gelombang badan (*body wave*)**

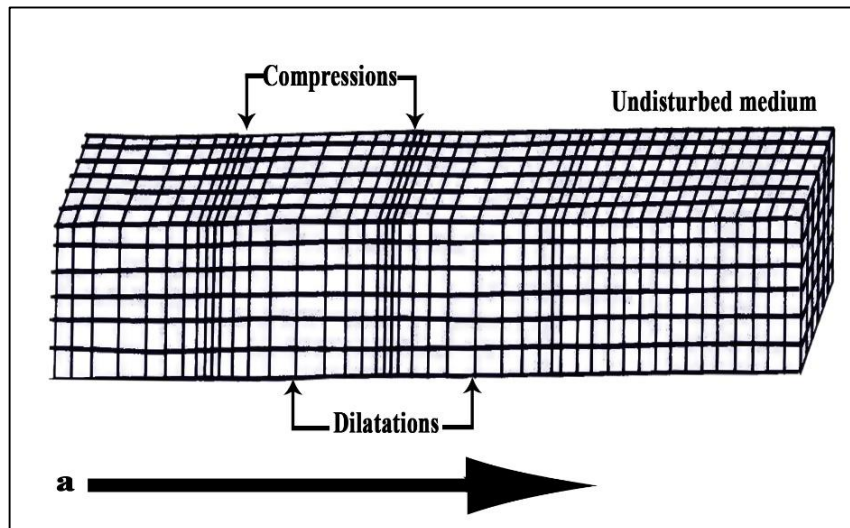
Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam medium elastik dan arah rambatannya ke seluruh bagian di dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjararannya, gelombang dibedakan atas gelombang P dan gelombang S.

##### **a. Gelombang Primer (P)**

Gelombang Primer atau gelombang kompresi merupakan gelombang badan (*body wave*) yang memiliki kecepatan paling tinggi dari gelombang S. Gelombang

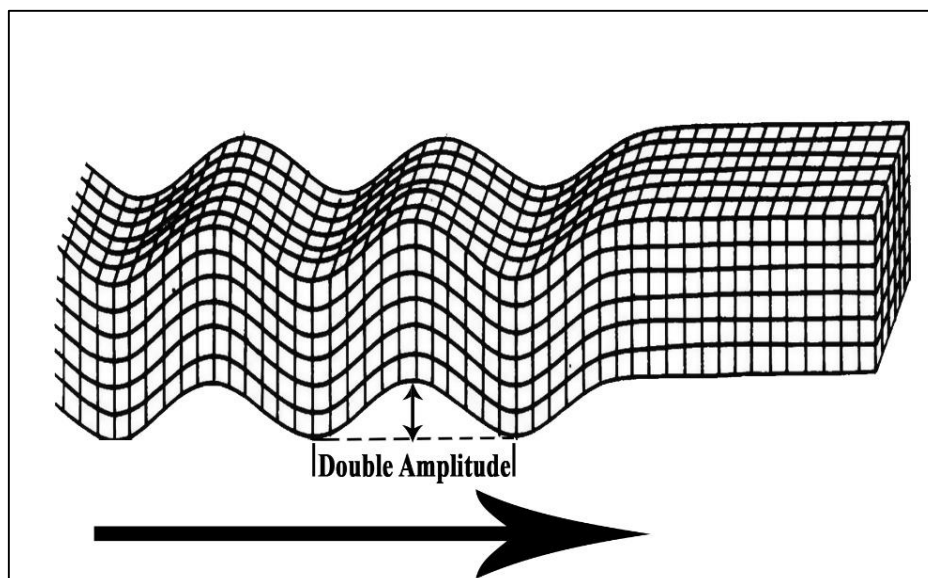
ini merupakan gelombang longitudinal partikel yang merambat bolak balik dengan arah rambatnya. Gelombang ini terjadi karena adanya tekanan.

Karena memiliki kecepatan tinggi gelombang ini memiliki waktu tiba terlebih dahulu dari pada gelombang S. Kecepatan gelombang Primer ( $V_p$ ) adalah  $\pm 5-7$  km/s di kerak bumi,  $> 8$  km/s di dalam mantel dan inti bumi,  $\pm 1,5$  km/s di dalam air, dan  $\pm 0,3$  km/s di udara.



**Gambar 4.** Ilustrasi gerak gelombang primer (modifikasi dari Hidayati, 2010)

b. Gelombang Sekunder (S)



**Gambar 5.** Ilustrasi gerak gelombang sekunder (modifikasi dari Hidayati, 2010)

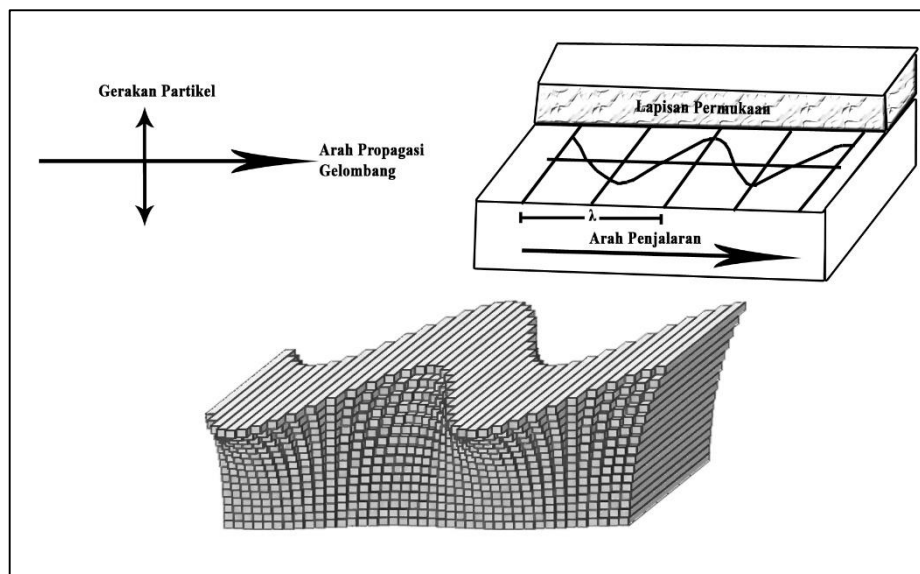
Gelombang S atau gelombang transversal (*shear wave*) adalah salah satu gelombang badan (*body wave*) yang memiliki gerak partikel tegak lurus terhadap arah rambatnya serta waktu tibanya setelah gelombang P. Gelombang ini tidak dapat merambat pada fluida, sehingga pada bagian inti bumi bagian luar tidak dapat terdeteksi sedangkan pada inti bumi bagian dalam mampu dilewati. Kecepatan gelombang S ( $V_s$ ) adalah  $\pm 3-4$  km/s di kerak bumi,  $>4,5$  km/s di dalam mantel bumi, dan  $2,5-3$  km/s di dalam inti bumi.

### 3.1.2 Penjelasan gelombang permukaan (*surface wave*)

Gelombang permukaan merupakan gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar, yang menjalar akibat adanya efek *free surface* dimana terdapat perbedaan sifat elastik. Gelombang ini dapat menjelaskan struktur mantel atas dan permukaan kerak bumi (*crust*). Sifat dan gerakan partikel media pada permukaan ada yang mirip gelombang P atau gelombang S. Didasarkan pada sifat gerakan partikel media elastik, terdapat dua tipe gelombang permukaan, yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *love*.

#### a. Gelombang *Love*

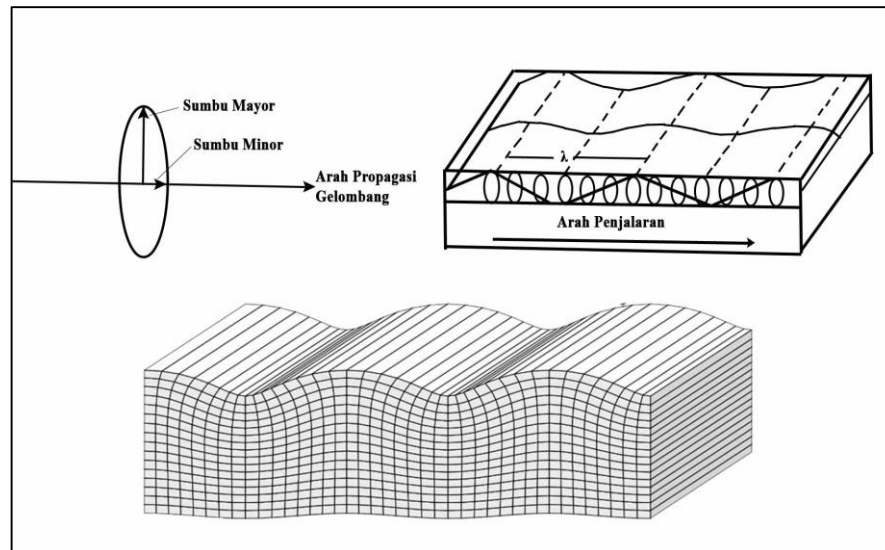
Gelombang ini merupakan gelombang yang arah rambat partikelnya bergetar melintang terhadap arah penjarannya. Gelombang *Love* merupakan gelombang transversal, kecepatan gelombang ini di permukaan bumi ( $V_L$ ) adalah  $\pm 2-4,4$  km/s.



**Gambar 6.** Ilustrasi gerak gelombang *love* (modifikasi dari Hidayati, 2010)

b. Gelombang *Rayleigh*

Gelombang *Rayleigh* merupakan jenis gelombang permukaan yang memiliki kecepatan ( $V_R$ ) adalah  $\pm 2-4,2$  km/s di dalam bumi. Arah rambatnya bergerak tegak lurus terhadap arah rambat dan searah bidang datar.



**Gambar 7.** Ilustrasi gerak gelombang *rayleigh* (modifikasi dari Hidayati, 2010)

### 3.2 Karakteristik Mikroseismik, *Microearthquake* dan Mikrotremor

Sisi lain dari gelombang seismik yaitu gelombang mikroseismik (*microseismic wave*). Yang membedakan dengan gelombang seismik bukan hanya frekuensi dan amplitudonya yang jauh lebih kecil akan tetapi sumber gelombangnya juga bukan berasal dari pusat terjadinya gempa bumi. Tentunya ada perbedaan antara gelombang mikroseismik (*microseismic wave*) dan gelombang gempa bumi kecil (*micro-earthquake wave*).

*Microearthquake* mempunyai karakteristik yang sama dengan gelombang seismik karena proses kejadiannya sama dengan proses terjadinya gelombang seismik. Yang membedakan keduanya hanyalah pada frekuensi dan amplitudo yang jauh lebih kecil dan tentunya dampak yang diakibatkannya. Pada gelombang *microearthquake* manusia tidak perlu untuk menyiapkan langkah preventif untuk mengatasi dampak dari gelombang ini karena memang tidak akan sampai pada taraf merusak yang membahayakan bagi kelangsungan hidup manusia. Gelombang ini memiliki karakteristik sendiri dan bukan berasal dari gempa bumi. Mikrotremor dapat juga disebut dengan suatu getaran yang memiliki periode pendek yang



merupakan akumulasi akibat dari efek gelombang laut, interaksi angin dengan tanaman dan kegiatan atmosfer (Toiba dkk., 2016).

Mikrotremor awalnya digunakan untuk mempelajari serta mengetahui karakteristik dari batuan sedimen struktur tanah bawah permukaan berhubungan dengan daerah dinamis pada suatu titik pengukuran. Mikrotremor biasa disebut juga sebagai *ambient noise*. *Ambient noise* adalah suatu getaran yang berasal dari tanah dengan amplitudo tertentu serta dapat menggambarkan keadaan geologi pada daerah tersebut yang diakibatkan oleh peristiwa alam maupun buatan, seperti angin, getaran kendaraan atau gelombang laut. Pada penelitian mikrotremor berdasarkan parameter periode dominan dan amplifikasi maka dapat diketahui karakteristik lapisan tanah. Dan parameter yang terukur antara lain frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan ketebalan sedimen. Mikrotremor adalah getaran tanah yang secara terus menerus dan sangat kecil yang berasal dari getaran aktivitas manusia, angin, lalu lintas, dan lain-lain (Kanai, 1983).

Metode mikroseismik adalah metode yang banyak berperan dalam beberapa bidang seperti eksplorasi gas bumi dan minyak bumi, panasbumi, pembelajaran struktur dalam bumi, studi kegunungapian serta kegempaan. Alat mikroseismik harus bisa mengidentifikasi adanya peluruhan getaran yang ada pada medium, bersama dengan *broadband* seismometer mengukur secara *real time* pergerakan tanah kemudian direkam sebagai fungsi waktu. Mikroseismik adalah aktivitas gelombang seismik yang memiliki ukuran kecil, sama dengan proses gempabumi namun belum pasti dirasakan oleh manusia.

Metode mikroseismik dapat mengancam keberadaan metode seismik konvensional. Prinsipnya yaitu *geophone* ditanamkan dengan kedalaman tertentu. Sumber mikroseismik terbanyak yaitu diperoleh dari peristiwa kompaksi yang disebabkan oleh adanya *overburden*. Secara tidak langsung, metode mikroseismik juga mampu mendeteksi adanya peristiwa *overburden*. Salah satu masalah dalam metode mikroseismik ialah adanya pemikiran lama yaitu keberadaan *geophone* harus dekat dengan sumber. Namun hal ini mampu diatasi dengan memasang ratusan sampai ribuan *geophone* untuk menciptakan sejenis mikrofon parabola yang mampu mendeteksi secara bersamaan beberapa peristiwa mikroseismik. Hal ini dikarenakan mikroseismik dapat menentukan lokasi sumber, yang berasal banyak

dari *fracture* atau kompaksi, sehingga dapat diketahui jarak antara lokasi dengan komponen mikroseismik yang penting. Pemanfaatan metode mikroseismik dapat dilakukan diberbagai sektor, diantaranya yaitu mikrotremor panasbumi dan hidrokarbon (minyak dan gas bumi).

Secara umum, sinyal mikroseismik terproses dan terekam hampir sama dengan sinyal gempa tektonik. Namun, pada analisis sinyal gempa tektonik membahas magnitudo diatas 5 Mw, sedangkan analisis gempa mikro di wilayah geothermal berada pada magnitudo kurang dari 3 Mw (Julian dan Foulger, 2009). Pertama sinyal kontinu yang terekam dianalisis menggunakan deteksi algoritma gempabumi agar dapat mengetahui kapan sumber energi impulsif muncul. Selanjutnya seismogram akan menyimpan sinyal termasuk beberapa *trigger time window* yang digunakan untuk menangkap data dalam bentuk sinyal digital. Pada aplikasi *borehole*, sensor triaxial ini digunakan untuk menjelaskan mengenai orientasi *raypath* dari fase insiden. Pada pemodelan kecepatan secara detail dalam industri minyak dan gas bisa direkonstruksi melalui *sonic logs* dan *event location* dikalkulasi pada titik yang sesuai dengan analisa waktu tiba pada beda fase dan orientasi *raypath*. Atribut seismik yang dapat didapatkan dari perekaman ini yang didefinisikan melalui frekuensi dan amplitudo yaitu magnitudo, asumsi dari beberapa patahan dari *stress* dan energi potensial, serta zona area patahan dapat bermanfaat untuk interpretasi dari seismik ini dan bisa langsung terkomputasi (Haerudin dkk., 2019).

### **3.3 Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR)***

Nakamura (1989) mengusulkan metode *HVSR* untuk mengestimasi frekuensi alami dan amplifikasi geologi setempat dari data mikrotremor. Metode ini juga dapat digunakan untuk melokalisasi daerah rawan kerusakan bangunan akibat efek lokal, interaksi antara bangunan dan tanah, dan kekuatan bangunan.

*HVSR* merupakan salah satu cara untuk memahami sifat struktur bawah permukaan tanpa menyebabkan gangguan pada struktur tersebut. Metode ini merupakan metode yang memperlihatkan hubungan antara struktur bawah permukaan tanah dengan perbandingan rasio spektrum *Fourier* dari sinyal mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya (Nakamura,

1989). Metode *HVSR* dapat menunjukkan jenis tanah yang berdasarkan dari nilai frekuensi dominan, yang tentunya sangat membantu dalam pengaplikasian bawah permukaan seperti klasifikasi kerentanan tanah atau referensi untuk membangun konstruksi yang tahan gempa (Haeruddin dkk., 2020).

Metode *HVSR* menghasilkan parameter penting yaitu nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi yang berkaitan dengan parameter fisik bawah permukaan. Metode *HVSR* dapat menjelaskan fenomena frekuensi resonansi lapisan permukaan tanpa harus menggunakan referensi dari batuan *bedrock*, yaitu dengan melakukan pengukuran di satu tempat dan menghasilkan tiga komponen yaitu vertikal, horizontal utara-selatan, dan horizontal timur-barat. Metode ini juga berfungsi untuk mengidentifikasi respon resonansi pada lembah sedimen atau cekungan yang berisi material sedimen. Metode ini merupakan metode yang efektif, murah, dan ramah lingkungan yang dapat digunakan pada wilayah pemukiman.

Dalam karakterisasi *HVSR*, perlu diketahui model gelombang yang terkandung dalam *HVSR* terlebih dahulu. Ada beberapa perbedaan pendapat tentang model gelombang yang terkandung dalam *HVSR*. Nakamura (2000) berpendapat bahwa *HVSR* merupakan gelombang badan, yakni gelombang *SH* (*Sekunder-Horizontal*). Sylvette, dkk. (2006) menunjukkan bahwa *HVSR* terpengaruh oleh gelombang permukaan yakni gelombang *Love* dan *Rayleigh*. Nakamura (1989) mengembangkan konsep bahwa amplitudo dan frekuensi puncak *HVSR* merepresentasikan amplifikasi dan frekuensi lokasi (*site*) setempat. *Site effect* terjadi akibat keberadaan lapisan tanah lunak yang menempati setengah cekungan dari batuan dasar. Dalam kondisi ini ada empat komponen gerakan yang terlibat, yaitu komponen gerak horizontal dan vertikal di batuan dasar dan komponen gerak horizontal dan vertikal di permukaan (Arifti, 2014). Faktor amplifikasi dari gerakan horizontal dan vertikal di permukaan tanah sedimen berdasarkan pada gerakan seismik di permukaan tanah yang bersentuhan langsung dengan batuan dasar di area cekungan dilambangkan dengan  $T_H$  dan  $T_V$  (Nakamura, 2000).

*Site Effect* ( $T_{SITE}$ ) pada permukaan lapisan sedimen, biasanya digambarkan dengan cara membandingkan faktor amplifikasi dari gerakan horizontal dan vertikal pada permukaan tanah sedimen.

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} \quad (1)$$

Besarnya faktor amplifikasi horizontal  $T_H$  adalah:

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (2)$$

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

Besarnya faktor amplifikasi vertikal  $T_V$  adalah:

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3)$$

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

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

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1 \quad (4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan amplifikasi horizontal dengan amplifikasi vertikal dimasukkan dalam amplifikasi horizontal dan vertikal pada permukaan tanah sedimen:

$$T_{SITE} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (5)$$

Persamaan tersebut menjadi dasar perhitungan rasio spektrum mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya (*HVSR*), sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$HVSR = T_{SITE} = \sqrt{\frac{f(S_{Utara-Selatan})^2 + (S_{Barat-Timur})^2}{S_{vertikal}}} \quad (6)$$

Agar mendapatkan kurva *HVSR* yang *reliable* ada beberapa kriteria yang perlu diperhatikan (SESAME, 2004), kriteria-kriteria penting tersebut ditampilkan dalam tabel berikut:

**Tabel 1.** Kriteria-kriteria untuk mendapatkan kurva *HVSR* yang *reliable* (SESAME, 2004).

No	Kriteria-kriteria untuk <i>HVSR Reliable</i>
1	$f_0 > 10/l_w$
2	$n_c(f_0) > 200$
3	$\partial_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5$ Hz dan $\partial_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5$ Hz

Dimana frekuensi  $f_0$  pada puncak H/V,  $l_w$  panjang dari *window* dan  $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$  dengan  $n_w$  merupakan jumlah *window* yang dipilih. Dan untuk  $\partial_A(f)$  merupakan deviasi standar dari  $A_{H/V}(f)$  atau *amplitude* kurva H/V dari frekuensi.

### 3.4 Frekuensi Dominan Lapisan Batuan

Frekuensi dominan adalah nilai frekuensi yang kerap muncul sehingga diakui sebagai nilai frekuensi dari lapisan batuan di wilayah tersebut sehingga nilai frekuensi dapat menunjukkan jenis dan karakteristik batuan tersebut. Dalam kajian teknik kegempaan, litologi yang lebih lunak mempunyai resiko yang lebih tinggi bila digoncang gelombang gempabumi, karena akan mengalami penguatan (amplifikasi) gelombang yang lebih besar dibandingkan dengan batuan yang lebih kompak.

**Tabel 2.** Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan mikrotremor oleh Kanai (Arifin, 2014).

Klasifikasi Tanah		Frekuensi Dominan (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi Tanah
Jenis	Tipe			
Jenis I	Tipe IV	6,7 - 20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>hard sandy, gravel</i> , dll	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tipis, dan didominasi oleh batuan keras.
Jenis II				

Jenis III	Tipe III	4 - 6,7	Batuan aluvial dengan ketebalan sedimen 5 meter. Terdiri dari <i>sandy- gravel, sandy hard clay, loam, dll</i>	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori menengah, sekitar 5-10 meter
Jenis IV	Tipe II	2,5 - 4	Batuan aluvial dengan ketebalan sedimen > 5 meter. Terdiri dari <i>sandy- gravel, sandy hard clay, loam, dll</i>	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10-30 meter
	Tipe I	<2,5	Batuan aluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur, dll. Dengan kedalaman 30 meter atau lebih	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tebal

### 3.5 Program *OpenHVS*R Sebagai Software Pemodelan

*OpenHVS*R adalah program komputer *open source* yang dikembangkan dalam bahasa pemrograman Matlab, program ini dirancang untuk pemodelan dan inversi simultan dari kumpulan data *HVS*R massif yang nantinya digunakan untuk memodelkan bawah permukaan baik secara 2D maupun 3D (termasuk juga topografi). Program komputer *OpenHVS*R menyediakan sebuah program yang mampu menangani kumpulan besar kurva *HVS*R, untuk mendapatkan hasil maksimal dari data mikrotremor yang telah diolah dalam waktu yang lebih singkat dan memungkinkan untuk mengintegrasikan dengan geologi sekitar. *OpenHVS*R yang dikembangkan di lingkungan Matlab digunakan untuk simulasi dan inversi dataset *HVS*R masif dengan tujuan memodelkan bawah permukaan 2D / 3D dari parameter *viscoelastic*.

Pada proses inversi menggunakan *OpenHVS*R, data masukan terdiri dari kurva *HVS*R yang diperoleh setelah pengolahan data lapangan dengan menggunakan perangkat lunak pihak ketiga (misalnya *Grilla, Geopsy, dll.*). *OpenHVS*R menerapkan *Forward Modeling (FWD)* yang ada pada *modelHVS*R yang dikembangkan oleh Herak (2008), yang tersedia juga di Fortran. Algoritma inversi ini didasarkan pada metode *Monte Carlo*, sepenuhnya dapat disesuaikan dan menerapkan banyak fitur baru yang belum ada pada penelitian sebelumnya. *FWD*

menghitung fungsi transfer teoritis dari lapisan bawah permukaan berdasarkan pendekatan Tsai dan Housner (1970), di mana bawah permukaan direpresentasikan sebagai kumpulan lapisan homogen viskoelastik di setengah ruang dan dijelaskan dalam istilah ketebalan ( $H$ ), kepadatan ( $Rho$ ), kecepatan gelombang tekan dan geser ( $Vp$ ,  $Vs$ ) dan faktor atenuasi yang sesuai ( $Qp$ ,  $Qs$ ), yang bergantung pada frekuensi dan mengikuti.

$$Q = Q_0 f^k. \quad (7)$$

Dimana  $Q_0$  adalah faktor atenuasi pada kondisi 1 Hz dan  $k$  adalah konstanta yang diestimasi tetap untuk semua titik pengukuran. Dispersi gelombang badan (*body waves*) dianggap memenuhi logaritma Aki dan Richards:

$$v(f) = v(f_{ref}) [1 + (\pi Q_0)^{-1} \ln(f/f_{ref})] \quad (8)$$

Dimana  $v(f)$  merupakan nilai kecepatan gelombang dengan pembanding kecepatan referensi. Untuk setiap lokasi, ditentukan model lokal 1-D bawah permukaan. FWD digunakan untuk menghitung spektrum amplifikasi gelombang badan dan gelombang permukaan berdasarkan kurva *HVSR*. Untuk mendapatkan nilai  $Vs$  yang akurat, diperlukan konstrain saat proses inversi kurva *HVSR*, dalam hal ini dapat menggunakan data bor yang diberikan untuk inisialisasi atau input yang dimasukkan saat menginversi (Bignardi dkk, 2016).

### 3.6 Inversi *HVSR* Berdasarkan Metode *Monte Carlo*

Pada *software* yang dikembangkan oleh Herak, yaitu Model *HVSR* terdapat modul *INV\_HVSR* (*Inversi Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) adalah modul yang menginversikan kurva *HVSR* hasil pengukuran untuk menemukan model bawah tanah yang menggambarannya. Algoritma ini didasarkan pada kombinasi yang sederhana dan dalam pencarian ruang model didasarkan pada metode *Monte Carlo* yang meminimalkan fungsi *misfit*.

$$m = \sum_i \{ [HVSR_{OBS}(f_i) - HVSR_{THE}(f_i)] W_i \}^2 \quad (9)$$

Dengan OBS dan THE adalah singkatan observasi dan teoritis dari kurva *HVSR* serta  $W_i$  adalah pembobotan yang didefinisikan sebagai berikut:

$$W_i = [HVSR_{OBS}(f_i)]^E \quad E \geq 0 \quad (10)$$

Metode Monte Carlo dimulai dengan model awal yang parameternya dipengaruhi oleh nilai *random* dengan batas yang ditentukan. Nilai *random* (acak) dipilih dari distribusi *uniform* atau normal, yang parameternya telah ditentukan (Herak, 2008).

### 3.7 Pengaruh Litologi Terhadap Kecepatan Gelombang Geser ( $V_s$ )

Kecepatan gelombang seismik biasanya dipengaruhi oleh litologi yang terdapat di bawah permukaan. Lapisan yang berbeda akan mengindikasikan *range* nilai kecepatan seismik yang berbeda, hal ini dikarenakan oleh komponen penyusun lapisan yang berbeda-beda. Dan juga setiap lapisan batuan memiliki tingkat kekerasan yang berbeda-beda, dari tingkat kekerasan yang berbeda-beda ini yang menyebabkan perbedaan elastisitas yang juga menyebabkan gelombang seismik merambat melalui lapisan batuan dengan kecepatan yang berbeda-beda. Dari kecepatan gelombang seismik kita dapat mengetahui litologi bawah permukaan. Berdasarkan pada table  $V_s$  dapat diketahui litologi yang beracuan pada peta geologi (Umam, 2020).

**Tabel 3.** Klasifikasi *site* berdasarkan nilai  $V_s$  hasil penyelidikan tanah dan laboratorium SNI 1726 (Badan Standarisasi Nasional, 2010).

No	Klasifikasi <i>Site</i>	Kecepatan gelombang geser $V_s$ (m/s)
1	Batuan Keras	$V_s \geq 1500$
2	Batuan	$750 < V_s \leq 1000$
3	Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak	$350 < V_s \leq 750$
4	Tanah Sedang	$175 < V_s \leq 350$
5	Tanah Lunak	$< 175$

**Tabel 4.** Tabel nilai  $V_s$  pada beberapa batuan oleh Daryono (Persada dkk., 2021).

No	Batuan	Nilai $V_s$ (m/s)
1	Granit	3500-3800
2	Dolerit	2960-3450
3	Andesit	2440-3500
4	Basal	3600-3700
5	Lempung	380-1000



## **IV. METODE PENELITIAN**

### **4.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan mulai dari bulan April 2021 di Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika, Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

### **4.2 Alat dan Bahan Penelitian**

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian antara lain:

- a. *GPS*
- b. *Main unit Accelerometer berbasis Arduino.*
- c. *Logbook* dan Alat Tulis
- d. Lembar Peta Daerah Penelitian
- e. Peta Geologi
- f. Laptop
- g. *Software Microsoft Office*
- h. *Software Geopsy*
- i. *Software Matlab*
- j. *Software Oasis Montaj*
- k. *Software Arcgis 10.3*

### **4.3 Jadwal Penelitian**

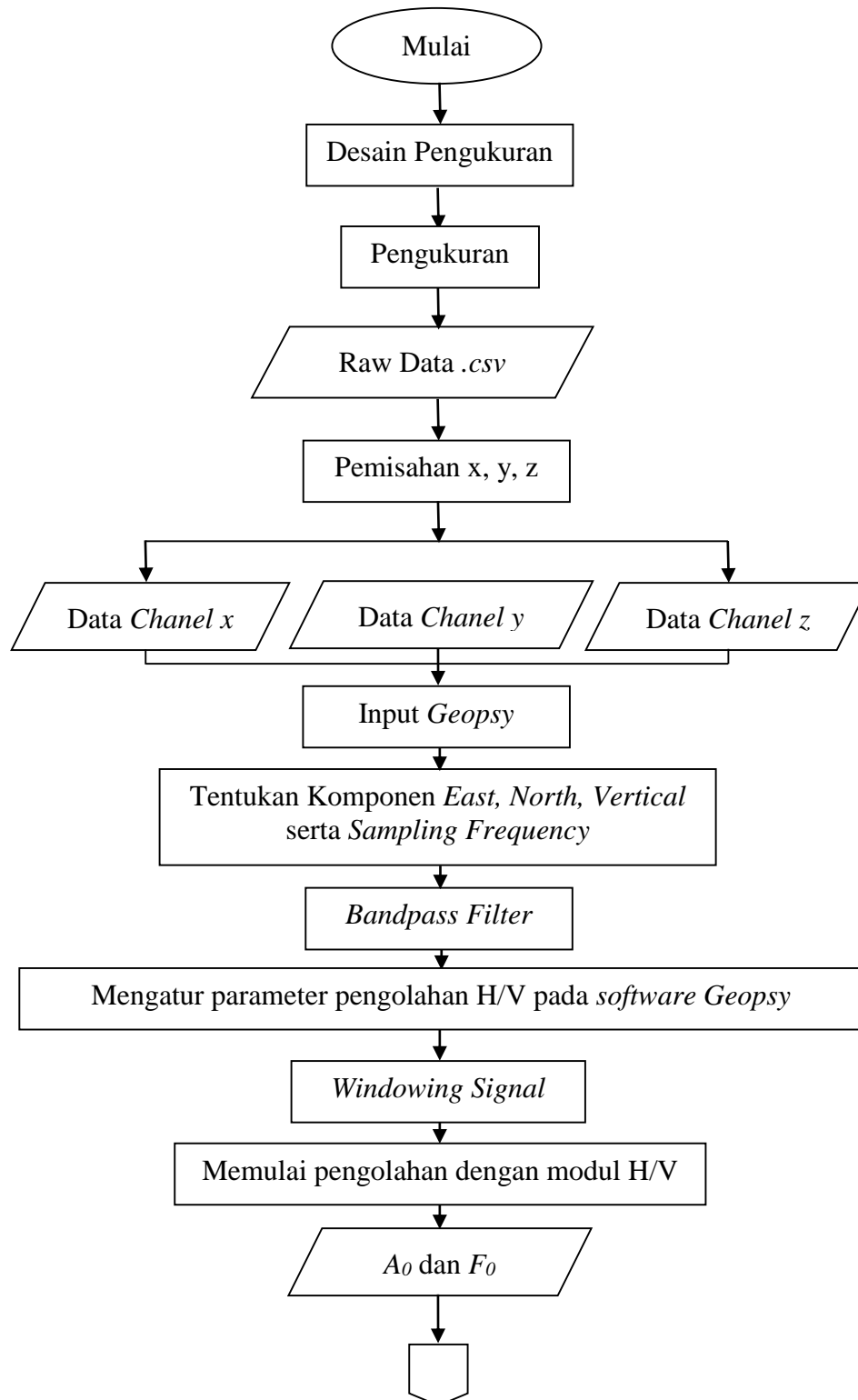
Adapun rincian waktu jadwal penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 5.**

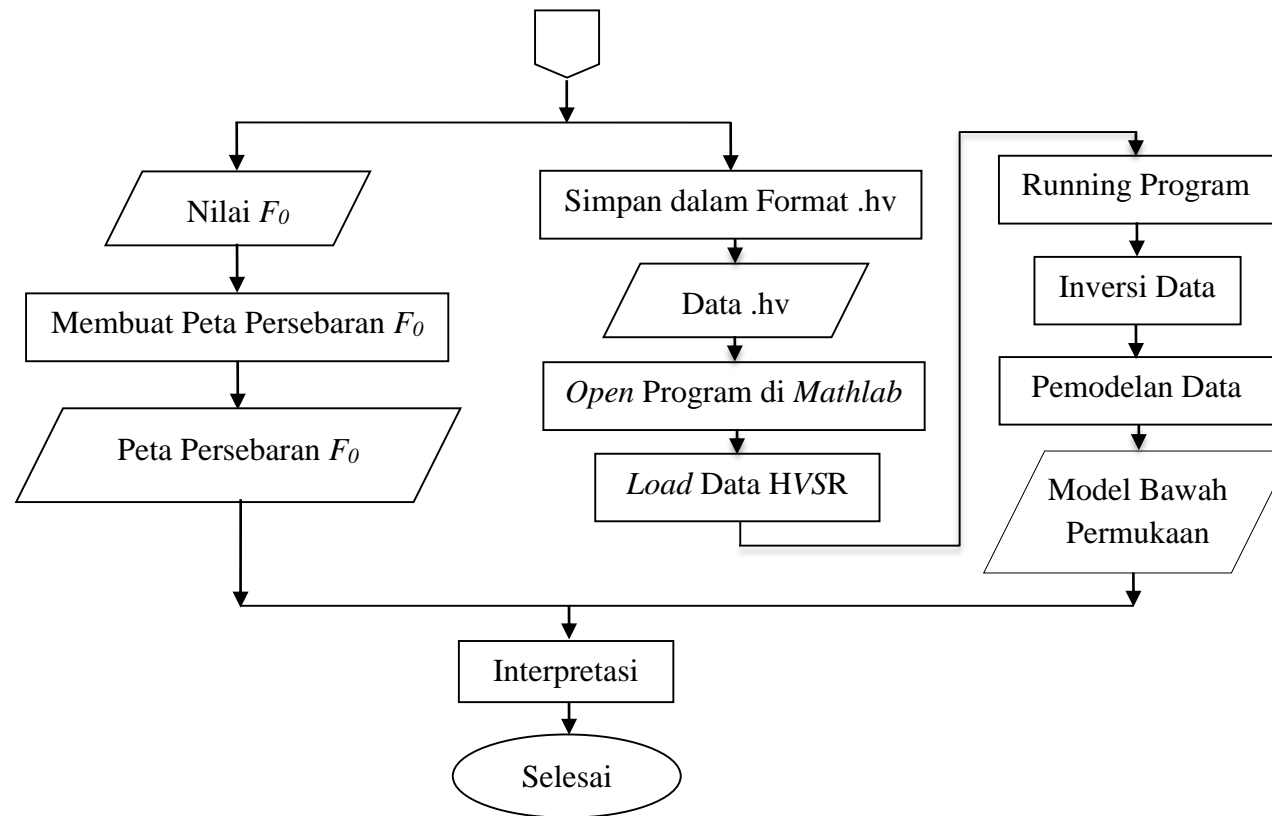
**Tabel 5.** Jadwal penelitian tugas akhir

No	Kegiatan	April				Mei				Juni				Juli				Agustus				Septem				Oktober				Nov		
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
1	Studi literatur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	Pengumpulan Data	■	■																													
3	Penyusunan Laporan Usul		■	■																												
4	Bimbingan Seminar Usul			■	■																											
5	Seminar Usul				■																											
6	Revisi					■	■	■	■																							
7	Pengolahan Data									■	■	■	■																			
8	Analisis Data													■	■	■																
9	Penyusunan Laporan Hasil																■	■	■	■												
10	Bimbingan Seminar Hasil																				■	■	■	■								
11	Seminar Hasil																					■										
12	Revisi																						■	■	■	■						
13	Bimbingan dan Fiksasi Laporan																											■	■			
14	Sidang Komprehensif																													■		

#### 4.4 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 8**.





**Gambar 8.** Diagram alir penelitian

#### 4.5 Prosedur Penelitian

##### 1. Studi Literatur dan Desain Pengukuran

Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep dasar dari geologi panasbumi maupun geofisika dari penelitian yang dilakukan.

##### 2. Pengukuran

Pengukuran dilakukan pada lapangan panasbumi Way Ratai menggunakan akselerometer berbasis Arduino dengan jumlah titik pengukuran sebanyak 70 titik yang memiliki jarak antar titik kurang lebih 500 meter.

##### 3. Tahap Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari pengukuran lapangan, diolah menggunakan *software Geopsy* untuk mendapatkan nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) melalui proses analisis *HVSR*.

##### 4. Inversi *HVSR*

Pada proses inversi ini menghasilkan pencitraan bawah permukaan. Pencitraan didapatkan dari interpolasi model kecepatan gelombang seismik, terutama gelombang  $V_s$  pada bawah permukaan masing-masing titik pengamatan. Nilai dari model kecepatan lapisan bawah permukaan menggambarkan pelapisan di bawah permukaan.

##### 5. Interpretasi

Hasil dari pemodelan inversi *HVSR* didapatkan nilai sebaran  $V_s$  yang dikorelasikan dengan geologi regional daerah penelitian guna didapatkan kontras antara zona-zona penciri panasbumi dengan wilayah sekitar.

## **VI. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **6.1 Kesimpulan**

Dari hasil penelitian yang telah dibahas dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dari hasil pengukuran mikrotremor menggunakan akselerometer berbasis Arduino yang diolah, didapatkan peta persebaran frekuensi dominan serta model bawah permukaan dari persebaran kecepatan gelombang geser.
2. Sebaran nilai frekuensi dominan pada lapangan panasbumi Way Ratai yang dihasilkan didominasi oleh klasifikasi jenis IV tipe I dan tipe II berkisar 0.60 Hz - 3.68 Hz. Tersebar mulai dari bagian selatan yang memiliki nilai frekuensi tinggi, pada daerah timur laut dan barat laut terdapat juga sebaran frekuensi tinggi dari sekitarnya. Dan pada bagian tenggara pada peta daerah penelitian ini memiliki frekuensi rendah, hal ini berhubungan dengan lokasi yang berbatasan langsung dengan laut.
3. Sebaran kecepatan gelombang geser dari penampang 3D yang didapatkan kebanyakan berada pada nilai kurang dari 350 m/s yang didefinisikan sebagai lapisan tanah sedang mulai dari kedalaman 0-30 meter.

### **6.2 Saran**

Mengingat nilai frekuensi dominan yang diperoleh dari pengolahan data mikrotremor menggunakan akselerometer berbasis Arduino belum mampu mendelegasi dengan tegas jenis serta karakteristik dari daerah penelitian, maka diperlukan data mikrotremor pembanding dari alat pengukur mikrotremor lain yang digunakan untuk memvalidasi ulang alat pengukur mikrotremor akselerometer berbasis Arduino.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amiruddin, A., Suharno, dan Karyanto. 2019. Desain dan Realisasi Accelerometer Berbasis Arduino Sebagai Instrumen Pendeteksi Mikrotremor. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, (03), 162-173.
- Arifti, F. W., 2014. Identifikasi Potensi Bahaya Seismik Berdasarkan Faktor Amplifikasi Tanah dan Ketebalan Sedimen Menggunakan Mikrotremor di Kecamatan Pacitan, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur. *Skripsi*. UIN Sunan Kalijaga. Yogyakarta.
- Arifin, S. S. 2014. Penentuan Zona Rawan Guncangan Bencana Gempa Bumi Berdasarkan Analisis Nilai Amplifikasi *HVSR* Mikrotremor dan Analisis Periode Dominan Daerah Liwa dan Sekitarnya. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 2(01), 30-40.
- Bignardi, S., AbuZeid, N., dan Montovani, A. 2016. *OpenHVSR*: Imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple *HVSR* modeling and inversion. *Journal Computers and Geosciences* 93 103–113.
- Ghazali, I. 2017. Estimasi Kecepatan Gelombang Geser ( $V_s$ ) Berdasarkan Inversi Mikrotremor *Spectrum Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR)* Studi Kasus: Tanah Longsor Desa Olak Alen, Blitar. *Skripsi*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember

- Haerudin, N., Alami, F., dan Rustadi. 2019. *Mikroseismik, Mikrotremor dan Microearthquake dalam Ilmu Kebumihan*. Pusaka Media. Bandar Lampung.
- Haerudin, N., Rustadi, Alami, F., dan Yogi, I. B. S. 2020. The effect-site analysis based on microtremor data using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method in the Bandar Lampung City. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1572, No. 75, pp. 1-10). IOP Publishing
- Herak, M. 2008. Model HVSR-A Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise. *Computers Geosciences*, 1514–1526.
- Hidayati, S., 2010. *Pengenalan Seismologi Gunungapi, Diklat Pelaksana Pemula Pengamat Gunungapi Baru*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.
- Julian, B. R. dan Foulger, G. R. 2009. Monitoring Geothermal Processes with Microearthquake Mechanism. *Proceedings of Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-187*.
- Kanai, K., 1983. *Seismology in Engineering*. Tokyo University. Japan.
- Karyanto, Sarkowi, M., Ukhti, F., Hidayatika, A., Haerudin, N., dan Darmawan, I. G. B. 2020. Analisis heat loss dan pemetaan sebaran suhu permukaan manifestasi di lapangan panas bumi Way Ratai. *Prosiding SINTA*, 3.
- Katili, J., A. 1973. *On Fitting Certain Geological and Geophysical Feature Island Arcs to the New Global Tectonics*. Univ. of W. Australia Press.
- Mangga, S. A., Amirudin, Suwarti, T., Gafoer, S. dan Sidarto. 1993. *Peta Geologi Lembar Tanjungkarang, Sumatera, Skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung.



- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- Nakamura, Y. 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering* (Vol. 2656). New Zealand.
- Naryanto, H., S. 1997. Kegempaan di Daerah Sumatera. *Alami*. 2(3).
- Persada, Y. D., Ilham, H. D. A., Amaninida, H. D., Ariyanto, P., dan Gustono, S. T. 2021. Pendugaan Awal Deposit Emas Wilayah Poboya, Palu Dengan Metode Inversi HVSR. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 7(1), 30-40.
- Putri, M. K., Suharno, dan Hidayatika, A. 2014. Introduction to Geothermal System of Way Ratai. *Proceedings Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2014. Jakarta Convention Center, Indonesia 4-6 June 2014*.
- SNI 1726. 2010. Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung. Badan Standarisasi Nasional.
- Suharno, S., Putri, M. K., dan Hidayatika, A. 2016. Penelitian Pendahuluan Panasbumi Way Ratai Pesawaran Lampung Indonesia. *Pertemuan Ilmiah Tahunan Himpunan Ahli Geofisika Indonesia 2016*, 1-4.
- SESAME. 2004. *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibration Measurement, Processing and Interpretation*. European Commission-Research General Directorate.
- Sylvette, B. C., Cécile, C., Pierre-Yves, B., Fabrice, C., Peter, M., Jozef, K., dan Fäh, D. 2006. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophysical Journal International*, 167(2), 827-837.

- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., dan Keys, D. A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. London.
- Toiba, Y., Sili, P. D., dan Maskur, M. 2016. Analisis Mikrotremor Kawasan Palu Barat Berdasarkan Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (*HVSR*). *Gravitasi*, 15(1).
- Tsai, N. C., dan Housner, G. W. 1970. Calculation of surface motions of a layered half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 60, 1625-1651.
- Umam, K. 2020. Identifikasi Lapisan Sedimen Dengan Pemodelan Bawah Permukaan Menggunakan Inversi *HVSR* (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) Di Sesar Panjang Kota Bandar Lampung. Skripsi. Universitas Lampung, Bandar Lampung.