

**IDENTIFIKASI ZONA POTENSI RESERVOIR PANASBUMI  
PADA LAPANGAN “MA” BERDASARKAN ANALISIS  
MULTIATRIBUT METODE *LOW FREQUENCY PASSIVE*  
*SEISMIC***

(Skripsi)

Oleh

**Siti Mahmudah  
2215051074**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG**

**2026**

**IDENTIFIKASI ZONA POTENSI RESERVOIR PANASBUMI PADA  
LAPANGAN “MA” BERDASARKAN ANALISIS MULTIATRIBUT  
METODE *LOW FREQUENCY PASSIVE SEISMIC***

**Oleh**

**Siti Mahmudah**

**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 POTENSI RESERVOIR PANASBUMI PADA LAPANGAN “MA” BERDASARKAN ANALISIS MULTIATRIBUT METODE *LOW FREQUENCY PASSIVE SEISMIC*

Oleh

**Siti Mahmudah**

Energi listrik di Indonesia sebagian besar berasal dari energi fosil, seperti batubara. Peralihan energi fosil menuju energi terbarukan di Indonesia ditargetkan mencapai 19-22% pada tahun 2030. Pengembangan lapangan panasbumi dapat mendukung transisi energi bersih di Indonesia, sebagai sumber energi listrik. Penggunaan metode geofisika dapat digunakan dalam pengembangan lapangan panasbumi. Salah satunya adalah dengan memanfaatkan metode seismik pasif untuk mengetahui keberadaan reservoir panasbumi. Penelitian dilakukan untuk mengidentifikasi zona potensi keberadaan fluida reservoir panasbumi pada Lapangan “MA”. Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan metode *Low Frequency Passive Seismic*. Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data seismik pasif *time series* yang direkam dengan seismometer 3 komponen, yaitu komponen vertikal, komponen horizontal utara-selatan, dan komponen horizontal timur-barat. Atribut LFPS yang digunakan untuk memetakan zona potensi reservoir meliputi amplitudo *power spectral density* (PSD-Z), frekuensi PSD-Z, dan nilai VH rasio. Berdasarkan hasil atribut LFPS, zona potensi reservoir diidentifikasi memiliki nilai amplitudo PSD-Z rendah yaitu 0-200 kJ, frekuensi PSD-Z 0,9-2 Hz, dan nilai VH rasio  $>0,6$ . Pemetaan spasial atribut LFPS menunjukkan bahwa zona potensi reservoir berada di bagian timur dan barat daerah penelitian. Dengan demikian, metode LFPS dapat diterapkan dalam proses eksplorasi lapangan panasbumi dengan beberapa penyesuaian.

Kata kunci: *Low Frequency Passive Seismic*, Panasbumi, *Power Spectral Density*, Reservoir, V/H Rasio

## **ABSTRACT**

### **IDENTIFICATION OF POTENTIAL GEOTHERMAL RESERVOIR ZONES IN “MA” FIELD BASED ON MULTIATTRIBUTE ANALYSIS USING THE LOW FREQUENCY PASSIVE SEISMIC METHOD**

By

**Siti Mahmudah**

*Electricity in Indonesia is primarily generated from fossil fuels, such as coal. The transition from fossil fuels to renewable energy in Indonesia is targeted to reach 19–22% by 2030. The development of geothermal fields can support Indonesia's clean energy transition as a source of electricity. Geophysical methods can be utilized in geothermal field development. One such method is the use of passive seismic techniques to identify the presence of geothermal reservoirs. This study was conducted to identify potential zones for geothermal reservoir fluids in the “MA” Field. The research employed a Low Frequency Passive Seismic (LFPS) approach. The data used in this study consists of passive seismic time-series data recorded using a three-component seismometer, namely the vertical component, the north-south horizontal component, and the east-west horizontal component. The LFPS attributes used to map potential reservoir zones include power spectral density amplitude (PSD-Z), PSD-Z frequency, and the VH ratio. Based on the LFPS attribute results, potential reservoir zones were identified as having low PSD-Z amplitude values of 0–200 kJ, PSD-Z frequencies of 0.9–2 Hz, and VH ratio values >0.6. Spatial mapping of the LFPS attributes indicates that potential reservoir zones are located in the eastern and western parts of the study area. Thus, the LFPS method can be applied in the geothermal field exploration process with some adjustments.*

*Keywords: Low Frequency Passive Seismic, Geothermal, Power Spectral Density, Reservoir, V/H Ratio*

Judul Skripsi : **Identifikasi Zona Potensi Reservoir Panasbumi Pada Lapangan “MA” Berdasarkan Analisis Multiatribut Metode *Low Frequency Passive Seismic***

Nama Mahasiswa : **Siti Mahmudah**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2215051074**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

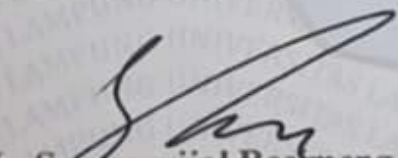
Fakultas : **Teknik**

**MENYETUJUI,**

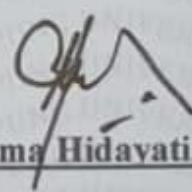
1. Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

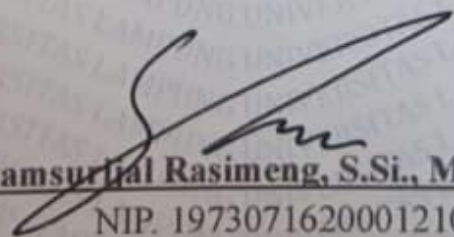
  
Dr. Ir. Syamsurrijal Rasimeng, S.Si., M.Si.,  
C.EIA., IPM.

NIP. 197307162000121002

  
Ir. Akroma Hidavatika, S.T.,  
M.Eng.

NIP. 19900802019032014

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

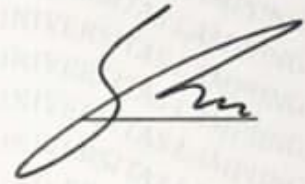
  
Dr. Ir. Syamsurrijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM.

NIP. 197307162000121002

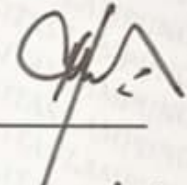
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

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



Sekretaris : **Ir. Akroma Hidayatika, S.T., M.Eng.**



Anggota : **Prof. Ir. Drs. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.,  
IPU., ASEAN Eng.**



2. Dekan Fakultas Teknik



**Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**  
NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 08 Mei 2026

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Identifikasi Zona Potensi Reservoir Panasbumi Pada Lapangan “MA” Berdasarkan Analisis Multiatribut Metode *Low Frequency Passive Seismic*” adalah benar hasil karya intelektual mandiri yang berdasarkan pengetahuan dan data yang telah saya dapatkan. Karya ini tidak berisi material yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil plagiat karya orang lain. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis pada daftar pustaka secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila pernyataan ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 08 Mei 2026

Penulis



**Siti Mahmudah**

NPM. 2215051074

## RIWAYAT HIDUP



Siti Mahmudah lahir di Banyuasin, 26 Desember 2004. Anak keempat dari empat bersaudara, lahir dari pasangan Bapak Miran dan Ibu Ayem. Penulis memulai pendidikan dasar di SD Negeri 23 Sembawa pada tahun 2010-2016, kemudian melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 1 Sembawa pada tahun 2016-2019. Penulis melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri Plus 2 Banyuasin III pada tahun 2019-2022. Pada tahun 2022, penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi pada Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama duduk di bangku perkuliahan sebagai mahasiswa, penulis aktif mengikuti beberapa kepanitiaan dan organisasi, diantaranya penulis aktif sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika “Bhuwana” pada Biro Kesekretariatan dan Rumah Tangga (KRT) selama 2 periode pada tahun 2023 – 2025. Pada tahun 2024, penulis menjadi bagian dari Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik (BEM FT) Universitas Lampung sebagai Sekretaris Dinas Advokasi dan Kesejahteraan Mahasiswa (Advokesma). Kemudian penulis tergabung ke dalam organisasi Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI SC Unila) sebagai anggota Divisi *Research and Competition Enhancement* pada tahun 2023, kemudian penulis diamanahkan menjadi Wakil Ketua Divisi *Internal Affairs* HAGI SC Unila pada tahun 2025, dan menjadi sekretaris umum HAGI SC Unila pada tahun 2026. Selain itu penulis juga menjadi bagian dari *The American Association of Petroleum Geologists* (AAPG SC Unila) sebagai anggota Divisi *Research and Innovation* pada

tahun 2025 yang kemudian diamanahkan menjadi Kepala Divisi *Research and Innovation* pada tahun 2026.

Selain aktif mengikuti kegiatan organisasi, penulis juga aktif mengikuti beberapa kompetisi *geoscience* di tingkat nasional, diantaranya adalah *Geophysics Whiz Event and Seminar* (GWES) oleh Hima TG “Bhuwana” Universitas Lampung, *Geoscience Trip and Competition* (GEOTRAP) oleh Hima Geofisika “Pedra” Universitas Padjajaran, *Geostudent Competition* (GEOSC) Oleh SM-IAGI Universitas Jenderal Sudirman, *Geology of Ore Deposit Festival* (GEODEFEST) Oleh MGEI-SC UPN “Veteran” Yogyakarta, dan *Geology Total Action* oleh UPN “Veteran” Yogyakarta. Selain itu penulis aktif mengikuti kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) pada tahun 2023-2026, dan menjadi finalis Pemilihan Mahasiswa Berprestasi Tingkat Jurusan Teknik Geofisika Tahun 2025. Sejak tahun kedua hingga tahun terakhir perkuliahan, penulis juga aktif mengikuti berbagai kegiatan pengabdian dan penelitian dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung di berbagai daerah di Provinsi Lampung.

Penulis melaksanakan kegiatan Kerja Praktik pada bulan Juni-Juli 2025 di Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan (BBSPGL) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral dengan topik “Analisis Kualitatif Perbandingan Metode *Pre Stack Time Migration* dan *Post Stack Time Migration* Pada Data Seismik 2D *Marine* Lapangan “ST” Cekungan Nias Sumatera Utara”. Kemudian penulis melaksanakan kegiatan Tugas Akhir di PT. Pertamina (Persero) pada bulan Januari-Maret 2026 dengan topik “Identifikasi Zona Potensi Reservoir Panasbumi Pada Lapangan “MA” Berdasarkan Analisis Multiatribut Metode *Low Frequency Passive Seismic*” yang mengantarkan penulis menjadi seorang sarjana Teknik Geofisika pada tahun 2026.

## **PERSEMBAHAN**

*”Untuk setiap doa yang terjawab dan setiap usaha yang membuahkan hasil”*  
Puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan kemudahan kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi dan perkuliahan. Skripsi ini tidak sempurna, namun dapat mengantarkan penulis menjadi seorang sarjana. Dengan penuh rasa bangga dan syukur, skripsi ini penulis persembahkan kepada:

Ayah dan Ibu Tercinta

### **Bapak Miran dan Ibu Ayem**

Atas pengorbanan dan perjuangan yang diberikan, cinta kasih dan kasih sayang yang tidak pernah lekang oleh jarak dan keadaan, doa-doa yang selalu dilangitkan dan segala hal yang telah diusahakan. Terima kasih sudah menjadi pelabuhan paling teduh dan tempat pulang paling nyaman.

Kakak-kakak Tersayang

### **Susilawati, Ngadino, dan Mardiah Pratiwi**

Terima kasih selalu menjadi saudara yang saling mengerti dan pengisi rumah yang tak pernah sepi. Kalian adalah ladang inspirasi dan motivasi untuk menyelesaikan skripsi dan berada di titik ini.

Almamaterku

### **Universitas Lampung**

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

## **MOTTO**

*“Maka bersabarlah, sesungguhnya janji Allah itu benar”*

**QS. Al-Ghafir: 55**

*“Maka, ingatlah kepada-Ku, Aku pun akan ingat kepadamu”*

**QS. Al-Baqarah:152**

*“Sesuatu yang hilang darimu berarti tidak tercipta untukmu dan apa yang tercipta untukmu tidak akan hilang darimu”*

**Umar bin Khattab**

*“Success is not final, failure is not fatal: it is the courage to continue that counts”*

**Winston Churchill**

*“Tidak harus lari, berjalan pelan tidak masalah asal kita tidak berhenti”*

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat, karunia, dan ridho-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan baik dan maksimal. Tanpa pertolongan, bimbingan, dan petunjuk-Nya, penulis menyadari bahwa perjalanan menyelesaikan skripsi ini tidak akan berjalan lancar dan mudah.

Skripsi ini mengangkat topik “Identifikasi Zona Potensi Reservoir Panasbumi Pada Lapangan "MA” Berdasarkan Analisis Multiatribut Metode *Low Frequency Passive Seismic*” merupakan suatu karya yang ditulis untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika Universitas Lampung.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat menjadi dan membawa manfaat untuk pembaca dan turut berkontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, serta dapat menjadi ladang amal jariyah bagi penulis dan semua pihak yang terlibat. Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik, saran, dan masukan yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan skripsi ini di masa yang akan datang.

Bandar Lampung, 08 Mei 2026



**Siti Mahmudah**

NPM. 2215051074

## SANWACANA

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat, kemudahan, dan segala hal-hal baik kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul “Identifikasi Zona Potensi Reservoir Panasbumi Pada Lapangan “MA” Berdasarkan Analisis Multiatribut Metode *Low Frequency Passive Seismic*”. Perjalanan penyelesaian penelitian tugas akhir ini tidak luput dari bantuan orang-orang baik yang selalu memberikan dukungan, semangat, motivasi, kritik dan saran, serta uluran tangan kepada penulis. Dengan segala rasa hormat dan 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 pembimbing 1 tugas akhir penulis yang telah memberikan bimbingan dan dukungan selama proses pengerjaan tugas akhir. Terima kasih atas waktu yang selalu diluangkan dan arahan yang diberikan hingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan.
3. Ibu Ir. Akroma Hidayatika, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing 2 tugas akhir penulis yang selalu sabar memberikan semangat dan motivasi, arahan dan bimbingan, saran dan masukan dalam pengerjaan tugas akhir hingga terselesaikan.
4. Bapak Prof. Ir. Drs. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN Eng., selaku dosen penguji tugas akhir penulis yang telah memberikan bimbingan, saran, masukan, dan evaluasi dalam penyempurnaan tugas akhir ini.
5. Ibu Isti Nur Kumalasari, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik penulis selama menempuh perkuliahan di Jurusan Teknik Geofisika, terima kasih atas semangat dan nasihat yang telah diberikan kepada penulis.

6. Bapak Taufik, S.T., CRMP., RPC., LAC. dan Mas Ahmad Amirudin, S.T., M.T., selaku pembimbing lapangan tugas akhir penulis di PT. Pertamina (Persero) yang telah memberikan bimbingan, pengetahuan, wawasan, dan pengalaman yang menjadi bekal bagi penulis memahami dunia kerja.
7. Bapak Subarsyah, S.Si., M.T., selaku pembimbing lapangan Kerja Praktik penulis di Balai Besar Survey dan Pemetaan Geologi Kelautan (BBSPGL) yang telah memberikan kesempatan, pengalaman, dan wawasan kepada penulis selama kegiatan Kerja Praktik.
8. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah membimbing dan memberikan pengetahuan kepada penulis dari awal perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir ini. Terima kasih sudah memberikan banyak kesempatan kepada penulis untuk mengembangkan diri selama perkuliahan.
9. Kedua Orangtua Terbaik, Bapak Miran dan Ibu Ayem yang tiada lelah memberikan dukungan untuk penulis, bukan hanya selama perkuliahan melainkan selama penulis menjalani kehidupan. Terima kasih atas pengorbanan yang telah diberikan, doa yang selalu dilantunkan, dan kasih sayang yang tak pernah putus dialirkan. *Hidup lebih lama yaa!!*
10. “*Saudara*”, Susilawati, Ngadino, Hendriyanto, Darwina, dan Mardiah Pratiwi. Kakak-kakak yang selalu memberikan dukungan dan cinta kasih kepada penulis. Terima kasih sudah selalu ada dan kasih sayang yang luar biasa.
11. “*3 Adik Kecil*”, Adibah Inara Zilfah, Ahmad Arkan, dan Genzo Julian Adha. Tiga anak kecil yang senantiasa menanti kepulangan penulis ke rumah dengan sukacita.
12. Mardiah Pratiwi, kakak sekaligus teman bertumbuh penulis sejak kecil. Terima kasih sudah selalu merayakan.
13. Muhammad Saipuddin, seseorang yang selalu mendengarkan semua cerita dan keluh kesah penulis selama menjalani perkuliahan. Terima kasih sudah selalu memahami, mendengar, dan mendukung. *Best listener!!*
14. “*Granit*”, Keluarga Besar Teknik Geofisika Angkatan 2022 yang telah menemani perjalanan penulis sejak awal perkuliahan. Terima kasih atas canda tawa, tangis sedih, suka dan duka yang akan selalu menjadi kenangan manis

dalam kehidupan penulis. Perjalanan 4 tahun yang berwarna karena hidup bersama kalian. *Thanks for unforgettable memories we made!!*

15. “*Sebelas*”, Yeni Marsela, Amelia Putri Anggraeni, Amalia Ramadhona, Nur Asia Azam, Tyas Puspaningsih, Hafizah, Hanifah, Galuh Andini Putri A. H., Aulia Nisya, dan Indira Audita Azra U. P., 10 orang sahabat yang selalu menemani penulis di setiap kegiatan dan proses perkuliahan. Terima kasih sudah selalu ada dan selalu merayakan segala pencapaian. *See u on top guys!!*
16. “*Kost Bu Eka*”, Hafizah dan Hanifah. Dua saudara yang menjadi teman Kerja Praktik penulis di Bandung hingga Tugas Akhir di Jakarta, tempat berbagi cerita dan pikiran, serta teman segala kegiatan selama perkuliahan.
17. “*Orang Aneh*”, Malikha Maharani dan Pebriadi Halomoan Matondang. Teman bertumbuh, berpikir, dan berproses. Teman mengikuti berbagai kegiatan perlombaan selama perkuliahan, teman bercerita yang tak pernah lelah mendengarkan. Terima kasih sudah kebersamaan sampai titik ini. *See u yaa!!*
18. “*Talk to Who*”, Razki Alfatah Khairu Mahli dan Ardian Perdana, tempat penulis bertukar cerita, saran dan pikiran tentang pertemanan dan perkuliahan. Terima kasih untuk telinga yang sudah selalu mendengar.
19. Siti Mahmudah yang telah berhasil menyelesaikan perkuliahan dengan baik. *Let's make another extraordinary achievement!!*
20. Abang, Kakak, dan Adik-adik Jurusan Teknik Geofisika yang selalu menjadi penyemangat penulis menyelesaikan perkuliahan.

Semua pihak yang terlibat dalam penyelesaian skripsi dan perkuliahan yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Semoga Allah SWT membalas setiap kebaikan dengan pahala dan hal-hal baik di kehidupun dengan penuh keberkahan.

Bandar Lampung, 08 Mei 2026



**Siti Mahmudah**

NPM. 2215051074

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>MENGESAHKAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>PERNYATAAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>viii</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>x</b>
<b>MOTTO</b> .....	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>SANWACANA</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxii</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	4
1.5 Manfaat.....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Tektonik Regional Daerah Penelitian .....	5
2.2 Geologi Regional Daerah Penelitian .....	7
2.2 Vulkanostratigrafi Daerah Penelitian.....	9
2.3 Penelitian Terdahulu .....	11
<b>III. TEORI DASAR</b> .....	<b>13</b>

3.1	Sistem Panasbumi.....	13
3.1.1	Sumber Panas ( <i>Heat Source</i> ) .....	14
3.1.2	Reservoir.....	15
3.1.3	Batuan Penudung ( <i>Caprock</i> ).....	15
3.1.4	Struktur Geologi .....	16
3.1.5	Daerah Resapan ( <i>Recharge Area</i> ).....	16
3.2	Gelombang Seismik.....	16
3.2.1	Gelombang Badan .....	17
3.2.2	Gelombang Permukaan.....	19
3.3	Metode Seismik .....	20
3.4	Metode Seismik Pasif .....	21
3.5	<i>Low Frequency Passive Seismic (LFPS)</i> .....	23
3.6	<i>Processing Waveform</i> .....	27
3.6.1	<i>Detrend Removal</i> .....	27
3.6.2	<i>Filtering</i> .....	28
3.6.3	<i>Windowing</i> .....	29
3.7	Analisis Polarisasi .....	30
3.8	<i>Fast Fourier Transform (FFT)</i> .....	34
3.9	<i>Power Spectral Density</i> .....	35
3.10	<i>Vertical to Horizontal Spectral Ratio (VHSR)</i> .....	37
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>40</b>
4.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	40
4.2	Alat dan Bahan .....	42
4.3	Prosedur Penelitian .....	42
4.3.1	Studi Literatur.....	43
4.3.2	Persiapan dan Pengumpulan Data .....	43
4.3.3	Pengolahan Data .....	43
4.3.4	Interpretasi .....	46
4.4	Diagram Alir .....	47
<b>V.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>49</b>
5.1	<i>Quality Control Waveform</i> .....	49
5.2	<i>Preprocessing Waveform</i> .....	53

5.3	Analisis Polarisasi .....	61
5.4	Analisis <i>Particle Motion</i> .....	67
5.5	Analisis <i>Power Spectral Density</i> .....	71
5.6	Analisis <i>Vertical to Horizontal Spectral Ratio</i> .....	79
5.7	Pemetaan Atribut <i>Low Frequency Passive Seismic</i> .....	84
5.8	Identifikasi Zona Potensi Reservoir Panasbumi.....	100
<b>VI.</b>	<b>SIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>111</b>
6.1	Simpulan.....	111
6.2	Saran .....	112
	<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>113</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur geologi daerah penelitian .....	6
2. Peta geologi regional daerah penelitian .....	8
3. Vulkanostratigrafi daerah penelitian .....	10
4. Vulkanostratigrafi daerah penelitian .....	11
5. Skematik tipe sistem panasbumi .....	13
6. Model sistem panasbumi ideal .....	15
7. Arah gerak partikel dan arah penjalaran gelombang P .....	18
8. Arah gerak partikel dan arah penjalaran gelombang S .....	19
9. Arah perambatan gelombang Love .....	19
10. Arah perambatan gelombang Rayleigh .....	20
11. Perbedaan sinyal tremor dan gempa bumi .....	22
12. Mekanisme respon frekuensi rendah .....	23
13. Ilustrasi spektrum mikroseismik hidrokarbon .....	25
14. Representasi skematis dari geometri pori <i>bi-conical</i> yang menghasilkan osilasi frekuensi rendah di sepanjang arah sumbu-z .....	26
15. Proses <i>detrend removal</i> data pasif seismik .....	28
16. <i>Bandpass filter</i> .....	28
17. Proses <i>windowing</i> data seismik pasif .....	30
18. Demonstrasi atribut polarisasi (a) <i>high azimuth, medium dip</i> , dan <i>high rectilinearity</i> ; (b) <i>medium azimuth, high dip</i> , dan <i>low rectilinearity</i> .....	32
19. Respon atribut polarisasi (a) zona non reservoir; (b) zona reservoir .....	33
20. <i>Particle motion</i> (a) bidang horizontal; (b) bidang vertikal .....	34
21. Sinyal analog (atas) dan sinyal digital (bawah) .....	35
22. Respon spektrum seismik pasif (a) zona reservoir; (b) zona non reservoir ...	36

23. Respon VH rasio (a) zona reservoir; (b) zona non reservoir .....	38
24. Diagram alir .....	48
25. Peta sebaran stasiun pengukuran seismik pasif .....	49
26. <i>Raw data</i> stasiun MA123 .....	50
27. <i>Raw data</i> stasiun MA117 .....	51
28. <i>Raw data</i> stasiun MA143 .....	52
29. <i>Raw data</i> stasiun MA134 .....	52
30. <i>Waveform</i> stasiun MA123 setelah <i>preprocessing</i> .....	54
31. <i>Waveform</i> stasiun MA117 setelah <i>cutting</i> dan <i>preprocessing</i> .....	55
32. <i>Waveform</i> stasiun MA143 setelah <i>cutting</i> dan <i>preprocessing</i> .....	55
33. <i>Waveform</i> stasiun MA134 setelah <i>cutting</i> dan <i>preprocessing</i> .....	56
34. <i>Final waveform</i> pada stasiun MA123 .....	58
35. <i>Final waveform</i> pada stasiun MA117 .....	58
36. <i>Final waveform</i> pada stasiun MA143 .....	59
37. Analisis polarisasi stasiun MA117 .....	62
38. Analisis polarisasi stasiun MA123 .....	64
39. Analisis polarisasi stasiun MA143 .....	65
40. Analisis <i>particle motion</i> stasiun MA117 .....	68
41. Analisis <i>particle motion</i> stasiun MA123 .....	69
42. Analisis <i>particle motion</i> stasiun MA143 .....	70
43. <i>Power spectral density</i> stasiun MA117 (a) PSD-Z; (b) PSD-N; (c) PSD-E..	72
44. <i>Power spectral density</i> stasiun MA123 (a) PSD-Z; (b) PSD-N; (c) PSD-E..	74
45. <i>Power spectral density</i> stasiun MA123 (a) PSD-Z; (b) PSD-N; (c) PSD-E..	75
46. Spektrum vertikal/horizontal stasiun MA117 .....	80
47. Spektrum vertikal/horizontal stasiun MA123 .....	81
48. Spektrum vertikal/horizontal stasiun MA143 .....	81
49. Sebaran stasiun perekaman terhadap spektrum PSD-E .....	84
50. Sebaran stasiun perekaman terhadap spektrum PSD-N .....	85
51. Peta sebaran atribut PSD komponen timur-barat (PSD-E) .....	86
52. Peta interpolasi sebaran atribut spektrum PSD-E .....	87
53. Peta sebaran atribut PSD komponen utara-selatan (PSD-N) .....	88
54. Peta interpolasi sebaran atribut spektrum PSD-N .....	89

55. Sebaran stasiun perekaman terhadap spektrum PSD-Z .....	91
56. Peta sebaran atribut PSD komponen vertikal (PSD-Z).....	92
57. Peta interpolasi sebaran atribut spektrum PSD-Z .....	93
58. Sebaran stasiun perekaman terhadap frekuensi PSD-Z .....	94
59. Peta sebaran atribut frekuensi PSD-Z .....	95
60. Peta interpolasi sebaran atribut frekuensi PSD-Z .....	96
61. Sebaran stasiun perekaman terhadap VH rasio .....	97
62. Peta sebaran atribut rasio vertikal/horizontal (V/H) .....	98
63. Peta sebaran atribut rasio vertikal/horizontal (V/H) .....	99
64. Peta zona potensi reservoir berdasarkan spektrum PSD-Z .....	101
65. Peta zona potensi reservoir berdasarkan frekuensi PSD-Z .....	102
66. Peta zona potensi reservoir berdasarkan VH rasio.....	103
67. Peta zona potensi reservoir Lapangan “MA” .....	108

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Jadwal Penelitian.....	41
2. Alat dan Bahan Penelitian.....	42
3. Spesifikasi Alat Lennartz LE 3D-Lite.....	43
4. <i>Quality Control Waveform</i> Awal .....	53
5. <i>Quality Control Waveform</i> Setelah <i>Preprocessing</i> .....	56
6. Parameter <i>Windowing Waveform</i> Pada Lapangan “MA”.....	60
7. Analisis Polarisasi Lapangan “MA” .....	66
8. <i>Power Spectral Density</i> Lapangan “MA” .....	77
9. Nilai VH Rasio Lapangan “MA” .....	83
10. Pembobotan Atribut Spektrum PSD-Z.....	106
11. Pembobotan Atribut Frekuensi PSD-Z .....	106
12. Pembobotan Atribut Spektrum VH rasio .....	106
13. Pembobotan Atribut Masing-Masing Stasiun .....	106

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik memiliki peranan yang sangat penting dalam mendorong kegiatan di berbagai sektor, baik sektor ekonomi, industri, transportasi, dan pembangunan wilayah. Namun sebagian besar pasokan energi listrik di Indonesia masih bersumber dan didominasi oleh pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil, terutama batubara. Energi fosil menyumbang sekitar 62% dari total kapasitas energi nasional pada tahun 2023 (KESDM, 2024). Ketergantungan terhadap energi fosil berdampak pada meningkatnya emisi gas rumah kaca, polusi udara, dan degradasi serta pencemaran lingkungan. Salah satu alternatif yang dapat mendukung transisi energi bersih di Indonesia adalah dengan mengembangkan energi terbarukan, seperti panasbumi (Sari, 2025).

Panasbumi merupakan sumber energi panas yang terdapat dan terbentuk di dalam kerak bumi. Karena berasal dari dalam bumi, panasbumi dapat dianggap sebagai energi terbarukan (*renewable energy*) (Sauni dkk., 2022). Sistem panasbumi yang banyak berkembang di Indonesia merupakan sistem hidrotermal (*hydrothermal system*) yang memiliki 5 unsur utama, yaitu memiliki sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, batuan penudung (*claycap*), struktur geologi (patahan dan rekahan), dan daerah resapan (*recharge area*) (Arafat dkk., 2020).

Indonesia memiliki 362 titik potensi panasbumi dengan jumlah manifestasi sebanyak 971 titik dengan potensi panasbumi mencapai sekitar 40% dari total cadangan dunia atau sekitar 23,9 GW (Nasruddin dkk., 2016). Hasil perhitungan didapatkan bahwa jumlah sumber daya panasbumi untuk pemanfaatan langsung di Indonesia per Desember tahun 2024 sebesar 222,77 MWt dengan cadangan terbukti sebesar 8,1 MWt (Badan Geologi, 2024). Saat ini kapasitas terpasang untuk Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi (PLTP) di Indonesia sebesar 2743,91 MW

atau 2,74391 GW. Adapun total energi listrik yang dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi di Seluruh Indonesia per Agustus 2025 adalah 11.525.813 MWh (Direktorat Panasbumi, 2025). Indonesia memiliki target capaian energi terbarukan mencapai 19-22% pada tahun 2030 sebagai proses peralihan dari energi fosil menuju energi terbarukan (KESDM, 2023).

Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 mengenai percepatan pengembangan Energi Terbarukan (ET) untuk penyediaan tenaga listrik memberikan dampak yang signifikan dalam pertumbuhan sektor panasbumi secara nasional. Regulasi ini mendorong langkah yang signifikan pada kegiatan eksplorasi, eksploitasi, serta pemanfaatan sumber daya panasbumi sebagai langkah strategis untuk memfasilitasi transisi energi. Upaya tersebut bertujuan untuk mengalihkan ketergantungan dari energi fosil menuju sumber energi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (EBTKE, 2023). Dalam rangka memanfaatkan potensi panasbumi di Indonesia dengan optimal, perlu dilakukan eksplorasi untuk mengetahui potensi panasbumi secara lebih optimal. Salah satu metode eksplorasi yang dapat dilakukan adalah dengan survei geofisika yang bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengetahui parameter fisis dan kondisi struktur geologi bawah permukaan. Salah satu metode geofisika yang dapat dimanfaatkan adalah metode seismik pasif (Kazantev dkk., 2017).

Metode seismik pasif merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan dengan memanfaatkan sinyal atau gelombang alami dari bumi. Metode ini menggunakan instrumen *ultra high sensitivity broadband seismometer* untuk mendeteksi sinyal akustik dengan frekuensi sangat rendah (infrasonik). Penggunaan metode seismik pasif dalam eksplorasi sumber daya energi merupakan terobosan baru di Indonesia (Wahyudi, 2008). Dalam pengolahannya, data seismik pasif dapat diolah menggunakan metode *low frequency passive seismic* (LFPS).

Metode LFPS pada awalnya disebut sebagai *Direct Hydrocarbon Indicator* (DHI) untuk menentukan keberadaan reservoir pada rentang frekuensi 2-6 Hz (Prabowo dkk., 2017). Prinsip metode LFPS pada dasarnya mengukur interaksi gelombang alami bumi frekuensi rendah, yang berasal dari gelombang air laut (*ocean wave peaks*), peristiwa vulkanik seperti konveksi magma ataupun kegiatan

manusia (Harisma dkk., 2024). Seiring dengan perkembangan teknologi, metode LFPS mulai dikembangkan untuk kegiatan eksplorasi panasbumi, diantaranya adalah penelitian lapangan panasbumi menggunakan metode LFPS yang dilakukan oleh (Kazantev dkk., 2017) untuk mengetahui area tersaturasi uap (*steam saturated*) pada Lapangan Panasbumi Muara Laboh dan juga penelitian pada Lapangan Panasbumi Lumut Balai oleh (Valentin, 2025) untuk mendeliniasi zona reservoir.

Penggunaan metode ini dinilai sangat efisien untuk pengembangan lapangan panasbumi karena mampu memetakan anomali secara lateral hanya dengan memanfaatkan getaran alami bumi. Eksplorasi sumber daya energi menggunakan metode seismik pasif dapat mereduksi dan menekan penggunaan biaya. Selain itu, metode seismik pasif juga ramah lingkungan karena tidak menggunakan sumber getaran aktif seperti pada metode seismik konvensional lainnya. Keunggulan lainnya adalah pada kemampuannya mendeteksi interaksi gelombang alami dengan fluida reservoir, sehingga risiko kegagalan pengeboran (*dry hole*) saat eksplorasi bisa diminimalisir. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui zona prospek reservoir panasbumi dengan menggunakan atribut *low frequency passive seismic* (LFPS).

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana atribut *low frequency passive seismic* dapat mengidentifikasi keberadaan reservoir panasbumi?
2. Bagaimana memetakan zona potensi reservoir panasbumi berdasarkan nilai atribut *low frequency passive seismic*?
3. Bagaimana penerapan metode metode *low frequency passive seismic* dalam eksplorasi lapangan panasbumi.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis atribut *low frequency passive seismic* untuk mengidentifikasi keberadaan reservoir panasbumi.

2. Memetakan zona prospek reservoir panasbumi berdasarkan atribut *low frequency passive seismic*.
3. Menganalisis penerapan metode *low frequency passive seismic* dalam eksplorasi lapangan panasbumi.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Data yang digunakan merupakan data seismik pasif *time series* Lapangan Panasbumi “MA”
2. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PertaRay 2.0.
3. Atribut yang digunakan meliputi *power spectral density* (PSD) komponen vertikal (PSD-Z), frekuensi PSD-Z, dan nilai VH rasio.
4. Interpretasi data digunakan untuk mengidentifikasi zona potensi reservoir panasbumi daerah penelitian.

#### **1.5 Manfaat**

Manfaat penelitian ini adalah diharapkan dapat memberikan informasi mengenai penerapan metode LFPS dalam eksplorasi lapangan panasbumi dan memberkan informasi mengenai zona potensi reservoir panasbumi di daerah penelitian serta dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya dalam pengembangan lapangan panasbumi di Indonesia.

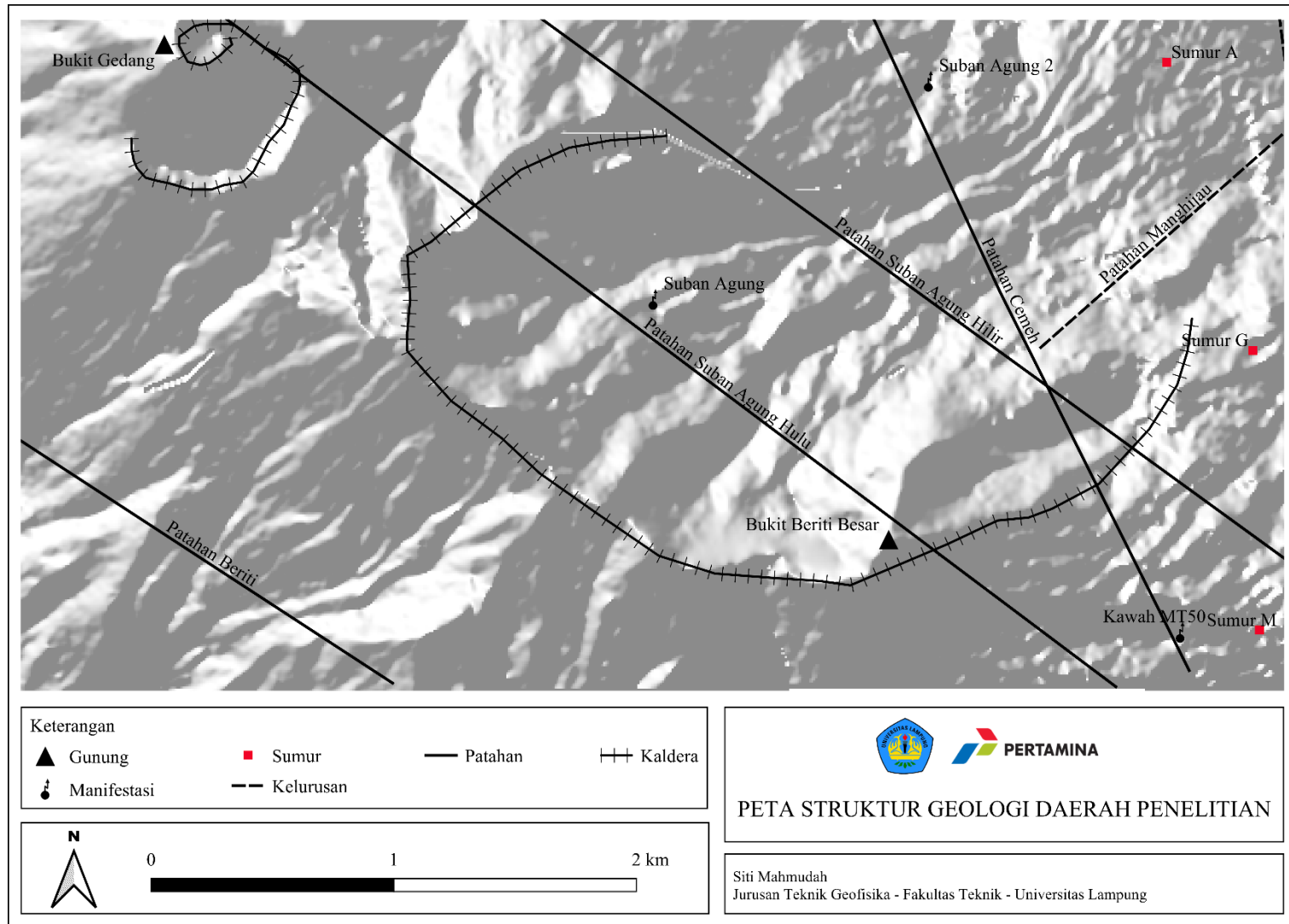
## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Tektonik Regional Daerah Penelitian

Daerah penelitian terletak di antara dua segmen Sistem Patahan Sumatera (*Sumatera Fault System*), yaitu Patahan Segmen Musi dan Patahan Segmen Ketaun. Selain itu, terdapat dua depresi yang berada pada daerah penelitian, yaitu Depresi Tektonik Muara Aman dan Depresi Vulkanotektonik Tabahbaru. Kedua depresi tersebut relatif sejajar satu sama lain. Hal ini menunjukkan bahwa blok barat Patahan Sumatera bergerak aktif ke arah barat laut dalam pergeseran dextral, sementara blok di sebelah timur lebih statis. Kondisi ini dianggap mempengaruhi kondisi geologi lokal pada kawasan daerah penelitian (Pratama dkk., 2020).

Pergerakan segmen-segmen Patahan Sumatera membentuk suatu cekungan dengan panjang sekitar 15 km dan lebar 5 km. Daerah penelitian termasuk ke dalam cekungan *pull apart* yang memiliki tatanan tektonik berupa Patahan Sumatera yang merupakan patahan mendatar berasosiasi dengan zona vulkanik secara bersamaan (Dwikorianto dkk., 2023).

Daerah Penelitian memiliki tiga orientasi struktur, yaitu NNW-SSE atau relatif N-S, NE-SW, dan NW-SE seperti terlihat pada Gambar 1. Arah NW-SE serupa dengan arah *Sumatera Fault System* (Sistem Patahan Sumatera). Patahan-patahan ini mengontrol permeabilitas dan aliran fluida pada daerah penelitian. Patahan-patahan produktif pada daerah penelitian yang memiliki arah NW-SE diantaranya adalah Patahan Suban Agung Hulu, Patahan Suban Agung Hilir, dan Patahan Cemeh (Nurseto dkk., 2021).



Gambar 1. Struktur geologi daerah penelitian (Nurseto dkk., 2021)

## 2.2 Geologi Regional Daerah Penelitian

Barisan fasies vulkanik daerah penelitian berkembang ke arah barat laut-tenggara sebagai barisan bukit kuarter. Barisan bukit kuarter merupakan salah satu manifestasi dari sumber panas bawah permukaan yang aktif dalam pembentukan saluran intrusi (Pratama dkk., 2020). Penjelasan mengenai karakter formasi batuan permukaan daerah penelitian digambarkan dalam Peta Geologi Regional Daerah Penelitian seperti pada Gambar 2.

Daerah penelitian terdiri dari beberapa formasi batuan penyusun, yaitu sebagai berikut.

### 1) Longsoran Debris Suban Agung

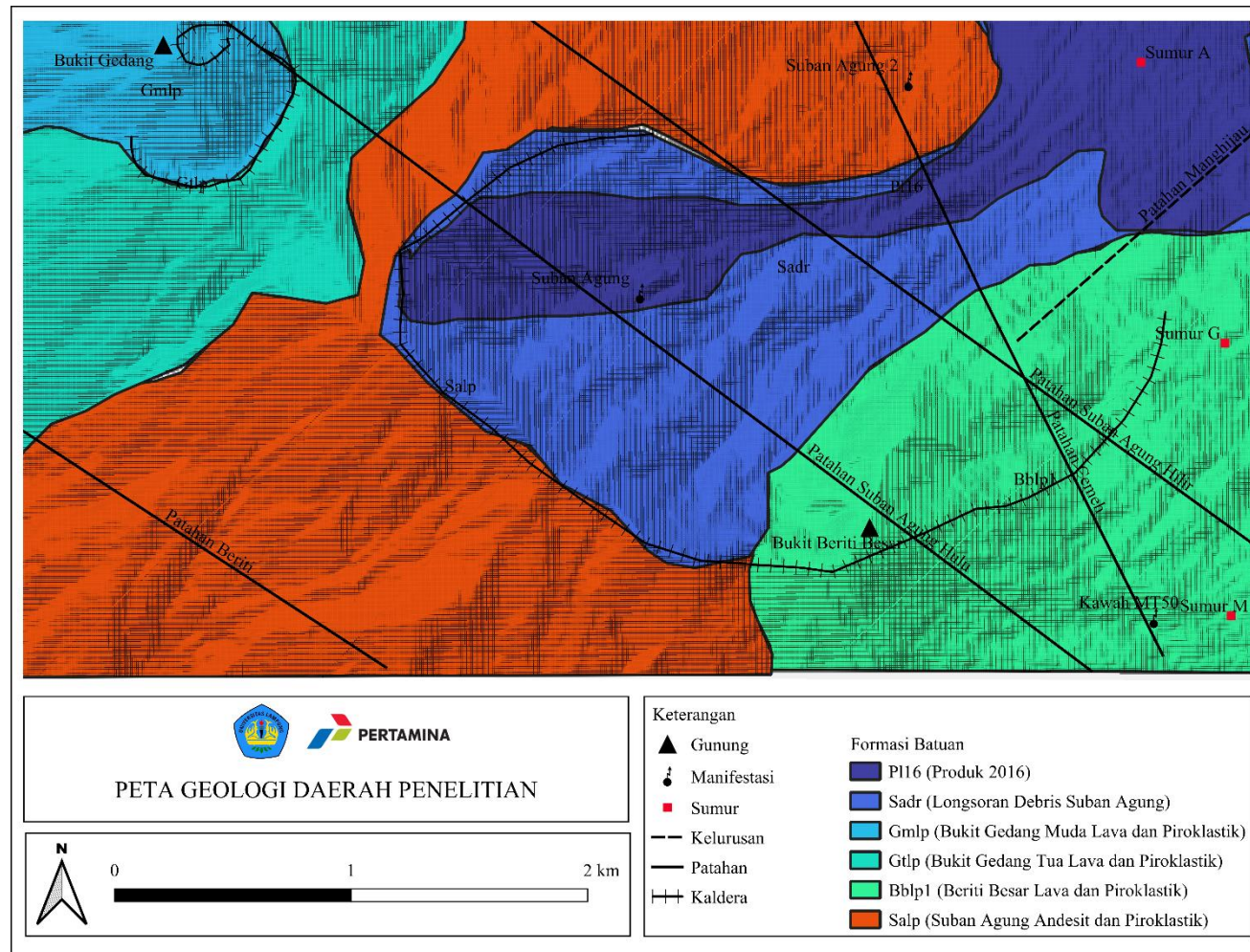
Longsoran material Suban Agung menyebar dari tepi Suban Agung ke arah timur laut. Material ini berupa material tidak terkonsolidasi-semi-terkonsolidasi seperti breksi yang terdiri dari fragmen batuan segar-terubah dengan matriks yang sebagian terubah. Sumber material longsoran material diinterpretasikan berasal dari Suban Agung.

### 2) Gunung Berapi Gedang Muda

Gunung Berapi Gedang Muda merupakan produk vulkanik dari Bukit Gedang yang menyebar dari bagian atas hingga tengah tubuh ke arah barat. Terdiri dari andesit dengan struktur masif dan sambungan lapisan, breksi lava andesit, fragmen andesit yang didominasi oleh fragmen andesit yang sebagian didukung oleh matriks, dan ditemukan breksi lava yang terpengaruh oleh aktivitas fluida hidrotermal dengan pH rendah, yang ditandai dengan adanya kaolinit dan fragmen andesit yang memiliki tekstur celah akibat pelarutan.

### 3) Gunung Berapi Gedang Tua

Gunung Berapi Gedang Tua merupakan produk vulkanik tua dari Bukit Gedang yang tersebar di bagian atas hingga bawah Bukit Gedang. Gunung Berapi Gedang Tua tersusun atas andesit dengan struktur masif dan retakan lapisan, lava breksi terdiri dari fragmen andesit dan sebagian obsidian terfragmentasi.



Gambar 2. Peta geologi regional daerah penelitian (Dwikorianto dkk., 2023; Nusantara, 2022)

4) Gunung Berapi Beriti Besar

Gunung Berapi Beriti Besar merupakan bagian dari Bukit Beriti Besar di bagian tenggara tubuh Suban Agung. Terdiri atas lava andesit dengan struktur retakan lapisan dan sebagian masif, breksi lava, tufa, dan endapan hidrotermal berupa material tanah liat yang teralterasi mengandung bahan organik.

5) Batu Vulkanik Suban Agung Muda

Merupakan bagian dari tubuh gunung berapi Suban Agung yang termuda. Di bawah Suban Agung, terdapat lapisan lava dan piroklastik yang membentuk litologi Suban Agung. Terdapat juga batuan yang teralterasi di sekitar kawah Suban Agung akibat adanya manifestasi.

## 2.2 Vulkanostratigrafi Daerah Penelitian

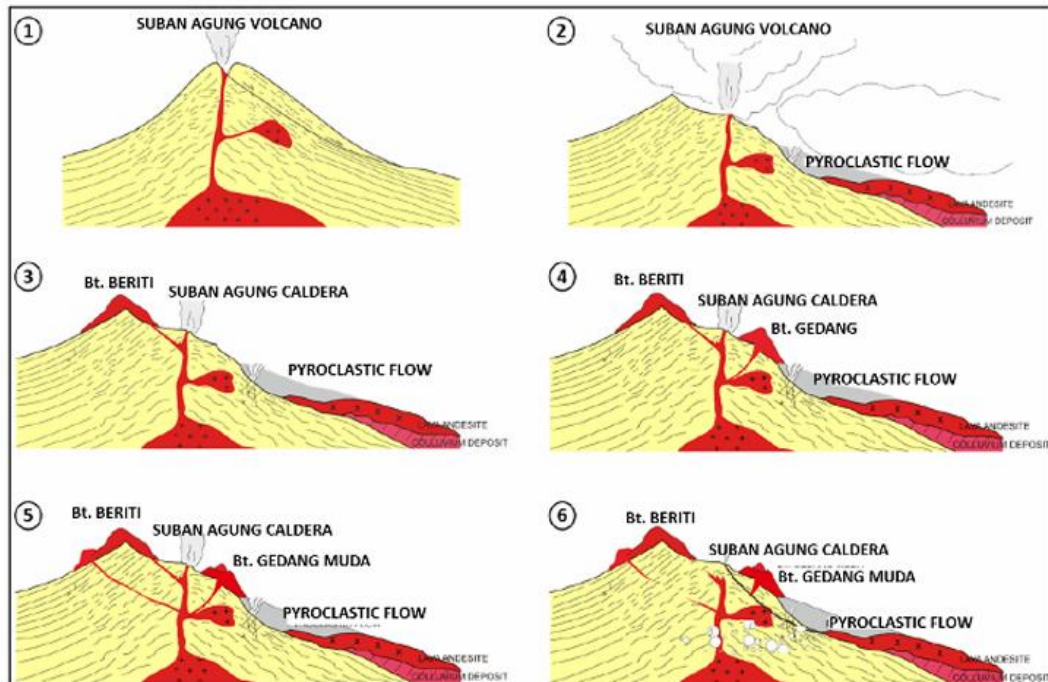
Terdapat tiga fase vulkanik pada daerah penelitian yang terjadi selama periode kuartar. Tiga fase tersebut meliputi vulkanisme Bukit Suban Agung, vulkanisme Bukit Beriti Besar, dan vulkanisme Bukit Beriti Kecil sebagai fase tertua. Sedangkan fase termuda meliputi Vulkanisme Bukit Gedang Tua dan Bukit Gedang. Vulkanisme Bukit Suban Agung merupakan vulkanisme tertua dan terbesar di daerah penelitian. Sampel batuan pada Kawah Bukit Suban Agung diperkirakan berusia  $0,907 \pm 0,25$  juta tahun lalu (Budiardjo dkk., 2001).

Aktivitas vulkanik Bukit Beriti Besar dan Bukit Beriti Kecil ditandai dengan morfologi kubah vulkanik yang terbentuk. Usia batuan disekitar Bukit Beriti Kecil diperkirakan berusia  $2,28 \pm 0,47$  juta tahun yang lalu (Budiardjo dkk., 2001). Aktivitas vulkanik termuda terdapat pada Bukit Gedang Tua dan Bukit Gedang Muda.

Secara umum, vulkanisme daerah penelitian terdiri dari beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut (Nurseto dkk., 2021). Gambar 3 menunjukkan vulkanostratigrafi pada daerah penelitian.

- 1) Fase pembentukan Gunung Suban Agung, gunung berapi dengan ketinggian 3000 mdpl yang tersusun atas lava andesit dan material piroklastik. Patahan Segmen Musi berperan sebagai bagian dari Patahan Besar Sumatera (*Giant Sumatera Fault*) yang menyediakan saluran untuk magma keluar dari bawah.

- 2) Patahan Besar Sumatera (*Giant Sumatera Fault*) merupakan patahan aktif yang menyebabkan potensi kegagalan lereng akibat gempa bumi yang sering terjadi.



Gambar 3. Vulkanostratigrafi daerah penelitian (Nurseto dkk., 2021)

- 3) Fase kehancuran Gunung Suban Agung disebabkan oleh kubah lava yang menyumbat bagian atas kawah. Letusan yang terjadi menyebabkan potensi longsor pada lereng dan tubuh gunung serta menyebabkan keruntuhan kawah. Material letusan terlempar sejauh lebih dari 8 km.
- 4) Patahan aktif yang terdapat di sekitar daerah penelitian menyebabkan terbentuknya jalur magma untuk keluar dari dalam bumi dan membentuk kubah gunung yang baru. Bukit Beriti dan Bukit Gedang terbentuk di kedua sisi lereng. Produk kedua bukit tersebut menyebar ke arah utara dan timur laut dari pusat letusan.
- 5) Aktivitas vulkanik yang terus terjadi membentuk unit bukit kecil, yaitu Bukit Beriti kecil dan kubah lava Bukit Gedang di atas pusat letusan.
- 6) Panas di bawah Bukit Suban Agung berevolusi menjadi sumber panas untuk lapangan panas bumi daerah penelitian. Struktur patahan aktif, seperti Patahan Segmen Musi menyediakan permeabilitas bagi fluida hidrotermal untuk bersirkulasi.

Epoch	Age Dating (Budiardjo, 1994)	Crown	Hummock	Primary Deposit	Secondary Deposit	
Holocene	Recent				Alluvial deposit (Oal)	
					2016 product (PI16)	
					Suban Agung Debris Avalanche (Sadr)	
Pleistocene	1100 ya	Bukit Pabuar		Bukit Pabuar 3 Lava and Pyroclastic (Palp3)		
				Bukit Pabuar 1 Pyroclastic (Pap1)		
		Bukit Gedang	Bukit Gedang Muda	Bukit Gedang Muda Lava and Pyroclastic (Gmlp)		
			Bukit Gedang Tua	Bukit Gedang Tua Lava and Pyroclastic (Gtlp)		
		Bukit Beriti	Beriti Besar	Beriti Besar 1 Lava and Pyroclastic (Bblp1)		
			Beriti Kecil	Bukit Beriti Kecil Lava and Pyroclastic (Bklp)		
		Suban Agung		Ancient Suban Agung Debris Avalanche 2 (Sadp2)		
			Air Mubai (?)	Air Mubai Andesite and pyroclastic (Amap)		
				Ancient Suban Agung Debris Avalanche 1 (Sadp1)		
						Non-epiclastic/pyroclastic deposit (Niep)
			Bukit Cemeh (?)	Bukit Cemeh Andesite and pyroclastic (Cmap)		
				Suban Agung Lava and Pyroclastic (Salp)		
		0.893 mya?	Bukit Lumut			Bukit Lumut Andesite (Lua)
		1.220 mya	Bukit Resam			Bukit Resam Andesite (Rsa)

Gambar 4. Vulkanostratigrafi daerah penelitian (Nurseto dkk., 2021)

### 2.3 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian ini, analisis data dilakukan dengan menggunakan acuan dan referensi dari penelitian terdahulu. Referensi yang digunakan mencakup cara pengolahan data seismik pasif dengan metode LFPS dan interpretasi hasil pengolahan metode LFPS. Penelitian oleh Kazantev dkk., (2017) pada Lapangan

Panasbumi Muara Laboh menyatakan bahwa zona tersaturasi uap atau zona potensi reservoir panasbumi pada Lapangan Muara Laboh memiliki nilai V/H yang tinggi mendekati 1 dengan rentang nilai 0,4 – 1. Titik pengukuran ini berada dekat dengan sumur A yang merupakan sumur produksi pada Lapangan Panasbumi Muara Laboh.

Yustiza (2022) melakukan penelitian dengan menggunakan metode LFPS untuk mengidentifikasi zona potensi reservoir pada Lapangan 'X'. Hasil penelitian menyatakan bahwa zona potensi reservoir panasbumi dapat diidentifikasi dengan menggunakan atribut LFPS melalui pemetaan nilai atribut *power spectral density* (PSD), *vertical to-horizontal ratio* (V/H Ratio) dan atribut polarisasi (*dip* dan *azimuth*). Titik stasiun paling berpotensi mengandung reservoir terletak pada titik A2, E25 dan M17. Hal ini juga divalidasi oleh stasiun A3 yang merupakan stasiun yang terdapat sumur produksi.

Husen, (2023) melakukan penelitian cara pengolahan dan analisis metode LFPS. Hasil penelitian menyatakan bahwa Spektrum PSD-Z dan VHRSR menunjukkan perbedaan yang signifikan antara zona non reservoir dan zona reservoir. Berdasarkan analisis PSD-Z, V/H ratio, dan peta persebaran nilai maksimum mengidentifikasi potensi reservoir di wilayah X (titik X05–X39, potensi 1–3) dan wilayah Y (titik Y24–Y12, potensi 1).

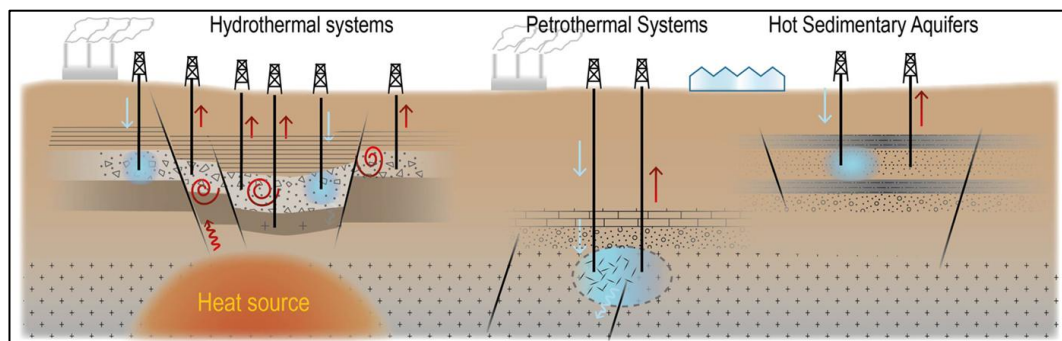
Sedangkan penelitian Valentin (2025) menggunakan metode LFPS untuk mendeliniasi zona reservoir panasbumi pada Lapangan Lumut Balai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa atribut yang dapat digunakan meliputi spektrum PSD-Z, frekuensi PSD-Z, dan nilai VH rasio. Berdasarkan hasil yang didapatkan, zona reservoir panasbumi Lumut Balai ditandai dengan nilai *power spectral density* (PSD) berada pada 0-30 kJ, dengan nilai PSD-Z lebih tinggi atau sama dengan PSD-N dan PSD-E. Selain itu, keberadaan reservoir ditandai dengan nilai V/H ratio  $>0,6$ , sehingga zona reservoir panasbumi Lumut Balai terletak pada area tenggara-timur yang dideliniasi oleh Sesar Air Ringkih dan dinding Kaldera Lumut Tua. Sedangkan pada bagian timur dan barat dideliniasi oleh sesar-sesar minor dari Sesar Udangan dan Sesar Gemurah Besar.

### III. TEORI DASAR

#### 3.1 Sistem Panasbumi

Energi panasbumi adalah energi panas alami yang berasal dari interaksi antara panas yang dipancarkan melalui batuan panas dengan air (fluida) yang terkandung di bawah permukaan. Sumber energi panasbumi berasal dari *Gradien Geothermal*, yaitu perbedaan suhu yang signifikan antara inti bumi dan permukaan (Sharmin dkk., 2023). Secara alami, keberadaan sumber panasbumi umumnya berada bersamaan dengan gunungapi. Panasbumi dalam bentuk uap air merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat digunakan untuk menggerakkan pembangkit listrik (Jamlean dkk., 2022).

Menurut (Buijze dkk., 2019) terdapat tiga tipe utama sistem panasbumi, yaitu sistem hidrotermal (*hydrothermal system*), sistem petrotermal (*petrothermal system*), dan akuifer sedimen panas (*hot sedimentary aquifers*) seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Skematik tipe sistem panasbumi (Buijze dkk., 2019)

##### 1) Sistem Hidrotermal (*Hydrothermal System*)

Sistem hidrotermal disebut juga lapangan panasbumi merupakan sistem panasbumi yang terletak di tatanan tektonik aktif serta didominasi oleh aktivitas konveksi. Sistem hidrotermal memiliki temperatur reservoir yang

tinggi ( $>200^{\circ}\text{C}$ ) pada kedalaman yang dangkal ( $< 3$  km). Sistem ini dapat diklasifikasikan sebagai lapangan yang didominasi uap atau didominasi air. Permeabilitas matriks atau rekahannya cukup tinggi untuk memungkinkan aliran fluida tanpa stimulasi (Buijze dkk., 2019).

2) Sistem Petrotermal (*Petrothermal System*)

Sistem petrotermal merupakan tipe sistem panasbumi yang menargetkan batuan yang memiliki permeabilitas rendah. Sistem panasbumi tipe ini memerlukan stimulasi sebelum aliran dapat dicapai. Sistem petrotermal mencakup konsep *Hot Dry Rock* (HDR) dengan sumur-sumur dihubungkan melalui perekahan hidrolik, serta *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) dengan injeksi tekanan tinggi menstimulasi permeabilitas jaringan rekahan alami melalui mekanisme pergeseran (*shearing*) (Buijze dkk., 2019; Lu, 2018).

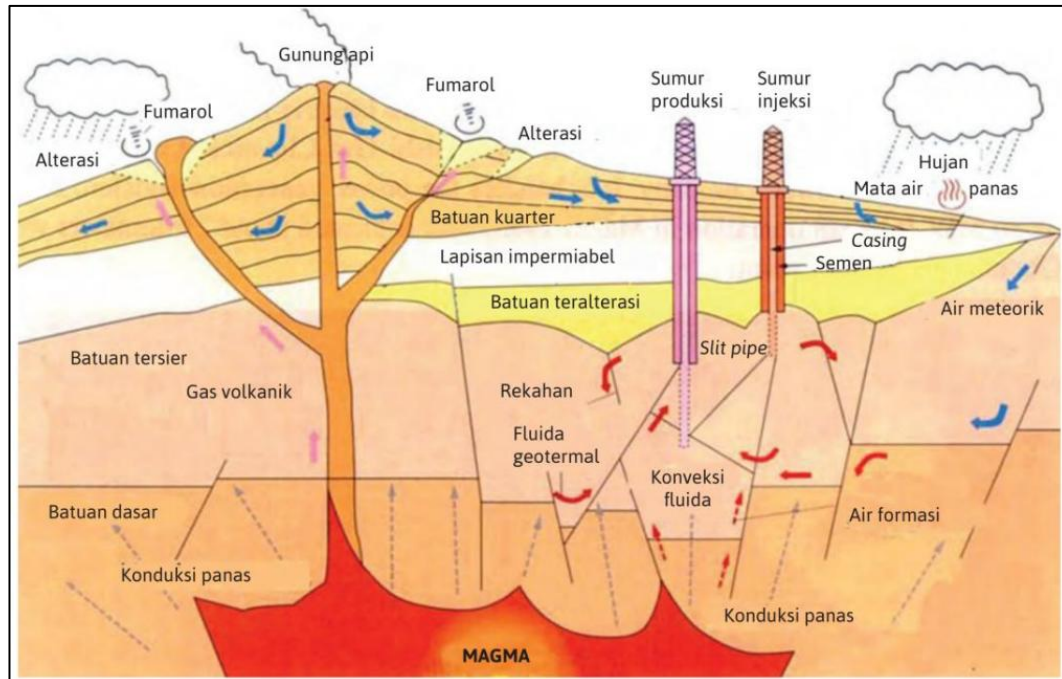
3) Akuifer Sedimen Panas (*Hot Sedimentary Aquifers*)

Sistem akuifer sedimen panas merupakan tipe sistem panasbumi yang terdiri dari formasi batuan sedimen berpori atau batuan permeabel. Sistem ini didominasi oleh aliran panas hasil proses konduksi dengan sebagian besar sistem memiliki temperatur rendah hingga menengah ( $30^{\circ}\text{C}$ - $150^{\circ}\text{C}$ ) pada kedalaman yang relatif dangkal (1-4 km). Umumnya, air/fluida disirkulasikan di antara dua sumur (*doublet*) pada tekanan rendah (Buijze dkk., 2019).

Suatu sistem panasbumi minimal memiliki 5 unsur utama, yaitu memiliki sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, batuan penudung (*claycap/caprock*), struktur geologi (patahan dan rekahan), dan daerah resapan (*recharge area*) (Arafat dkk., 2020) seperti terlihat pada Gambar 6.

### 3.1.1 Sumber Panas (*Heat Source*)

Sumber panas (*heat source*) dalam sistem panasbumi erat kaitannya dengan keberadaan magma. Terjadinya subduksi yang membentuk rantai pegunungan, menyebabkan magma dari dalam bumi menerobos ke permukaan dan membentuk intrusi batuan beku. Kontak antara intrusi batuan beku dengan batuan plutonik akan berperan sebagai sumber panas utama yang memanaskan fluida di atas lapisan tersebut (Suharno, 2013). Sumber panas (*heat source*) dapat juga berasal dari panas batuan kering, tekanan tanah, dan pemanasan air akibat proses lipatan atau patahan.



Gambar 6. Model sistem panasbumi ideal (Wijayanti, 2023)

### 3.1.2 Reservoir

Reservoir panasbumi merupakan batuan yang mampu menyimpan dan meloloskan fluida termal. Batuan pada reservoir panasbumi memiliki porositas dan permeabilitas yang baik (Lawless, 1995). Berdasarkan besarnya temperatur, reservoir panasbumi dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu reservoir bertemperatur rendah ( $T < 125^{\circ}\text{C}$ ), reservoir bertemperatur sedang ( $T = 125^{\circ}\text{C} - 225^{\circ}\text{C}$ ), dan reservoir bertemperatur tinggi ( $T > 225^{\circ}\text{C}$ ) (Saptadji, 2001). Dalam sistem panasbumi, fluida primer pada reservoir dapat diklasifikasikan menjadi tiga tipe utama, yaitu sistem dominasi cairan (*liquid dominated system*), sistem dominasi uap (*steam dominated system*), dan *boiling geothermal system* yang terdiri dari campuran cairan dengan akumulasi uap dalam jumlah kecil (Sumotarto, 2015).

### 3.1.3 Batuan Penudung (*Caprock*)

Batuan penudung (*caprock*) dalam sistem panasbumi memiliki peran untuk mencegah fluida termal keluar atau bocor ke permukaan dari batuan reservoir. Batuan penudung biasanya merupakan batuan dengan sifat permeabilitas yang rendah (*impermeable*) (Rachmaningtias dkk., 2014). Batuan penudung dalam panasbumi biasanya dikenal sebagai *claycap*, yaitu batuan lempung hasil alterasi

argilik dengan tingkat impermeabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan *caprock* pada umumnya (Richard dkk., 2013).

### **3.1.4 Struktur Geologi**

Struktur geologi dalam sistem panasbumi berperan sebagai area rembesan, yaitu sistem yang meloloskan air (permeabel). Dalam sistem panasbumi, struktur geologi dapat berupa perlipatan, patahan, rekahan, atau ketidakselarasan. Struktur geologi memiliki peran yang penting sebagai area keluaran (rembesan) dan jalur manifestasi permukaan (Mulyani dkk., 2022). Patahan pada umumnya berfungsi sebagai indikator keberadaan sistem panasbumi sekaligus menjadi acuan lokasi sumur produksi. Struktur patahan akan berperan sebagai perangkap fluida dan jalur migrasi, baik pada zona resapan (*recharge area*) maupun zona keluaran (*discharge area*) (Dickson & Fanelli, 2004).

### **3.1.5 Daerah Resapan (*Recharge Area*)**

Daerah resapan (*recharge area*) merupakan daerah tempat aliran air tanah bergerak menuju ke bawah permukaan bumi dan akan terakumulasi untuk memenuhi cadangan air pada reservoir. Air pada daerah resapan (*recharge area*) akan masuk ke dalam bumi melalui rekahan atau patahan pada lapisan batuan. *Recharge area* akan menampung *freshwater* atau hasil dari presipitasi, seperti danau, sungai, dan laut. Umumnya *recharge area* memiliki elevasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *discharge area*. Daerah resapan (*recharge area*) yang terjaga dengan baik akan menopang tekanan di dalam fluida reservoir karena pori reservoir akan terisi secara kontinu (Hendrasto dkk., 2018).

## **3.2 Gelombang Seismik**

Gelombang seismik adalah gelombang mekanik yang berasal dari dalam bumi. Bumi tersusun atas beberapa lapisan batuan dengan karakteristik elastisitas yang berbeda-beda. Sifat tidak homogen dari lapisan-lapisan ini memungkinkan gelombang seismik merambat, dengan sebagian energi gelombangnya akan dipantulkan dan sebagian lainnya akan diteruskan ke lapisan batuan bawah permukaan bumi (Telford dkk., 1990).

Berdasarkan perambatannya gelombang seismik terbagi menjadi 2 jenis, yaitu gelombang yang merambat melalui interior bumi atau dikenal sebagai gelombang badan (*body wave*) dan gelombang yang merambat melalui permukaan bumi atau dikenal sebagai gelombang permukaan (*surface wave*) (Gadallah & Fisher, 2008).

### 3.2.1 Gelombang Badan

Gelombang badan (*body wave*) merupakan gelombang seismik yang menjalar dalam medium yang elastik ke seluruh bagian dalam bumi. Berdasarkan gerak partikelnya, gelombang badan (*body wave*) terdiri atas 2 jenis, yaitu gelombang primer (*P wave*) dan gelombang sekunder (*S wave*) (Hutahean dkk., 2022).

#### 1) Gelombang P (*P Waves*)

Gelombang P atau gelombang primer merupakan gelombang seismik yang memiliki kecepatan paling tinggi dibandingkan dengan gelombang yang lain. Gelombang P termasuk gelombang longitudinal dengan arah rambatnya sejajar dengan arah gerak partikelnya dan gelombang ini dapat merambat di berbagai medium, seperti padat, cair, dan gas (Maryanto, 2016). Kecepatan gelombang P dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu Konstanta Lamé ( $\lambda$ ), rigiditas ( $\mu$ ), dan densitas ( $\rho$ ) dari medium perambatannya. Kecepatan gelombang P dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 1 (Shearer, 2009).

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1)$$

Keterangan:

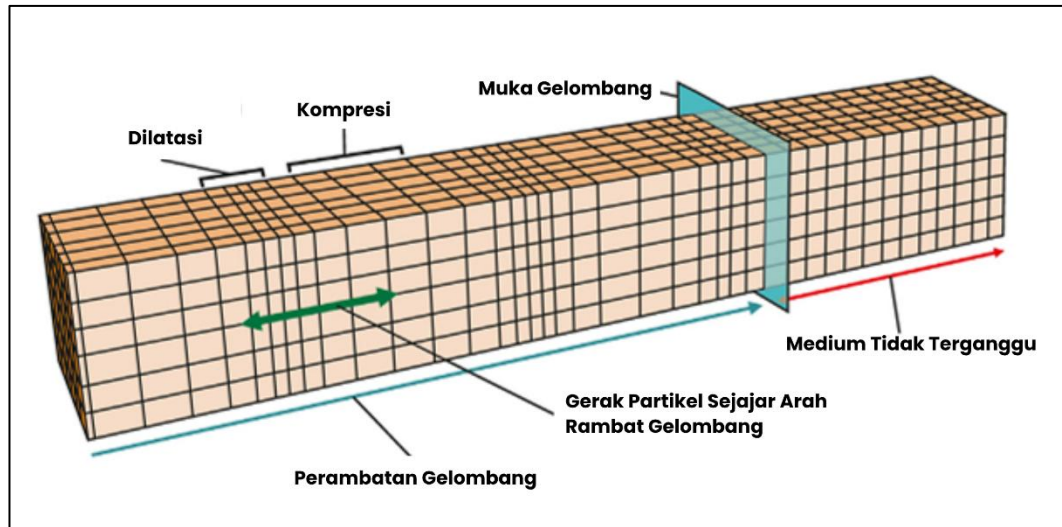
$v_p$  : Kecepatan gelombang P (m/s)

$\lambda$  : Konstanta Lamé (N/m<sup>2</sup>)

$\mu$  : Rigiditas (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  : Densitas (kg/m<sup>3</sup>)

Gelombang P terjadi karena adanya tekanan, sehingga memiliki kecepatan yang tinggi. Karena memiliki kecepatan tinggi gelombang P memiliki waktu tiba terlebih dahulu dibandingkan gelombang S. Ilustrasi dari gelombang P dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Arah gerak partikel dan arah penjalaran gelombang P (Cox dkk., 2020)

## 2) Gelombang S (*S Waves*)

Gelombang S atau gelombang sekunder merupakan jenis gelombang transversal yang arah rambatnya tegak lurus terhadap arah gerak partikelnya. Gelombang S hanya dapat merambat pada medium padat dan tidak dapat melewati medium cair ataupun gas (Arintalofa dkk., 2020). Kecepatan gelombang S dipengaruhi oleh rigiditas ( $\mu$ ), dan densitas ( $\rho$ ) dari medium perambatannya. Kecepatan gelombang S dirumuskan pada Persamaan 2 (Shearer, 2009).

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

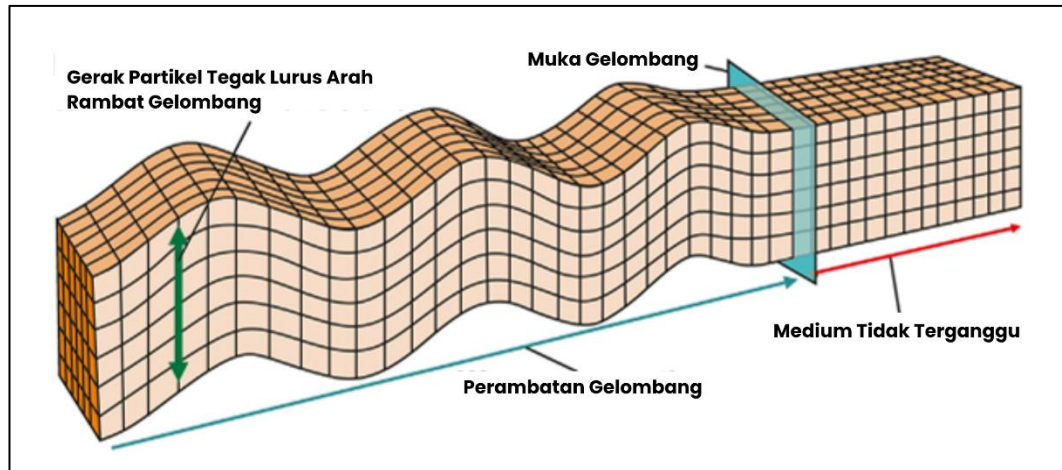
Keterangan:

$v_s$  : Kecepatan gelombang S (m/s)

$\mu$  : Rigiditas ( $\text{N/m}^2$ )

$\rho$  : Densitas ( $\text{kg/m}^3$ )

Gelombang sekunder merambat dengan kecepatan yang lebih rendah dibandingkan gelombang primer. Ilustrasi dari gelombang P dapat dilihat pada Gambar 8.



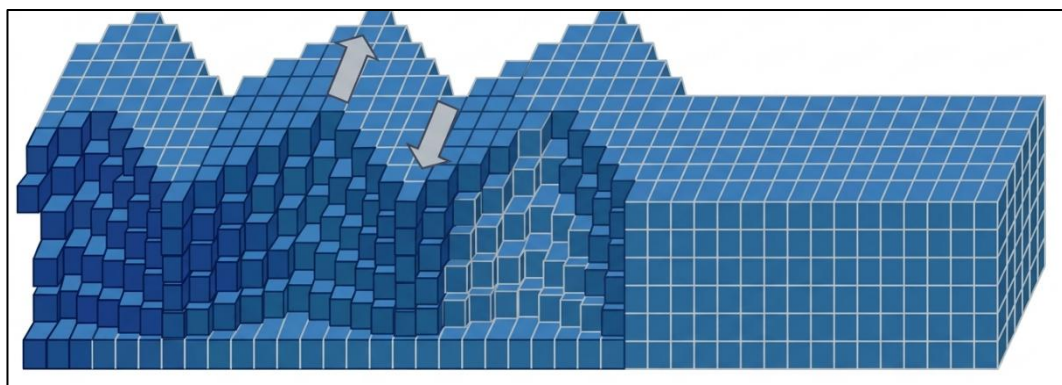
Gambar 8. Arah gerak partikel dan arah penjaralan gelombang S (Cox dkk., 2020)

### 3.2.2 Gelombang Permukaan

Gelombang permukaan (*surface wave*) adalah gelombang seismik yang hanya menjalar di permukaan bumi. Semakin masuk ke dalam bumi, amplitudo gelombang akan semakin melemah. Gelombang permukaan memiliki kecepatan yang bergantung pada frekuensi. Gelombang permukaan terdiri atas gelombang Love dan gelombang Rayleigh (Gadallah & Fisher, 2008).

#### 1) Gelombang Love

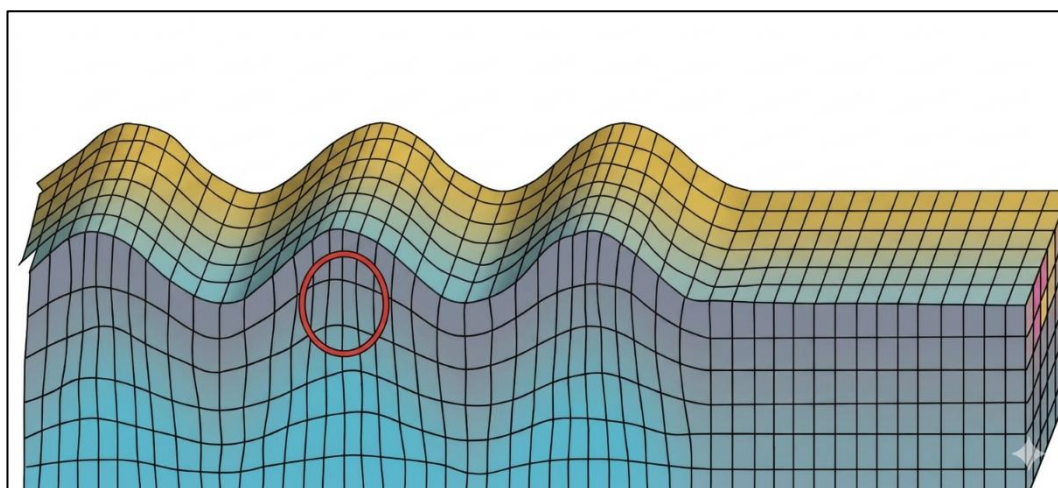
Gelombang Love merupakan gelombang permukaan yang menjalar dalam bentuk gelombang transversal. Gelombang Love memiliki kecepatan yang berada di antara kecepatan gelombang S di permukaan dan di lapisan yang lebih dalam, serta menunjukkan sifat dispersi. Gelombang Love melibatkan gerakan transversal yang sejajar dengan permukaan dan kadang disebut sebagai gelombang SH (Gadallah & Fisher, 2008). Ilustrasi perambatan gelombang Love dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Arah perambatan gelombang Love (Lowrie, 2007)

## 2) Gelombang Rayleigh

Gelombang Rayleigh adalah gelombang yang menjalar di permukaan bumi dengan pergerakan partikelnya menyerupai elips karena menjalar di permukaan. Gelombang Rayleigh disebut juga *groundroll* memiliki gerak partikel *ellips retrograde*, dengan kedalaman penetrasi sekitar tiga kali panjang gelombangnya (Maryanto, 2016). Gelombang Rayleigh merambat sepanjang permukaan bumi dan melibatkan gerakan longitudinal serta transversal dengan hubungan fase yang pasti. Amplitudo gelombang Rayleigh menurun seiring bertambahnya kedalaman, dan gerakan partikel terbatas pada bidang vertikal yang mencakup arah rambat gelombang (Gadallah & Fisher, 2008). Ilustrasi perambatan gelombang Rayleigh dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Arah perambatan gelombang Rayleigh (Lowrie, 2007)

### 3.3 Metode Seismik

Metode seismik merupakan metode geofisika yang sering digunakan dalam proses eksplorasi karena memiliki keakuratan dalam menentukan dan memodelkan kondisi struktur bawah permukaan bumi yang bersifat heterogen (Julius dkk., 2020). Metode seismik memiliki tingkat akurasi, resolusi, dan penetrasi yang baik. Metode seismik sering digunakan dalam eksplorasi hidrokarbon karena dapat memberikan gambaran keadaan bawah permukaan dengan tingkat resolusi yang tinggi dibandingkan dengan metode lainnya (Telford dkk., 1990).

Metode seismik menggunakan prinsip penjalaran gelombang yang merambat dalam suatu medium di bawah permukaan yang kemudian direfleksikan atau

direfraksikan sepanjang bidang reflektor atau bidang batas antar lapisan batuan. Setiap bidang batas atau bidang reflektor memiliki impedansi akustik yang berbeda-beda yang menyebabkan gelombang dapat terpantulkan atau terbiaskan (Badley, 1985). Metode seismik terbagi menjadi 2 jenis, yaitu metode seismik aktif dan metode seismik pasif. Kedua jenis metode ini memiliki pemanfaatan yang berbeda-beda, salah satunya pemanfaatan metode seismik pasif dalam eksplorasi sumber daya energi (Sheriff & Geldart, 1995).

### 3.4 Metode Seismik Pasif

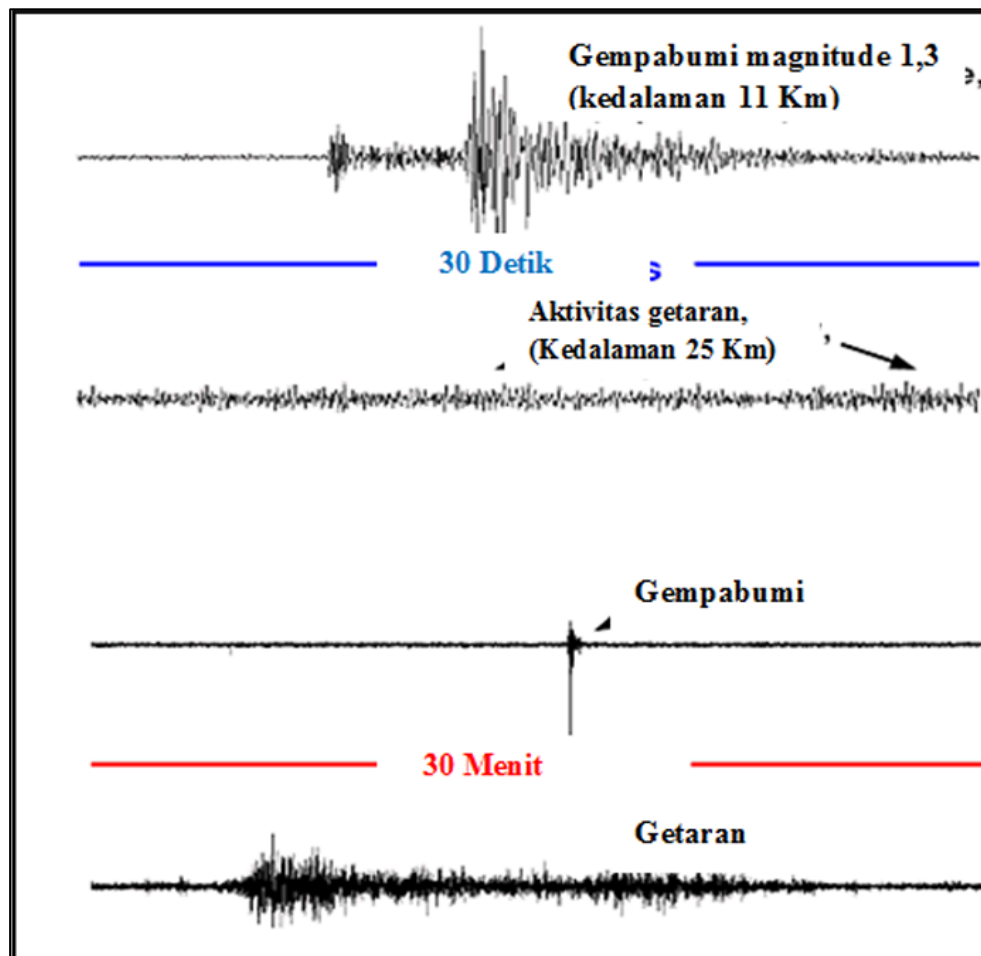
Seismik pasif merupakan metode seismik yang memanfaatkan getaran alami bumi untuk mengidentifikasi kondisi bawah permukaan. Seismik pasif pada dasarnya adalah gelombang atau getaran kecil yang terus-menerus terjadi dan ditangkap oleh lapisan batuan permukaan yang kemudian dipantulkan kembali dalam frekuensi stabil oleh struktur pembatas. Gelombang yang terjadi disebabkan oleh adanya getaran mikro di dalam bumi atau adanya aktivitas eksternal lainnya (Priscilla dkk., 2025). Sumber utama dari seismik pasif biasanya berupa gelombang alami dari aktivitas tektonik ataupun gelombang laut (Sheriff & Geldart, 1995).

Berdasarkan pemanfaatannya, sumber gelombang seismik pasif dapat dibagi menjadi 2 jenis, yaitu seismik pasif berdasarkan *event* dan seismik pasif berdasarkan *noise* (Haerudin dkk., 2019). Gambar 11 menunjukkan perbedaan antara sinyal atau getaran akibat gempa bumi dan sinyal tremor.

#### 1) Seismik Pasif Berdasarkan *Event*

Getaran atau gelombang seismik pasif yang terjadi akibat suatu peristiwa (*event*) gempa bumi dikenal sebagai *microearthquake* (MEQ). MEQ merupakan gelombang seismik yang dipicu oleh peristiwa alamiah seperti aktivitas tektonik maupun vulkanik dalam skala kecil dengan frekuensi dan amplitudonya yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan gelombang seismik pada umumnya. MEQ umumnya terjadi pada zona subduksi aktif atau pada bidang pergeseran bidang sesar, dan banyak dimanfaatkan untuk kegiatan eksplorasi sumber daya alam, termasuk panas bumi (Hilyah, 2010). Dalam eksplorasi panas bumi, MEQ digunakan untuk mengamati hasil *hydraulic fracturing* (simulasi hidraulik) proses produksi dan injeksi, identifikasi

kebocoran *casing* sumur, pemetaan patahan, mengamati pergerakan fluida pada proses injeksi, dan lain-lain (Setiawan dkk., 2017).



Gambar 11. Perbedaan sinyal tremor dan gempabumi (Haerudin dkk., 2019)

## 2) Seismik Pasif Berdasarkan *Noise*

Seismik pasif yang bersumber dari *noise* dikenal sebagai mikrotremor dan mikroseismik. Mikroseismik merupakan gelombang seismik yang memiliki ukuran yang kecil karena adanya aktivitas gelombang laut (*ocean wave peak*) ataupun aktivitas konveksi magma. Sedangkan mikrotremor merupakan getaran dengan periode pendek akibat kegiatan manusia dan fenomena alam (angin, aliran air, gelombang laut, dan variasi tekanan atmosfer) (Yuliatwati dkk., 2020). Dalam penerapannya, mikroseismik atau mikrotremor dapat digunakan untuk kegiatan monitoring *unconventional reservoirs* seperti *shale gas*, karakterisasi retakan dan mengetahui potensi produksi sumur

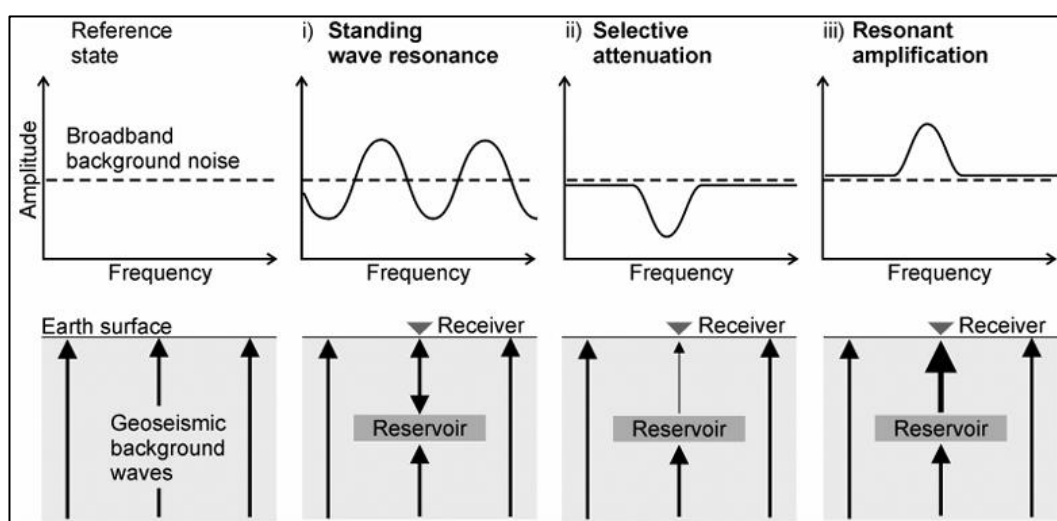
kedepannya (Zheng dkk., 2016). Salah satu pendekatan mikroseismik yang digunakan untuk eksplorasi sumber daya energi, seperti minyak dan gas bumi serta panasbumi adalah metode *low frequency passive seismic* (LFPS) (Wahyudi, 2008).

### 3.5 *Low Frequency Passive Seismic* (LFPS)

*Low Frequency Passive Seismic* (LFPS) pada awalnya merupakan metode *Direct Hydrocarbon Indicator* (DHI) dalam kegiatan eksplorasi hidrokarbon. Prinsip metode LFPS pada dasarnya mengukur interaksi gelombang alami bumi frekuensi rendah dengan fluida pada reservoir menggunakan sensor yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi (*ultrahigh sensitivity broadband seismometer*). Metode ini masih bersifat empiris berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan (Yustiza, 2022).

Metode LFPS didasarkan pada prinsip interaksi suatu sistem fluida dalam medium berpori (reservoir) yang bersifat non linier. Reservoir dipandang sebagai sistem multifasa yang bersifat *transfer characteristic* gelombang akustik non konvensional. Sehingga reservoir akan berperan sebagai konverter dari spektrum *noise* alami bumi berfrekuensi tinggi menjadi ke arah yang lebih rendah (Dangel dkk., 2003; Wahyudi, 2008).

Menurut Saenger dkk., (2007), terdapat tiga jenis mekanisme yang menyebabkan respon anomali pada frekuensi rendah seperti pada Gambar 12.

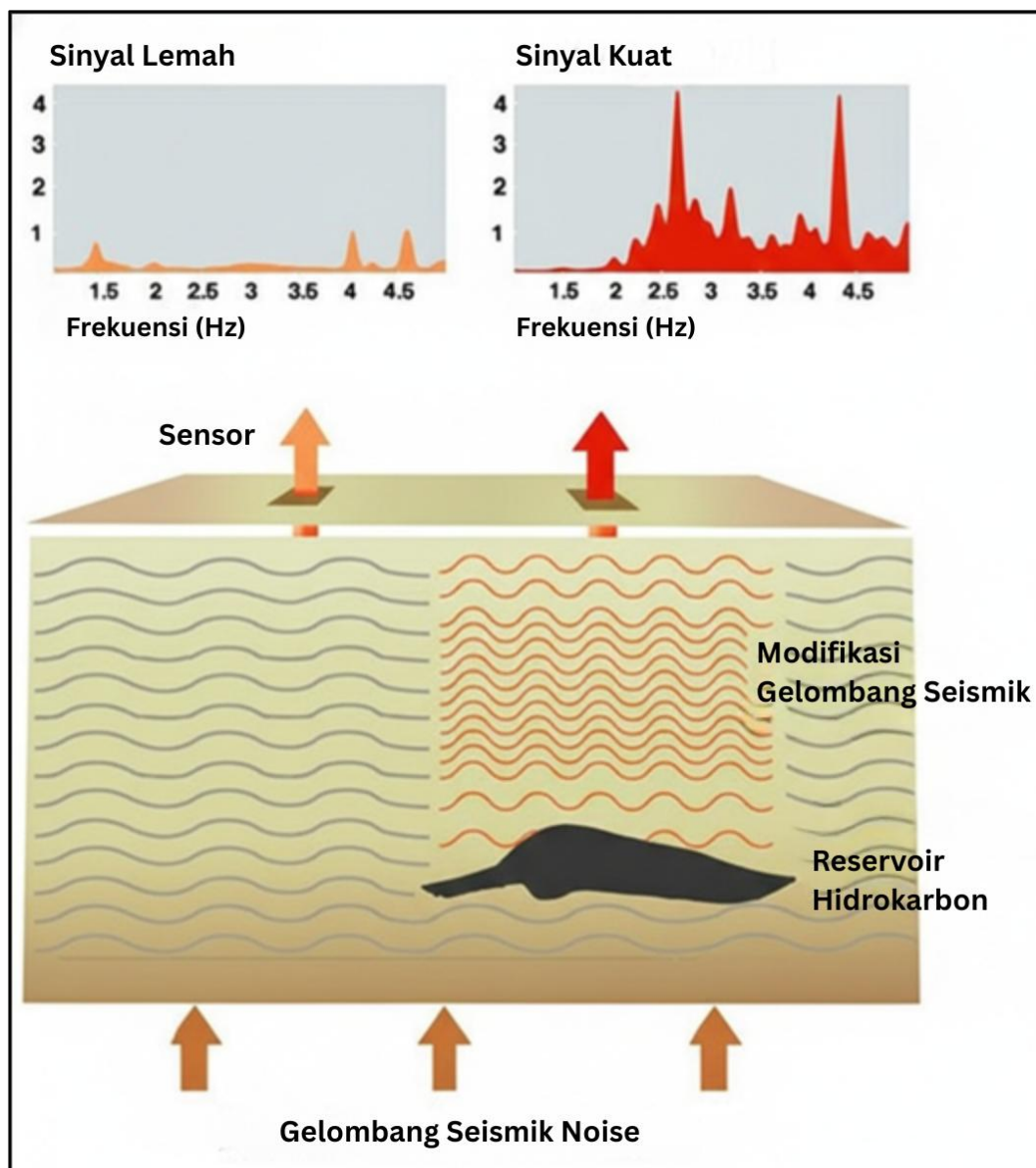


Gambar 12. Mekanisme respon frekuensi rendah (Saenger dkk., 2007)

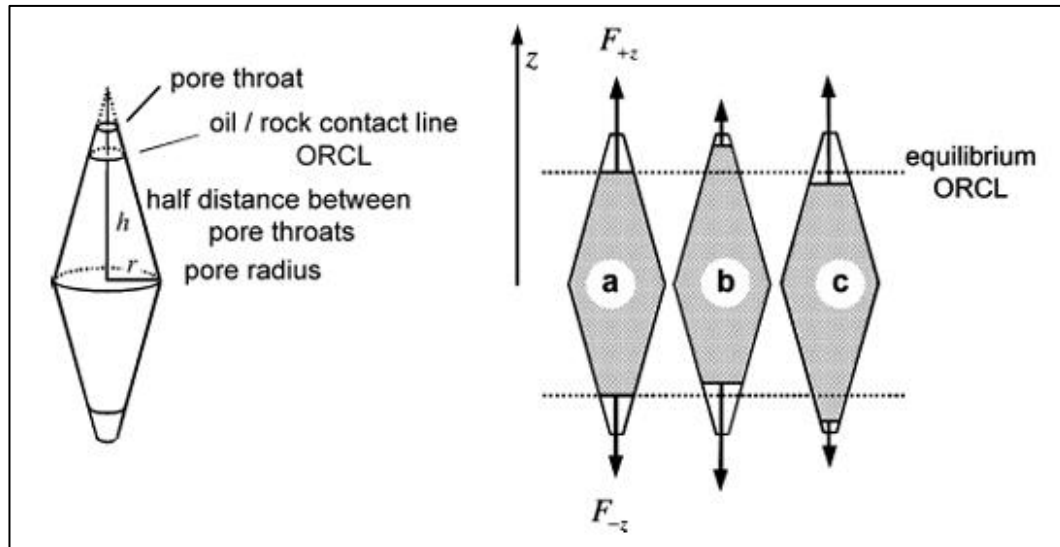
- 1) Resonansi Gelombang Tegak (*Standing Wave Resonance*)  
Spektrum anomali pada mekanisme ini terjadi karena adanya perbedaan waktu tempuh gelombang (*two way time travel*) pada saat gelombang seismik merambat dan kemudian terefleksikan atau terpantulkan karena perbedaan material antara lapisan diatas atau dibawah reservoir. Respon spektrum anomali yang terekam pada sensor terjadi karena adanya perbedaan impedansi akustik (AI) antara reservoir dan batuan diatasnya (Saenger dkk., 2007).
  
- 2) Atenuasi Selektif (*Selective Attenuation*)  
Pada mekanisme ini, spektrum anomali terbentuk ketika terjadi atenuasi pada properti elastik gelombang seismik, yaitu gelombang S (*Shear Wave*) dengan reservoir. Sifat gelombang S yang tidak dapat melalui fluida menyebabkan atenuasi yang tinggi, sehingga sensor akan menangkap respon dengan frekuensi dan amplitudo yang rendah. Salah satu model yang menjelaskan mekanisme yang dominan pada frekuensi rendah antara 1 – 10 Hz adalah model setengah kejenuhan (*patchy saturation model*) (Ebrahimi dkk., 2018).
  
- 3) Amplifikasi Resonansi (*Resonance Amplification*)  
Mekanisme ini menjelaskan terjadinya spektrum anomali karena peristiwa resonansi pada skala pori akibat peningkatan tekanan pori reservoir. Ketika gelombang alami melewati reservoir multi fasa, energi seismik yang terjebak di dalam pori memicu efek resonansi serta menciptakan tegangan antar fluida. Hal ini kemudian menyebabkan munculnya gaya pada gelembung fluida pori hingga terjadi amplifikasi resonansi pada frekuensi yang rendah. Hal ini juga terjadi pada reservoir gas (Holzner dkk., 2009; Saenger dkk., 2009).

Menurut Lambert dkk., (2009); Saenger dkk., (2009) anomali spektrum pada frekuensi rendah pada zona reservoir terjadi karena adanya proses amplifikasi resonansi pada pori reservoir. Hal ini menyebabkan reservoir akan berperan sebagai konverter yang mengubah gelombang alami menjadi gelombang P yang memiliki frekuensi tertentu. Metode *low frequency passive seismic* (LFPS) sudah banyak

diterapkan pada lapangan minyak dan gas bumi di dunia, termasuk Indonesia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spektrum anomali muncul pada rentang frekuensi 1-6 Hz (Dangel dkk., 2003), 2- 3 Hz (Rohaman dkk., 2025), dan 2-4 Hz pada lapangan panasbumi (Yustiza, 2022). Anomali kuat terjadi di atas wilayah zona reservoir dan akan menurun bahkan tidak ada ketika berada ditepi atau di zona non reservoir (Priyono dkk., 2024). Gambar 13 menunjukkan ilustrasi respon spektrum anomali hidrokarbon di sekitar zona reservoir dan zona non reservoir.



Gambar 13. Ilustrasi spektrum mikroseismik hidrokarbon (Dangel dkk., 2003)



Gambar 14. Representasi skematis dari geometri pori *bi-conical* yang menghasilkan osilasi frekuensi rendah di sepanjang arah sumbu-z (Holzner dkk., 2009)

Menurut (Holzner dkk., 2009) mikrotremor hidrokarbon merupakan peristiwa osilasi harmonik fluida pada skala pori di dalam reservoir. Mekanisme ini disebabkan oleh gaya eksternal seperti gelombang seismik laut atau gelombang seismik alami frekuensi rendah akibat proses geodinamik. Geometri pori reservoir dimodelkan dalam bentuk *bi-conical* seperti pada Gambar 14 yang merepresentasikan model linear yang menghasilkan osilasi harmonik akibat proses amplifikasi resonansi pada sumbu z atau vertikal.

Gambar 14 menunjukkan bahwa batas permukaan fluida akan membentuk ORCL (*Oil-Rock Contact Line*), yaitu kolom kontak antara batuan dan minyak.

- 1) Kondisi setimbang, cairan berada dalam kondisi stabil ketika gaya kapiler pada arah z positif ( $F_{+z}$ ) dan arah z negatif ( $F_{-z}$ ) bernilai sama atau dalam keadaan yang sama.
- 2) Simpangan positif, jika terjadi gangguan kecil yang menggeser cairan ke arah z positif, maka nilai ( $F_{+z}$ ) akan berkurang sementara ( $F_{-z}$ ) bertambah relatif terhadap titik setimbangnya. Perubahan ini menghasilkan gaya pemulih yang mendorong cairan kembali ke posisi semula (z negatif).
- 3) Simpangan negatif, prinsip yang sama berlaku jika cairan mengalami dislokasi ke arah z negatif, dengan gaya-gaya kapiler akan bekerja untuk mengembalikan cairan ke posisi setimbang.

Osilasi satu dimensi yang terjadi di dalam pori di sepanjang sumbu x dapat dicari dengan persamaan diferensial orde dua beserta fungsi respon resonansinya (Holzner dkk., 2009) seperti terlihat pada Persamaan 3, 4, dan 5.

$$f = \frac{dF_z}{dz} = \gamma \frac{2\pi r}{h} \quad (3)$$

Dengan massa yang dapat dihitung melalui Persamaan 4.

$$m = \frac{2}{3} r^2 \pi h \rho_L \quad (4)$$

Didapatkan frekuensi resonansi seperti pada Persamaan 5.

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{f}{m}} = \frac{1}{2\pi h} \sqrt{\frac{6\gamma}{r\rho_L}} \quad (5)$$

Keterangan:

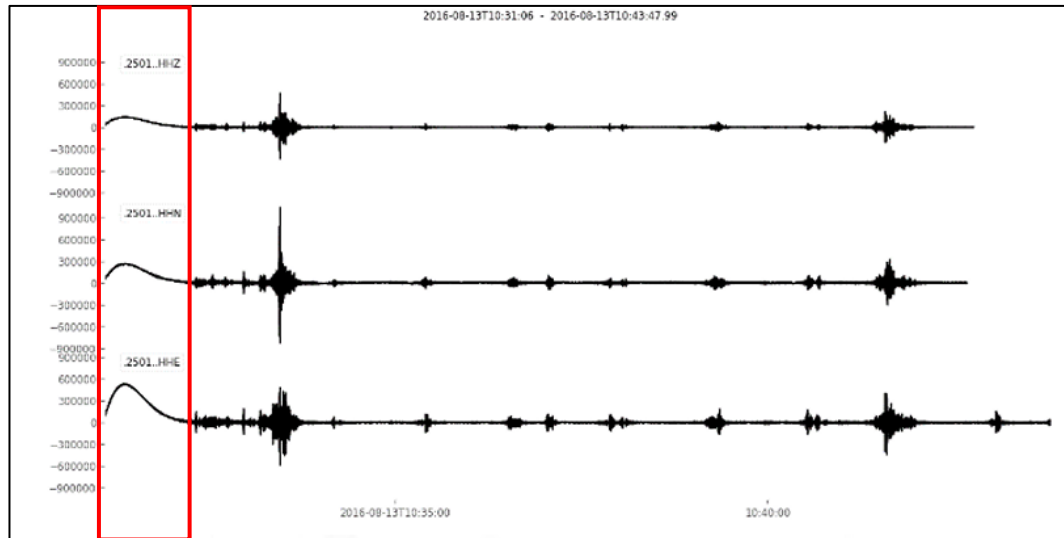
- $f$  : Frekuensi osilasi (Hz)
- $r$  : Radius pori-pori (m)
- $h$  : Setengah panjang kolom pori (m)
- $\gamma$  : Tegangan permukaan minyak (N/m)
- $m$  : Massa (Kg)
- $\rho_L$  : Densitas minyak (Kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  : Frekuensi resonansi (Hz)

### 3.6 *Processing Waveform*

Dalam pengolahan data seismik pasif dengan metode *low frequency passive seismic* (LFPS) dilakukan beberapa tahapan untuk mendapatkan kualitas *waveform* yang baik. Proses pengolahan *waveform* dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

#### 3.6.1 *Detrend Removal*

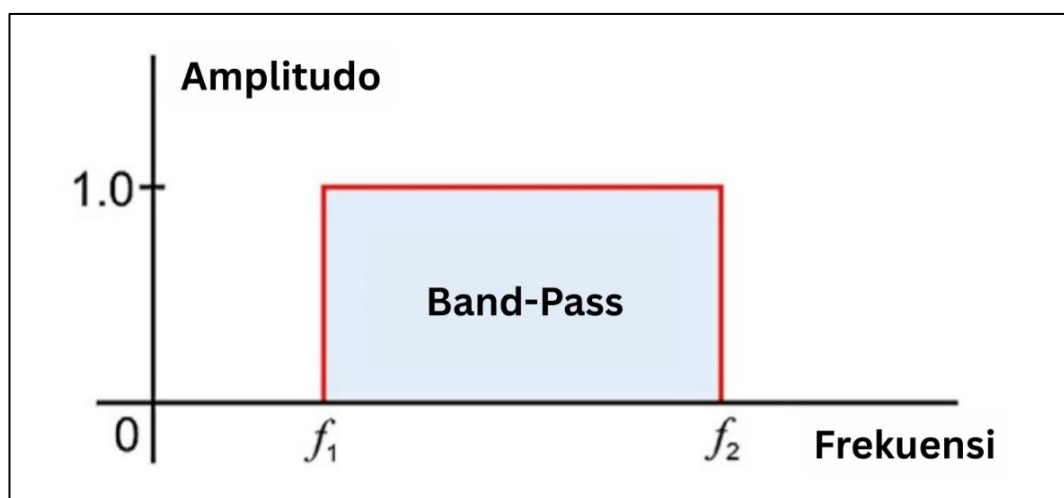
Tahapan awal dalam pengolahan data seismik pasif menggunakan metode *low frequency passive seismic* adalah melakukan *detrend removal*. *Detrend/trend removal* merupakan tahapan untuk menghilangkan efek *trend* pada data sinyal seismik pasif, sehingga data berada pada posisi yang sama atau posisi 0. Tahapan *detrend removal* dilakukan dengan mengurangi nilai dengan nilai rata-rata dari data (Yustiza, 2022). Proses *detrend removal* dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Proses *detrend removal* data pasif seismik (Yustiza, 2022)

### 3.6.2 Filtering

*Filtering* merupakan proses 'menyelamatkan' frekuensi yang diinginkan. Pada proses ini sinyal dengan frekuensi tertentu akan dilewatkan sedangkan sinyal yang memiliki frekuensi diluar yang dimaksud tidak akan dilewatkan. Terdapat beberapa jenis *filtering* yang biasanya digunakan, yaitu *low pass filter*, *high pass filter*, *band pass filter* (Bancroft, 2001). Namun, dalam pengolahan data seismik pasif, filter yang umum digunakan adalah *bandpass filter* karena biasanya gelombang seismik pasif terkontaminasi *noise* frekuensi rendah (getaran atau gelombang air laut) dan *noise* frekuensi tinggi (aktivitas manusia).



Gambar 16. *Bandpass filter* (Dondurur, 2018)

Gambar 16 merupakan ilustrasi proses *bandpass filter*. *Bandpass filter* merupakan jenis filter yang hanya akan meloloskan sinyal dengan frekuensi tertentu. Sinyal yang berada di luar rentang frekuensi yang ditentukan oleh filter, baik di bawah maupun di atasnya, akan dicegah atau diredam oleh rangkaian *bandpass filter* (Ramdhani dkk., 2013).

Rumus umum untuk merancang *bandpass filter* (pita lebar) dalam konteks pengolahan data seismik adalah menggunakan fungsi transfer filter yang didasarkan pada domain frekuensi. Persamaan untuk merancang filter *bandpass* dapat dilihat pada Persamaan (6)

$$H(f) = \left[1 - \left(\frac{f}{f_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{f_2}{f}\right)^2\right] \quad (6)$$

Keterangan:

$H(f)$  : Fungsi transfer filter pada frekuensi  $f$  (Hz)

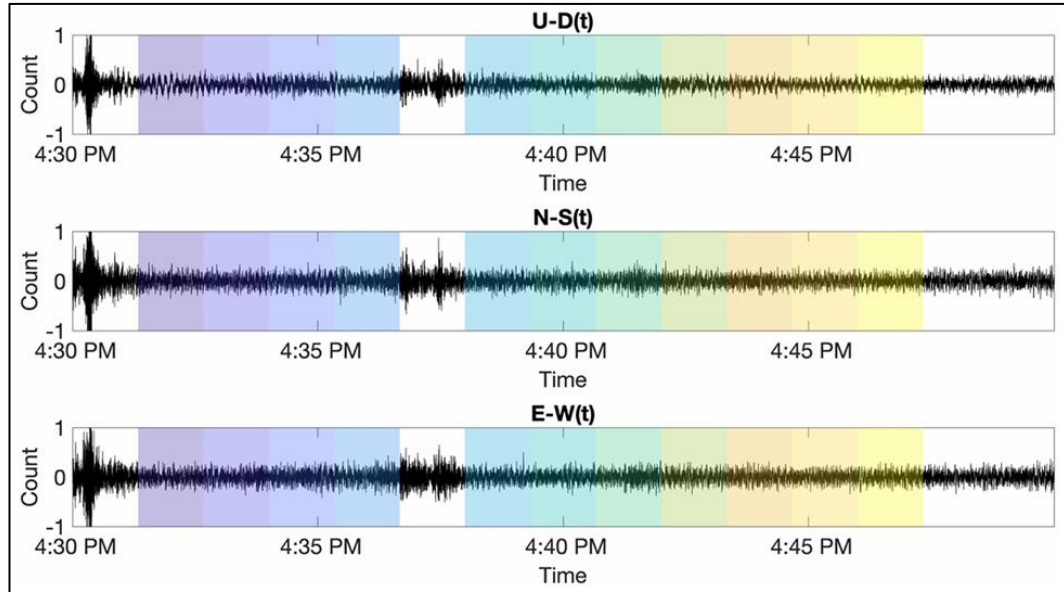
$f$  : Frekuensi (Hz)

$f_1$  : Frekuensi *cutoff* bawah dari filter *bandpass* (Hz)

$f_2$  : Frekuensi *cutoff* atas dari filter *bandpass* (Hz)

### 3.6.3 *Windowing*

Data mentah (*raw data*) hasil pengukuran tersimpan dalam domain waktu dengan sinyal yang terekam masih terganggu dengan adanya *noise* atau gangguan. Untuk menghilangkan *noise* atau gangguan pada data dilakukan proses *windowing*, yaitu tahapan untuk mereduksi *noise* dengan membagi data menjadi beberapa bagian segmen berdasarkan rentang waktu tertentu (Valentin, 2025). *Windowing* bertujuan untuk menjaga sinyal tetap bersih guna menghitung atribut spektral yang merepresentasikan keberadaan reservoir secara akurat. Banyak jendela data dihitung untuk memperkuat anomali yang berhubungan dengan hidrokarbon (Priyono dkk., 2024). Gambar 17 menunjukkan proses *windowing* data seismik pasif. Setiap jendela berwarna merepresentasikan sinyal bersih yang digunakan dalam langkah pemrosesan selanjutnya.



Gambar 17. Proses *windowing* data seismik pasif (Priyono dkk., 2024)

### 3.7 Analisis Polarisasi

Analisis polarisasi merupakan proses untuk mengetahui gerakan partikel dalam fungsi waktu. Analisis polarisasi dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Principal-Components Analysis* (PCA) (Jurkevics, 1988). Analisis polarisasi berfungsi untuk mengetahui arah datang gelombang dan sifat perambatan serta gerak partikel gelombang sehingga dapat diketahui keberadaan reservoir (Saenger dkk., 2007). Dalam pengolahan data seismik pasif menggunakan metode *low frequency passive seismic* (LFPS), analisis polarisasi digunakan sebagai *quality control* (QC) *waveform* untuk mengetahui arah datang dan penjalaran sinyal berasal dari bidang vertikal atau horizontal (Valentin, 2025).

Tahap pertama proses analisis polarisasi adalah menerapkan *bandpass filter* untuk sinyal dari ketiga komponen. Kemudian dilakukan perhitungan *autovariance* dan *crossvariance* terhadap data seismik pasif tiga komponen tersebut dengan menggunakan Persamaan 7, 8, dan 9 (Saenger dkk., 2009).

$$C_{ij} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N u_i(s) u_j(s) \right] \quad (7)$$

Keterangan:

$C_{ij}$  : *Crossvariance* data pasif seismik pada waktu tertentu (s)

$N$  : Jumlah sampel data dalam satu (*window*) (s)

$ij$  : Komponen dari x (NS), y (EW), z (UD) (s)

$u_i$  : Amplitudo sinyal pada komponen ke- $i$  pada sampel ke- $s$

$u_j$  : Amplitudo sinyal pada komponen ke- $j$  pada sampel ke- $s$

Selanjutnya dilakukan perhitungan matriks *covariance* dengan menggunakan Persamaan 8.

$$C = \begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{xy} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{xz} & C_{yz} & C_{zz} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Keterangan

$C$  : Matriks *covariance* data pasif seismik pada waktu tertentu

$x$  : Komponen sinyal utara-selatan (NS)

$y$  : Komponen sinyal timur-barat (EW)

$z$  : Komponen sinyal vertikal (UD)

Berdasarkan Persamaan 7 dan Persamaan 8 dilakukan perhitungan nilai eigen dan vektor eigen yang digunakan untuk mengetahui besar energi dan arah gerak sinyal dengan menggunakan Persamaan 9 (Saenger dkk., 2009).

$$(C - I\lambda)p = 0 \quad (9)$$

Keterangan:

$C$  : Matriks *covariance* data pasif seismik pada waktu tertentu

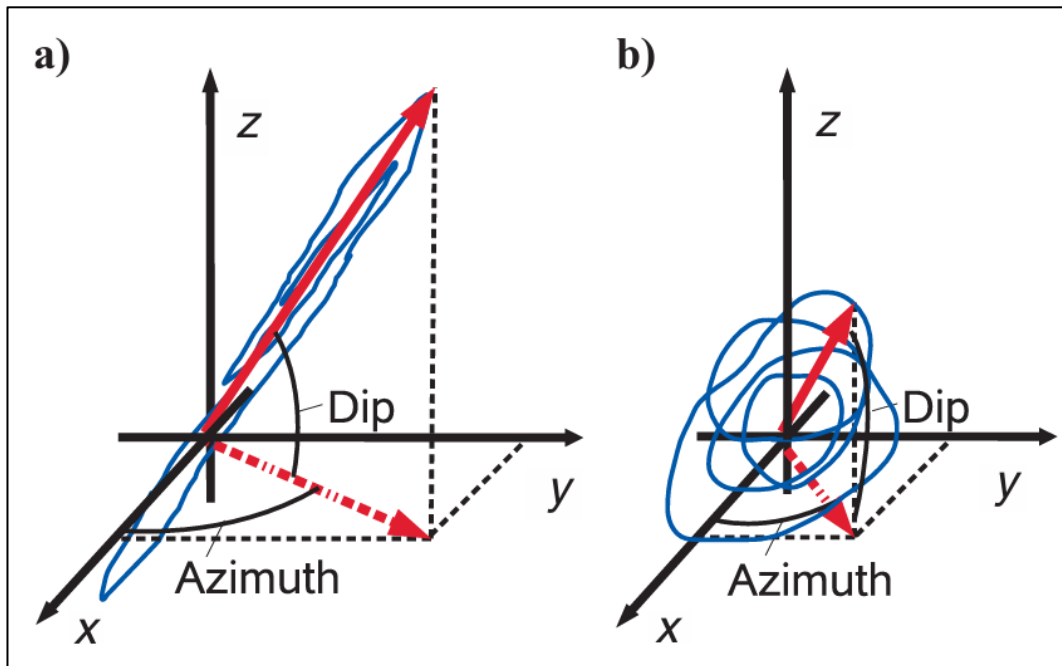
$I$  : Matriks identitas

$\lambda$  : Nilai eigen

$p$  : Vektor eigen

Gambar 18 menunjukkan demonstrasi atribut polarisasi. Garis berwarna biru menunjukkan plot vektor eigen terbesar dalam ruang 3D terhadap waktu yang menggambarkan dinamika atau gerakan osilasi partikel. Garis merah solid menunjukkan vektor eigen terbesar, sedangkan panjang dari garis merah tersebut merepresentasikan *rectilinearity*. Nilai *rectilinearity* yang tinggi menandakan bahwa arah dominan gerak partikel sejajar dengan sumbu vertikal yang merepresentasikan zona reservoir. Nilai atau besar atribut *dip* diukur dari bidang horizontal kearah vertikal. Nilai *dip* akan merepresentasikan arah sinyal yang datang dari arah vertikal. Sedangkan nilai *azimuth* diukur dari sumbu X positif

berlawanan arah jarum jam. Azimuth berfungsi untuk mengetahui arah datang sinyal secara horizontal (Saenger dkk., 2009).



Gambar 18. Demonstrasi atribut polarisasi (a) *high azimuth, medium dip, dan high rectilinearity*; (b) *medium azimuth, high dip, dan low rectilinearity* (Saenger dkk., 2009)

Atribut polarisasi tidak divisualisasikan dalam bentuk peta, melainkan dilakukan analisis dari masing-masing stasiun untuk mengetahui arah datang dan arah perambatan gelombang. Atribut polarisasi umumnya dikorelasikan dengan atribut frekuensi rendah untuk mengetahui keberadaan reservoir. Keberadaan reservoir dapat dilakukan dengan perhitungan nilai atribut polarisasi seperti *dip*, *azimuth*, *rectilinearity*, dan *planarity*. Berdasarkan Persamaan 9, nilai *dip* dan *azimuth* dapat diketahui dari vektor eigen terbesar, sedangkan nilai *rectilinearity* dan *planarity* direpresentasikan oleh nilai eigen terbesar. Nilai eigen terbesar digunakan untuk melihat kuat sinyal, dengan parameter nilai 0 hingga 1 yang menunjukkan arah penjalaran sinyal yang linear (Akbar dkk., 2013).

Besar nilai *dip*, *azimuth*, dan *rectilinearity* dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 10, 11, dan 12 berikut (Saenger dkk., 2009).

$$L = 1 - \left( \frac{\lambda_2 + \lambda_3}{2\lambda_1} \right) \quad (10)$$

$$\phi = \arctan - \left( \frac{p_1(z)}{\sqrt{p_1(x)^2 + p_1(y)^2}} \right) \quad (11)$$

$$\theta = \arctan - \left( \frac{p_1(y)}{p_1(x)} \right) \quad (12)$$

Keterangan:

$L$  : Rectilinearity

$\phi$  : Dip ( $^{\circ}$ )

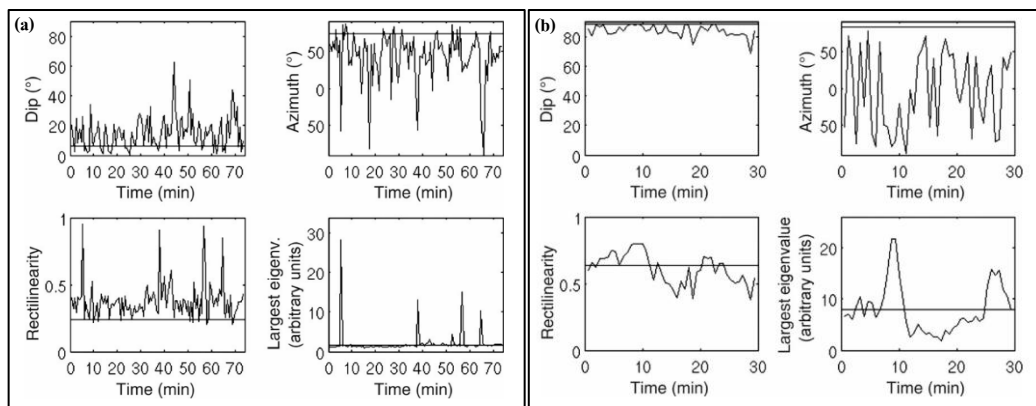
$\theta$  : Azimuth ( $^{\circ}$ )

$\lambda$  : Nilai eigen

$p_1(x)$  : Vektor eigen pada arah utara-selatan (NS)

$p_1(y)$  : Vektor eigen pada arah timur-barat (EW)

$p_1(z)$  : Vektor eigen pada arah vertikal (UD)

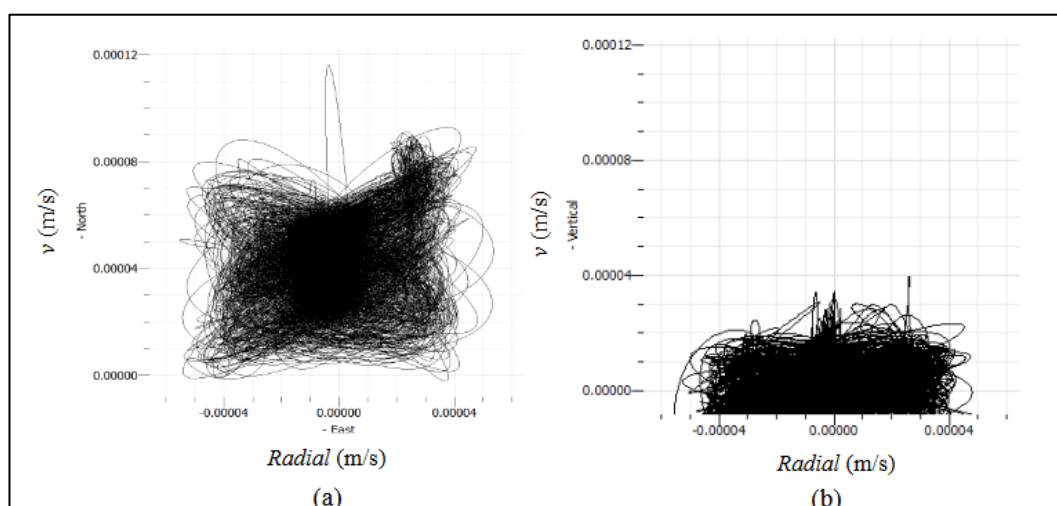


Gambar 19. Respon atribut polarisasi (a) zona non reservoir; (b) zona reservoir (Saenger dkk., 2009)

Gambar 19 menunjukkan pengaplikasian respon atribut polarisasi data seismik pasif pada zona reservoir dan non reservoir. Untuk mengidentifikasi keberadaan reservoir ada beberapa pola trend pada atribut polarisasi dalam berbagai studi dan penelitian terkait seismik pasif. Berdasarkan Gambar 15, zona reservoir ditandai dengan nilai *dip* yang tinggi ( $\phi > 80^{\circ}$ ) dan *azimuth* yang kuat dan tidak stabil serta nilai *rectilinearity* yang tinggi ( $> 0,5$ ). Sedangkan pada zona non reservoir ditandai dengan nilai *dip* yang relatif kecil ( $\phi \sim 20^{\circ}$ ) dan *azimuth* yang lebih stabil serta memiliki nilai *rectilinearity* yang lebih rendah ( $< 0,5$ ) (Saenger dkk., 2009).

### 3.8 Particle Motion

Analisis pergerakan partikel (*particle motion*) biasanya digunakan dalam studi gempa bumi untuk menentukan episenter dan hiposenter, dalam studi panas bumi untuk menentukan gempa mikro (*microearthquake*) akibat aktivitas hidrotermal di bawah permukaan (Nurhanafi dkk., 2023). Analisis pergerakan partikel dapat dilakukan terhadap rekaman data seismik pasif 3 komponen, yaitu komponen vertikal, komponen horizontal timur-barat, dan komponen horizontal utara-selatan untuk menentukan arah sumber penyebab terjadinya getaran (Kurnia & Maryanto, 2015; Nurhanafi dkk., 2023). Resultan gerak partikel (*particle motion*) akan membentuk pola bulatan yang menandakan bahwa pergerakan partikel arah horizontal tidak memiliki arah tertentu atau menandakan bahwa titik pengukuran berada tepat di area aliran fluida bawah permukaan (Bahri dkk., 2021; Marbun & Pohan, 2024). Gambar 20 menunjukkan contoh analisis *particle motion*.

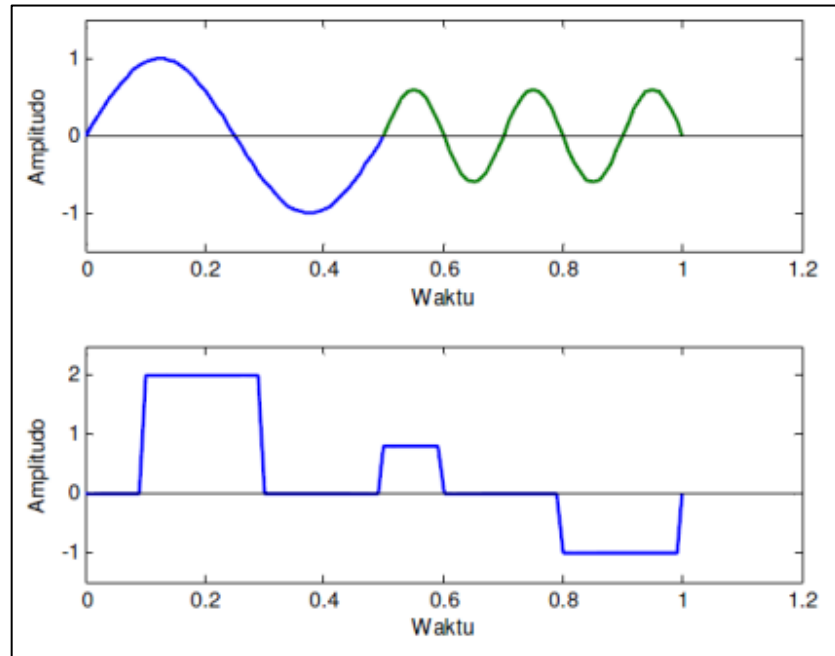


Gambar 20. *Particle motion* (a) bidang horizontal; (b) bidang vertikal (Marbun & Pohan, 2024)

### 3.9 Fast Fourier Transform (FFT)

*Fast Fourier Transform* (FFT) merupakan algoritma matematika yang digunakan untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (DFT) secara efektif dan efisien (Riyani dkk., 2019). *Fast Fourier Transform* (FFT) adalah metode transformasi operasi matematika yang mengubah sinyal analog dengan domain spasial atau waktu menjadi sinyal digital berdomain frekuensi. *Fast Fourier Transform* (FFT) memungkinkan perhitungan transformasi Fourier diskrit

dilakukan dengan lebih cepat dan efisien melalui berbagai proses analisis yang melibatkan *filtering* (Kusuma, 2021). Gambar 21 menunjukkan ilustrasi sinyal analog dan sinyal digital.



Gambar 21. Sinyal analog (atas) dan sinyal digital (bawah) (Sipasulta dkk., 2014)

*Fast Fourier Transform* (FFT) dapat didefinisikan melalui persamaan 13 (Kusuma, 2021).

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (13)$$

Keterangan:

$S(f)$  : Sinyal dalam domain frekuensi (*frequency domain*)

$s(t)$  : Sinyal dalam domain waktu (*time domain*)

$e^{-j2\pi ft}$  : Konstanta nilai sebuah sinyal

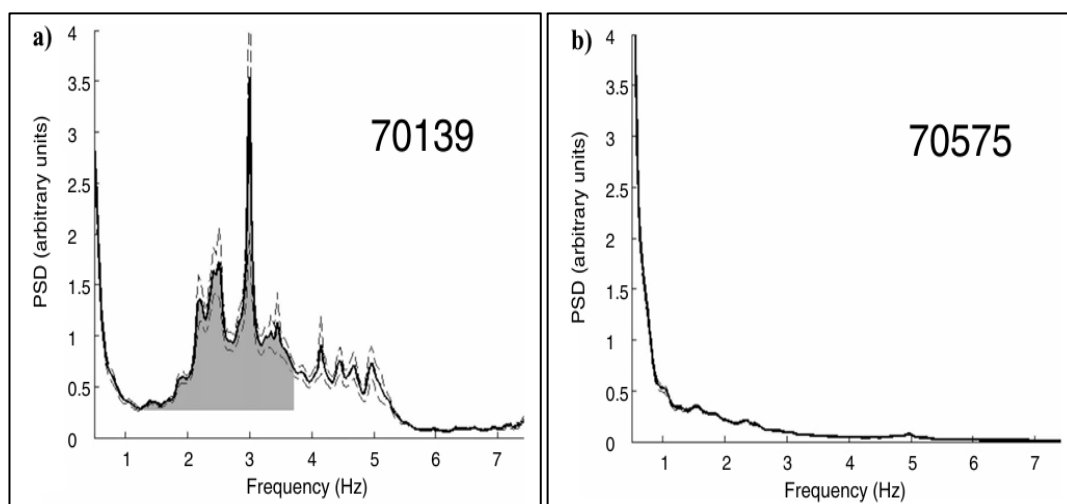
$f$  : Frekuensi (Hz)

$t$  : Waktu (s)

### 3.10 *Power Spectral Density*

*Power Spectral Density* (PSD) merepresentasikan distribusi energi dan kekuatan rata-rata sinyal pada interval frekuensi tertentu. Menurut (Priyono dkk., 2024), keberadaan fluida pada zona reservoir akan menyebabkan peningkatan nilai energi sinyal pada frekuensi rendah. Hal ini akan tercermin sebagai puncak

amplitudo atau spektrum pada kurva *Power Spectral Density* (PSD). Amplitudo spektral komponen vertikal (PSD-Z) dapat memetakan kekuatan relatif sinyal di atas wilayah reservoir dan akan tercermin juga pada komponen horizontal utara-selatan (PSD-N) dan komponen horizontal timur-barat (PSD-E) (Dangel dkk., 2003). Gambar 22 mengilustrasikan penerapan atribut *Power Spectral Density* (PSD) pada data seismik pasif yang direkam di atas zona reservoir dan zona non reservoir.



Gambar 22. Respon spektrum seismik pasif (a) zona reservoir; (b) zona non reservoir (Saenger dkk., 2009)

Estimasi nilai *Power Spectral Density* (PSD) dilakukan dengan Metode Welch (1967) atau yang sering disebut sebagai *veraged periodogram*. Secara teknis, metode ini memecah sinyal menjadi beberapa segmen jendela (*window*) yang saling tumpang tindih (*overlapping*). Setiap segmen tersebut kemudian diproses melalui tahap *tapering* sebelum dihitung nilai PSD-nya. Hasil akhirnya diperoleh dengan merata-ratakan nilai PSD dari seluruh segmen untuk membentuk satu kurva PSD yang representatif. Nilai *Power Spectral Density* (PSD) dapat ditentukan berdasarkan Persamaan 14 (Welch, 1967).

$$PSD(f) = \frac{1}{f_s N} |X[f]|^2 \quad (14)$$

Keterangan:

*PSD* : *Power Spectral Density* (kJ)

$f_s$  : *Sampling frequency* (Hz)

$N$  : Jumlah sampel data

$|X[f]|^2$  : Hasil FFT dari sinyal  $|X[t]|$

Metode *low frequency passive seismic* (LFPS) berfokus pada anomali amplitudo yang muncul pada spektrum frekuensi rendah dari data seismik pasif, yakni dalam rentang 1–6 Hz (Valentin, 2025). Berdasarkan Gambar 21 dan beberapa penelitian yang telah dilakukan, respon kurva PSD akan cenderung naik pada daerah yang berada dekat dengan zona reservoir dan cenderung stabil pada daerah yang jauh dari zona reservoir. Meskipun demikian, identifikasi keberadaan reservoir dengan analisis *Power Spectral Density* (PSD) perlu divalidasi dengan atribut seismik pasif lainnya (Kazantev dkk., 2017; Saenger dkk., 2009).

### 3.11 *Vertical to Horizontal Spectral Ratio* (VHSR)

*Vertical to horizontal spectral ratio* (VHSR) merupakan atribut anomali spektral dengan membandingkan komponen vertikal dan horizontal yang disebut sebagai VH Rasio. Rasio spektral ini menormalkan spektrum pada komponen vertikal terhadap komponen horizontal. Dengan asumsi bahwa gelombang merambat secara vertikal dari bawah dan resonansi gelombang P mendominasi, maka energi anomali akan lebih tinggi pada komponen vertikal (Lambert dkk., 2009; Saenger dkk., 2009). Dibandingkan dengan PSD-IZ, kuantifikasi VH rasio memiliki sifat yang lebih stabil terhadap waktu dan dapat memberikan respon yang cukup terhadap sifat batuan di bawah permukaan (Priyono dkk., 2024).

Pengembangan atribut rasio spektral ini didasari oleh temuan adanya fenomena lembah (*trough*) pada rasio *Horizontal to Vertical* (H/V) di rentang frekuensi tertentu. Fenomena ini diidentifikasi oleh Dangel dkk. (2003) sebagai anomali spektral yang berkorelasi dengan keberadaan reservoir hidrokarbon. Sebagai bentuk adaptasi terhadap karakteristik anomali tersebut, digunakanlah rasio *vertical to horizontal* (V/H). Pada grafik *vertical to horizontal* (V/H) yang terkait dengan anomali reservoir akan tampak puncak (*peak*) pada frekuensi tertentu (Saenger dkk., 2009).

Tujuan utama dari normalisasi terhadap komponen horizontal ini adalah untuk mengeliminasi gangguan atau pengaruh gerakan horizontal. Hal ini memungkinkan pemisahan sinyal yang lebih bersih, sehingga respons spektral yang

berkaitan dengan keberadaan reservoir pada komponen vertikal dapat terlihat lebih kontras. VH rasio dapat dihitung menggunakan Persamaan 15 (Priyono dkk., 2024).

$$\frac{V}{H}(f) = \frac{V(f)}{\sqrt{\frac{1}{2}H_{NS}^2(f)+H_{EW}^2(f)}} \quad (15)$$

Keterangan:

$\frac{V}{H}(f)$  : Rasio V/H (Hz)

$V(f)$  : Komponen spektrum vertikal (Hz)

$H_{NS}$  : Komponen spektrum horizontal utara-selatan (Hz)

$H_{EW}$  : Komponen spektrum horizontal timur-barat (Hz)

Karena rasio spektral V/H menormalkan komponen vertikal terhadap komponen horizontal, atribut ini bersifat independen terhadap atribut PSD-IZ (Saenger dkk., 2009). Perhitungan nilai VH rasio juga dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 16 (Kazantev dkk., 2017).

$$\frac{V}{H} = \frac{PSD_Z}{\sqrt{\frac{1}{2}PSD_N^2+PSD_E^2}} \quad (16)$$

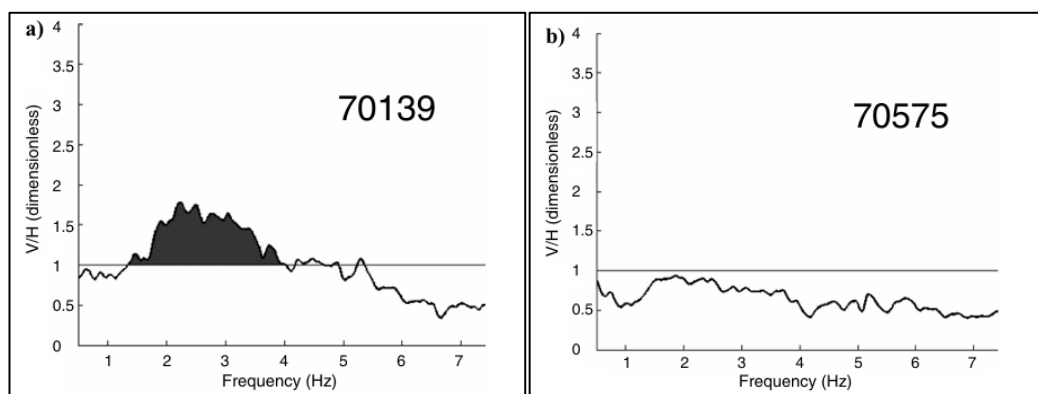
Keterangan:

$\frac{V}{H}$  : Rasio V/H

$PSD_Z$  : Nilai PSD pada komponen vertikal

$PSD_N$  : Nilai PSD pada komponen horizontal utara-selatan

$PSD_E$  : Nilai PSD pada komponen horizontal timur-barat



Gambar 23. Respon VH rasio (a) zona reservoir; (b) zona non reservoir (Saenger dkk., 2009)

Gambar 23 merepresentasikan penerapan atribut V/H pada zona reservoir dan non reservoir. Menurut penelitian yang dilakukan Saenger dkk. (2009), atribut VH rasio dapat digunakan untuk memetakan daerah yang memiliki potensi reservoir. Zona reservoir memiliki nilai V/H yang lebih tinggi ( $V/H > 1$ ). Sedangkan pada zona non reservoir memiliki nilai V/H yang jauh lebih kecil ( $V/H < 1$ ).

Menurut penelitian Kazantev dkk. (2017) pada Lapangan Panasbumi Muara Laboh, zona dengan V/H mendekati 1 berada pada sumur produksi panasbumi yang diinterpretasikan sebagai zona jalur uap Lapangan Panasbumi Muara Laboh. Valentin (2025), melakukan penelitian pada Lapangan Panasbumi Lumut Balai. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa zona yang memiliki prospek sebagai reservoir memiliki nilai  $V/H > 0,6$ . Secara umum, prinsip dasar penerapan atribut ini serupa, sehingga metode tersebut juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi reservoir pada lapangan panasbumi.

## **IV. METODOLOGI PENELITIAN**

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

Penelitian tugas akhir ini dilaksanakan di:

- Tempat : PT. Pertamina (Persero)  
Alamat : Jalan Daan Mogot Rd, Km. 16, Kecamatan Kalideres, Kota  
Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia 11840  
Waktu : Januari 2026 – Mei 2026

Jadwal penelitian secara rinci dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jadwal Penelitian

Kegiatan	Januari				Februari				Maret				April				Mei	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Studi Literatur	■																	
Persiapan Penelitian	■																	
Pengumpulan Data	■																	
Pengolahan Data	■																	
Bimbingan Proposal	■																	
Seminar Proposal	■																	
Analisis dan Interpretasi Data	■																	
Penyusunan Laporan Hasil	■																	
Bimbingan Hasil	■																	
Seminar Hasil	■																	
Revisi Hasil	■																	
Bimbingan Sidang	■																	
Komprehensif	■																	
Sidang Komprehesif	■																	

## 4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Alat dan Bahan Penelitian

No	Alat dan Bahan	Fungsi
1	Data Seismik Pasif	Data hasil pengukuran di lapangan yang digunakan dalam penelitian berformat <i>mseed</i> .
2	Visual Studio Code	Digunakan sebagai alat dalam memisahkan komponen <i>waveform</i>
3	<i>Software</i> PertaRay 2.0	Digunakan dalam proses pengolahan data, meliputi proses <i>preprocessing</i> hingga perhitungan dan analisis atribut <i>low frequency passive seismic</i>
4	<i>Software</i> Geopsy	Digunakan dalam proses pemotongan data seismik pasif
5	<i>Software</i> Surfer 2023	Digunakan sebagai alat dalam pembuatan peta hasil pengolahan dan analisis data
6	<i>Software</i> QGis 3.44	Digunakan sebagai alat dalam pembuatan peta geologi regional daerah penelitian dan peta hasil pengolahan
7	Microsoft Excel 2021	Digunakan dalam proses <i>quality control</i> data hasil pengolahan
8	Microsoft Word 2021	Digunakan untuk penyusunan laporan akhir hasil penelitian

## 4.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

### 4.3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan pada tahap awal hingga akhir kegiatan penelitian. Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan data yang berkaitan dengan penelitian. Data yang berkaitan dengan penelitian, mencakup landasan teori dan tinjauan pustaka terkait kondisi geologi daerah penelitian yang dapat mempermudah dalam proses pengolahan dan interpretasi hasil. Pada tahapan studi literatur, penulis mempelajari alur dan konsep dasar yang berkaitan dengan proses pengolahan data seismik pasif menggunakan metode *low frequency passive seismic* (LFPS).

### 4.3.2 Persiapan dan Pengumpulan Data

Tahapan persiapan dan pengumpulan data dilakukan untuk mengumpulkan data dan informasi yang digunakan dalam kegiatan penelitian. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data seismik pasif dalam format *mseed* yang terdiri dari 3 komponen sensor yaitu NS (*North-South*), EW (*East-West*) dan UD (Vertikal). Data seismik pasif diakuisisi dengan menggunakan instrumen seismometer bertipe Lennartz LE 3D-Lite dengan durasi pengukuran masing-masing stasiun selama 24 jam. Adapun spesifikasi alat Lennartz LE 3D-Lite dijelaskan dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Spesifikasi Alat Lennartz LE 3D-Lite

No	Type	Short Period
1	<i>Eigen Period</i>	1 second
2	<i>Upper Frequency Limit</i>	100 Hz
3	<i>Transduction Factor</i>	800 V/(m/s) ( <i>differential</i> )
4	<i>Output Signal</i>	3 analog voltages, max +-7V
5	<i>Temperature Range</i>	-15°C - 60°C
6	<i>RMS Noise @1Hz</i>	< 3 nm/s
7	<i>Dynamic Range</i>	> 136 dB

### 4.3.3 Pengolahan Data

Proses pengolahan data seismik pasif dengan metode *low frequency passive seismic* terdiri dari beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut.

1) **Input Data**

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data seismik pasif hasil pengukuran di lapangan dalam format *mseed*. Data seismik pasif terdiri dari 3 komponen yang telah dipisahkan, yaitu komponen utara-selatan (NS), komponen timur barat (EW), dan komponen vertikal/*up-down* (UD). Data yang digunakan sebanyak 29 stasiun pengukuran. Proses input data pada *software* PertaRay dilakukan sebanyak 29 kali karena pengolahan dilakukan per-masing-masing stasiun.

2) *Detrend Removal*

Tahap selanjutnya setelah proses input data adalah tahapan *detrend removal*. *Detrend removal* bertujuan untuk menghilangkan data *waveform* yang tidak sesuai dengan *trend* data. Proses *detrend removal* akan menghasilkan data yang berada pada titik 0 sesuai dengan kondisi pengukuran di lapangan. Tahapan *detrend removal* bertujuan untuk meningkatkan kualitas *waveform* dengan menghilangkan *noise* frekuensi rendah atau penyimpangan tren yang terjadi selama proses akuisisi. Hal ini umumnya dipicu oleh ketidakstabilan sensor saat awal pemasangan, yang menyebabkan terekamnya nilai amplitudo yang terlalu ekstrem.

3) *Filtering*

*Filtering* merupakan tahapan yang dilakukan untuk memilih frekuensi sinyal yang ingin diolah dan menghilangkan frekuensi sinyal yang tidak diinginkan. Pada penelitian ini, proses *filtering* dilakukan dengan menggunakan *bandpass filter*, yaitu dengan membatasi rentang frekuensi yang ingin di olah. Adapun rentang *bandpass filter* yang digunakan adalah 1-8 Hz sesuai dengan penelitian Kazantev dkk. (2017); Valentin (2025); Yustiza (2022) pada lapangan panasbumi.

4) *Windowing*

Tahap *windowing* dilakukan untuk membagi *waveform* ke dalam segmen-segmen waktu tertentu guna memastikan data yang digunakan terbebas dari

*noise*. Penentuan lebar jendela (*window length*) dilakukan dalam satuan detik, semakin kecil lebar jendela, semakin tinggi resolusi data yang dihasilkan. Dalam proses *windowing*, diterapkan skema *thresholding* (ambang batas) amplitudo untuk mengeliminasi data yang memiliki lonjakan amplitudo ekstrem yang diidentifikasi sebagai *noise*. Tahapan ini dilakukan *trial and error* untuk mengoptimalkan pemilihan segmen data sehingga diperoleh rasio sinyal terhadap *noise* (SNR) yang maksimal pada setiap jendela. Penelitian ini menggunakan lebar jendela 10 - 20 detik dengan *overlap* 0 – 5 detik. Ambang batas amplitudo (*threshold*) disesuaikan dengan kondisi data masing-masing stasiun.

5) Analisis Polarisasi

Analisis polarisasi dilakukan sebagai *quality control* (QC) data masing-masing stasiun pengukuran. Hal ini dilakukan untuk mengetahui arah datang sinyal atau gelombang serta arah penjalaran partikel sinyal terhadap sensor. Tahapan ini dilakukan dengan mengekstraksi beberapa atribut polarisasi, yaitu *dip*, *azimuth*, *rectilinearity*, dan *planarity*.

6) Analisis *Particle Motion*

Analisis *particle motion* dilakukan dengan melihat arah pergerakan partikel dominan untuk mengetahui arah datang sinyal sebagai validasi hasil analisis polarisasi. Pada penelitian ini, analisis *particle motion* dilakukan pada sensor arah vertikal untuk menentukan sinyal yang terekam pada sensor vertikal berasal dari bawah permukaan atau berupa sinyal permukaan.

7) *Fast Fourier Transform* (FFT)

Tahapan ini diterapkan pada data perekaman mikroseismik yang telah memenuhi standar *Quality Control* (QC) optimal berdasarkan analisis polarisasi sebelumnya. Melalui mekanisme Transformasi Fourier, data yang semula berada dalam domain waktu dikonversi ke dalam domain frekuensi untuk dilakukan ekstraksi dan analisis atribut spektral.

8) *Analisis Power Spectral Density*

Tahapan ini dilakukan ketika data seismik pasif sudah dilakukan proses FFT. Data yang sudah dalam domain frekuensi, selanjutnya akan dilakukan analisis spektrum pada masing-masing komponen, yaitu komponen vertikal (PSD-Z), komponen utara-selatan (PSD-N), dan komponen timur-barat (PSD-E). Estimasi kuat energi sinyal dilakukan melalui pendekatan *averaged periodogram* sesuai algoritma Welch (1967). Proses ini memproses data dalam domain frekuensi (hasil FFT) untuk mengekstrak atribut spektral.

9) *Analisis Vertical to Horizontal Spectral Ratio*

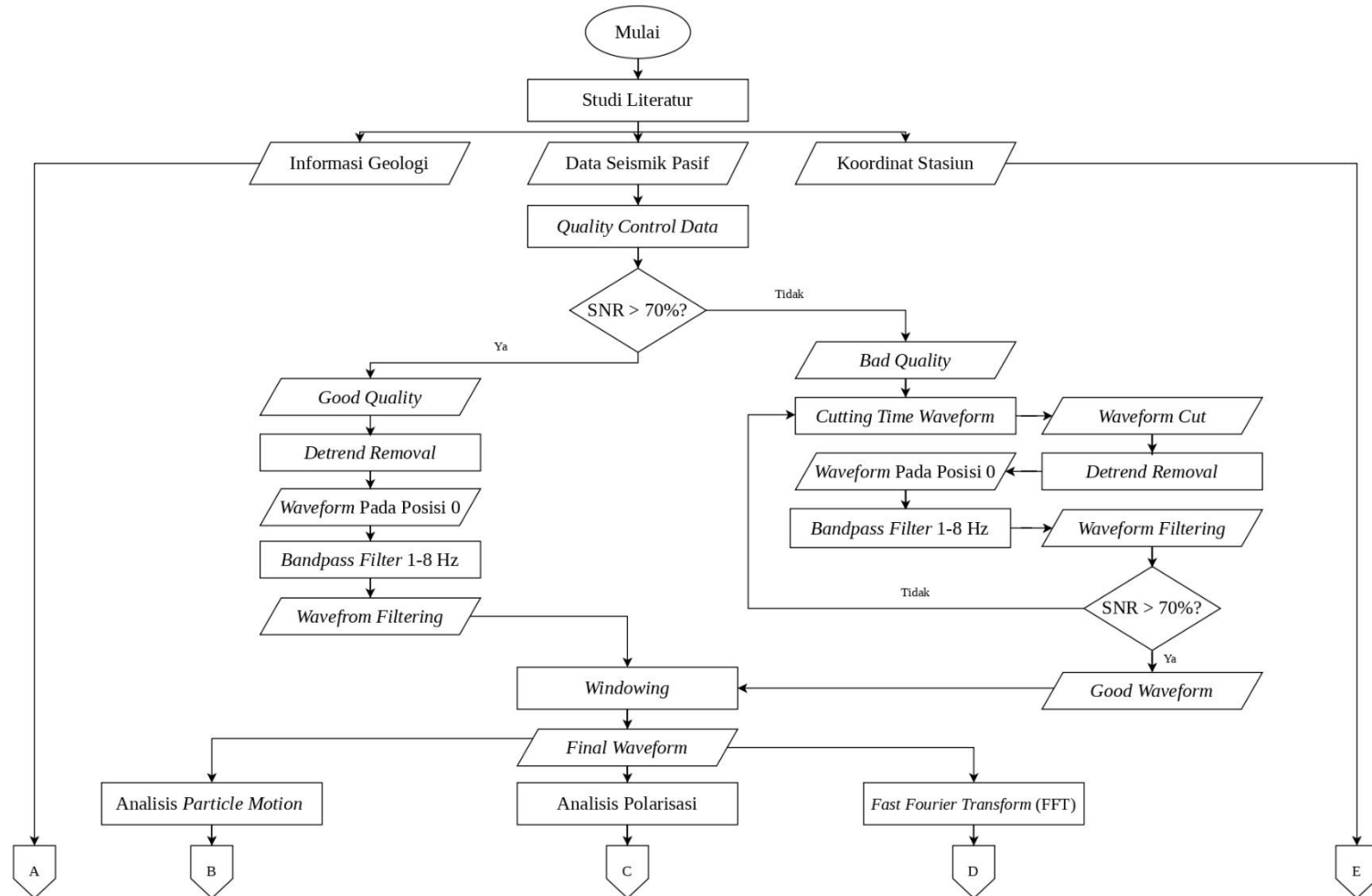
Analisis VH rasio dilakukan dengan menghitung perbandingan nilai PSD pada komponen vertikal dan komponen horizontal sesuai dengan Persamaan 16. Ekstraksi atribut VH rasio dilakukan dengan membandingkan spektral pada komponen vertikal dan horizontal. Prosedur ini bertujuan untuk memetakan distribusi energi sinyal, sehingga dapat diketahui komponen mana yang lebih dominan.

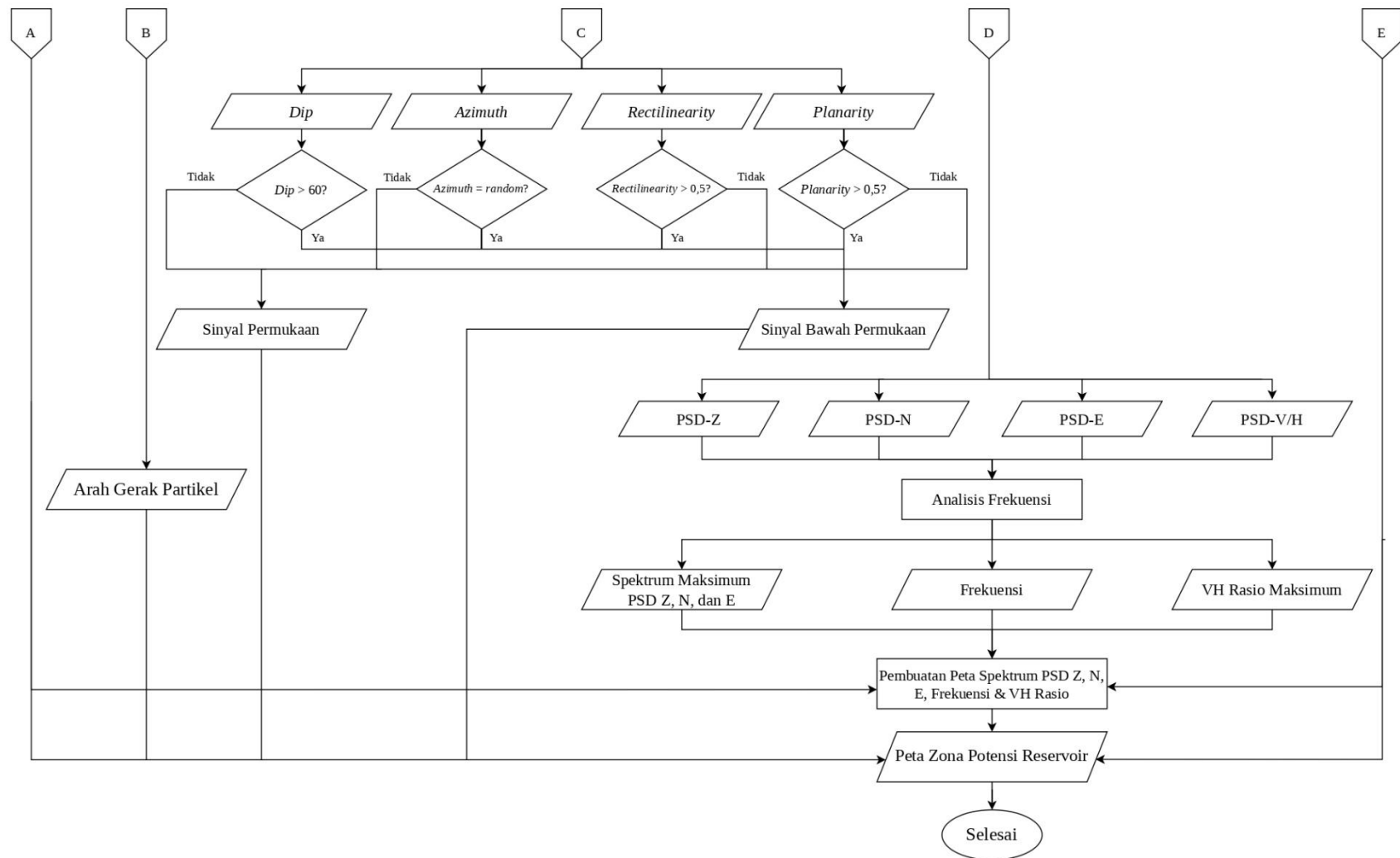
#### **4.3.4 Interpretasi**

Tahapan ini difokuskan pada identifikasi area prospek reservoir panasbumi melalui analisis nilai atribut pada setiap stasiun perekaman. Untuk memetakan distribusi spasialnya, dilakukan interpolasi kriging yang berfungsi untuk mengestimasi nilai antar stasiun sehingga anomali zona reservoir dapat teramati secara kontinu. Sebelum proses interpolasi, nilai atribut terlebih dahulu diklasifikasikan ke dalam beberapa rentang nilai tertentu berdasarkan karakteristik spektrumnya.

#### 4.4 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini dijelaskan pada Gambar 24 berikut.





Gambar 24. Diagram alir

## DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, M. F., Nugraha, A. D., Ramadhan, D., & Mulyanagara, G. (2013). Application and Noise Analysis of Passive Seismic Method for Hydrocarbon Reservoir. *Proceedings HAGI-IAIGI Joint Convention Medan*.
- Arafat, R., Yudiantoro, D. F., & Joni, W. (2020). Analisis Ketebalan Batuan Penudung Sistem Panasbumi Non-Vulkanik Berdasarkan Metode Magnetotellurik. *Mine Magazine (MineMagz)*, 1(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.36355/v1i2.448>
- Arintalofa, V., Yulianto, G., & Harmoko, U. (2020). Analisa mikrotremor Menggunakan Metode HVSR Untuk Mengetahui Karakteristik Bawah Permukaan Manifestasi Panasbumi Diwak dan Derekan Berdasarkan Nilai Vp. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 1(2), 54–61. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.9276>
- Badan Geologi. (2024). *Berita Badan Geologi*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Badley, M. E. (1985). *Practical Seismic Interpretation*. IHRDC Press, Boston, MA.
- Bahri, A. S., Abdullah, M. I. U. S., Aliyan, S. A., Purwanto, M. S., Widodo, A., Hilyah, A., Fajar, M. H. M., Hardyani, P. V., Sunardi, Alita, E. W., Rahmat, M., & Nurfitriana, I. (2021). Identification of Underground River with Microtremor Method in Dersono Karst Area, Pacitan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 649(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/649/1/012001>
- Bancroft, J. C. (2001). Seismic Imaging: Post-Stack. *CSEG Recorder*. September, 33–40.

- Budiardjo, B., Hantono, D., Agus, H., & Nugroho, &. (2001). Geochemical Characterization of Thermal Waters in Hululais Geothermal Prospect. *Stanford Geothermal Workshop*.
- Buijze, L., Van Bijsterveldt, L., Cremer, H., Paap, B., Veldkamp, H., Wassing, B. B. T., Van Wees, J. D., Van Yperen, G. C. N., Ter Heege, J. H., & Jaarsma, B. (2019). Review of Induced Seismicity in Geothermal Systems Worldwide and Implications for Geothermal Systems in The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 98. <https://doi.org/10.1017/njg.2019.6>
- Cox, D. R., Newton, A. M. W., & Huuse, M. (2020). *Regional Geology and Tectonics (Second Edition)*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64134-2.00020-1>
- Dangel, S., Schaepman, M. E., Stoll, E. P., Carniel, R., Barzandji, O., Rode, E. D., & Singer, J. M. (2003). Phenomenology of Tremor-Like Signals Observed Over Hydrocarbon Reservoirs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 128(1–3), 135–158. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00251-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00251-8)
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *What is Geothermal Energy*. Instituto di Geoscienze e Georisorse, CNR.
- Direktorat Panasbumi. (2025). *Geothermal Energy Information System*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Dondurur, D. (2018). *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01591-7>
- Dwikorianto, T., Daud, Y., Martha, A. A., & Juanda, A. A. (2023). Ambient Noise Data Processing to Obtain Group Velocity for Subsurface Structure Identification: Preliminary Research in Hululais Geothermal Field, Sumatra, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 08(02), 67–71.
- Dwikorianto, T., Daud, Y., Martha, A. A., & Mulyanto. (2023). Hululais Field Review from Geoscientific Exploration to Exploitation Stage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1–13.

- Ebrahimi, M., Moradi, A., & Seidin, H. (2018). Analysis of Low-Frequency Passive Seismic Attributes in Maroun Oil Field, Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(3), 11–26.
- EBTKE. (2023). *Laporan Kinerja Ditjen EBTKE*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Gadallah, M. R., & Fisher, R. (2008). *Exploration Geophysics*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85160-8>
- Haerudin, N., Alami, F., & Rustadi. (2019). *Mikroseismik, Mikrotremor, dan Mikroearthquake Dalam Ilmu Kebumihan*. Bandar Lampung: Pustaka Media.
- Harisma, R. A., Setiawan, B., & Putra, H. S. (2024). Aplikasi Metode Seismik Pasif Untuk Penentuan Zona Prospek Hidrokarbon di Kecamatan Aceh Birem Bayeun, Kabupaten Aceh Timur. *Acta Geoscience, Energy, and Mining*, 2(4), 115–118.
- 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(1), 61–74. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14203/risetgeotam2018.v28.428>
- Holzner, R., Eschle, P., Dangel, S., Frehner, M., Narayanan, C., & Lakehal, D. (2009). Hydrocarbon Microtremors Interpreted as Nonlinear Oscillations Driven by Oceanic Background Waves. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(1), 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2007.06.013>
- Husen, M. Z. (2023). Pengolahan Data dan Analisa Lanjut Metode Low Frequency Passive Seismic (LFPS) Studi Kasus Di Daerah X dan Y. Skripsi. Universitas Pertamina.
- Hutahean, N., Mahadianto, Simbolon, B., & Harahap, M. (2022). Analisis Penentuan Letak Epicentrum Gempa dan Dampaknya Terhadap Konstruksi. *Jurnal Teknologi dan Informasi*, 1(3), 112–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.59086/jti.v1i3.444>
- Jamlean, V., Bujung, C. A. N., & Rampengan, A. M. (2022). Studi Kimia Fisik Fluida Pada Manifestasi Panasbumi Danau Linow. *Jurnal FisTa: Fisika dan Terapannya*, 3(2), 87–92. <https://doi.org/10.53682/fista.v3i2.211>

- Julius, A. M., Taruna, R., Putra, S. Y. S., Negara, P. K. G. A., Rummy, B. F. A., Yullatifah, A., Nopianti, E., Akuba, N. S., Taufik, T., Subakti, H., & Widana, I. D. K. K. (2020). Pengukuran Kecepatan Gelombang Seismik Menggunakan Metode Refraksi Pada Lapisan Tanah Dangkal. *Geodika: Jurnal Kajian Ilmu dan Pendidikan Geograf*, 4(1), 22–31. <https://doi.org/10.29408/geodika.v4i1.1915>
- Jurkevics, A. (1988). Polarization Analysis of Three Component Array Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(5), 1725–1743.
- Kazantev, A., Egermann, A., Ramadhan, U., Huguer, F., Formento, C., Peruzzetto, M., Chauris, H., & Metaxian, J. P. (2017). An Innovative Methodology Based on Low Frequency Passive Seismic Data Analysis To Map Geothermal Reservoir Steam Saturated Areas. *Proceedings The 5th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition*.
- KESDM. (2023). *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- KESDM. (2024). *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kurnia, V. A., & Maryanto, S. (2015). Penentuan Hiposenter dan Episenter Data Seismik Di Daerah Hidrotermal Blawan Komplek Gunung Ijen Jawa Timur Dengan Analisis Particle Motion. *Brawijaya Physics Student Journal*, 2(1).
- Kusuma, D. T. (2021). Fast Fourier Transform (FFT) Dalam Transformasi Sinyal Frekuensi Suara Sebagai Upaya Perolehan Average Energy (AE) Musik. *Petir: Jurnal Pengkajian dan Penerapan Teknik Informatika*, 14(1), 28–35. <https://doi.org/10.33322/petir.v14i1.1022>
- Lambert, M. A., Schmalholz, S. M., Saenger, E. H., & Steiner, B. (2009). Low-Frequency Microtremor Anomalies at an Oil And Gas Field in Voitsdorf, Austria. *Geophysical Prospecting*, 57(3), 393–411. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2008.00734.x>
- Lawless, J. (1995). *Guidebook: An Introduction to Geothermal System*. Short Course, Unocal Ltd.
- Lowrie, M. (2007). *Fundamentals of Geophysics Second Edition*. Cambridge University Press.

- Lu, S. M. (2018). A Global Review of Enhanced Geothermal System (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2902–2921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.097>
- Marbun, M. K., & Pohan, A. F. (2024). Identifikasi Gerakan Partikel Air Panas Berdasarkan Analisis Mikrotremor di Mata Air Panas Bukit Kili dan Garara, Kabupaten Solok. *Jurnal Fisika Unand*, 13(2), 177–182. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.2.177-182.2024>
- Maryanto, S. (2016). *Seismik Vulkanologi*. Malang: Universitas Brawijaya Press.
- Mulyani, S., Daud, Y., Pasiki, R. G., & Siagian, H. (2022). Karakteristik Struktur Patahan Pada Lapangan Panasbumi X (Sumatra) Berdasarkan Pemetaan Geologi, Penginderaan Jauh, dan Data Gaya Berat. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 17(2), 109–124.
- Nainggolan, S. S., Prasetyo, I., Sardiyanto, Gravatt, M., Sullivan, J. O., & Titus, K. (2025). The New Geological and Natural State Model of Hululais Geothermal Field. *Proceedings 47th New Zealand Geothermal Workshop*.
- Nasruddin, Alhamid, M. I., Daud, Y., Surachman, A., Sugiyono, A., Aditya, H. B., & Mahlia, T. M. I. (2016). Potential Of Geothermal Energy for Electricity Generation in Indonesia: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 733–740. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.032>
- Nurhanafi, K., Zarkasi, A., Intifadhah, S. H., Wibowo, N. B., & Purnama, A. Y. (2023). Analisis Pergerakan Partikel terhadap Rekaman Mikrotremor di Permukaan Sungai Bawah Tanah Bribin, Kawasan Karst Gunung Sewu. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, 12(3), 472–479
- Nurseto, S. T., Arifin, M. T., Pratama, G. R., Nusantara, V. D. M., Thamrin, M. H., & Suryantini. (2021). Structural Geology and Volcanism in Hululais Geothermal Area, Bengkulu, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 732(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/732/1/012004>
- Nusantara, V. D. M. (2022). Borehole Geology of Well HLS-EX Hululais Geothermal Field, Sumatra Island, Indonesia. Thesis. University of Iceland.
- Nusantara, V. D. M., Pratama, G. R., Nurseto, S. T., Arifin, M. T., & Thamrin, M. H. (2022). Characterization of Hululais Subsurface Rock Formation and Its

- Implication to Starto Volcano Facies Model Hululais Geothermal Field, Indonesia. *Proceedings 42nd New Zealand Geothermal Workshop*.
- Prabowo, B. S., Verdhora Ry, R., Dian Nugraha, A., & Siska, K. (2017). Hydrocarbon Prospect Derived from Attributes Analysis on Low-Frequency Passive Seismic Survey: A Case Study from Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 62(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/62/1/012020>
- Pratama, G. R., Nusantara, V. D. M., Nurseto, S. T., Arifin, M. T., & Thamrin, M. H. (2020). Volcanostratigraphy of Hululais Geothermal Field, Bengkulu, Indonesia. *Proceedings 42nd New Zealand Geothermal Workshop*.
- Priscilla, V. A., Farid, M., Lidiawati, L., & Al Ansory, A. R. (2025). Perubahan Garis Pantai Rawan Gempabumi di Lokasi Terabrasi Menggunakan Data Geofisika. *Buletin Oseanografi Marina*, 14(1), 121–134. <https://doi.org/10.14710/buloma.v14i1.64643>
- Priyono, A., Ry, R. V., Nugraha, A. D., Lesmana, A., Prabowo, B. S., Husni, Y. M., Ardianto, A., Witarsa, N., & Sutan, B. I. (2024). On The Use of Low-Frequency Passive Seismic as a Direct Hydrocarbon Indicator: A Case Study at Banyubang Oil Field, Indonesia. *Open Geosciences*, 16(1). <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0587>
- Rachmaningtias, N., Setyawan, A., & Raharjo, I. B. (2014). Identifikasi Struktur Resistivitas Daerah Geothermal “T” Berdasarkan Hasil Pemodelan 2D Data Magnetotellurik. *Youngster Physics Journal*, 3(2), 143–146.
- Ramdhani, H., Manik, H. M., & Susilohadi, S. (2013). Acoustic Detection and Characterization of Marine Sediment with Shallow Seismic Technology in Rambat Waters, Bangka Belitung. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 5(2). <https://doi.org/10.29244/jitkt.v5i2.7572>
- Richard, F., Suharsono, & Nandiwardhana, D. (2013). Model Numerikal Reservoir Sistem Panasbumi Pada Daerah Topografi Relatif Datar untuk Mencari Kondisi Natural State dan Menganalisa Sensitivitas Panas Pada Reservoir Menggunakan Software Tough2. *Seminar Nasional Informatika 2013 (SemnasIF 2013)*.

- Riyani, A., Nurrochman, A., Rizqiyah, P., & Junaidi, A. (2019). Mengidentifikasi Sinyal Suara Manusia Menggunakan Metode Fast Fourier Transform (FFT) Berbasis Matlab. *Journal of Informatics, Information System, Software Engineering and Applications*, 1(1), 42–50. <https://doi.org/10.20895/INISTA.V1I2>
- Rohaman, M., Krisnabudhi, A., Atmojo, H. T., & Adha, I. (2025). Low Frequency Passive Seismic Analysis for Characterizing Hydrocarbon Presence in the Kendal Subbasin. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 40(3), 55–66. <https://doi.org/10.17794/rgn.2025.3.5>
- Saenger, E. H., Schmalholz, S. M., Lambert, M. A., Nguyen, T. T., Torres, A., Metzger, S., Habiger, R. M., Müller, T., Rentsch, S., & Méndez-Hernández, E. (2009). A Passive Seismic Survey Over a Gas field: Analysis of Low-Frequency Anomalies. *Geophysics*, 74(2). <https://doi.org/10.1190/1.3078402>
- Saenger, E. H., Spectraseis, Z., Steiner, B., Schmalholz, S. M., Lambert, M., & Podladchikov, Y. Y. (2007). Considerations of Observed Spectral Anomalies Over Hydrocarbon Reservoirs Generated by Microtremors. *Tenth International Congress of The Brazilian Geophysical Society*, 1–6. <https://doi.org/10.1190/sbgf2007-224>
- Saptadji, N. M. (2001). *Teknik Panasbumi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Sari, D. P. (2025). Analisis Dampak Lingkungan Dan Implikasi Ekonomi Aktivitas Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi (PLTP) Dalam Mewujudkan Sustainable Development Goals (SDGs) Di Indonesia. *Ar-Rasyid: Jurnal Publikasi Penelitian Ilmiah*, 1(5), 119–133. <https://doi.org/10.64788/ar-rasyid.v1i5.38>
- Sauni, H., Fernando, Z. J., & Candra, S. (2022). Energi Geothermal Dalam Aturan, Masalah Lingkungan Hidup, dan Solusi Penyelesaian Konflik di Masyarakat. *Jurnal Rechts Vinding: Media Pembinaan Hukum Nasional*, 11(3), 373–390.
- Setiawan, A., Rustadi, & Zaenudin, A. (2017). Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro Dan Poisson's Ratio, Studi Kasus: Hydroshearing Pada Lapangan Enhanced Geothermal System Newberry, Oregon. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 3(3), 1–16. <https://doi.org/10.23960/jge.v3i3.1045>

- Sharmin, T., Khan, N. R., Akram, M. S., & Ehsan, M. M. (2023). A State-of-the-Art Review on Geothermal Energy Extraction, Utilization, and Improvement Strategies: Conventional, Hybridized, and Enhanced Geothermal Systems. *International Journal of Thermofluids*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100323>
- Shearer, P. M. (2009). *Introduction to Seismology Second Edition*. Cambridge University Press.
- Sheriff, R. E., & Geldart, L. P. (1995). *Exploration Seismology*. Cambridge University Press.
- Sipasulta, R. Y., Lumenta, A. S., & Sompie, S. R. (2014). Simulasi Sistem Pengacak Sinyal Dengan Metode FFT (Fast Fourier Transform). *E-Journal Teknik Elektro dan Komputer*, 1–8. <https://doi.org/10.35793/jtek.v3i2.4448>
- Suharno. (2013). *Eksplorasi Geothermal*. Bandar Lampung: Lembaga Penelitian Universitas Lampung.
- Sumotarto, U. (2015). *Eksplorasi Panasbumi*. Yogyakarta: Ombak.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Valentin, F. (2025). Analisis Multiatribut Low Frequency Passive Seismic (LFPS) Untuk Delineasi Reservoar Panasbumi Pada Lapangan Lumut Balai, Sumatera Selatan. Skripsi. Universitas Lampung.
- Wahyudi. (2008). Microseismic Application for Direct Hydrocarbon Detection and Identification. *Berkala MIPA*, 18(2).
- Welch, P. D. (1967). The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodogram. *IEEE Transaction on Audio and Electroacoustics*, 15(2).
- Wijayanti, M. D. (2023). *Energi Panas Bumi*. Jakarta Timur: PT. Bumi Aksara.
- Yuliawati, W. S., Rasimeng, S., & Karyanto, K. (2020). Pengolahan Data Mikrotremor Berdasarkan Metode HVSR Dengan Menggunakan Matlab. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 5(1), 45–59. <https://doi.org/10.23960/jge.v5i1.22>

Yustiza, A. P. (2022). Analisis Multiatribut Metode Low Frequency Passive Seismic Untuk Indikasi Keberadaan Reservoir Geothermal pada Lapangan 'X.' Skripsi. Universitas Pertamina.

Zheng, Y., Wang, Y., & Chang, X. (2016). Wave Equation Based Microseismic Source Location and Velocity Inversion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 261, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.07.003>