

**ANALISIS KECEPATAN GELOMBANG RAYLEIGH
DENGAN PENDEKATAN *AMBIENT NOISE TOMOGRAPHY*
MENGUNAKAN SEISMOGRAF (PIGRAF)
PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI**

(Skripsi)

Oleh

Haidar Prida Mazzaluna

191505012



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**ANALISIS KECEPATAN GELOMBANG RAYLEIGH
DENGAN PENDEKATAN *AMBIENT NOISE TOMOGRAPHY*
MENGUNAKAN SEISMOGRAF (PIGRAF)
PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI**

Oleh

H Aidar Prida Mazzaluna

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

ANALISIS KECEPATAN GELOMBANG RAYLEIGH DENGAN PENDEKATAN *AMBIENT NOISE TOMOGRAPHY* MENGUNAKAN SEISMOGRAF (PiGraf) PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI

Oleh

HAI DAR PRIDA MAZZALUNA

Ambient noise tomography (ANT) merupakan metode seismik pasif yang menggunakan seismeter sebagai instrumen yang menerima sinyal seismik alami. Metode ANT dilakukan untuk mengekstrak *empirical Green's function* dari proses korelasi silang antara dua stasiun untuk mengetahui waktu tempuh dan kecepatan gelombang permukaan. Pada penelitian ini metode ANT dilakukan pengolahan korelasi silang, kurva disperi, dan tomografi waktu tempuh yang. Hasil olahan digunakan sebagai uji alat PiGraf yang merupakan hasil rancang bangun dari tim penelitian Way Ratai. *Green's function* yang didapatkan dari hasil korelasi silang ambient noise belum cukup mengidentifikasi waktu tempuh antar stasiun sedangkan kecepatan hasil kurva dispersi dapat didapatkan dengan baik akan tetapi kemenerusan dari kurva dispersi masih dianggap kurang. Adapun manifestasi banyak terletak di kontras antara anomali tinggi dengan rendah pada peta kecepatan grup. Peta kecepatan grup juga berkaitan dengan peta anomali bouguer lengkap di daerah penelitian.

Kata kunci: Seismograf, *Ambient noise tomography*, Panas Bumi Way Ratai

ABSTRACT

**ANALYSIS OF RAYLEIGH WAVE VELOCITY
WITH AMBIENT NOISE TOMOGRAPHY METHOD
USING SEISMOGRAF (PiGraf)
IN WAY RATAI GEOTHERMAL FIELD**

By

H Aidar Prida Mazzaluna

Ambient noise tomography (ANT) is a passive seismic method that uses a seismometer as an instrument that receives natural seismic signals. The ANT method is used to extract the empirical Green's function from the cross-correlation process between the two stations to determine the travel time and speed of surface waves. In this study, the ANT method processed cross-correlation, dispersion curves, and travel time tomography. The processed results are used as a test for the PiGraf tool which is the result of the design from the Way Ratai research team. The green's function obtained from the ambient noise cross-correlation results is not enough to identify the travel time between stations while the speed of the dispersion curve results can be obtained well, but the continuity of the dispersion curve is still considered to be lacking. Almost all of manifestations lie in the contrast between high and low anomalies on the group velocity map. The group velocity map is also related to the complete Bouguer anomaly map in the study area.

Keyword: Seismograf, Ambient noise tomography, Way Ratai Geothermal Area

Judul Skripsi : **ANALISIS KECEPATAN GELOMBANG RAYLEIGH DENGAN PENDEKATAN *AMBIENT NOISE TOMOGRAPHY* MENGGUNAKAN SEISMOGRAF (PIGRAF) PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI**

Nama Mahasiswa : **Haidar Prida Mazzaluna**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915051012**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing I

Karyanto, S.Si., M.T.
NIP 19691230 199802 1 001

Dosen Pembimbing II

I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng.
NIP 19880505 201903 1 019

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

Karyanto, S.Si., M.T.
NIP 19691230 199802 1 001

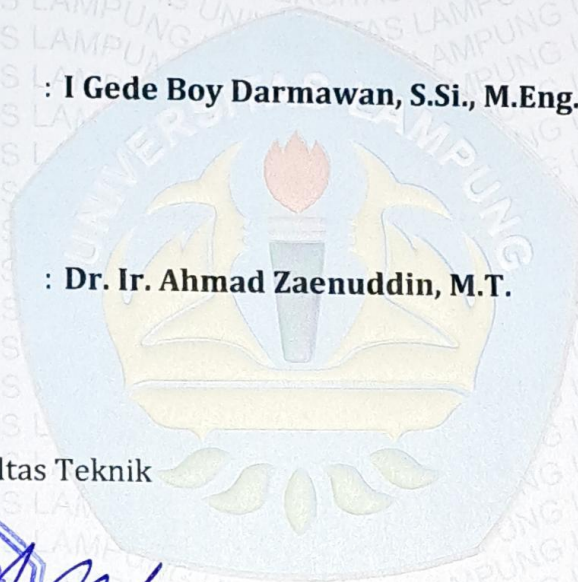
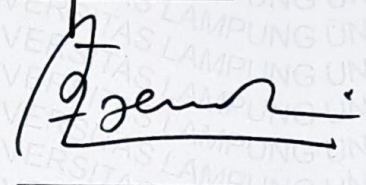
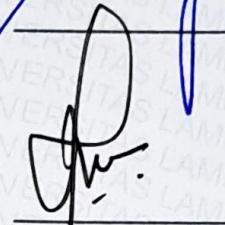
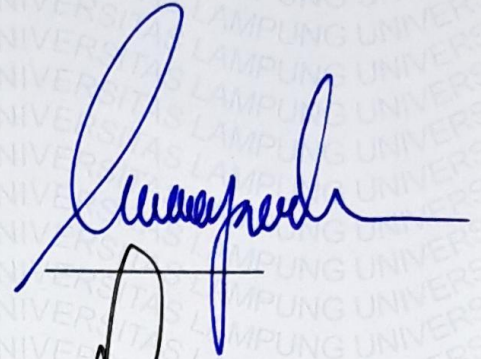
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Karyanto, S.Si., M.T.

Sekretaris : I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng.

Anggota : Dr. Ir. Ahmad Zaenuddin, M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 04 Agustus 2023

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isis sebagian maupun keseluruhan dengan judul “Analisis Kecepatan Gelombang Rayleigh Dengan Pendekatan Ambient Noise Tomography Menggunakan Seismograf (PiGraf) Pada Lapangan Panas Bumi Way Ratai” adalah benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang diakui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang telah berlaku.

Bandar Lampung, 10 Agustus 2023



Haidar Prida Mazzaluna

NPM. 1915051012

RIWAYAT HIDUP

Haidar Prida Mazzaluna merupakan seorang yang baik hati, lahir pada 22 September 2001, merupakan anak kedua dari dua bersaudara, dari Bapak Supriyadi dan Ibu Umi Farida.

Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri 1 Braja Harjosari pada tahun 2007. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Way Jepara pada tahun 2019. Dilanjutkan ke jenjang berikutnya di SMA Negeri 1 Way Jepara pada tahun 2016. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan Sarjana di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.

Selama perkuliahan, penulis mengikuti organisasi kemahasiswaan intra kampus yakni Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana selama 2 periode (2021 dan 2022) sebagai anggota Biro Kesekretariatan. Penulis juga mengikuti *Society of Exploration Geophysicists Student Chapter* (SEG SC) sebagai kepala divisi internal pada tahun 2022. Penulis pada saat perkuliahan meraih penghargaan pada beberapa kompetisi akademik, yakni meraih juara 2 lomba poster pada ajang GWES ke-7, juara 3 lomba poster pada GWES ke-8, dan juara 2 lomba software pada acara Dies Natalis Teknik Geofisika ITERA. Penulis melakukan kerja praktik di P3TKEBTKE ESDM dan melakukan tugas akhir bersama Tim Penelitian Way Ratai.

PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan lafaz hamdalah, skripsi ini saya persembahkan kepada:

KELUARGA TERCINTA

Yang telah memberikan dukungan serta doa dan harapan kepada penulis,

KAWAN-KAWAN PENULIS

Yang selalu kebersamai di saat sedih maupun senang,

ANAK-ANAK KONTRAKAN 19

Sebagai tempat bernaung selama di Bandar Lampung,

TEKNIK GEOFISIKA 19 MAKKOU TANDING

Teman seperjuangan dalam menempuh pendidikan sarjana, dan

TIM PENGEMBANGAN PiGraf

Tim yang bersama-sama melakukan rancang bangun PiGraf.

MOTTO

“Beg no one to stay
When they decide
They want to leave
Your love is not a cage
For wild hearts
It is a gift to well received”
- Nikita Gill

“You are on this Earth
For a purpose only
You can fulfill”
- Unknown

“When I stop struggling,
I float.
Is is the law”
- Another Unkonown

UCAPAN TERIMAKASIH

Syukur alhamdulillah penulis haturkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat hidayahnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi yang berjudul “Analisis Kecepatan Gelombang Rayleigh Dengan Pendekatan *Ambient Noise Tomography* Menggunakan Seismograf (PiGraf) Pada Lapangan Panas Bumi Way Ratai” merupakan satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik Geofisika di Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Karyanto, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika sekaligus Dosen Pembimbing I Skripsi saya.
2. Bapak I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing II Skripsi saya.
3. Bapak Dr. Ir. Ahmad Zaenuddin, M.T., selaku Dosen Penguji Skripsi saya.
4. Bapak Ilham Dani, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik saya.
5. Adelia Safitri, Airlangga Sani, dan Andwina Sagita selaku partner seperjuangan dalam melakukan penelitian.
6. Angkatan TG 19 selaku rekan dalam menyelesaikan perkuliahan.
7. Segenap Dosen dan Civitas Teknik Geofisika UNILA yang kebersamai saya dalam 4 tahun ini di jurusan.
8. Pak Darno, Pak Aceng, dan Mbah Basrowi yang telah menyediakan tempat untuk penelitian.

Bandar Lampung, 10 Agustus 2023



Haider Prida Mazzaluna
NPM. 1915051012

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PERSETUJUAN	v
PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN	ix
MOTTO	x
UCAPAN TERIMAKASIH	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	18
1.2. Tujuan Penelitian.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Lokasi Penelitian.....	4
2.2. Geologi dan Stratigrafi.....	4
2.3. Struktur Geologi.....	7
2.4. Panas Bumi Way Ratai.....	8
2.5. <i>Road Map</i> PiGraf.....	8
III. TEORI DASAR	9
3.1. Sistem Panas Bumi.....	9

3.2.	Gelombang Rayleigh	10
3.3.	Seismometer	11
3.4.	Tomografi <i>Ambient Noise</i>	12
3.5.	<i>Preprocessing Data</i>	14
3.5.1.	Reduksi <i>Sampling Rate</i>	14
3.5.2.	Koreksi Instrumen	14
3.5.3.	<i>Detrend</i> dan <i>Demean</i>	15
3.5.4.	Normalisasi Temporal	15
3.5.5.	Pemutihan Frekuensi	17
3.5.6.	<i>Bandpass Filter</i>	17
3.6.	Korelasi Silang dan <i>Stacking</i>	18
3.7.	Kecepatan Grup dan Kecepatan Fase	20
3.8.	<i>Fast Marching Method</i> (FMM)	21
3.9.	Pemodelan Kedepan dan Pemodelan Kebelakang	22
IV.	METODOLOGI PENELITIAN.....	23
4.1.	Tempat dan Waktu Penelitian	23
4.2.	Alat dan Bahan	24
4.3.	Tahap Akuisisi Data	24
4.4.	Tahap Pengolahan Data	25
4.4.1.	Persiapan Data	26
4.4.2.	Korelasi Silang <i>Ambient Noise</i>	26
4.4.3.	Distribusi Energi <i>Ambient Noise</i>	29
4.4.4.	Kurva Dispersi Kecepatan Gelombang Rayleigh	30
4.4.5.	Tomografi <i>Ambient Noise</i>	31
4.5.	Analisis dan Interpretasi	32
4.6.	Diagram Alir	34
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
5.1.	Data Akuisisi PiGraf	37
5.2.	<i>Preprocessing Data</i>	42
5.3.	Korelasi Silang <i>Ambient Noise</i> dan <i>Stacking</i>	43
5.4.	Distribusi Energi <i>Ambient Noise</i>	49
5.5.	Kurva Dispersi	50

5.6.	Peta Kecepatan Grup Gelombang Rayleigh	54
5.7.	Analisis Hasil dan Keterkaitan dengan Komponen Panas Bumi	56
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	60
6.1.	Kesimpulan	60
6.2.	Saran	60
	DAFTAR PUSTAKA.....	61
	LAMPIRAN.....	67

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Simbologi dan keterangan formasi batuan daerah Way Ratai.....	5
2. Jadwal penelitian skripsi.....	22
3. Waktu tempuh antar stasiun.....	53
4. RMS dan variasi data tiap iterasi.....	54
5. Hubungan periode dan kecepatan grup.....	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta Lokasi Penelitian.....	4
2. Peta Geologi Lapangan Panas Bumi Way Ratai.....	5
3. Stratigrafi Lapangan Panas Bumi Way Ratai.....	7
4. Model panas bumi sistem dominasi air dengan relief tinggi.....	9
5. Pola perambatan gelombang Rayleigh.....	11
6. Konstruksi dasar seismometer.....	11
7. Prinsip <i>ambient noise tomography</i>	12
8. Perbandingan tomografi <i>ambient noise</i> dengan tomografi menggunakan sumber buatan.....	13
9. Tipe-tipe normalisasi dalam domain waktu.....	15
10. Spektrum amplitudo sebelum dan sesudah pemutihan frekuensi.....	17
11. Skema korelasi silang antar 2 stasiun.....	18
12. Himpunan <i>Green's function</i> gelombang Rayleigh antara satu stasiun dengan stasiun lainnya.....	20
13. Kecepatan grup dan kecepatan fase gelombang Rayleigh.....	21
14. Stasiun PiGraf.....	25
15. Pergantian <i>accu</i>	25
16. Rangkaian <i>script Matlab: Ambient Noise Cross-correlation for Daily Long</i>	27
17. Masukan parameter pada script “Noisecorr_SAC_v4.m”	27
18. Contoh himpunan fungsi korelasi silang antar stasiun.....	28
19. Geometri <i>plane-wave modelling</i>	29
20. Contoh distribusi energi <i>Ambient noise</i>	30
21. <i>Software dispersion analysis Matlab GUI</i>	31
22. <i>Picking</i> pada kurva dispersi.....	31
23. Hasil inversi ANT di Australia.....	32

24. Diagram Alir.....	34
25. Sinyal komponen BHZ berformat *.sac keluaran PiGraf <i>Software</i>	37
26. Waveform Stasiun PG02 tanggal 10 Juli 2023.....	38
27. Data PiGraf 10 Juli 2023 komponen BHZ di tiap stasiun.....	39
28. Data PiGraf 11 Juli 2023 komponen BHZ di tiap stasiun.....	41
29. <i>Preprocessing data</i> stasiun PG02.....	42
30. 1 hari <i>stacking data</i> pasangan stasiun PG01-PG02.....	43
31. 3 hari <i>stacking data</i> pasangan stasiun PG01-PG02.....	44
32. 8 hari <i>stacking data</i> pasangan stasiun PG01-PG02.....	44
33. Himpunan <i>Green's function</i> periode 0.2 – 0.5 detik.....	46
34. Himpunan <i>Green's function</i> periode 0.5 – 1 detik.....	47
35. Himpunan <i>Green's function</i> periode 1 – 5 detik.....	48
36. Distribusi energi <i>ambient noise</i>	49
37. Kurva dispersi pasangan stasiun PG01-PG02.....	50
38. Kurva dispersi pasangan stasiun PG01-PG03.....	51
39. Kurva dispersi pasangan stasiun PG01-PG04.....	51
40. Kurva dispersi pasangan stasiun PG02-PG03.....	52
41. Kurva dispersi pasangan stasiun PG02-PG04.....	52
42. Kurva dispersi pasangan stasiun PG03-PG04.....	53
43. Himpunan kurva dispersi.....	54
44. Peta kecepatan grup gelombang Rayleigh.....	56
45. <i>Overlay raypath</i> terhadap peta geologi.....	57
46. Peta <i>overlay</i> kecepatan grup gelombang Rayleigh.....	58
47. Peta anomali bouguer lengkap Lapangan Panas Bumi Way Ratai.....	58

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu daerah prospek panasbumi di Indonesia adalah lapangan panas bumi Way Ratai. Secara geografi daerah ini terletak di Kabupaten Pesawaran (Putri dkk., 2014). Menurut Suharno dkk. (2017) berdasarkan analisis kesetimbangan ion, lapangan panas bumi Way Ratai seharusnya merupakan sistem panas bumi temperatur tinggi mengacu pada panas bumi Wairakei. Panas bumi Way Ratai saat ini masih dalam tahap eskplorasi (Karyanto dkk., 2020). Pada tahapan ini dilakukan studi geologi, geokimia dan geofisika untuk menghitung sumber daya potensial di daerah prosepek panas bumi. Tahap eksplorasi merupakan fase yang kritis terutama bagi investor, karena pada tahapan ini resiko dan ketidakpastian pada tahap ini merupakan yang tertinggi (Daniel dkk., 2019). Terlebih lagi belum ada sumur eksplorasi pada lapangan panas bumi ini. Oleh karenanya perlu adanya studi geofisika yang mendukung terutama untuk meningkatkan akurasi *well targeting*. Beberapa metode geofisika yang sudah dilakukan di daerah ini adalah metode geolistrik (Pratama dkk., 2019), audio-magnetotellurik (Suryadi dkk., 2019), metode gaya berat (Sarkowi dkk., 2021), metode panas (Karyanto dkk., 2020; Karyanto dkk., 2021), dan metode magnetik (Zaenudin, 2011). Untuk menguatkan interpretasi data geofisika yang telah disebutkan, dilakukanlah pengukuran *ambient noise tomography* didaerah panas bumi Way Ratai untuk melihat karakteristik kecepatan gelombang Rayleigh.

Ambient Noise Tomography (ANT) merupakan metode seismik pasif yang menggunakan seismometer sebagai instrumen yang menerima sinyal seismik alami bawah permukaan. Inti dari ANT adalah melakukan korelasi silang antara dua rekaman data *noise* seismik dari dua seismometer (Larose dkk., 2015). Korelasi silang dilakukan untuk mengekstrasi sinyal *background noise* seismik

yang mewakili respon impuls elastis bawah permukaan (Zulfakriza dkk., 2020). Kegunaan dari ANT ialah untuk mengekstrak *empirical Green's function* untuk mendapatkan kecepatan grup dan kecepatan fase dari gelombang Rayleigh dan gelombang Love (Ritzwoller dkk., 2011).

Metode ANT sudah mulai digunakan di Indonesia beberapa contohnya antara lain penggambaran struktur geologi di Palu (Ikhsan dan Yudistira, 2019), struktur di Cekungan Banyumas (Setiawan dkk., 2021), dan pemodelan kecepatan gelombang Rayleigh di Pulau Jawa (Anshori dkk., 2018). Sedangkan untuk pemanfaatan di studi kasus panas bumi sudah pernah dilakukan pada lapangan panas bumi Hengil, Islandia (S'anchez-Pastor dkk., 2021) dan dapat digunakan bersama data resistivitas untuk mengidentifikasi anomali temperature. Kemudian pada lapangan panas bumi Alshache, Prancis (Luhejeur dkk., 2016) pengukuran ANT digunakan untuk identifikasi zona *graben*.

Pada penelitian ini alat yang digunakan ialah seismograf PiGraf yang mana merupakan seismograf terbaru hasil rancang bangun dari tim Eksplorasi Way Ratai TG UNILA. Proses pengembangan alat seismik pasif yang pertama dilakukan ialah akselerometer berbasis Arduino (Amiruddin dkk., 2019). Kemudian dilanjutkan dengan pengembangan seismograf berbasis Raspberry Pi (PiGraf). Sehingga pada penelitian ini juga merupakan akuisisi data yang pertama kali dilakukan oleh PiGraf sekaligus sebagai uji validasi.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan karakteristik *Ambient Noise* di daerah panas bumi Way Ratai menggunakan PiGraf.
2. Mendapatkan nilai kecepatan gelombang Rayleigh di daerah panas bumi Way Ratai dengan pendekatan korelasi silang dan kurva dispersi.
3. Melakukan analisis dan interpretasi peta kecepatan gelombang Rayleigh dan kaitannya dengan sistem panas bumi Way Ratai.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Data yang digunakan merupakan data pengukuran primer menggunakan PiGraf di daerah panas bumi Way Ratai.
2. Pengolahan meliputi korelasi silang, analisis kurva dispersi dan tomografi kecepatan gelombang Rayleigh.

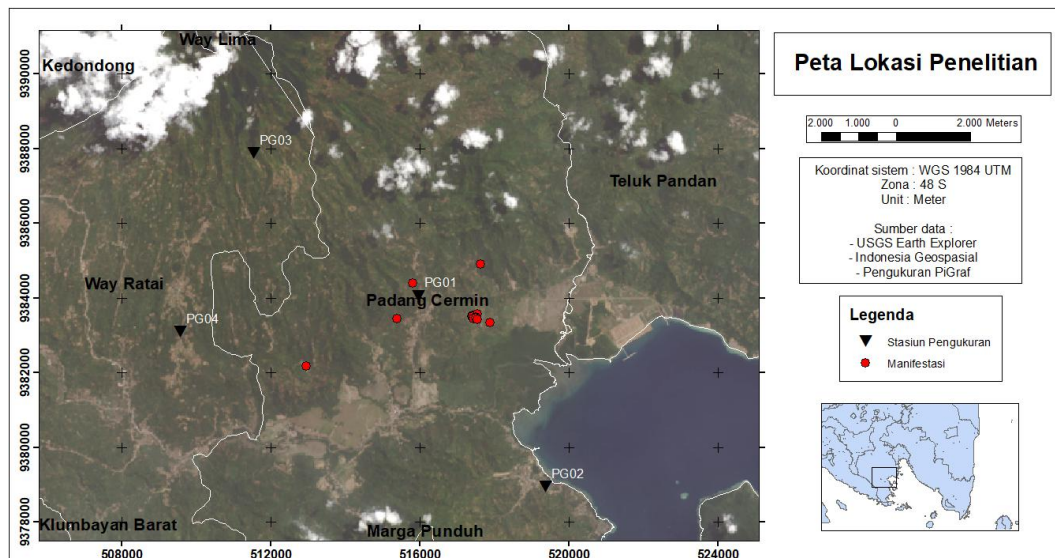
1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik *ambient noise* hasil pengukuran PiGraf serta mengetahui hubungan antara peta kecepatan gelombang permukaan dengan sistem panas bumi yang ada di daerah penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah Lapangan Panasbumi Way Ratai. Lapangan Panasbumi Way Ratai terletak di Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Lampung. Secara geografis, daerah penelitian terletak pada koordinat 9372060 – 9392928 mN dan 499960 – 529533 mE. Lokasi penelitian diperlihatkan pada peta desain akuisisi sebagai berikut (Gambar 1).

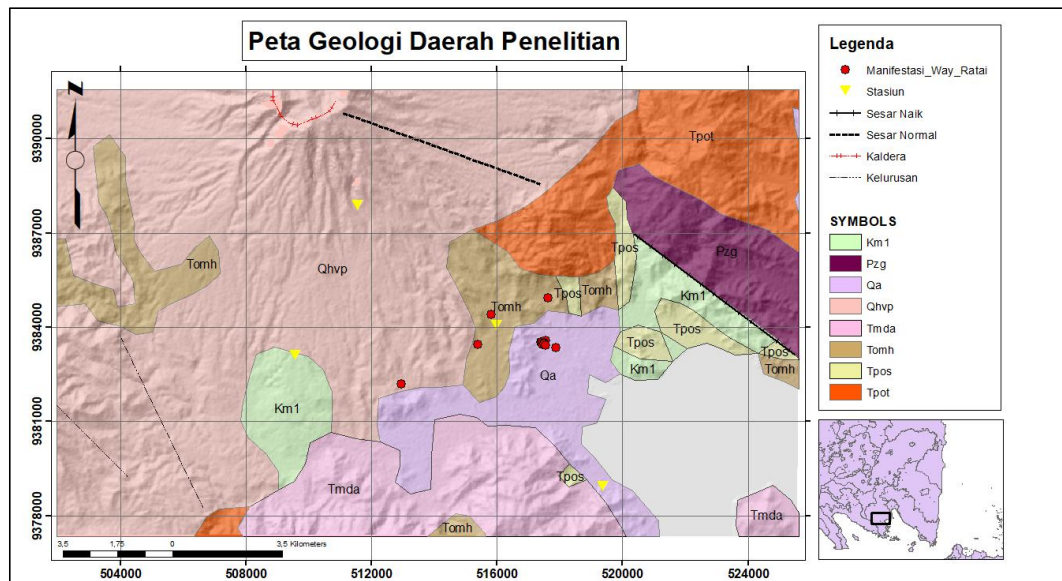


Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

2.2. Geologi dan Stratigrafi

Menurut McCourt dkk. (1996) daerah way ratai termasuk kedalam busur plutonik yang berumur kapur tengah-akhir dan berada pada mikro-lempeng Woyla. Busur ini berfokus sepanjang zona patahan berarah barat laut-tenggara dan didominasi oleh granitoid pembawa hornblend dioritik hingga granodioritik dengan granit biotit megacrystic K-feldspar. Adapun berdasarkan peta geologi lembar oleh

Mangga dkk. (1993) batuan yang terdapat di daerah Way Ratai didominasi oleh batuan gunungapi. Peta geologi diberikan oleh Gambar 2 sebagai berikut.



Gambar 2. Peta Geologi Lapangan Panas Bumi Way Ratai (Dimodifikasi dari Mangga dkk., 1993)

Rincian informasi formasi dijelaskan oleh Tabel 1 sebagai berikut.

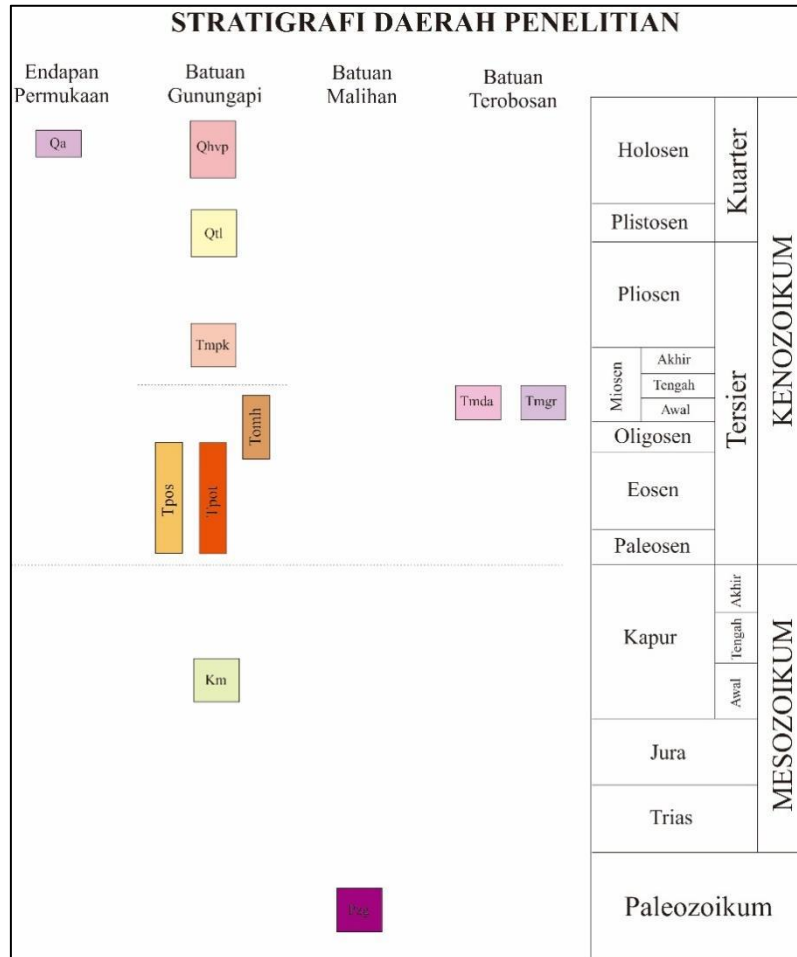
Tabel 1. Simbologi dan Keterangan Formasi Batuan Daerah Way Ratai

No	Simbol	Formasi	Keterangan
1	Qa	Aluvium	Kerakal, kerikil, pasir, lempung dan gambut
2	Qhvp	Endapan Gunungapi Muda	Lava(andesit-basal), breksi dan tuf. Hasil erupsi Gunung Pesawaran
3	QTI	Formasi Lampung	Tuf berbatuapung, tuf riolitik, tuf padu tufit, batulempung tufan dan batupasir tufan
4	Tmpk	Formasi Kantur	Perselingan antara tufit, batulempung karbonan, batulanau karbonan dan batupasir
5	Tomh	Formasi Hulusimpang	Lava andesit basal, tuf dan breksi gunungapi terubah dengan lensa batugamping
6	Tpos	Formasi Sabu	Perselingan antara breksi konglomeratan dengan batupasir

Tabel 1. Simbologi dan Keterangan Formasi Batuan Daerah Way Ratai (Lanjutan)

No	Simbol	Formasi	Keterangan
7	Tpot	Formasi Tarahan	Perselingan antara breksi konglomeratan dengan batupasir
8	Km	Formasi Menanga	Perselingan serpih, dan batulempung dengan basal, sisipan rijang dan lensa batugamping
9	Pzg	Kompleks Gunung Kasih Tak Terpisahkan	Didominasi sekis pelitan dan sedikit gnes, mencakup pzgk, yakni Kuarsit Sukodadi berupa kuarsit dengan sisipan sekis-kuarsa serisit, dan pzgm, yakni Batupualam Trimulyo berupa batupualam dan sekis.
10	Tmda	Dasit Piabung	Dasit
11	Tmgr	Batuan Granit Tak terpisahkan	Granit dan granodiorit

Startigrafi daerah penelitian diberikan oleh Mangga dkk. (1993) (Gambar 3). Umur batuan di daerah penelitian bervariasi meliputi umur kuartar, tersier, kapur, dan paleozoikum. Terdapat pula batuan produk terobosan yang berumur tersier. Kemudian terdapat ketidakselarasan nampak pada batas antara Formasi Katur (TmPk) dengan Formasi Hulusimpang (Tomh), Formasi Sabu (Tpos), dan Formasi Tarahan (Tpot).



Gambar 3. Stratigrafi Lapangan Panas Bumi Way Ratai (Dimodifikasi dari Mangga dkk., 1993)

2.3. Struktur Geologi

Struktur geologi regional Sumatera terbentuk karena adanya lempeng India-Australia yang sedang disubduksi ke arah timurlaut (Lestari, 2021). Di daerah penelitian terdapat Sesar Menanga berarah barat laut-tenggara yang memotong kaldera di Gunung Pesawaran. Sesar Menanga sejajar dengan struktur utama di Sumatera, yakni Sesar Semangko (Haerudin dkk., 2016). Sesar dan kelurusan yang ada di daerah penelitian cenderung berarah utara-selatan dan barat laut-tenggara (Gambar 2). Terdapat pula sesar naik berarah barat laut-tenggara yang menyingkap Formasi Kompleks Gunung Kasih Tak Terpisahkan (Pzg). Selain itu bagian timur Gunung Pesawaran terlihat beberapa gawir.

2.4. Panas Bumi Way Ratai

Lapangan panas bumi Way Ratai saat ini masih dalam tahapan perhitungan besaran sumber daya potensial. Kenampakan dari panasbumi Way Ratai secara jelas terlihat dari banyaknya manifestasi yang ada di daerah tersebut. Manifestasi yang terdapat di lapangan panas bumi Way Ratai memiliki suhu berkisar antara 46 – 103°C. Berdasarkan analisis *heat loss* yang dilakukan oleh Karyanto dkk. (2020) menunjukkan suhu tinggi berada di bagian tenggara dari puncak Gunung Ratai dan semakin rendah ke bagian selatan. Karyanto dkk. (2017) juga menjelaskan bahwa mata air panas Natar diduga merupakan salah satu zona *outflow* dari panas bumi Way Ratai dan menurut Zaenudin (2011) berdasarkan dari harga anomali magnetik yang telah diteliti zona *upflow* berada disekitar Gunung Ratai dan zona reservoir masih terlihat pada kedalaman 1 Km. Sedangkan pada penelitian potensial diri oleh Setyawan dkk. (2019) arah aliran fluida dari panas bumi Way Ratai cenderung mengalir dari utara menuju selatan. Kemudian berdasarkan analisis gaya berat oleh Sarkowi dkk. (2021), reservoir panas bumi terletak di Gunung Ratai dan sebelah barat daya Gunung Ratai dekat dengan titik manifestasi.

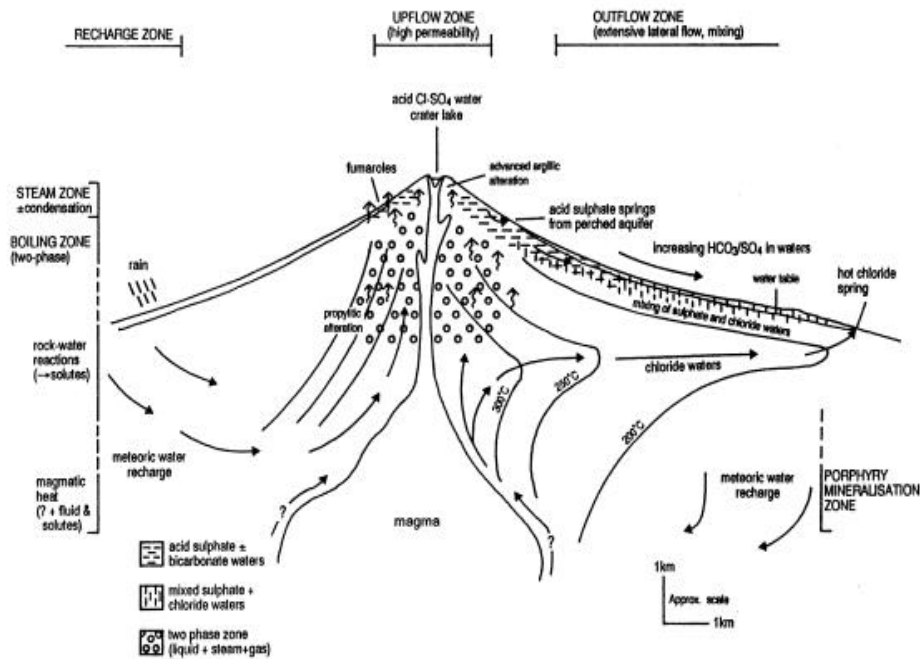
2.5. Road Map PiGraf

Pada penelitian ini digunakan PiGraf yang merupakan seismograf terbaru hasil dari rancang bangun dari tim Eksplorasi Way Ratai Teknik Geofisika Universitas Lampung. Seismograf ini berbasis Raspberry Pi dan ditujukan untuk melakukan akuisisi data dalam ranah eksplorasi geofisika. PiGraf memiliki 3 komponen sensor berarah atas-bawah, utara-selatan, dan timur-barat. Pi Graf merupakan generasi selanjutnya dari akselerometer berbasis Arduino dengan nama Akselino dengan sensor ADXL335 (Amiruddin dkk., 2019). Akselino ini kemudian dikembangkan lagi dengan menggunakan sensor ADXL345 dan pernah di uji oleh Darmawan dkk. (2019) dengan dibandingkan dengan akslerometer REFTEK dan didapatkan nilai korelasi sekitar 62%. Akan tetapi masih memiliki pola kerentanan tanah yang mirip. Olehnya kemudian dikembangkan lagi sehingga sekarang dilakukan rancang bangun PiGraf dengan harapan sensor seismometer akan memiliki sensitivitas yang lebih tinggi.

III. TEORI DASAR

3.1. Sistem Panas Bumi

Pada dasarnya sistem panas bumi merupakan perpindahan panas baik secara konduksi maupun konveksi dari sumber panas ke daerah sekitarnya. Perpindahan dengan cara konduksi mengalirkan panas melalui batuan di sekeliling sumber panas. Sedangkan perpindahan dengan cara konveksi melibatkan air yang ada dekat dengan sumber panas sebagai perantara perpindahan panas (Saptadji, 2001). Perpindahan panas secara konveksi memerlukan batuan dengan permeabilitas yang baik untuk mengalirkan fluida panas ke permukaan. Sistem panas bumi yang ada di Indonesia merupakan sistem panas bumi dominasi air dengan relief yang tinggi (Nicholson, 1993). Berikut merupakan konsep model panas bumi di Indonesia (Gambar 4).



Gambar 4. Model Panas Bumi Sistem Dominasi Air dengan Relief Tinggi (Nicholson, 1993)

Sistem panas bumi konvensional membutuhkan 3 komponen utama, yakni sumber panas, permeabilitas, dan air. Dimana panas tersalurkan oleh batuan sekitar dan memanaskan air yang berada pada batuan yang permeabel (reservoir panas bumi) (Kana dkk., 2014).

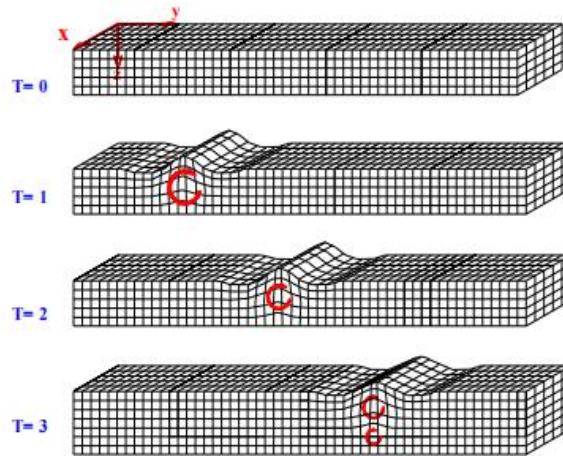
3.2. Gelombang Rayleigh

Gelombang permukaan ialah gelombang seismic yang berada pada batas permukaan medium. Gelombang permukaan merupakan gelombang yang cukup kompleks berdasarkan sifat gerakan partikel media elastiknya. Gelombang ini memiliki frekuensi yang rendah dan amplitudo yang tinggi serta menjalar akibat adanya efek *free surface*. Salah satu jenis gelombang permukaan ialah gelombang Rayleigh.

Gelombang Rayleigh (R) (Gambar 5) memiliki partikel yang arah rambatnya horizontal terhadap gerak gelombang dan memiliki pola berputar dalam permukaan yang vertical dan tegak lurus terhadap arah rambatnya. Gelombang R akan bergerak sepanjang permukaan dengan amplitudo yang berkurang signifikan terhadap kedalaman. Dari keseluruhan gelombang seismic, gelombang R berperan paling besar dalam menyalurkan energi mekanik yakni sekitar 67% dari keseluruhan energi yang dihasilkan (Rosyidi, 2013).

Gelombang permukaan R terbentuk melalui gabungan antara komponen gelombang P dan komponen gelombang SV (gelombang S dalam komponen vertikal). Pada media dengan sifat elastik yang berubah terhadap kedalaman, kecepatan gelombang permukaan R memiliki fungsi terhadap frekuensi. Hubungan antara kecepatan terhadap frekuensi ini kemudian yang disebut sebagai sifat dispersif (Rosyidi, 2020). Dispersi gelombang permukaan dengan periode pendek sensitif terhadap heterogenitas dangkal. Analisis dispersi biasa tidak menghasilkan prakiraan struktur yang baik dikarenakan adanya hamburan kuat pada periode pendek ($T < 30s$). Tomografi *ambient noise* gelombang dangkal dalam prakiraan struktur kerak dangkal melibatkan pengukuran dispersi *empirical*

Green's functions (EGFs) yang diperoleh dari korelasi silang *ambient noise* (Yao dkk., 2008).



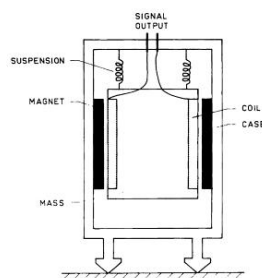
Gambar 5. Pola Perambatan Gelombang Rayleigh (Rosyidi, 2020)

Kecepatan gelombang R di dalam bumi ialah sekitar 2 – 4,2 km/s. Adapun persamaan kecepatan gelombang Rayleigh (v_r) diberikan sebagai berikut (Kiswiranti, 2019):

$$v_R = 0,92\sqrt{v_s}. \quad (3)$$

3.3. Seismometer

Seismometer ialah sensor yang mengukur gelombang seismik menggunakan suatu sensor dengan 3 komponen arah timur-barat, utara-selatan, dan atas-bawah (Al Fath, 2018). Adapun cara kerja sensor seismometer ialah magnet dan pegas yang digantungkan pada koil (Gambar 6). Sehingga jika ada getaran yang membuat magnet bergerak, akan ada arus yang mengalir pada koil (Maharani, 2015).

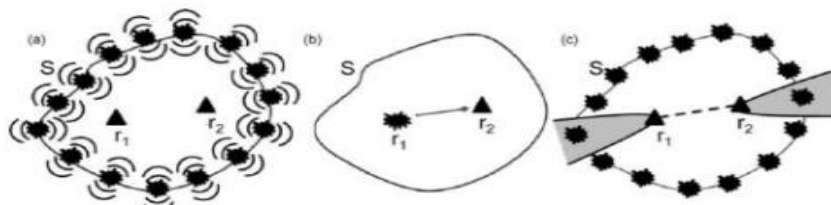


Gambar 6. Konstruksi Dasar Seismometer (Maharani, 2015)

3.4. Tomografi *Ambient Noise*

Menurut (Munadi, 1992) dalam (Hidayatunnisak dkk., 2014) tomografi seismik ialah teknik untuk memperoleh gambaran dari suatu benda tanpa membelah atau mengirisnya dengan cara melakukan beberapa pengukuran di luar dari benda tersebut (disebut sebagai proyeksi-proyeksi), kemudian dilakukan rekonstruksi. Dalam praktik ini tomografi menggunakan *ambient noise* sebagai sinyal. Ambient noise (mikrotremor) merupakan suatu getaran yang terjadi karena gangguan tertentu. Beberapa sumber penyebab terjadinya ambient noise ialah angin, gelombang laut, getaran kendaraan, ataupun aktivitas manusia yang menyebabkan getaran (Haerudin dkk., 2019).

Ambient noise tomography dalam melakukan tomografi pendekatan yang digunakan ialah menggunakan prinsip interferometri seismik. Interferometri merupakan ilmu yang mempelajari interferensi antara 2 buah sinyal guna mempelajari medium penjarangannya. *Ambient noise tomography* (ANT) memanfaatkan korelasi silang antara 2 buah sinyal seismik untuk membentuk respon impuls antar sinyal. Korelasi silang antara 2 buah sinyal akan menghasilkan *Green's functions* dari medium tempat sinyal tersebut menjalar. Fungsi *Green's* ialah respon dari medium merambatnya sinyal terhadap impuls (fungsi *delta dirac*) sumber (Anshori, 2014). Lebih jelas lagi metode ANT digambarkan oleh Gambar 7. Terlihat dua buah seismometer r_1 dan r_2 dikelilingi oleh sinyal sumber, dalam hal ini sumber yang dimaksud ialah *ambient noise* (Gambar 7 (a)). Kemudian metode ANT mengansumsikan salah satu sensor (r_1) sebagai sumber virtual (Gambar 7 (b)). Olehnya sumber yang ada di lokasi abu-abu memberikan kontribusi pada *Green's functions* (Gambar 7 (c)).

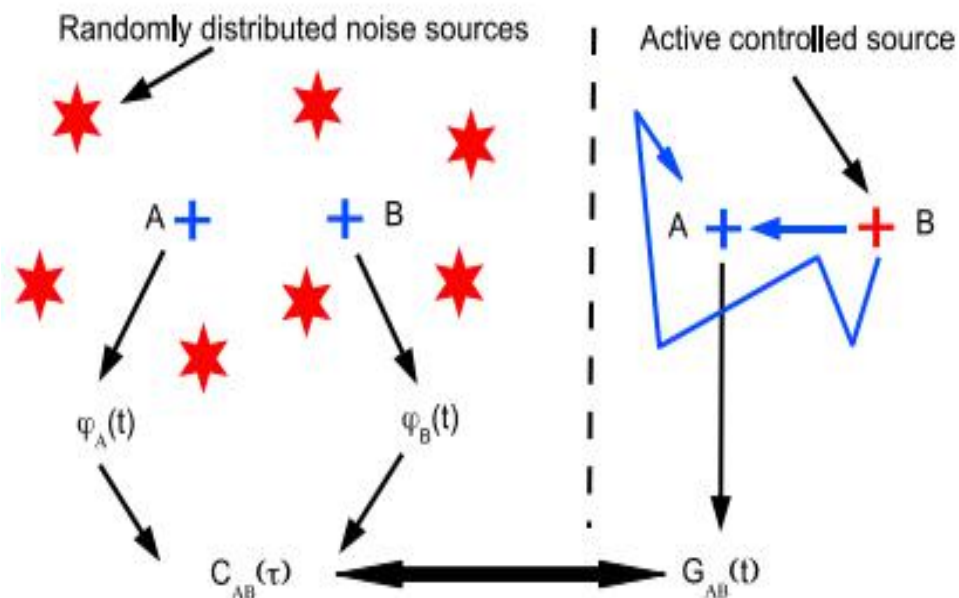


Gambar 7. Prinsip *ambient noise tomography* (Nicholson dkk., 2012)

Ide utama dalam praktik tomografi *ambient noise* ialah melakukan korelasi berbasis waktu $C(\tau)$ yang dilakukan pada sinyal $\varphi(t)$ yang direkam pada waktu yang sama di dua tempat yang berbeda (stasiun A dan stasiun B), dimana hal ini memiliki akses ke respon impuls $G(t)$ antara A dan B. Sehingga seolah-olah salah satu stasiun merupakan sumber dan stasiun lainnya sebagai penerima. Apabila disekitar stasiun memiliki sumber *ambient noise* yang cukup, korelasi silang antara stasiun A dan B akan dapat menghasilkan *Green's function* (Larose dkk., 2015).

$$\partial_{\tau} C_{AB}(\tau) = \partial_{\tau} \int \varphi_A(t) \varphi_A(t + \tau) dt \propto G^+(A, B, \tau) - G^-(A, B, -\tau) \quad (4)$$

Dimana G^+ dan G^- merupakan kausal dan anti-kausal dari *Green's function*. Pendekatan ini membuat kita dapat meniru sumber dimanapun kita meletakkan sensor seismik dan tentu saja mengubah *noise* menjadi sinyal. Gambar berikut (Gambar 8) merupakan ilustrasi perbedaan antara praktik tomografi seismik pasif (sebelah kiri) dan aktif (sebelah kanan). Bintang berwarna merah merupakan sumber *noise* (sumber pasif), tanda palang berwarna biru merupakan penerima, tanda palang berwarna merah merupakan sumber buatan.



Gambar 8. Perbandingan Tomografi Ambient Noise dengan Tomografi Menggunakan Sumber Buatan (Larose dkk., 2015)

3.5. Preprocessing Data

Sebelum melakukan korelasi silang perlu dilakukan persiapan data terlebih dahulu. *Preprocessing data* yang dilakukan bertujuan agar data mentah hanya akan menyorot *ambient noise* saja. Untuk itu dalam pemrosesan data *ambient noise* perlu menghapus sinyal yang tidak diinginkan, seperti penyimpangan instrumen dan gempa bumi yang mengaburkan data *ambient noise* (Da Silva dkk., 2021). Adapun persiapan data tiap stasiun meliputi reduksi *sampling* data, melakukan koreksi instrumen, *detrend* dan *demean* data, normalisasi temporal, dan pemutihan frekuensi (Amiri, 2017).

3.5.1. Reduksi Sampling Rate

Data waveform perlu dilakukan reduksi *sampling rate* data untuk mengurangi waktu pengolahan data. Karena data dengan ukuran besar akan memerlukan waktu *processing* yang lama. Terlebih lagi data *waveform* yang digunakan dalam tomografi *ambient noise* ialah data dengan kisaran waktu mingguan, bulanan, sampai tahunan sedangkan banyak pasangan korelasi silang data yang perlu dilakukan. Umumnya data di sampel ulang sampai dengan 1 Hz (Amiri, 2017). Akan tetapi frekuensi sampel dapat berbeda-beda.

3.5.2. Koreksi Instrumen

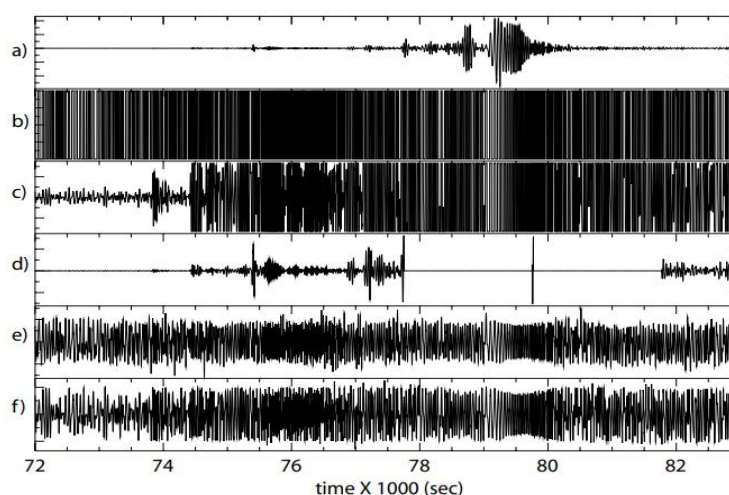
Waveform yang terekam pada seismometer dapat mengalami penyimpangan akibat fungsi transfer dari instrumen, olehnya perlu dilakukan penghilangan pengaruh instrumen, sehingga data *waveform* yang terekam merupakan data yang sebenarnya (Pratama dan Negara, 2021). Akan tetapi apabila pengukuran dilakukan menggunakan instrumen yang sama, maka tidak perlu dilakukan koreksi.

3.5.3. *Detrend dan Demean*

Detrend dan *demean* data waveform dilakukan untuk menghilangkan *trend* harian.

3.5.4. *Normalisasi Temporal*

Normalisasi dilakukan untuk mendapatkan separasi *ambient noise* yang baik. Step inilah yang paling penting dalam *processing* data. Normalisasi temporal perlu dilakukan untuk mereduksi efek data gempa pada korelasi silang, gangguan instrumental, dan variasi sumber *noise* di sekitar stasiun (Amiri, 2017). Gempa bumi merupakan salah satu hambatan paling signifikan dalam pemrosesan data *ambient noise* secara otomatis. Meskipun waktu dan lokasi terjadinya gempa bumi dapat ditemukan di katalog gempa bumi, akan tetapi gempa bumi kecil (*micro-earthquake*) perlu di selidiki lebih lanjut. Terlebih lagi waktu tiba gelombang permukaan pada periode yang pendek tidak diketahui pasti. Sehingga, penghilangan sinyal gempa harus dilakukan secara adaptif, bukan melulu bergantung kepada katalog (Bensen dkk., 2007). Adapun beberapa tipe dari normalisasi dalam domain waktu yang biasa digunakan dalam pemrosesan data *ambient noise* sebagai berikut (Gambar 9).



Gambar 9. Tipe-tipe Normalisasi dalam Domain Waktu (Bensen dkk., 2007)

Berdasarkan gambar diatas (Gambar 9), terdapat 5 jenis normalisasi dalam domain waktu yang coba dilakukan oleh Bensen dkk. (2007). Gambar 9(a) merupakan data mentah. Gambar 9(b) merupakan normalisasi *one-bit*, dimana sinyal dibuat menjadi ± 1 , dimana sinyal dengan amplitudo positif akan bernilai 1 dan amplitudo negatif akan bernilai -1. Metode inilah yang paling sering digunakan dalam normalisasi temporal. Gambar 9(c) merupakan metode *clipped waveform*, dimana dilakukan pemotongan ambang batas sesuai dengan rms dari amplitudo sinyal pada hari tersebut. Gambar 9(d) ialah *automated event detection and removal*. Apabila amplitudo gelombang diatas ambang tertentu, 30 menit berikutnya amplitudo gelombang akan disetel menjadi 0. Ambang batas ini akan sulit ditentukan mengingat akan ada variasi amplitudo pada stasiun yang berbeda. Gambar 9(e) ialah metode normalisasi *running-absolute-mean*. Metode ini menghitung rata-rata berjalan dari nilai absolut *waveform* dalam lebar jendela yang tetap dan bobot *waveform* terletak di tengah jendela. Sehingga jika diberikan diskrit deret waktu d_j , dapat dihitung bobot normalisasi pada waktu n ialah:

$$w_n = \frac{1}{2N+1} \sum_{j=n-N}^{n+N} |d_j| \quad (5)$$

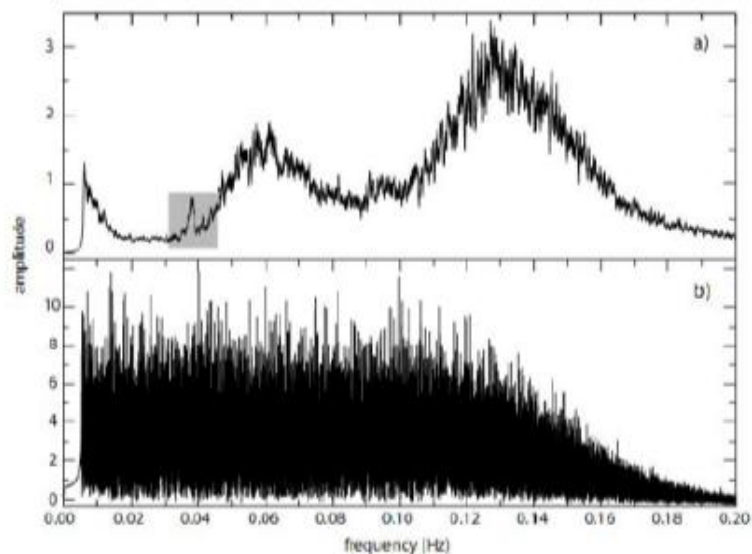
sehingga datum yang telah dinormalisasi (\tilde{d}_n) menjadi:

$$\tilde{d}_n = \frac{d_n}{w_n}. \quad (6)$$

Lebar jendela normalisasi $(2N+1)$ menyatakan berapa banyak informasi amplitudo yang digunakan. Nilai $(N=0)$ akan mendapatkan hasil yang persis dengan metode normalisasi *one-bit*. Sementara lebar jendela yang sangat panjang $(N \rightarrow \infty)$ akan mendekati sinyal aslinya. Gambar 9(f) ialah normalisasi *water level* dimana setiap amplitudo diatas rms amplitudo harian akan di turunkan dengan bobot. Hal ini dijalankan secara iteratif sampai seluruh bentuk gelombang hampir homogen dalam amplitudo. Metode ini dilakukan berulang sampai seluruh *waveform* berada di bawah *water-level*, yakni enam kalinya level rms harian.

3.5.5. Pemutihan Frekuensi

Pemutihan frekuensi ialah normalisasi dalam domain frekuensi untuk menghapus tanda seismisitas dengan meratakan magnitude frekuensi pada rentang frekuensi yang diinginkan. Normalisasi dalam domain frekuensi memutihkan spektrum amplitudo tanpa mengubah fase. Hal ini secara efektif memperluas rentang frekuensi rekaman *ambient noise* dan mencegah sinyal dengan amplitudo spektral tinggi mendominasi sinyal amplitudo rendah (Da Silva, 2021). Pemutihan frekuensi berperan mengurangi ketidakseimbangan dalam spektrum stasiun tunggal dan berguna untuk membantu menghasilkan pengukuran dispersi *broad-band*. Adapun terlihat contoh data sebelum dan sesudah dilakukan normalisasi pada domain frekuensi pada Gambar 10. Kotak abu-abu ialah *noise* pada periode 26(s).



Gambar 10. Spektrum Amplitudo Sebelum dan Sesudah Pemutihan Frekuensi (Bensen dkk., 2007).

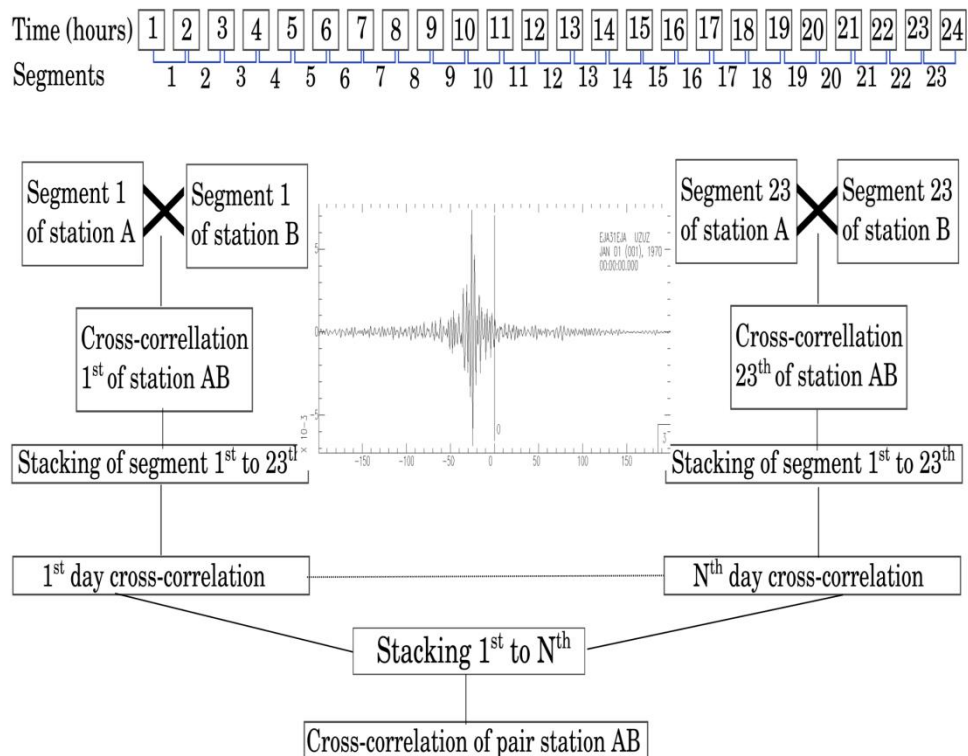
3.5.6. *Bandpass Filter*

Bandpass filter digunakan untuk mendapatkan sinyal pada rentang frekuensi tertentu. Pada pengolahan data korelasi silang *ambient noise*, sangat penting

untuk memisahkan frekuensi atau periode suatu *waveform*. Dalam pengamatan kecepatan grup dan kecepatan fase gelombang Rayleigh, periode panjang akan lebih sensitif terhadap struktur bumi begitu sebaliknya (Anshori, 2014).

3.6. Korelasi Silang dan *Stacking*

Stacking merupakan proses penjumlahan *trace* dalam satu *gather* data guna menaikkan nilai SNR (*Signal to Noise Ratio*). Dengan melakukan proses *stacking* sinyal-sinyal yang koheren akan saling menguatkan sedangkan sinyal-sinyal yang tidak koheren akan saling melemahkan (Suparman, 2017). Step-step korelasi silang dan *stacking* data yang diberikan oleh Martha (2017) pada Gambar 11. Untuk melakukan korelasi silang, dibentuk segmen-segmen yang dibentuk dari 2 jam pengukuran. Kemudian antar segmen dilakukan korelasi silang dan dilakukan *stacking* sehingga didapatkan korelasi silang per-hari. Begitu seterusnya jika ingin dilakukan sampai per-minggu, per-bulan, atau per-tahun.



Gambar 11. Skema Korelasi Silang Antar 2 Stasiun (Martha dkk., 2017)

Persamaan korelasi silang diberikan oleh Liu dkk. (2018) sebagai berikut:

$$C_{AB}(\tau) \approx \int_0^{t_c} v_A(t)v_B(t + \tau)dt, \quad (7)$$

dimana:

$C_{AB}(t)$: Fungsi korelasi silang *ambient noise* pada domain waktu (NCF),

$v_A(t)$: data *broadband* stasiun A yang telah dilakukan *preprocessing*,

$v_B(t)$: data *broadband* stasiun B yang telah dilakukan *preprocessing*,

τ : jeda waktu antara $v_A(t)$ dan $v_B(t)$,

t_c : panjang waktu data yang digunakan untuk korelasi silang.

Dengan menggunakan turunan dari waktu fungsi korelasi silang *noise* (NCF), *empirical Green's function* (EGF) dalam domain waktu bisa didapatkan. Untuk pasangan stasiun A dan B, hubungan antara NCF, EGF, dan *Green's functions* asli, diberikan sebagai berikut:

$$\frac{dC_{AB}(t)}{dt} = -\widehat{G}_{AB}(t) + \widehat{G}_{BA}(t) \approx -G_{AB}(t) + G_{AB}(t), \quad (8)$$

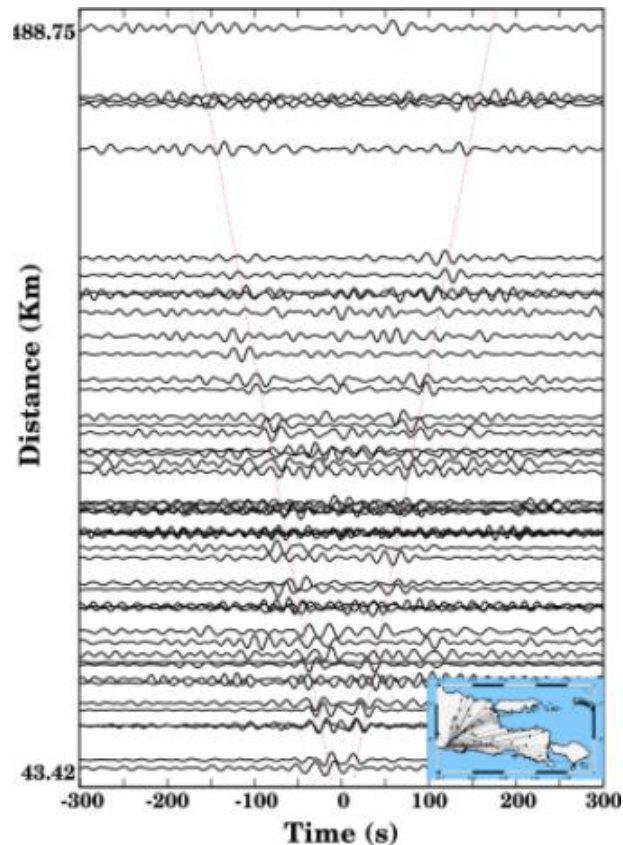
dimana:

$\frac{dC_{AB}(t)}{dt}$: turunan pertama dari NCF ($C_{AB}(t)$),

$\widehat{G}(t)$: *empirical Green's function* (EGF),

$G(t)$: *Green's function* asli.

Himpunan *Green's function* dari satu stasiun ke stasiun lainnya dapat di plot dalam satu *cross-correlogram* sehingga dapat memperoleh kecepatan grup gelombang Rayleigh rata-rata. Adapun contoh *cross-correlogram* oleh Martha (2017) dapat dilihat pada Gambar 12. Dimana waktu tiba gelombang sebanding dengan jarak antar stasiun. Kemudian kecepatan grup gelombang Rayleigh rata-rata dapat diperoleh dari kementerian amplitudo tinggi yang dibentuk dari himpunan *Green's function*.

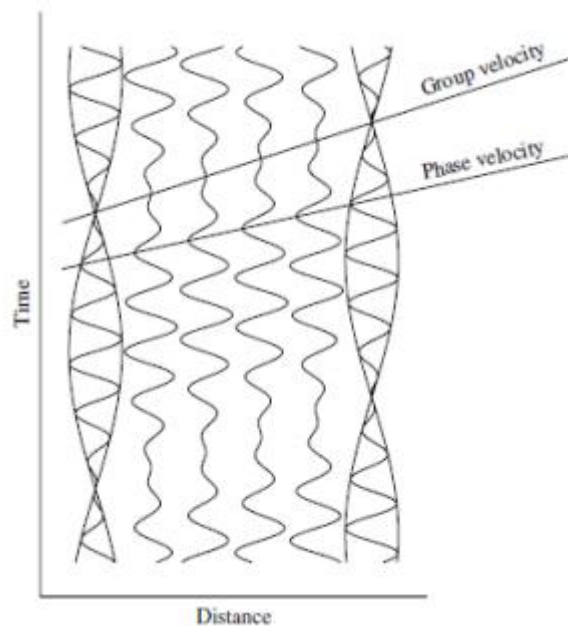


Gambar 12. Himpunan *Green's Function* Gelombang Rayleigh Antara Satu Stasiun Dengan Stasiun Lainnya (Martha, 2017)

3.7. Kecepatan Grup dan Kecepatan Fase

Gelombang-gelombang yang timbul dari hampir semua sumber seismik terdiri dari suatu spektrum frekuensi yang kontinu. Gelombang-gelombang ini memiliki komponen harmonik yang masing-masing memiliki kecepatan yang disebut sebagai kecepatan fase ($C(\omega)$). Kecepatan fase dapat diartikan sebagai kecepatan menjalarnya gelombang dengan frekuensi tunggal. Sehingga kecepatan fase hanya menjelaskan kecepatan merambatnya setiap puncak sinyal (Muhajir, 2014). Saat spektrum frekuensi muncul, gelombang-gelombang tersebut mengalami interferensi dan menghasilkan pola-pola konstruktif (saling membangun) dan destruktif (saling menghilangkan). Pola-pola interferensi yang bersifat konstruktif bersifat sebagai paket-paket gelombang yang merambat sebagai gangguan di sepanjang permukaan yang kemudian disebut sebagai kecepatan grup $U(\omega)$ (Adi,

2002). Gambaran kecepatan grup dan kecepatan fasa disajikan sebagai berikut (Gambar 13).



Gambar 13. Kecepatan fase dan kecepatan grup gelombang Rayleigh (Shearer, 2009)

Adapun hubungan antara kecepatan fase dengan kecepatan grup diberikan sebagai berikut (Larson dan Ekström, 2001).

$$U(\omega) = \frac{d\omega}{dk} = c + k \frac{dc}{dk}, \quad (9)$$

dimana,

ω : frekuensi angular,

k : bilangan gelombang,

c : kecepatan fase $c(\omega) = \frac{\omega}{k}$.

3.8. *Fast Marching Method (FMM)*

Fast marching method (FMM) ialah algoritma numerik berbasis grid yang melakukan propagasi maju (*front propagation*) dari suatu titik ke segala arah yang mungkin (Soelaiman dkk., 2006). FMM digunakan untuk melakukan komputasi waktu tempuh dan pelacakan arah sinar (*raypath*). Kebanyakan pendekatan

numerik memperhitungkan waktu tempuh dan arah sinar menggunakan dua metode. Metode yang pertama yakni menyelesaikan persamaan kinetik sinar dengan metode berbasis sinar (*ray-based*). Metode yang kedua ialah menyelesaikan persamaan eikonal (perhitungan gradien waktu tempuh gelombang permukaan) untuk menentukan jalan tercepat antara dua buah titik (White, 2020; Ritzwoller dkk., 2011).

3.9. Pemodelan Kedepan dan Pemodelan Kebelakang

Dalam ilmu geofisika dikenal dua jenis pemodelan, yakni pemodelan kedepan dan pemodelan kebelakang. Pemodelan kedepan dilakukan dengan menentukan parameter model terlebih dahulu, kemudian diperiksa apakah model yang telah dibuat mirip dengan data observasi. Sebaliknya pada pemodelan kebelakang parameter yang digunakan untuk *modelling* didapatkan langsung dari data. Dalam pembuatan model kecepatan pemodelan kedepan dan pemodelan kebelakang dilakukan secara iteratif sehingga mendapatkan *travel time* yang sesuai dan mengurangi nilai standar deviasi pada setiap iterasi (Muhajir, 2014).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Lapangan Panas Bumi Way Ratai, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. Kegiatan yang dilakukan ialah pengukuran *ambient noise* menggunakan PiGraf. Selanjutnya data seismometer yang telah didapatkan diolah di Laboratorium Instrumentasi Geofisika, Gedung Teknik Geofisika, Jalan Prof. Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kecamatan Rajabasa, Kota Bandar Lampung. Waktu pengejaan skripsi ialah dari tanggal 1 April – 1 Juli 2023. Adapun alur waktu pengerjaan skripsi sebagai berikut (Tabel 2).

Tabel 2. Jadwal Penelitian Skripsi

Kegiatan	April				Mei				Juni				Juli				Agustus			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Penyusunan Proposal Skripsi																				
Seminar Usul																				
Persiapan Pra Lapangan																				
Akuisisi Data Lapangan																				
Penyusunan Skripsi																				
Revisi dan Bimbingan Skripsi																				
Seminar Hasil																				
Sidang Komprehensif																				

4.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang dipakai dalam penelitian ini digunakan untuk menunjang proses akuisi dan pengolahan data. Adapun alat dan bahan yang digunakan sebelum dan saat akuisisi data ialah:

1. Seismograf (PiGraf)
2. Baterai
3. Selubung Pelindung Seismograf
4. Smartphone/Laptop
5. GPS
6. Buku Catatan Lapangan

Sedangkan alat dan bahan yang digunakan saat proses pengolahan data ialah:

1. Data hasil akuisisi PiGraf
2. Laptop dengan sistem operasi *Linux Pop Os*
3. *Software WPS Office*
4. *Software Seisgram2k*
5. *Software Matlab R2018a*
6. *Software Quantum GIS*
7. *Script Matlab: Ambient Noise Cross-correlation for daily long* (Yao, 2015)
8. *Software Dispersion Analysis Matlab GUI* (Yao, 2015)
9. *Intel® Fortran Compiler*
10. Program *fmst v1.1*. (Rawlinson, 2005)

4.3. Tahap Akuisisi Data

Akuisisi data dilakukan di Lapangan Panas Bumi Way Ratai. Akuisisi data dilakukan di 4 titik pengukuran. Sehingga dibangunlah 4 buah stasiun. Sebelum dilakukan akuisisi kami melakukan studi literatur dan studi lapangan untuk mendapatkan titik akuisisi yang ideal. Akuisisi data akan dilaksanakan dengan Tim Ratai TG UNILA. PiGraf ketika proses akuisisi diletakkan di bawah tanah sekitar kedalaman ± 60 cm dan dimasukkan kedalaman ember untuk menjaga air. Ember yang digunakan sebagai stasiun didalamnya di cor dan dibawah ember diberi pasak yang berfungsi untuk menghantarkan gelombang seismik yang akan

direkam (Gambar 14). Setelah pemasangan stasiun selesai, PiGraf dibiarkan di tempat selama sekitar 1 minggu pengukuran untuk mendapatkan data *ambient noise* perhari dan setelahnya dapat dilakukan *stacking data*. Keempat stasiun ini dikunjungi setiap hari guna pengambilan data dan pergantian *accu* (Gambar 15).



Gambar 14. Stasiun PiGraf



Gambar 15. Pergantian Accu

4.4. Tahap Pengolahan Data

Adapun tahapan pengolahan data meliputi *preprocessing*, korelasi silang *ambient noise*, pengolahan kurva dispersi, dan tomografi *ambient noise*. Hal yang pertama dilakukan ialah memotong data supaya menjadi data harian. Selanjutnya dilakukan *preprocessing data*, yakni persiapan data setiap stasiun sebelum

dilakukan korelasi silang. Pada penelitian ini *preprocessing data* dan korelasi silang dilakukan menggunakan *Script Matlab: Ambient Noise Cross-correlation for Daily Long* oleh Yao (2015). Kemudian dilakukan analisis kurva dispersi kecepatan grup gelombang Rayleigh dengan menggunakan *Software Dispersion Analysis Matlab* oleh Yao (2015) yang berbasis GUI (*Graphical User Interface*) *Matlab*. Setelahnya dilakukan tomografi kecepatan grup gelombang Rayleigh menggunakan program *fmst v.1.1*.

4.4.1. Persiapan Data

Keluaran data dari PiGraf masih dalam bentuk biner. Olehnya perlu dilakukan perubahan data ke dalam format *.SAC. Kemudian data pengukuran dicacah dalam rentang waktu per-hari untuk mendapatkan korelasi silang per-hari.

4.4.2. Korelasi Silang *Ambient Noise*

Format data *.SAC dibutuhkan untuk dapat melakukan pengolahan data menggunakan *software Matlab*. Adapun proses korelasi silang dilakukan menggunakan *Script Matlab: Ambient Noise Cross-correlation for Daily Long*. Pada kumpulan *script Matlab* ini dilakukan *preprocessing* meliputi reduksi *sampling rate*, koreksi instrumen, *detrend* dan *demean* data, normalisasi *one-bit*, pemutihan frekuensi, serta filter *bandpass*. Akan tetapi pada penelitian ini tidak dilakukan koreksi instrumen dikarenakan alat yang digunakan ialah seismometer dengan jenis yang sama. Kemudian dilakukan korelasi silang data dan *stacking* serta distribusi *ambient noise* dalam bidang azimuthal. Keseluruhan rangkaian *script* ini diperlihatkan pada gambar berikut (Gambar 16).

Name	Date modi...	Type	Size	
CFs_Whittempnorm_test	11/07/201...	File folder		folder penyimpanan hasil korelasi silang antar stasiun
dataSAC	10/07/201...	File folder		folder data mentah yang akan diolah
Resp	11/07/201...	File folder		folder data respon instrumen stasiun
.DS_Store	22/09/201...	DS_STORE ...	16 KB	
CFArrayAmpAnalysis	07/03/202...	ASV File	12 KB	
CFArrayAmpAnalysis	07/03/202...	M File	12 KB	script analisis amplitudo susunan fungsi korelasi silang
CrossCorrelation	05/03/202...	M File	8 KB	script fungsi korelasi silang <i>single broadband</i>
nfile	26/02/202...	CoreIDRA...	222 KB	
noisecorr_sac_parfor	10/07/201...	M File	10 KB	script <i>parfor</i> <i>Noisecorr_SAC_v4</i> untuk korelasi silang data
Noisecorr_SAC_v4	07/03/202...	M File	8 KB	script utama, tempat mengatur semua parameter yang diinginkan
OBSsta	01/05/201...	Text Docu...	1 KB	daftar stasiun pengukuran
OBSstaResp	06/03/201...	Text Docu...	1 KB	daftar data respon instrumen stasiun pengukuran
Rd_InstruRespFile	08/07/201...	M File	2 KB	script untuk membaca file respon instrumen
readme	13/07/201...	Text Docu...	3 KB	
readsac	22/09/201...	M File	29 KB	script untuk membaca data *.SAC
readsacFS	12/03/201...	M File	3 KB	script untuk melakukan plot data
rmResp_bpfilter	08/07/201...	M File	7 KB	script untuk koreksi instrumen dan melakukan filter <i>bandpass</i>

Gambar 16. Rangkaian *script* Matlab: *Ambient Noise Cross-correlation for Daily Long*

Proses pengolahan yang terjadi dilakukan secara otomatis dengan *script* utama yakni “Noisecorr_SAC_v4.m” yang berjalan secara paralel dengan *script* pendukung. Sebelum melakukan *running script* utama perlu disetel parameter-parameter yang diinginkan pada *script* “Noisecorr_SAC_v4.m” (Gambar 17). Parameter-parameter tersebut meliputi rentang periode, *sampling frequency* baru, rentang tahun data, rentang hari pada tahun tersebut, panjang jeda waktu maksimal untuk kedua sisi fungsi korelasi silang (CFs), dan panjang waktu segmen untuk korelasi silang.

```

55 function Noisecorr_SAC_v4
56
57 %%-----Define the value of essential parameters in the programs-----
58 %
59 StaFile = 'OBSsta.txt'; % file containing the station information
60 RespFile = 'OBSstaResp.txt'; % file containing corresponding station response file (RESP. format)
61 IndexRmResp = 0; % index of performing instrument response removal or not: =1 remove, will use RespFile; otherwise, RespFile is not used
62 %
63 % datadir = './dataSAC/'; % folder containing all sac data for all stations (data must be named with Julian day ...)
64 %
65 % PeriodBand = [2 5; 5 10; 10 20; 20 40]; % multiple connecting period bands for temporal normalization of ambient noise data
66 %
67 % the final output CFs are broadband CFs from the smallest to largest period, here [2 40]s
68 %
69 % fNew = 5; % data resampling frequency: original sample freq / fNew must be an integer!!!
70 %
71 %
72 IndexWhiteSpec = 1; % = 1, spectrum whitening; otherwise use original spectrum
73 %
74 IndexCorrMethod = 2; % = 1: one-bit cross correlation; = 2: temporal normalization cross-correlation
75 %
76 % yearrange = [2008 2008]; % year of the data
77 %
78 % dayrange = [1 366]; % range of days in a year for CF calculation
79 %
80 % MaxSegTime = 500; % maximum time length (in seconds) for each side of CFs
81 %
82 % SegHour = 2; % data segment length (in hour) for data preprocessing (removing response, whitening)
83 %
84 % cmp1 = '2'; % data component (L, E, N) for the first station for the processing
85 %
86 % cmp2 = '2'; % data component (L, E, N) for the second station for the processing
87 %
88 % outCFdir = './CFs_Whittempnorm_test/'; % output folder for CFs
89 %
90 %
91 IndexParfor=0; % =1, use parallel computing; otherwise don't use parallel computing.
92 %
93 n_parpool=4; % for parfor, use n_parpool cores in one CPU. (only be used in case of IndexParfor=1)
94 %

```

Gambar 17. Masukan parameter pada *script* “Noisecorr_SAC_v4.m”

Pemilihan periode maksimal pada rentang periode diberikan oleh Bensen dkk. (2007) dimana jarak antar stasiun (Δ) minimal 2-3 kali panjang gelombang (λ). Sehingga apabila diberikan perkiraan kecepatan grup gelombang Rayleigh (U). Maka

$$U = \lambda/T, \quad (10)$$

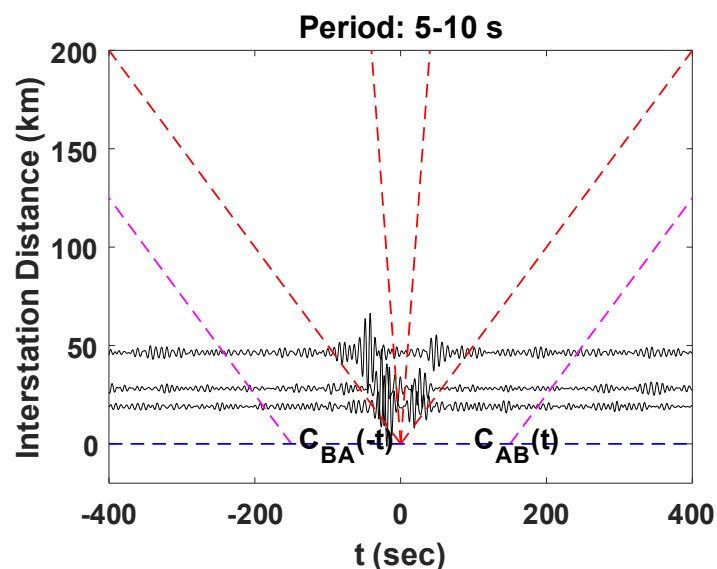
dimana T merupakan periode dan

$$\Delta_{min} = 2\lambda, \quad (11)$$

didapatkanlah persamaan periode maksimal

$$T_{maks} = \Delta/2U. \quad (12)$$

Pada proses *preprocessing data ambient noise* perlu dilakukan *resampling data* guna menghemat waktu pengolahan. Umumnya frekuensi baru yang digunakan ialah 1 Hz. Akan tetapi pada penelitian ini *sampling data* baru yang dipakai ialah 5 Hz mengingat data yang diolah memiliki panjang waktu 2 minggu saja. Kemudian segmen data untuk korelasi silang ialah 2 jam mengikuti skema pengolahan oleh Martha dkk. (2017). Keluaran data yang akan didapatkan ialah fungsi korelasi silang (CFs). Data korelasi silang yang sudah diolah dapat menampilkan himpunan data fungsi korelasi silang CFs pada *corellogram* (Gambar 18).



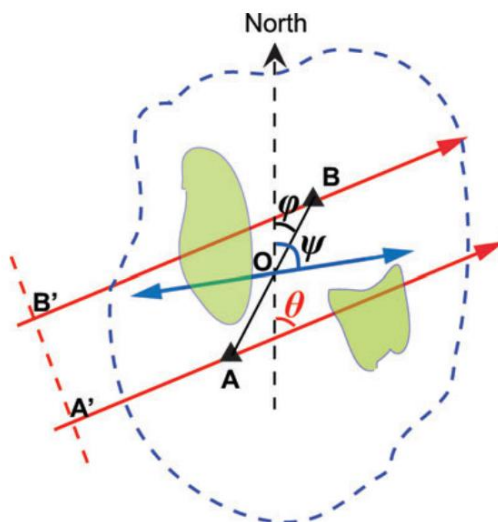
Gambar 18. Contoh himpunan fungsi korelasi silang antar stasiun

Periode yang digunakan dapat disetel sehingga dapat dibandingkan nantinya periode mana yang memiliki hubungan himpunan antar pasang stasiun yang baik. Sehingga dapat dihitung kecepatan grup rata-rata berdasarkan *trend* kepadatan amplitudo tinggi pada himpunan *corellogram*. Terlihat pada

contoh (Gambar 18) jarak antar stasiun akan berbanding lurus dengan jeda waktu. Garis putus-putus berwarna ungu merupakan jendela *noise*. Sedangkan garis putus-putus berwarna merah ialah jendela sinyal.

4.4.3. Distribusi Energi *Ambient Noise*

Yao dan van der Hilst (2009) menghitung distribusi energi *ambient noise* dengan pendekatan *plane-wave modelling*. Geometri *plane-wave modelling* diberikan sebagai berikut (Gambar 19).

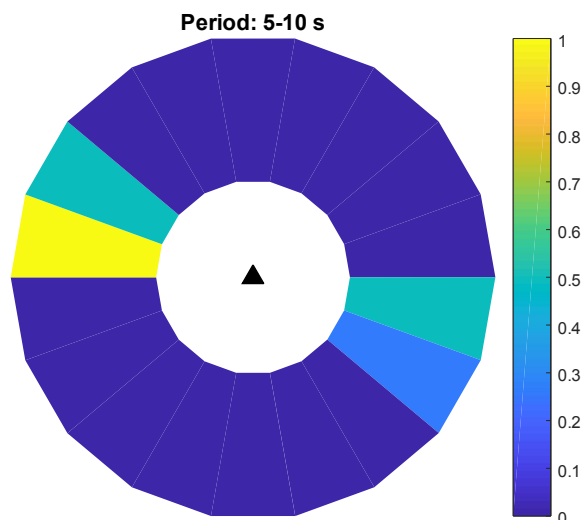


Gambar 19. Geometri *plane-wave modelling* (Yao dan van der Hilst, 2009)

Plane-wave dengan sudut azimuth θ ditunjukkan oleh Gambar 18. Garis putus-putus merah menunjukkan bagian *wavefront* dari *plane-wave* yang tegak lurus dengan jalur sinar yang ditunjukkan oleh panah berwarna merah. Dua stasiun A dan B dengan titik pusat O dan sudut azimuth ϕ (dari A ke B). Daerah berwarna hijau merupakan anomali kecepatan. Sedangkan arah dengan sudut azimuth ψ pada titik O ditampilkan sebagai batang biru. Hubungan antara fungsi korelasi silang $C_{AB}(\omega, t)$ dengan energi *ambient noise* diberikan sebagai berikut:

$$C_{AB}(\omega, t) = \int_0^{2\pi} E_p(\omega, \theta) \cos[\omega(t - \delta t)] H(t, \delta t) d\theta \quad (13)$$

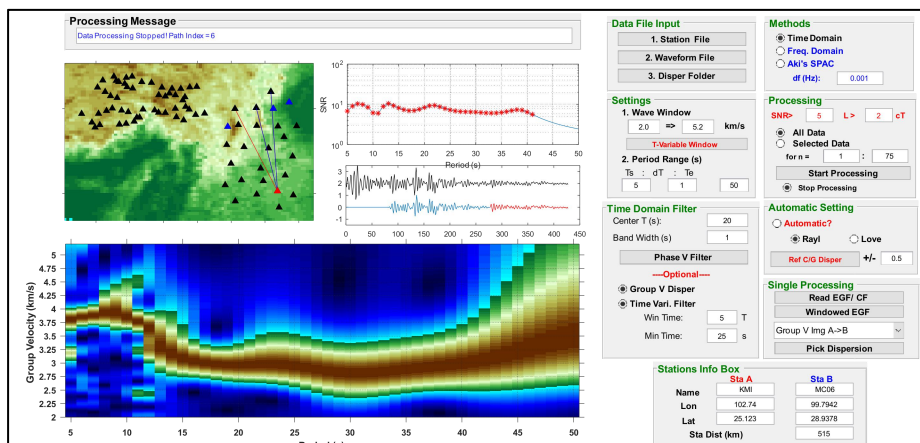
dengan E_p merupakan energi *ambient noise* dan $H(t, \delta t)$ merupakan *taper-function*. Sehingga didapatkan *pie chart* yang menunjukkan arah *ambient noise* secara azimuthal (Gambar 20). Olehnya dapat dilihat dari mana arah *ambient noise* paling banyak berasal dengan melihat amplitudo yang sudah dinormalisasi yang paling tinggi.



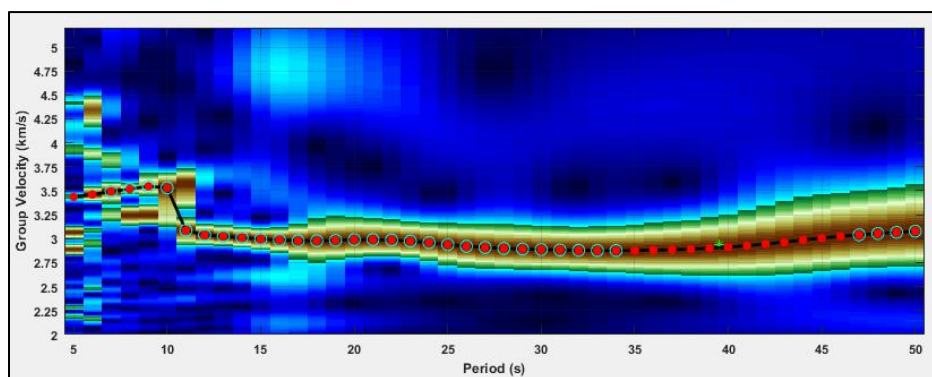
Gambar 20. Contoh distribusi energi *ambient noise*

4.4.4. Kurva Dispersi Kecepatan Gelombang Rayleigh

Pengolahan kurva dispersi kecepatan gelombang Rayleigh dilakukan menggunakan *Software Dispersion Analysis Matlab GUI* oleh Yao (2015) (Gambar 21). Masukan data yang diperlukan ialah *file* daftar stasiun, *file waveform* berupa fungsi korelasi silang (CF) atau berupa fungsi *Green's empiris* (EGF), dan folder tempat keluaran kurva dispersi. Adapun parameter yang perlu disetel ialah lebar jendela kurva dispersi meliputi rentang kecepatan (km/s) dan rentang periode (s), nilai rentang periode untuk filter dalam domain waktu, memilih kecepatan grup atau kecepatan fase yang akan dipilih untuk diambil dan disimpan, data yang akan diolah, dan pemilihan kecepatan gelombang Rayleigh atau gelombang Love. Kurva dispersi yang didapatkan dapat kemudian dilakukan *picking* untuk mendapatkan nilai kecepatan di setiap periode (Gambar 22).



Gambar 21. Software dispersion analysis Matlab GUI

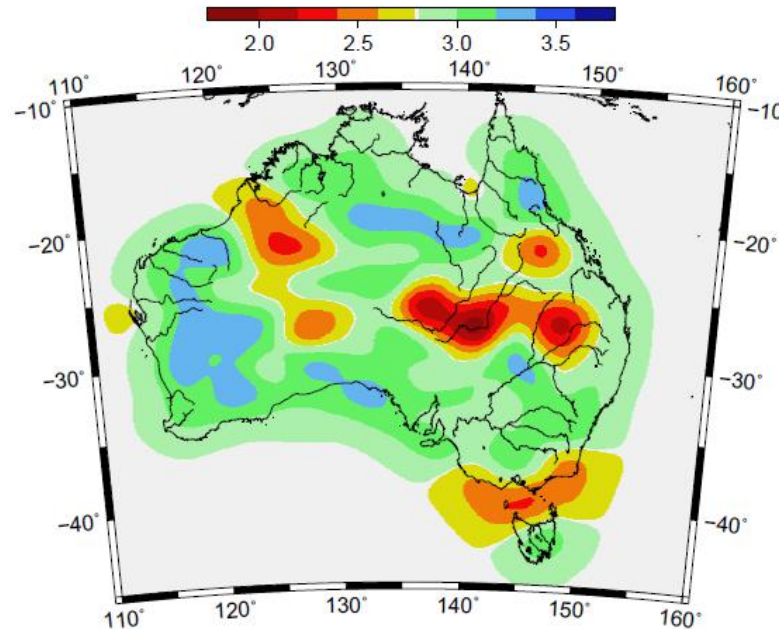


Gambar 22. Picking pada kurva dispersi

4.4.5. Tomografi *Ambient Noise*

Pada penelitian ini dilakukan tomografi *ambient noise* dengan membuat peta kecepatan gelombang Rayleigh menggunakan program *fnst v1.1* oleh Rawlinson (2005). Pada program ini dilakukan inversi dengan masukan waktu tempuh gelombang antar stasiun untuk tiap periode yang berbeda. Dalam melakukan inversi ini digunakan pendekatan *fast marching method* (FMM) untuk melacak muka gelombang pada medium yang heterogen. Metode ini bersifat non-linier karena langkah inversi diasumsikan secara linier tetapi penerapan berulang FMM memungkinkan terjadinya hubungan non-linier antara kecepatan dan waktu tempuh. Selama inversi iteratif jalur yang menghubungkan dua stasiun diperbarui terus-menerus. *Tomografi*

ambient noise dengan pendekatan *fast marching method* (FMM) pernah dilakukan oleh Saygin dan Kennett (2012) untuk memetakan kecepatan gelombang geser di Australia (Gambar 23).



Gambar 23. Hasil inversi ANT di Australia (Saygin dan Kennet, 2012)

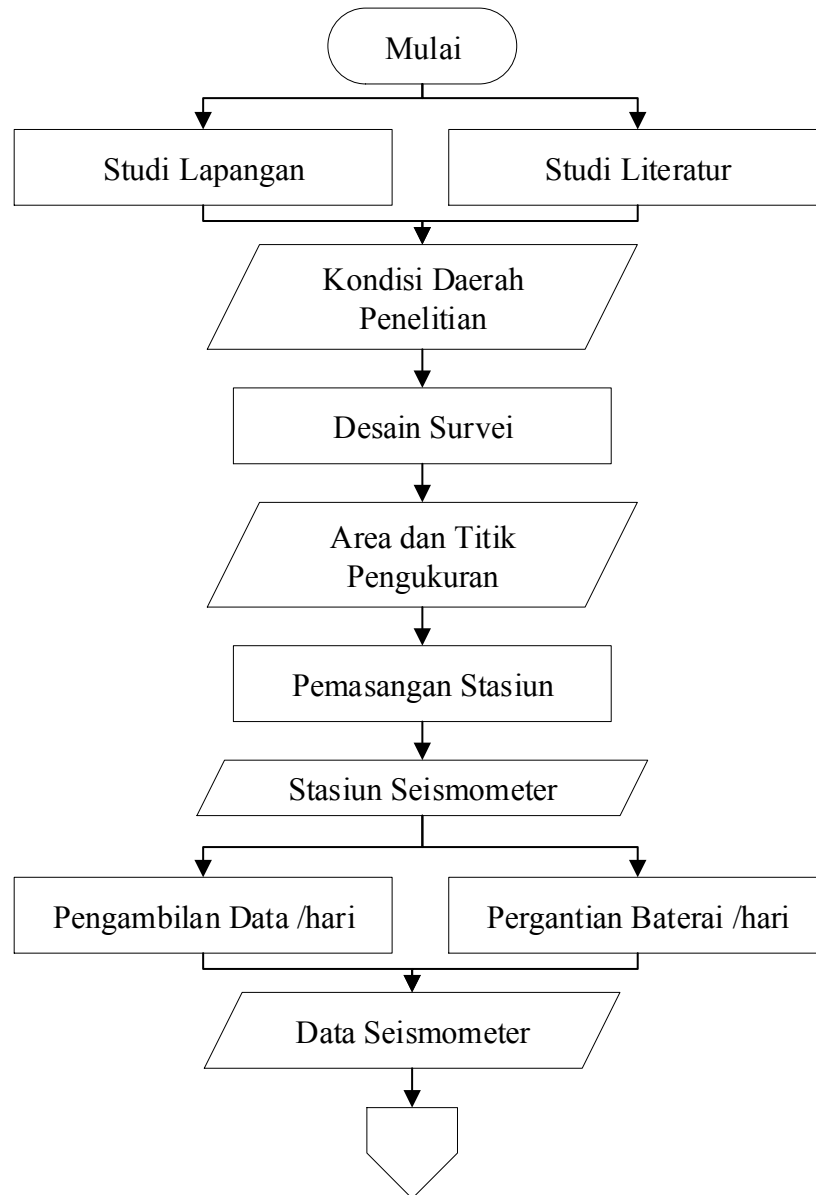
4.5. Analisis dan Interpretasi

Setelah dilakukan pengolahan data yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, hasil pengolahan berupa korelasi silang, kurva dispersi, dan kecepatan gelombang Rayligh di daerah penelitian dilakukan interpretasi dan analisis. Interpretasi dan analisis kecepatan yang dilakukan ialah mengacu pada aspek hubungan kecepatan dengan sistem panas bumi. Penelitian sebelumnya tentang tomografi *ambient noise* pada lapangan panas bumi Hengil, Islandia (Sánchez-Pastor dkk., 2021), hasil tomografi kecepatan digunakan dalam analisis reservoir. Reservoir panas bumi memiliki anomali kecepatan yang rendah dibanding daerah sekelilingnya. Hal ini dikarenakan batuan pada reservoir panas bumi pada umumnya memiliki rekahan alami (Saptadji, 2001). Adapun informasi model geofisika dari panas bumi pada daerah penelitian yang telah dilakukan dapat digunakan sebagai pembanding dan pendukung dalam analisis dan

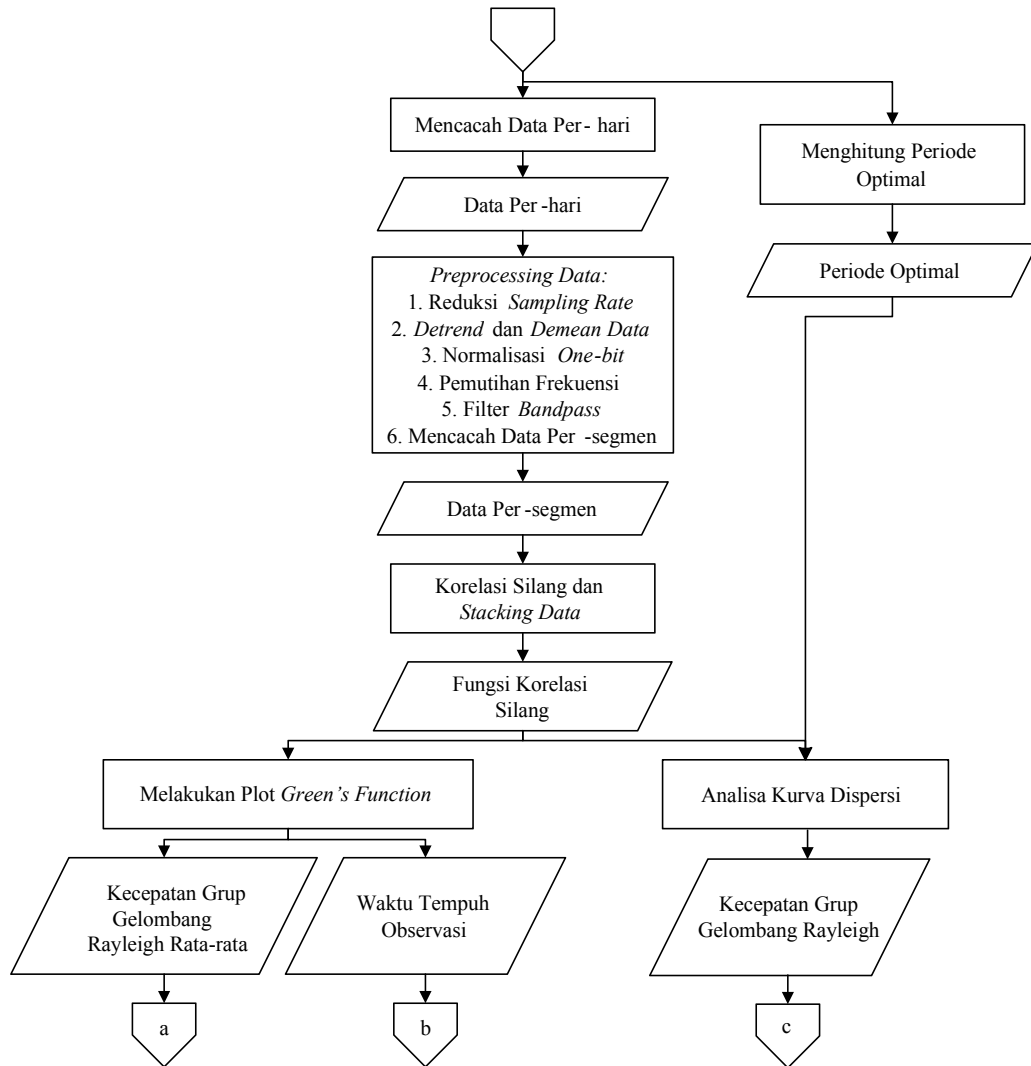
interpretasi. Menurut (Amiri, 2017) kecepatan berbanding lurus dengan densitas dan berbanding terbalik dengan temperatur. Hubungan antara parameter fisis inilah yang akan digunakan dalam analisis dan interpretasi.

4.6. Diagram Alir

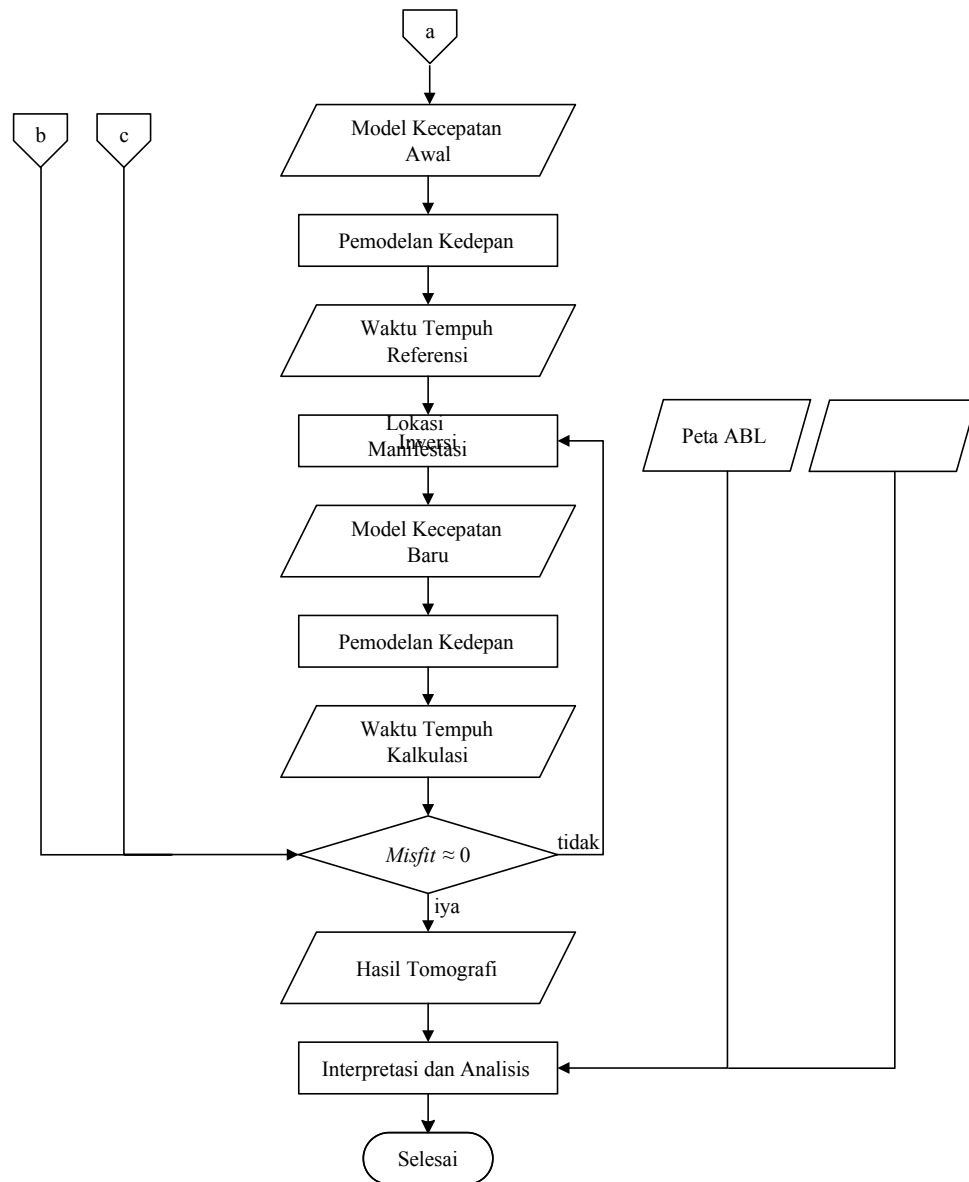
Adapun diagram alir penelitian terlihat sebagai berikut (Gambar 24).



Gambar 24. Diagram Alir Penelitian



Gambar 24. Diagram Alir Penelitian (Lanjutan 1)



Gambar 24. Diagram Alir Penelitian (Lanjutan 2)

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil pengukuran PiGraf di 4 stasiun yang berbeda didapati bahwa karakter *ambient noise* yang terekam pada PiGraf cenderung sunyi pada stasiun yang jauh dari keramaian dan sebaliknya. Adapun *Green's function* yang didapatkan dari hasil korelasi silang *ambient noise* belum cukup mengidentifikasi waktu tempuh antar stasiun sedangkan kecepatan hasil kurva dispersi dapat diperoleh dengan baik akan tetapi kemenerusan dari kurva dispersi masih dianggap kurang.
2. Kecepatan grup yang didapatkan dari himpunan *Green's function* pada periode 0.2 – 0.5 s adalah 0.377 km/s, pada periode 0.5 – 1 s adalah 0.415 km/s dan pada periode 1 -5 s adalah 0.427 km/s. Sedangkan rentang kecepatan grup yang dimiliki oleh kurva dispersi ialah 0.3 – 0.8 km/s.
3. Manifestasi banyak terletak di kontras antara anomali tinggi dengan rendah pada peta kecepatan grup. Peta kecepatan grup juga berkaitan dengan peta anomali Bouguer lengkap di daerah penelitian.

6.2. Saran

Desain stasiun pengukuran perlu diperbaharui lagi untuk mereduksi getaran akibat air hujan. Pengukuran perlu dilakukan di waktu yang lebih lama dan ditempat yang jauh dari aktivitas manusia supaya mendapatkan separasi gelombang Rayleigh yang baik. Kemudian pembuatan peta kecepatan grup dapat dilakukan lagi dengan menambah *raypath* sehingga resolusi peta dapat ditingkatkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, K., dan Yuliyanto, G. 2002. Pemodelan Matriks Sensitivitas Dispersi Kecepatan Grup Gelombang Love dengan Metode Beda Hingga. *Berkala Fisika*, 5(1), 17-21.
- Adityatama, D. W., Purba, D. P., dan Muhammad, F. 2019. Manajemen Risiko Dalam Pengeboran Eksplorasi Panas Bumi Di Indonesia. *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 9(2), 1-17.
- Al Fath, M. I., Asshidiqi, M. F., dan Praja, M. B. 2018. Prototipe Sistem Monitoring Balanced Angular Momentum Seismometer Berbasis IoT. *Prosiding Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SINKO) 2018*, 341-346.
- Amiri, S. 2017. Overview of Seismic Ambient Noise Tomography. *Research Proposal*. Doi: 10.13140/RG.2.2.33945.31846.
- Amiruddin, A., Suharno, S., dan Karyanto, K. 2019. Desain dan Realisasi Accelerometer Berbasis Arduino sebagai Instrumen Pendeteksi Mikrotremor. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 5(3), 162-173.
- Anshori, M. 2014. Pencitraan Tomografi Ambient Noise untuk Menentukan Model Kecepatan Gelombang Rayleigh di Pulau Jawa. *Skripsi*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Anshori, M., Maryanto, S., Rahman, T. D., dan Panshori, A. 2018. Ambient Noise Tomography for Determining the Velocity Model of Rayleigh Wave in Java Island, Indonesia. *SSRG International Journal of Applied Physics (SSRG-IJAP)*, 5(1), 9-13.
- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., Levshin, A. L., Lin, F., Moschetti, M. P., Saphiro, N. M., dan Yang, Y. 2007. Processing Seismic Ambient Noise Data to Obtain Reliable Broad-Band Surface Wave Dispersion Measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1239-1260.
- Darmawan, I., Mulyasari, R., Amirudin, A., Efendi, D. S., dan Suharno, S. 2019. Uji Validasi Instrumen Akselerometer ADXL345 untuk Pengukuran Kerentanan Gempa dengan Metode HVSR. *Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri-SINTA 2019*.

- Donovan, R., Karyanto, K., dan Dewanto, O. 2018. Studi Sifat Termal Batuan Daerah Lapangan Panas Bumi Way Ratai Berdasarkan Pengukuran Metode Konduktivitas Termal. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 4(3). Doi: 10.23960/jge.v4i3.44.
- Ikhsan, F., dan Yudistira, T. 2019. Shear Wave Velocity Structure Construction Using Ambient Seismic Noise Tomography (ANT) In Palu, Central Sulawesi. *Jurnal Geofisika*, 17(2), 1-4.
- Haerudin, N., Karyanto, K., dan Kuntoro, Y. 2016. Radon and Thoron Mapping to Delineate The Local-Fault in The Way Ratai Geothermal Field Lampung Indonesia. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(7). 4804-4809. ISSN 1819-6608.
- Haerudin, N., Alami, F., dan Rustadi, R. 2019. *Mikroseismik, Mikrotremor dan Microearthquake Dalam Ilmu Kebumihan*. Bandar Lampung: Pusaka Media.
- Hidayatunnisak, S., Susilo, A., dan Anshori, M. 2014. Studi Tomografi Seismik Untuk Menentukan Model Kecepatan Gelombang P Daerah Bali. *Brawijaya Physics Student Journal*, 2(1).
- Hurriyah, H. 2013. Atenuasi Gelombang (Studi pada Gelombang Seismik). *Eksakta*, 2, 39-44.
- Kana, J. D., Djongyang, N., Raïdandi, D., Nouck, P. N., dan Dadjé, A. 2015. A Review of Geophysical Methods for Geothermal Exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 87-95.
- Karyanto, K., Haerudin, N., Zaenudin, A., dan Muharoroh, E. 2017. Studi Konduktivitas Panas Batuan Area Manifestasi Air Panas Natar Sebagai Zona Outflow Sistem Panas Bumi Way Ratai, Lampung. *Siger Unila*.
- Karyanto, K., 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 Seminar Nasional Ilmu Teknik Dan Aplikasi Industri Fakultas Teknik Universitas Lampung*, Vol. 3.
- Karyanto, K., Haerudin, N., Suharno, S., Darmawan, I., Adli, M., dan Manurung, P. 2021. Numerical Modeling for The Steady-State Condition of The Geothermal System in Way Ratai. *Journal of Applied Science and Engineering*, 25(3), 447-456. (Unpublished).
- Kiswiranti, D. 2019. *Seismologi (Dasar-dasar Seismologi dan Aplikasinya)*. Yogyakarta: Institut Sains dan Teknologi AKPRIND.

- Larose, E., Carrière, S., Voisin, C., Bottelin, P., Baillet, L., Guéguen, P., Walter, F., Jongsman, D., Guillier, B., Garambois, S., Gimbert, F., dan Massey, C. 2015. Environmental Seismology: What Can We Learn on Earth Surface Processes with Ambient Noise?. *Journal of Applied Geophysics*, 116, 62-74.
- Larson, E. W., dan Ekström, G. 2001. Global Models of Surface Wave Group Velocity. *Pure and Applied Geophysics*, 158, 1377-1399.
- Lehuteur, M., Vergne, J., Maggi, A., dan Schmittbuhl, J. 2016. Ambient Noise Tomography with Non-Uniform Noise Sources and Low Aperture Networks: Case Study of Deep Geothermal Reservoirs in Northern Alsace, France. *Geophysical Journal International*, 208(1), 193-210.
- Lestari, I. P. 2021. Geologi Daerah Way Lengkokai Dan Sekitarnya, Kecamatan Kelumbayan Barat, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. *Tugas Akhir B*. Lampung: Institut Teknologi Sumatera.
- Liu, Y., Zhang, H., Fang, H., Yao, H., dan Gao, J. 2018. Ambient noise tomography of three-dimensional near-surface shear-wave velocity structure around the hydraulic fracturing site using surface microseismic monitoring array. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 209-217.
- Maharani, R. S. 2015. Rancang Bangun Strong Motion Seismometer 3C Biaya Murah Berbasis MEMS Accelerometer. *Skripsi*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Mangga, S. A., Amirudin, A., Suwarti, T., Gafoer, S., dan Sidarto, S. 1993. *Peta Geologi Lembar Tanjung Karang, Sumatera*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Martha, A. A., Cummins, P., Saygin, E., dan Widiyantoro, S. 2017. Identification of The Existences of The Mud Volcanoes Beneath East Java-Indonesia Region Using Ambient Noise Tomography. *CTBT Science and Technology Conference 2017*. Doi: 10.13140/RG.2.2.29295.69284.
- McCourt, W. J., Crow, M. J., Cobbing, E. J., dan Amin, T. C. 1996. Mesozoic and Cenozoic plutonic evolution of SE Asia: evidence from Sumatra, Indonesia. *Geological Society Special Publications*, 106(1), 321-335.
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Skotlandia: Springer-Verlag.
- Nicolson, H., Curtis, A., Baptie, B., dan Galetti, E. 2012. Seismic interferometry and ambient noise tomography in the British Isles. *Proceedings of the Geologists' Association*, 123(1), 74-86. doi:10.1016/j.pgeola.2011.04.002
- Pratama, W., Rustadi, R., dan Haerudin, N. 2019. Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Wenner-Schlumberger Untuk Mengidentifikasi

Litologi Batuan Bawah Permukaan dan Fluida Panas Bumi Way Ratai di Area Manifestasi Padok di Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 5(1), 30-44.

- Putri, M. K., Suharno, S., Hidayatika, A. 2014. Introduction to Geothermal System of Way Ratai. *Proceedings Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2014*. Jakarta Convention Center, Indonesia: 4-6 Juni 2014.
- Rawlinson, N. 2005. *FMST: Fast Marching Surface Tomography Package–Instructions*. Canberra: Research School of Earth Sciences, Australian National University.
- Ritzwoller, M. H., Lin, F. C., dan Shen, W. 2011. Ambient Noise Tomography With a Large Seismic Array. *Comptes Rendus Geoscience*, 343(8-9), 558-570.
- Rosyidi, S. A. P. 2013. *Metode Analisis Gelombang Permukaan Untuk Penyelidikan Sub-Permukaan*. Yogyakarta: LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Rosyidi, S. A. P. 2020. *Evaluasi Daya Dukung Tanah Dasar Perkerasan Jalan Berbasis Kecepatan Gelombang Geser*. Yogyakarta: LP3M Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Sánchez-Pastor, P., Obermann, A., Reinsch, T., Ágústsdóttir, T., Gunnarsson, G., Tómasdóttir, S., Hjörleifsdóttir, V., Hersir, G.P., Agústsson, K., dan Wiemer, S. 2021. Imaging High-Temperature Geothermal Reservoirs with Ambient Seismic Noise Tomography, A Case Study of The Hengill Geothermal Field, SW Iceland. *Geothermics*, 96, 102207.
- Saptadji, N. M. 2001. *Teknik Panas Bumi*. Bandung: Penerbit ITB.
- Sarkowi, M., dan Wibowo, R. C. 2021. Geothermal Reservoir Identification in Way Ratai Area Based on Gravity Data Analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. Doi:10.1088/1742-6596/2110/1/012004.
- Saygin, E., dan Kennett, B. L. N. 2012. Crustal Structure of Australia from Ambient Seismic Noise Tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B1).
- Setiawan, A., Zulfakriza, Z., Nugraha, A. D., Rosalia, S., Priyono, A., Widiyantoro, S., Sahara, D. P., Marjiyono, M., Setiawan, J. H., Lelono, E. B., Permana, A. K., dan Hidayat, H. 2021. Delineation of Sedimentary Basin Structure Beneath The Banyumas Basin, Central Java, Indonesia, Using Ambient Seismic Noise Tomography. *Geoscience Letters*, 8, 1-15.

- Setyawan, N., Setiawan, M. R., dan Singarimbun, A. 2019. Identifikasi Aliran Fluida Panas Bawah Permukaan di Lapangan Panas Bumi Way Ratai Menggunakan Metode Self Potential. *Journal Of Science and Applicative Technology*, 3(1), 1-7.
- Shearer, P. M. 2009. *Introduction to Seismology*. Cambridge University Press.
- Soelaiman, R., Tjandra, E., dan Setiawan, I. M. A. 2006. Penerapan Metode Fast Marching Pada Perhitungan Geodesic Distance Permukaan Obyek Triangular Mesh. *Jurnal Informatika*, 7(1), 38-46.
- Suharno, S., Rustadi, R., dan Zaenudin, A. 2017. Geothermal Energy: Case Study Identification Based On Analysis Of Ion Balance And Reservoir Characteristic. *The 7th Annual Basic Science International Conference*, 8-9 Maret 2017, Malang, Jawa Timur.
- Suparman, Y. 2019. Pemantauan Seismik Ambient Noise dan Realtime Seismic Amplitude Measurement untuk Identifikasi Peningkatan Aktivitas Gunung Api. *Tesis*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Suryadi, S., Haerudin, N., Karyanto, K., dan Sudrajat, Y. 2019. Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Lapangan Panas Bumi Way Ratai Berdasarkan Data Audio Magnetotelluric (AMT). *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 3(1), 85-97.
- White, M. C., Fang, H., Nakata, N., dan Ben-Zion, Y. 2020. Pykonal: a Python Package for Solving The Eikonal Equation in Spherical and Cartesian Coordinates Using The Fast Marching Method. *Seismological Research Letters*, 91(4), 2378-2389.
- Yao, H., Beghein, C., Robert, D., dan Hilst, V. D. 2008. Surface Wave Array Tomography in SE Tibet from Ambient Seismic Noise and Two-Station Analysis-II Crustal and Upper-Mantle Structure. *Geophysical Journal International*, 173(1), 205-219.
- Yao, H., dan Van Der Hilst, R. D. 2009. Analysis of ambient noise energy distribution and phase velocity bias in ambient noise tomography, with application to SE Tibet. *Geophysical Journal International*, 179(2), 1113-1132.
- Yao, H. 2015. *Manual for EGF Analysis Time Freq Dispersion Software*. China: University of Science and Technology of China.
- Zaenudin, A., Karyanto, K., Damayanti, L., dan Sarkowi, M. 2011. Interpretasi Anomali Medan Magnetik pada Daerah Panasbumi Way Ratai Lampung. *Proceedings The 11th Annual Indonesian Geothermal Association Meeting & Conference*.

Zulfakriza, Z., Nugraha, A. D., Widiyantoro, S., Cummins, P. R., Sahara, D. P., Rosalia, S., Awali, P., Kasbani, K., Syahbana, D. K., Priambodo, I. C., Martanto, M., Ardianto, A., Husni, Y. M., Lesmana, A., Kusumawati, D., dan Prabowo, B. S. 2020. Tomographic Imaging of The Agung-Batur Volcano Complex, Bali, Indonesia, from The Ambient Seismic Noise Field. *Frontiers in Earth Science*, 43.