

**ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO UNTUK
MENENTUKAN ZONA AKTIF LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI
MENGUNAKAN PiGraf**

(Skripsi)

Oleh

**AIRLANGGA SANI CAHYA MARGALIU
1915051008**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO UNTUK
MENENTUKAN ZONA AKTIF LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI
MENGUNAKAN PiGraf**

**Oleh
AIRLANGGA SANI CAHYA MARGALIU**

**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 SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO UNTUK MENENTUKAN ZONA AKTIF LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI MENGUNAKAN PiGraf

Oleh

Airlangga Sani Cahya Margaliu

Way Ratai merupakan salah satu daerah di Indonesia yang memiliki potensi panas bumi yang belum dieksploitasi, sehingga penting dilakukan eksplorasi dengan metode geofisika. Pada penelitian kali ini dilakukan penelitian eksplorasi panasbumi menggunakan metode *microearthquake*. Alat yang digunakan yaitu PiGraf, merupakan sebuah seismograf yang dikembangkan oleh Tim Riset Way Ratai Unila. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan PiGraf dalam mendeteksi gempa mikro, serta mendapatkan sebaran episenter dan hiposenter gempa mikro untuk menentukan zona aktif panasbumi di Way Ratai. Akuisisi data dilakukan pada 9 sampai 16 Juli 2023 di Kecamatan Padang Cermin, Pesawaran, dengan menggunakan 4 stasiun pengukuran yang berjarak kurang lebih 5 km. Uji kalibrasi alat terlebih dahulu dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai kemampuan alat dalam merekam gempa. Berdasarkan hasil uji kalibrasi alat, didapatkan hasil bahwa alat telah dapat merekam gelombang dengan baik. Proses penentuan episenter dan hiposenter dilakukan menggunakan metode analisis *Geiger's Adaptive Damping* (GAD), yang kemudian direlokasi menggunakan analisis hypoDD untuk mendapatkan hasil yang lebih presisi. Terdapat 7 *event* gempa mikro yang teridentifikasi yang dominan tersebar di sekitar area penelitian dengan kedalaman hiposenter dari 230-12.797 meter. Lalu setelah relokasi, *event* tereduksi menjadi 4 *event* yang terfokus disekitar area penelitian dengan kedalaman hiposenter dari 2774-12.523. Zona aktif Lapangan Panasbumi Way Ratai belum bisa diidentifikasi, hal ini disebabkan oleh keterbatasan *event* gempa mikro yang dimiliki. Namun berdasarkan uji kalibrasi dan 7 *event* gempa mikro yang terekam dapat diketahui bahwa alat PiGraf telah berfungsi dengan baik, namun perlu terus dilakukan pengembangan lanjutan dari sisi alat dan tata cara akuisisi data seperti pengurangan jarak antar stasiun, penambahan periode waktu akuisisi, sampai peningkatan sensitivitas alat.

Kata Kunci: Panasbumi, *Microearthquake*, Episenter, Hiposenter, PiGraf

ABSTRACT

ANALYSIS OF MICROEARTHQUAKE HYPOCENTER DISTRIBUTION TO DETERMINE THE ACTIVE ZONE OF THE WAY RATAI GEOTHERMAL FIELD USING PiGraf

By

Airlangga Sani Cahya Margaliu

Way Ratai is one of the areas in Indonesia that has geothermal potential that has not been exploited, so it is important to carry out exploration using geophysical methods. In this research, geothermal exploration research was carried out using the microearthquake method. The tool used is PiGraf, a seismograph developed by the Way Ratai Unila Research Team. This research aims to determine PiGraf's ability to detect microearthquakes, as well as obtain the distribution of microearthquake epicenters and hypocenters to determine the active geothermal zone in Way Ratai. Data acquisition was carried out from 9 to 16 July 2023 in Padang Cermin District, Pesawaran, using 4 stations, located approximately 5 km apart. A calibration test is first carried out to obtain information about the PiGraf's ability to record earthquakes. Based on the results of the calibration test, it was found that the PiGraf was able to record seismic waves well. The process of determining the epicenter and hypocenter is carried out using analytical of Geiger's Adaptive Damping (GAD), which was then relocated using hypoDD analysis to obtain more precise results. There are 7 MEQ events identified, distributed around the study area with a hypocenter depth of 230-12,797 meters. Then after relocation, event were reduced to 4 events focused around the research area with a hypocenter depth of 2774-12,523. The active zone of the Way Ratai Geothermal Field cannot yet be identified, this is due to limitations micro earthquakes event owned. However, based on calibration tests and 7 event identified,.it can be seen that the PiGraf is functioning well, but further development needs to be carried out in terms of the improvement tool components in PiGraf and also data acquisition procedures, such as reducing the distance between stations, increasing the acquisition time period, and increasing the sensitivity of the sensor.

Keywords: Geothermal, Microearthquake, Epicenter, Hypocenter, PiGraf

Judul Skripsi : **ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA
MIKRO UNTUK MENENTUKAN ZONA
AKTIF LAPANGAN PANASBUMI
WAY RATAI MENGGUNAKAN PiGraf**

Nama Mahasiswa : *Airlangga Sani Cahya Margaliu*

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915051008**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**



Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

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

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

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

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

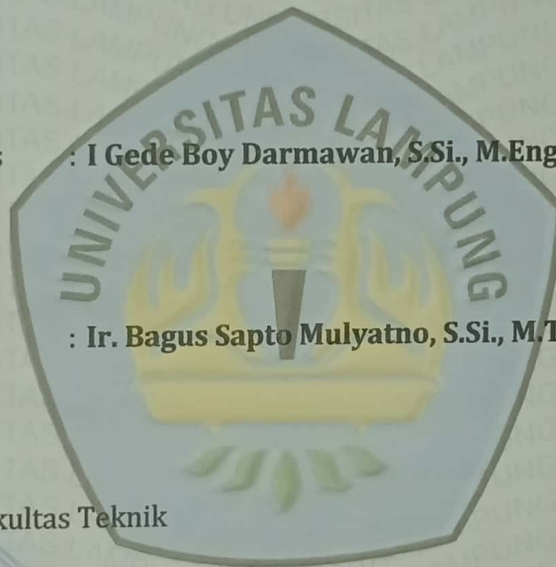
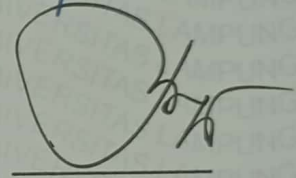
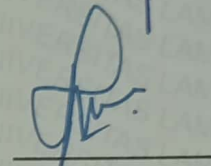
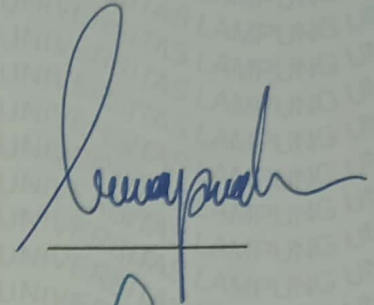
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

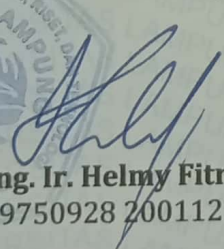
Sekretaris : I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng.

Anggota : Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik




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

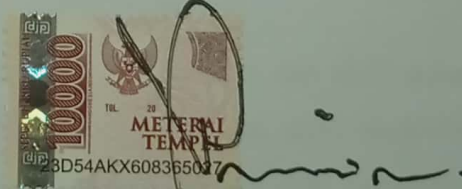
Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 15 September 2023

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis 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 ilmiah.

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

Bandar lampung, 29 September 2023



Airlangga Sani Cahya Margaliu
1915051008

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Airlangga Sani Cahya Margaliu, lahir di Bandar Lampung tanggal 16 Mei 2001, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Putra dari Bapak Mas Syafri Hasan dan Ibu Yunita Melani Hanafi. Memulai Pendidikan dari taman kanak-kanak Sandi Putra pada tahun 2006, kemudian melanjutkan pendidikan sekolah dasar di SDN 2 Rawa Laut, pendidikan sekolah menengah pertama di SMPN 4 Bandar Lampung, lalu pendidikan sekolah menengah atas di SMAN 10 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2019. Selanjutnya pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Teknik Geofisika Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN.

Selama masa kuliah, penulis memiliki ketertarikan yang tinggi dan aktif dalam kegiatan organisasi, khususnya yang berhubungan dengan sosial, anak-anak, dan pendidikan. Pengalaman organisasi pertama sebagai *Organizing Committee President* dari Program Widyawiyata AIESEC in Unila kemudian melanjutkan perjalanan di AIESEC in Unila sebagai Physical Marketing Manager pada Departemen Outgoing Global Volunteer sampai tahun 2021. Selanjutnya penulis aktif dalam organisasi jurusan yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana, mengawali perjalanan sebagai Ketua Pelaksana Bina Bakti Masyarakat Desa di Banjit, Way Kanan pada tahun 2021. Lalu menjadi Ketua Umum pada periode 2022.

Pada semester 6 penulis melaksanakan kerja praktik di Pusat Penelitian dan Pengembangan Tenaga Kelistrikan, Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (P3TKEBTKE) dengan judul “Identifikasi Struktur Geologi Daerah Panas Bumi Bittuang Berdasarkan Analisis *Second Vertical Derivative* Data Gaya Berat GGMPPlus 2013”. Kemudian berhasil menyelesaikan pendidikan Sarjana pada tanggal 15 September 2023 dengan judul “Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro untuk Menentukan Zona Aktif Lapangan Panas Bumi Way Ratai Menggunakan PiGraf”.

PERSEMBAHAN

Puji dan Syukur kepada Allah SWT, atas kehendak-Nya terselesaikannya skripsi ini dengan baik. Skripsi ini saya persembahkan kepada:

Ayah dan Ibu

Sebagai motivasi utama penulis dalam perkuliahan. Terima kasih atas segala doa, kasih sayang yang selalu tercurahkan tanpa henti. Terimakasih atas segala dukungan, baik secara materiil dan moril sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian perkuliahan.

Adik dan Keluarga

Terimakasih telah memberikan dukungan dan semangat kepada penulis dalam pelaksanaan seluruh rangkaian perkuliahan.

Teknik Geofisika Universitas Lampung 2019

Terimakasih atas semua pengalaman yang tercipta dan menjadi rumah kedua penulis selama berjuang di Teknik Geofisika Unila

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan semesta alam, karena berkat izin-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan kerja praktik yang berjudul “**Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro untuk Menentukan Zona Aktif Lapangan Panasbumi Way Ratai Menggunakan PiGraf**”. Adapun penulisan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Geofisika, Universitas Lampung. Terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang terlibat dalam penyusunan laporan ini. Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan di dalam penulisan skripsi ini, sehingga sangat diperlukan kritik dan saran yang membangun untuk menjadi lebih baik. Semoga laporan kerja praktik ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi siapapun yang membacanya serta bermanfaat bagi perkembangan ilmu kebumihan di masa yang akan datang

Bandar Lampung,

Penulis

Airlangga Sani Cahya Margaliu

NPM. 1915051008

SANWACANA

Dengan menyebut nama Allah SWT yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, segala puji penulis haturkan kepada Allah SWT karena berkat izin-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro untuk Menentukan Zona Aktif Lapangan Panasbumi Way Ratai Menggunakan PiGraf**”. Shalawat serta salam selalu turunkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang syafaat nya selalu kita nantikan di hari akhir kelak.

Dalam penyelesaian Laporan Kerja Praktik ini, terdapat banyak pihak terlibat, Adapun pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah dan Ibu tercinta, bapak Mas Syafri Hasan dan ibu Yunita Melani Hanafi yang selalu memberikan doa, dukungan, serta semangat.
2. Adik tersayang dan seluruh keluarga yang telah membantu mulai dari pelaksanaan kerja praktik sampai pembuatan laporan ini.
3. Bapak Karyanto, S.Si., M.T. selaku Dosen Pembimbing Satu Skripsi yang telah memberikan bimbingan dan dukungan selama proses pengerjaan pembuatan alat, akuisisi lapangan, pengolahan data, sampai penulisan skripsi ini.
4. Bapak I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Dua Skripsi yang telah memberikan bimbingan dan dukungan selama proses pengerjaan pembuatan alat, akuisisi lapangan, pengolahan data, sampai penulisan skripsi ini.
5. Bapak Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan dan koreksi terhadap penelitian ini.
6. Bapak Ibu Dosen Teknik Geofisika Universitas Lampung atas ilmu pengetahuan yang diberikan.

7. Haidar, Gita, dan Adel yang telah berjuang bersama-sama menyelesaikan penelitian ini dan membuat cerita yang luar biasa selama pelaksanaan penelitian ini.
8. Pak Darno dan Emak beserta keluarga besar yang telah memberikan bantuan selama masa akuisisi data di Way Ratai.
9. Ihsan, Alda, Gita sebagai salah satu *support system* terbaik yang telah menemani dari mulai kepengurusan Eskalasi Transformasi 2023 sampai saat ini dan seterusnya.
10. Sahabat-sahabat Beswan Djarum Beasiswa Plus angkatan 37 yang memberikan banyak inspirasi.
11. Keluarga besar Teknik Geofisika 19 Mak Kou Tanding yang menjadi rumah kedua selama penulis berada di perkuliahan.
12. “ tiptoearoundyou”
13. Serta semua pihak yang membantu menyelesaikan skripsi ini

Bandar Lampung, 29 September 2023

Penulis

Airlangga Sani Cahya Margaliu

NPM. 1915051008

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PERSETUJUAN.....	v
PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Lokasi Daerah Penelitian	4
2.2. Geologi Regional.....	4
2.3. Geologi Daerah Penelitian	6
2.3.1. Geomorfologi	7
2.3.2. Stratigrafi.....	7

2.3.3. Struktur Geologi	8
2.4. Panasbumi Way Ratai	9
2.5. <i>Roadmap</i> Pengembangan Pigaf.....	10
III. TEORI DASAR.....	12
3.1. Energi Panasbumi (<i>Geothermal</i>).....	12
3.1.1. Komponen Sistem Panasbumi.....	13
3.2. Sistem Panasbumi di Indonesia.....	14
3.3. Teori Dasar Gelombang Seismik	14
3.2.1. Gelombang Badan	15
3.2.2. Gelombang Permukaan	16
3.4. Metode <i>Microearthquake</i> (MEQ)	17
3.4.1. Parameter Sumber Gempa.....	19
3.4.2. Waktu Asal (<i>Origin time</i>).....	19
3.4.3. Hiposenter	20
3.4.4. Episenter.....	21
3.4.5. Magnitudo	21
3.5. Metode <i>Double difference</i>	21
IV. METODOLOGI PENELITIAN.....	23
4.1. Waktu dan Tempat Penelitian	23
4.2. Alat dan Bahan	24
4.3. Prosedur Penelitian.....	25
4.3.1. Uji Kalibrasi Alat	25
4.3.2. Studi Literatur dan Desain Akuisisi	25
4.3.3. Akuisisi Data	25
4.3.4. Pengolahan Data.....	27
4.3.5. Analisis dan Interpretasi.....	34
4.4. Diagram Alir Penelitian	35
V. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
5.1. Hasil Uji Kalibrasi Alat.....	37

5.2.	<i>Event</i> Gempa Mikro (MEQ) Periode 9 – 16 Juli 2023.....	39
5.3.	Waktu Tiba Gelombang P dan S	40
5.4.	Sebaran Episenter, Hiposenter, dan <i>Origin time</i> Gempa Mikro (MEQ) Sebelum Relokasi.....	41
5.5.	Sebaran Episenter, Hiposenter, dan <i>Origin time</i> Gempa Mikro (MEQ) Setelah Relokasi	43
5.6.	Plotting Distribusi Episenter dan Hiposenter Gempa Mikro (MEQ) Sebelum Relokasi.....	43
5.7.	Plotting Distribusi Episenter dan Hiposenter Gempa Mikro (MEQ) Setelah Relokasi	45
5.8.	Analisis dan Interpretasi Distribusi Episenter dan Hiposenter	46
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	49
6.1.	Kesimpulan.....	49
6.2.	Saran.....	49
	DAFTAR PUSTAKA	51
	LAMPIRAN.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi penelitian daerah panasbumi Way Ratai	4
2. Tektonik pulau sumatera (Darmawan dkk., 2021)	5
3. Peta geologi daerah penelitian	6
4. Peta distribusi densitas daerah Way Ratai (Sarkowi dkk., 2021).....	10
5. Perpindahan panas di bawah permukaan (Saptadji, 2009)	12
6. Model sistem panasbumi (Dickson dan Fanelli, 2003)	13
7. Peta zona penunjaman dan sebaran gunung api di Indonesia (Hochstein dan Sudarman, 2008).....	14
8. Perambatan gelombang P (Wahidah dkk., 2021)	15
9. Perambatan gelombang S (Wahidah dkk., 2021)	16
10. Perambatan gelombang Love (Wahidah dkk., 2021)	16
11. Perambatan gelombang Rayleigh (Wahidah dkk., 2021)	17
12. Tiga komponen gelombang gempa mikro (Hurukawa, 2008).....	18
13. Diagram wadati (Hurukawa, 2007)	19
14. Jarak hiposenter (Hurukawa, 2008).....	20
15. Ilustrasi algoritma metode <i>double difference</i> (Waldhauser dan Elsworth, 2000).....	22
16. Akuisisi data dan penggantian <i>accu</i>	26
17. <i>Casing</i> alat PiGraf.....	27
18. Tampilan PiGraf local server.....	28
19. Tampilan beranda software PiGrafSoft.exe.....	28
20. File input stasiun di software GAD	30
21. File input data waktu tiba gelombang P dan S di software GAD.....	30

22.	File input <i>velocity model</i> di software GAD	31
23.	Katalog <i>arrival time</i>	32
24.	Tampilan program <i>ph2dt.inp</i>	33
25.	Tampilan program <i>hypoDD.inp</i>	33
26.	Diagram alir penelitian	35
27.	Skema 1 uji kalibrasi alat.....	37
28.	Hasil rekaman seismogram uji kalibrasi skema 1.....	37
29.	Skema 2 uji kalibrasi alat.....	38
30.	Hasil rekaman seismogram uji kalibrasi skema 2.....	38
31.	Katalog gempa INATEWS BMKG 9 – 16 Juli 2023 (Sumber: BMKG)....	37
32.	Hasil pengolahan pada software GAD	40
33.	Peta distribusi episenter MEQ sebelum relokasi	42
34.	Distribusi hiposenter MEQ sebelum relokasi	42
35.	Peta distribusi episenter MEQ setelah relokasi	43
36.	Distribusi hiposenter MEQ setelah relokasi	44
37.	Distribusi Episenter dan Hiposenter MEQ a)Sebelum Relokasi b)Setelah Relokasi	45

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Stratigrafi daerah penelitian (modifikasi dari Mangga, 1993).....	8
2. Klasifikasi gempa berdasarkan magnitudo (Hurukawa, 2007).....	21
3. Tabel kegiatan.....	23
4. Alat dan bahan	24
5. Lokasi stasiun pengukuran	26
6. 1D <i>V_p seismic velocity model</i> (Kissling dkk., 1994).....	31
7. Data waktu tiba gelombang P dan S	39
8. Hasil perhitungan penentuan episenter, hiposenter, dan <i>origin time software</i> GAD.....	40
9. Hasil perhitungan penentuan episenter, hiposenter, dan <i>origin time software</i> hypoDD.....	41

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia memiliki potensi panasbumi sebesar 23,7 GW, yaitu sekitar 40% dari potensi di dunia. Hal ini karena secara geografis Indonesia berada di jalur cincin api. Dengan potensi yang sangat besar, pemanfaatan energi sampai tahun 2022 hanya sebesar 4.5% dari potensi yang dimiliki. Potensi sumber energi panasbumi ini perlu dimaksimalkan untuk mendukung program transisi energi dan program *net zero emission* Indonesia di tahun 2060 (Dewan Energi Nasional, 2022).

Provinsi Lampung terletak di jalur gunung api yang merupakan bagian dari busur sunda (*sunda arc*), hal ini yang menyebabkan Lampung memiliki banyak potensi sumber energi panasbumi. Salah satu daerah panasbumi di Lampung adalah Way Ratai. Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Elvira (2022) dilakukan perhitungan estimasi potensi energi panasbumi menggunakan metode volumetrik, didapatkan hasil jika Daerah Panasbumi Way Ratai memiliki potensi sebesar 62,55 Mwe dalam periode 30 tahun. Keberadaan panasbumi di daerah ini ditunjukkan oleh keberadaan manifestasi panasbumi berupa air panas, silika sinter, dan perbedaan vegetasi yang mencolok (Suharno dkk., 2016). Dengan potensi yang cukup besar Daerah Panasbumi Way Ratai masih belum dieksplorasi secara terpadu untuk pengembangan lebih lanjut salah satunya, yaitu penentuan sumur eksplorasi (*well targeting*).

Pada eksplorasi panasbumi, penentuan zona aktif panasbumi dapat dilakukan dengan menganalisis sebaran hiposenter gempa mikro. Metode geofisika yang dapat digunakan salah satunya adalah metode *microearthquake* (MEQ).

Metode ini menggunakan sumber pengukuran gelombang seismik natural dengan magnitudo kurang dari 3 (Maulida, 2015). Dalam eksplorasi panasbumi, metode MEQ dimanfaatkan untuk mengidentifikasi retakan berpotensi (sesar aktif) yang mempunyai porositas dan permeabilitas tinggi, menentukan perkiraan daerah prospek (zona aktif) panasbumi serta dapat membantu menentukan posisi bor sumur eksplorasi (Haerudin dkk., 2019). Penentuan sebaran hiposenter gempa mikro (MEQ) dapat dilakukan dengan beberapa metode, pada penelitian kali ini metode yang digunakan, yaitu metode *double difference* dengan *software* HypoDD. Metode ini dipilih sebab dalam relokasi hiposenter gempa metode ini memanfaatkan fakta bahwa jika jarak hiposenter antara dua gempa relatif lebih kecil dibandingkan dengan jarak *event* ke stasiun maka *raypath* nya dianggap sama. Perbedaan waktu tempuh dua *event* yang terekam pada stasiun yang sama itulah yang selanjutnya digunakan sebagai fungsi jarak untuk menghitung ulang hiposenter sehingga memiliki tingkat presisi yang tinggi (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).

Pada penelitian kali ini alat yang digunakan untuk mendeteksi gempa mikro (MEQ), yaitu PiGraf. PiGraf merupakan suatu seismograf berbasis *Raspberry Pi* yang dikembangkan oleh Tim Eksplorasi Way Ratai Teknik Geofisika Unila. PiGraf menggunakan 3 sensor *geophone* untuk merekam *event* gempa, dalam hal ini, yaitu *event* gempa mikro. Alat ini merupakan pengembangan dari Akselerometer Akselino yang telah dikembangkan sebelumnya oleh Amiruddin dkk (2019). PiGraf diharapkan dapat menjadi alat yang mampu mendeteksi gempa mikro untuk menentukan zona aktif panasbumi dengan kemampuan yang baik, relatif lebih murah, dan teknologi yang dapat terus berkembang.

Oleh karena itu penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan PiGraf sebagai alat untuk menganalisis sebaran gempa mikro untuk menentukan zona aktif Daerah Panasbumi Way Ratai yang dapat dimanfaatkan sebagai data pendukung dalam eksplorasi salah satunya untuk penentuan sumur eksplorasi (*well targeting*).

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui kemampuan PiGraf dalam mendeteksi gempa mikro (MEQ) dengan melakukan akuisisi data di Lapangan Panasbumi Way Ratai.
2. Mendapatkan sebaran hiposenter gempa mikro (MEQ) di Lapangan Panasbumi Way Ratai menggunakan metode analisis *double difference* (HypoDD).
3. Menentukan zona aktif Daerah Panasbumi berdasarkan analisis hiposenter gempa mikro (MEQ) di Lapangan Panasbumi Way Ratai

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah ini adalah sebagai berikut.

1. Data yang digunakan adalah data gempa mikro hasil akuisisi menggunakan PiGraf di Daerah Panasbumi Way Ratai.
2. Relokasi hiposenter gempa mikro dilakukan menggunakan metode *double-difference* (HypoDD).
3. Identifikasi zona aktif panasbumi didasarkan pada analisis sebaran hiposenter gempa mikro.

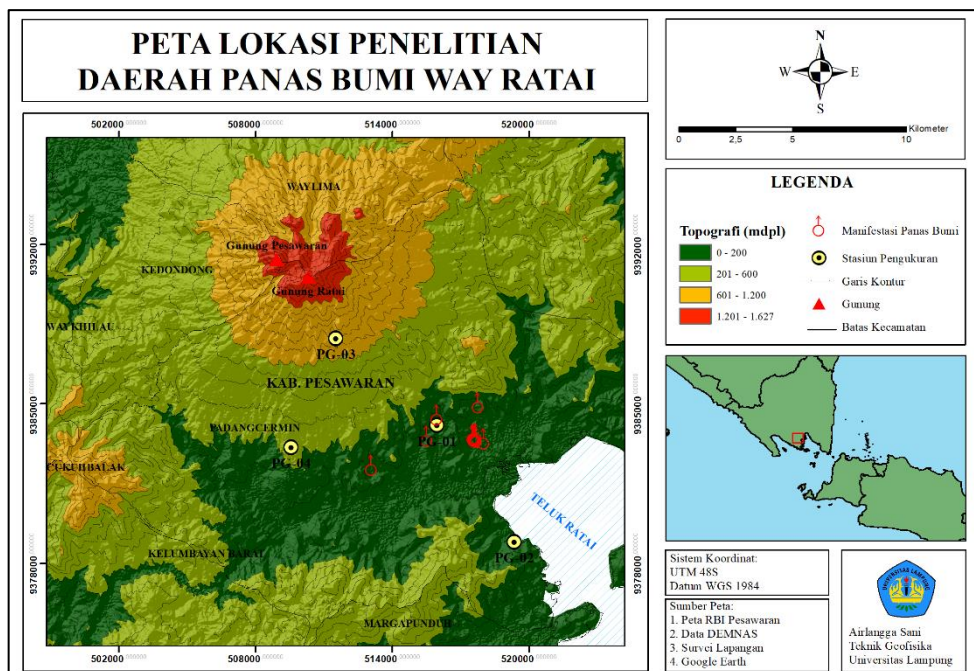
1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari dilaksanakannya penelitian ini adalah dapat memberikan informasi mengenai zona aktif Daerah Panasbumi Way Ratai yang dapat digunakan sebagai data pendukung untuk kegiatan eksplorasi, salah satunya dalam meningkatkan akurasi pada penentuan lokasi sumur eksplorasi (*well targeting*) di Daerah Panasbumi Way Ratai.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Daerah Penelitian

Daerah penelitian berlokasi pada Daerah Panasbumi Way Ratai, Kecamatan Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung, yang terletak pada koordinat 498892-524148 m S dan 9374485-9396560 m E. Berikut lokasi daerah penelitian ditunjukkan oleh Gambar 1.

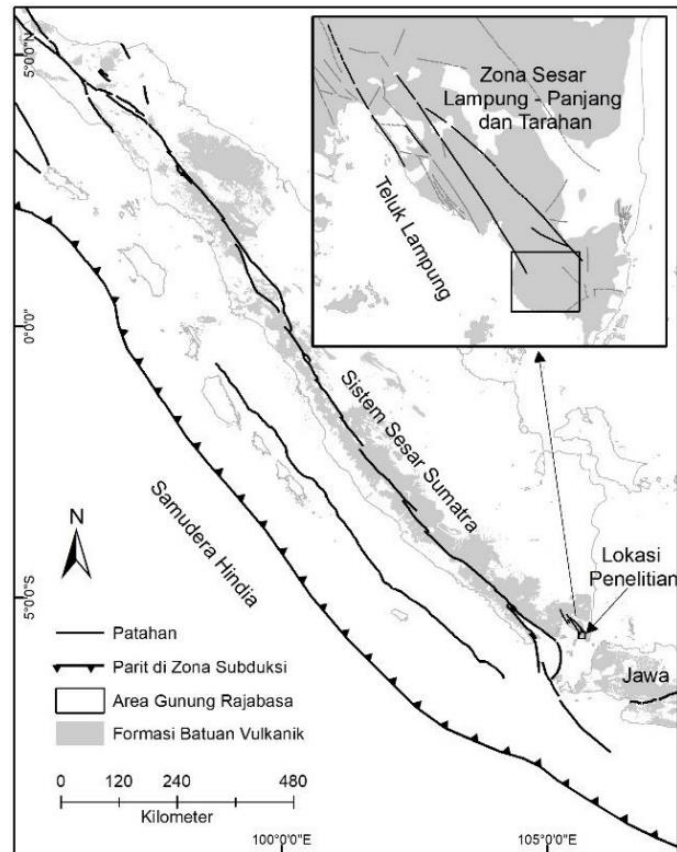


Gambar 1. Peta lokasi penelitian daerah panasbumi Way Ratai

2.2. Geologi Regional

Pulau Sumatera terletak di zona tektonik aktif lempeng Indo-Australia. Lempeng tersebut menujam dari barat atau barat daya ke Pulau Sumatera di bagian timur (Gambar 2). Pulau Sumatera secara umum tersusun oleh batuan sedimen tersier yang terletak di atas batuan metamorf, dan di beberapa tempat diterobos oleh

batuan beku mafik dan ultramafik. Lalu di sebelah timurnya terbentuk oleh cekungan busur yang terdiri dari sedimen serpih, batugamping dan sedimen vulkanik Miosen-Pleistosen.

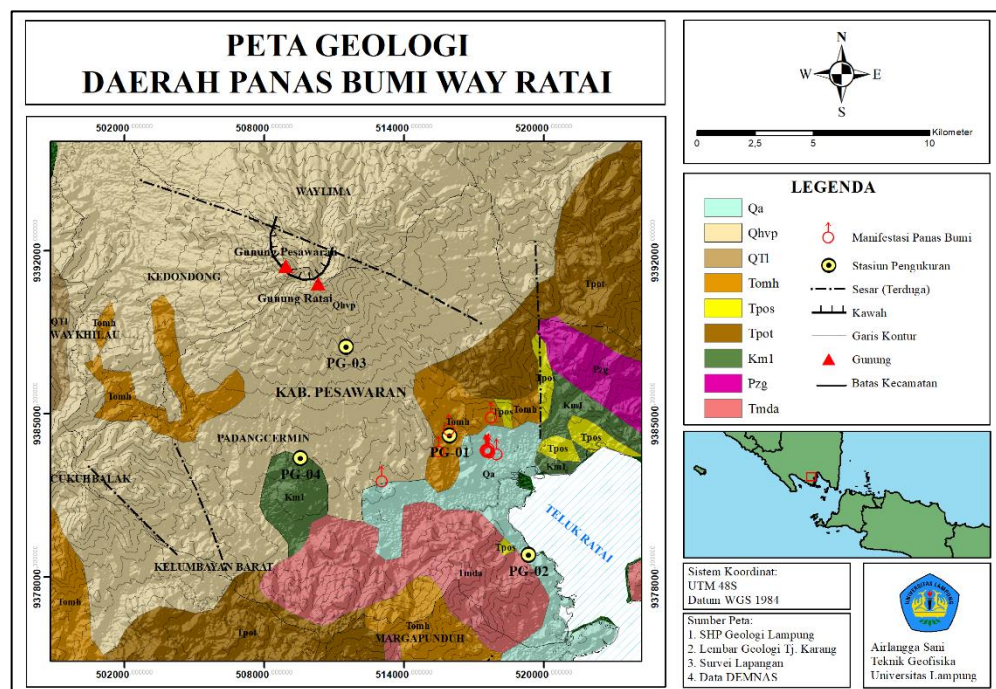


Gambar 2. Tektonik Pulau Sumatera (Darmawan dkk., 2021)

Pada bagian tengah Pulau Sumatera, terbentuk oleh busur vulkanik di pegunungan Bukit Barisan. Pegunungan Bukit Barisan ini tersusun oleh batuan sedimen yang berumur Miosen-Pliosen yang terlipat dan terpatahkan, batuan metamorf, batuan granitik, serta terobosan batuan mafik dan vulkanik yang ditutupi oleh deretan gunung api, yang memanjang dan sejajar dengan garis zona penunjaman. Selanjutnya ke arah timur terbentuk oleh cekungan belakang busur vulkanik yang tersusun oleh batuan sedimen klastik batu pasir, serpih napal, batulempung dan batugamping Oligosen-Pliosen. (Naryanto, 1997).

2.3. Geologi Daerah Penelitian

Daerah Penelitian berada pada Lembar Geologi Tanjung Karang (Mangga dkk., 1993). Terdapat 9 Formasi geologi, yaitu alluvium (Qa), Formasi Gunungapi Pesawaran (Qhvp), Formasi Lampung (QTI), Formasi Hulusimpang (Tomh), Formasi Sabu (Tpos), Formasi Tarahan (Tpot), Formasi Menanga (Km1), Komplek Gunung Kasih (Pzg), dan Dasite Piabung (Tmda) (Gambar 3).



Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian

Dari 9 Formasi geologi yang ada di daerah penelitian, Formasi Gunungapi Pesawaran (Qhvp) mendominasi daerah penelitian, yang terdiri dari lava (andesit-basalt), breksi, dan tuf. Lalu terdapat alluvium (Qa) yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lempung dan gambut. Selanjutnya terdapat Formasi Lampung (QTI) yang terdiri dari tuf berbatuapung, tuf padu tufit, tuf riolitik, batulempung tufan, dan batupasir tufan. Terdapat juga Formasi Hulusimpang (Tomh) yang terdiri dari lava andesit basal, tuf, dan breksi gunungapi berubah dengan lensa batugamping. Lalu terdapat Formasi Sabu (Tpos), Formasi ini merupakan persilangan antara breksi konglomeratan dengan batupasir. Selanjutnya terdapat Formasi Tarahan (Tpot) yang terdiri dari tuf padu, breksi dengan sisipan rijang. Formasi Menanga (Km1) terdiri dari perselingan serpih, batulempung dengan basal, sisipan rijang,

dan lensa batugamping. Selain itu terdapat Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg) yang terdiri dari sekis pilitan dan sedikit gneiss. Serta terdapat Dasit Piabung (Tmda) yang terdiri dari litologi dasit.

2.3.1. Geomorfologi

Daerah Panasbumi Way Ratai, berada di komplek gunung api yang memiliki dua kerucut gunung api berdekatan, yaitu Gunung Ratai dan Gunung Betung di timur laut. Keberadaan komplek gunung api dipengaruhi oleh proses endogen dan eksogen selama zaman kuartar. Proses endogen yang bekerja, yaitu berasal dari dinamika Gunungapi Ratai dan Gunung Betung dan tektonik regionalnya, sedangkan proses eksogennya adalah proses hidrosfir yang diakibatkan oleh erosi. Kedua proses alam inilah yang menghasilkan bentang alam berupa perbukitan dan dataran. Selanjutnya bentang alam dikelompokkan berdasarkan karakteristiknya, yaitu dimensi, bentuk, kemiringan lereng, tekstur dan pola aliran sungai. Morfologi Way Ratai dikelompokkan menjadi 7 satuan morfologi, yaitu morfologi kubah lava, perbukitan tekstur kasar, perbukitan tua, pedataran bergelombang lemah, pedataran landai, dan perbukitan terisolir (Mangga dkk., 1993).

2.3.2. Stratigrafi

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Tanjung Karang (Mangga dkk., 1993) diketahui bahwa stratigrafi Daerah Panasbumi Way Ratai dibagi menjadi empat kelompok yang berasal dari masa Kenozoikum sampai Paleozoikum, yaitu endapan permukaan, batuan gunungapi, batuan terobosan (intrusi), dan batuan malihan (Tabel 1). Kelompok endapan permukaan pada daerah penelitian terdiri dari Alluvium (Qa), merupakan batuan termuda yang berasal dari Zaman Kuartar, Kala Holosen.

Selanjutnya kelompok batuan gunung api, yang terdiri dari Formasi Gunungapi Pesawaran (Qhvp), Formasi Lampung (QTI), Formasi Hulusimpang (Tomh), Formasi Sabu (Tpos), Formasi Tarahan (Tpot), dan Formasi Menanga (Km) yang berasal dari Zaman Kuartar-Kapur, Kala Holosen-Kapur Awal.

Lalu kelompok batuan terobosan yang terdiri dari Dasit Piabung (Tmda) yang berasal dari Zaman Tersier Kala Miosen Awal. Dan kelompok batuan tertua pada daerah penelitian, yaitu kelompok batuan malihan yang merupakan Formasi Kompleks Gunung Kasih (Pzg) yang berasal dari masa Paleozoikum (Tabel 1).

Tabel 1. Stratigrafi daerah penelitian (modifikasi dari Mangga, 1993)

ENDAPAN PERMUKAAAN	BATUAN GUNUNGAPI	BATUAN MALIHAN	BATUAN TEROBOSAN	LITOLOGI	UMUR
Qa	Qhvp QTI			HOLOSEN	KUARTER
				PLISTOSEN	
				PLIOSEN	TERSIER
				MIOSEN	
				Akhir	
				Tengah	
				Awal	
				OLIGOSEN	KENOZOIKUM
				EOSEN	
				PALEOSEN	
				KAPUR	
					MESOZOIKUM
				Akhir	
				Tengah	
				JURA	PALEOZOIKUM
				TRIAS	
				PALEOZOIKUM	

2.3.3. Struktur Geologi

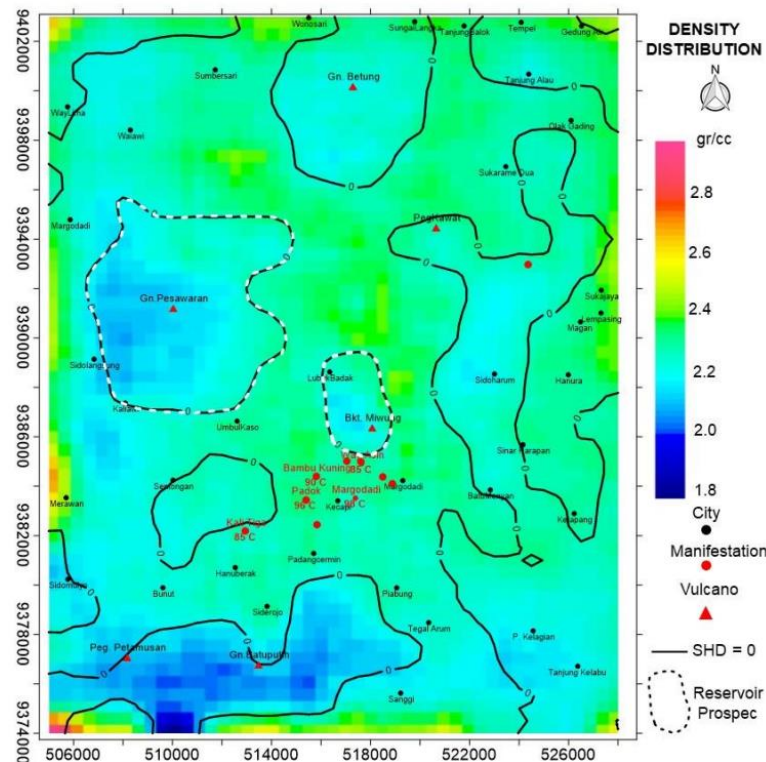
Berdasarkan Peta Geologi Daerah Penelitian (Gambar 3) struktur geologi di Daerah Panasbumi Way Ratai didominasi oleh struktur sesar yang berarah barat laut-tenggara, juga terdapat struktur rim kaldera, struktur sesar berarah utara-selatan dan sesar naik. Struktur-struktur sesar yang berarah barat laut-tenggara diduga kuat merupakan sesar normal, salah satunya, yaitu Sesar Menanga yang keberadaannya membentang atau memotong sepanjang Gunung Pesawaran dan Gunung Ratai. Lalu pada daerah timur daerah penelitian terdapat struktur berupa sesar yang berarah utara-selatan dan sesar naik berarah barat laut-tenggara. Terdapat juga struktur geologi berupa rim kaldera yang berada pada daerah Gunung Pesawaran dan Gunung Ratai (Mangga dkk., 1993).

2.4. Panasbumi Way Ratai

Daerah Panasbumi Way Ratai merupakan salah satu potensi panasbumi yang terletak di Provinsi Lampung, keberadaannya ditampakkan oleh manifestasi-manifestasi yang ada (Suharno dkk., 2016). Pada Daerah Panasbumi Way Ratai terdapat manifestasi panasbumi yang didominasi oleh mata air panas yang memiliki suhu tinggi, berkisar 45-103°C (Karyanto dkk., 2020). Dari hasil perhitungan SiO_2 oleh Suharno dkk (2016) suhu reservoir di Daerah Panasbumi Way Ratai sebesar 131,8°C yang merupakan reservoir dominasi air.

Beberapa survei geofisika telah dilakukan untuk mengidentifikasi zona prospek ataupun reservoir panasbumi di Way Ratai. Salah satunya, yaitu survei *Audio Magnetotelluric* (AMT) oleh Suryadi dkk (2017). Penelitian tersebut, dilakukan untuk mengidentifikasi sistem panasbumi di Daerah Panasbumi Way Ratai berdasarkan parameter resistivitas bawah permukaan. Berdasarkan penelitian tersebut diketahui jika batuan penudung berada pada kedalaman 100-700 m di bawah Gunung Ratai dengan nilai resistivitas sekitar 10 ohm.m, keberadaan zona penudung tersebut juga diperkuat oleh simulasi numerik model permeabilitas oleh Darmawan dkk (2021) yang menyebutkan jika terdapat area impermeabel yang cukup tebal di bawah Gunung ratai. Lalu area reservoir berada pada kedalaman 300 -1600 m dengan nilai resistivitas antara 10-60 ohm.m, serta batuan dasar berada di kedalaman 700-3000 m dengan nilai resistivitas lebih dari 60 ohm.m. Semakin bertambah kedalaman maka akan semakin besar resistivitasnya.

Selain itu juga pernah dilakukan analisis metode gaya berat, berdasarkan analisis data gaya berat yang dilakukan oleh (Sarkowi dkk., 2021), anomali gaya berat rendah terdapat di area Gunung Pesawaran dan Gunung Ratai, area kumpulan manifestasi, serta di sebelah selatan dari area kedua gunung tersebut yang mana anomali rendah tersebut mengindikasikan suatu area yang memiliki porositas dan permeabilitas yang tinggi, sehingga daerah tersebut diinterpretasikan sebagai lokasi reservoir yang paling prospektif di Way Ratai (Gambar 4).



Gambar 4. Peta distribusi densitas daerah Way Ratai (Sarkowi dkk., 2021)

Berdasarkan gambar 4, dapat diketahui bahwa zona prospektif reservoir berada pada selatan Gunung Ratai. Zona prospektif reservoir tersebut direpresentasikan oleh warna biru yang dibatasi oleh garis putus-putus. Informasi ini yang selanjutnya dijadikan sebagai salah satu referensi untuk menentukan luasan area penelitian dan sebaran lokasi stasiun pengukuran.

2.5. Roadmap Pengembangan PiGraf

PiGraf merupakan alat seismograf yang merupakan pengembangan dari penelitian terdahulu yang dilakukan sejak tahun 2019. Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Amiruddin dkk (2019) yang tergabung di Tim Eksplorasi Way Ratai Teknik Geofisika Unila. Penelitian tersebut melakukan desain dan realisasi akselerometer berbasis Arduino, yang selanjutnya dilakukan uji validasi oleh Darmawan dkk (2019). Alat Akselerometer tersebut menggunakan akselerometer ADXL345 yang dihubungkan oleh *microcontroller* Arduino Mega. Hasil uji validasi yang dilakukan Darmawan dkk (2019) memberikan kesimpulan jika akselerometer berbasis arduino tersebut berhasil mendeteksi pola kerentanan tanah. Alat tersebut dapat melakukan program yang bekerja secara efisien dengan *sampling rate* pengambilan

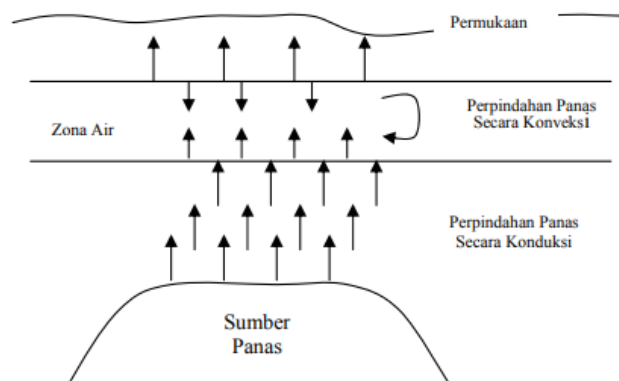
data maksimal 500/s. Pada suatu akuisisi selama 30 menit, umumnya alat ini memerlukan waktu 20 menit untuk konversi, yang mana jika terjadi kegagalan atau berhenti bekerja maka perlu melakukan konversi ulang (*reboot*).

Berdasarkan penelitian tersebut, dilakukan pengembangan lanjutan, yaitu alat seismograf berbasis Raspberry Pi dengan sensor *geophone*. Alat ini dapat merekam gempa mikro dengan sensitivitas yang tinggi. Pengembangan pada PiGraf, yaitu dapat melakukan proses pengulangan terus-menerus (*looping*), sehingga pada saat terdapat komponen alat yang tidak sinkron, alat tersebut dapat melakukan pengulangan sampai komponen alat berfungsi kembali.

III. TEORI DASAR

3.1. Energi Panasbumi (*Geothermal*)

Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2014. Panasbumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, serta batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetis tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panasbumi. Pada dasarnya, sistem panasbumi terbentuk dari hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan konveksi (Gambar 5). Perpindahan panas secara konduksi ini terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas. Perpindahan panas secara konveksi karena gaya apung air, walaupun gravitasi selalu mempunyai kecenderungan untuk bergerak ke bawah, apabila air tersebut kontak dengan sumber panas, maka akan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Hal ini menyebabkan terjadinya sirkulasi air atau arus konveksi karena air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak ke bawah. (Saptadji, 2009).

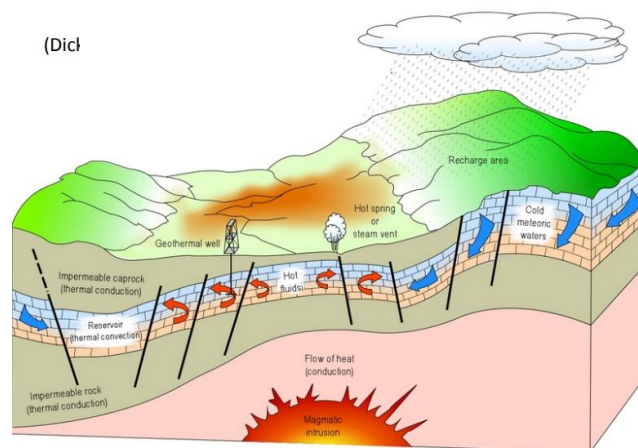


Gambar 5. Perpindahan panas di bawah permukaan (Saptadji, 2009)

3.1.1. Komponen Sistem Panasbumi

Menurut Suharno (2013), sistem panasbumi terdiri dari 5 komponen penyusun, yaitu:

- Sumber panas (*heat source*) yang terbentuk oleh batuan plutonik.
- Batuan berporos (*reservoir*) tempat air panas atau fluida terjebak di dalamnya.
- Lapisan penudung (*cap rock*), berupa lapisan yang kedap air (*impermeable*) yang biasanya terdiri dari batuan lempung.
- Struktur geologi (patahan perlipatan, rekahan dan ketidakselarasan) yang merupakan sistem lolos air (*permeable*).
- Daerah resapan (*recharge area*) dan siklus hidrologi, aliran air di bawah permukaan yang cukup untuk pengisian reservoir.

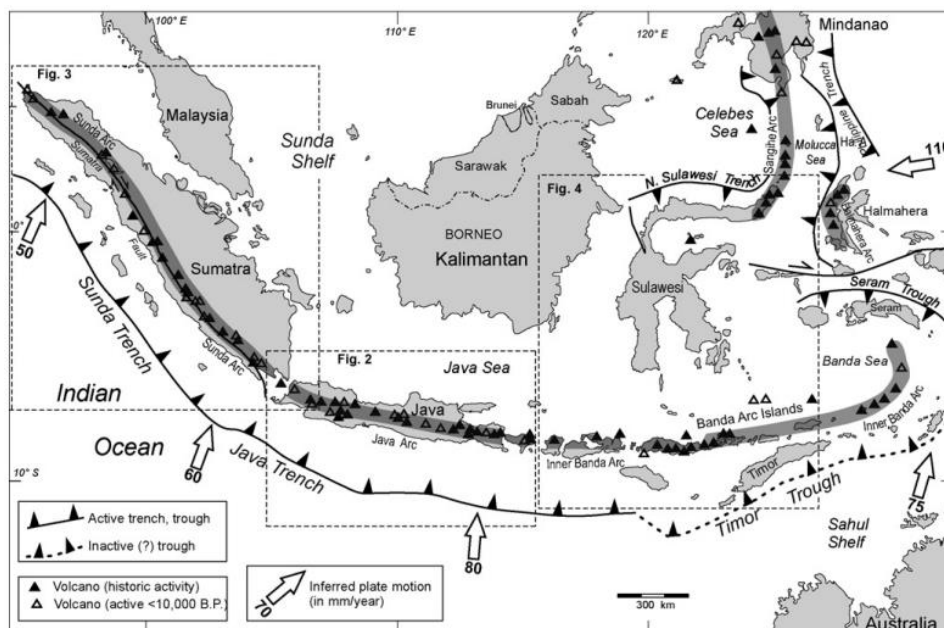


Gambar 6. Model sistem panasbumi (Dickson dan Fanelli, 2003).

Kelima komponen (Gambar 6) tersebut saling berhubungan satu dengan lainnya untuk membentuk suatu sistem panasbumi. Air hujan masuk ke dalam tanah melalui pori di antara butir-butir batuan, sehingga air dapat masuk menerobos turun ke batuan panas. Air tersebut selanjutnya terakumulasi pada reservoir dan terpanaskan oleh batuan panas, sehingga suhu air meningkat, volume bertambah, dan tekanan menjadi naik. Tekanan yang tinggi menyebabkan air panas dan mineral yang terlarut di dalamnya naik ke permukaan melalui celah, retakan dan pori-pori yang berhubungan lalu muncul sebagai manifestasi seperti mata air panas (*hot spring*), fumarola, solfatara, geyser, uap tanah, lumpur panas, kawah, dan batuan alterasi (Suharno, 2010).

3.1.2. Sistem Panasbumi di Indonesia

Pada umumnya sistem panasbumi di Indonesia mempunyai suhu yang cukup tinggi karena berkaitan dengan kegiatan gunung api muda berumur kuarter < 400.000 tahun. Sistem gunung api di Indonesia berhubungan dengan sistem tektonik lempeng yang aktif di wilayah Indonesia. Ketiga lempeng tektonik aktif tersebut, yaitu lempeng Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia. Tumbukan antara ketiga lempeng tektonik tersebut mengakibatkan sebagian lempeng menunjam pada bagian lempeng yang lain (subduksi) sehingga muncul gunung api-gunung api di sepanjang zona penunjaman atau zona busur vulkanik tersebut yang memanjang di bagian barat Sumatera, ke selatan Pulau Jawa, dan diteruskan ke arah Pulau Bali dan Kepulauan Nusa Tenggara (Gambar 7) (Suharno, 2013).



Gambar 7. Peta zona penunjaman dan sebaran gunung api di Indonesia (Hochstein dan Sudarman, 2008).

3.2. Teori Dasar Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah gelombang yang merambat melalui lapisan di bawah permukaan bumi. Perambatan gelombang seismik dipengaruhi oleh sifat elastisitas batuan di bawah permukaan. Gelombang seismik terbagi menjadi 2, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang badan menjalar pada media elastik dan merambat ke seluruh bagian

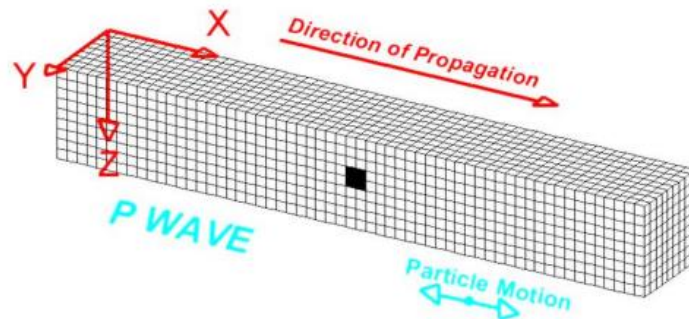
di dalam bumi, sedangkan gelombang permukaan merambat di permukaan bumi (Telford dkk., 1990).

3.1.3. Gelombang Badan (*Body Wave*)

Gelombang badan terbagi menjadi dua jenis, yaitu gelombang P (Primer) dan Gelombang S (Sekunder).

a. Gelombang P (Primer)

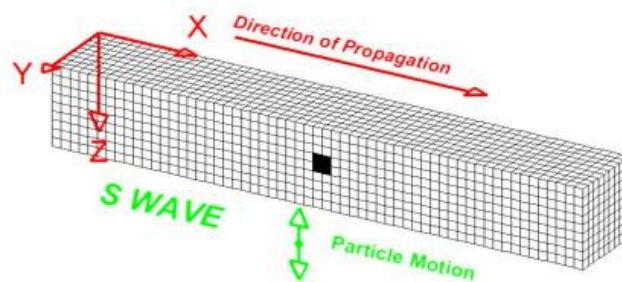
Gelombang P dapat menjalar pada semua medium baik padat, cair, ataupun gas. Arah gerak partikel gelombang P searah atau sejajar dengan arah penjalaran gelombangnya (Gambar 8), hal ini menyebabkan gelombang P memiliki kecepatan rambat paling besar dibanding gelombang seismik lainnya. Kecepatan gelombang P (v_p) di kerak bumi adalah sekitar 5 – 7 km/s, didalam mantel dan inti bumi sebesar >8 km/s, sekitar 1,5 km/s di dalam air, dan sekitar 0,3 km km/s di udara (Kiswiranti, 2019).



Gambar 8. Perambatan gelombang P (Wahidah dkk., 2021).

b. Gelombang S (Sekunder)

Gelombang S hanya dapat merambat melalui medium padat. Arah gerak partikelnya tegak lurus dengan arah rambatnya (Gambar 9). Gelombang ini tidak bisa merambat pada fluida, sehingga tidak dapat terdeteksi pada inti bumi luar. Kecepatan gelombang S (v_s) adalah sekitar 3 – 4 km/s di kerak bumi, $>4,5$ km/s di dalam mantel, sekitar 2,5 – 3 km/s di inti dalam (Kiswiranti, 2019). Berikut adalah gambar skema perambatan gelombang S (Gambar 9).



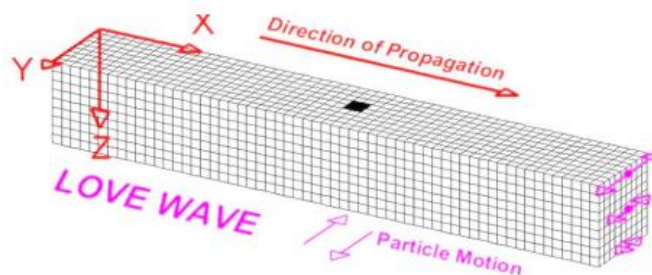
Gambar 9. Perambatan gelombang S (Wahidah dkk., 2021)

3.1.4. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

Gelombang badan terbagi menjadi dua jenis, yaitu gelombang P (Primer) dan Gelombang S (Sekunder).

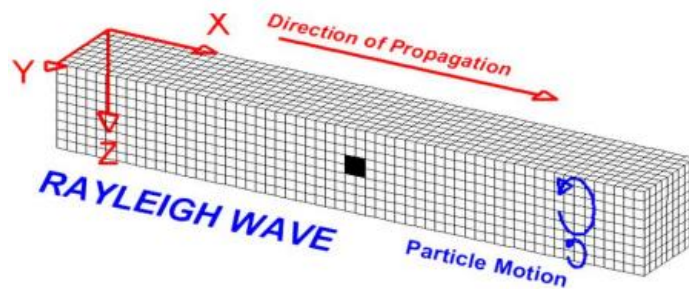
a. Gelombang Love

Gelombang Love merupakan gelombang permukaan yang partikel-partikelnya bergerak tegak lurus ke arah perambatan secara horizontal terhadap gelombang tersebut (Gambar 10). Kecepatannya sangat lambat jika dibandingkan dengan gelombang S dan gelombang P (Rosyidi, 2013). Kecepatan gelombang love di permukaan bumi sekitar 2 – 4,4 km/s (Kiswiranti, 2019).



Gambar 10. Perambatan gelombang Love (Wahidah dkk., 2021) Gelombang Rayleigh

Gelombang Rayleigh merupakan gelombang permukaan yang partikel-partikelnya bergerak secara horizontal terhadap arah rambatnya dan membentuk pola gerakan memutar (elips) (Gambar 11). Energi dari sumber gelombang rayleigh akan bergerak sepanjang permukaan dan amplitudonya akan semakin menurun secara cepat sesuai keadaan (Rosyidi, 2013). Gelombang rayleigh memiliki kecepatan sekitar 2 – 4,2 km/s (Kiswiranti, 2019).

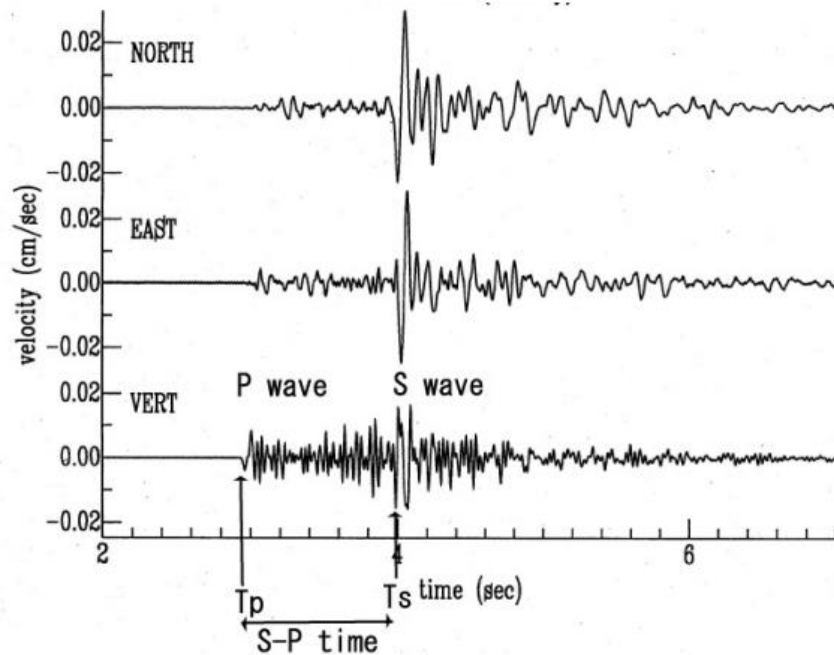


Gambar 11. Perambatan gelombang Rayleigh (Wahidah dkk., 2021)

3.3. Metode *Microearthquake* (MEQ)

Metode *microearthquake* adalah salah satu metode geofisika yang cukup baik karena memanfaatkan sumber gelombang seismik natural dan berfrekuensi rendah. Menurut Haerudin dkk (2019), *microearthquake* memiliki karakteristik yang sama dengan gelombang seismik, karena proses kejadiannya sama dengan proses terjadinya gelombang seismik. Perbedaan keduanya adalah pada nilai frekuensi dan amplitudo yang jauh lebih kecil serta dampak yang diakibatkannya. Pada gelombang *microearthquake* (MEQ), manusia tidak perlu menyiapkan hal-hal *preventif* untuk mengatasi dampak dari gelombang ini, karena memang tidak akan sampai pada taraf yang merusak apalagi membahayakan bagi kelangsungan hidup manusia. Konsep pengukuran dalam metode *microearthquake*, yaitu menangkap gelombang getar yang berasal dari sumber getar atau sumber gempa dengan magnitude < 3 M. Metode ini prinsipnya merekam sinyal yang akan dibaca sebagai *event-event* seismik yang ada di suatu tempat (Halim dkk., 2020).

Data gelombang atau gempa mikro yang terekam oleh sensor saat melakukan pengukuran metode *microearthquake* terdiri 3 komponen, yaitu 2 komponen horizontal (utara-selatan dan timur barat) dan 1 komponen horizontal (kedalaman) yang dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Tiga komponen gelombang gempa mikro (Hurukawa, 2008).

Metode *microearthquake* dapat dimanfaatkan pada studi panasbumi, baik pada tahap eksplorasi juga tahap produksi. Pada tahapan eksplorasi panasbumi, metode MEQ dapat digunakan untuk mengidentifikasi retakan berpotensi (sesar aktif) yang memiliki porositas dan permeabilitas tinggi, mengidentifikasi perkiraan daerah prospek panasbumi serta dimanfaatkan untuk membantu menentukan posisi bor. Sedangkan pada tahap produksi, dari pola gempa mikro yang dipantau dan re-injeksi air, dapat diketahui mengenai karakteristik pengisian recharge retakan-retakan besar pada reservoir. Karakteristik reinjeksi reservoir penting diketahui untuk pemeliharaan atau *monitoring* agar tidak terjadi ketimpangan air pada reservoir yang dapat menyebabkan penurunan produksi (Hilyah, 2010).

Terjadinya gempa mikro pada suatu lapangan panasbumi dipengaruhi oleh 3 faktor, yaitu:

- a. Bergesernya zona lemah karena adanya aktivitas air yang diinjeksi dan meningkatnya tekanan dalam batuan.
- b. Adanya kontak antara air dengan batuan beku panas atau *heat source* sehingga dapat direspon sebagai sumber.

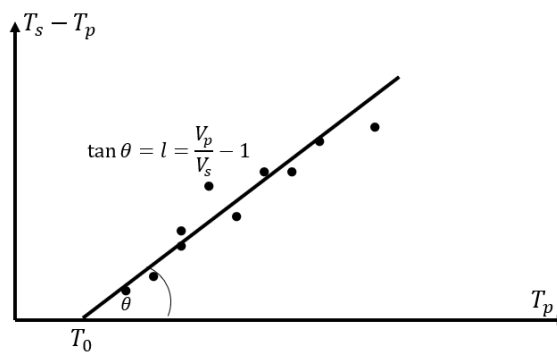
- c. Hilangnya tekanan pori akibat pori yang kosong karena ada aktivitas produksi fluida ke permukaan.

3.4. Parameter Sumber Gempa

Pada suatu kejadian gempabumi akan menghasilkan informasi seismik yang ditampilkan dalam bentuk gelombang. Informasi yang masih hanya berupa gelombang tersebut akan dianalisis lebih untuk mendapatkan informasi parameter sumber gempa. Parameter sumber gempa tersebut adalah waktu asal gempa (*origin time*), episenter, hiposenter, dan magnitudo (Sunarjo dkk., 2012).

3.4.1. Waktu Asal Gempa (*Origin time*)

Waktu asal gempabumi atau *origin time* adalah waktu saat suatu gempa terjadi pada sumber dengan kedalaman tertentu di lapisan bumi. *Origin time* dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*). Salah satu cara untuk menentukan *origin time* adalah menggunakan diagram wadati (Gambar 13) yang memanfaatkan selisih waktu tiba gelombang P dan S serta mengasumsikan bahwa medium bumi adalah homogen.



Gambar 13. Diagram wadati (Hurukawa, 2008)

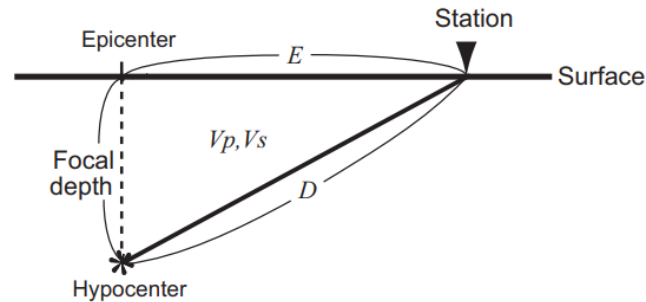
Secara sederhana melalui diagram wadati, *origin time* dapat ditentukan dari perpotongan garis T_p terhadap $T_s - T_p$, sehingga *origin time* (T_0) dapat diperoleh dengan persamaan berikut (Jannah, 2016).

$$T_0 = T_p - \frac{T_{sp}}{l} \quad (1)$$

Hasil dari nilai *origin time* (T_0) ini yang selanjutnya digunakan untuk menghitung hiposenter suatu gempa.

3.4.2. Hiposenter

Hiposenter diartikan sebagai pusat suatu gempa bumi didalam permukaan bumi (Gambar 14). Hiposenter biasanya dianggap sebagai titik, namun sebenarnya hiposenter merupakan sebuah bidang yang luasnya bergantung pada besar energi yang dilepaskan (Jannah dkk., 2016).



Gambar14. Jarak hiposenter (Hurukawa, 2008)

Jarak hiposenter (D) dengan stasiun pencatat dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$D = T_{po} * V_p \quad (2)$$

$$D = T_{so} * V_s = (T_s - T_o) * V_s$$

$$D = \{(T_s - T_p) + (T_p - T_o)\} * V_s$$

$$D = (T_{sp} + T_{po}) * V_s \quad (3)$$

T_s adalah waktu tiba gelombang S, T_p adalah waktu tiba gelombang P, V_p adalah kecepatan gelombang P, serta V_s merupakan kecepatan gelombang S.

3.4.3. Episenter

Episenter merupakan titik pada permukaan bumi yang merupakan proyeksi tegak lurus dari hiposenter suatu gempa bumi (Gambar 14). Lokasi Episenter digambarkan dalam sistem koordinat geografis atau kartesian bola bumi dan dinyatakan dalam derajat bujur dan lintang (Haerudin, 2019).

3.4.4. Magnitudo

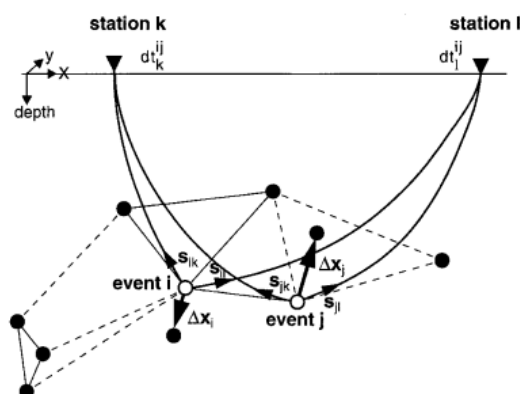
Magnitudo merupakan satuan besar kekuatan suatu gempa bumi, yang merupakan hasil pengamatan dari seismograf, menggambarkan nilai energi yang terlepas pada saat terjadinya gempa bumi (Haerudin, 2019). Menurut Hurukawa (2008), gempa bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan besar kecil magnitudonya (Tabel 2).

Tabel 2. Klasifikasi gempa berdasarkan magnitudo (Hurukawa, 2008)

Besar Magnitudo	Klasifikasi Gempa
$M \geq 7$	Gempa Besar
$M < 7$	Gempa Menengah
$M < 5$	Gempa Kecil
$M < 3$	Gempa Mikro
$M < 1$	Gempa Ultra Mikro

3.5. Metode *Double difference*

Metode *Double difference* adalah metode relokasi hiposenter yang diperkenalkan oleh Felix Waldhauser dan Ellsworth pada tahun 2000. Metode ini bertujuan untuk mendapatkan lokasi hiposenter yang sesuai dengan kondisi tektoniknya sehingga lebih akurat (Waldhauser, 2001). Prinsip metode ini, yaitu apabila jarak antara dua *event* gempa yang dipasangkan relatif lebih kecil dibandingkan jarak antara stasiun pengamatan ke masing-masing *event* gempa yang dipasangkan, maka dapat diasumsikan jika *raypath* dan *waveform* dari kedua *event* itu sama (Gambar 15). Dengan asumsi tersebut, selisih waktu tempuh atau *residual time* antara kedua gempabumi yang terekam pada stasiun yang sama dapat dianggap sebagai fungsi jarak antara kedua hiposenter (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).



Gambar 15. Ilustrasi algoritma metode *double difference* (Waldhauser dan Ellsworth, 2000)

Pada gambar 15 terdapat dua *event* gempa i dan j digambarkan oleh lingkaran putih yang terekam pada stasiun yang sama (k dan l), memiliki selisih waktu tempuh dan posisi dua *event* tersebut jaraknya relatif lebih kecil dibandingkan jarak keduanya terhadap stasiun pencatat (k dan l), sehingga dianggap memiliki *ray path* yang

cenderung sama. Algoritma *double difference* meminimalkan perbedaan *residual time* dari waktu tempuh hasil perhitungan dan waktu tempuh hasil pengamatan pada dua *event* gempa yang berdekatan dengan sejumlah stasiun pencatat gempa yang sama. *Residual time* antara observasi dan kalkulasi didefinisikan sebagai perbedaan waktu tempuh observasi dan kalkulasi antara dua *event* gempa, yang dirumuskan oleh persamaan berikut (Muhlis, 2018).

$$dr_k^{ij} = (T_k^i - T_k^j)^{obs} - (T_k^i - T_k^j)^{cal} \quad (3)$$

Keterangan:

- dr_k^{ij} = *Residual time* dari *event* i dan j di stasiun k
- T_k^i = Waktu tempuh gempa i ke stasiun k
- T_k^j = Waktu tempuh gempa j ke stasiun k
- $(T_k^i - T_k^j)^{obs}$ = Selisih waktu tempuh pengamatan dari *event* i dan j ke stasiun k
- $(T_k^i - T_k^j)^{cal}$ = Selisih waktu tempuh kalkulasi dari *event* i dan j ke stasiun k

4.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4. Alat dan bahan

No	Alat dan Bahan	Fungsi
1	PiGraf Seismograf	Alat pengukur gempa mikro
2	GPS	Alat <i>plotting</i> koordinat titik stasiun pengukuran
3	<i>Accu</i>	Sumber energi alat seismograf
4	Laptop	Perangkat keras untuk melakukan penyusunan laporan dan pengolahan data
5	Seisgram2K v6.0	Perangkat lunak untuk melakukan penentuan waktu tiba gelombang P dan S
6	GAD.exe	Perangkat lunak untuk menentukan episenter dan hiposenter gempa mikro
7	HypoDD	Perangkat lunak untuk relokasi episenter dan hiposenter gempa mikro
8	<i>Windows Power Shell</i>	Perangkat lunak untuk menjalankan program ph2dt dan hypoDD
9	<i>Notepad ++</i>	Perangkat lunak untuk mengatur parameter program ph2dt.inp dan hypoDD.inp
10	Arcgis 10.8	Perangkat lunak untuk membuat peta lokasi dan sebaran episenter MEQ
11	Surfer 13	Perangkat lunak untuk membuat penampang distribusi hiposenter MEQ
12	Peta Geologi	Data literatur inFormasi geologi daerah penelitian
13	Data Gempa Mikro	Data hasil akuisisi menggunakan PiGraf
14	<i>Shapefile</i> RBI Kab. Pesawaran	Data inFormasi administratif daerah penelitian
15	Data DEM	Data topografi daerah penelitian

4.3. Prosedur Penelitian

Adapun tahapan prosedur penelitian yang saya laksanakan adalah sebagai berikut.

4.3.1. Uji Kalibrasi Alat

Uji kalibrasi alat dilakukan untuk menguji seberapa baik alat PiGraf merekam gelombang dengan baik, tahapan ini penting dilaksanakan sebagai acuan awal kualitas perekaman pada alat. Uji kalibrasi alat dilakukan dengan meletakkan alat PiGraf pada suatu lintasan dengan jarak 3 meter antar alat. Sumber yang digunakan merupakan sumber aktif menggunakan palu yang dipukulkan pada plat besi. Sumber ditempatkan pada ujung lintasan yang berjarak 1 meter dari alat ke-1. Jika sensor telah baik, maka pada seismogram gelombang yang pertama kali tiba akan teramati pada alat yang paling dekat dengan sumber getaran.

4.3.2. Studi Literatur dan Desain Akuisisi

Studi literatur dilakukan untuk memahami berbagai hal yang berhubungan dengan Daerah Panasbumi Way Ratai serta metode yang digunakan berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilaksanakan. Selanjutnya dilakukan desain akuisisi untuk menentukan sebaran stasiun pengukuran saat akuisisi. Pada desain akuisisi, sebaran titik pengukuran diletakkan berada di bagian selatan dari Gunung Ratai dengan total 4 stasiun pengukuran masing-masing berjarak kurang lebih 6 kilometer. Hal ini dilakukan merujuk dengan banyaknya keberadaan manifestasi panasbumi di area tersebut dan beberapa studi geofisika yang pernah dilakukan di Daerah Panasbumi Way Ratai. Salah satunya, yaitu studi data gayaberat untuk mengidentifikasi reservoir oleh Sarkowi dkk (2021) yang menghasilkan bahwa zona prospek reservoir berada pada area selatan Gunung Ratai. Serta penelitian metode *audio magnetotelluric* (AMT) oleh Suryadi dkk (2017) yang juga menghasilkan kesimpulan jika zona prospek berada pada area selatan Gunung Ratai.

4.3.3. Akuisisi Data

Tahapan akuisisi data dilakukan pada Daerah Panasbumi Way Ratai menggunakan PiGraf dengan jumlah 4 stasiun pengukuran. Lokasi stasiun pengukuran dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Lokasi stasiun pengukuran

Stasiun Pengukuran	Koordinat		Elevasi (m)	Alamat
	UTM X	UTM Y		
PG-01	515962	9384049	70	Desa Bambu Kuning, Kecamatan Padang Cermin, Pesawaran
PG-02	519359	9378937	10	Desa Durian, Kecamatan Padang Cermin, Pesawaran
PG-03	511526	9387875	726	Desa Harapan Jaya, Kecamatan Padang Cermin, Pesawaran
PG-04	509556	9383092	248	Desa Pesawaran Indah, Kecamatan Padang Cermin, Pesawaran

Sebelum akuisisi data dimulai, kegiatan diawali dengan instalasi 4 stasiun pengukuran PiGraf yang dilakukan pada tanggal 6 Juli 2023. Selanjutnya setelah semua stasiun pengukuran terpasang, dilanjutkan proses akuisisi data (Gambar 16) selama satu minggu dimulai dari tanggal 9 Juli 2023. Mekanisme akuisisi data, yaitu merekam data selama 24 jam dengan pergantian baterai setiap pagi hari.

**Gambar 16.** Akuisisi data dan penggantian *accu*

Pada setiap stasiun pengukuran, PiGraf diletakkan pada kedalaman sekitar 50 sentimeter di dalam sebuah *casing* luaran (Gambar 17) yang berfungsi untuk

melindungi PiGraf dari rembesan air. Pada bagian alas *casing* luaran dibuat dari beton untuk memudahkan proses *levelling* alat dan agar memaksimalkan perambatan gelombang seismik ke alat PiGraf.



Gambar 17. *Casing* alat PiGraf

4.3.4. Pengolahan Data

Pengolahan data dimulai dari identifikasi *event* gempa mikro (MEQ) melalui seisgram, lalu menentukan hiposenter, serta relokasi hiposenter untuk mendapatkan lokasi hiposenter yang lebih akurat. Tahapan pengolahan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

a. Pengunduhan Data

Tahap awal dari pengolahan data pada penelitian kali ini, yaitu pengunduhan data. Pengunduhan data diakses melalui PiGraf *Local server* yang berisikan data-data hasil perekaman masing-masing stasiun. Berikut tampilan PiGraf *Local server* (Gambar 18).

PiGraf Files				
Copyright © 2023 by Way Ratai Research Team - University of Lampung				
Filename	Last Modified	Filesize	Download	Delete
PG_Z2W01_20230720131232819.bin	2023-07-20 13:13:03	44.05 KB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230716131443038.bin	2023-07-16 13:16:27	124.13 KB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230716000009714.bin	2023-07-16 09:38:25	41.62 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230715000008646.bin	2023-07-16 00:00:01	102.31 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230714000011371.bin	2023-07-15 00:00:00	104.07 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230713000011091.bin	2023-07-14 00:00:03	101.17 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230712000010243.bin	2023-07-13 00:00:03	99.42 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230711000010758.bin	2023-07-12 00:00:02	101.77 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230710000010945.bin	2023-07-11 00:00:02	105.37 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20230709105648099.bin	2023-07-10 00:00:02	57.54 MB	Download	Delete

1 2 3 4 5 Next >>

Gambar 18. Tampilan PiGraf *local server*

b. Konversi Data *Waveform* .bin ke .mseed dan .sac

Pengkonversian data *waveform* yang sebelumnya masih dalam format .bin diubah menjadi mseed dan sac. Proses ini dilakukan menggunakan *software* PiGrafSoft.exe, berikut adalah tampilan beranda dari *software* PiGrafSoft.exe (Gambar 19).



Gambar 19. Tampilan beranda *software* PiGrafSoft.exe

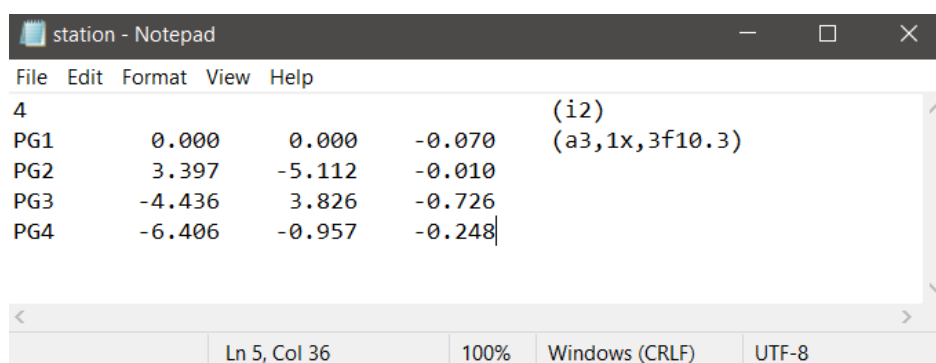
c. Pemilihan *Event* dan *Picking* Waktu Tiba Gelombang P & S

Data hasil konversi format menggunakan PiGraf selanjutnya dilakukan proses pemilihan *event* dan *picking* waktu tiba (*arrival time*) gelombang P & S. Pemilihan *event* dilakukan secara manual dengan menyeleksi keseluruhan data *waveform* pada 4 stasiun selama satu minggu pengukuran. *Event* yang terpilih minimal terekam oleh 3 stasiun. Proses ini akan menghasilkan data waktu tiba gelombang P & S, serta selisih waktu tiba gelombang P & S dari masing-masing *event* yang terekam. Proses pemilihan *event* dan *picking* waktu tiba gelombang P dan S pada seisgram terlampir pada Lampiran 1.

d. Penentuan Hiposenter Gempa Mikro dengan metode GAD

Pada penelitian kali ini penentuan hiposenter gempa mikro (MEQ) dilakukan menggunakan metode *Geiger's Adaptive Dampig* (GAD). Metode ini menggunakan perhitungan pendekatan *least square* untuk meminimalisir eror. Terdapat 3 *input* dalam penentuan hiposenter menggunakan metode GAD, yaitu koordinat stasiun, data waktu tiba gelombang P dan S, serta data model kecepatan.

Langkah pertama yang dilakukan pada tahap ini adalah membuat *file input* stasiun, yang terdiri dari kode stasiun, koordinat stasiun, serta elevasi. Penulisannya disesuaikan dengan format *input* yang ada pada *software* GAD.exe seperti pada Gambar 20.



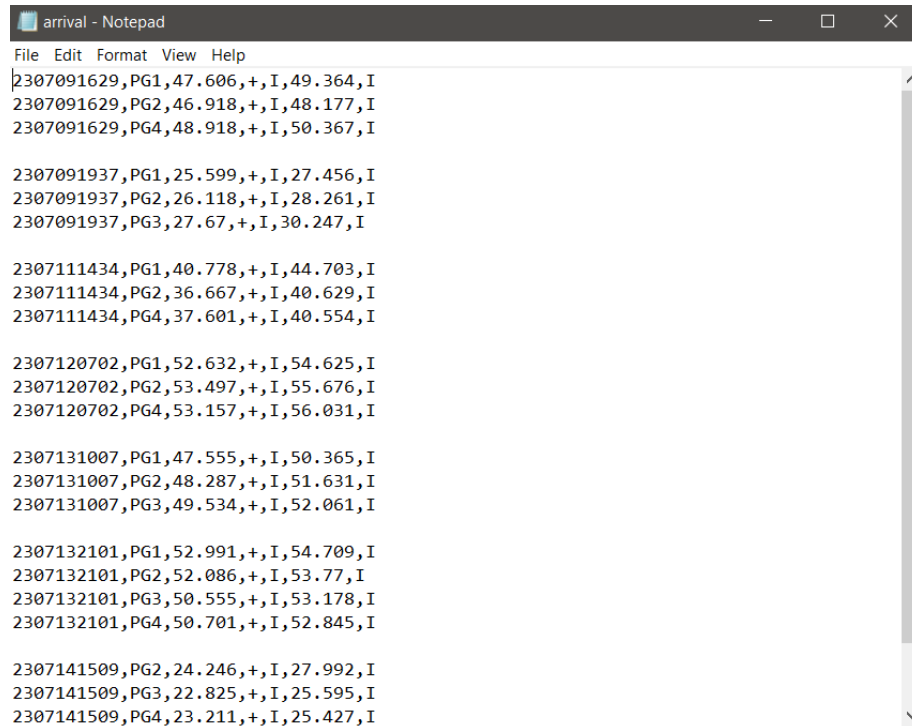
```

4 (i2)
PG1 0.000 0.000 -0.070 (a3,1x,3f10.3)
PG2 3.397 -5.112 -0.010
PG3 -4.436 3.826 -0.726
PG4 -6.406 -0.957 -0.248

```

Gambar 20. *File input* stasiun di *software* GAD

Selanjutnya membuat *file input* data waktu tiba gelombang P dan S yang sebelumnya telah didapatkan dari hasil *picking*. Data yang dibutuhkan, yaitu tanggal, kode stasiun, serta waktu tiba gelombang P dan S yang dapat dilihat pada Gambar 21.



```

arrival - Notepad
File Edit Format View Help
2307091629,PG1,47.606,+,I,49.364,I
2307091629,PG2,46.918,+,I,48.177,I
2307091629,PG4,48.918,+,I,50.367,I

2307091937,PG1,25.599,+,I,27.456,I
2307091937,PG2,26.118,+,I,28.261,I
2307091937,PG3,27.67,+,I,30.247,I

2307111434,PG1,40.778,+,I,44.703,I
2307111434,PG2,36.667,+,I,40.629,I
2307111434,PG4,37.601,+,I,40.554,I

2307120702,PG1,52.632,+,I,54.625,I
2307120702,PG2,53.497,+,I,55.676,I
2307120702,PG4,53.157,+,I,56.031,I

2307131007,PG1,47.555,+,I,50.365,I
2307131007,PG2,48.287,+,I,51.631,I
2307131007,PG3,49.534,+,I,52.061,I

2307132101,PG1,52.991,+,I,54.709,I
2307132101,PG2,52.086,+,I,53.77,I
2307132101,PG3,50.555,+,I,53.178,I
2307132101,PG4,50.701,+,I,52.845,I

2307141509,PG2,24.246,+,I,27.992,I
2307141509,PG3,22.825,+,I,25.595,I
2307141509,PG4,23.211,+,I,25.427,I

```

Gambar 21. *File input* data waktu tiba gelombang P dan S di *software* GAD

File input terakhir, yaitu data *velocity model* di berbagai kedalaman. Pada penelitian kali ini, *velocity model* yang dirujuk, yaitu 1D V_p Seismic *Velocity model* oleh Kissling dkk (1994) (Tabel 6).

Tabel 6. 1D V_p seismic *velocity model* (Kissling dkk., 1994)

Kedalaman (km)	V_p (km/s)	V_s (km/s)
0	2.63	1.52
1	2.84	1.64
2	3.01	1.73
3	3.16	1.82
4	3.3	1.90
6	3.43	1.98
8	3.69	2.13
10	3.94	2.27
12	4.20	2.42

Pada *software* GAD, format *file input velocity model* terdiri dari jumlah lapisan kedalaman, nilai kedalaman, serta Vp dan Vs per lapisan kedalaman, dapat dilihat pada Gambar 22.

```

velocity - Notepad
File Edit Format View Help
nzLayer      : 6 (15x,i4)
zLayer       : 0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 (15x,5f8.3)
VpL(nzLayer+1): 2.63 3.01 3.30 3.43 3.69 3.94 (15x,6f8.3)
VsL(nzLayer+1): 1.52 1.73 1.90 1.98 2.13 2.27 (15x,6f8.3)
Ln 6, Col 5 | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8

```

Gambar 22. *File input velocity model* di *software* GAD

Output dari tahapan identifikasi hiposenter pada *software* GAD ini, yaitu nilai koordinat episenter, kedalaman hiposenter, serta *origin time* dari masing masing *event*, yang selanjutnya dilakukan *plotting* untuk melihat sebaran atau distribusinya.

e. Relokasi Hiposenter Gempa Mikro dengan metode hypoDD

Tahapan penentuan hiposenter dengan metode GAD akan menghasilkan posisi episenter dan hiposenter, serta *origin time*. Selanjutnya dilakukan relokasi untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat menggunakan metode hypoDD. Proses pertama dari tahapan relokasi ini adalah dengan membuat katalog *input arrival time* serta koordinat stasiun pengukuran. Gambar 23 berikut merupakan cuplikan katalog *arrival time 7 event* gempa mikro.

WayRatai.pha															
1	#	2023	07	09	16	29	45.798	-5.620923	105.148713	2.591	2	0	0	0.208	1
2	PG1						47.606							1	P
3	PG1						49.364							1	S
4	PG2						46.918							1	P
5	PG2						48.177							1	S
6	PG4						48.918							1	P
7	PG4						50.367							1	S
8	#	2023	07	09	19	37	21.532	-5.528815	105.091233	0.230	2	0	0	5.300	2
9	PG1						25.599							1	P
10	PG1						27.456							1	S
11	PG2						26.118							1	P
12	PG2						28.261							1	S
13	PG3						27.670							1	P
14	PG3						30.247							1	S
15	#	2023	07	11	14	34	32.923	-5.726779	105.087813	1.976	2	0	0	1.320	3
16	PG1						40.778							1	P
17	PG1						44.703							1	S
18	PG2						36.667							1	P
19	PG2						40.629							1	S
20	PG4						37.601							1	P
21	PG4						40.554							1	S
22	#	2023	07	12	07	02	49.591	-5.522279	105.156010	6.768	2	0	0	0.284	4
23	PG1						52.632							1	P
24	PG1						54.625							1	S
25	PG2						53.497							1	P
26	PG2						55.676							1	S
27	PG4						53.157							1	P
28	PG4						56.031							1	S
29	#	2023	07	12	10	07	44.471	-5.575590	105.156918	12.79	2	0	0	0.440	5
30	PG1						47.555							1	P
31	PG1						50.365							1	S
32	PG2						48.287							1	P
33	PG2						51.631							1	S
34	PG3						49.534							1	P
35	PG3						52.601							1	S
36	#	2023	07	13	21	01	47.037	-5.548225	105.044611	10.12	2	0	0	0.826	6
37	PG1						52.911							1	P
38	PG1						54.709							1	S
39	PG2						52.086							1	P
40	PG2						53.770							1	S
41	PG3						50.555							1	P
42	PG3						53.178							1	S

Gambar 23. Katalog *arrival time*

Katalog *arrival time* (Gambar 23) merupakan *input* dalam program proses *clustering* program ph2dt. Proses ini merupakan proses pembentukan dan pengelompokan gempa mikro yang saling berkaitan. Proses ini dilakukan pada program ph2dt dengan *input* data stasiun (.dat) dan data waktu rtiba (*arrival time*) (.pha) ke dalam *file* ph2dt.inp (Gambar 24). Terdapat beberapa parameter nilai yang harus dimasukkan dalam *file* ph2dt.inp, yaitu MINWGHT (minimum pembobotan *picking*), MAXDIST (jarak terja antara pasangan *event* dengan stasiun), MAXSEP (separasi hiposenter maksimum antar pasangan *event* dalam km), MAXNGH (jumlah maksimal *event* gempabumi dalam satu pasangan), MINLNK (jumlah minimum *event* untuk didefinisikan sebagai satu pasangan), MINOBS (jumlah minimum stasiun yang mencatat suatu *event*), dan MAXOBS (jumlah paling banyak stasiun yang mencatat suatu *event*).

```

ph2dt.inp
1  * ph2dt.inp - input control file for program ph2dt
2  * Input station file:
3  StasiunWR.dat
4  * Input phase file:
5  WayRatai.pha
6  *MINWGHT: min. pick weight allowed [0]
7  *MAXDIST: max. distance in km between event pair and stations [200]
8  *MAXSEP: max. hypocentral separation in km [10]
9  *MAXNGH: max. number of neighbors per event [10]
10 *MINLNK: min. number of links required to define a neighbor [8]
11 *MINOBS: min. number of links per pair saved [8]
12 *MAXOBS: max. number of links per pair saved [20]
13 *MINWGHT MAXDIST MAXSEP MAXNGH MINLNK MINOBS MAXOBS
14 0 20 10 10 2 3 4

```

Gambar 24. Tampilan program ph2dt.inp

Keluaran dari proses ini adalah data diferensial dan data absolut. Data diferensial terdiri dari data dt.ct (data waktu tempuh gempa bumi yang saling terhubung dan tercatat di stasiun yang sama). Sedangkan untuk data absolut terdiri dari even.dat; (data informasi parameter gempa bumi hasil pengolahan di ph2dt), event.sel, station.sel, dan ph2dt.log (laporan hasil proses ph2dt) yang digunakan sebagai *input* pada program hypoDD.inp (Gambar 25).

```

hypoDD.inp
1  * RELOC.INP:
2  *--- input file selection
3  * cross correlation diff times:
4
5  *
6  *catalog P diff times:
7  dt.ct
8  *
9  * event file:
10 event.dat
11 *
12 * station file:
13 StasiunWR.dat
14 *
15 *--- output file selection
16 * original locations:
17 hypoDD.loc
18 * relocations:
19 hypoDD.reloc
20 * station information:
21 hypoDD.sta
22 * residual information:
23 hypoDD.res
24 * source parameter information:
25 *hypoDDL1.src
26
27 *
28 *--- data type selection:
29 * IDAT: 0 = synthetics; 1= cross corr; 2= catalog; 3= cross & cat
30 * IPHA: 1= P; 2= S; 3= P&S
31 * DIST:max dist [km] between cluster centroid and station
32 * IDAT  IPHA  DIST
33 2 3 10
34 *
35 *--- event clustering:
36 * OBSCC: min # of obs/pair for crosstime data (0= no clustering)
37 * OBSCT: min # of obs/pair for network data (0= no clustering)
38 * OBSCC  OBSCT
39 0 2

```

Gambar 25. Tampilan program hypoDD.inp

Terdapat 4 *output* dari program hypoDD.inp, yaitu hypoDD.loc (data hiposenter sebelum direlokasi), hypoDD.reloc (data hiposenter setelah direlokasi), hypoDD.sta (data residual stasiun dan banyak *phase* yang terekam oleh stasiun), dan hypoDD.res (data residual waktu tempuh yang diperoleh dari hasil perhitungan pada iterasi terakhir).

f. *Plotting* Sebaran Hiposenter menggunakan Arcgis dan Surfer

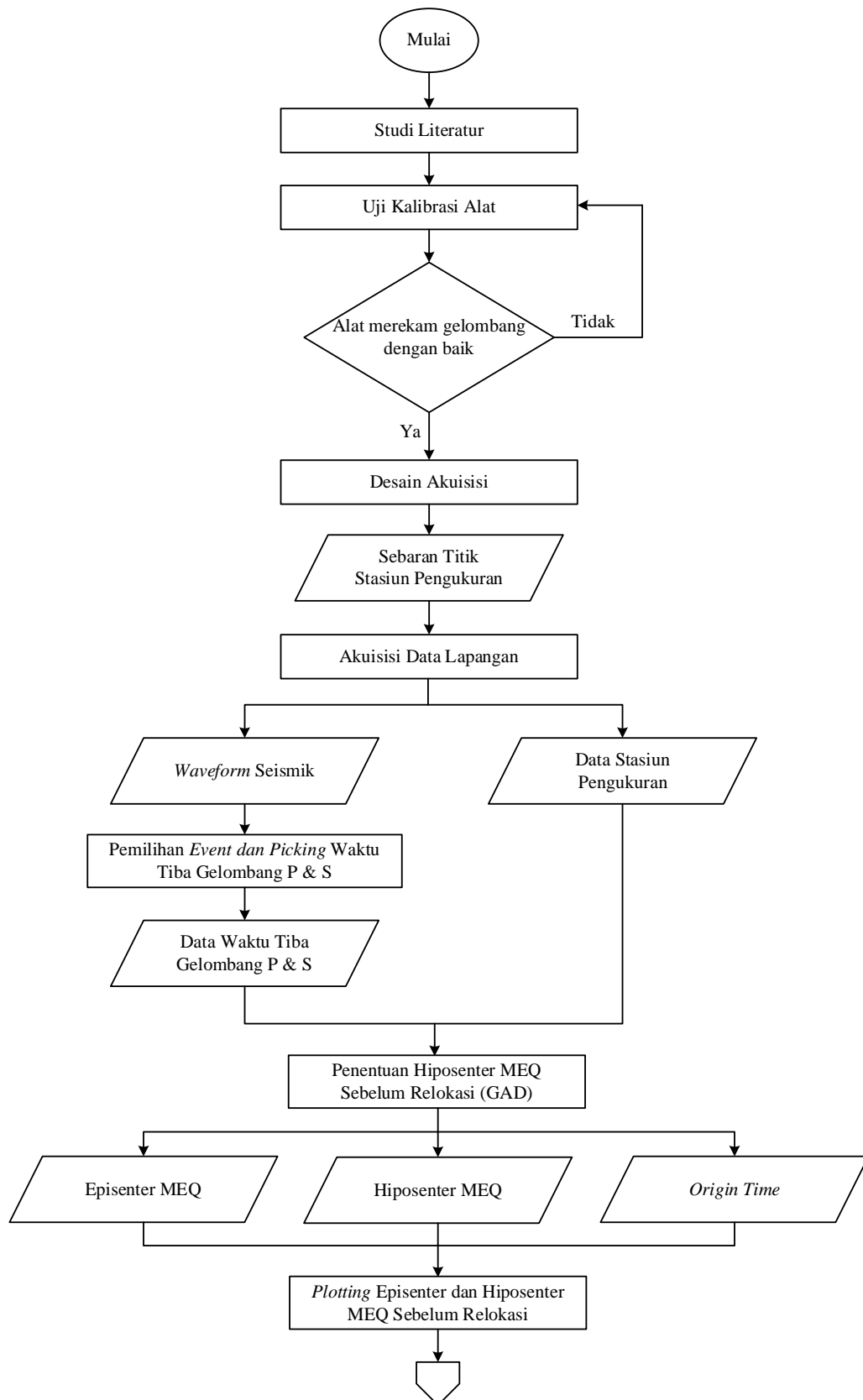
Berdasarkan pengolahan data maka akan dihasilkan data koordinat episenter dan kedalaman hiposenter sebelum dan sesudah relokasi. Data inilah yang selanjutnya di *plotting* ke *software* Arcgis, kemudian dilakukan *slicing* lintasan tertentu pada Surfer untuk mendapatkan penampang kedalaman distribusi hiposenter.

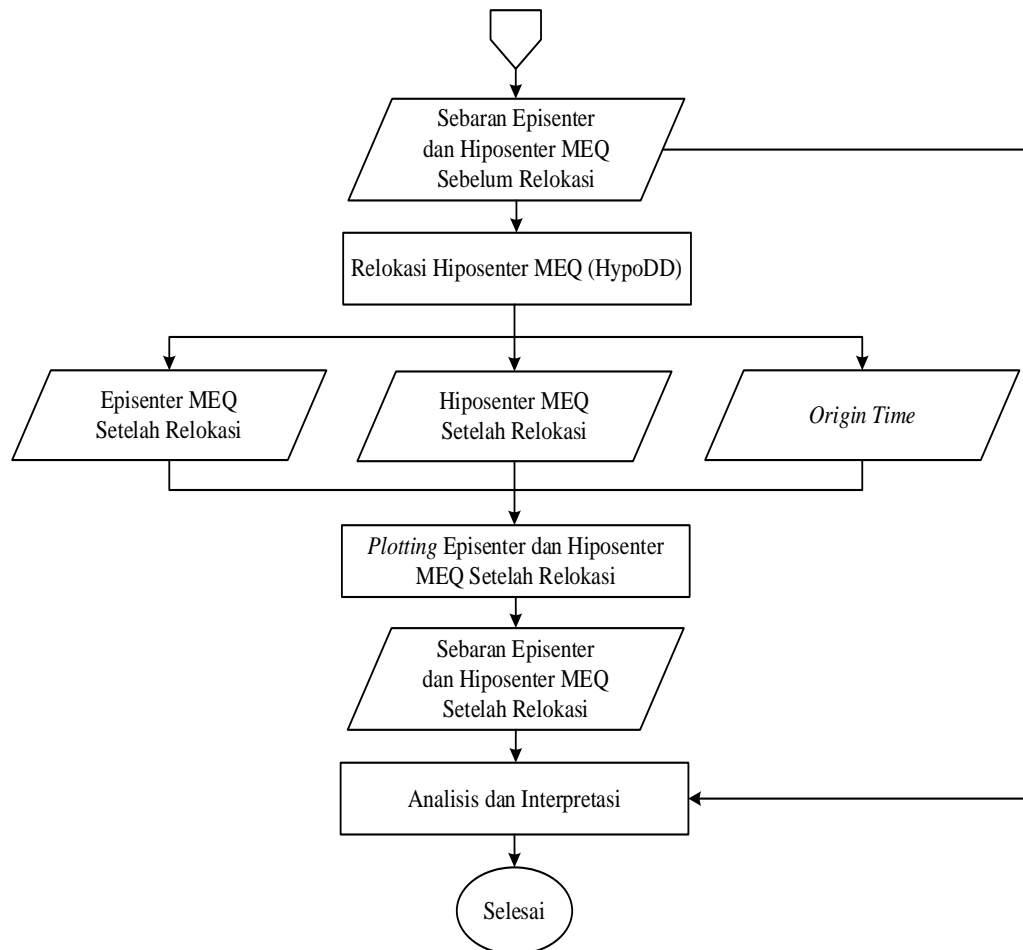
4.3.5. Analisis dan Interpretasi

Sebaran episenter dan hiposenter yang telah didapatkan tersebut selanjutnya dianalisis dan diinterpretasikan untuk menentukan zona aktif panasbumi yang ditunjukkan oleh banyaknya aktivitas gempa mikro sebagai representasi dari aktivitas aliran fluida, keberadaan reservoir, keberadaan struktur atau juga diakibatkan karena adanya kontak fluida dengan batuan panas.

4.4. Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian kali ini adalah sebagai berikut.





Gambar 26. Diagram alir penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Hasil uji kalibrasi didapatkan jika gelombang akan tiba paling awal pada alat yang paling dekat dengan sumber, dan kemudian melambat seiring dengan semakin jauhnya alat lain terhadap sensor dengan selisih waktu tiba dari 0.005 sampai 0.03 s. Hal ini menunjukkan bahwa alat PiGraf telah dapat merekam gelombang dengan baik.
2. Terdapat 7 *event* gempa mikro yang teridentifikasi selama periode akuisisi data 9 – 16 Juli 2023, hal ini menunjukkan bahwa alat PiGraf sudah cukup baik dalam mendeteksi gempa mikro pada Lapangan Panasbumi Way Ratai.
3. Sebaran episenter gempa mikro (MEQ) didominasi berada pada area di sekitar sebaran stasiun pengukuran, yaitu di selatan Gunung Ratai, sedangkan lokasi hiposenter gempa mikro (MEQ) pada Lapangan Panasbumi Way Ratai berada pada kedalaman 230 – 12.797 meter.
4. *Event-event* MEQ yang terekam pada penelitian ini kemungkinan disebabkan oleh aktivitas panasbumi di bawah permukaan, namun perlu dilakukan validasi kembali dikarenakan keterbatasan jumlah *event* MEQ yang didapat, sehingga pada penelitian zona aktif panasbumi pada Lapangan Panasbumi Way Ratai belum dapat diidentifikasi.

6.2. Saran

Adapun saran terkait pengembangan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penentuan waktu tiba gelombang P dan S saat *picking* sangat bergantung dengan gelombang atau *waveform* yang terekam pada masing-masing stasiun, pada penelitian kali ini masih ditemukan pada suatu *event* yang terekam, tidak semua

2. stasiun pengukuran merekam *waveform* dengan jelas dan baik. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan jarak antar stasiun yang terlalu jauh yang menyebabkan penjararan gelombang ke stasiun tertentu menjadi tidak maksimal, sehingga untuk penelitian selanjutnya jarak antar-stasiun perlu diperkecil untuk mendapatkan hasil perekaman yang lebih maksimal.
3. Pada penelitian selanjutnya, akuisisi data di lapangan yang belum tereksplorasi seperti Lapangan Panasbumi Way Ratai perlu dilakukan dengan waktu yang lebih lama agar *event* MEQ yang didapatkan menjadi lebih banyak.

DAFTAR PUSTAKA

- Amiruddin, A., Suharno, dan Karyanto. 2019. Desain dan Realisasi Accelerometer Berbasis Arduino sebagai Instrumen Pendeteksi Mikrotremor. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 5(3), 162–173.
- Darmawan, I. G. B., Hidayatika, A., Sarkowi, M., dan Karyanto. 2021. Pemanfaatan simulasi numerik sebagai studi pendahuluan untuk membangun model permeabilitas zona potensi reservoir panasbumi. *Prosiding SINTA 4*.
- Darmawan, I. G. B., Mulyasari, R., Amiruddin, A., Efendi, D. S., dan Suharno. 2019. Uji validasi instrumen akselerometer ADXL345 untuk pengukuran kerentanan gempa dengan metode HVSAR. *Seminar Nasional Hasil Penelitian Sains, Teknik, dan Aplikasi Industri 2019*.
- Dewan Energi Nasional. 2022. *Peran Geothermal Dalam Transisi Energi*. <https://www.den.go.id/index.php/dinamispage/index/1207-peran-geothermal-dalam-transisi-energi.html>. Diakses pada 10 Maret 2023.
- Dickson, M. , H., dan Fanelli, M. 2003. *Geothermal Energy Utilization and Technology*. Paris: UNESCO Publishing.
- Elvira, W. V. 2022. Estimasi Potensi Energi Panasbumi Menggunakan Metode Volumetrik Dengan Pemodelan Simulasi Numerik Aliran Fluida Hidrotermal dan Perpindahan Energi Panas Pada Lapangan Panasbumi Way Ratai. Skripsi. Universitas Lampung.
- Haerudin, N., Alami, F., dan Rustadi. 2019. *Mikroseismik, Mikrotremor Microearthquake dalam ilmu kebumihan*. Bandar Lampung: Pusaka Media.
- Halim, G. R., Utama, W., dan Mariyanto, M. 2020. Uji Lokasi Hiposenter Mikro-Earthquake (MEQ) dengan Metode Inversi Simulated Annealing pada Lapangan Panasbumi “XX.” *Jurnal Geosaintek*, 6(2), 71–76.
- Hilyah, A. 2010. Studi Gempa Mikro Untuk Mendeteksi Rekahan di Area Panasbumi Kamojang Kabupaten Garut. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 6(2).
- Hochstein, M. , P., dan Sudarman, S. 2008. History of geothermal exploration in Indonesia from 1970 to 2000. *Geothermics*, 37, 220–266.

- Hurukawa, N. 2008. *Practical Analyses of Local Earthquakes*. Tsukuba: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.
- Jannah, I. N., Anggono, T., dan Yulianto, T. 2016. Aplikasi Metode *Double difference* dalam Relokasi Hiposenter untuk Menggambarkan Zona Transisi Antar Busur Banda dan Busur Sunda. *Youngster Physics Journal*, 5(3), 113–122.
- Karyanto, K., Sarkowi, M., Hidayatika, A., Ukhti, F., 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*.
- Kiswiranti, D. 2019. *Seismologi (Dasar-Dasar Seismologi dan Aplikasinya)*. Yogyakarta: Institut Sains dan Teknologi AKPRIND Yogyakarta.
- Klein, F. W., Einarsson, P., dan Wyss, M. 1973. Microearthquakes on the Mid-Atlantic plate boundary on the Reykjanes Peninsula in Iceland. *J Geophys.* 78, 5084-5099.
- Mangga, S. A., Amirudin, Suwanti, T., Gafoer, S., dan Sidarto. 1993. Peta Geologi Lembar Tanjung Karang, Sumatera.
- Maulida, N. H. 2015. Identifikasi Sebaran Hiposenter dan Episenter Gempa Mikro pada Lapangan Panasbumi “NDA” dengan Metode *Single Event Determination (SED)* Periode April 2014. Laporan Kerja Praktik. Universitas Lampung.
- Muhlis, M. 2018. Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan Metode *Double difference* di Daerah (Cianjur-Sukabumi). Skripsi. UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Naryanto, S. H. 1997. Kegempaan di Daerah Sumatra. *Alami*, 2(3).
- Nugraha, A. D. 2018. *Mikroseismik*. Bandung: ITB Press.
- Rosyidi, S. A. P. 2013. *Metode Analisis Gelombang Permukaan Untuk Penyelidikan Sub-Permukaan*. Yogyakarta: LP3M UMY.
- Saptadji, N., M. 2009. *Teknik Panasbumi*. Bandung: Departemen Teknik Perminyakan ITB.
- Sarkowi, M., Wibowo, R. C., dan Karyanto, K. 2021. Geothermal Reservoir Identification in Way Ratai Area Based on Gravity Data Analysis. *Journal of Physics*.
- Suharno, S. 2010. *Pengembangan Prospek Panasbumi*. Bandar Lampung: Teknik Geofisika Unila.
- Suharno, S. 2013. *Eksplorasi Geothermal*. Bandar Lampung: Lembaga Penelitian Universitas Lampung.

- Suharno, S., Putri, M. K., dan Hidayatika, A. 2016. Penelitian Pendahuluan Panasbumi Way Ratai Pesawaran Lampung Indonesia. *Pertemuan Ilmiah Tahunan Himpunan Ahli Geofisika Indonesia*, 1–4.
- Sunarjo, S., Gunawan, M. T., dan Pribadi, S. 2012. *Gempabumi Edisi Populer*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Suryadi, S., Haerudin, N., Karyanto, dan Sudrajat, Y. 2017. Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Lapangan Panasbumi Way Ratai Berdasarkan Data Audio Magnetotelluric (AMT). *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 3(1).
- Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Wahidah, W., Lepong, P., dan Hamdani, D. 2021. *Pengantar Geofisika*. Samarinda: Universitas Mulawarman.
- Waldhauser, F. 2001. *hypoDD -- A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations*. Toronto: US Geological Survey.
- Waldhauser, F., dan Ellsworth, W. L. 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), 1353–1368.