

**IDENTIFIKASI ZONA REKAHAN AKTIF AKIBAT
PENGARUH AKTIVITAS FLUIDA PADA SUMUR INJEKSI
BERDASARKAN RELOKASI HIPOSENTER GEMPA MIKRO
MENGUNAKAN METODE *DOUBLE-DIFFERENCE* DATA
SEISMOGRAF PIGRAF DI LAPANGAN PANAS BUMI
ULUBELU, TANGGAMUS**

(Skripsi)

Oleh
Tyas Puspaningsih
2215051078



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

**IDENTIFIKASI ZONA REKAHAN AKTIF AKIBAT PENGARUH
AKTIVITAS FLUIDA PADA SUMUR INJEKSI BERDASARKAN
RELOKASI HIPOSENTER GEMPA MIKRO MENGGUNAKAN METODE
DOUBLE-DIFFERENCE DATA SEISMOGRAF PIGRAF DI LAPANGAN
PANAS BUMI ULUBELU, TANGGAMUS**

Oleh
Tyas Puspaningsih

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

IDENTIFIKASI ZONA REKAHAN AKTIF AKIBAT PENGARUH AKTIVITAS FLUIDA PADA SUMUR INJEKSI BERDASARKAN RELOKASI HIPOSENTER GEMPA MIKRO MENGGUNAKAN METODE *DOUBLE-DIFFERENCE* DATA SEISMOGRAF PIGRAF DI LAPANGAN PANAS BUMI ULUBELU, TANGGAMUS

Oleh

Tyas Puspaningsih

Lapangan Panas Bumi Ulubelu menerapkan sistem reinjeksi fluida untuk menjaga tekanan reservoir dan keberlanjutan produksi. Aktivitas reinjeksi tersebut dapat meningkatkan tekanan pori batuan dan memicu terjadinya gempa mikro (*microearthquake/MEQ*) pada zona rekahan aktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi zona rekahan aktif berdasarkan relokasi hiposenter gempa mikro menggunakan metode Double-Difference (HypoDD). Data yang digunakan merupakan data gempa mikro hasil perekaman seismograf PiGraf pada periode 17 Februari–12 April 2026 di Lapangan Panas Bumi Ulubelu. Tahapan pengolahan meliputi *picking* gelombang P dan S, penentuan hiposenter awal menggunakan *Geiger Adaptive Damping* (GAD), dan relokasi hiposenter menggunakan HypoDD. Dari 83 *event* gempa mikro yang teridentifikasi, sebanyak 70 *event* berhasil direlokasi. Hasil relokasi menunjukkan distribusi hiposenter yang lebih terfokus dibandingkan sebelum relokasi. Sebaran hiposenter terkonsentrasi pada kedalaman sekitar 0,5–1,5 km di sekitar sumur injeksi UBL-17, UBL-19, dan UBL-23. Pola distribusi gempa mikro cenderung mengikuti arah struktur dominan baratlaut–tenggara (NW–SE) dan baratdaya–timurlaut (SW–NE) yang diinterpretasikan sebagai zona rekahan aktif dan jalur migrasi fluida reservoir.

Kata kunci: Gempa Mikro, HypoDD, Relokasi Hiposenter, Zona Rekahan Aktif, Lapangan Panas Bumi Ulubelu

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF ACTIVE FRACTURE ZONES INDUCED BY FLUID ACTIVITY AT INJECTION WELLS BASED ON MICROEARTHQUAKE HYPOCENTER RELOCATION USING THE DOUBLE-DIFFERENCE METHOD FROM PIGRAF SEISMOGRAPH DATA IN THE ULUBELU GEOTHERMAL FIELD, TANGGAMUS

By

Tyas Puspaningsih

The Ulubelu Geothermal Field implements a fluid reinjection system to maintain reservoir pressure and sustain production. Reinjection activities can increase pore pressure within rocks and trigger microearthquakes (MEQ) along active fracture zones. This study aims to identify active fracture zones based on microearthquake hypocenter relocation using the Double-Difference (HypoDD) method. The data used in this study consist of microearthquake records acquired by the PiGraf seismograph during the period of February 17 to April 12, 2026, in the Ulubelu Geothermal Field. Data processing included P- and S-wave picking, initial hypocenter determination using the Geiger Adaptive Damping (GAD) method, and hypocenter relocation using HypoDD. Out of 83 identified microearthquake events, 70 events were successfully relocated. The relocation results show a more focused hypocenter distribution compared to the initial locations. The hypocenters are concentrated at depths of approximately 0.5–1.5 km around injection wells UBL-17, UBL-19, and UBL-23. The spatial distribution of microearthquakes tends to follow the dominant northwest–southeast (NW–SE) and southwest–northeast (SW–NE) structural trends, which are interpreted as active fracture zones and fluid migration pathways within the geothermal reservoir.

Keywords: Microearthquake, HypoDD, Hypocenter Relocation, Active Fracture Zone, Ulubelu Geothermal Field

Judul Skripsi : Identifikasi Zona Rekanan Aktif Akibat Pengaruh Aktivitas Fluida Pada Sumur Injeksi Berdasarkan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Menggunakan Metode *Double-Difference* Data Seismograf Pigraf Di Lapangan Panas Bumi Ulubelu, Tanggamus

Nama Mahasiswa : **Tyas Puspaningsih**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215051078

Program Studi : Teknik Geofisika


Fakultas : Teknik

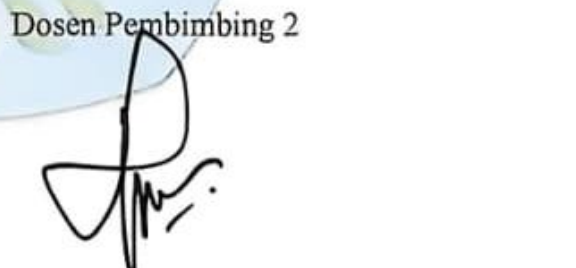


1. Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2


Prof. Dr. Ir. Karyanto, S.Si., M.T.
NIP. 196912301998021001


Ir. I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng.
NIP. 198805052019031019

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika


Dr. Ir. Syamsurrijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM.
NIP. 197307162000121002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

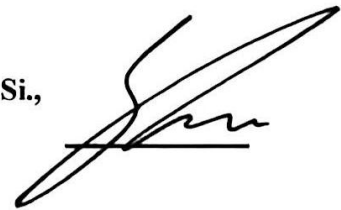
Ketua : Prof. Dr. Ir. Karyanto, S.Si., M.T.



Sekretaris : Ir. I Gede Boy D, S.Si., M.Eng.



Anggota : Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si.,
M.Si., C.EIA., IPM.



2. Dekan Fakultas Teknik


Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 196910312000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 12 Juni 2026

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Identifikasi Zona Rekahan Aktif Akibat Pengaruh Aktivitas Fluida pada Sumur Injeksi Berdasarkan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Menggunakan Metode *Double-Difference* Data Seismograf PiGraf di Lapangan Panas Bumi Ulubelu, Tanggamus” merupakan hasil penelitian dan pemikiran saya sendiri yang disusun berdasarkan data, analisis, serta referensi yang diperoleh selama proses penelitian. Karya ini tidak memuat karya ilmiah orang lain yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik pada perguruan tinggi mana pun, kecuali bagian-bagian yang telah disebutkan sumbernya secara jelas sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah dan etika akademik yang berlaku.

Apabila di kemudian hari ditemukan bahwa pernyataan ini tidak sesuai dengan keadaan yang sebenarnya, maka saya bersedia menerima segala konsekuensi dan sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026

Penulis



Tyas Puspaningsih

NPM 2215051078

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Tyas Puspaningsih, lahir di Kota Cilegon pada tanggal 2 April 2004 sebagai anak kedua dari dua bersaudara, dari pasangan Alm. Bapak Warsan Martadi dan Ibu Neneng Komariah. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 1 Cilegon dan menyelesaikannya pada tahun 2016. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Cilegon pada tahun 2016–2019, kemudian melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 3 Cilegon pada tahun 2019–2022. Pada tahun 2022, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menempuh pendidikan di bangku perkuliahan, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan organisasi, kepanitiaan, dan kegiatan akademik. Dalam kegiatan organisasi, penulis pernah menjabat sebagai Sekretaris Umum Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HIMA TG Bhuwana) periode 2024/2025. Selain itu, penulis juga aktif sebagai anggota Divisi *Human Resources and Development* pada *Society of Exploration Geophysicists Student Chapter* Universitas Lampung (SEG SC Unila).

Penulis juga aktif berpartisipasi dalam berbagai kegiatan kepanitiaan di lingkungan Program Studi Teknik Geofisika Universitas Lampung. Di antaranya sebagai anggota Divisi Kesekretariatan pada kegiatan *Geophysics Academic and Event* (GEAVENT) tahun 2023 dan anggota Divisi Kesekretariatan pada kegiatan *Geophysics Whiz Event and Seminar* (GWES) ke-10.

Sebagai bagian dari proses pembelajaran akademik, penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT Gecko Geomekanika Persada pada tanggal 4 Agustus hingga 17 September 2025 dengan judul “Analisis *Collapse Pressure* untuk Identifikasi *Wellbore Stability* Berdasarkan Data Log pada Lapangan ‘TY’ Cekungan Jawa Barat Utara.” Melalui kegiatan tersebut, penulis memperoleh pengalaman dalam penerapan ilmu geomekanika untuk menganalisis kestabilan lubang bor berdasarkan data log sumur. Selanjutnya, pada periode Januari hingga Juni 2026, penulis melaksanakan penelitian tugas akhir di Laboratorium Instrumentasi Geofisika Universitas Lampung dengan judul “Identifikasi Zona Rekahan Aktif Akibat Pengaruh Aktivitas Fluida pada Sumur Injeksi Berdasarkan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Menggunakan Metode *Double-Difference* Data Seismograf PiGraf di Lapangan Panas Bumi Ulubelu, Tanggamus.” Penelitian tersebut disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala rahmat, kasih sayang, pertolongan, dan jalan-jalan baik yang selalu Allah hadirkan dalam kehidupan penulis. Tidak ada satu langkah pun dalam perjalanan ini yang dapat penulis lalui tanpa izin dan kehendak-Nya. Dengan segala kerendahan hati, penulis mempersembahkan karya sederhana ini kepada:

PAPA DAN MAMA

Untuk dua orang yang menjadi alasan terbesar penulis untuk terus melangkah hingga hari ini. Skripsi ini menjadi salah satu bentuk rasa terima kasih yang tidak akan pernah cukup untuk membalas seluruh cinta dan perjuangan yang telah Papa dan Mama berikan. Terima kasih karena tidak pernah berhenti mendoakan, mendukung, dan menguatkan penulis dalam setiap keadaan. Terima kasih atas segala cinta, kasih sayang, pengorbanan, dan doa yang telah diberikan kepada penulis sejak langkah pertama kehidupan hingga mampu berada di titik ini. Tidak ada pencapaian yang penulis raih tanpa campur tangan perjuangan Papa dan Mama di dalamnya.

KAKAK DAN KELUARGA

Terima kasih kepada Mas yang telah banyak membantu dan mengambil peran dalam keluarga setelah kepergian Papa. Terimakasih untuk semua langkah mundur yang diambil demi penulis bisa maju dua langkah lebih baik. Meskipun tidak selalu diungkapkan secara langsung, penulis menghargai segala bentuk dukungan, perhatian, dan tanggung jawab yang telah diberikan selama ini. Semoga segala kebaikan dan kerja keras yang telah dilakukan senantiasa mendapat balasan terbaik serta keberkahan dalam setiap langkah kehidupan.

TEKNIK GEOFISIKA UNIVERSITAS LAMPUNG

Terima kasih kepada keluarga besar Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah menjadi tempat penulis belajar, bertumbuh, dan menemukan banyak pelajaran berharga selama masa perkuliahan. Terima kasih kepada para dosen yang dengan sabar membimbing dan membagikan ilmunya, serta kepada abang dan kakak tingkat yang telah memberikan arahan, bantuan, dan pengalaman yang sangat berarti. Banyak hal yang penulis pelajari bukan hanya tentang geofisika, tetapi juga tentang proses, perjuangan, dan kebersamaan.

DIRI PENULIS SENDIRI

Terakhir, persembahkan ini penulis berikan kepada diri sendiri. Terima kasih karena telah bertahan sejauh ini. Terima kasih karena tidak menyerah meskipun ada banyak hal yang tidak berjalan sesuai harapan. Terima kasih karena tetap memilih bangkit setelah kegagalan, tetap memilih melangkah ketika jalan terasa berat, dan tetap berusaha percaya bahwa setiap proses memiliki waktunya sendiri. Perjalanan ini mungkin tidak selalu mudah dan tidak selalu indah, tetapi hari ini penulis dapat melihat ke belakang dan menyadari bahwa semua rasa lelah, kecewa, takut, dan ragu telah mengantarkan penulis sampai di titik ini. Untuk segala hal yang telah berhasil dilewati, terima kasih karena telah menjadi kuat ketika keadaan mengharuskan demikian. Semoga langkah ini menjadi awal dari perjalanan-perjalanan baik lainnya yang menanti di masa depan.

MOTTO

“Tuhanmu tidak meninggalkanmu dan tidak pula membencimu.”

(QS. Ad-Dhuha: 3)

“Allah memang tidak menjanjikan hidupmu akan selalu indah, tapi dua kali Allah berjanji bahwa: *fa inna ma'al –'usri yusra, inna ma'al-usri yusra.*”

(QS. Al-Insyirah: 5-6)

“Life can be heavy, especially if you try to carry it all once. Part of growing up and moving into new chapters of your life is about catch and release.”

-Taylor Swift-

“The act of wanting to pursue something maybe even more precious than actually becoming that thing, so i feel like just being in the process itself is a prize and so you shouldn't think of it as a hard way and even if you do get stressed out you should think of it as happy stress just enjoy while pursuing it cause it's that precious.”

-Mark Lee-

“It will pass, everything you've gone through, it will pass.”

-Rachel Venya-

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala rahmat, karunia, dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Identifikasi Zona Rekahan Aktif Akibat Pengaruh Aktivitas Fluida pada Sumur Injeksi Berdasarkan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Menggunakan Metode *Double-Difference* Data Seismograf PiGraf di Lapangan Panas Bumi Ulubelu, Tanggamus” dengan baik.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam proses penyusunannya, penulis memperoleh banyak bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak sehingga penelitian ini dapat terselesaikan. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi pembaca dan pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang geofisika.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026



Tyas Puspaningsih

NPM. 2215051078

SANWACANA

Alhamdulillah rabbil'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas segala rahmat, karunia, kemudahan, serta pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Identifikasi Zona Rekahan Aktif Akibat Pengaruh Aktivitas Fluida pada Sumur Injeksi Berdasarkan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Menggunakan Metode *Double-Difference* Data Seismograf PiGraf di Lapangan Panas Bumi Ulubelu, Tanggamus" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa banyak pihak telah memberikan bantuan, dukungan, bimbingan, motivasi, serta doa yang sangat berarti. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika dan dosen penguji tugas akhir penulis yang telah memberikan kritik, saran, dan evaluasi yang sangat bermanfaat untuk penyempurnaan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA. Selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Karyanto, S.Si., M.T., selaku selaku dosen pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingan, arahan, ilmu, motivasi, serta masukan yang sangat berharga selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas kesabaran, perhatian, dan waktu yang telah diberikan kepada penulis dalam setiap tahapan penelitian.

5. Bapak Ir. I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng., selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan bimbingan, arahan, dukungan, kritik, dan saran yang membangun selama proses penelitian hingga penyusunan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih atas kesempatan yang diberikan untuk menjadi bagian dari Tim Tugas Akhir Instrumentasi PiGraf.
6. Ibu Ir. Akroma Hidayatika, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing, memberikan nasihat, serta mendukung penulis selama menjalani proses perkuliahan di Program Studi Teknik Geofisika Universitas Lampung.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah berkontribusi dalam proses pembelajaran, memberikan ilmu pengetahuan, serta mendukung penulis selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung.
8. Papa, *my never-ending-savior*, terima kasih atas cinta, kasih sayang, dan segala perjuangan yang telah Papa berikan selama hidup Papa. Meskipun Papa tidak dapat menyaksikan secara langsung perjalanan penulis hingga berada di titik ini, namun kehadiran Papa tidak pernah benar-benar hilang. Penulis berharap, di mana pun Papa berada, Papa mengetahui bahwa anak kecil yang dahulu selalu Papa banggakan akhirnya berhasil menyelesaikan salah satu mimpinya.
9. Mama, *terang yang selalu menyala dalam diriku*, terima kasih karena telah menjadi ibu sekaligus ayah, menjadi rumah ketika dunia terasa terlalu berat, dan menjadi terang yang tidak pernah redup dalam hidup penulis. Penulis tumbuh dengan melihat bagaimana Mama mengubah lelah menjadi senyum, mengubah khawatir menjadi doa, dan mengubah luka menjadi kekuatan. Jika hari ini penulis berhasil menyelesaikan skripsi ini, maka keberhasilan ini adalah milik Mama lebih dari siapapun. *Live a little longer, Ma, so that one day i can become a smile that could never take away from you.*
10. Kakak penulis, *who the one and only i called 'Mas'*, terima kasih karena tetap berdiri ketika keadaan mengharuskanmu untuk lebih kuat dari sebelumnya. Terimakasih untuk semua langkah mundur yang diambil demi penulis bisa maju dua langkah lebih baik. Mungkin tidak semua rasa terima kasih dapat diungkapkan dengan kata-kata, tetapi penulis menghargai setiap usaha,

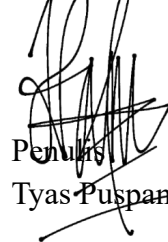
dukungan, dan tanggung jawab yang telah diberikan hingga hari ini. *Despite everything, you remain the best brother i could ever have.*

11. Tim PT. Gecko Geomekanika Persada, Terima kasih atas kesempatan, ilmu, pengalaman, serta pembelajaran berharga yang diberikan kepada penulis selama pelaksanaan Kerja Praktik. Terima kasih kepada Bang Omar, Bang Alvand, Bang Dimas, Kak Eva, Kak Anshila, Kak Aisyah, dan seluruh mentor, pembimbing, dan rekan kerja yang telah berbagi pengetahuan, pengalaman, serta memberikan lingkungan belajar yang mendukung.
12. Pebriadi, Firda Amalia, dan Serli Marlina, terima kasih sudah membuat Cimahi menjadi tempat dengan segala cerita serunya. Penulis harap, dimana pun kita bertemu nantinya, semoga sehat selalu menyertai kalian.
13. “*Teman Kandung*”, Laras Damasaty, Ula Aula Zahro, Syarah Alyazilah, Terima kasih karena telah menjadi bagian dari rumah yang penulis temukan dalam bentuk seorang sahabat. Terima kasih karena tidak pernah lelah mendengarkan cerita-cerita yang berulang, memahami hari-hari yang tidak selalu baik, dan tetap membuka ruang bagi penulis untuk kembali, sejauh apa pun langkah ini pergi.
14. Amalia Ramadhona, *my home away from home*, terima kasih karena selalu ada dalam hampir setiap fase kehidupan perkuliahan penulis. Untuk setiap ujung-ujung Bandar Lampung yang kita sambangi setiap waktu, untuk malam-malam panjang yang kita habiskan dengan film-film dan “*teh*” hangat itu, untuk segala hal kecil yang tidak pernah kita perhitungkan sebagai budi kasih, dan tentang rencana-rencana masa depan yang hanya bisa kita tertawakan. Semoga langkah yang akan kita tempuh setelah ini membawa kita pada hal-hal baik yang selama ini kita perjuangkan.
15. “*My Beautiful Chaos*”, 10 sahabat baik yang mengajarkan arti pertemanan, Amalia Ramadhona, Hanifah, Siti Mahmudah, Hafizah, Nur Asia Azam, Amelia Putri Anggraeni, Galuh Andini Putri Anralu H., Yeni Marsela, Indira Audita Azra Utami Putri, Aulia Nisya, Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan yang mungkin tidak akan pernah penulis lupakan.
16. “*#MakanApaKitaHariIni*”, Husnul Mubarrak dan Fitra Rahmadani, terima kasih sudah menjadi teman makan selama akhir perkuliahan ini. *May every*

meal we shared together become a source of strength for our hearts in the years to come.

17. “*Les Calistung*”, Fadsyah Muhammad Arbi, Aflaha Afif Alfahmi, dan Galuh Andini Putri, Terima kasih karena telah menjadi rekan seperjuangan yang tidak hanya hadir dalam ruang rapat dan program kerja, tetapi juga dalam proses bertumbuh menjadi pribadi yang lebih baik. *The pillars of #OptimasiHarmoni.*
18. Tim PiGraf, Razki Alfatah Khairu Mahli, Irgi Akbari, Aviv Irfan Wildan Ghiffary, Asda Arwa Zahiya, Firda Amalia, Terima kasih atas kesempatan untuk belajar, berkembang, dan menjadi bagian dari perjalanan panjang ini.
19. “*Orang-orang berisik di Instrumen*”, Ardian, Salsa, Presti, Syeikha, dan semua orang yang berjuang bersama-sama menyelesaikan skripsi di Lab. Instrumen.
20. Teknik Geofisika 2022, Terima kasih telah menjadi bagian dari cerita selama masa perkuliahan. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, tawa, dan berbagai kenangan yang telah tercipta selama empat tahun terakhir
21. Mark Lee, *my everlasting source of inspiration and pride*, terima kasih karena telah menjadi bagian kecil dari hari-hari yang berat melalui musik dan karyanya.
22. Tyas Puspaningsih, *the soul that never stopped believing*, terima kasih karena tetap bertahan pada hari-hari yang terasa begitu panjang, pada saat kehilangan harus diterima, pada saat keraguan datang silih berganti, dan pada saat rasanya lebih mudah untuk menyerah daripada melanjutkan. *I love you with all your imperfections!*
23. Semua pihak yang telah menjadi bagian dari perjalanan ini, terima kasih yang sebesar-besarnya atas semua dukungan, doa, dan kontribusi selama penyusunan skripsi ini.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026



Penulis
Tyas Puspaningsih

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
MENGESAHKAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN	Error! Bookmark not defined.
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN	x
MOTTO	xii
KATA PENGANTAR	xiii
SANWACANA	xiv
DAFTAR ISI	xviii
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
I. PENDAHULUAN	3
1.1. Latar Belakang	3
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Lokasi Penelitian.....	5
2.2. Geologi Regional	6
2.3. Stratigrafi.....	7
2.4. Fisiografi dan Morfologi.....	10
2.5. Penelitian Terdahulu.....	12
III. TEORI DASAR	14

3.1.	Energi Panas Bumi	14
3.1.1.	Model Sistem Panas Bumi	14
3.1.2.	Sistem Panas Bumi di Indonesia	15
3.2.	Teori Dasar Gelombang	16
3.2.1.	Gelombang Badan (<i>Body Wave</i>).....	16
3.2.2.	Gelombang Permukaan (<i>Surface Wave</i>).....	18
3.3.	Metode <i>Microearthquake</i> (MEQ)	19
3.4.	Parameter Sumber Gempa.....	20
3.4.1.	Waktu Asal Gempa (<i>Origin Time</i>).....	20
3.4.2.	Hiposenter	21
3.4.3.	Episenter	22
3.4.4.	Parameter Waktu Tiba Gelombang.....	22
3.5.	Metode <i>Double-Difference</i>	23
3.6.	Sumur Injeksi dalam Sistem Panas Bumi	26
3.7.	Zona Rekahan Aktif pada Reservoir Panas Bumi	27
IV.	METODOLOGI PENELITIAN	28
4.1.	Waktu dan Tempat Penelitian.....	28
4.2.	Alat dan Bahan.....	30
4.3.	Prosedur Penelitian.....	31
4.3.1.	Studi Literatur.....	31
4.3.2.	Desain Akuisisi.....	31
4.3.3.	Akuisisi Data Lapangan	31
4.3.4.	Pengolahan Data.....	33
4.3.5.	Analisis dan Interpretasi Data	42
4.4.	Diagram Alir Penelitian.....	43
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN	45
5.1.	<i>Event</i> Gempa Mikro (MEQ) Periode 17 Februari – 12 April 2026	45
5.2.	Waktu Tiba Gelombang P dan S.....	46
5.3.	Sebaran Episenter, Hiposenter, dan <i>Origin Time</i> Gempa Mikro Sebelum Relokasi.....	53
5.4.	Sebaran Episenter, Hiposenter, dan <i>Origin Time</i> Gempa Mikro (MEQ) Setelah Relokasi.....	58

5.5. <i>Plotting</i> Distribusi Episenter dan Hiposenter Gempa Mikro (MEQ) Sebelum Relokasi.....	61
5.6. <i>Plotting</i> Distribusi Episenter dan Hiposenter Gempa Mikro (MEQ) Setelah Relokasi.....	64
5.7. Analisis dan Interpretasi Distribusi Episenter dan Hiposenter	67
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	72
6.1. Kesimpulan	72
6.2. Saran.....	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta administrasi daerah penelitian.....	5
2. Peta geologi daerah penelitian	6
3. Stratigrafi daerah penelitian (Amin, dkk., 1993)	8
4. Pembagian fisiografi Provinsi Lampung (Mangga, dkk., 1994).....	10
5. Satuan morfologi lembar Kotaagung (Amin, dkk., 1994)	11
6. Model sistem panas bumi (Wijayanti, 2023)	15
7. Peta zona penunjaman dan sebaran gunung api di Indonesia (Hochstein & Sudarman, 2008)	16
8. Perambatan gelombang P (Wahidah, dkk., 2021)	17
9. Perambatan gelombang S (Wahidah, dkk., 2021)	17
10. Perambatan gelombang Love (Wahidah, dkk., 2021)	18
11. Perambatan gelombang Rayleigh (Wahidah, dkk., 2021)	18
12. Tiga komponen gelombang mikro (Hurukawa, 2008)	19
13. Diagram Wadati (Hurukawa, 2008)	21
14. Jarak Hiposenter (Hurukawa, 2008)	21
15. Ilustrasi algoritma metode <i>Double-Difference</i> (Waldhauser & Ellsworth, 2000)	23
16. <i>Casing</i> PiGraf.....	32
17. Pemasangan stasiun PiGraf dengan panel surya	33
18. Tampilan PiGraf <i>local server</i>	34
19. Tampilan beranda <i>software</i> PiGrafSoft.exe.....	34
20. Ilustrasi prinsip triangulasi lokasi sumber gempa menggunakan beberapa stasiun seismik.	36
21. File <i>input</i> stasiun di <i>software</i> GAD.....	37
22. File <i>input</i> data waktu tiba gelombang P dan S di <i>software</i> GAD.....	38

23. <i>Display</i> dari Tabel 5. <i>ID Vp seismic velocity model</i>	39
24. <i>File input velocity model</i> di <i>software GAD</i>	39
25. Katalog <i>arrival time</i>	40
26. Tampilan program <i>ph2dt.inp</i>	41
27. Tampilan program <i>hypoDD.inp</i>	41
28. Diagram Alir Penelitian.....	44
29. Katalog gempa BMKG 17 Februari – 12 April 2026.....	46
30. Nilai diagram Wadati sebagai validasi <i>picking</i> gelombang P dan S	47
31. Hasil pengolahan pada <i>software GAD.exe</i>	54
32. Peta distribusi episenter gempa mikro (MEQ) sebelum relokasi.....	61
33. <i>Cross section</i> hiposenter gempa mikro (MEQ) arah NW – SE sebelum relokasi	62
34. <i>Cross section</i> hiposenter gempa mikro (MEQ) arah SW – NE sebelum relokasi	63
35. Peta distribusi episenter gempa mikro (MEQ) setelah relokasi	64
36. <i>Cross section</i> hiposenter gempa mikro (MEQ) arah NW – SE setelah relokasi	65
37. <i>Cross section</i> hiposenter gempa mikro (MEQ) arah SW - NE setelah relokasi	66
38. Distribusi episenter dan hiposenter gempa mikro (MEQ) a) Sebelum relokasi b) Setelah relokasi	67
39. Distribusi episenter dan hiposenter gempa mikro (MEQ) a) Sebelum relokasi b) Setelah relokasi	67

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Ringkasan stratigrafi dari wilayah Tanggamus (Suharno, 2003)	8
2. Parameter identifikasi <i>event</i> gempa mikro pada penelitian (modifikasi dari Utama, dkk., 2021).....	23
3. Jadwal Kegiatan Penelitian	29
4. Alat dan Bahan	30
5. 1D <i>Vp seismic velocity model</i>	38
6. Data waktu tiba gelombang P dan S.....	48
7. Koordinat relatif stasiun.....	55
8. Hasil perhitungan penentuan episenter, hiposenter, dan <i>origin time software</i> GAD.exe.....	55
9. Hasil perhitungan penentuan episenter, hiposenter, dan <i>origin time software</i> HypoDD	59

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi panas bumi merupakan sumber energi yang berasal dari panas alami di dalam bumi yang tersimpan dalam bentuk fluida maupun batuan panas pada kondisi geologi tertentu (Rybach & Muffler, 1981). Keberadaan suatu sistem panas bumi dikendalikan oleh beberapa komponen utama, yaitu sumber panas yang berfungsi sebagai penyedia energi termal, batuan reservoir sebagai tempat akumulasi fluida panas, lapisan penudung yang menghambat keluarnya fluida ke permukaan, struktur geologi yang berperan sebagai jalur migrasi fluida, serta daerah imbuhan yang memasok air ke dalam sistem (Goff & Janik, 2000). Dalam pengelolaan reservoir panas bumi, fluida hasil produksi umumnya dikembalikan ke dalam sistem melalui sumur injeksi untuk menjaga tekanan reservoir, mempertahankan keberlanjutan produksi, serta mencegah penurunan temperatur secara signifikan.

Lapangan panas bumi Ulubelu yang terletak di Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung, merupakan salah satu lapangan panas bumi yang telah beroperasi secara komersial di Indonesia. Secara tektonik, wilayah ini dipengaruhi oleh aktivitas Patahan Sumatera dan proses subduksi Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia, sehingga memiliki kondisi geologi yang kompleks dan aktif (Sieh & Natawidjaja, 2000). Dalam pengelolaan reservoirnya, Lapangan Panas Bumi Ulubelu menerapkan sistem injeksi yang berpotensi menimbulkan gempa mikro terinduksi di sekitar zona reservoir dan sepanjang struktur geologi bawah permukaan.

Dalam eksploitasi sistem panas bumi, injeksi fluida (*re-injection*) merupakan aspek penting untuk menjaga tekanan reservoir dan keberlanjutan produksi jangka panjang (Saptadji, 2001). Fluida hasil produksi uap atau air panas umumnya diinjeksi kembali ke dalam reservoir melalui sumur injeksi untuk menjaga tekanan pori, mempertahankan keberlanjutan produksi, serta mencegah

penurunan kinerja reservoir dalam jangka panjang (Saptadji, 2009). Injeksi fluida ke dalam batuan reservoir dapat menyebabkan peningkatan tekanan pori yang berpotensi memicu pergerakan rekahan dan sesar yang telah ada. Pergerakan rekahan tersebut menghasilkan gempa-gempa kecil atau gempa mikro yang dikenal sebagai *mikroearthquake* (Armi & Santosa, 2014).

Microearthquake (MEQ) merupakan fenomena gempa bumi berskala kecil dengan magnitudo rendah (umumnya $M \leq 3$) yang banyak dimanfaatkan sebagai metode geofisika pasif untuk memantau dinamika bawah permukaan, khususnya pada sistem panas bumi. Informasi hiposenter gempa mikro dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona rekahan aktif, arah aliran fluida injeksi, serta struktur geologi bawah permukaan yang berperan sebagai jalur permeabilitas tinggi (Kayal, 2008). Namun, interpretasi sebaran gempa mikro sangat bergantung pada ketelitian penentuan lokasi hiposenter. Penentuan lokasi gempa secara konvensional sering kali masih dipengaruhi oleh keterbatasan model kecepatan bawah permukaan dan geometri stasiun seismik, sehingga sebaran hiposenter cenderung menyebar dan kurang merepresentasikan struktur rekahan yang sebenarnya. Kondisi ini dapat menyulitkan analisis hubungan antara aktivitas sumur injeksi dan respon reservoir panas bumi.

Untuk meningkatkan ketelitian lokasi hiposenter gempa mikro, digunakan metode relokasi hiposenter berbasis *double-difference*. Metode ini memanfaatkan selisih waktu tiba gelombang seismik dari pasangan gempa yang berdekatan dan direkam oleh stasiun yang sama, sehingga pengaruh kesalahan model kecepatan dapat diminimalkan. Implementasi metode *double-difference* dilakukan menggunakan perangkat lunak HypoDD yang mampu mengolah data waktu tiba gelombang P dan S untuk menghasilkan lokasi relatif hiposenter yang lebih presisi. Hasil relokasi umumnya memperlihatkan pola sebaran gempa yang lebih rapat dan terstruktur, seperti klaster atau pola linier, yang berkaitan dengan keberadaan rekahan dan sesar aktif.

Dalam penelitian ini, data gempa mikro direkam menggunakan instrumen PiGraf, yaitu seismograf berbasis *Raspberry Pi* yang dikembangkan oleh Teknik Geofisika Universitas Lampung. PiGraf merupakan *prototipe* seismograf berbiaya relatif rendah dengan sensitivitas tinggi untuk aplikasi eksplorasi dan monitoring

panas bumi. Perangkat ini menggunakan sensor geophone 4,5 Hz dan ADC 24-bit sehingga mampu merekam sinyal frekuensi rendah dengan rasio *signal-to-noise* yang lebih baik dibanding *prototipe* sebelumnya berbasis akselerometer. Sistemnya mendukung perekaman kontinu, sinkronisasi waktu GPS, serta telah diuji dengan pembandingan seismograf standar dan menunjukkan keandalan pencatatan data yang baik. Dalam penelitian panas bumi, PiGraf digunakan untuk merekam aktivitas mikroseismik dan *ambient noise* guna mengidentifikasi zona sirkulasi fluida, struktur berpori, dan area aktif reservoir (Karyanto, dkk., 2025).

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi zona rekahan aktif yang dipengaruhi oleh aktivitas fluida pada sumur injeksi melalui analisis relokasi hiposenter gempa mikro menggunakan metode *double-difference* di Lapangan Panas Bumi Ulubelu. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pola sebaran gempa mikro serta keterkaitannya dengan jalur rekahan dan pergerakan fluida di dalam reservoir. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman terhadap respon reservoir panas bumi akibat injeksi fluida serta menjadi informasi pendukung dalam kegiatan monitoring dan pengelolaan reservoir secara berkelanjutan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana hiposenter gempa mikro dapat mengidentifikasi zona rekahan aktif di Lapangan Panas Bumi Ulubelu.
2. Bagaimana pola sebaran spasial gempa mikro hasil relokasi terhadap pengaruh aktivitas sumur injeksi terhadap respon reservoir panas bumi.
3. Bagaimana keterkaitan antara distribusi gempa mikro dengan struktur rekahan yang berperan sebagai jalur aliran fluida reservoir.

1.3. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi zona rekahan aktif di Lapangan Panas Bumi Ulubelu berdasarkan relokasi hiposenter gempa mikro menggunakan metode *double-difference* (HypoDD).

2. Menganalisis pola sebaran spasial gempa mikro hasil relokasi untuk mengetahui pengaruh aktivitas sumur injeksi terhadap respon reservoir panas bumi.
3. Menentukan keterkaitan antara distribusi gempa mikro dengan struktur rekahan yang berperan sebagai jalur aliran fluida reservoir.

1.4. Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan tujuan di atas, maka dapat dirumuskan batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data yang digunakan adalah data gempa mikro hasil akuisisi menggunakan instrumen PiGraf di Lapangan Panas Bumi Ulubelu, Tanggamus.
2. Relokasi hiposenter gempa mikro dilakukan menggunakan metode *double-difference* (HypoDD) berdasarkan data waktu tiba gelombang P dan S.
3. Identifikasi zona rekahan aktif didasarkan pada analisis sebaran spasial hiposenter gempa mikro hasil relokasi dan keterkaitannya dengan aktivitas sumur injeksi.

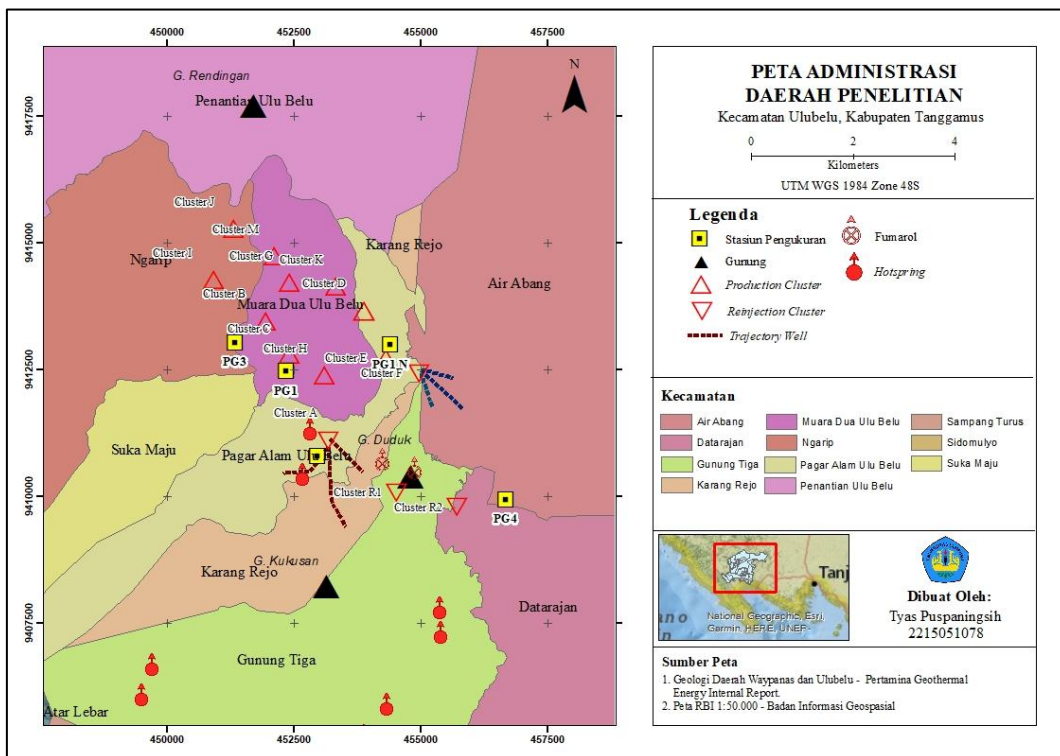
1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam memahami karakteristik sebaran gempa mikro yang berkaitan dengan aktivitas sumur injeksi di Lapangan Panas Bumi Ulubelu. Melalui penerapan analisis relokasi hiposenter menggunakan metode *double-difference* (HypoDD), penelitian ini diharapkan mampu mengidentifikasi keberadaan dan pola perkembangan zona rekahan aktif sebagai respon terhadap proses injeksi fluida di dalam reservoir panas bumi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi pendukung yang penting dalam kegiatan pemantauan dan pengelolaan reservoir panas bumi secara berkelanjutan, serta dapat dimanfaatkan sebagai referensi dalam pengembangan kajian *microearthquake* (MEQ) dan penerapan metode relokasi hiposenter pada studi panas bumi di Indonesia.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Penelitian

Wilayah penelitian terletak di Kecamatan Ulubelu, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Secara geografis, wilayah penelitian dibatasi oleh koordinat 448,399 – 455,457 mE dan 9.407,839 – 9.415,491 mN di zona 48S menurut proyeksi UTM (*Universal Transverse Mercator*) dengan datum WGS84 (*World Geodetic System 1984*). Gambar 1 menunjukkan peta wilayah penelitian.

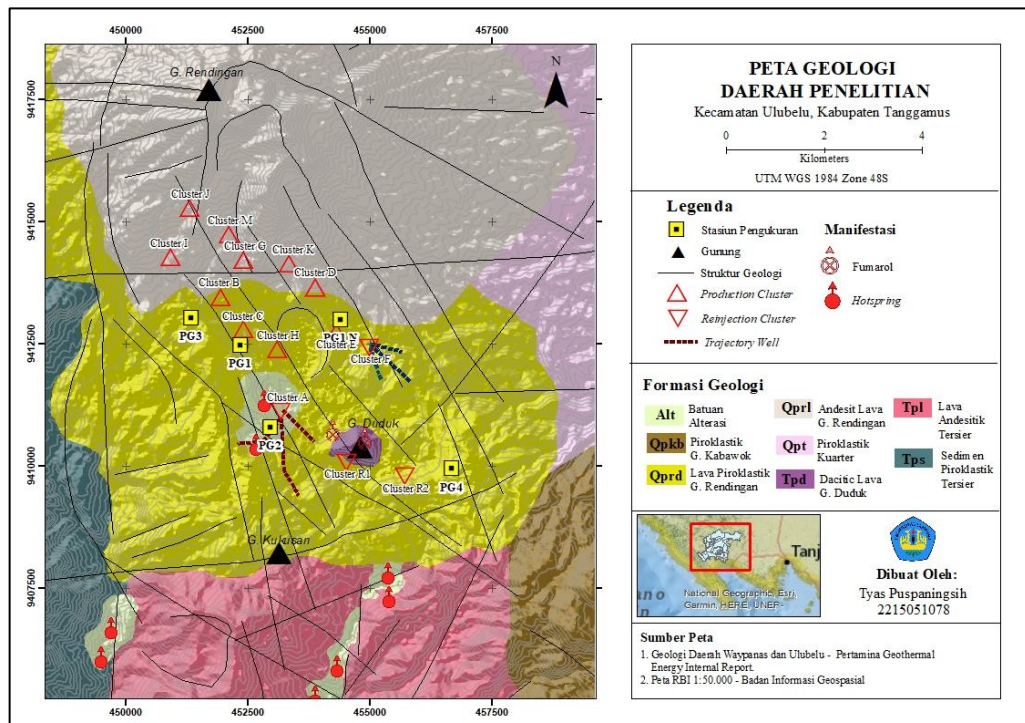


Gambar 1. Peta administrasi daerah penelitian

2.2. Geologi Regional

Lapangan Panas Bumi Ulubelu berada pada jalur Pegunungan Bukit Barisan yang memanjang dari barat laut hingga tenggara Pulau Sumatra. Keberadaan jalur pegunungan ini berkaitan erat dengan aktivitas subduksi Lempeng Indo-Australia yang menunjam ke bawah Lempeng Eurasia, sehingga menghasilkan aktivitas magmatisme, vulkanisme, serta perkembangan struktur geologi yang intens.

Kondisi geologi Ulubelu berasal dari periode Pleistosen hingga Holosen, yang didominasi oleh batuan vulkanik muda termasuk tufa, lava, dan breksi. Batuan tertua adalah batuan metamorfik pra-Tersier (tingkat metamorfik rendah hingga sedang) (Amin et al., 1994; Suharno, 2013). Batuan vulkanik Tersier berasal dari Gunung Sula, Panggang, dan Kukusan, yang terdiri dari basalt, lava dacit, piroksen, dan andesit basaltik. Gunung-gunung ini terletak di dalam wilayah studi, dengan batuan vulkanik yang meluas ke arah barat daya dan barat (Suharno dan Browne, 2000). Batuan vulkanik Kuartar berasal dari Gunung Rindingan dan Gunung Tanggamus dan terdiri dari lava riolit, tufa, breksi, dan lava andesit. Peta geologi wilayah penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian

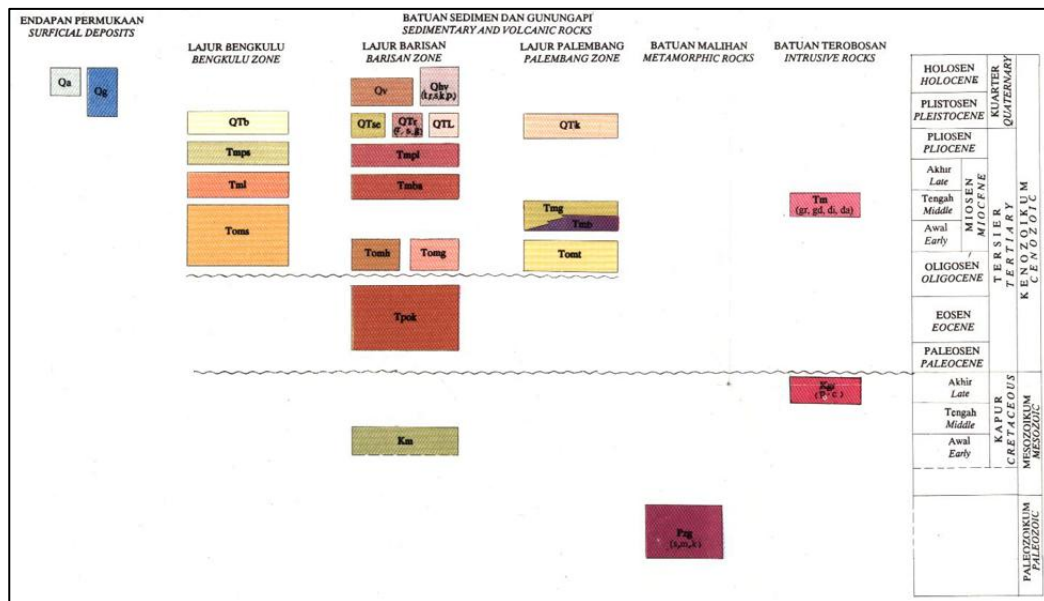
Sebagian besar permukaan geologis telah mengalami pelapukan, dan batuan yang telah mengalami alterasi intensif ditemukan di bagian tengah wilayah penelitian, yaitu di sekitar Desa Pagaralam. Batuan dasar setempat terdiri dari breksi dan lava Formasi Hulusimpang (Tomh), yang muncul di permukaan dan menyebar ke arah barat daya, timur laut, dan barat laut di kawasan vulkanik Kabupaten Tanggamus (Amin dkk., 1993). Batuan dasar (*basement*) ditutupi oleh batuan vulkanik hingga kedalaman sekitar 1000 m, yang terdiri dari lava andesit Gunung Sulah, lava andesit basaltik Gunung Kukusan, lava piroklastik dan andesit Gunung Kabawok dan Tanggamus serta lava breksi Gunung Tanggamus, lava piroklastik dan andesit Gunung Rendingan, dan lava riolitik Gunung Kurupan (Amin dkk., 1994).

2.3. Stratigrafi

Berdasarkan hasil pemetaan geologi yang dilakukan oleh Masdjuk (1990) dalam Gentana dkk. (2018), daerah Ulubelu tersusun oleh satuan batuan vulkanik berumur Tersier hingga Kuartar yang didominasi oleh lava, tuf, dan batuan piroklastik. Urutan stratigrafi daerah penelitian disajikan pada Tabel 1. Secara umum, satuan batuan yang berkembang menunjukkan adanya aktivitas vulkanisme yang berlangsung secara berulang sejak Pliosen hingga Kuartar. Produk vulkanik yang lebih tua umumnya berupa tuf pumis dan lava vulkanik, sedangkan satuan yang lebih muda didominasi oleh batuan piroklastik dan aliran lava andesit-basaltik. Keberadaan batuan vulkanik tersebut berperan penting dalam pembentukan sistem panas bumi Ulubelu, baik sebagai batuan reservoir, jalur permeabilitas yang dikontrol oleh struktur geologi, maupun sebagai hasil aktivitas magmatisme yang berkaitan dengan sumber panas sistem panas bumi.

Selain satuan vulkanik, daerah Ulubelu juga tersusun oleh batuan granodiorit Formasi Hulusimpang, Formasi Ranau, batuan teralterasi, serta endapan aluvial yang berkembang pada bagian tertentu wilayah penelitian. Secara vulkanostratigrafi, kawasan ini dipengaruhi oleh beberapa pusat erupsi yang terbentuk pada periode yang berbeda, mulai dari vulkanisme berumur Pliosen hingga Pleistosen. Aktivitas vulkanik yang lebih tua diwakili oleh Gunung Sulah, Gunung Kukusan, dan Gunung Panggang, sedangkan aktivitas yang lebih muda berkembang melalui Gunung Kabawok, Gunung Tanggamus, Gunung Rendingan,

dan Gunung Kurupan. Keberadaan beberapa pusat vulkanik tersebut menunjukkan bahwa daerah Ulubelu mengalami sejarah vulkanisme yang kompleks dan berlangsung secara berulang. Produk-produk vulkanik yang dihasilkan kemudian membentuk susunan batuan yang berperan penting dalam perkembangan sistem panas bumi, baik sebagai batuan reservoir, batuan penudung, maupun jalur aliran fluida yang dikontrol oleh struktur geologi.



Gambar 3. Stratigrafi daerah penelitian (Amin, dkk., 1993)

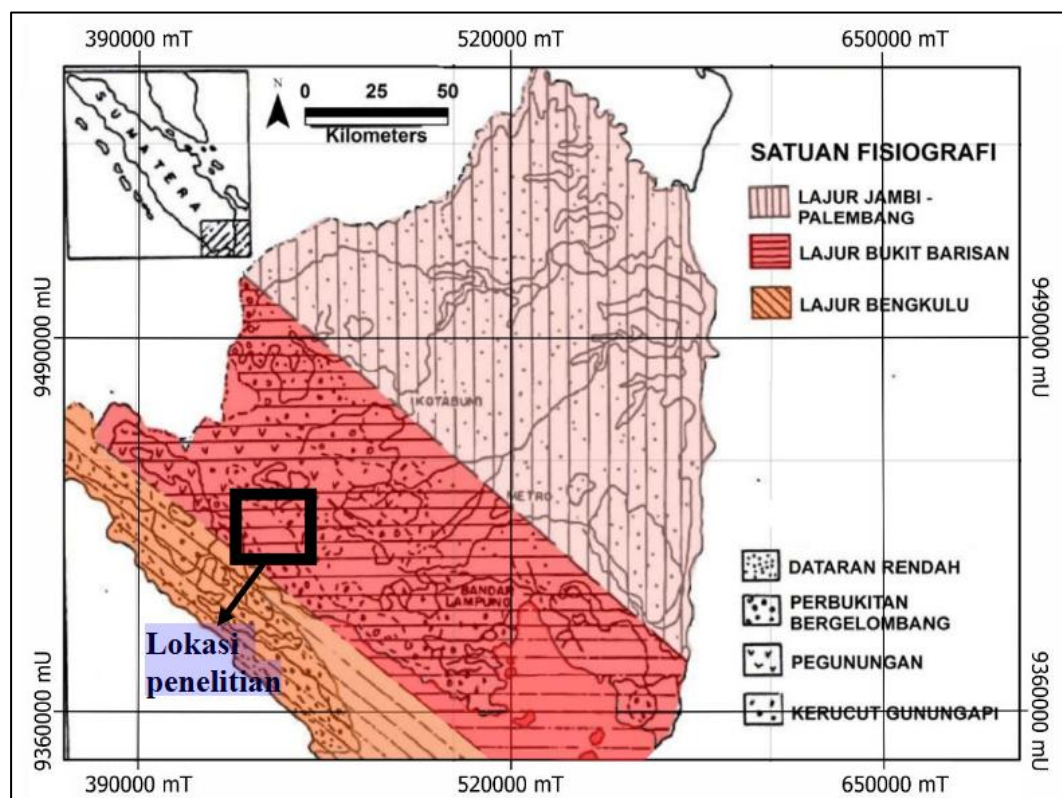
Tabel 1. Ringkasan stratigrafi dari wilayah Tanggamus (Suharno, 2003)

Unit (Simbol)	Umur Geologi	Litologi	Ketebalan
Alluvium (Qa)	Holosen	Material tidak terkonsolidasi, <i>boulders</i> , pasir, lanau, dan tanah liat	-
Formasi Ranau (QTr)	Holosen sampai Pleistosen	<i>Pumeeceous</i> Tuff	100-500 m
Volkanik Muda (Qhv)	Holosen sampai Pleistosen	Lava andesit <i>basaltic</i> , tuff dan breksi	± 800 m
Volkanik Tua(Qv)	Pleistosen	Breksi Volkanik dan aliran lava	± 400 m

Formasi Semong (QTse)	Pleistosen sampai Pliosen	Batupasir-batulempung	20-40 m
Formasi Kasai (QTK)	Pleistosen sampai Pliosen	Volkaniklastik dengan konsolidasi buruk	± 200 m
Formasi Simpangaur (Tmps)	Pliosen sampai Miosen Akhir	Batupasir dan batulempung	200-700 m
Formasi Bal (Tmba)	Miosen	Vulkaniklastik tuff	100-200 m
Granodiorit (Tmgr)	Miosen	Pluton granitik	-
Formasi Seblat (Toms)	Miosen sampai Akhir Oligosen	Perlapisan Sedimen: Batulempung, Batulanau dan batupasir	± 500 m
Formasi Gading (Tomg)	Miosen sampai Akhir Oligosen	Perlapisan Sedimen: Batulempung, Batulanau dan batupasir	100-500 m
Formasi Hulusimpang (Tomh)	Miosen sampai Akhir Oligosen	Breksi Volkanik dan Lava	-
Pluton Pandean dan Instrusi yang berhubungan (Kgr)	<i>Creteceous</i> Akhir	Pluton Granitik	-
Formasi Menanga (Km)	<i>Creteaceous</i> Awal	Serpih, batulempung dan batupasir	-
Gunungkasihan Kompleks (Pzg)	Palaeozoik	Batuan metamorf	-

2.4. Fisiografi dan Morfologi

Bentang alam Sumatra telah dipengaruhi secara signifikan oleh berbagai peristiwa geologis, salah satunya adalah subduksi Lempeng Eurasia di bawah Lempeng Indo-Australia. Peristiwa ini menyebabkan terbentuknya pegunungan di sepanjang pulau Sumatra, membentang dari Lampung hingga Aceh (Barber dkk., 2005). Berdasarkan klasifikasi oleh Mangga dkk. (1994), Provinsi Lampung terbagi menjadi tiga wilayah fisiografis: Sabuk Jambi-Palembang, terletak di timur laut; Sabuk Bengkulu, terletak di barat daya; dan Sabuk Bukit Barisan, terletak di antara dua sabuk lainnya, yang dicirikan oleh medan pegunungan yang membentang dari Lampung hingga Aceh. Daerah penelitian terletak di dalam Sabuk Bukit Barisan, zona pegunungan dengan lereng curam dan ketinggian berkisar antara 300 hingga 2.000 meter di atas permukaan laut (dpl).

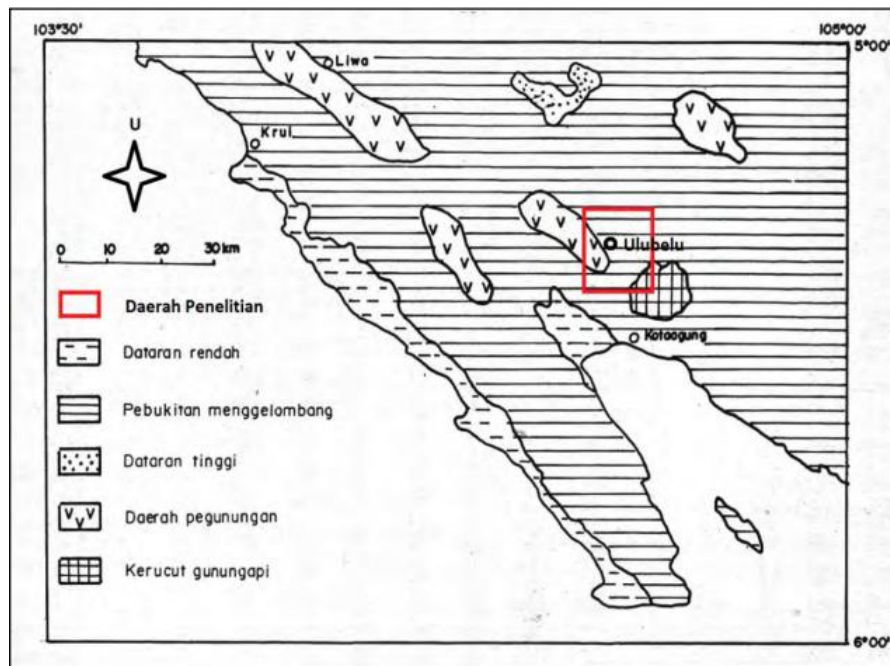


Gambar 4. Pembagian fisiografi Provinsi Lampung (Mangga, dkk., 1994)

Secara geomorfologi, wilayah Kabupaten Tanggamus yang termasuk dalam Lembar Peta Kotaagung memperlihatkan keragaman bentang alam yang dipengaruhi oleh aktivitas tektonik dan vulkanik. Bentuklahan yang berkembang

dapat dikelompokkan menjadi beberapa satuan utama, yaitu pegunungan dan perbukitan, dataran rendah, perbukitan bergelombang, dataran tinggi, serta kerucut vulkanik. Di antara satuan tersebut, perbukitan bergelombang merupakan bentuklahan yang paling dominan dan menempati sebagian besar wilayah penelitian. Satuan ini tersusun oleh kombinasi batuan intrusif, batuan vulkanik Kuartar, sedimen berumur Tersier, serta sejumlah kecil batuan metamorf. Variasi litologi dan relief yang berkembang menunjukkan bahwa wilayah ini telah mengalami proses geologi yang kompleks, sehingga membentuk kondisi morfologi yang beragam dan mendukung perkembangan sistem panas bumi di daerah Ulubelu.

Berdasarkan Gambar 5, morfologi wilayah penelitian terdiri dari dataran pantai yang merupakan bagian dari Cekungan Sesar Semangko, yang terbentuk dari endapan aluvial dengan ketinggian berkisar antara 40 m di atas permukaan laut, serta pegunungan yang terdiri dari batuan beku, metamorfik, dan vulkanik muda, dengan ketinggian berkisar antara sekitar 700 m hingga 1.500 m di atas permukaan laut. Secara umum, lereng pegunungan cukup curam dengan lembah berbentuk V yang sempit. Pegunungan di wilayah studi meliputi Gunung Kukusan, Gunung Kabawok, Gunung Wairas, dan Gunung Rendingan.



Gambar 5. Satuan morfologi lembar Kotaagung (Amin, dkk., 1994)

2.5. Penelitian Terdahulu

Rahmaningtyas dkk. (2020) melakukan penelitian relokasi hiposenter gempa mikro menggunakan metode *double-difference* pada suatu lapangan panas bumi di Indonesia. Penelitian ini relevan karena dilakukan pada sistem panas bumi dengan karakter geologi vulkanik yang serupa dengan Ulubelu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hiposenter gempa mikro setelah relokasi membentuk klaster yang lebih rapat dan terarah dibandingkan sebelum relokasi. Pola sebaran tersebut berasosiasi dengan zona rekahan dan jalur aliran fluida reservoir. Selain itu, nilai residual waktu tempuh (RMS) menurun secara signifikan setelah proses relokasi, yang menandakan peningkatan akurasi penentuan lokasi gempa. Temuan ini memberikan bukti bahwa metode *double-difference* efektif untuk mengurangi pengaruh kesalahan model kecepatan dan mampu memperjelas geometri struktur bawah permukaan.

Setyaningsih (2017) mengkaji relokasi hiposenter gempa mikro di Lapangan Panas Bumi Wayang Windu menggunakan metode *double-difference* melalui perangkat lunak HypoDD. Penelitian ini menunjukkan bahwa proses relokasi mampu memperbaiki posisi hiposenter secara signifikan, yang ditandai dengan penurunan nilai residual waktu tempuh gelombang. Sebaran hiposenter hasil relokasi membentuk klaster yang lebih rapat dan pola linier yang diinterpretasikan sebagai zona rekahan aktif. Pola tersebut berkaitan erat dengan struktur geologi yang berperan sebagai jalur aliran fluida reservoir, sehingga relokasi hiposenter dapat dimanfaatkan untuk memahami karakter permeabilitas sistem panas bumi.

Hijriani dkk. (2017) melakukan penelitian peningkatan akurasi lokasi gempa mikro di sebuah lapangan panas bumi dengan mengombinasikan metode korelasi silang *waveform* dan relokasi *double-difference*. Penelitian ini relevan karena menitikberatkan pada peningkatan kualitas data waktu tiba sebelum proses relokasi, yang menjadi faktor penting dalam keberhasilan metode HypoDD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setelah proses korelasi silang dan relokasi, hiposenter gempa mikro membentuk pola klaster yang lebih jelas serta memperlihatkan orientasi struktur tertentu. Pola tersebut berkorelasi dengan struktur geologi yang berperan sebagai jalur aliran fluida. Penelitian ini memberikan bukti bahwa metode *double-*

difference sangat efektif untuk memetakan zona rekahan aktif pada sistem panas bumi ketika didukung data waktu tiba yang presisi.

Penelitian oleh Margaliu (2022) membahas analisis gempa mikro pada sistem panas bumi dengan fokus pada penentuan lokasi dan interpretasi sebaran hiposenter sebagai indikator struktur bawah permukaan. Studi ini menggunakan data waktu tiba gelombang P dan S dari jaringan seismik lokal, yang kemudian diolah untuk mendapatkan distribusi hiposenter gempa mikro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas gempa mikro cenderung terakumulasi pada zona tertentu yang diinterpretasikan sebagai area rekahan aktif dan jalur permeabilitas fluida reservoir. Selain itu, penelitian ini menegaskan bahwa ketelitian lokasi hiposenter sangat memengaruhi kualitas interpretasi struktur bawah permukaan, sehingga proses pengolahan data seismik yang baik menjadi faktor penting dalam studi mikroseismik panas bumi. Penelitian ini relevan karena sama-sama memanfaatkan gempa mikro sebagai indikator dinamika reservoir, meskipun pendekatan relokasi presisi tinggi seperti *double-difference* belum menjadi fokus utama dalam studi tersebut.

Berdasarkan seluruh penelitian terdahulu tersebut, terlihat bahwa studi mikroseismik pada sistem panas bumi secara konsisten menunjukkan keterkaitan antara sebaran hiposenter gempa mikro dengan zona rekahan dan jalur aliran fluida reservoir. Metode *double-difference* terbukti meningkatkan ketelitian lokasi gempa dan memperjelas geometri struktur bawah permukaan, sedangkan studi lain menunjukkan pentingnya kualitas data waktu tiba dan interpretasi sebaran gempa sebagai indikator permeabilitas reservoir. Namun, penelitian yang secara khusus mengintegrasikan relokasi hiposenter presisi tinggi dengan analisis pengaruh aktivitas sumur injeksi di Lapangan Panas Bumi Ulubelu masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kekosongan tersebut melalui analisis relokasi hiposenter gempa mikro guna mengidentifikasi zona rekahan aktif yang dipengaruhi oleh injeksi fluida.

III. TEORI DASAR

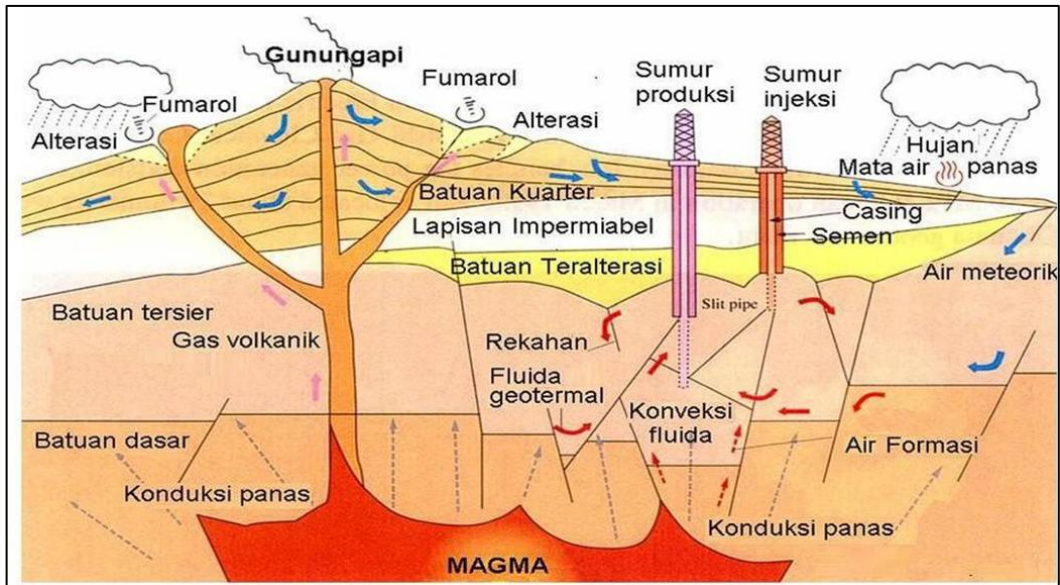
3.1. Energi Panas Bumi

Energi panas bumi adalah energi termal yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan Bumi dan dalam fluida yang terkandung di dalamnya. Energi termal ini berbentuk air atau uap yang terbentuk di dalam reservoir panas bumi sebagai hasil pemanasan oleh batuan beku, yang mentransfer panas melalui konduksi ke air di bawah permukaan, sehingga menciptakan sistem konveksi.

Di bawah permukaan Bumi, suhu meningkat secara bertahap seiring dengan kedalaman. Perubahan suhu Bumi ini umumnya dikenal sebagai gradien geotermal (Suharno, 2013). Namun, deskripsi ini tetap merupakan rata-rata global, dan variasi yang signifikan dapat terjadi antara lokasi yang berbeda; misalnya, daerah vulkanik menunjukkan gradien geotermal yang lebih tinggi pada kedalaman dangkal dibandingkan dengan daerah lain pada kedalaman yang sama (Maulida, 2016).

3.1.1. Model Sistem Panas Bumi

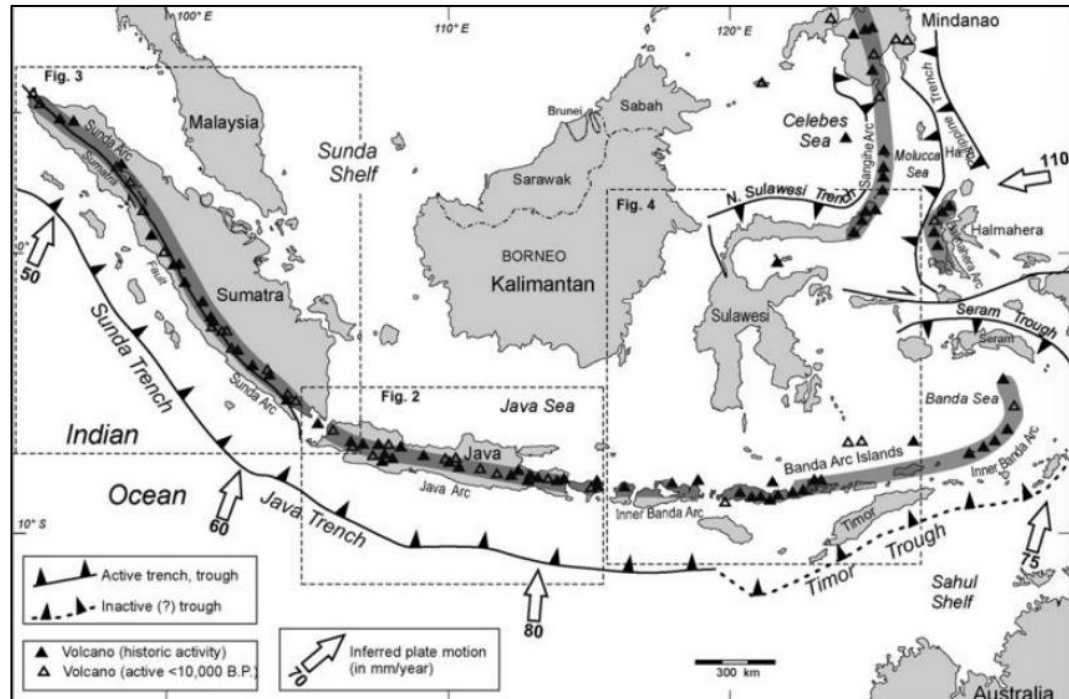
White (1967) mengembangkan model konseptual sistem panas bumi yang menekankan gagasan sirkulasi fluida dalam sistem hidrotermal. Fluida panas bumi berasal dari air meteorik yang meresap di bawah permukaan melalui batuan permeabel atau retakan dan kemudian muncul di permukaan dalam bentuk fitur panas bumi. Ketika suhu air mencapai suhu jenuhnya, terjadi perubahan fase. Ketika ini terjadi, fluida menjadi campuran uap dan air. Jika, pada kedalaman tertentu, suhu air lebih tinggi daripada suhu jenuhnya, maka hanya satu fase—fase uap—yang ada dalam sistem panas bumi. Teori ini memperkuat gagasan bahwa manifestasi permukaan merupakan ekspresi dari sistem konveksi masif di bawah permukaan.



Gambar 6. Model sistem panas bumi (Wijayanti, 2023)

3.1.2. Sistem Panas Bumi di Indonesia

Secara umum, sistem panas bumi di Indonesia memiliki suhu yang relatif tinggi karena terkait dengan aktivitas vulkanik baru-baru ini yang terjadi kurang dari 400.000 tahun yang lalu (periode Kuartar). Sistem vulkanik Indonesia terkait dengan sistem lempeng tektonik aktif di wilayah tersebut. Tiga lempeng tektonik aktif ini adalah lempeng Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia. Tabrakan antara ketiga lempeng tektonik ini menyebabkan satu lempeng menyelam di bawah lempeng lainnya (subduksi), sehingga terbentuk gunung berapi di sepanjang zona subduksi atau busur vulkanik yang membentang dari Sumatera bagian barat, ke selatan melintasi Jawa, dan berlanjut ke Bali dan Kepulauan Sunda Kecil (Gambar 7) (Suharno, 2013).



Gambar 7. Peta zona subduksi dan distribusi gunung api di Indonesia (Hochstein & Sudarman, 2008)

3.2. Teori Dasar Gelombang

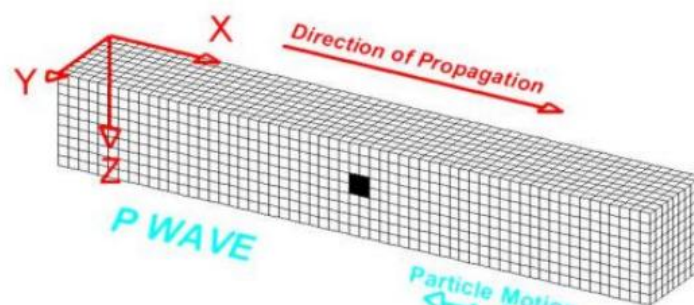
Gelombang seismik merupakan energi elastik yang merambat melalui material penyusun bumi akibat adanya pelepasan energi dari suatu sumber seismik. Karakteristik perambatan gelombang ini dipengaruhi oleh sifat fisik dan elastisitas batuan yang dilaluinya. Secara umum, gelombang seismik dikelompokkan menjadi dua jenis utama, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang badan merambat melalui bagian dalam bumi dan terdiri atas gelombang primer (P) serta gelombang sekunder (S), sedangkan gelombang permukaan merambat pada lapisan paling atas bumi dan umumnya memiliki amplitudo yang lebih besar dibandingkan gelombang badan. Dalam penelitian mikroseismik, informasi waktu tiba gelombang P dan S menjadi parameter yang sangat penting karena digunakan dalam penentuan lokasi hiposenter dan relokasi sumber gempa (Telford et al., 1990).

3.2.1. Gelombang Badan (*Body Wave*)

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

1.) Gelombang P (Primer)

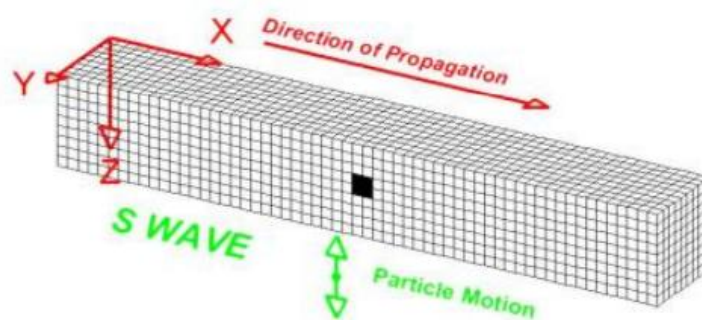
Gelombang primer (*Primary wave* atau gelombang P) merupakan gelombang badan yang memiliki kecepatan rambat paling tinggi sehingga menjadi gelombang pertama yang terekam oleh stasiun seismik. Gelombang ini dapat merambat melalui medium padat, cair, maupun gas dengan arah gerak partikel sejajar terhadap arah perambatan gelombang. Kecepatan gelombang P umumnya berkisar antara 5–7 km/s pada kerak bumi dan lebih dari 8 km/s pada mantel bumi (Kiswiranti, 2019).



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

2.) Gelombang S (Sekunder)

Gelombang sekunder (*Secondary wave* atau gelombang S) merupakan gelombang badan yang memiliki kecepatan rambat lebih rendah dibandingkan gelombang P sehingga tiba setelah gelombang P pada stasiun seismik. Gelombang ini hanya dapat merambat melalui medium padat karena arah gerak partikelnya tegak lurus terhadap arah perambatan gelombang. Kecepatan gelombang S pada kerak bumi umumnya berkisar antara 3–4 km/s dan lebih dari 4,5 km/s pada mantel bumi (Kiswiranti, 2019)..



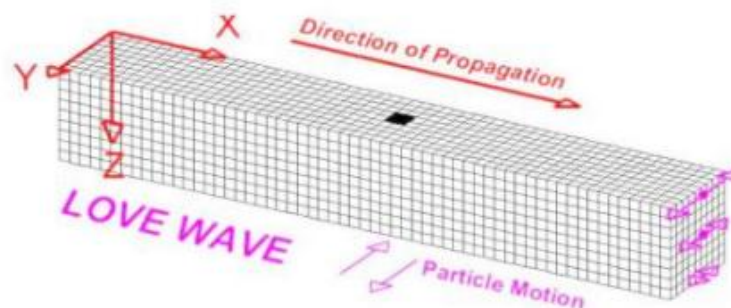
Gambar 9. Perambatan gelombang S (Wahidah, dkk., 2021)

3.2.2. Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

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

1.) Gelombang Love

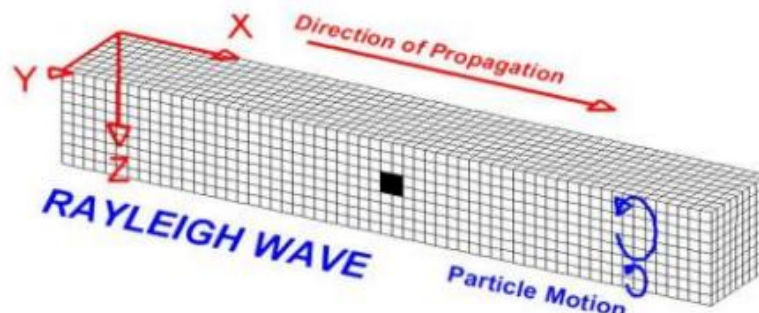
Gelombang Love merupakan salah satu jenis gelombang permukaan yang memiliki arah gerak partikel tegak lurus terhadap arah perambatan gelombang dan sejajar dengan permukaan bumi. Gelombang ini merambat lebih lambat dibandingkan gelombang badan, yaitu gelombang P dan gelombang S, dengan kecepatan yang umumnya berkisar antara 2–4,4 km/s di permukaan bumi (Rosyidi, 2013; Kiswiranti, 2019).



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

2.) Gelombang Rayleigh

Gelombang Rayleigh merupakan gelombang permukaan yang memiliki gerakan partikel berbentuk elips pada bidang vertikal searah dengan arah perambatan gelombang. Energi gelombang ini merambat di sepanjang permukaan bumi dengan amplitudo yang semakin berkurang seiring bertambahnya jarak dari sumber. Kecepatan gelombang Rayleigh umumnya berkisar antara 2–4,2 km/s di permukaan bumi (Rosyidi, 2013; Kiswiranti, 2019).



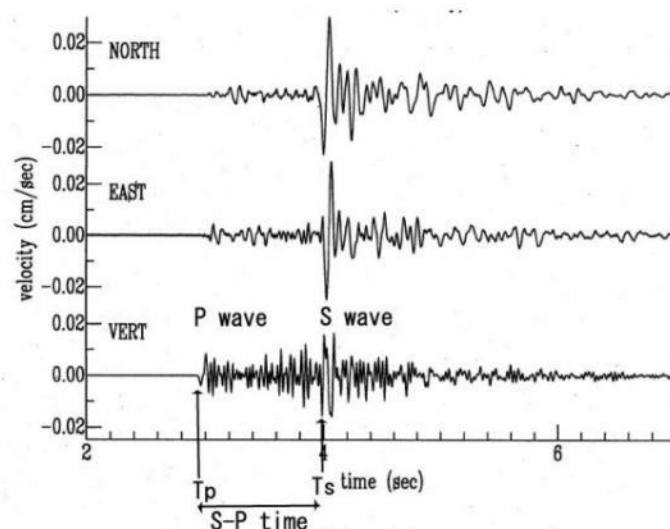
Gambar 11. Perambatan gelombang Rayleigh (Wahidah, dkk., 2021)

3.3. Metode *Microearthquake* (MEQ)

Metode *microearthquake* adalah metode geofisika pasif yang memanfaatkan gelombang seismik alami yang dihasilkan oleh aktivitas seismik berskala kecil di bawah permukaan bumi. Dalam sistem panas bumi, metode ini banyak digunakan untuk memantau aktivitas rekahan dan pergerakan fluida di dalam reservoir melalui kejadian gempa mikro. Menurut Haerudin dkk. (2019), gempa mikro memiliki karakteristik yang serupa dengan gempa bumi pada umumnya, namun dengan energi yang lebih kecil sehingga menghasilkan amplitudo gelombang yang rendah dan durasi sinyal yang relatif singkat.

Gempa mikro umumnya memiliki magnitudo kecil, yaitu kurang dari 3 M, serta didominasi oleh kandungan frekuensi yang lebih tinggi dibandingkan gempa tektonik regional. Frekuensi sinyal gempa mikro umumnya berada pada rentang beberapa Hertz hingga puluhan Hertz, tergantung kondisi medium batuan dan sumber gempanya. Karakteristik frekuensi yang relatif tinggi tersebut menyebabkan bentuk gelombang pada seismogram terlihat lebih rapat dengan durasi sinyal yang pendek. Metode ini prinsipnya merekam sinyal yang akan dibaca sebagai *event-event* seismik yang ada di suatu tempat (Halim dkk., 2020).

Data gelombang atau mikroseismik yang direkam oleh sensor selama pengukuran mikroseismik terdiri dari tiga komponen: dua komponen horizontal (utara-selatan dan timur-barat) dan satu komponen vertikal (kedalaman), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.



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

Metode gempa mikro (*micro-earthquake method*) banyak dimanfaatkan dalam pengembangan lapangan panas bumi, baik pada tahap eksplorasi maupun produksi. Pada tahap eksplorasi, metode ini digunakan untuk mengidentifikasi zona rekahan dan struktur geologi yang berpotensi menjadi jalur aliran fluida serta membantu menentukan area prospek dan lokasi pengeboran. Sementara itu, pada tahap produksi, pemantauan aktivitas mikroseismik dapat digunakan untuk mengevaluasi respons reservoir terhadap kegiatan produksi dan reinjeksi fluida. Informasi tersebut penting untuk memahami perubahan kondisi reservoir serta menjaga keberlanjutan produksi panas bumi (Hilyah, 2010).

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

- a. Pergeseran zona lemah akibat injeksi air dan peningkatan tekanan di dalam batuan.
- b. Perubahan temperatur akibat interaksi fluida reinjeksi dengan batuan panas yang menimbulkan perubahan tegangan termal pada batuan sehingga memicu pergerakan rekahan.
- c. Hilangnya tekanan pori akibat pori yang kosong karena ada aktivitas produksi fluida ke permukaan.

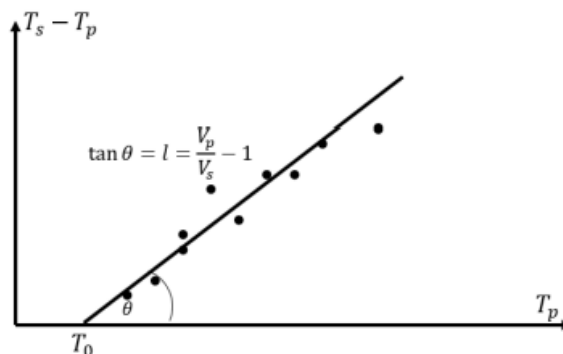
3.4. Parameter Sumber Gempa

Ketika gempa bumi terjadi, gempa tersebut menghasilkan data seismik yang ditampilkan dalam bentuk gelombang. Data gelombang mentah ini kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menentukan parameter sumber gempa. Parameter ini meliputi waktu kejadian, episenter, hiposenter, dan magnitudo (Sunarjo et al., 2012).

3.4.1. Waktu Asal Gempa (*Origin Time*)

Waktu asal (*origin time*) merupakan waktu terjadinya gempa pada sumbernya di bawah permukaan bumi yang dinyatakan dalam satuan tanggal dan waktu berdasarkan *Universal Coordinated Time* (UTC). Salah satu metode yang digunakan untuk menentukan waktu asal adalah Diagram Wadati, yaitu metode yang memanfaatkan hubungan antara waktu tiba gelombang P dan gelombang S dengan asumsi medium bawah permukaan bersifat homogen. Selain digunakan

untuk menentukan waktu asal gempa, Diagram Wadati juga dapat digunakan untuk memperoleh rasio kecepatan gelombang P terhadap gelombang S (V_p/V_s) yang diperlukan dalam analisis lokasi hiposenter.



Gambar 13. Diagram Wadati (Hurukawa, 2008)

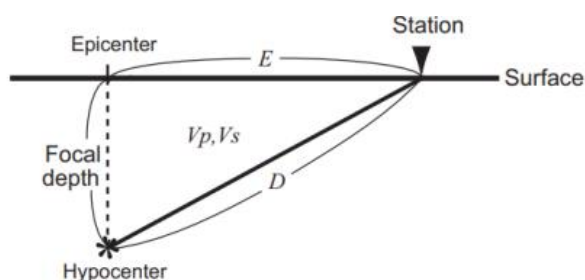
Sederhananya, dengan menggunakan diagram Wadati, waktu awal dapat ditentukan dari perpotongan garis T_p dengan garis $T_s - T_p$ sehingga *origin time* (T_0) dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut (Jannah dkk., 2016).

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

Nilai waktu asal (T_0) ini kemudian digunakan untuk menghitung hiposenter gempa bumi.

3.4.2. Hiposenter

Hiposenter merupakan titik sumber terjadinya gempa di bawah permukaan bumi yang menjadi lokasi awal pelepasan energi seismik. Posisi hiposenter dinyatakan dalam koordinat tiga dimensi yang meliputi lintang, bujur, dan kedalaman. Meskipun hiposenter sering direpresentasikan sebagai satu titik, pada kondisi sebenarnya sumber gempa dapat berupa suatu bidang atau zona rekahan yang mengalami pelepasan energi, dengan ukuran yang bergantung pada besar energi yang dilepaskan selama peristiwa gempa berlangsung (Jannah dkk., 2016)..



Gambar 14. Jarak Hiposenter (Hurukawa, 2008)

Jarak (D) dari hiposenter ke stasiun perekaman dapat dinyatakan dengan persamaan berikut..

$$\begin{aligned}
 D &= T_{p0} V_p \\
 D &= T_{s0} V_{s0} = (T_s - T_0) V_s \\
 D &= \{(T_s - T_p) + (T_p - T_0)\} V_s \\
 D &= (T_{sp} + T_{p0}) V_s
 \end{aligned} \tag{2}$$

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

3.4.3. Episenter

Episenter adalah titik di permukaan Bumi yang merupakan proyeksi tegak lurus dari hiposenter gempa bumi (Gambar 14). Lokasi episentrum dijelaskan dalam sistem koordinat geografis Kartesius atau bola dan dinyatakan dalam derajat bujur dan lintang (Haerudin, 2019).

3.4.4. Parameter Waktu Tiba Gelombang

Identifikasi *event* gempa mikro pada penelitian ini dilakukan berdasarkan parameter waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S yang terekam oleh jaringan seismograf PiGraf.

Dalam penelitian ini, parameter magnitudo tidak digunakan sebagai dasar identifikasi *event*. Hal ini disebabkan data rekaman PiGraf yang digunakan masih berupa satuan *count* (*digital count*) sehingga belum dilakukan konversi ke simpangan tanah (*ground displacement*), kecepatan partikel, maupun amplitudo terkalibrasi yang diperlukan dalam perhitungan magnitudo. Selain itu, pada proses penentuan lokasi menggunakan perangkat lunak GAD, parameter magnitudo bukan merupakan parameter utama yang memengaruhi solusi lokasi hiposenter. Nilai magnitudo yang digunakan dalam proses komputasi hanya berupa nilai asumsi awal (*default*) sebesar 2 yang berfungsi sebagai parameter pendukung dan tidak digunakan dalam analisis maupun interpretasi hasil penelitian.

Identifikasi event dalam penelitian ini didasarkan pada karakteristik waktu tiba gelombang P dan S yang terekam pada beberapa stasiun pengamatan. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Utama et al. (2021) yang menggunakan parameter selisih waktu tiba gelombang P dan S ($t_s - t_p \leq 3$ detik) serta

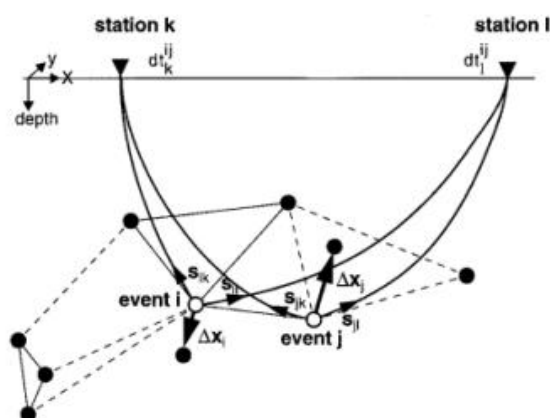
ketererekan event pada minimal tiga stasiun sebagai kriteria seleksi event gempa mikro sebelum dilakukan penentuan lokasi hiposenter.

Tabel 2. Parameter identifikasi *event* gempa mikro pada penelitian (modifikasi dari Utama, dkk., 2021)

Parameter	Kriteria
Gelombang P	Teridentifikasi jelas
Gelombang S	Teridentifikasi jelas
Selisih waktu S-P	≤ 3 detik
Jumlah stasiun	≥ 3 stasiun

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 menentukan lokasi hiposenter sesuai dengan kondisi tektonik, sehingga memberikan akurasi yang lebih besar (Waldhauser, 2001). Prinsip metode ini adalah jika jarak antara dua kejadian gempa bumi yang berpasangan relatif lebih kecil daripada jarak dari stasiun pengamatan ke masing-masing kejadian yang berpasangan, dapat diasumsikan bahwa jalur sinar dan bentuk gelombang dari kedua kejadian tersebut sama (Gambar 15). Berdasarkan asumsi ini, perbedaan waktu atau waktu residual antara dua gempa bumi yang tercatat di stasiun yang sama dapat dianggap sebagai fungsi dari jarak antara kedua hiposenter (Waldhauser dan Ellsworth, 2000).



Gambar 15. Ilustrasi algoritma metode *Double-Difference* (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

Gambar 15 menunjukkan lingkaran hitam dan putih yang mewakili distribusi hiposenter gempa bumi, yang dihubungkan dengan kejadian gempa bumi di sekitarnya melalui data korelasi silang (ditunjukkan oleh garis padat) atau data katalog (ditunjukkan oleh garis putus-putus). Gempa bumi i dan j yang ditunjukkan oleh lingkaran putih tercatat di stasiun yang sama (stasiun k dan stasiun l) dengan perbedaan waktu tempuh d_k^i dan d_l^i . Karena kedekatan kedua gempa bumi ini, jalur gelombangnya dianggap sama, yaitu melewati medium dengan kecepatan yang sama. Arah panah Δx_i dan Δx_j menunjukkan vektor relokasi gempa bumi yang akan terjadi.

Berdasarkan teori perambatan sinar, persamaan waktu kedatangan gelombang badan τ yang terkait dengan gempa bumi i dari stasiun k dapat didefinisikan sebagai integral lintasan (Waldhauser dan Ellsworth, 2000) :

$$\tau_k^i = \tau^i + \int_i^k u ds \quad (3)$$

Dimana τ^i adalah waktu kedatangan gempabumi i , u adalah medan kecepatan, dan ds adalah sebuah elemen panjang lintasan. Hubungan antara waktu kedatangan dan lokasi gempa bumi bersifat non-linier, sehingga ekspansi deret Taylor digunakan untuk melinierkan Persamaan (3). Ini menghasilkan residual gempa bumi yang secara linier menghubungkan waktu kedatangan yang diamati dengan waktu kedatangan teoritis τ_k^i yang sesuai dengan hiposenter dan parameter gempa bumi i :

$$r_k^i = \frac{\partial \tau_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i \quad (4)$$

Persamaan (4) adalah persamaan untuk gempabumi i yang tercatat di stasiun k . Dalam metode relokasi *Double-Difference* ini, persamaan ini terkait dengan gempa bumi lainnya.

Sementara itu, untuk gempabumi j yang diamati di stasiun k yaitu:

$$r_k^j = \frac{\partial \tau_k^j}{\partial x} \Delta x^j + \frac{\partial \tau_k^j}{\partial y} \Delta y^j + \frac{\partial \tau_k^j}{\partial z} \Delta z^j + \Delta \tau^j \quad (5)$$

Dengan demikian, perbedaan antara gempa bumi i dan gempa bumi j diperoleh sebagai berikut:

$$r_k^i = \frac{\partial \tau_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial \tau_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial \tau_k^j}{\partial x} \Delta x^j + \frac{\partial \tau_k^j}{\partial y} \Delta y^j + \frac{\partial \tau_k^j}{\partial z} \Delta z^j + \Delta \tau^j \quad (6)$$

Dengan asumsi bahwa gempa bumi terjadi berdekatan, jalur dari gempa bumi ke stasiun dianggap sama. Persamaan (6) mewakili perbedaan waktu kedatangan antara gempa bumi i dan j sehubungan dengan setiap parameter (x, y, z, t). Persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{obs} - (t_k^i - t_k^j)^{cal} \quad (7)$$

Dimana dr_k^{ij} adalah selanjutnya disebut sebagai persamaan *Double-Difference* dr_k^{ij} adalah selisih antara waktu kedatangan gelombang yang diamati dan waktu kedatangan yang dihitung pada gempa bumi i dan gempa bumi j .

Persamaan (7) kemudian dapat ditulis dalam bentuk :

$$\Delta d = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j \quad (8)$$

Persamaan (8) dapat ditulis menjadi:

$$\Delta d = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta t_k^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta t_k^j \quad (9)$$

Jika dinyatakan dalam bentuk matriks, maka persamaan tersebut akan menjadi:

$$\begin{pmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \dots \\ \Delta d_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x_1} & \frac{\partial t_1}{\partial y_1} & \frac{\partial t_1}{\partial z_1} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x_2} & \frac{\partial t_2}{\partial y_2} & \frac{\partial t_2}{\partial z_2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_n}{\partial x_n} & \frac{\partial t_n}{\partial y_n} & \frac{\partial t_n}{\partial z_n} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{pmatrix} \quad (10)$$

Atau

$$W \Delta d = W G \Delta m \quad (11)$$

Dimana Δd adalah matriks waktu residual berdimensi $M \times 1$. M dan G masing-masing adalah himpunan data observasi perbedaan ganda dan matriks Jacobi berdimensi $M \times 4N$, N dan Δm masing-masing adalah jumlah gempa bumi dan matriks perubahan model berdimensi $4N \times 1$, sedangkan W adalah matriks diagonal yang berfungsi sebagai faktor pembobotan dalam persamaan perhitungan waktu tempuh gelombang.

Proses inversi dilakukan secara iteratif hingga diperoleh nilai residual yang minimum. Iterasi tersebut bertujuan untuk menghasilkan posisi hiposenter yang lebih akurat dan lebih terfokus dibandingkan lokasi awal. Dalam metode *HypoDD*, event-event yang memiliki jarak berdekatan diasumsikan memiliki lintasan gelombang yang hampir sama menuju stasiun pengamatan, sehingga pengaruh kesalahan model kecepatan dapat dikurangi dan ketelitian relokasi hiposenter dapat ditingkatkan.

3.6. Sumur Injeksi dalam Sistem Panas Bumi

Sumur injeksi merupakan bagian penting dalam pengelolaan reservoir panas bumi. Fluida hasil produksi dari sumur produksi, baik berupa air panas maupun kondensat uap, umumnya tidak dibuang ke permukaan tetapi dikembalikan ke dalam reservoir melalui sumur injeksi. Proses ini disebut reinjeksi fluida dan bertujuan menjaga keseimbangan massa serta tekanan reservoir agar sistem panas bumi dapat berproduksi secara berkelanjutan (Saptadji, 2009). Secara fisik, injeksi fluida menyebabkan peningkatan tekanan pori (*pore pressure*) pada batuan reservoir. Dalam mekanika batuan, kondisi kestabilan rekahan atau sesar dikontrol oleh konsep tegasan efektif (*effective stress*) yang dirumuskan sebagai:

$$\sigma' = \sigma - P_f \quad (12)$$

Keterangan:

σ' : Tegasan efektif

σ : Tegasan total

P_f : Tekanan pori fluida

Ketika fluida diinjeksi, nilai P_f meningkat sehingga tegasan efektif σ' menurun. Penurunan tegasan efektif ini membuat bidang rekahan atau sesar menjadi lebih mudah mengalami pergerakan (*slip*), karena gaya gesek penahannya berkurang. Jika kondisi tegasan sudah mendekati batas kegagalan batuan, maka perubahan kecil pada tekanan pori dapat memicu pergerakan rekahan yang menghasilkan gempa mikro (Majer dkk., 2007). Selain itu, injeksi fluida juga menyebabkan terbentuknya *front* tekanan (*pressure front*) yang menyebar dari titik injeksi ke arah reservoir. Penyebaran tekanan ini tidak selalu isotropik, melainkan mengikuti jalur permeabilitas tinggi, yaitu rekahan dan sesar yang sudah ada sebelumnya.

Secara operasional, perubahan pola seismisitas mikro sering digunakan sebagai indikator respons reservoir terhadap injeksi. Jika setelah injeksi terjadi peningkatan jumlah gempa mikro di sekitar sumur injeksi atau pada kedalaman reservoir, hal tersebut menunjukkan bahwa injeksi memengaruhi kondisi mekanik batuan dan mengaktifasi struktur yang sudah ada.

3.7. Zona Rekahan Aktif pada Reservoir Panas Bumi

Zona rekahan aktif merupakan jaringan patahan atau rekahan yang masih responsif terhadap perubahan tegasan dan tekanan fluida sehingga berperan sebagai jalur utama aliran fluida hidrotermal dalam sistem panas bumi. Rekahan yang berkembang di bawah tekanan fluida memiliki permeabilitas yang jauh lebih tinggi dibanding pori antar butir batuan, sehingga zona rekahan sering kali menjadi konduktor dominan aliran fluida panas bumi yang menghubungkan sumber panas, reservoir, dan sumur produksi (Kurnianto, dkk., 2021). Rekahan yang saling berhubungan ini membentuk jaringan rekahan (*fracture network*) yang memungkinkan sirkulasi fluida panas bumi secara efektif, yang berpengaruh pada produktivitas reservoir dan kemampuan reservoir untuk mendukung produksi energi (Agung, dkk., 2021).

Indikator tidak langsung dari keberadaan zona rekahan aktif dapat diperoleh melalui distribusi hiposenter gempa mikro. Ketika tekanan fluida di reservoir berfluktuasi—misalnya akibat injeksi fluida atau ekstraksi—rekahan yang berada dalam kondisi mendekati kegagalan tegasan dapat mengalami deformasi kecil atau *slip*, sehingga menghasilkan gempa mikro (*microseismicity*). Pola distribusi hiposenter yang menunjukkan orientasi linier, bidang atau klaster tertentu sering diinterpretasikan sebagai geometri rekahan aktif bawah permukaan, yang sesuai dengan orientasi struktur geologi dan medan tegasan dominan di wilayah tersebut (Hilyah, 2010).

Secara mekanik, rekahan aktif umumnya berada pada orientasi yang konsisten dengan medan tegasan regional sehingga ketika tekanan fluida meningkat, gaya normal pada bidang rekahan berkurang dan potensi geseran menjadi lebih besar. Akibatnya, rekahan aktif lebih mudah mengalami gerakan kecil yang menghasilkan gempa mikro berulang pada zona yang sama, yang dapat dipantau dan direlokasi untuk memetakan struktur bawah permukaan dan jalur aliran fluida (Hilyah, 2010).

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu dan tempat penelitian ini adalah sebagai berikut.

Waktu : Desember 2025 – April 2026

Tempat : Laboratorium Instrumentasi Geofisika, Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung

Alamat : Gedung Teknik Geofisika – Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung, 35142.

Jadwal penelitian terlampir pada Tabel 3.

Tabel 3. Jadwal Kegiatan Penelitian

Kegiatan	Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur	■																							
Desain Akuisisi	■				■																			
Penyusunan Proposal	■		■		■		■																	
Bimbingan Proposal	■		■		■		■																	
Penelitian	■		■		■		■																	
Seminar Proposal	■		■		■		■																	
Persiapan Akuisisi Data	■				■																			
Akuisisi Data	■				■																			
Lapangan	■				■																			
Pengolahan Data	■				■																			
Analisis dan Interpretasi Data	■				■																			
Penyusunan Laporan Hasil	■				■																			
Bimbingan Seminar Hasil	■				■																			
Seminar Hasil	■				■																			
Bimbingan dan Fiksasi Laporan	■				■																			
Sidang Komprehensif	■				■																			

4.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4. Alat dan Bahan

No	Alat dan Bahan	Fungsi
1.	Seismograf PiGraf	Alat pengukur gempa mikro
2.	GPS	Alat <i>plotting</i> koordinat titik stasiun pengukuran
3.	Baterai	Digunakan sebagai sumber daya untuk seismograf
4.	Panel Surya	Digunakan sebagai sumber energi alternatif untuk mengisi daya baterai seismograf
5.	Selubung Pelindung Seismograf	Melindungi seismograf dari hujan, panas, debu, serta gangguan lingkungan lainnya agar data rekaman lebih stabil dan alat tetap aman.
6.	Laptop	Perangkat keras untuk pembuatan laporan dan pengolahan data
7.	GAD.exe	<i>Software</i> untuk penentuan episenter dan hiposenter gempa mikro
8.	HypoDD	<i>Software</i> untuk merelokasi episenter dan hiposenter gempa mikro
9.	Cygwin	<i>Software</i> untuk menjalankan program ph2dt dan hypoDD
10.	Notepad ++	<i>Software</i> untuk mengatur parameter program ph2dt.inp dan hypoDD.inp
11.	ArcGis 10.4	<i>Sotware</i> untuk pembuatan peta lokasi dan sebaran episenter MEQ
12.	Origin Pro	Perangkat lunak untuk membuat penampang distribusi hiposenter MEQ
13.	Peta Geologi	Data literatur informasi geologi daerah penelitian
14.	Data Gempa Mikro	Data hasil akuisisi menggunakan PiGraf

No.	Alat dan Bahan	Fungsi
15.	<i>Shapefile</i> RBI Kab. Tanggamus	Data informasi administrasi daerah penelitian
16.	Data DEM	Data topografi daerah penelitian
17.	Data lokasi sumur injeksi	Data informasi lokasi sumur injeksi di daerah penelitian

4.3. Prosedur Penelitian

Tahapan prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

4.3.1. Studi Literatur

Tahap awal penelitian dilakukan melalui studi literatur yang bertujuan membangun landasan teoritis serta memahami pendekatan metodologis yang relevan. Literatur yang dikaji meliputi konsep dasar sistem panas bumi, mekanisme terbentuknya gempa mikro pada reservoir, pengaruh injeksi fluida terhadap perubahan tekanan pori dan tegasan efektif batuan, serta teori mengenai rekahan dan permeabilitas reservoir. Selain itu, dipelajari pula prinsip dasar metode penentuan hiposenter gempa, termasuk metode *Geiger Adaptive Damping* (GAD) untuk penentuan lokasi awal gempa serta metode *double-difference* untuk relokasi hiposenter presisi tinggi. Studi juga mencakup penggunaan perangkat lunak seismologi seperti HypoDD, prinsip *picking* waktu tiba gelombang P dan S, serta teknik visualisasi spasial menggunakan ArcGIS dan Surfer.

4.3.2. Desain Akuisisi

Desain akuisisi dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi geologi dan operasional lapangan panas bumi. Penentuan lokasi stasiun seismik memperhatikan jarak terhadap sumur injeksi, cakupan area reservoir, serta kondisi topografi. Jaringan stasiun dirancang agar mampu mendeteksi gempa mikro dengan magnitudo kecil serta memungkinkan relokasi hiposenter secara akurat. Geometri jaringan yang baik akan meningkatkan resolusi spasial distribusi gempa mikro.

4.3.3. Akuisisi Data Lapangan

Pengambilan data seismik dilaksanakan di lapangan panas bumi Ulubelu, Tanggamus, Lampung, dengan memanfaatkan jaringan stasiun seismik portabel

berbasis PiGraf untuk merekam aktivitas gempa mikro. Sebelum pemasangan alat, dilakukan peninjauan lapangan guna menilai kondisi medan, karakter geologi permukaan, tingkat gangguan kebisingan, serta posisi relatif terhadap sumur injeksi dan zona reservoir. Hasil peninjauan tersebut digunakan sebagai dasar penentuan lokasi stasiun agar sebarannya mampu mewakili area penelitian dan mendukung ketelitian penentuan hiposenter. Seluruh kegiatan lapangan dilakukan dengan dukungan Tim Instrumentasi PiGraf Unila.

Sebelum proses perekaman dimulai, terlebih dahulu dilakukan instalasi seluruh stasiun PiGraf pada titik pengukuran yang telah ditentukan. Pada setiap stasiun, perangkat PiGraf ditempatkan di bawah permukaan tanah pada kedalaman sekitar 70 cm di dalam *casing* pelindung. *Casing* tersebut dirancang untuk melindungi instrumen dari rembesan air, perubahan kondisi cuaca, serta gangguan eksternal lainnya. Bagian dasar *casing* dibuat dari beton guna mempermudah proses *levelling* alat serta meningkatkan kualitas kopling antara sensor dan medium tanah, sehingga perambatan gelombang seismik menuju sensor dapat direkam secara lebih optimal. Setelah seluruh stasiun terpasang dan dipastikan berfungsi dengan baik, sistem perekaman kemudian dijalankan.



Gambar 16. *Casing* PiGraf

Akuisisi data dilakukan secara kontinu selama periode pengamatan lebih dari satu bulan. Skema perekaman berkelanjutan ini memungkinkan terekamnya kejadian gempa mikro alami maupun gempa mikro terinduksi yang berkaitan dengan dinamika reservoir dan aktivitas sumur injeksi. Data yang tersimpan pada masing-masing unit dikumpulkan secara berkala untuk memastikan kelengkapan rekaman serta menghindari kehilangan data. Setiap stasiun PiGraf juga dilengkapi dengan modem yang mendukung pengiriman data jarak jauh, sehingga pemantauan kondisi alat dan data dapat dilakukan secara lebih efisien. Selain itu, sistem catu daya utama menggunakan panel surya yang terhubung dengan baterai isi ulang, memungkinkan alat tetap beroperasi secara mandiri di lapangan tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal. Konfigurasi ini sangat penting untuk menjaga kontinuitas perekaman dan kestabilan sistem selama masa akuisisi berlangsung.



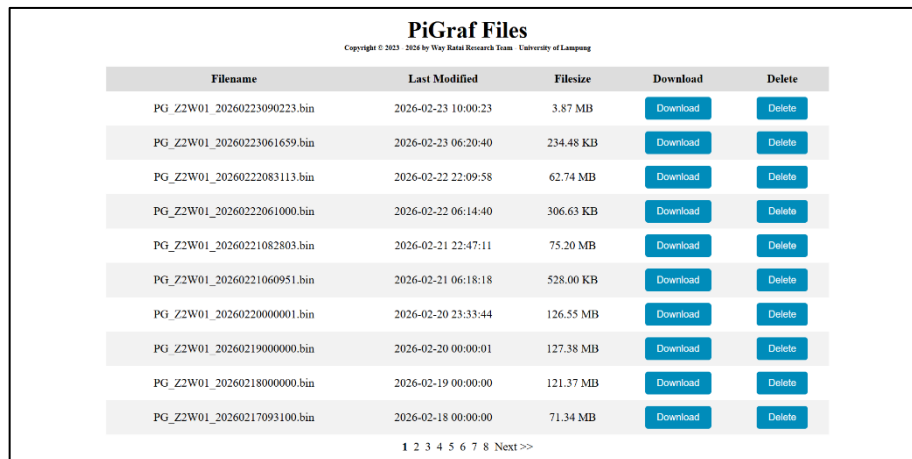
Gambar 17. Pemasangan stasiun PiGraf dengan panel surya

4.3.4. Pengolahan Data

Pengolahan data dimulai dengan identifikasi gempa mikro (MEQ) menggunakan seismogram, dilanjutkan dengan penentuan hiposenter dan relokasi hiposenter untuk mendapatkan lokasi yang lebih akurat. Langkah-langkah pengolahan data dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1.) Pengunduhan Data

Langkah pertama dalam pengolahan data untuk penelitian ini adalah mengunduh data. Data diakses melalui server PiGraf Local, yang berisi data yang direkam dari setiap stasiun. Berikut adalah contoh antarmuka server PiGraf Local (Gambar 18).

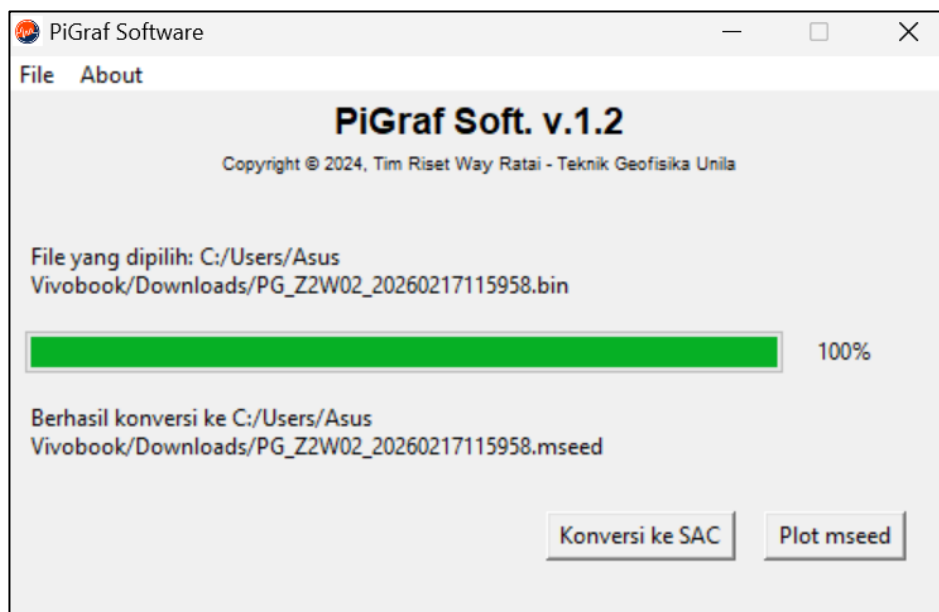


Filename	Last Modified	Filesize	Download	Delete
PG_Z2W01_20260223090223.bin	2026-02-23 10:00:23	3.87 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260223061659.bin	2026-02-23 06:20:40	234.48 KB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260222083113.bin	2026-02-22 22:09:58	62.74 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260222061000.bin	2026-02-22 06:14:40	306.63 KB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260221082803.bin	2026-02-21 22:47:11	75.20 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260221060951.bin	2026-02-21 06:18:18	528.00 KB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260220000001.bin	2026-02-20 23:33:44	126.55 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260219000000.bin	2026-02-20 00:00:01	127.38 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260218000000.bin	2026-02-19 00:00:00	121.37 MB	Download	Delete
PG_Z2W01_20260217093100.bin	2026-02-18 00:00:00	71.34 MB	Download	Delete

Gambar 18. Tampilan PiGraf *local server*

2.) Konversi Data *Waveform* .bin ke .mseed dan .sac

Data bentuk gelombang, yang sebelumnya dalam format .bin, dikonversi ke format mseed dan sac. Proses ini dilakukan menggunakan perangkat lunak PiGrafSoft.exe. Berikut adalah tangkapan layar dari layar beranda PiGrafSoft.exe (Gambar 19).



Gambar 19. Tampilan beranda *software* PiGrafSoft.exe

3.) Pemilihan *Event* dan *Picking* Waktu Tiba Gelombang P dan S

Data yang dikonversi menggunakan PiGraf kemudian diproses untuk memilih kejadian dan menentukan waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S. Pemilihan kejadian dilakukan secara manual dengan meninjau semua data bentuk gelombang dari keempat stasiun selama periode pengukuran satu minggu. Kejadian yang dipilih harus direkam oleh setidaknya 3 stasiun. Proses ini akan menghasilkan waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S, serta perbedaan waktu antara kedatangan gelombang P dan gelombang S untuk setiap kejadian yang direkam.

4.) Prinsip Penentuan Jarak dan Lokasi

Penentuan lokasi sumber gempa pada dasarnya dilakukan berdasarkan perbedaan waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S yang direkam oleh stasiun seismik. Selisih waktu tiba antara kedua gelombang tersebut digunakan sebagai informasi utama untuk memperkirakan jarak sumber gempa terhadap stasiun pencatat.

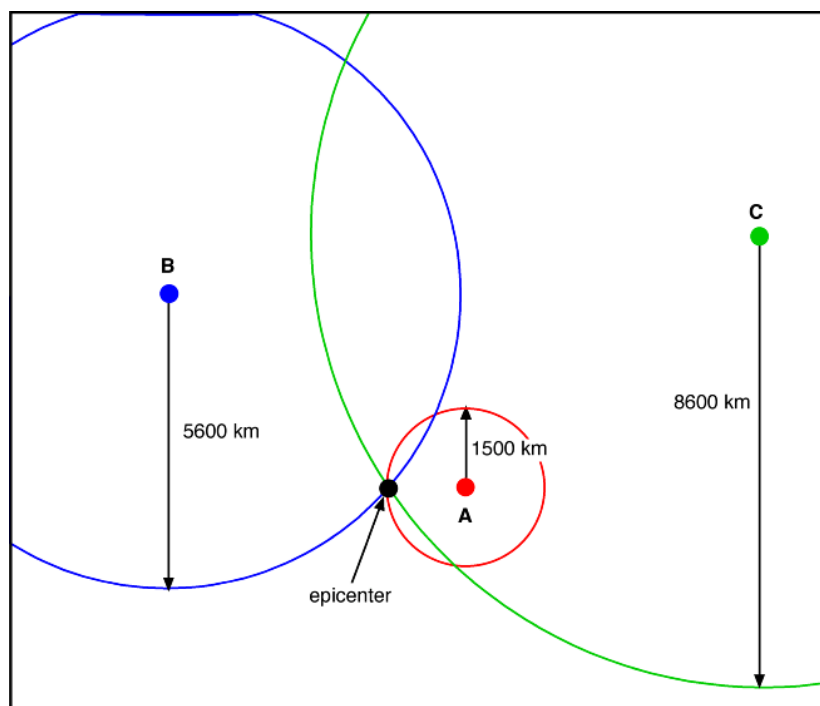
Pada tahap *picking* menggunakan perangkat lunak SeisGram2K, waktu tiba gelombang P dan S ditentukan pada setiap stasiun pengamatan. Perbedaan waktu tiba gelombang P dan S kemudian dihitung menggunakan Persamaan 14. Semakin besar nilai selisih waktu tiba gelombang P dan S, maka semakin jauh jarak sumber gempa terhadap stasiun pengamatan.

$$D = \frac{(t_s - t_p)V_p V_s}{V_p - V_s} \quad (13)$$

Dengan nilai D merupakan jarak antara sumber gempa dan stasiun pengamatan.

Gambar 20 menunjukkan prinsip dasar penentuan lokasi sumber gempa menggunakan metode triangulasi. Selisih waktu tiba gelombang P dan S pada setiap stasiun digunakan untuk memperkirakan jarak sumber gempa terhadap stasiun pengamatan. Jarak tersebut direpresentasikan sebagai lingkaran dengan radius tertentu, sehingga satu stasiun hanya memberikan informasi jarak tanpa menunjukkan arah sumber gempa. Dengan menggunakan beberapa stasiun, perpotongan lingkaran dari masing-masing stasiun menghasilkan estimasi lokasi episenter. Pada penelitian ini, prinsip triangulasi tersebut diterapkan secara numerik

menggunakan metode *Geiger Adaptive Damping* (GAD) yang memanfaatkan data waktu tiba gelombang P dan S dari seluruh stasiun untuk menentukan koordinat episenter dan hiposenter secara lebih akurat.



Gambar 20. Ilustrasi prinsip triangulasi lokasi sumber gempa menggunakan beberapa stasiun seismik.

Pada gambar terdapat tiga stasiun seismik: Stasiun A (merah), Stasiun B (biru), Stasiun C (hijau). Masing-masing stasiun merekam waktu tiba gelombang P dan S. Dari selisih waktu tiba tersebut diperoleh jarak sumber gempa terhadap masing-masing stasiun.

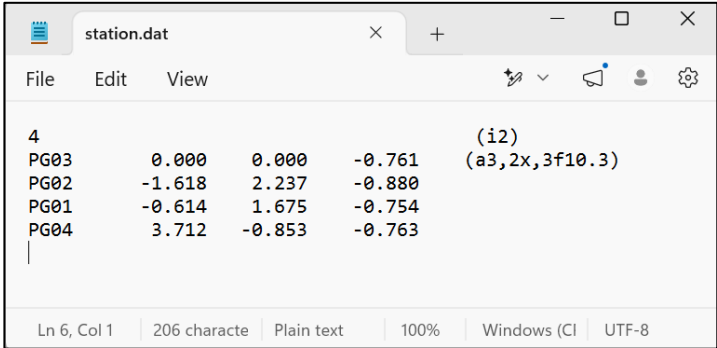
Karena stasiun hanya mengetahui jarak dan belum mengetahui arah, maka lokasi *event* dapat berada pada semua titik yang memiliki jarak sama terhadap stasiun tersebut. Oleh karena itu dibuat lingkaran dengan radius sesuai jarak hasil perhitungan.

- Lingkaran merah menunjukkan semua kemungkinan lokasi *event* terhadap stasiun A.
- Lingkaran biru menunjukkan semua kemungkinan lokasi *event* terhadap stasiun B.
- Lingkaran hijau menunjukkan semua kemungkinan lokasi *event* terhadap stasiun C.

Titik perpotongan ketiga lingkaran merupakan lokasi episenter yang paling mungkin.

5.) Penentuan Hiposenter Gempa Mikro dengan Metode GAD

Dalam penelitian ini, penentuan lokasi awal hiposenter gempa mikro dilakukan menggunakan metode *Geiger's Adaptive Damping* (GAD). Metode ini merupakan metode inversi lokasi gempa yang menggunakan pendekatan kuadrat terkecil (*least squares*) untuk meminimalkan selisih antara waktu tiba gelombang hasil observasi dan waktu tiba hasil perhitungan model. Proses penentuan hiposenter memerlukan tiga data utama, yaitu koordinat stasiun seismik, waktu tiba gelombang P dan S hasil *picking*, serta model kecepatan bawah permukaan. Berdasarkan data tersebut, GAD melakukan proses iterasi untuk memperoleh koordinat hiposenter dan waktu asal gempa (*origin time*) yang menghasilkan nilai residual minimum. Hasil lokasi hiposenter yang diperoleh dari metode GAD selanjutnya digunakan sebagai lokasi awal sebelum dilakukan proses relokasi menggunakan metode *Double-Difference* (HypoDD)..



```

4 (i2)
PG03 0.000 0.000 -0.761 (a3,2x,3f10.3)
PG02 -1.618 2.237 -0.880
PG01 -0.614 1.675 -0.754
PG04 3.712 -0.853 -0.763

```

Gambar 21. *File input* stasiun di *software* GAD

Selanjutnya, data yang berisi waktu kedatangan gelombang P dan S, yang sebelumnya diperoleh dari hasil seleksi. Data yang dibutuhkan—yaitu, tanggal, kode stasiun, dan waktu kedatangan gelombang P dan S—dapat dilihat pada Gambar 21.

```

arrival.dat
File Edit View
2602181640,PG1,06.357,+,I,07.492,I
2602181640,PG2,06.701,-,E,07.582,E
2602181640,PG3,06.220,+,E,07.165,I

2602181745,PG1,18.791,-,I,19.824,I
2602181745,PG2,18.654,+,E,19.556,E
2602181745,PG3,18.573,-,E,19.437,E

2602181826,PG1,01.506,-,I,02.309,I
2602181826,PG2,01.627,+,E,02.738,I
2602181826,PG3,00.759,-,I,01.240,E

2602181943,PG1,58.678,+,E,61.009,I
2602181943,PG2,59.121,-,I,61.554,I
2602181943,PG3,58.116,-,E,60.441,E

2602190517,PG1,33.082,-,I,34.552,I
2602190517,PG2,33.256,-,I,35.312,E
2602190517,PG3,32.748,+,I,33.779,E

2602191909,PG1,18.575,-,E,21.101,E
2602191909,PG2,18.675,+,I,21.351,E
2602191909,PG3,18.387,+,E,20.943,I

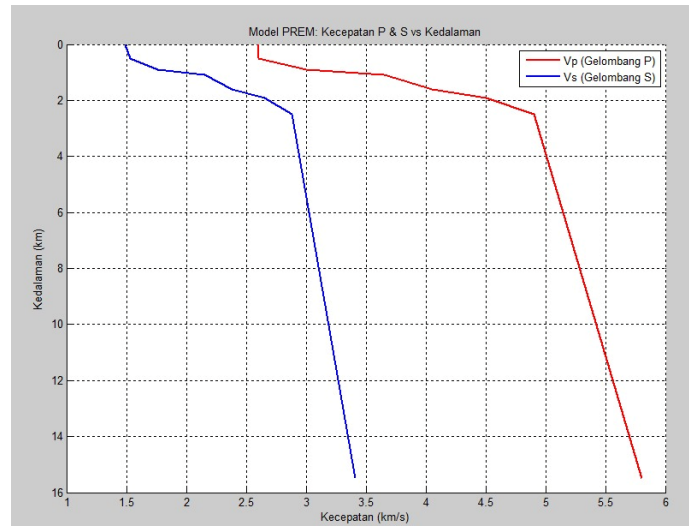
```

Gambar 22. *File input* data waktu tiba gelombang P dan S di *software* GAD

File input akhir, berisi data model kecepatan pada berbagai kedalaman. Dalam penelitian ini, model kecepatan yang digunakan diperoleh dari data model 1D PT. Pertamina Geothermal Energi Tbk (PGE).

Tabel 5. 1D V_p seismic velocity model

Kedalaman	Kedalaman	V_p (km/s)	V_s (km/s)
1	2000	2.4	1.37
2	600	2.6	1.49
3	0	2.6	1.49
4	-500	2.6	1.53
5	-900	3	1.76
6	-1100	3.65	2.15
7	-1600	4.05	2.38
8	-1900	4.5	2.65
9	-2500	4.9	2.88
10	-15500	5.8	3.41



Gambar 23. *Display* dari Tabel 5. *1D Vp seismic velocity model*, diturunkan dari Model PREM (*Preliminary Reference Earth Model*)

Model kecepatan 1D digunakan sebagai dasar untuk menentukan lokasi hiposenter menggunakan metode *Geiger's Adaptive Damping* (GAD). Meskipun waktu tiba gelombang P dan S telah diperoleh melalui proses pemilihan, informasi ini hanya menunjukkan waktu tiba gelombang di stasiun pengamatan dan belum dapat digunakan secara langsung untuk menentukan lokasi sumber gempa. Model kecepatan 1D digunakan untuk menghitung waktu tempuh gelombang dari hiposenter ke stasiun sehingga perbandingan dapat dilakukan antara waktu tiba yang diamati dan waktu tiba yang dihitung.

Dalam perangkat lunak GAD, format *file input* untuk model kecepatan terdiri dari jumlah lapisan kedalaman, nilai kedalaman, dan nilai Vp dan Vs untuk setiap lapisan kedalaman, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 23.

```

nzLayer      : 5
zLayer       : -0.6  0.5   0.9   1.1   1.6
VpL(nzLayer+1): 2.55  2.68  3.12  3.65  4.05
VsL(nzLayer+1): 1.471 1.532 1.764 2.151 2.381

```

Gambar 24. *File input velocity model* di *software* GAD

Output dari tahap identifikasi hiposenter dalam perangkat lunak GAD mencakup koordinat episenter, kedalaman hiposenter, dan waktu kejadian untuk setiap peristiwa, yang kemudian diplot untuk memvisualisasikan distribusinya.

6.) Relokasi Hiposenter Gempa Mikro dengan Metode HypoDD

Langkah-langkah untuk menentukan hiposenter menggunakan metode GAD akan menghasilkan posisi episenter dan hiposenter, serta waktu kejadian. Selanjutnya, relokasi dilakukan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat menggunakan metode hypoDD. Langkah pertama dalam proses relokasi ini adalah membuat katalog waktu kedatangan dan koordinat stasiun pengukuran. Gambar 24 di bawah ini menunjukkan contoh katalog waktu kedatangan untuk kejadian gempa mikro.

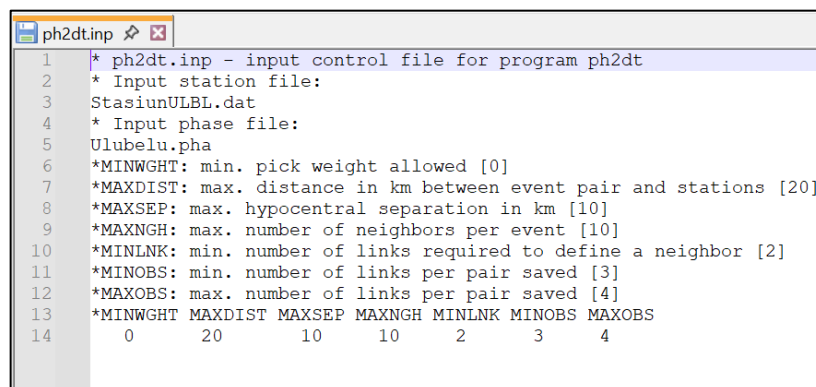
```

# 2026 03 10 14 46 47.345 -5.3296229 104.5713195 1.182 2 0.0 0.0 0.150 1
PG1 48.325 1 P
PG2 49.248 1 S
PG3 48.256 1 P
PG4 49.210 1 S
PG5 48.110 1 P
PG6 48.522 1 S
# 2026 03 11 10 27 00.571 -5.3442945 104.5823113 3.432 2 0.0 0.0 0.054 2
PG1 02.409 1 P
PG2 03.924 1 S
PG3 02.653 1 P
PG4 04.375 1 S
PG5 02.118 1 P
PG6 03.143 1 S
PG7 02.360 1 P
PG8 03.698 1 S
# 2026 03 11 11 15 40.684 -5.3394630 104.5946704 3.827 2 0.0 0.0 0.215 3
PG1 42.833 1 P
PG2 44.122 1 S
PG3 42.787 1 P
PG4 44.403 1 S
PG5 42.643 1 P
PG6 43.254 1 S
PG7 41.897 1 P
PG8 43.555 1 S
# 2026 03 12 16 05 56.308 -5.2938549 104.5728513 1.404 2 0.0 0.0 0.288 4
PG1 57.575 1 P
PG2 59.971 1 S
PG3 57.330 1 P
PG4 58.063 1 S
PG5 58.219 1 P
PG6 59.576 1 S
PG7 58.261 1 P
PG8 59.847 1 S
# 2026 03 13 13 50 45.114 -5.3231917 104.5724069 4.500 2 0.0 0.0 0.161 5
PG1 46.892 1 P
PG2 48.657 1 S
PG3 46.825 1 P
PG4 49.244 1 S
  
```

Gambar 25. Katalog *arrival time*

Katalog waktu kedatangan (Gambar 24) berfungsi sebagai *input* untuk proses pengelompokan dalam program ph2dt. Proses ini melibatkan pembentukan dan pengelompokan gempa mikro yang berkorelasi. Proses ini dilakukan dalam program ph2dt dengan memuat data stasiun (.dat) dan data waktu kedatangan (.pha) ke dalam *file* ph2dt.inp (Gambar 25). Ada beberapa parameter yang harus dimasukkan dalam *file* ph2dt.inp, yaitu MINWGHT (bobot seleksi minimum), MAXDIST (jarak maksimum antara pasangan kejadian dan stasiun), MAXSEP (pemisahan hiposenter maksimum antara pasangan kejadian dalam km), MAXNGH (jumlah maksimum kejadian gempa dalam satu pasangan), MINLNK (jumlah minimum kejadian yang akan didefinisikan sebagai pasangan), MINOBS

(jumlah minimum stasiun yang mencatat suatu kejadian), dan MAXOBS (jumlah maksimum stasiun yang mencatat suatu kejadian).



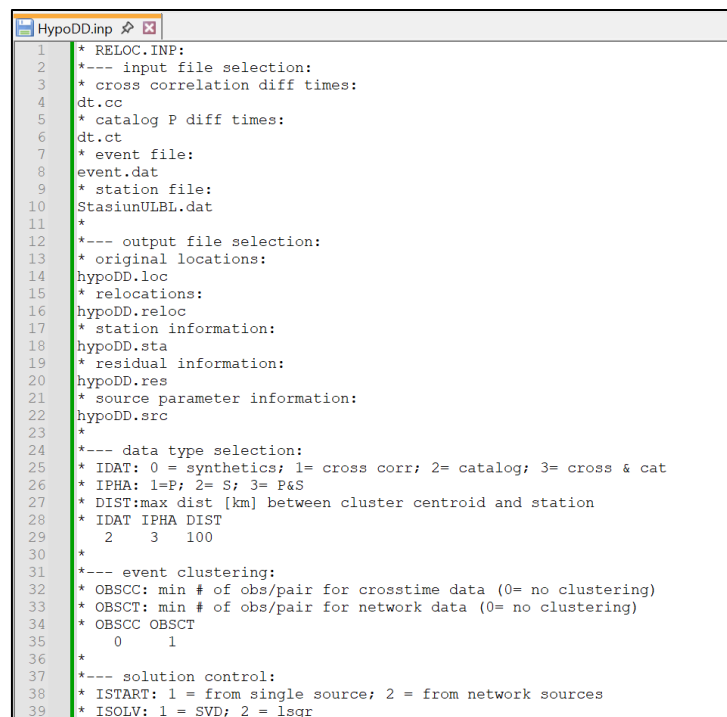
```

1 * ph2dt.inp - input control file for program ph2dt
2 * Input station file:
3 StasiunULBL.dat
4 * Input phase file:
5 Ulubelu.pha
6 *MINWGHT: min. pick weight allowed [0]
7 *MAXDIST: max. distance in km between event pair and stations [20]
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 [2]
11 *MINOBS: min. number of links per pair saved [3]
12 *MAXOBS: max. number of links per pair saved [4]
13 *MINWGHT MAXDIST MAXSEP MAXNGH MINLNK MINOBS MAXOBS
14 0 20 10 10 2 3 4

```

Gambar 26. Tampilan program ph2dt.inp

Output dari proses ini terdiri dari data diferensial dan data absolut. Data diferensial terdiri dari data dt.ct (data waktu tempuh gempa bumi yang berkorelasi yang direkam di stasiun yang sama). Sementara itu, data absolut terdiri dari even.dat (informasi parameter gempa bumi yang diproses di ph2dt), event.sel, station.sel, dan ph2dt.log (laporan hasil pemrosesan ph2dt), yang digunakan sebagai *input* untuk program hypoDD.inp (Gambar 26).



```

1 * RELOC.INP:
2 *--- input file selection:
3 * cross correlation diff times:
4 dt.cc
5 * catalog P diff times:
6 dt.ct
7 * event file:
8 event.dat
9 * station file:
10 StasiunULBL.dat
11 *
12 *--- output file selection:
13 * original locations:
14 hypoDD.loc
15 * relocations:
16 hypoDD.reloc
17 * station information:
18 hypoDD.sta
19 * residual information:
20 hypoDD.res
21 * source parameter information:
22 hypoDD.src
23 *
24 *--- data type selection:
25 * IDAT: 0 = synthetics; 1= cross corr; 2= catalog; 3= cross & cat
26 * IPHA: 1=P; 2= S; 3= P&S
27 * DIST:max dist [km] between cluster centroid and station
28 * IDAT IPHA DIST
29 2 3 100
30 *
31 *--- event clustering:
32 * OBSCC: min # of obs/pair for crosstime data (0= no clustering)
33 * OBSCT: min # of obs/pair for network data (0= no clustering)
34 * OBSCC OBSCT
35 0 1
36 *
37 *--- solution control:
38 * ISTART: 1 = from single source; 2 = from network sources
39 * ISOLV: 1 = SVD; 2 = lsqr

```

Gambar 27. Tampilan program hypoDD.inp

Program hypoDD.inp menghasilkan empat *file* keluaran: hypoDD.loc (data hiposenter sebelum relokasi), hypoDD.reloc (data hiposenter setelah relokasi), hypoDD.sta (data residual stasiun dan jumlah fase yang direkam oleh setiap stasiun), dan hypoDD.res (data residual waktu tempuh yang diperoleh dari perhitungan pada iterasi terakhir).

7.) *Plotting* Sebaran Hiposenter Menggunakan ArcGIS dan Surfer

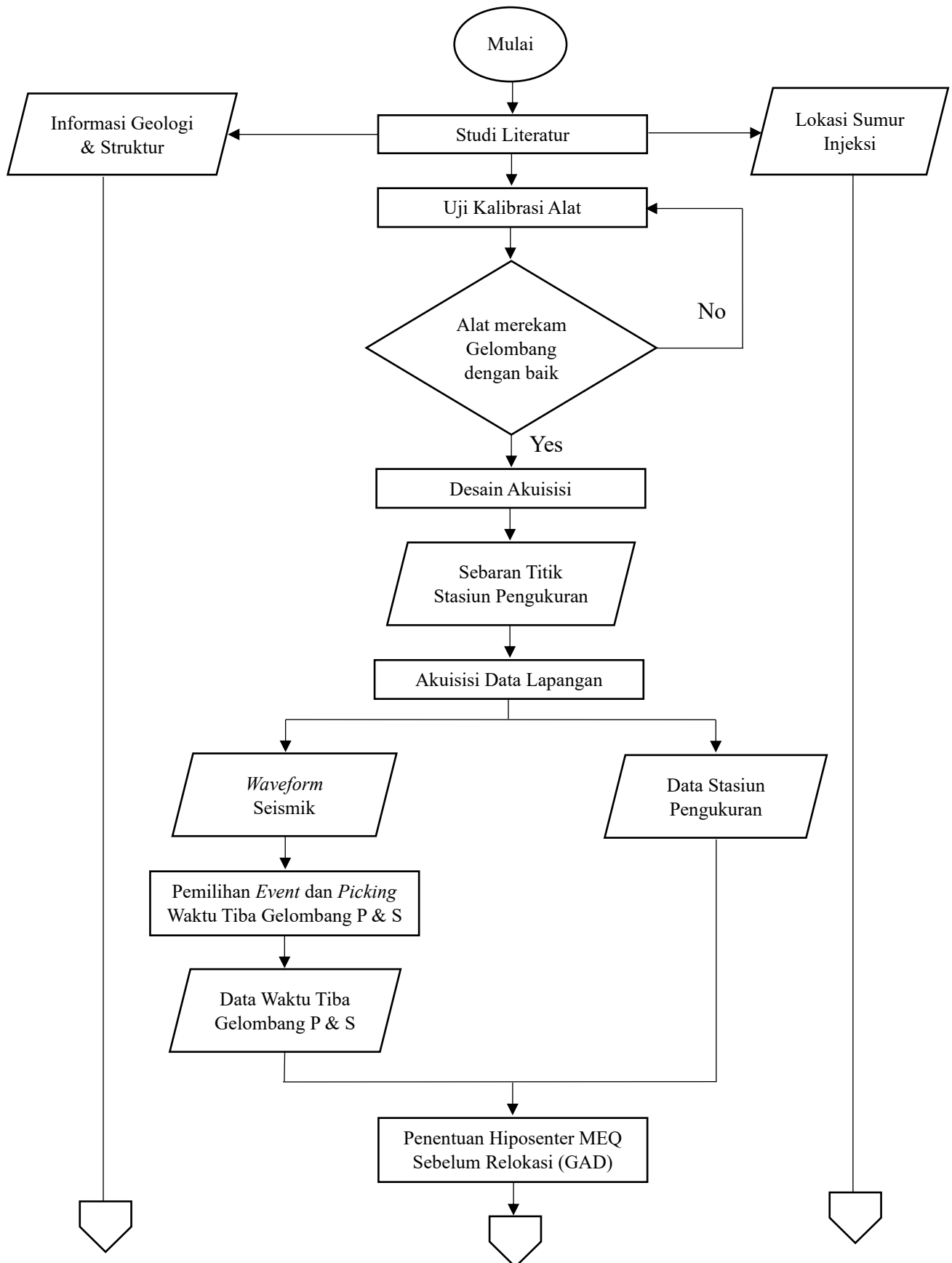
Berdasarkan pengolahan data, koordinat episenter dan kedalaman hiposenter sebelum dan sesudah relokasi akan dihasilkan. Data ini kemudian diplot dalam perangkat lunak ArcGIS, diikuti dengan pembuatan penampang spesifik di Surfer untuk mendapatkan penampang distribusi kedalaman hiposenter. Koordinat hiposenter diplot pada peta dan penampang menggunakan ArcGIS dan Surfer. Visualisasi ini digunakan untuk mengamati pola distribusi spasial gempa mikro relatif terhadap sumur injeksi.

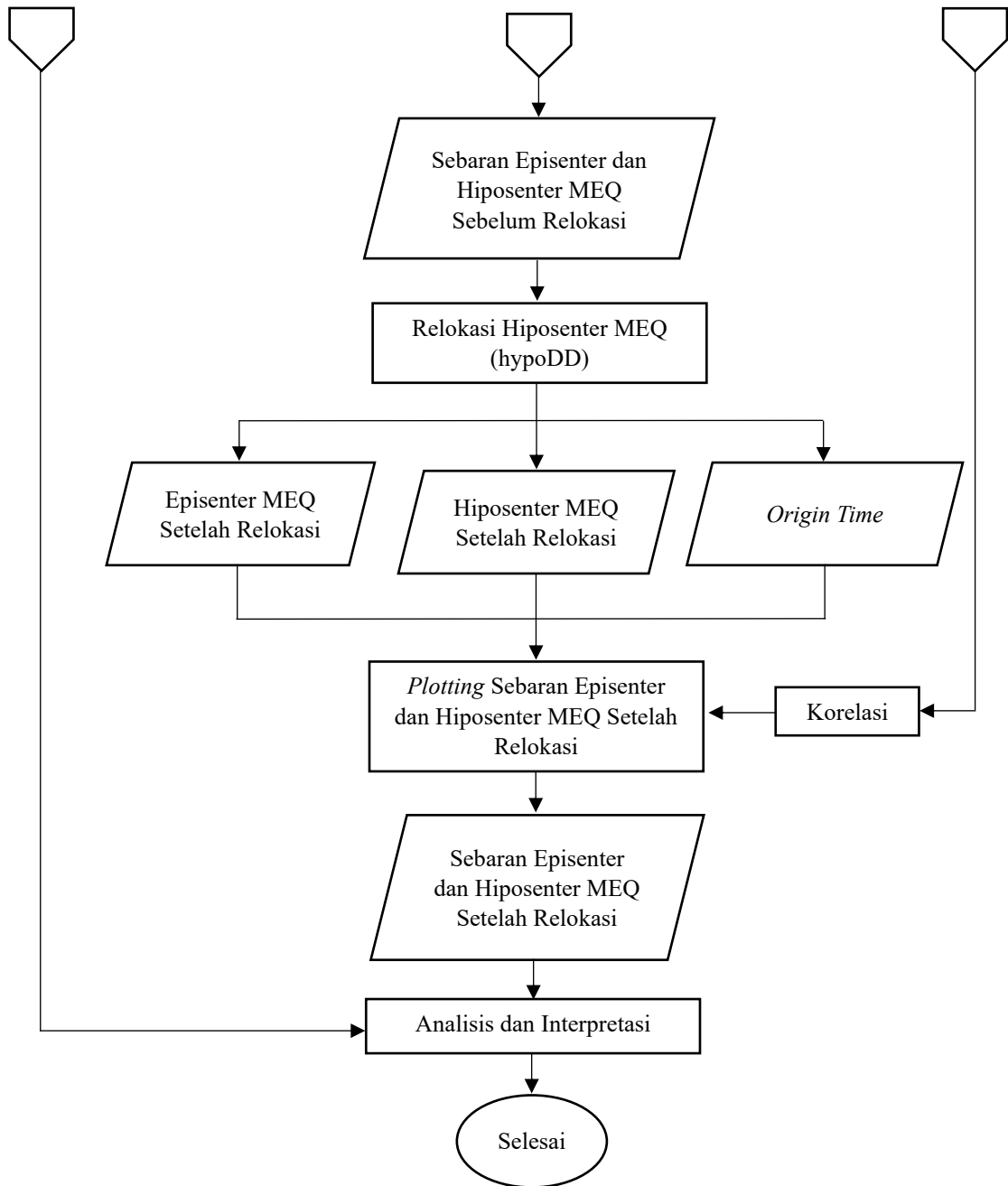
4.3.5. Analisis dan Interpretasi Data

Analisis dilakukan dengan mengamati pola sebaran hiposenter setelah relokasi. Klaster gempa yang terkonsentrasi di sekitar sumur injeksi menunjukkan respons reservoir terhadap perubahan tekanan fluida. Pola linier hiposenter diinterpretasikan sebagai zona rekahan aktif. Interpretasi juga mempertimbangkan kedalaman gempa, arah penyebaran klaster, dan densitas kejadian gempa sebagai indikator jalur aliran fluida dan zona permeabilitas tinggi. Hasil analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi zona reservoir yang aktif secara hidrolik serta memahami dinamika sistem panas bumi akibat aktivitas injeksi.

4.4. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini adalah sebagai berikut.





Gambar 28. Diagram Alir Penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data gempa mikro (MEQ) di Lapangan Panas Bumi Ulubelu menggunakan metode *Double-Difference* (*HypoDD*), diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode *Double-Difference* berhasil meningkatkan ketelitian lokasi hiposenter gempa mikro dibandingkan metode GAD. Dari 83 *event* yang teridentifikasi, sebanyak 70 *event* berhasil direlokasi sehingga distribusi hiposenter menjadi lebih terfokus dan menunjukkan indikasi zona rekahan aktif di bawah permukaan Lapangan Panas Bumi Ulubelu.
2. Sebaran hiposenter hasil relokasi menunjukkan keterkaitan dengan aktivitas sumur injeksi, terutama di sekitar Cluster F pada kedalaman 0,5–1,5 km. Kondisi ini mengindikasikan bahwa aktivitas reinjeksi fluida berpotensi memicu gempa mikro melalui peningkatan tekanan pori pada zona permeabel.
3. Distribusi episenter dan hiposenter mengikuti arah struktur dominan NW–SE dan SW–NE, serta mengindikasikan keberadaan zona rekahan aktif yang berperan sebagai jalur migrasi fluida reservoir panas bumi di Lapangan Ulubelu.

6.2. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jaringan stasiun seismik yang lebih rapat dan merata serta instrumen dengan kualitas perekaman yang lebih stabil untuk meningkatkan ketelitian hasil lokasi hiposenter. Analisis juga dapat dikembangkan dengan memanfaatkan data *time series* aktivitas reinjeksi fluida sehingga hubungan antara perubahan laju injeksi dan aktivitas gempa mikro dapat dipahami secara lebih mendalam.

DAFTAR PUSTAKA

- Agung, Y. Z., Haryanto, A. D., Hardiyono, A., Setiawan, D. I., & Suleman, W. A. (2021). High Permeability Zone On Geothermal Manifestations Using Fault Fracture Density In Sembalun Area, Lombok. *Journal of Geological Sciences and Applied Geology*, 5(2), 24-30. doi: <https://doi.org/10.24198/gstag.v5i2.34937>
- Amin, T. C., Sidarto, S., Santosa, & Gunawan, W. (1994). *Geologi lembar Kotaagung, Sumatera*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Amiruddin, A., Suharno, & Karyanto. (2019). Desain dan Realisasi Accelerometer Berbasis Arduino sebagai Instrumen Pendeteksi Mikrotremor. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 162-173.
- Armi, R., & Santosa, B. J. (2014). Reservoir Lapangan Panas Bumi Wayang Windu dengan Metode Inversi Tomografi dari Data Microearthquake (Studi Kasus: Kawasan Gunung Wayang Windu). *Jurnal Teknik Pomits*, 1-8.
- Barber, A. J., Crow, M. J., & Milsom, J. (2005). *Sumatra: Geology, Resources, and Tectonic Evolution*. London: The Geology Society.
- Danusaputro, H. (2005). The Reservoir of The Rendingan-Ulubelu-Waypanas Geothermal System. *Berkala Fisika*, 69-74.
- Gentana, D., Sulaksana, N., Sukiyah, E., & Yuningsih, E. T. (2019). Morphotectonics of Mount Rendingan Area Related to the Appearances of Geothermal Surface Manifestations. *Indonesian Journal on Geoscience*, 291-309.
- Goff, F., & Janik. (2000). *Encyclopedia of volcanoes: Geothermal system*. Amerika Serikat: Academic Press: A Harcourt Science and Technology Company.
- Haerudin, N., Alami, F., & Rustadi. (2019). *Mikroseismik, Mikrotremor Microearthquake dalam Ilmu Kebumihan*. Bandar Lampung: Pusaka Media.

- Halim, G. R., Utama, W., & Mariyanto, M. (2020). Uji Lokasi Hiposenter Mikroearthquake (MEQ) dengan Metode Inversi Simulated Annealing pada Lapangan Panasbumi "XX.". *Jurnal Geosaintek*, 6(2), 71-76.
- Hendrasto, F., Hutasoit, L., Kusuma, S. B., & Sapiie, B. (2018). Penerapan Model NRECA pada Daerah Resapan Lapangan Panasbumi Wayang Windu, Jawa Barat. *Riset Geologi dan Pertambangan*, 28.
- Hijriani, A., Sahara, D. P., Nugraha, A. D., Ramadhan, I., & Sidik, R. P. (2017). Peningkatan Akurasi Lokasi Gempa Mikro Dengan Menggunakan Metoda Double-Difference Dan Korelasi Silang Master Waveform. *Jurnal Geofisika*, 15(3), 21-25. doi: <http://dx.doi.org/10.36435/jgf.v15i1.33>
- Hilyah, A. (2010). Studi Gempa Mikro Untuk Mendeteksi Rekahan di Area Panasbumi Kamojang Kabupaten Garut. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 6(2).
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2008). History of Geothermal Exploration in Indonesia from 1970 to 2000. *Geothermics*, 37, 220-226.
- Hurukawa, N. (2008). *Practical Analyses of Local Earthquakes*. Tsukuba: International Institute of Seismology and Earthquake Engineering.
- Jannah, I. N., Anggono, T., & 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, Mazzaluna, H. P., Darmawan, I. B., Wibowo, R. C., Zaenudin, A., & Hermana, M. (2025). Mapping Rayleigh Wave Group Velocities from Ambient Noise in the Way Ratai Geothermal Field Using PiGraf Seismograph Prototypes. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin* 40(2), 1-14. doi: <https://doi.org/10.17794/rgn.2025.2.1>
- Kayal, J. R. (2008). *Microearthquake Seismology and Seismotectonics of South Asia*. New Delhi: Springer Dordrecht. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8180-4>
- Kiswiranti, D. (2019). *Seismologi (Dasar-Dasar Seismologi dan Aplikasinya)*. Yogyakarta: Institut Sains dan Teknologi AKPRIND Yogyakarta.

- Kurnianto, B., Yudiantoro, D. F., & Ratnaningsih, D. R. (2021). Identifikasi Daerah Prospek Panas Bumi Berdasarkan Analisis Kelurusan dan Fault Fracture Density (FFD) Lapangan Panas Bumi Gunung Unggaran Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Ilmiah Geologi PANGEA*, 8(2), 65-71. doi: <https://doi.org/10.31315/jigp.v8i2.9648>
- Majer, E. L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., & Asanuma, H. (2007). Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics*, 36(3), 185-222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.03.003>
- Mangga, A. S., Amir, H., & Suwarti, T. (1994). *Peta Geologi Lembar Tanjung Karang, Sumatera*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Margaliu, A. S. (2020). Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro Untuk Menentukan Zona Aktif Lapangan Panasbumi Way Ratai Menggunakan PiGraf. *Skripsi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Masdjuk, M. (1990). *Laporan Geologi Daerah Way Panas dan Ulubelu, Lampung Selatan*. Jakarta: Divisi Panas Bumi Pertamina.
- Maulida, N. H. (2016). Inversi Tomografi dan Sebaran Poisson's Ratio Gempa Mikro Pada Lapangan Panas bumi Brady's Hot Spring, Nevada. *Skripsi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Muhlis, M. (2018). *Relokasi Hiposenter Gempabumi Menggunakan Metode Double-Difference di Daerah (Cianjur-Sukabumi)*. Jakarta: UIN Syarif Hidayatullah.
- Rahmaningtyas, N. I., Utama, W., & Lestari, W. (2020). Analisis Sumber Gempa Mikro Melalui Distribusi Lokasi Hiposenter Menggunakan Metode *Double-Difference* Pada Lapangan Panas Bumi "X". *Jurnal Geosaintek*, 6(1), 33-42. doi: <http://dx.doi.org/10.12962/j25023659.v6i1.6549>
- Rosyidi, S. P. (2013). *Metode Analisis Gelombang Permukaan Untuk Penyelidikan Sub-Permukaan*. Yogyakarta: LP3M UMY.
- Rybach, L., & Muffler, L. (1981). *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*. Amerika Serikat: John Willey and Sons Ltd.
- Saptadji, N. M. (2001). *Teknik Panas Bumi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

- Saptadji, N. M. (2009). *Karakteristik Reservoir Panas Bumi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Setyaningsih. (2017). Relokasi Hiposenter Gempabumi Mikro di Lapangan Panas Bumi Wayang Windu Menggunakan Metode *Double-Difference*. *Skripsi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Sieh, K., & Natawidjaja, D. (2000). Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B12), 28295-28326. doi: <https://doi.org/10.1029/2000JB900120>
- Suharno. (2013). *Eksplorasi Geothermal*. Bandar Lampung: Lembaga Penelitian Universitas Lampung.
- Suharno. (2013). Reservoir review of the Rendingan-Ulubelu-Waypanas (RUW) geothermal field, Lampung, Indonesia. *Geothermal Resources Council (GRC) Transactions*, 471-477.
- Suharno, & Browne, P. R. (2000). Subsurface Hydrothermal Alteration at the Ulubelu Geothermal Field, Lampung, Southern Sumatra Indonesia. *Proceedings Twenty-fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University.
- Sunarjo, S., Gunawan, M. T., & Pribadi, S. (2012). *Gempabumi Edisi Populer*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Utama, W., Warnana, D. D., & Garini, S. A. (2021). Identification of Micro-Earthquake Hypocenters using Geiger and Coupled Velocity-Hypocenters Methods. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, 350 – 355.
- Wahidah, W., Lepong, P., & 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., & 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.

White, D. E. (1967). Some Principle of Geyser Activity, Mainly From Steambot Springs, Nevada. *American Journal of Science*, 641-684.

Wijayanti, M. D. (2023). *Energi Panas Bumi*. Jakarta: Bumi Aksara.