

**IDENTIFIKASI SISTEM PANASBUMI BONJOL, SUMATERA  
BARAT BERDASARKAN ANALISIS METODE GAYABERAT  
DAN MAGNETOTELURIK**

(Skripsi)

Oleh  
**AMELIA PUTRI ANGGRAENI**  
**NPM 2215051062**



**FAKULTAS TEKNIK**  
**UNIVERSITAS LAMPUNG**  
**BANDAR LAMPUNG**  
**2026**

**IDENTIFIKASI SISTEM PANASBUMI BONJOL, SUMATERA  
BARAT BERDASARKAN ANALISIS METODE GAYABERAT  
DAN MAGNETOTELURIK**

Oleh  
**AMELIA PUTRI ANGGRAENI**

**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 SISTEM PANASBUMI BONJOL, SUMATERA BARAT BERDASARKAN ANALISIS METODE GAYABERAT DAN MAGNETOTELURIK

Oleh

**Amelia Putri Anggraeni**

Daerah Bonjol, Sumatera Barat merupakan wilayah yang berada pada zona Sesar Sumatera dan memiliki manifestasi panasbumi berupa mata air panas, sehingga berpotensi sebagai daerah prospek panasbumi. Identifikasi sistem panasbumi di daerah ini dilakukan melalui integrasi metode Gayaberat dan Magnetotelurik (MT). Penelitian diawali dengan perbandingan data anomali gayaberat hasil pengukuran langsung dengan data GGMPPlus untuk menganalisis kesesuaian pola anomali dan representasi struktur geologi bawah permukaan. Analisis data Gayaberat dilakukan untuk analisis derivative menggunakan *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD), serta pemodelan inversi 3D untuk mengidentifikasi distribusi densitas bawah permukaan. Sementara itu, data Magnetotelurik diolah melalui tahapan *robust processing*, koreksi *static shift*, dan inversi 2D untuk memperoleh distribusi resistivitas bawah permukaan. Hasil analisis menunjukkan keterkaitan kuat antara struktur geologi dan sistem panasbumi, di mana Sesar Normal Alahanmati, Sesar Normal Padang Baru, dan Sesar Normal Takis berperan sebagai jalur migrasi fluida hidrotermal sekaligus mengontrol kemunculan manifestasi di permukaan. Pemodelan 3D gayaberat mengindikasikan densitas 1,0–2,8 g/cc, dengan densitas rendah sebagai reservoir akibat rekahan dan alterasi, serta densitas tinggi sebagai *basement*. Data MT menunjukkan *caprock* beresistivitas rendah (0–12  $\Omega\text{m}$ ), reservoir sedang (12–78  $\Omega\text{m}$ ), dan *basement* tinggi (>78  $\Omega\text{m}$ ). Secara keseluruhan, sistem diinterpretasikan sebagai tipe *outflow*, dengan Sesar Normal Alahanmati sebagai zona *recharge* dan Sesar Normal Padang Baru sebagai zona *discharge*. Fluida meteoritik dipanaskan pada kedalaman >3000 m, tertahan *caprock*, lalu mengalir lateral dan naik melalui sesar, menghasilkan manifestasi bersuhu 49–88°C, pH mendekati netral, serta endapan travertin akibat proses pendinginan dan evolusi fluida.

Kata Kunci: Analisis *Derivative*, Metode Gayaberat, Metode Magnetotelurik, Sistem Panasbumi, Panasbumi Bonjol.

## ABSTRACT

### ***IDENTIFICATION OF THE BONJOL GEOTHERMAL SYSTEM, WEST SUMATRA, BASED ON GRAVITY AND MAGNETOTELURIC ANALYSIS***

*By*

**Amelia Putri Anggraeni**

*The Bonjol area in West Sumatra is located within the Sumatran Fault Zone and exhibits geothermal activity in the form of hot springs, making it a promising geothermal prospect. The identification of geothermal systems in this area was conducted through the integration of gravity and magnetotelluric (MT) methods. The study began with a comparison of gravity anomaly data from direct measurements with GGMPlus data to analyze the consistency of anomaly patterns and the representation of subsurface geological structures. Gravity data analysis was performed using the First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) for derivative analysis, as well as 3D inversion modeling to identify subsurface density distributions. Meanwhile, magnetotelluric data were processed through robust processing, static shift correction, and 2D inversion to obtain subsurface resistivity distributions. The analysis results indicate a strong correlation between geological structures and the geothermal system, where the Alahanmati Normal Fault, the Padang Baru Normal Fault, and the Takis Normal Fault act as migration pathways for hydrothermal fluids while controlling the emergence of surface manifestations. 3D gravity modeling indicates densities of 1.0–2.8 g/cc, with low densities representing reservoirs resulting from fractures and alteration, and high densities representing the basement. MT data indicate a low-resistivity caprock (0–12  $\Omega\text{m}$ ), a medium-resistivity reservoir (12–78  $\Omega\text{m}$ ), and a high-resistivity basement (>78  $\Omega\text{m}$ ). Overall, the system is interpreted as an outflow type, with the Alahanmati Normal Fault serving as the recharge zone and the Padang Baru Normal Fault as the discharge zone. Meteoric fluids are heated at depths >3000 m, confined by the caprock, then flow laterally and rise through the faults, resulting in manifestations with temperatures of 49–88°C, a pH close to neutral, and travertine deposits due to cooling and fluid evolution.*

*Keywords: Derivative Analysis, Gravity Method, Magnetotelluric Method, Geothermal System, Bonjol Geothermal.*

Judul Skripsi : Identifikasi Sistem Panasbumi Bonjol,  
Sumatera Barat Berdasarkan Analisis Metode  
Gayaberat dan Magnetotelurik

Nama Mahasiswa : **Amelia Putri Anggraeni**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215051062

Program Studi : Teknik Geofisika

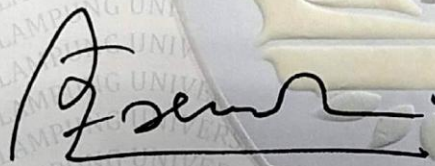
Fakultas : Teknik

**MENYETUJUI**

**1. Komisi Pembimbing**

Pembimbing 1

Pembimbing 2



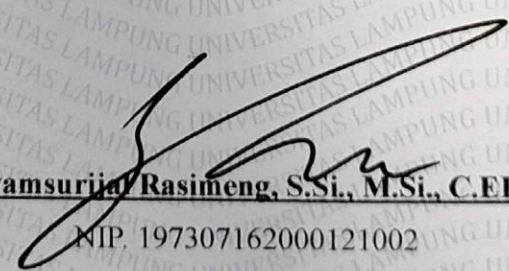
**Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.**

**Sandri Erfani, S.Si., M.Eng.**

NIP. 197209281999031001

NIP. 198902152019031016

**2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika**



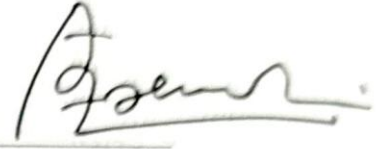
**Dr. Ir. Syamsurrijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA, IPM.**

NIP. 197307162000121002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji


Ketua : Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.



Sekretaris : Sandri Erfani, S.Si., M.Eng.



Anggota : Ir. I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng.



2. Dekan Fakultas Teknik

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

NIP. 19691030200031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 26 Mei 2026

## PERNYATAAN

Saya dengan sesungguhnya menegaskan bahwa skripsi berjudul "Identifikasi Sistem Panasbumi Bonjol, Sumatera Barat Berdasarkan Analisis Metode Gayaberat dan Magnetotelurik" merupakan hasil penelitian dan karya ilmiah yang disusun secara mandiri berdasarkan data, hasil interpretasi serta pemahaman yang diperoleh selama pelaksanaan penelitian.

Dalam penyusunannya, skripsi ini tidak mengandung karya, pendapat, maupun gagasan pihak lain yang telah dipublikasikan tanpa penyebutan sumber. Seluruh informasi dan kutipan yang digunakan telah dicantumkan secara jelas sesuai kaidah penulisan ilmiah.

Pernyataan ini saya susun dengan penuh kesadaran serta rasa tanggung jawab. Jika di kemudian hari terbukti terdapat pelanggaran terhadap keaslian karya ilmiah ini, maka saya siap menerima segala bentuk konsekuensi maupun sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Bandar Lampung, 26 Mei 2026

Penulis



**Amelia Putri Anggraeni**

NPM, 2215051062

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Demak, Jawa Tengah pada tanggal 25 Maret 2004 yang merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Masjawoh dan Ibu Sumiyati. Pendidikan penulis dimulai dari TK Kemala Kotabumi Selatan pada tahun 2009-2010, melanjutkan ke Sekolah Dasar di SD Negeri 04 Gapura Kotabumi tahun 2010-2016. Kemudian penulis menempuh pendidikan menengah pertama di SMPN 03 Kotabumi dan lulus pada tahun 2019 yang selanjutnya menempuh pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAN 03 Kotabumi dan lulus pada tahun 2022. Dan pada tahun yang sama yaitu 2022 penulis melanjutkan pendidikan ke Jurusan Teknik Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademik maupun non-akademik. Penulis memiliki pengalaman sebagai Asisten Praktikum Metode Gayaberat pada tahun 2026. Selain itu, penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi, yaitu sebagai Sekretaris Bidang Sosial Budaya Masyarakat Hima TG Bhuwana Universitas Lampung pada tahun 2024-2025, Bendahara 1 Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia periode 2025-2026, Ketua Divisi *Human Resource Development* AAPG (*American Association of Petroleum Geologist*) *Student Chapter* Unila tahun 2026, Anggota Divisi *Professional Improvement* Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia *Student Chapter* Unila tahun 2024-2025. Selain itu, penulis juga terlibat dalam berbagai kepanitiaan antara lain menjadi Ketua Pelaksana Webinar Kegeofisikaan Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia tahun 2024, Sekretaris Pelaksana *Sharing* dan Diskusi Hima TG Bhuwana tahun

2024, kordinator acara Bina Bakti Masyarakat Desa Hima TG Bhuwana tahun 2024, anggota divisi *Sponsorship* dalam acara nasional Geophysics academic and Event (GEAVENT), serta berpartisipasi sebagai anggota divisi acara pada kegiatan nasional *Geophysics Whiz Event and Seminar* (GWES) ke-10.

Penulis melakukan pengabdian kepada masyarakat melalui kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Semanak, Kecamatan Bakauheni, Kabupaten Lampung Selatan tahun 2025. Pada tahun yang sama juga penulis melakukan Kerja Praktik (KP) di Pusat Sumberdaya Mineral Batubara dan Panasbumi (PSDMBP) di bulan Juli-Agustus 2025 dengan judul "Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Daerah Panabumi Bonjol Dengan Menggunakan *Forward Modeling* 2D Data Gayaberat". Penulis melakukan penelitian Tugas Akhir pada bulan Januari – Mei 2026 dengan judul "Identifikasi Sistem Panasbumi Bonjol, Sumatera Barat Berdasarkan Analisis Metode Gayaberat dan Magnetotelurik" untuk memperoleh gelar sarjana teknik yang dilakukan di Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

## **PERSEMBAHAN**

Dengan penuh rasa syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, pertolongan dan kemudahan yang senantiasa diberikan dalam setiap perjalanan dan proses penyusunan karya ini sehingga segala tantangan dapat dilalui dan terselesaikan.

### **Bapak dan Ibu Tercinta**

Terima kasih atas segala doa yang tak pernah terputus, cinta kasih sayang, pengorbanan, dan segala jerih payah yang telah dilakukan untuk penulis sehingga masih dapat hidup dengan sangat baik hingga saat ini. Terima kasih telah menjadi alasan utama penulis untuk menjadi kuat dan tidak menyerah. Semuanya takkan mampu penulis balas bahkan dengan nyawapun, namun dengan karya ini penulis ingin sedikit mewujudkan bahwa setiap harapan, kepercayaan dan doa yang telah diberikan selalu penulis perjuangkan dengan sungguh-sungguh. Semoga pencapaian ini dapat menjadi langkah awal untuk sedikit membalas segala kebaikan yang telah diberikan sekaligus menjadi gerbang bagi terwujudnya doa dan harapan indah berikutnya.

### **Mbak dan Adikku Tersayang**

**Dewi Septiana, S.Kom.**

**Ahmad Januwar Rifqy**

Terima kasih telah menjadi tempat berbagi cerita, berkeluh kesah, penyemangat serta teman ribut penulis dalam setiap perjalanan dan proses yang telah dilalui. Semoga karya ini dapat menjadi kebanggaan dan kebahagiaan yang juga dapat dirasakan bersama.

### **Teknik Geofisika Universitas Lampung**

Tempat yang tidak pernah penulis bayangkan dan harapkan sebelumnya namun ternyata adalah tempat terbaik sebenarnya. Terima kasih telah menjadi tempat penulis menimba ilmu selama empat tahun ini. Terima kasih sebesar-besarnya kepada Teknik Geofisika Angkatan 2022 (GRANIT) yang telah menjadi rumah, teman bermain, bertumbuh, berjuang, berkeluh kesah, dan suka duka selama perkuliahan ini.

## MOTTO

*” Life is what you make of it. Don’t overthink it, go for what you want, and embrace the journey!”*

-S.mcnutt

“Allah memang tidak menjanjikan hidupmu akan mudah, namun dua kali Allah berjanji bahwa *Fa inna ma ‘al- ‘usri yusra, inna ma ‘al- ‘usri yusra*”

(Q.S Al-Insyirah: 5-6)

”Kejar apapun yang kamu inginkan, walaupun terkadang semua hal tak selalu berjalan sesuai rencana dan berujung kecewa yang hanya dapat diungkap oleh ”yaudahlah mau gimana lagi, belum takdirnya” setidaknya kamu sudah pernah mencoba dan tidak menyesal dikemudian hari, hidup cuma sekali yakali gak mau mencoba hal – hal baru!”

-Amelia putri Anggraeni

”Pada akhirnya, ini semua hanyalah permulaan”

-Nadin Amizah

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul “Identifikasi Sistem Panasbumi Bonjol, Sumatera Barat Berdasarkan Analisis Metode Gayaberat dan Magnetotelurik” dapat diselesaikan dengan baik.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai bantuan, dukungan, serta doa dari banyak pihak yang turut memberikan kontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, selama proses penelitian hingga tahap penyusunan selesai. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian karya ilmiah ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki sejumlah kekurangan dan belum sepenuhnya sempurna. Dengan demikian, kritik serta saran yang membangun sangat diharapkan sebagai bahan evaluasi dan penyempurnaan pada masa mendatang. Penulis berharap penelitian ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi pembaca, baik dari lingkungan akademik ataupun masyarakat umum, khususnya dalam mendukung pengembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 26 Mei 2026



**Amelia Putri Anggraeni**

NPM. 2215051062

## SANWACANA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, pertolongan, serta kemudahan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **”Identifikasi Sistem Panasbumi Bonjol, Sumatera Barat Berdasarkan Analisis Metode Gayaberat dan Magnetotelurik”** dengan baik. Shalawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang menjadi teladan terbaik bagi umat manusia dalam menjalani kehidupan. Dalam proses penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa keberhasilan penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, arahan, serta kontribusi dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya 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 Universitas Lampung yang telah memberikan dukungan dan arahan selama masa perkuliahan.
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
4. Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah memberikan banyak ilmu, arahan, masukan serta dengan penuh kesabaran membimbing selama proses penyusunan skripsi.
5. Bapak Sandri Erfani, S.Si., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing 2 yang senantiasa memberikan dukungan serta berbagai saran yang sangat membantu dalam penyelesaian skripsi ini.


6. Bapak Ir. I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan evaluasi, kritik dan saran yang sangat bermanfaat untuk menyempurnakan penulisan skripsi ini.
7. Prof. Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si., IPM., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang selalu memberikan arahan, nasihat, serta dukungan selama penulis menjalani perkuliahan.
8. Seluruh Dosen dan Staf Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan, pengalaman, serta pembelajaran yang sangat berarti selama masa perkuliahan.
9. Bagian Panasbumi PSDMBP tempat penulis melakukan Kerja Praktik, terkhusus bapak Wiwid Joni, S.Si.,M.T., selaku Pembimbing Lapangan di perusahaan yang telah memberikan banyak pengetahuan baru, saran masukan dan dukungan selama penulis melakukan Kerja Praktik. Serta Bapak dan Ibu bagian Panasbumi lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu, terima kasih atas ilmu, pengalaman, nasihat, serta hiburan yang telah penulis dapatkan selama melakukan Kerja Praktik di PSDMBP Bandung.
10. Bapak dan Ibuku tersayang, terima kasih yang tak terhingga atas segala doa, kasih sayang, dukungan dan usaha yang tak pernah terputus serta mengusahakan apapun dengan sebaik-baiknya. Semoga Allah SWT selalu memberikan kesehatan, keselamatan dan surganya kelak untuk semua pengorbanan yang telah diberikan untuk penulis.
11. Mbak dan adik kandung penulis, Dewi Septiana dan Ahmad Januwar Rifqy yang telah ikut berperan penting dalam segala proses kehidupan penulis dan selalu menemani juga mendukung segala hal yang dilakukan penulis. Kakak Ipar penulis, Khoirul Ahmadi yang turut serta mendukung dan membantu selama masa perkuliahan penulis.
12. Ponakanku tersayang, Khaireen Azizia Azzahra yang menjadi penghibur penulis ketika pulang ke rumah dan menjadi salah satu alasan penulis untuk menjadi "rich aunty" di masa depan.
13. Rana Atikah, yang selalu bersedia mendengarkan segala keluh kesah dari semua persoalan kehidupan, tangisan, tawa dan apapun yang dialami penulis, terima kasih telah menjadi sahabat yang selalu ada dan bersedia menjadi salah satu

tempat pulang penulis dari masa sekolah menengah pertama hingga saat ini dan selamanya. Terima kasih atas segala dukungan dan segala hal yang telah diberikan selama hampir 10 tahun belakang ini.

14. Dewi Nur Fajariani, Putri Dordia dan Dina Rafika yang turut serta selama hampir 10 tahun belakang ini selalu mendukung, menjadi tempat bercerita, teman bermain, dan berkeluh kesah penulis terkait segala hal.
15. Syifa Salsabila dan Yussi Rona Nurannisa, "my aries girls" yang selalu mendukung, menjadi teman bercerita, teman ngopi, teman berkeluh kesah, teman gabut yang sekarang sudah sangat sibuk, terima kasih telah menemani dan menjadi teman penulis dari masa sekolah menengah atas hingga saat ini.
16. Yeni Marsela, pemilik NPM 61 yang membuat penulis memiliki NPM 62, terima kasih atas segala waktu, perhatian dan dukungan yang telah diberikan untuk penulis selama masa perkuliahan dan perantauan ini, terima kasih telah menjadi teman makan, teman ngopi, teman *healing*, teman nongki, teman berkeluh kesah, dan teman yang selalu ada disaat suka maupun duka selama masa perkuliahan penulis. Nur Asia Azam, teman seperjuangan, sebimbangan dan teman stress *Gravity* MT penulis, terima kasih atas segala waktu, saran masukan, dukungan yang telah diberikan untuk penulis, terima kasih telah menjadi teman berkeluh kesah tentang semua kehidupan penulis.
17. Cung-cung cantik dan manisku, Hafizah, Yeni Marsela, Nur Asia Azam, Siti Mahmudah, Hanifah, Galuh Andini Putri Anralu, Tyas Puspaningsih, Indira Audita Azra Utami Putri, Amalia Ramadhona dan Aulia Nisya yang menemani dan membuat masa akhir perkuliahan lebih berwarna dengan segala cerita suka dan duka, teman bertukar pendapat dengan segala hal *random* yang menjadi topik obrolan.
18. Yusroni sang tutor MT penulis yang telah banyak membantu penulis pada pengolahan MT serta menjadi *partner* berhimpun bersama Hafiz Ibnu, M. Aji dan Tegar Mahendra di Bidang Sosial Budaya Masyarakat Hima TG Bhuwana periode 2024-2025.
19. Granit22 yang menjadi keluarga di masa perkuliahan penulis, yang kebersamai dari proses kaderisasi hingga menjadi alumni.

20. Diriku, Amelia Putri Anggraeni, apresiasi sebesar-besarnya untuk diri sendiri yang telah berhasil menyelesaikan awal perjalanan sebenarnya, terima kasih telah bekerja keras dan bertahan tanpa peduli kelelahan dan kesakitan walau masih banyak hal yang harus diikhhlaskan meski itu bukan yang diharapkan. Terima kasih kepada diri yang sudah kuat atas tangisan dan kekecewaan yang tidak bisa selalu diungkapkan kepada orang lain dan hanya membenam di kepala diri sendiri. Terima kasih karena tetap bertahan dan terus melangkah meskipun sering diliputi keraguan serta keinginan untuk menyerah. Jangan berhenti berusaha, tetaplah bahagia di mana pun berada, dan hargailah setiap pencapaian kecil dalam hidupmu. Skripsi ini mungkin belum sempurna, namun seluruh proses yang dijalani menjadi pengalaman berharga yang penuh makna dan pembelajaran. Karya ini merupakan bentuk nyata dari perjuangan yang layak untuk dibanggakan.
21. Kepada Abang kakak angkatan 2021,2020 dan 2019 serta adik adik angkatan 2023 dan 2024 yang tidak bisa penulis tuliskan satu persatu, terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan untuk penulis selama menjalani perkuliahan di Teknik Geofisika Universitas Lampung.
22. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas segala dukungan dan bantuan yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.

Bandar Lampung, 26 Mei 2026



**Amelia Putri Anggraeni**

NPM. 2215051062

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>RIWAYAT HIDUP.....</b>	<b>ix</b>
<b>PERSEMBAHAN.....</b>	<b>x</b>
<b>MOTTO .....</b>	<b>xii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>SANWACANA.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xxi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Lokasi Daerah Penelitian .....	6
2.1 Struktur Geologi Daerah Penelitian .....	6
2.2 Stratigrafi Regional .....	9
2.3 Penelitian Terdahulu.....	12
<b>III. TEORI DASAR.....</b>	<b>16</b>
3.1 Sistem Panasbumi .....	16
3.1.1 Manifestasi Panasbumi.....	18
3.2 Metode Gayaberat .....	19

3.2.1	Data Gayaberat .....	20
3.2.2	Konsep Dasar Gayaberat .....	21
3.2.2.1	Gayaberat Newton .....	21
3.2.2.2	Percepatan Gayaberat .....	21
3.2.2.3	Potensial Gayaberat .....	23
3.2.2.4	Rapat Massa Batuan (Densitas) .....	23
3.2.3	Koreksi – koreksi dalam Metode Gayaberat .....	25
3.2.3.1	Koreksi Pasang Surut ( <i>Tide Correction</i> ) .....	25
3.2.3.2	Koreksi Apungan ( <i>Drift Correction</i> ) .....	26
3.2.3.3	Koreksi Lintang ( <i>Latitude Correction</i> ).....	27
3.2.3.4	Koreksi Udara Bebas ( <i>Free-Air Correction</i> ) .....	27
3.2.3.5	Koreksi Bouguer ( <i>Bouguer Correction</i> ).....	28
3.2.3.6	Koreksi Medan ( <i>Terrain Correction</i> ) .....	29
3.2.4	Analisis Spektrum .....	31
3.2.5	Filter <i>Moving Average</i> .....	34
3.2.6	<i>First Horizontal Derivative</i> .....	34
3.2.7	<i>Second Vertical Derivative</i> .....	35
3.2.8	<i>Inverse Modelling</i> .....	36
3.3	Metode Magnetotelurik (MT) .....	37
3.3.1	Prinsip Elektromagnet .....	38
3.3.2	Persamaan Maxwell .....	40
3.3.3	<i>Skin Depth</i> .....	42
3.3.4	Pengolahan Data Magnetotelurik .....	43
3.3.4.1	Transformasi Fourier .....	43
3.3.4.2	<i>Robust Processing</i> .....	44
3.3.4.3	Seleksi <i>Crosspower</i> dan Koreksi <i>Static Shift</i> .....	44
3.3.4.4	Pemodelan Magnetotelurik.....	44
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>48</b>
4.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	48
4.2	Alat dan Bahan .....	48
4.3	Prosedur Penelitian .....	51
4.3.1	Tahapan Pengolahan Data Metode Gayaberat .....	51

4.3.2 Tahapan Pengolahan Data Metode Magnetotelurik .....	52
4.4 Diagram Alir .....	53
<b>V. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>52</b>
5.1 Topografi dan Geologi .....	52
5.2 Metode Gayaberat .....	57
5.2.1 <i>Complete Bouguer Anomaly (CBA)</i> .....	57
5.2.2 Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual .....	60
5.2.3 Anomali Regional .....	64
5.2.4 Anomali Residual .....	65
5.2.5 Analisis Derivative .....	66
5.2.5.1 <i>First Horizontal Derivative</i> .....	66
5.2.5.2 <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i> .....	67
5.2.6 Model Inversi 3D Gayaberat .....	70
5.2.7 Penampang hasil <i>Slicing</i> 3D Gayaberat .....	71
5.3 Metode Magnetotelurik .....	73
5.3.1 Pemodelan Inversi 2 Dimensi .....	73
5.4 Penampang 2 Dimensi Data Gayaberat dan 2 Dimensi Magnetotelurik. 74	
5.4.1 <i>Slicing</i> Lintasan A-A' .....	74
5.4.2 <i>Slicing</i> Lintasan B-B' .....	77
5.5 Model Konseptual Sistem Panasbumi .....	78
<b>VI. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>81</b>
6.1 Kesimpulan .....	81
6.2 Saran .....	82

## **DAFTAR PUSTAKA**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Lokasi Daerah Penelitian .....	6
2. Peta Geologi Daerah Bonjol.....	7
3. Satuan stratigrafi daerah Panasbumi Bonjol .....	9
4. Gambar konseptual sistem panasbumi .....	17
5. Gaya tarik menarik antara dua benda.....	21
6. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi .....	23
7. Grafik pengaruh pasang surut bumi dan drift instrumen terhadap percepatan gravitasi .....	26
8. Koreksi udara bebas terhadap gayaberat.....	28
9. Koreksi Bouguer. (a) Titik pengukuran pada dataran tinggi yang luas. (b)Titik pengukuran bawah permukaan. ....	29
10. Koreksi medan terhadap gayaberat .....	31
11. Kurva Ln A Terhadap k .....	33
12. Konsep Gelombang Elektromagnetik .....	38
13. Komponen medan listrik dan medan magnet dalam polarisasi TE dan TM .	42
14. Diagram Alir Penelitian.....	54
15. Peta Topografi daerah penelitian.....	52
16. Peta Geologi Daerah Penelitian dengan <i>slicing</i> lintasan.....	55
17. Peta CBA Pengukuran Langsung .....	59
18. Peta CBA GGMPPlus.....	59
19. Lintasan Analisis Spektrum.....	61
20. Grafik lintasan A-AA .....	62
21. Grafik lintasan B-BB .....	62
22. Peta Anomali Regional.....	64

23. Peta Anomali Residual .....	65
24. Peta <i>First Horizontal Derivative</i> .....	66
25. Peta <i>Second Vertical Derivative</i> .....	67
26. Lintasan A-A' FHD dan SVD.....	68
27. Lintasan B-B' FHD dan SVD.....	69
28. Model 3D densitas Gayaberat .....	70
29. Lintasan <i>slicing</i> 3D Gayaberat berdasarkan peta residual .....	71
30. Model <i>slicing</i> 2D lintasan A-A'.....	72
31. Model <i>slicing</i> 2D lintasan B-B' .....	72
32. Penampang model resistivitas 2D Magnetotelurik .....	74
33. Penampang anomali residual, FHD, SVD dan model <i>slicing</i> A-A' 3D Gayaberat .....	75
34. Penampang anomali residual, FHD, SVD dan model <i>slicing</i> B-B' 3D Gayaberat .....	78
35. Model Konseptual Sistem Panasbumi.....	79

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian Terdahulu.....	13
2. Nilai densitas batuan .....	24
3. Koefisien Filter SVD .....	36
4. Nilai Resistivitas Batuan .....	39
5. Data yang digunakan dalam penelitian .....	48
6. Peralatan yang digunakan dalam penelitian.....	49
7. Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	50
8. Nilai kedalaman Regional Residual .....	63
9. Nilai cutt-of dan lebar jendela.....	63
10. Identifikasi jenis sesar lintasan A-A' .....	68
11. Identifikasi jenis sesar lintasan B-B' .....	69

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi global termasuk Indonesia mengalami peningkatan yang cukup pesat sejalan dengan bertambahnya jumlah penduduk dan berkembangnya sektor industri. Keamanan energi nasional di masa depan akan sangat bergantung pada ketergantungan yang tinggi pada sumber energi fosil. Menjawab tantangan tersebut, pemerintah mulai melakukan upaya transisi energi ke energi terbarukan (Hermawan & Prabhawati, 2024). Indonesia dikenal sebagai negara yang memiliki potensi sumber daya energi terbarukan yang sangat besar, salah satunya panasbumi. Hal tersebut disebabkan karena Indonesia berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama dan sebagai negara yang berada pada jalur "Ring of Fire" atau cincin api pasifik, sehingga menciptakan tatanan geodinamika yang mendukung pembentukan sistem panasbumi. Interaksi konvergen Lempeng Indo-Australia, Pasifik, dan Eurasia menyebabkan deformasi kerak serta terbentuknya rekahan yang memicu naiknya magma dari mantel bumi (Suniah & Rochayati, 2025). Aktivitas tektonik memicu pembentukan magma dari mantel bumi menjadi sumber panas alami bagi fluida yang terjebak di bawah permukaan. Potensi panasbumi Indonesia diperkirakan mencapai 28,91 GW yang tersebar di 312 lokasi di berbagai pulau besar seperti Sumatra, Jawa, dan Sulawesi, yang menjadikannya salah satu cadangan panasbumi terbesar di dunia (Agung, 2018).

Sistem panasbumi secara umum tersusun oleh beberapa komponen utama yang saling berinteraksi, yaitu sumber panas (*heat source*), reservoir, batuan penudung (*cap rock*), dan jalur sirkulasi fluida (Irfan & Daud, 2019). Sistem ini didominasi oleh konveksi air panas, dimana panas dari sumber magmatik atau anomali termal dalam kerak bumi memanaskan fluida bawah permukaan. Fluida panas tersebut

kemudian tersimpan dan bersirkulasi di dalam reservoir yang bersifat permeabel, umumnya berupa batuan karbonat atau batuan terfraktur, sehingga memungkinkan aliran fluida dalam jumlah besar. Di atas reservoir, terdapat *cap rock* dengan permeabilitas rendah yang berfungsi menahan fluida panas agar tidak langsung terlepas ke permukaan, sehingga tekanan dan temperatur sistem tetap terjaga (Corrado dkk., 2014). Salah satu daerah di Indonesia yang mempunyai prospek panasbumi yang signifikan berada pada daerah Bonjol, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat.

Daerah Panasbumi Bonjol berada di zona depresi (*graben*) Bonjol yang dibentuk oleh pergerakan sistem Sesar Sumatera yang membentang dari Banda Aceh sampai Teluk Semangko di Lampung. Manifestasi air panas di empat lokasi yaitu Padang Baru, Sungai Limau, Takis, dan Kambahan menunjukkan potensi panasbumi di daerah Bonjol. Semua manifestasi air panas yang ditemukan mengandung jenis air klorida dan berada pada keseimbangan parsial (Hutapea dkk., 2000). Meskipun Pulau Sumatera memiliki potensi panasbumi yang sangat besar, tingkat pemanfaatannya masih tergolong rendah. Hingga saat ini, total kapasitas terpasang di seluruh Pulau Sumatera baru sekitar 122 MW (Agung, 2018). Oleh sebab itu dibutuhkan metode geofisika untuk membuktikan keberadaan sistem panasbumi di bawah permukaan secara lebih tepat, yang mana dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode Gayaberat dan Magnetotelurik.

Metode Gayaberat ialah salah satu metode Geofisika yang dimanfaatkan untuk mengidentifikasi kondisi struktur geologi bawah permukaan berdasarkan perbedaan nilai densitas batuan. Perubahan atau penurunan struktur bawah permukaan dapat dianalisis melalui anomali Bouguer, yang mencerminkan variasi densitas batuan secara lateral serta geometri atau bentuk sumber anomali itu sendiri (Sarkowi, 2014). Data gayaberat dapat diperoleh dari pengukuran langsung di lapangan maupun dari data sekunder berbasis satelit, seperti GGMplus. Data gravitasi sekunder GGMplus 2013 merupakan model gravitasi *global* beresolusi tinggi yang menyediakan informasi dengan jarak antar titik data sekitar 200 meter pada arah utara – selatan (Sudrajad, 2023). Pada penelitian ini, kedua sumber data tersebut dibandingkan untuk menentukan data Gayaberat yang paling akurat dalam menggambarkan kondisi bawah permukaan daerah Bonjol, yang selanjutnya

digunakan pada tahap interpretasi. Sedangkan, Metode Magnetotelurik (MT) merupakan metode geofisika elektromagnetik pasif yang memanfaatkan variasi alami medan listrik dan medan magnet Bumi untuk memetakan struktur resistivitas bawah permukaan hingga kedalaman yang besar. Dalam eksplorasi panasbumi metode ini berperan untuk mengenali komponen sistem hidrotermal berdasarkan perbedaan nilai tahanan jenis (Panjaitan, 2010).

Beberapa penelitian terdahulu di daerah Bonjol telah dilakukan menggunakan pendekatan geofisika secara terpisah, seperti metode gayaberat dengan data pengukuran langsung oleh (Zaenudin dkk., 2013) untuk pemodelan struktur dan reservoir Lapangan Panasbumi Bonjol dari anomali gayaberat, dan penelitian oleh (Maula, 2022) untuk identifikasi reservoir Panasbumi Bonjol berdasarkan analisis data magnetotelurik. Namun, penggunaan satu metode secara tunggal masih memiliki keterbatasan dalam menggambarkan sistem panasbumi secara menyeluruh. Oleh sebab itu, dalam penelitian ini terlebih dahulu dilakukan perbandingan data gayaberat untuk memilih data yang paling sesuai, sebelum selanjutnya diintegrasikan dengan metode magnetotelurik. Integrasi kedua metode tersebut diharapkan dapat menghasilkan interpretasi sistem panasbumi daerah Bonjol yang lebih akurat, dan memiliki nilai kebaruan dibandingkan penelitian sebelumnya.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dijabarkan sebelumnya, maka dapat dirumuskan tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan perbandingan antara data anomali gayaberat hasil pengukuran langsung di lapangan dengan data anomali gayaberat dari model GGMPPlus untuk menganalisis kesesuaian pola anomali serta kesesuaian gambaran struktur geologi daerah penelitian.
2. Mengidentifikasi struktur geologi di daerah penelitian menggunakan analisis *derivative* metode gayaberat.

3. Memodelkan inversi 3D data gayaberat untuk mengidentifikasi distribusi densitas bawah permukaan.
4. Menentukan nilai distribusi Resistivitas berdasarkan model Inversi 2 Dimensi data Magnetotelurik.
5. Memodelkan sistem Panasbumi Bonjol berdasarkan data Gayaberat dan Magnetotelurik.

### **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan hanya pada identifikasi sistem panasbumi daerah Panasbumi Bonjol.
2. Data yang digunakan merupakan data pengukuran langsung oleh Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panasbumi (PSDMBP) dan data sekunder *Global Gravity Model Plus (GGMPlus)*.
3. Identifikasi sistem panasbumi dilakukan dengan mengintegrasikan hasil pemodelan pada data gayaberat dengan data Magnetotelurik.
4. Penelitian difokuskan pada identifikasi sistem panasbumi yang dibatasi hanya pada komponen *caprock*, reservoir dan *heatsource*.

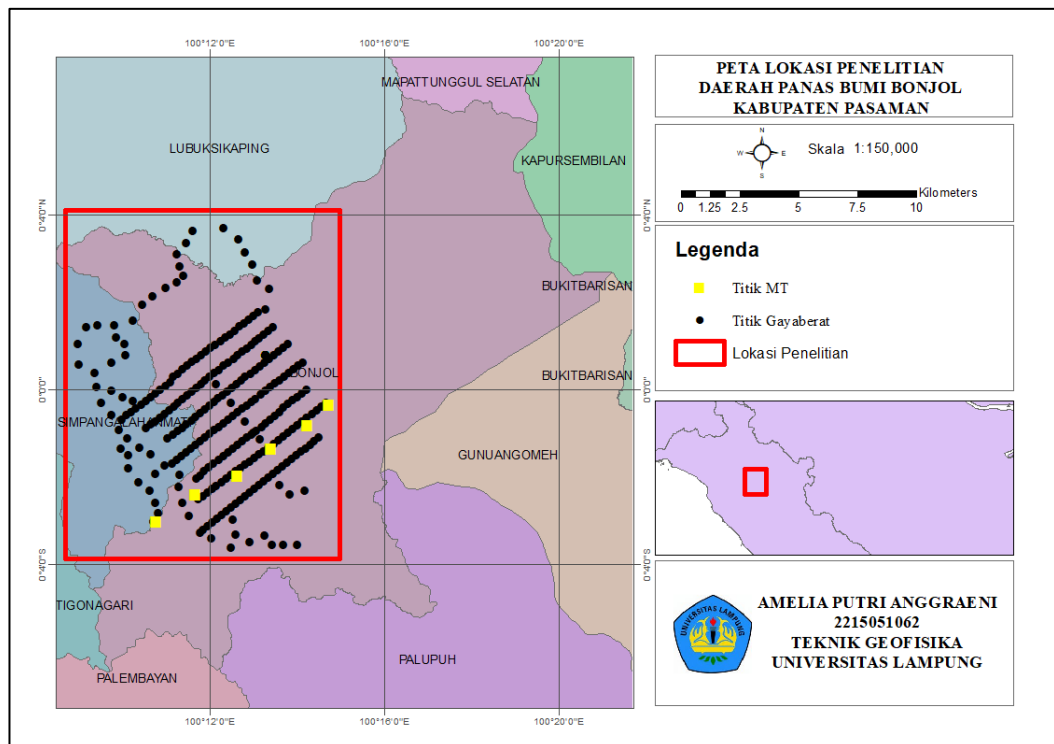
### **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan tambahan wawasan dan referensi terkait korelasi data gayaberat dan magnetotelurik dalam kegiatan eksplorasi panasbumi, khususnya untuk mengenali sistem panasbumi di daerah Bonjol, Sumatera Barat. Hasil penelitian ini diharapkan mampu menyajikan gambaran yang lebih rinci mengenai kondisi struktur bawah permukaan dan sistem panasbumi dengan mengintegrasikan kedua metode geofisika tersebut.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Lokasi Daerah Penelitian

Secara administratif penelitian ini berlokasi di daerah Bonjol, Kabupaten Pasaman, Provinsi Sumatera Barat. Daerah Panasbumi Bonjol berada pada posisi geografis antara  $100^{\circ}8'51,72 - 100^{\circ}16'27,48$  BT dan  $0^{\circ}3'46,08''$  LU -  $0^{\circ}3'43,2''$  LS. Luas wilayah Kecamatan Bonjol sekitar  $194.12 \text{ km}^2$  dan berada pada elevasi 100 – 1.160 m. Gambar 1 menunjukkan peta administrasi daerah penelitian.



Gambar 1. Lokasi Daerah Penelitian

### 2.1 Struktur Geologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian terletak di zona Sistem Sesar Sumatera (SFS), yang berarah dari barat laut ke tenggara dan panjang zona sesar adalah 1650 km. Pada awalnya peneliti menduga bahwa sistem sesar pada daerah penelitian berupa sesar

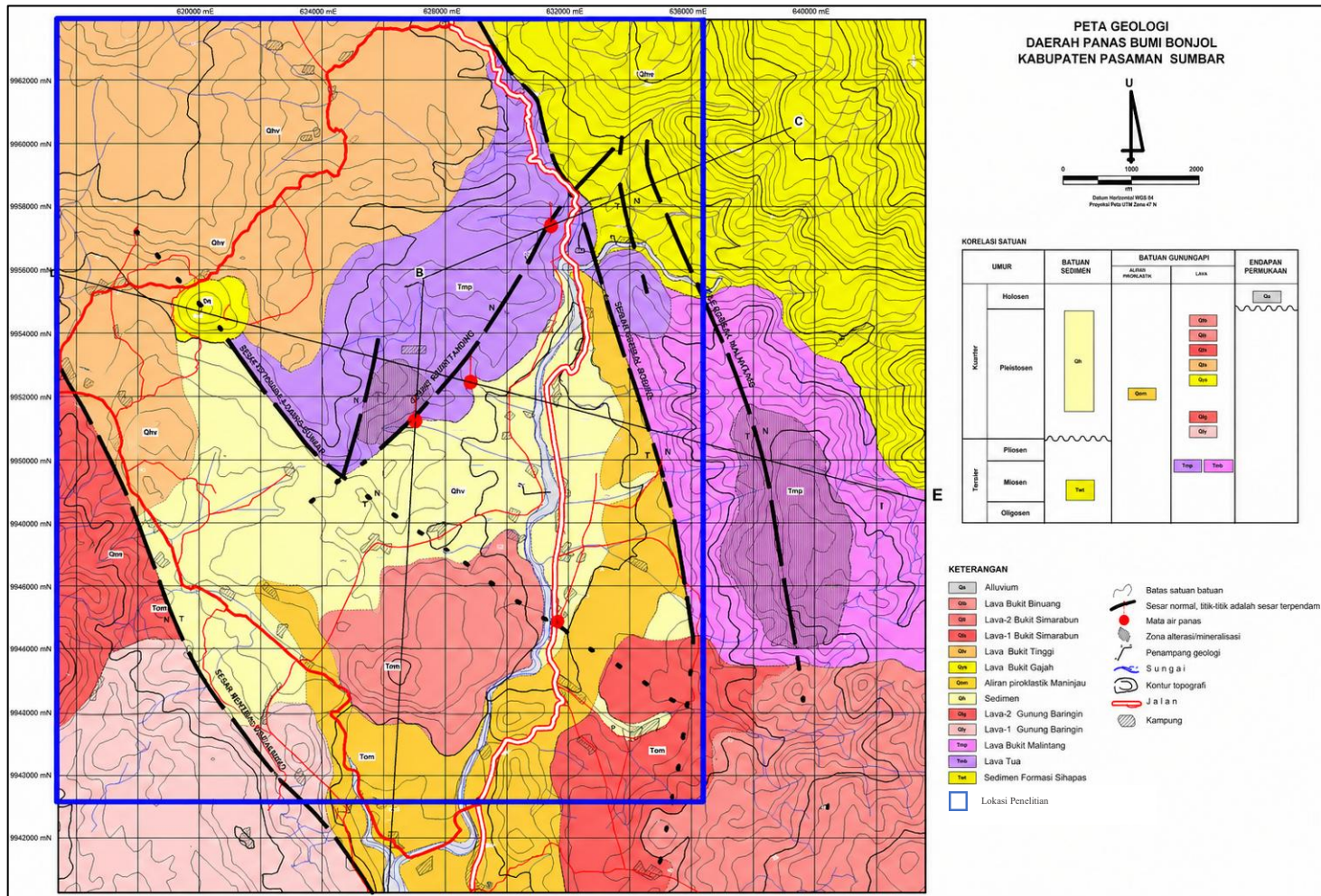
Normal. Namun penelitian selanjutnya menyatakan bahwa sistem sesar tersebut tersusun atas sejumlah sesar yang memiliki arah sejajar dengan rentang umur yang berbeda-beda. Beberapa di antaranya diperkirakan terbentuk pada periode Kapur Tengah, sedangkan sesar lainnya mulai aktif sejak Paleogen (Kholid dkk., 2007)

Berdasarkan penelitian oleh (Kholid dkk., 2007) daerah Panasbumi Bonjol memiliki 5 struktur sesar yang ditandai oleh beberapa indikasi geologi, seperti munculnya mata air panas, kelurusan lembah serta pegunungan, keberadaan kekar, bidang sesar dan zona hancuran batuan. Lima sesar tersebut yaitu:

1. Sesar Malintang: Relatif berarah ke barat laut – tenggara yang dicirikan oleh kelurusan punggung bukit memanjang. Jenis sesar ini merupakan Sesar normal dengan di sebelah barat daya mengalami penurunan, sesar ini diakibatkan oleh gaya tarikan yang bergerak dari timur laut ke barat daya.
2. Sesar Bonjol: Sesar ini merupakan Sesar normal berarah barat laut – tenggara yang dicirikan oleh adanya kelurusan punggung bukit memanjang, kekar-kekar, zona hancuran batuan, dan batuan ubahan/alterasi. Sesar ini sebagai proses dari pembentukan jalur mineralisasi di wilayah penelitian dipengaruhi oleh Sesar Bonjol Dan Sesar Malintang, yang membentuk sesar tangga.
3. Sesar Alahan Mati: Terletak di sebelah barat daya wilayah Panasbumi Bonjol dan berarah ke barat laut – tenggara serta mempunyai bagian sebelah timur laut yang relatif turun. Pada sebelah timur daerah Panasbumi Bonjol struktur sesar tersebut membentuk suatu graben yang berasosiasi dengan Sesar Bonjol.
4. Sesar Padang Baru: Terletak dibagian tengah wilayah penelitian dengan arah barat laut – tenggara. Sesar ini diinterpretasikan sebagai sesar normal yang diakibatkan blok barat daya relatif bergerak turun. Mata air panas Padang Baru, daerah hancuran, kekar-kekar, dan kelurusan punggung menunjukkan bahwa permukaannya mengindikasikan sesar.
5. Sesar Takis: Terletak pada bagian tengah area penelitian yang mengarah ke barat daya – timur laut. Indikasi keberadaan sesar ini terlihat cukup jelas yang ditunjukkan oleh kelurusan kemunculan mata air panas (seperti air panas Takis, air panas sungai Limau, dan air panas sungai Langkuik dan Kambahan), zona hancuran, kekar-kekar, air terjun (bidang sesar), dan mineralisasi dan ubahan batuan.

Hasil analisis struktur geologi menunjukkan bahwa sesar di daerah penelitian berperan sebagai jalur utama pergerakan fluida dari bawah permukaan. Struktur ini mengontrol arah aliran fluida sekaligus mempengaruhi munculnya manifestasi panas bumi di permukaan. Oleh karena itu, kemunculan mata air panas sangat berkaitan dengan posisi dan karakter sesar yang berkembang. Manifestasi yang ditemukan umumnya berupa mata air panas dengan sifat fisik dan kimia yang bervariasi, mencerminkan kondisi sistem panas bumi dan interaksinya dengan batuan sekitar. Manifestasi panas bumi di daerah penelitian meliputi:

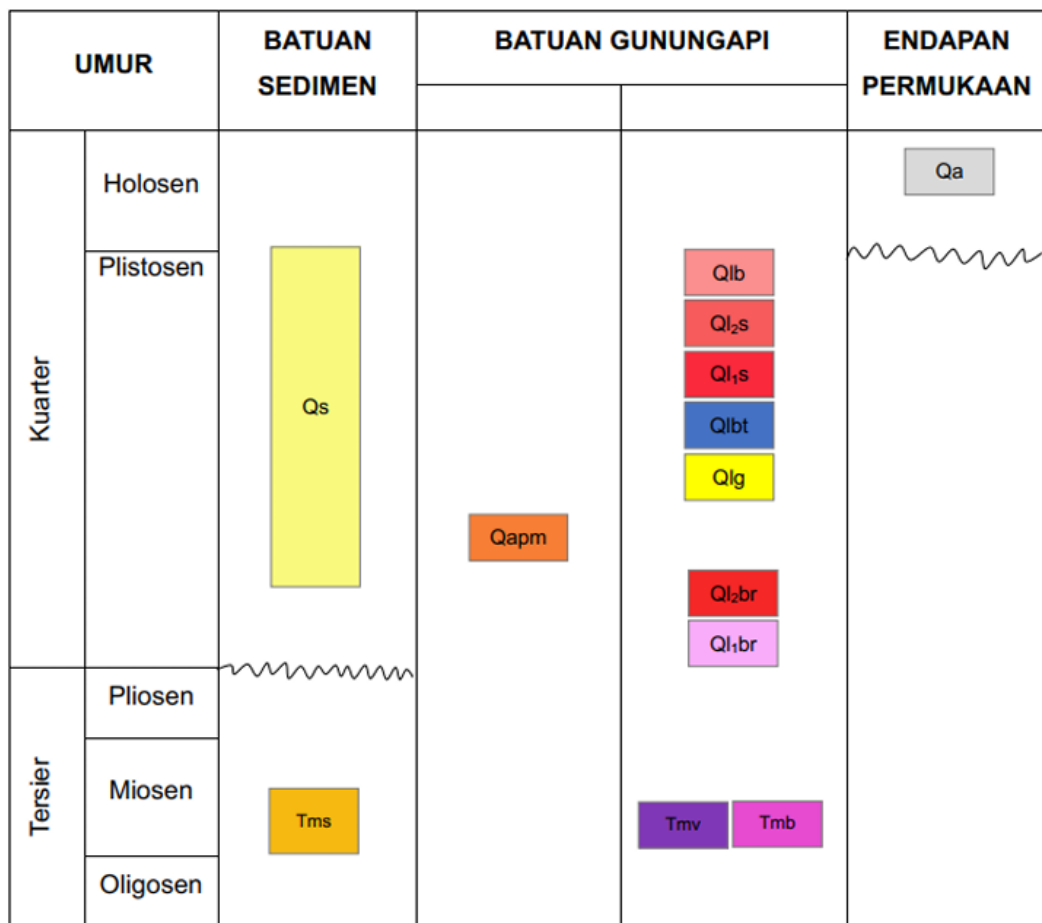
1. Mata Air Panas Padang Baru: Mata air panas ini ditemukan di wilayah Kampung Padang Baru, dengan koordinat UTM X = 635.833 mT dan Y = 9.997.416 mS. Kemunculannya berada pada batuan sedimen yang berasal dari lingkungan danau atau depresi. Suhu air tercatat sekitar 49,7°C dengan pH 6,5, kondisi air jernih, serta terdapat endapan karbonat berupa travertin. Keberadaan mata air panas ini dikontrol oleh struktur Sesar Padang Baru.
2. Mata Air Panas Sungai Takis: Manifestasi ini muncul di sepanjang lembah Sungai Takis pada koordinat UTM X = 633.504 mT dan Y = 10.000.611 mU. Mata air panas tersebut muncul secara berkelompok dengan suhu sekitar 87,9°C dan pH 6,9. Airnya jernih dan di permukaan banyak dijumpai endapan travertin, termasuk yang telah mengalami pemfosilan, berwarna hitam, keras, dan memiliki ketebalan hingga beberapa meter. Kemunculan mata air ini dikendalikan oleh Sesar Takis yang membentuk pola kelurusan berarah barat daya–timur laut.
3. Mata Air Panas Sungai Limau: Lokasi mata air panas ini berada pada koordinat UTM X = 634.409 mT dan Y = 10.001.219 mU, muncul di endapan aluvial Sungai Limau. Manifestasi ini juga berkelompok dengan suhu sekitar 73,5°C dan pH 7,3. Airnya jernih, terlihat adanya gelembung gas, serta sedikit endapan karbonat (travertin). Sistem kemunculannya dikontrol oleh struktur geologi yang sama dengan mata air panas Sungai Takis, yaitu Sesar Takis.
4. Mata Air Panas Sungai Langkuik/Kambahan: Mata air panas ini terletak pada koordinat UTM X = 635.716 mT dan Y = 10.003.684 mU. Suhu air mencapai sekitar 73,4°C dengan pH 7,5 dan kondisi air jernih, kemunculannya juga dikontrol oleh Sesar Takis.



Gambar 2. Peta Geologi Daerah Bonjol (Kholid dkk., 2007)

## 2.2 Stratigrafi Regional

Menurut Kholid (2007) stratigrafi wilayah Panasbumi Bonjol didasarkan pada hubungan relatif antar satuan batuan. Penamaan setiap satuan batuan ditentukan dengan mempertimbangkan pusat erupsi, mekanisme pembentukan, serta proses genesa batuan tersebut. Hasil survei menunjukkan bahwa litologi di Daerah Panasbumi Bonjol terbagi ke dalam 13 satuan batuan, yang meliputi atas dua satuan batuan sedimen, sepuluh satuan batuan vulkanik, serta satu satuan endapan permukaan berupa aluvium.



Gambar 3. Satuan stratigrafi daerah Panasbumi Bonjol (Kholid dkk., 2007)

Gambar 3 merupakan satuan stratigrafi Panasbumi Bonjol yang memiliki 13 formasi batuan, yaitu sebagai berikut.

1. Satuan Sedimen Formasi Sihapas (Tms): Tersebar di bagian timur laut wilayah penelitian dan mencakup sekitar 15% dari total luas daerah kajian. Secara litologi, satuan ini tersusun atas konglomerat, serpih berkarbon, batulanau, serta

- batupasir kuarsa. Singkapan batuan umumnya bersifat sangat kompak dan keras, serta pada beberapa lokasi ditemukan lapisan batubara sebagai sisipan.
2. Satuan Aliran Lava Tua (Tmv): Tersebar dari pusat hingga utara wilayah penelitian. Pada umumnya, singkapan batuan telah mengalami pelapukan yang cukup besar, dan pada beberapa tempat menunjukkan proses mineralisasi atau ubahan hidrotermal. Sistem sesar yang bergerak dari barat daya ke timur laut, terutama sesar Takis, memengaruhi keberadaan satuan aliran lava tua. Sesar Takis mengatur munculnya mata air panas di wilayah Takis, Sungai Limau, dan Sungai Langkuik/Kambahan.
  3. Satuan Aliran Lava Bukit Malintang (Tmbm): Aliran lava dasitik dengan umur sebanding dengan satuan lava tua terletak di bagian timur wilayah penelitian. Sebagian besar batuan pada satuan ini telah mengalami pelapukan intensif serta proses ubahan dan mineralisasi, yang juga berasosiasi dengan aktivitas penambangan emas tradisional oleh masyarakat setempat. Singkapan batuan yang masih relatif segar, terutama di lereng barat Bukit Malintang, memiliki warna abu-abu terang, masif, dan terkekar dengan banyak urat kuarsa. Batuan biasanya porfiritik halus.
  4. Satuan Aliran Lava 1 Gunung Baringin (Ql<sub>1</sub>br): Satuan Aliran Lava 1 Gunung Baringin berada di bagian barat daya wilayah penelitian dan terlihat jelas di sekitar Desa Alahan Mati. Satuan ini membentuk punggung memanjang dengan lereng yang relatif sedang. Kondisi batuan umumnya masih cukup segar, bersifat masif dan keras, meskipun di beberapa tempat dijumpai kekar serta pelapukan yang cukup kuat. Sesar Normal Alahan Mati yang bergerak dari barat laut ke tenggara mempengaruhi keberadaan satuan ini. Sesar ini diduga berfungsi sebagai batas barat zona depresi di daerah penelitian.
  5. Satuan Aliran Lava 2 Gunung Baringin (Ql<sub>2</sub>br): Berada di bagian barat hingga barat daya daerah penelitian dan tersusun oleh batuan lava berkomposisi andesitik. Singkapan batuan umumnya masih relatif segar dan masif, meskipun pada beberapa lokasi telah mengalami pelapukan yang cukup kuat serta berkembang kekar-kekar. Berdasarkan pengamatan lapangan, litologi satuan ini memiliki kemiripan dengan satuan Aliran Lava 1 Gunung Baringin,

namun menunjukkan tekstur yang lebih kasar. Selain itu, di beberapa lokasi ditemukan bentuk vesikuler yang mungkin merupakan bagian atas aliran lava.

6. Satuan Sedimen Danau (Qs): Menempati bagian tengah daerah penelitian dan tersusun oleh endapan danau berupa perselingan antara batupasir dan lempung. Singkapan batumannya masih dapat dijumpai dengan baik di lapangan, dengan warna bervariasi mulai dari putih, abu-abu, hingga kuning kecoklatan.
7. Satuan Aliran Piroklastika Maninjau (Qapm): Terletak di bagian selatan wilayah penelitian, dengan sebagian besar tertutup oleh tebing-tebing bukit. Material penyusunnya sering dimanfaatkan oleh masyarakat setempat sebagai bahan campuran dalam pembuatan batu bata. Endapan aliran piroklastika ini terutama terdiri dari batuapung (*pumice*) berwarna putih dengan tingkat pemilahan yang tinggi dan kemas tertutup.
8. Satuan Aliran Lava Bukit Gajah (Qlg): Terletak di bagian barat laut wilayah penelitian dan terdiri dari lava andesitik. Sebagian besar batumannya telah memudar. Pada megaskopis, batuan berwarna abu-abu dan terlihat kekar dan struktur berlembar (*sheeting joint*). Tekstur batumannya berupa porfiritik dengan fenokris plagioklas dan piroksen yang tertanam pada massa dasar mikrokristalin hingga membentuk gelas vulkanik. Satuan ini diperkirakan terbentuk pada kala kuartar sebagai akibat dari erupsi kuat Bukit Gajah.
9. Satuan Aliran Lava Bukit Tinggi (Qlbt): Terletak di bagian barat laut wilayah penelitian, dengan banyak singkapan di sekitar Desa Watas, Koto Tangah, dan Pinang. Pada umumnya, kondisi batuan masih relatif segar, tetapi pada beberapa tempat terlihat perubahan berupa mineral lempung (montmorilonit) berwarna abu-abu dan mineral pirit. Batuan penyusunnya adalah lava berwarna abu-abu gelap, sangat vesikuler, dan bertekstur porfiritik secara megaskopis. Fenokris yang ditemukan terdiri dari hornblende, plagioklas, dan piroksen yang tertanam dalam massa dasar gelas vulkanik dan mikrokristalin.
10. Satuan Aliran Lava 1 Bukit Simarabun (Ql<sub>1</sub>s): Berada pada bagian tenggara daerah penelitian dan tersusun oleh bongkah-bongkah lava. Pada beberapa lokasi, satuan ini memperlihatkan struktur berlembar (*sheeting joint*), sementara sebagian batumannya telah mengalami pelapukan yang cukup kuat.

11. Satuan Aliran Lava 2 Bukit Simarabun (Ql<sub>2s</sub>): Berada di bagian tenggara daerah Panasbumi Bonjol dan merupakan kelanjutan dari punggung atas satuan Aliran Lava 1 Bukit Simarabun. Singkapan batumannya ditemukan di sekitar Desa Air Abu dan tersusun oleh lava andesitik yang memperlihatkan struktur berlembar serta sebagian telah mengalami pelapukan. Satuan ini menutupi satuan lava di bawahnya dan diduga berasal dari pusat erupsi yang sama, yaitu Bukit Simarabun. Umur satuan ini diperkirakan kuartar.
12. Satuan Aliran Lava 1 Bukit Binuang (Qlb): Berada di bagian selatan–tengah daerah Panasbumi Bonjol dan membentuk kerucut Bukit Binuang dengan lereng yang relatif sedang. Singkapan batumannya umumnya masih segar dan tersusun oleh bongkahan-bongkahan lava andesitik. Batuan berwarna abu-abu dengan tekstur porfiritik, serta fenokris berupa plagioklas dan piroksen yang tertanam dalam massa dasar mikrokristalin dan gelas vulkanik. Satuan batuan ini memiliki umur absolut sekitar  $1,3 \pm 0,1$  juta tahun, yang termasuk dalam periode plistosen. Sumber panasnya diperkirakan berasal dari akumulasi sisa magma yang terperangkap di bawah kerucut Bukit Binuang, meskipun kedalamannya belum dapat diketahui secara pasti.
13. Satuan Aluvium (Qa): Merupakan endapan permukaan batuan yang telah terendapkan dari pemotongan sebelumnya. Komponennya terdiri dari konglomerat, pasir, lempung, dan bongkah lava yang terlepas. Endapan ini biasanya ditemukan di dasar sungai dan di sepanjang alurnya. Satuan aluvium diperkirakan telah ada sejak kuartar.

### **2.3 Penelitian Terdahulu**

Penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini dirangkum dalam Tabel 1. Berbagai penelitian tersebut menjadi dasar konseptual dan metodologis dalam penelitian ini dengan kondisi geologi yang kompleks, sekaligus memperkuat relevansi pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis & Tahun	Hasil Penelitian
1.	(Nugraha, 2023) Identifikasi Daerah Prospek Reservoir Panasbumi Maritaing Berdasarkan Analisis Data Metode Gayaberat dan Magnetotelurik. (Skripsi). Universitas Lampung.	Penelitian ini dilakukan untuk menentukan zona prospek reservoir panasbumi di wilayah Maritaing, Kabupaten Alor, Nusa Tenggara Timur, melalui integrasi metode gayaberat dan magnetotelurik (MT) yang didukung oleh data geologi dan geokimia. Hasil kajian menunjukkan bahwa daerah penelitian dipengaruhi oleh sistem sesar berorientasi Barat Laut–Tenggara dan Timur Laut–Barat Daya. Zona prospek reservoir diperkirakan terletak disekitar bukit Karitemang, struktur batuan daerah ini terdapat aliran piroklastik Karitemang, lava Karitemang dan juga batuan sedimen.
2.	(Maula, 2022) Identifikasi Reservoir Panasbumi Bonjol Berdasarkan Analisa Data Magnetotelurik, Geolistrik dan Geokimia. Universitas Lampung.	Pemodelan inversi 2D magnetotellurik menunjukkan nilai resistivitas 0-500 Ohm-m, dengan rincian kategori rendah (0-12 Ohm-m; 0-1500 m), sedang (12-78 Ohm-m; 500-3000 m), dan tinggi (78-500 Ohm-m; >1500 m). Area prospek diidentifikasi melalui reservoir (12-120 Ohm-m) dan sumber panas (>120 Ohm-m), yang dibatasi oleh sesar Padang Baru serta Sesar normal Bonjol. Temuan ini diperkuat oleh data geokimia (Hg tinggi) dan tahanan jenis rendah (<15 Ohm-m) pada AB/2 500 m dan 1000 m di sekitar mata air panas Padang Baru.

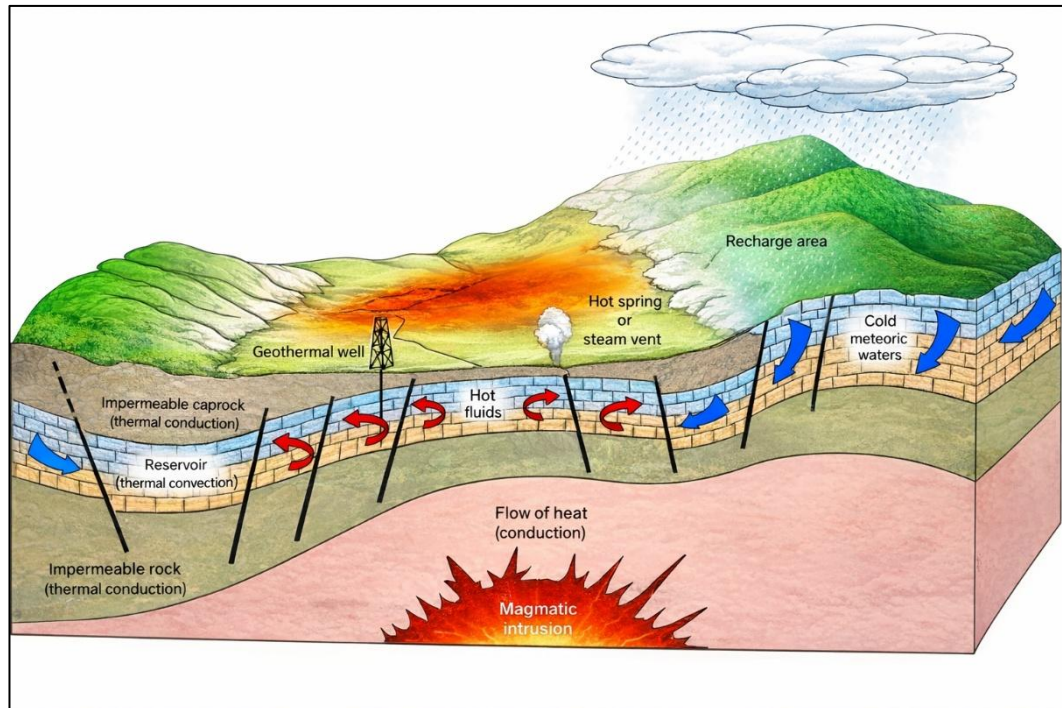
No	Penulis & Tahun	Hasil Penelitian
3.	(Ramadhan dkk., 2020) Analisa Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panasbumi “GF-TNH” Sumatera Barat Berdasarkan Metode Gaya Berat.	Analisis metode gaya berat menunjukkan nilai Anomali Bouguer berkisar antara $-48,3$ hingga $-4,0$ mGal dengan kedalaman regional sekitar $2,43$ km yang merepresentasikan batas kerak bumi. Anomali residual berada pada rentang $-0,5$ hingga $4,0$ mGal pada kedalaman sekitar $0,77$ km, yang mencerminkan batas antara batuan dasar dan batuan dangkal. Kondisi bawah permukaan didominasi oleh struktur Sesar normal dan sesar naik. Variasi densitas mengindikasikan dominasi batuan beku vulkanik berdensitas tinggi yang diduga sebagai intrusi, sementara zona berdensitas rendah diinterpretasikan sebagai area prospek reservoir panasbumi.
4.	(Zaenudin dkk., 2013) Pemodelan Struktur dan Reservoir Lapangan Panasbumi Bonjol Dari Anomali Gaya Berat.	Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis data gayaberat di daerah Panasbumi Bonjol melalui teknik <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD) untuk memetakan struktur sesar dan pemodelan inversi 3D dari anomali Bouguer untuk menentukan dimensi reservoir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur sesar yang teridentifikasi melalui teknik SVD berkorelasi baik dengan struktur geologi di permukaan yang berarah Barat Laut-Tenggara dan Barat Daya-Timur Laut. Selain itu, pemodelan inversi 3D berhasil mengidentifikasi reservoir panasbumi yang terletak di bagian Selatan

No	Penulis & Tahun	Hasil Penelitian
5.	(Kholid dkk., 2007) Penelitian Terpadu (Geologi, Geokomia Dan Geofisika) Daerah Panasbumi Bonjol, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat.	<p>dan Timur daerah penelitian pada kedalaman sekitar 1.400 meter dengan densitas 1,7 g/cc, sementara sumber panas (<i>heat source</i>) diperkirakan berada di bagian Barat Laut pada kedalaman sekitar 7.000 meter dengan densitas 2,8 g/cc.</p> <p>Manifestasi panasbumi di daerah Bonjol ditandai oleh kemunculan beberapa mata air panas dengan suhu antara 49,7 hingga 87,9 °C, pH mendekati netral (6,5–7,5), serta keberadaan endapan travertin di sekitarnya. Kemunculan mata air panas tersebut dikontrol oleh struktur geologi berupa Sesar normal berarah barat laut–tenggara yang berkembang di wilayah penelitian.</p>

### III. TEORI DASAR

#### 3.1 Sistem Panasbumi

Energi panas yang tersimpan di bawah permukaan bumi dalam bentuk air panas maupun uap, yang berada pada kondisi geologi tertentu hingga mencapai kedalaman beberapa kilometer di dalam kerak bumi dikenal sebagai Sistem Panasbumi. Sistem ini tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, batuan penudung (*cap rock*), serta fluida panas. Pembentukan sistem panasbumi terjadi akibat proses perpindahan panas dari sumber panas di sekitarnya, baik melalui mekanisme konduksi maupun konveksi. Perpindahan panas secara konduksi berlangsung melalui media batuan, sedangkan konveksi terjadi ketika air bersentuhan langsung dengan sumber panas. Interaksi antara air meteorik yang meresap ke dalam bumi dengan panas pada kedalaman tertentu menghasilkan fluida panas yang terakumulasi di dalam reservoir. Reservoir berperan sebagai tempat penyimpanan fluida panas karena tersusun oleh batuan yang memiliki tingkat permeabilitas tinggi. Fluida panas tersebut tidak langsung keluar ke permukaan karena tertahan oleh batuan penudung yang bersifat kedap air. Namun, keberadaan struktur geologi seperti patahan yang memotong reservoir dapat menjadi jalur keluarnya fluida panas ke permukaan, yang kemudian muncul sebagai manifestasi panasbumi, misalnya mata air panas. Secara umum, keberadaan sistem panasbumi erat kaitannya dengan aktivitas magmatisme di suatu wilayah. Indonesia, yang secara geografis berada pada jalur cincin api dunia (*ring of fire*), memiliki kondisi geologi yang sangat mendukung terbentuknya sistem panasbumi, sehingga menyimpan potensi energi panasbumi yang besar (Hermawan dkk., 2012).



Gambar 4. Gambar konseptual sistem panasbumi (Syukri dkk., 2018)

Sistem panasbumi terjadi ketika rekahan dan patahan pada batuan berfungsi sebagai jalur yang memungkinkan air masuk ke dalam pori-pori batuan. Air tersebut kemudian meresap ke kedalaman dan menyebar mengikuti celah-celah batuan yang masih terbuka. Saat air mencapai zona yang memiliki sumber panas, suhunya meningkat. Pada kondisi ini, sebagian air dapat berubah menjadi uap, sementara sisanya tetap berada dalam bentuk cair. Perpindahan panas dalam sistem panasbumi terutama berlangsung melalui proses konveksi yang dipengaruhi oleh gaya apung. Walaupun air secara alami bergerak ke bawah akibat gravitasi, pemanasan menyebabkan densitas air menurun sehingga fluida menjadi lebih ringan dan cenderung bergerak ke atas. Seiring meningkatnya suhu, volume dan tekanan fluida juga bertambah, sehingga fluida panas memberikan tekanan batuan di sekitarnya dan mengalir melalui jalur rekahan atau patahan. Perbedaan tekanan antara bagian bawah permukaan dan permukaan bumi mengakibatkan fluida panas bergerak naik, sementara fluida yang lebih dingin bergerak turun. Pergerakan naik dan turun ini membentuk sirkulasi fluida yang berlangsung secara terus-menerus, yang dikenal sebagai arus konveksi dalam sistem panasbumi.

### 3.1.1 Manifestasi Panasbumi

Suharno (2012) menjelaskan bahwa keberadaan sistem panasbumi di suatu wilayah dapat dikenali melalui berbagai manifestasi yang muncul di permukaan. Manifestasi tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Mata air panas (*hot spring*) merupakan salah satu indikasi utama aktivitas panasbumi. Batuan pada dapur magma mampu menyimpan panas dalam jangka waktu yang sangat lama, bahkan hingga ribuan tahun. Ketika air tanah meresap ke dalam bumi dan bersentuhan dengan sumber panas tersebut, suhu air akan meningkat. Air yang telah mengalami pemanasan kemudian bergerak melalui celah atau rekahan batuan ke permukaan. Ketika air panas muncul di permukaan, itu disebut mata air panas. Jika debit air keluar cukup besar, dapat terbentuk kolam air panas.
2. Fumarola dan sulfatara juga menjadi ciri khas daerah panasbumi. Fumarola merupakan lubang atau celah tempat keluarnya gas-gas hasil aktivitas vulkanik, yang biasanya ditemukan di sekitar gunung api atau di sekitar rekahan kerak bumi. Melalui fumarola, uap air dan gas panas dilepaskan ke atmosfer. Sulfatara merupakan jenis fumarola khusus yang didominasi oleh emisi gas belerang. Manifestasi ini sering muncul di wilayah vulkanik dengan aktivitas hidrotermal yang intens dan ditandai oleh bau belerang yang khas akibat kandungan sulfur yang tinggi.
3. Geysir adalah fenomena semburan air panas dan uap ke permukaan bumi yang terjadi secara periodik. Geysir terbentuk dari sistem rekahan atau rongga bawah tanah yang terisi air dan dipanaskan oleh sumber panas di kedalaman. Seiring bertambahnya volume air dan meningkatnya suhu, tekanan uap di bawah permukaan menjadi semakin besar. Tekanan tersebut akhirnya mendorong air keluar ke permukaan dalam bentuk semburan yang kuat. Mekanisme ini meliputi pemanasan air, pembentukan uap, serta pelepasan tekanan secara tiba-tiba.
4. Lumpur panas merupakan manifestasi lain yang umumnya mengandung uap panas dalam jumlah terbatas dan gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang sulit mengalami kondensasi. Manifestasi ini sering dijumpai di daerah dengan aktivitas hidrotermal dangkal.

5. Kawah adalah bentuk morfologi berupa cekungan terbuka menyerupai corong yang menjadi tempat keluarnya material vulkanik seperti gas, uap, lava, dan material piroklastik. Kawah sering berasosiasi dengan aktivitas vulkanisme dan sistem panasbumi aktif.
6. Batuan alterasi terbentuk sebagai hasil dari kontak antara batuan asal dengan fluida hidrotermal. Sejumlah parameter, termasuk suhu, tekanan, jenis batuan, komposisi, dan pH fluida, serta durasi interaksi, mengontrol proses alterasi ini. Kontak antara batuan dengan air klorida yang berasal dari reservoir dalam (*deep chloride water*) dapat membentuk mineral-mineral hidrotermal atau mineral sekunder. Mineral seperti epidot, klorit, dan wairakit umumnya terbentuk pada kondisi suhu tinggi, sedangkan mineral adularia dan albit lebih sering dijumpai pada zona dengan permeabilitas tinggi. Oleh karena itu, karakteristik mineral pada batuan alterasi dapat memberikan informasi penting mengenai kondisi sistem panasbumi dan lingkungan bawah permukaan.

### 3.2 Metode Gayaberat

Metode gayaberat adalah teknik geofisika yang umum digunakan untuk melakukan survei dan menemukan daerah prospek panasbumi. Metode ini memiliki kemampuan untuk merepresentasikan kondisi bawah permukaan melalui variasi densitas batuan. Hal ini memungkinkan untuk mengenali komponen utama pada sistem panasbumi, seperti batuan penutup (*cap rock*), reservoir, serta sumber panas (*heat source*). Selain itu, metode gayaberat efektif dalam mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan yang berfungsi sebagai perangkap maupun jalur pergerakan fluida. Struktur ini termasuk area pengisian (*recharge*) dan area keluaran (*discharge*). Semua ini merupakan komponen penting dari pembentukan sistem panasbumi (Telford dkk., 1990).

Salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengukur perubahan medan gravitasi Bumi adalah metode gayaberat. Perubahan nilai gayaberat yang teramati di permukaan bumi dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik bawah permukaan, terutama variasi densitas dan jenis batuan. Selain itu, faktor geometris seperti perbedaan jarak antara permukaan bumi dan pusat bumi, serta kondisi topografi permukaan, juga turut berkontribusi terhadap variasi nilai gayaberat yang

terukur (Sarkowi, 2014). Menurut Djudjun (2005), metode gayaberat memiliki peranan penting dalam berbagai kajian yang berkaitan dengan pemetaan kondisi bawah permukaan bumi serta penelitian geologi. Prinsip dasar metode tersebut didasarkan pada sifat massa suatu benda, di mana perbedaan massa akan menimbulkan variasi gaya gravitasi yang dapat diukur dan dianalisis.

### 3.2.1 Data Gayaberat

Data gayaberat dalam eksplorasi geofisika pada dasarnya dapat diperoleh dari dua jenis sumber utama, yaitu pengukuran langsung di lapangan (*land surface gravity*) dan data gravitasi berbasis satelit seperti GGMPlus. Data gayaberat hasil pengukuran langsung di lapangan merupakan data primer yang didapatkan melalui pengukuran memakai alat gravimeter, dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi hingga mencapai orde 0.01–0.001 mGal, sehingga mampu merepresentasikan kondisi variasi densitas bawah permukaan secara nyata dan detail pada skala lokal. Data ini sering dimanfaatkan dalam eksplorasi geofisika dalam mengindikasikan struktur geologi seperti sesar, batas litologi, dan cekungan sedimen berdasarkan kontras densitas batuan. Namun proses akuisisi data lapangan memiliki beberapa keterbatasan, diantaranya memerlukan biaya yang relatif tinggi, waktu yang lama, dan juga terkendala kondisi medan yang sulit dijangkau seperti daerah pegunungan atau lembah, sehingga sering menyebabkan distribusi data tidak merata dan adanya kekosongan data di beberapa area. Akibat keterbatasan tersebut, meskipun akurat, data gayaberat lapangan sering kali tidak mampu memberikan cakupan wilayah yang luas secara menyeluruh (Wiguna dkk., 2024).

Data gayaberat GGMPlus merupakan data sekunder yang dihasilkan melalui pemodelan matematis dengan menggabungkan data gravitasi satelit (GRACE dan GOCE), model gravitasi global seperti EGM2008, serta efek topografi beresolusi tinggi dari SRTM, sehingga menghasilkan data dengan cakupan global dan resolusi spasial yang tampak sangat tinggi hingga sekitar 200 meter (Hirt dkk., 2012). Keunggulan utama data ini adalah kemampuannya mencakup area yang luas, termasuk daerah yang sulit dijangkau oleh survei lapangan, serta dapat digunakan untuk mengisi kekosongan data gravitasi (Wiguna dkk., 2024). Namun demikian, resolusi tinggi pada GGMPlus sebagian besar berasal dari kontribusi efek topografi (Residual Terrain Model/RTM), bukan dari peningkatan resolusi informasi geologi

bawah permukaan, sehingga informasi densitas batuan yang sebenarnya tetap terbatas pada resolusi data satelit sekitar puluhan kilometer. Oleh sebab itu, data GGMPPlus belum dapat dimanfaatkan secara langsung untuk interpretasi geologi tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu, seperti penghilangan efek topografi dan penerapan koreksi Bouguer, serta lebih tepat digunakan sebagai data pendukung atau alternatif dibandingkan sebagai pengganti utama data lapangan (Ananda dkk., 2025).

### 3.2.2 Konsep Dasar Gayaberat

#### 3.2.2.1 Gayaberat Newton

Hukum Gravitasi Newton menyatakan adanya interaksi gaya tarik antara dua benda bermassa yang terpisah sejauh  $r$  ( $m_1$  dan  $m_2$ ) yang disebut sebagai teori dasar metode gayaberat. Besarnya gaya gravitasi tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan sebagai berikut (Serway & Jewett, 2009):

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

Keterangan:

$\vec{F}$  : Gaya tarik menarik (N)

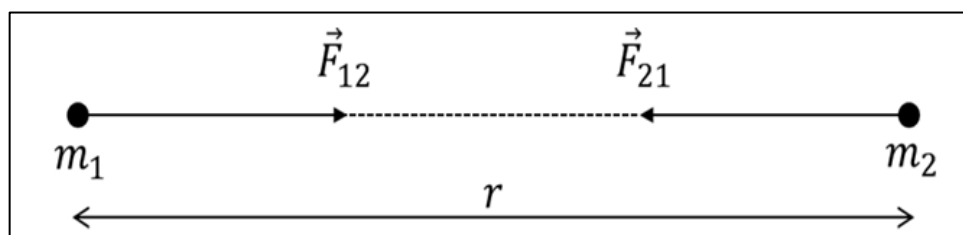
$m_1$  : Massa benda 1 (kg)

$m_2$  : Massa benda 2 (kg)

$r$  : Jarak antara dua buah benda (m)

$G$  : Konstanta gravitasi universal ( $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg S}^{-2}$ )

$\hat{r}$  : Vektor satuan arah gaya



Gambar 5. Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009)

#### 3.2.2.2 Percepatan Gayaberat

Newton juga menjelaskan hubungan antara gaya dan percepatan melalui Hukum II Newton. Hukum ini menyatakan bahwa gerak suatu benda dipengaruhi oleh gaya yang bekerja padanya, di mana besar gaya tersebut berbanding lurus

berdasarkan massa benda dan percepatan gravitasi bumi yang bekerja pada benda tersebut.

$$\vec{F} = m \vec{g} \quad (2)$$

Secara sederhana, kecepatan benda bermassa  $m_2$  yang disebabkan oleh gaya tarik benda bermassa  $m_1$  pada jarak  $r$  dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (3)$$

Jika diterapkan pada percepatan gravitasi bumi, maka persamaan tersebut dapat dituliskan menjadi:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} = -G \frac{M}{R^2} \hat{r} \quad (4)$$

Keterangan:

$\vec{g}$  : Percepatan gravitasi bumi ( $\text{m/s}^2$ )

$\vec{F}$  : Gaya berat atau gaya tarik gravitasi (N)

$m$  : Massa benda (kg)

$M$  : Massa bumi (kg)

$G$  : Konstanta gravitasi umum ( $6,674 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$ )

$R$  : Jari – jari bumi (km)

$\hat{r}$  : Vektor satuan yang menunjukkan arah gaya menuju pusat massa.

Pengukuran percepatan gravitasi pertama kali diperkenalkan oleh Galileo Galilei. Sebagai bentuk penghormatan terhadap kontribusinya, besaran percepatan gravitasi selain dituliskan dalam sistem MKS ( $\text{m/s}^2$ ) dan sistem CGS ( $\text{cm/s}^2$ ) juga dituliskan dalam satuan gal, yang umum digunakan dalam studi gayaberat, seperti gal dan miligal (mGal). Hubungan konversi antara satuan-satuan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2 \text{ (dalam c.g.s)}$$

Satuan anomali gayaberat dalam kegiatan eksplorasi diberikan dalam orde miligal (mGal):

$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal}$$

$$1 \mu\text{Gal} = 10^{-3} \text{ mGal} = 10^{-6} \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ mGal} = 10 \text{ g.u.} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

Dalam satuan m.k.s, gayaberat diukur dalam g.u. (*gravity unit*) atau  $\mu\text{m/s}^2$

### 3.2.2.3 Potensial Gayaberat

Potensial gayaberat adalah jenis energi yang terkait dengan upaya untuk menggerakkan massa. Jika suatu benda bermassa berada di dalam sistem ruang, medan potensial di sekitarnya akan diciptakan. Medan potensial konservatif menunjukkan bahwa upaya dalam medan gayaberat hanya dipengaruhi oleh posisi awal dan akhir daripada lintasan yang dilalui (Rosid, 2005).

$$V = G_m \int_{\infty}^r \frac{1}{r^2} dr \quad (5)$$

$$V = G \frac{m}{r^2} r \quad (6)$$

$$V = G \frac{m}{r} \quad (7)$$

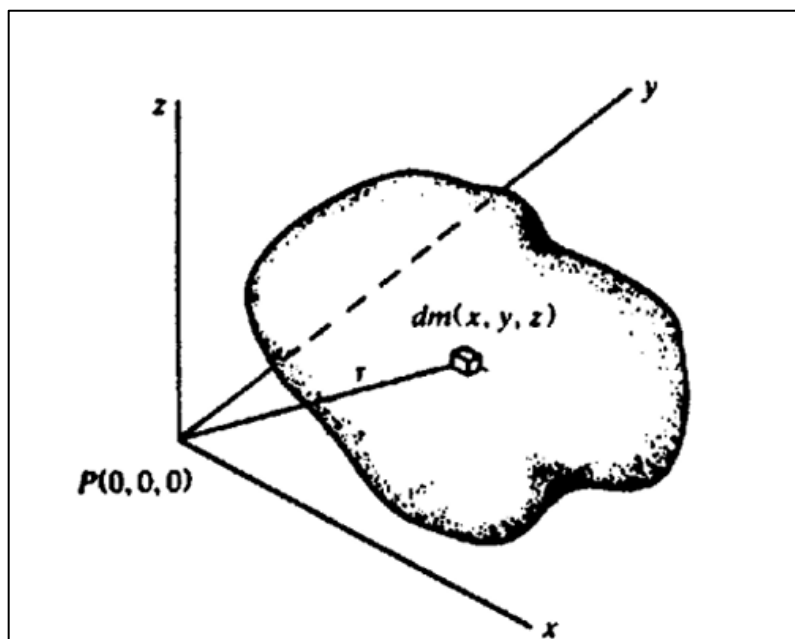
Keterangan:

$V$  : Potensial gravitasi (J/kg)

$m$  : Massa benda (kg)

$r$  : Jarak (m)

$G$  : Konstanta universal gravitasi ( $6,67 \times 10^{-11} m^{-3}kg^{-1}$ )



Gambar 6. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi (Telford dkk., 1990)

### 3.2.2.4 Rapat Massa Batuan (Densitas)

Dalam penggunaan metode gayaberat, densitas atau rapat massa batuan adalah salah satu faktor fisik yang sangat penting. Nilai densitas rata-rata wilayah survei diperlukan untuk perhitungan anomali Bouguer. Nilai densitas batuan

tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti densitas mineral penyusun, tingkat porositas, proses kompaksi akibat tekanan, dan tingkat pelapukan batuan (Brotopuspito, 2001). Setiap jenis batuan memiliki nilai densitas yang berbeda-beda. Perbedaan atau variasi rapat massa pada batuan sedimen umumnya dipengaruhi akibat proses tektonik yang bekerja di wilayah tersebut. Berikut ini disajikan variasi nilai densitas batuan berdasarkan (Telford dkk., 1990) dapat dilihat pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990)

<b>Jenis Batuan</b>	<b>Rentang Densitas (g/cc)</b>	<b>Rata-rata (g/cc)</b>
<b>Batuan Sedimen</b>		
<i>Overburden</i>		1,92
<i>Soil</i>	1,20-2,40	1,92
<i>Clay</i>	1,63-2,60	2,21
<i>Gravel</i>	1,70-2,40	2,00
<i>Sand</i>	1,70-2,30	2,00
<i>Sandstone</i>	1,61-2,76	2,35
<i>Shale</i>	1,77-3,20	2,40
<i>Limestone</i>	1,93-2,90	2,55
<i>Dolomit</i>	2,28-2,90	2,70
<i>Loess</i>	1,40-1,93	1,64
<i>Silt</i>	1,80-2,20	1,93
<i>Chalk</i>	1,53-2,60	2,01
<i>Halite</i>	2,10-2,60	2,22
<i>Glacier Ice</i>	0,88-0,92	0,90
<b>Batuan Beku</b>		
<i>Rhyolite</i>	2,35-2,70	2,52
<i>Andesit</i>	2,40-2,80	2,61
<i>Granite</i>	2,50-2,81	2,64
<i>Granodiorite</i>	2,67-2,79	2,73
<i>Porphyry</i>	2,60-2,89	2,74
<i>Quartz diorite</i>	2,62-2,96	2,79

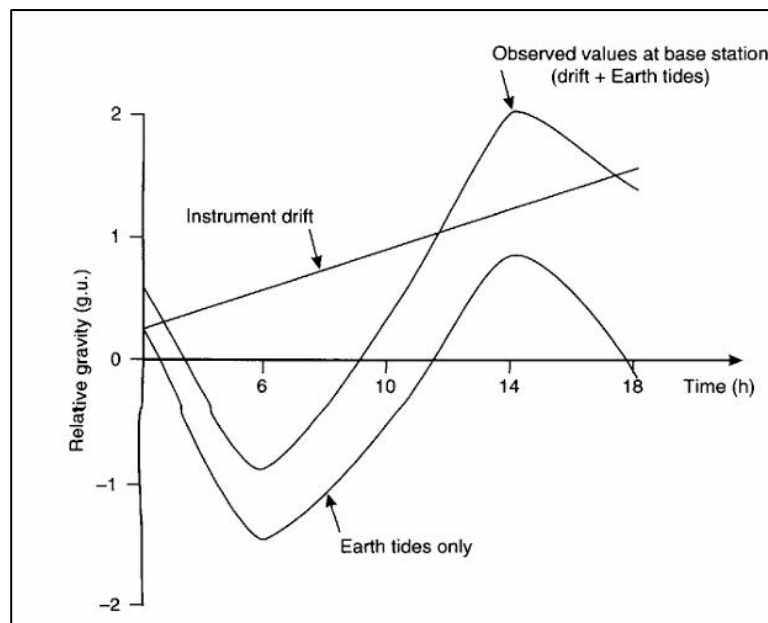
<b>Jenis Batuan</b>	<b>Rentang Densitas (g/cc)</b>	<b>Rata-rata (g/cc)</b>
<i>Diorite</i>	2,72-2,99	2,85
<i>Lavas</i>	2,80-3,00	2,90
<i>Diabase</i>	2,50-3,20	2,91
<i>Basalt</i>	2,70-3,30	2,99
<i>Gabbro</i>	2,70-3,50	3,03
<i>Peridotite</i>	2,78-3,37	3,15
<i>Syenite</i>	2,60-2,95	2,77
<i>Acid igneous</i>	2,30-3,11	2,61
<i>Basic igneous</i>	2,09-3,17	2,79
<b>Batuan Metamorf</b>		
<i>Quartzite</i>	2,50-2,70	2,60
<i>Schists</i>	2,39-2,90	2,64
<i>Graywacke</i>	2,60-2,70	2,65
<i>Marble</i>	2,60-2,90	2,75
<i>Serpentine</i>	2,40-3,10	2,78
<i>Slate</i>	2,70-2,90	2,79
<i>Gneiss</i>	2,59-3,00	2,80
<i>Amphibolite</i>	2,90-3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,20-3,54	3,37
<i>Phyllite</i>	2,68-2,80	2,74
<i>Granulite</i>	2,52-2,7	2,65

### **3.2.3 Koreksi – koreksi dalam Metode Gayaberat**

#### **3.2.3.1 Koreksi Pasang Surut (*Tide Correction*)**

Koreksi Pasang Surut (*Tide Correction*) merupakan salah satu tahapan penting dalam pengolahan data gayaberat. Koreksi ini dibutuhkan untuk menghilangkan efek gaya tarik benda-benda langit, terutama bulan dan matahari, pada permukaan bumi. Besarnya Koreksi Pasang Surut berubah secara periodik seiring dengan perubahan posisi relatif benda-benda langit tersebut terhadap bumi. Apabila tarikan gravitasi bulan dan matahari menyebabkan peningkatan nilai gayaberat terukur, maka nilai koreksi ditambahkan pada hasil pengamatan.

Sebaliknya, jika pengaruh gaya tarik tersebut berlawanan, maka nilai koreksi harus diturunkan. Perhitungan Koreksi Pasang Surut mengacu pada formulasi Longman (1959) dan dapat diterapkan dengan bantuan *software*. Akan ada nilai positif dan negatif yang ditampilkan pada grafik hasil Koreksi Pasang Surut. Nilai positif mengindikasikan bahwa bumi menerima gaya tarik lebih besar dibandingkan kondisi normal, sedangkan nilai negatif menandakan berkurangnya tarikan dibandingkan kondisi normal. Penerapan Koreksi Pasang Surut sangat penting dalam pengolahan data gayaberat karena mampu mereduksi gangguan (*noise*) akibat pengaruh benda-benda langit, sehingga data yang dihasilkan menjadi lebih akurat.



Gambar 7. Grafik pengaruh pasang surut bumi dan *drift* instrumen terhadap percepatan gravitasi (Reynolds, 1997)

### 3.2.3.2 Koreksi Apungan (*Drift Correction*)

Gravimeter bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan pegas yang dilengkapi dengan massa yang tergantung bebas pada ujungnya. Karena sifat pegas yang tidak sepenuhnya elastis, sistem tersebut tidak selalu kembali ke kondisi awal setelah mengalami perubahan. Selama proses pengukuran, guncangan atau getaran dapat menyebabkan pergeseran titik nol pembacaan, yang dikenal sebagai *drift* atau apungan, di mana nilainya berubah secara bertahap terhadap waktu. Untuk mengurangi kesalahan akibat *drift*, dilakukan koreksi menggunakan metode *loop*

tertutup, yakni melalui pengukuran kembali ke titik awal setelah seluruh titik pengamatan selesai. Nilai koreksi *drift* diperoleh dari selisih rata-rata hasil pembacaan pada titik awal dan titik akhir dalam setiap *loop* pengukuran (Brotopuspito, 2001).

$$Dn = \left\{ \frac{(g_b - g_a)}{(t_b - t_a)} (t_n - t_a) \right\} \quad (8)$$

Keterangan:

$D_n$  : Koreksi *drift* pada saat pembacaan titik ikat

$g_a$  : Pembacaan *gravimeter* di titik awal

$g_b$  : Pembacaan *gravimeter* di titik akhir

$t_a$  : Waktu pembacaan pada titik awal

$t_b$  : Waktu pembacaan pada titik akhir

$t_n$  : Waktu pembacaan pada titik pengamatan

### 3.2.3.3 Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)

Bentuk bumi pada umumnya tidak berupa bola sempurna, melainkan mendekati bentuk sferoidal. Untuk merepresentasikan bentuk tersebut digunakan spheroid referensi, yaitu sebuah ellipsoid yang dijadikan pendekatan matematis terhadap bentuk bumi. Spheroid ini digunakan sebagai acuan dalam merepresentasikan muka laut rata-rata (geoid) dengan mengabaikan pengaruh massa atau objek yang berada di atas permukaannya. Berdasarkan dengan Blakely (1995) secara teoritis *spheroid referensi* ( $G$  lintang) diberikan oleh persamaan GRS (*Geodetic Reference System*) 1980 gravitasi normal dinyatakan oleh persamaan (9).

$$G_n = 978032,7 (1 + 0,0053024 \sin^2 \theta - 0,0000058 \sin^2 2\theta) \text{mGal} \quad (9)$$

### 3.2.3.4 Koreksi Udara Bebas (*Free-Air Correction*)

Pada pengamatan gayaberat, pengukuran yang dilakukan pada elevasi tertentu  $h$  di atas *mean sea level* akan menyebabkan nilai percepatan gravitasi yang diperoleh menjadi lebih rendah. Dengan demikian, diperlukan proses koreksi pada hasil pembacaan gravimeter agar data yang dihasilkan lebih akurat. Koreksi udara

bebas diterapkan untuk mendapatkan nilai gravitasi absolut yang menunjukkan keadaan sebenarnya pada lokasi pengamatan (Syamsuriadi, 2013). Menurut Telford dkk., (1990) persamaan yang digunakan dalam koreksi udara bebas ditunjukkan pada persamaan (10).

$$FAC = 0,3086 \times h \quad (10)$$

Keterangan:

FAC : *Free Air Correction*

h : Ketinggian (m)

Persamaan (11) digunakan untuk menentukan nilai *Free Air Anomaly* (FAA) atau yang dikenal sebagai anomali udara bebas.

$$FAA = g_{obs} - g_{\varphi} + 0,3086 h \quad (11)$$

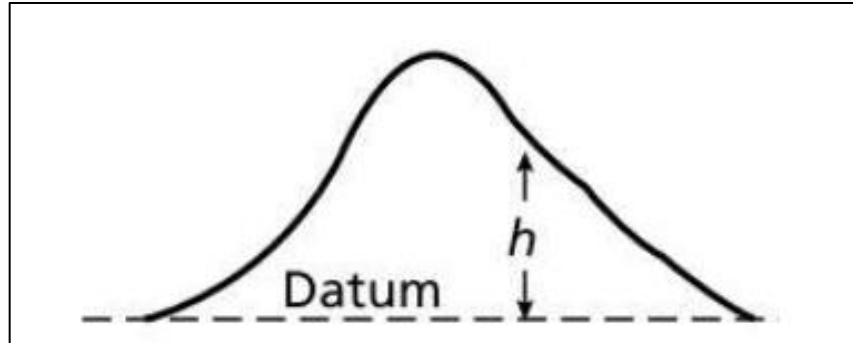
Keterangan:

FAA : *Free air anomaly* (mGal)

$g_{obs}$  : Gravitasi observasi (mGal)

$g_{\varphi}$  : Gayaberat teoritis pada lintang (mGal)

h : ketinggian tempat pengukuran di atas permukaan laut (m)



Gambar 8. Koreksi udara bebas terhadap gayaberat (Kearey dkk., 2002).

### 3.2.3.5 Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Koreksi Bouguer merupakan koreksi yang diterapkan untuk memperhitungkan pengaruh perbedaan ketinggian titik pengamatan tanpa mengabaikan keberadaan massa batuan di bawahnya. Koreksi ini dilakukan dengan mengestimasi gaya tarik gravitasi yang ditimbulkan akibat massa batuan yang dimodelkan sebagai suatu slab dengan ketebalan  $h$  dan densitas rata-rata  $\rho$ . Dalam penerapannya, massa batuan di bawah titik pengamatan diasumsikan sebagai bidang horizontal tak terbatas dengan ketebalan yang sama dengan elevasi stasiun

pengukuran serta memiliki densitas yang sama (Rahima, 2020). Besar koreksi bouguer (*Bouguer Correction*) dapat ditentukan berdasarkan persamaan sebagai berikut.

$$BC = 2\pi G \rho h \quad (12)$$

Karena  $2\pi G = -0,04192$  maka

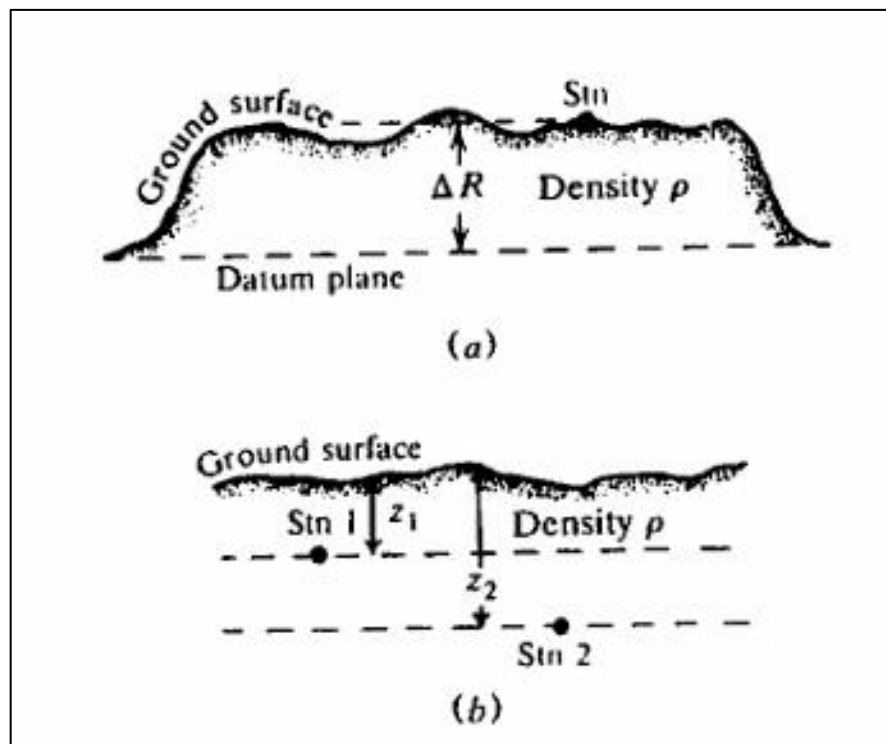
$$BC = 0,04191 \rho h \quad (13)$$

Keterangan:

BC : Koreksi bouguer (mGal)

$\rho$  : Rapat massa batuan rata-rata ( $\text{kg/m}^3$ )

h : Ketinggian (m)



Gambar 9. Koreksi Bouguer. (a) Titik pengukuran pada dataran tinggi yang luas.

(b) Titik pengukuran bawah permukaan (Telford dkk., 1990).

### 3.2.3.6 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi medan digunakan untuk menghitung dampak distribusi massa yang berbeda di sekitar lokasi pengukuran. Koreksi ini bertujuan meninjau kembali efek variasi topografi dan kondisi medan setempat terhadap nilai gayaberat yang terukur (Gambar 9). Koreksi Bouguer pada dasarnya mengasumsikan bahwa titik

pengamatan diasumsikan berada di permukaan datar yang sangat luas. Namun, kondisi lapangan umumnya memiliki topografi yang tidak rata, seperti adanya perbukitan atau pegunungan. Apabila hanya diterapkan koreksi Bouguer, hasil data yang diperoleh dapat menjadi kurang representatif. Hal ini disebabkan oleh pengaruh massa batuan di sekitar titik pengukuran, baik yang terletak di bagian atas ataupun bawah titik pengamatan, yang turut memberikan kontribusi terhadap nilai gayaberat terukur. Oleh karena itu, diperlukan koreksi topografi untuk memperhitungkan pengaruh variasi relief permukaan, terutama pada daerah dengan kondisi topografi tidak merata seperti daerah perbukitan maupun deretan pegunungan (Susilawati, 2005). Jika keadaan topografi pengukuran terjadi di wilayah relatif datar, koreksi medan tidak diperlukan. Rumus untuk koreksi medan adalah sebagai berikut:

$$g = \frac{0,04193}{n} \rho \left\{ (r_2 - r_1) + \sqrt{r_2^2 + L^2} - \sqrt{r_1^2 + L^2} \right\} \quad (14)$$

Keterangan:

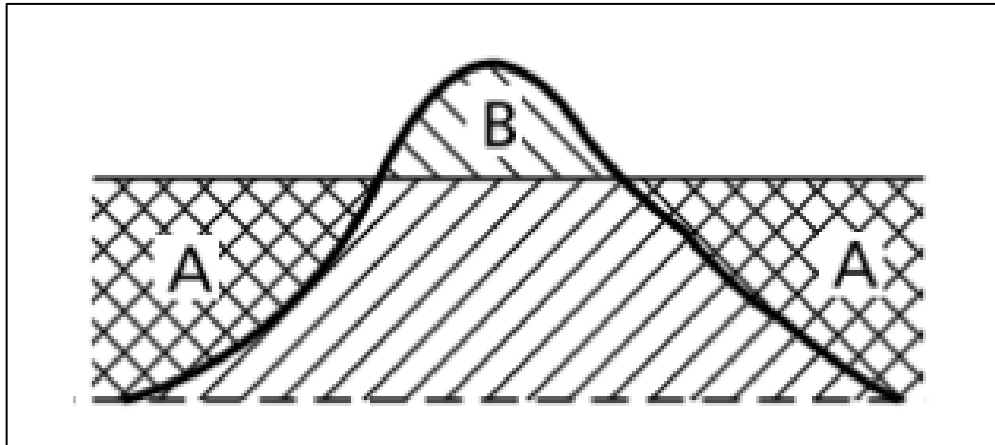
- $g$  : Respons gayaberat (mGal)
- $n$  : Jumlah kompartemen tiap zona
- $\rho$  : Densitas (g/cc)
- $r_1$  : Jari-jari radius dalam (m)
- $r_2$  : Jari-jari radius luar (m)
- $L$  : Selisih ketinggian dari titik pengukuran (m)

Dalam upaya mengubah nilai anomali menjadi *Complete Bouguer Anomaly* (CBA), koreksi medan perlu ditambahkan pada *Simple Bouguer Anomaly* (SBA) karena komponen gaya horizontal, yang juga dikenal sebagai koreksi medan, mengurangi nilai gayaberat yang diukur.

$$\text{CBA} = \text{SBA} + \text{TC} \quad (15)$$

Keterangan:

- CBA : *Complete bouguer anomaly* (mGal)
- SBA : *Simple bouguer anomaly* (mGal)
- TC : *Terrain correction* (mGal)



Gambar 10. Koreksi medan terhadap gayaberat (Kearey dkk., 2002)

### 3.2.4 Analisis Spektrum

Karena *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) merupakan nilai resultan dari berbagai komponen anomali, maka dalam tahap pemrosesan serta interpretasi data metode gravitasi perlu dilakukan pemisahan menjadi anomali regional dan anomali residual. Analisis spektrum digunakan untuk menghitung kedalaman sumber anomali gayaberat di bawah permukaan bumi. Metode ini menerapkan Transformasi Fourier untuk mengubah fungsi yang bergantung pada waktu maupun jarak ke dalam bentuk representasi domain frekuensi atau bilangan gelombang. Untuk menerapkannya, analisis spektrum digunakan untuk mengidentifikasi batas-batas yang membedakan anomali Bouguer regional dan residual di daerah penelitian. Hasil yang diperoleh selanjutnya dimanfaatkan sebagai dasar dalam penentuan lebar jendela (*window*) yang digunakan pada proses *filtering* anomali gayaberat. Berikut rumusan persamaan transformasi Fourier adalah (Blakely, 1996):

$$F(U) = \gamma \mu F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (16)$$

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0 z_1)}}{|k|} \quad (17)$$

Keterangan:

$$z_1 > z_0, |k| \neq 0$$

$U$  : Potensi gayaberat ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

$\mu$  : Anomali densitas ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\gamma$  : Konstanta gayaberat ( $6,67 \times 10^{-11} \text{N m}^2/\text{kg}^2$ )

- $r$  : Jarak (m)  
 $z_0$  : Kedalaman bidang dangkal (m)  
 $z_1$  : Kedalaman bidang dalam (m)  
 $k$  : Bilangan gelombang (rad/m)

Sehingga diperoleh persamaan:

$$F(U) = 2\pi\gamma\mu \frac{e^{|k|(z_0z_1)}}{|k|} \quad (18)$$

Dengan demikian, transformasi Fourier terhadap anomali gayaberat pada lintasan yang diperlukan sebagai berikut:

$$F(g_z) = \gamma\mu F\left(\frac{\partial 1}{\partial z r}\right) \quad (19)$$

$$= \gamma\mu \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (20)$$

$$F(g_z) = 2\pi\gamma\mu e^{|k|(z_0z_1)} \quad (21)$$

Jika distribusi densitas tidak menunjukkan korelasi dengan nilai gayaberat, maka nilai  $\mu = 1$ . Berdasarkan asumsi tersebut, hasil Transformasi Fourier dari anomali gayaberat dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A = C e^{|k|(z_0z_1)} \quad (22)$$

Keterangan:

- $A$  : Amplitude  
 $C$  : Konstanta

Tahap berikutnya dilakukan dengan melogaritmakan hasil transformasi Fourier tersebut di atas, sehingga diperoleh keterkaitan antara amplitude ( $A$ ) dengan bilangan gelombang ( $k$ ) dan kedalaman ( $z_0z_1$ ):

$$\ln A = (z_0z_1)|k| \quad (23)$$

Keterangan:

- $A$  : Amplitudo hasil transformasi Fourier  
 $\ln A$  : Logaritma natural amplitudo  
 $k$  : Bilangan gelombang (rad/m)  
 $z_0$  : Kedalaman bidang dangkal (m)  
 $z_1$  : Kedalaman bidang dalam (m)  
 $|k|$  : Nilai absolut bilangan gelombang (rad/m)

Bentuk persamaan 23 dapat dinyatakan kembali sebagai persamaan garis lurus berikut

$$y = mx + c \quad (24)$$

Pada persamaan 24, sumbu  $y$  direpresentasikan oleh  $\ln A$ , sedangkan sumbu  $x$  dinyatakan sebagai  $|k|$ . Kemiringan atau gradien garis ditunjukkan oleh  $(z_0 - z_1)$ , yang menggambarkan perbedaan kedalaman antara sumber dangkal dan sumber dalam. Nilai bilangan gelombang  $|k|$  didefinisikan sebagai  $2\pi$  per panjang gelombang, sehingga hubungan keduanya dapat dituliskan sebagai:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (25)$$

Keterkaitan antara panjang gelombang  $\lambda$  dan interval spasial  $\Delta x$  melibatkan faktor pengali  $N$ , sehingga diperoleh hubungan:

$$\lambda = N \cdot \Delta x \quad (26)$$

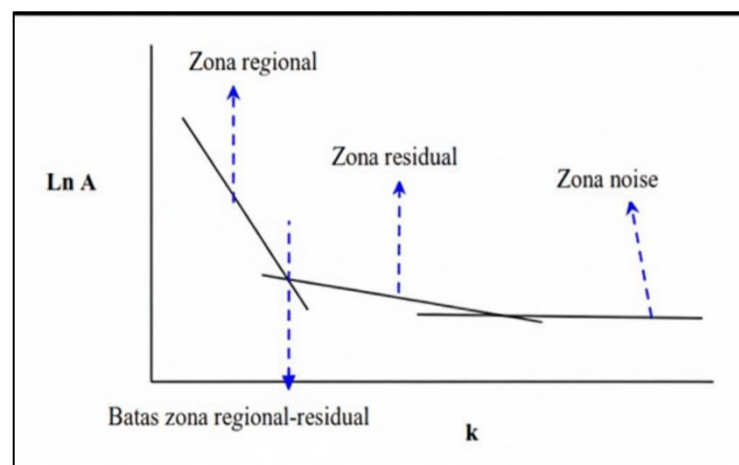
Parameter  $N$  menyatakan ukuran jendela yang digunakan dalam proses analisis. Dalam metode FFT,  $\Delta x$  merepresentasikan domain spasial, sedangkan  $k_c$  menunjukkan nilai bilangan gelombang batas (*cut-off wave number*). Oleh karena itu, hubungan keduanya dapat dirumuskan sebagai:

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (27)$$

Selain itu, terdapat hubungan linear antara bilangan gelombang dan frekuensi yang dinyatakan melalui persamaan:

$$k = 2\pi f \quad (28)$$

Frekuensi rendah umumnya berkaitan dengan anomali regional, sedangkan frekuensi tinggi lebih merepresentasikan anomali residual.



Gambar 11. Kurva  $\ln A$  Terhadap  $k$  (Sarkowi, 2014)

### 3.2.5 Filter *Moving Average*

*Moving Average* adalah filter yang bekerja dengan merata-ratakan nilai-nilai data yang berdekatan dalam suatu rentang tertentu yang ditentukan oleh ukuran *window*. Sekelompok nilai di dalam *window* tersebut digabungkan menjadi satu nilai rata-rata, kemudian *window* digeser ke titik data berikutnya untuk melakukan proses yang sama secara berulang. Salah satu metode penyaringan *low-pass* adalah filter *moving average*, yang digunakan untuk meredam elemen frekuensi tinggi dan meloloskan elemen frekuensi rendah ke dalam data. Nilai *window* ditentukan berdasarkan hasil analisis spektrum dengan menggunakan frekuensi *cut-off*  $\omega = \frac{2\pi}{\lambda}$ , sehingga panjang gelombang *cut-off* dapat dinyatakan sebagai  $\lambda_{cutoff} = \frac{2\pi}{w_{cutoff}}$ . Selanjutnya nilai N dihitung menggunakan persamaan:

$$N = \frac{\lambda_{cutoff}}{\text{sampling rate}} \quad (24)$$

Setelah nilai N diperoleh, proses ini dilanjutkan dengan menerapkan filter menggunakan *software* surfer. Hasil dari proses tersebut berupa peta anomali regional yang dihasilkan melalui penerapan filter *Moving average* (Yufajjiru dkk., 2019).

### 3.2.6 *First Horizontal Derivative*

*First Horizontal Derivative* (FHD) atau turunan horizontal pertama merupakan perubahan besaran anomali gayaberat secara lateral dari satu titik ke titik lainnya. Metode ini efektif untuk menemukan batas struktur geologi karena menonjolkan wilayah dengan perubahan anomali yang tajam, yang biasanya ditunjukkan oleh nilai maksimum atau minimum pada batas sumber anomali. Turunan horizontal relatif mudah diterapkan dengan menggunakan pendekatan turunan berhingga dan perhitungan diskrit. Metode FHD dimanfaatkan untuk memetakan struktur bawah permukaan, baik yang bersifat dangkal maupun yang berada pada kedalaman lebih besar (Zaenudin dkk., 2013). Metode ini dimanfaatkan untuk memetakan struktur bawah permukaan yang berada pada kedalaman dangkal maupun dalam. Nilai *First Horizontal Derivative* (FHD) dihitung menggunakan Persamaan (Blakely, 1996) sebagai berikut:

$$FHD = \frac{\Delta g}{\Delta x} = \frac{g_{(i+1)} - g_{(i)}}{\Delta x} \quad (25)$$

Keterangan:

FHD : *First horizontal derivative* (mGal)

$\Delta g$  : Perubahan nilai anomali gayaberat (mGal)

$g(i + 1)$  : Nilai anomali gayaberat pada titik ke (i + 1) (mGal)

$g_i$  : Nilai anomali gayaberat pada titik ke-i (mGal)

$\Delta x$  : Jarak antar titik pengamatan arah horizontal (m)

Dengan  $\frac{\partial g}{\partial x}$  dan  $\frac{\partial g}{\partial y}$  yang menyatakan turunan pertama perubahan nilai gravitasi terhadap arah sumbu x dan y dengan satuan mGal/m.

### 3.2.7 *Second Vertical Derivative*

Metode ini digunakan untuk menunjukkan sumber anomali lokal dan dangkal. Adanya diskontinuitas pada struktur bawah permukaan dapat diidentifikasi dengan sangat baik dengan menggunakan teknik ini. Ini terutama berlaku untuk keberadaan patahan di area survei. Secara teoritis, pendekatan ini berasal dari persamaan Laplace untuk anomali gayaberat permukaan bumi, yang kemudian dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut (Sarkowi, 2010):

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (26)$$

Atau:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (27)$$

Sehingga *second vertical derivative* dirumuskan sebagai:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left( \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \quad (28)$$

Menurut Sarkowi (2010) nilai nol pada turunan kedua Anomali Bouguer dapat digambarkan sebagai batas antara dua lapisan batuan dengan densitas yang berbeda. Batas tersebut dapat merepresentasikan keberadaan struktur geologi, seperti sesar maupun intrusi.

Dalam analisis *Second Vertical Derivative* (SVD), penentuan jenis patahan baik patahan normal, patahan naik, maupun patahan turun dapat dilakukan dengan mengamati nilai maksimum ( $SVD_{max}$ ) dan minimum ( $SVD_{min}$ ). Menurut Sarkowi

(2010) perbandingan nilai-nilai tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi karakteristik patahan, sebagai berikut:

$$|SVD|_{max} < |SVD|_{min} = \text{Patahan naik}$$

$$|SVD|_{max} > |SVD|_{min} = \text{Patahan normal/turun}$$

$$|SVD|_{max} = |SVD|_{min} = \text{Patahan mendatar}$$

Adapun operator koefisien filter SVD seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Koefisien Filter SVD

<b>SVD Tipe Henderson &amp; Zietz (1949)</b>				
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
-0,0838	-2,6667	17,0000	-2,6667	-0,0838
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000
<b>SVD Tipe Elkins (1951)</b>				
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000
-0,0833	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,0000	-0,0334	-1,0668	-0,0334	0,0000
-0,0833	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000
<b>SVD Tipe Rosenbach (1953)</b>				
0,0000	-0,0416	0,0000	-0,0416	0,0000
-0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	-0,0416
0,0000	-0,7500	4,0000	-0,7500	0,0000
-0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	-0,0416
0,0000	-0,0416	0,0000	-0,0416	0,0000

### 3.2.8 Inverse Modelling

Pemodelan inversi (*inverse modelling*) adalah suatu pendekatan yang bertujuan menyesuaikan model secara otomatis agar hasil perhitungan mendekati data hasil pengamatan. Fungsi objektif yang harus diminimalkan biasanya digunakan untuk menggambarkan kesesuaian antara data observasi dan respons

model. Dalam kalkulus, apabila turunan fungsi terhadap parameter atau variabel yang tidak diketahui bernilai nol, fungsi tersebut akan mencapai kondisi minimum. Prinsip inilah yang dimanfaatkan dalam pemodelan inversi untuk mengestimasi parameter-parameter model yang paling sesuai. Dalam pemodelan inversi gayaberasat, Wulandari & Setiawan (2015) mengemukakan persamaan dua dimensi (2D) yang digunakan sebagai pendekatan dalam pemodelan tiga dimensi (3D), yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta g(x, y, z) = G \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho z dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (29)$$

Besaran tersebut merepresentasikan komponen tarikan gravitasi vertikal pada suatu titik yang disebabkan oleh benda homogen. Dalam persamaan tersebut,  $G$  merupakan konstanta gravitasi, sedangkan  $\rho$  menyatakan densitas batuan.

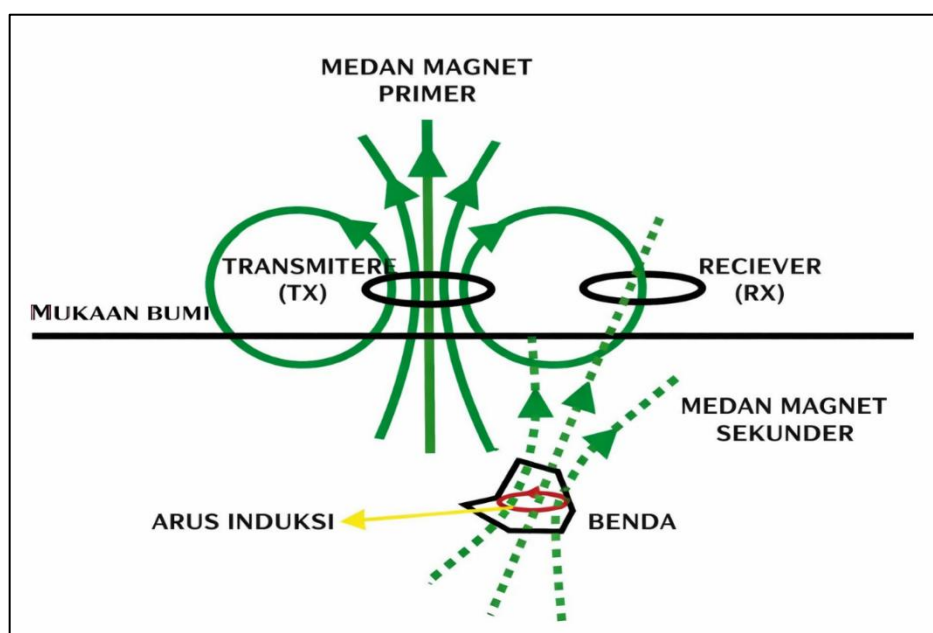
### 3.3 Metode Magnetotelurik (MT)

Metode magnetotelurik (MT) adalah metode eksplorasi geofisika yang memetakan struktur batuan di bawah permukaan dengan menggunakan perubahan medan elektromagnetik Bumi yang alami. Metode ini bekerja secara pasif melalui pengukuran hubungan antara medan listrik dan medan magnet yang dipengaruhi oleh aktivitas petir serta badai matahari di atmosfer. Gelombang elektromagnetik ini merambat masuk ke dalam tanah dan mengalami induksi, di mana setiap lapisan batuan akan memberikan respons berbeda tergantung pada kemampuannya menghantarkan arus listrik atau yang dikenal sebagai nilai resistivitas. Dalam konteks eksplorasi panasbumi, penggunaan MT menjadi sangat krusial karena kemampuannya dalam melakukan pencitraan struktur geologi hingga kedalaman beberapa kilometer, yang tidak dapat dicapai dengan metode geofisika dangkal lainnya. Melalui analisis tensor impedansi, para peneliti dapat mengidentifikasi keberadaan zona konduktif yang biasanya merepresentasikan batuan penutup (*cap rock*) berupa lempung hasil alterasi hidrotermal. Selain itu, sebaran nilai resistivitas yang didapatkan memungkinkan para ahli untuk melokalisasi reservoir panasbumi serta mendeteksi keberadaan sumber panas (*heat source*), sehingga proses penentuan titik koordinat pengeboran dapat dilakukan secara presisi dengan risiko kegagalan yang minimal (Zarkasyi dkk., 2019).

Metode magnetotelurik (MT) merupakan salah satu teknik geofisika yang menggunakan variasi medan elektromagnetik alami untuk memperkirakan nilai resistivitas bawah permukaan bumi. *Output* utama dari data MT adalah kurva *sounding* yang menghubungkan resistivitas semu serta fase dengan frekuensi atau periode tertentu, di mana periode yang lebih panjang mencerminkan struktur pada kedalaman yang lebih besar. Pemodelan data ini dapat dilakukan secara 1-D, yang menyerupai metode geolistrik, maupun 2-D yang merepresentasikan variasi resistivitas secara lateral (sumbu-x) dan vertikal (sumbu-z) (Grandis, 2009).

### 3.3.1 Prinsip Elektromagnet

Metode magnetotelurik (MT) termasuk salah satu metode elektromagnetik (EM) pasif yang memanfaatkan pengukuran variasi alami medan listrik (E) serta medan magnet (H) pada dua arah yang saling tegak lurus terhadap permukaan bumi.



Gambar 12. Konsep Gelombang Elektromagnetik (Wachisbu & Santosa, 2015)

Metode ini digunakan untuk mengestimasi distribusi konduktivitas bawah permukaan, mulai dari kedalaman puluhan meter hingga beberapa kilometer. Rentang frekuensi medan elektromagnetik yang dapat direkam oleh metode magnetotelurik berkisar antara 300 hingga 0,001 Hz. Medan magnet yang terinduksi di bawah permukaan berkaitan erat dengan respon elektromagnetik serta sifat resistivitas batuan. Secara umum, sebagian besar batuan bersifat sebagai

konduktor yang kurang baik. Nilai resistivitas batuan dapat meningkat secara signifikan apabila batuan tersebut memiliki struktur yang kompak. Hukum Archie digunakan sebagai pendekatan empiris untuk menentukan nilai resistivitas formasi batuan ( $\rho$ ) (Wachisbu & Santosa, 2015).

$$\rho = \alpha \theta^{-m} S_w^{-n} \rho_w \quad (30)$$

Dalam persamaan tersebut, parameter  $a$  merupakan koefisien yang dipengaruhi oleh karakteristik litologi, sedangkan  $m$  dan  $n$  adalah faktor sementasi. Parameter  $\rho_w$  menyatakan resistivitas fluida formasi,  $\phi$  merepresentasikan porositas, dan  $S_w$  menunjukkan tingkat kejenuhan fluida. Persamaan (30) memperlihatkan bahwa nilai resistivitas memiliki hubungan berbanding terbalik dengan porositas batuan.

Tabel 4. Nilai Resistivitas Batuan (Telford, 1990)

Jenis Batuan/Mineral	Resistivitas ( $\Omega m$ )
Udara	~
Pirit	0,1 - 100
Kwarsa	500 - 800000
Kalsit	$1 \times 10^{12} \times 1 \times 10^{13}$
Garam Batu ( <i>Rock Salt</i> )	$30 - 1 \times 10^{13}$
Granit	200 - 10000
Andesit	$1,7 \times 10^2 - 45 \times 10^4$
Basalt	200 - 100000
Gamping	500 - 10000
Batu Pasir	200 - 8000
Batu Tulis	20 - 2000
Pasir	1 - 1000
Lempung	1 - 100
Air Tanah	0,5 - 300
Air asin	0,2
Magnetit	0,01 - 1000
Kerikil Kering	600 - 1000
Aluvium	10 - 800
Kerikil	4 - 600

Secara singkat, mekanisme terbentuknya medan listrik serta medan magnet di permukaan bumi dapat dijelaskan melalui Gambar 12 Berdasarkan ilustrasi tersebut, ketika arus listrik dialirkan dari pemancar (Transmitter/TX), akan terbentuk medan magnet primer yang kemudian menghasilkan medan elektromagnetik (EM) primer di permukaan bumi. Arus listrik ini dapat berasal dari sumber buatan maupun sumber alami. Pada metode magnetotelurik, sumber arus yang digunakan bersifat alami. Ketika arus listrik mengalami penghentian dan kemudian dialirkan kembali secara berulang, medan magnet yang dihasilkan akan mengalami perubahan. Perubahan medan magnet tersebut dikenal sebagai *fluks magnet*. Apabila di bawah permukaan terdapat material konduktif atau *ore body*, maka respon medan magnetik primen menghasilkan arus listrik.

### 3.3.2 Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan seperangkat persamaan fundamental yang menjelaskan karakteristik medan listrik dan medan magnet. Pengembangan sistematis dari hasil eksperimen Faraday, Ampere, Gauss, Coulomb, dan Maxwell mengenai fenomena kelistrikan dan kemagnetan menghasilkan persamaan tersebut. Dalam penerapan metode magnetotelurik, persamaan Maxwell digunakan sebagai dasar teoritis untuk menggambarkan perilaku gelombang elektromagnetik yang dimanfaatkan dalam pengukuran. Secara matematis, persamaan Maxwell dalam bentuk diferensial pada domain frekuensi dapat dinyatakan sebagai berikut (Grandis, 2009):

$$\nabla H = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (30)$$

$$\nabla E = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (31)$$

Keterangan:

H : Medan magnet (Ampere/m)

E : Medan listrik (Volt/m)

D : Perpindahan listrik (Coulomb/m<sup>2</sup>)

B : Induksi magnet (Tesla)

J : Rapat arus (A/m<sup>2</sup>)

Persamaan (30) dan (31) disubstitusikan ke dalam hasil operasi  $curl$  ( $\nabla \times$ ) dari kedua persamaan tersebut. Selanjutnya, persamaan yang diperoleh didekomposisi dengan mempertimbangkan geometri model dua dimensi (2-D). Proses ini menghasilkan persamaan medan elektromagnetik yang dapat diklasifikasikan ke dalam dua jenis polarisasi, yaitu TE (*transverse electric*) dan TM (*transverse magnetic*).

Pada polarisasi TE, medan listrik  $E_x$  dan medan magnet  $H_y$  masing-masing tersusun sejajar dan tegak lurus terhadap arah struktur. Hubungan matematis yang berlaku untuk polarisasi ini dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = i\omega\mu_0\sigma E_x \quad (32)$$

$$H_y = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (33)$$

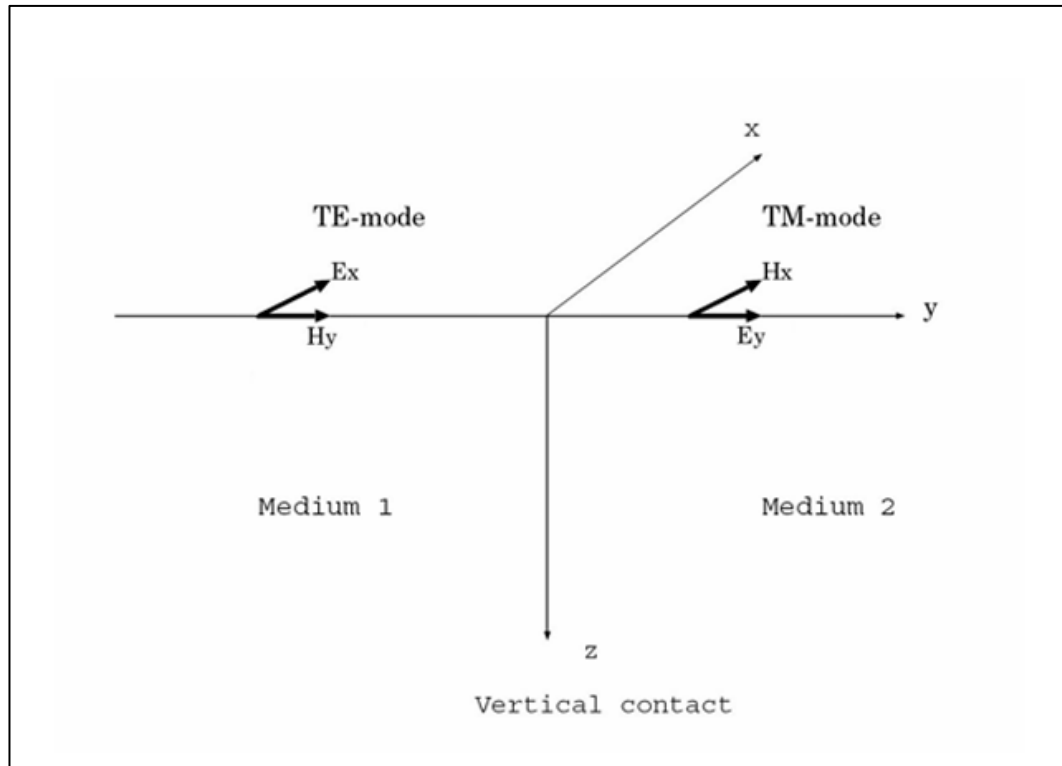
Sementara itu, pada polarisasi TM, medan magnet  $H_x$  dan medan listrik  $E_y$  masing-masing sejajar dengan struktur dan tegak lurus. Persamaan yang menggambarkan kondisi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) = i\omega\mu_0\sigma H_x \quad (34)$$

$$E_y = \rho \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (35)$$

Persamaan (32) dan (34) pada dasarnya merupakan hasil dekomposisi dari Persamaan (30) dan (31) yang masing-masing ditujukan untuk komponen medan listrik  $E_x$  dan medan magnet  $H_x$ . Dalam pendekatan ini, kontribusi arus perpindahan listrik dianggap jauh lebih kecil dibandingkan dengan arus konduksi, sehingga pengaruhnya dapat diabaikan.

Untuk keperluan pemodelan numerik, persamaan diferensial medan elektromagnetik pada setiap polarisasi diselesaikan menggunakan metode beda hingga dengan mempertimbangkan diskretisasi model dua dimensi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13. Pada polarisasi TE, perhitungan diawali dengan menentukan medan listrik  $E_x$  pada grid menggunakan Persamaan (32). Hasil tersebut kemudian dimanfaatkan untuk menghitung medan magnet  $H_y$  melalui pendekatan diferensiasi numerik sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (33). Prosedur yang serupa diterapkan pada polarisasi TM dengan menggunakan Persamaan (34) dan (35).



Gambar 13. Komponen medan listrik dan medan magnet dalam polarisasi TE dan TM (Grandis, 2009).

### 3.3.3 Skin Depth

Metode magnetotelurik (MT) didasarkan pada kemampuan medan elektromagnetik untuk merambat dan menembus ke dalam bumi. Kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik dipengaruhi oleh karakteristik gelombang itu sendiri serta nilai konduktivitas batuan bawah permukaan. Metode MT dikenal memiliki daya jangkau investigasi yang cukup dalam, yaitu mampu menjangkau kedalaman lebih dari 3 km. Penurunan frekuensi sinyal yang digunakan akan meningkatkan kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik, namun konsekuensinya adalah waktu perekaman data yang diperlukan menjadi lebih lama (Simpson & Bahr, 2005). Kedalaman penetrasi atau kedalaman investigasi gelombang elektromagnetik dapat dihitung dengan menggunakan parameter *skin depth*. Persamaan *skin depth* pada metode magnetotelurik dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (36)$$

Keterangan:

- $\delta$  : *Skin depth* (m)  
 $\omega$  : Frekuensi sudut (rad/s)  
 $\mu$  : Permeabilitas magnetik medium (H/m)  
 $\sigma$  : Konduktivitas listrik medium (S/m)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai *skin depth* ditentukan oleh konduktivitas medium dan frekuensi sinyal elektromagnetik yang digunakan dalam pengukuran. Semakin tinggi frekuensi sinyal, maka kedalaman penetrasi gelombang elektromagnetik menjadi lebih dangkal. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi atau semakin besar periode sinyal, maka penetrasi gelombang elektromagnetik akan semakin dalam. Selain itu, medium dengan konduktivitas rendah akan menghasilkan kedalaman penetrasi yang lebih besar dibandingkan medium dengan konduktivitas tinggi.

### 3.3.4 Pengolahan Data Magnetotelurik

#### 3.3.4.1 Transformasi Fourier

Pada tahap ini dilakukan konversi data deret waktu (*time series*) yang diperoleh selama proses pengukuran, meliputi unsur medan listrik  $E_x$  dan  $E_y$ , serta komponen medan magnet  $H_x$ ,  $H_y$ , dan  $H_z$ . Transformasi Fourier digunakan untuk mengubah data dari domain waktu ke domain frekuensi. Transformasi Fourier berfungsi untuk merepresentasikan sinyal sebagai fungsi frekuensi. Pada persamaan transformasi Fourier,  $F(\omega)$  menyatakan fungsi gelombang dalam domain frekuensi,  $f(t)$  merupakan fungsi sinyal dalam domain waktu,  $i$  adalah bilangan imajiner,  $\omega = 2\pi f$  menyatakan frekuensi sudut, sedangkan  $t$  merepresentasikan waktu (Simpson & Bahr, 2005).

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i\omega t} dt \quad (37)$$

Keterangan:

- $X(\omega)$  : Representasi sinyal pada domain frekuensi  
 $x(t)$  : Sinyal asli pada domain waktu  
 $dt$  : Elemen diferensial waktu (s)  
 $\omega$  : Frekuensi sudut (*angular frequency*) (rad/s)

### 3.3.4.2 *Robust Processing*

*Robust Processing* merupakan metode penyaringan (*noise*) pada data AMT yang tersedia dalam perangkat lunak SSMT 2000. Teknik ini memanfaatkan sejumlah pengukuran dan menerapkan pendekatan geostatistik untuk mengidentifikasi serta mengeliminasi data yang menyimpang atau terindikasi sebagai derau. Dalam prosesnya, *Robust Processing* mengevaluasi kontribusi masing-masing pengukuran terhadap nilai rata-rata, kemudian menurunkan bobot pengaruh data *outlier* pada iterasi berikutnya sehingga diperoleh hasil pengolahan data yang lebih stabil dan representatif (Simpson & Bahr, 2005).

### 3.3.4.3 Seleksi *Crosspower* dan Koreksi *Static Shift*

Dalam pengukuran magnetotelurik (MT), dua mode pengukuran yang sangat penting untuk tahap awal pemodelan dan interpretasi, yaitu *Transverse Electric* (TE) dan *Transverse Magnetic* (TM). Pada mode TE, komponen medan listrik yang terukur sejajar dengan arah struktur utama, sehingga mode ini juga dikenal sebagai *E-polarization*. Sementara itu, mode TM ditandai oleh komponen medan magnet yang sejajar dengan arah struktur utama dan sering disebut sebagai *B-polarization*. Secara ideal, kurva respons TE dan TM diharapkan saling berhimpitan. Akan tetapi, dalam banyak kasus kedua kurva tersebut menunjukkan pergeseran (*Shifting*) yang dapat menyebabkan kesalahan dalam penentuan nilai resistivitas lapisan batuan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan seleksi *static shift*, yaitu dengan penyesuaian manual terhadap titik pada kurva TE dan TM sehingga mengarah pada respons yang ideal. Pengaruh *static shift* umumnya disebabkan oleh heterogenitas material permukaan, pengaruh topografi, serta keberadaan kontak vertikal di dekat permukaan (Simpson & Bahr, 2005).

### 3.3.4.4 Pemodelan Magnetotelurik

Menurut Murdani dkk (2020) model satu dimensi (1-D) direpresentasikan sebagai susunan lapisan horizontal, di mana setiap lapisan diasumsikan memiliki nilai resistivitas yang homogen. Parameter utama dalam model 1-D meliputi nilai resistivitas serta tebal lapisan masing-masing lapisan batuan. Pada umumnya,

keterkaitan antara hasil pengamatan dan parameter pemodelan dapat dituliskan dalam bentuk:

$$d = F(m) \quad (38)$$

Dengan  $d$  adalah vektor data,  $m$  merupakan vektor model, dan  $F(m)$  adalah fungsi *forward modeling*. Penyelesaian permasalahan inversi diterapkan menggunakan algoritma Newton dengan tujuan memperoleh model yang meminimumkan fungsi objektif yang didefinisikan sebagai berikut

$$\psi(m) = (d - mF)^T V(d - mF) \quad (39)$$

Keterangan:

- $\psi(m)$  : Fungsi objektif / fungsi kesalahan yang akan diminimalkan
- $m$  : vektor model (parameter bawah permukaan, misalnya resistivitas)
- $d$  : Fektor data observasi hasil pengukuran lapangan
- $F(m)$  : Fungsi *forward modeling*, yaitu data prediksi dari model  $m$
- $d - F(m)$  : Residual / selisih antara data observasi dan data hasil model
- $(d - F(m))^T$  : Transpose residual
- $V$  : Matriks pembobot (*weighting matrix*)

Untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan secara lebih realistis, diterapkan model dua dimensi (2-D), di mana nilai resistivitas tidak hanya bergantung pada kedalaman ( $z$ ), tetapi juga bervariasi sepanjang arah penampang atau profil ( $y$ ). Dengan demikian, distribusi resistivitas dapat dinyatakan sebagai fungsi  $\rho(y, z)$ . Inversi merupakan tahap pengolahan data lapangan yang menggunakan pendekatan matematis dan statistik untuk memperoleh distribusi sifat fisik bawah permukaan. Proses analisis dilakukan dengan menyesuaikan respons model matematis terhadap data hasil pengukuran di lapangan.

Metode NLCG termasuk dalam teknik inversi yang digunakan untuk meminimalkan nilai fungsi objektif (*objective functional*,  $S$ ). Fungsi objektif tersebut umumnya terdiri atas kombinasi berbobot antara fungsi model dan selisih (*misfit*) antara data hasil perhitungan dan data observasi.

$$S = \phi_d + t\phi_m \quad (40)$$

Keterangan:

- $S$  : Fungsi objektif total yang diminimalkan
- $\phi_d$  : Komponen *data misfit*, yaitu kesalahan antara data observasi dan hasil model

- $\phi_m$  : Komponen model regularization, yaitu penghalus / pembatas model  
 $t$  : Parameter regularisasi (pengontrol keseimbangan)

Parameter regulasi berfungsi untuk mengendalikan keseimbangan (*trade-off*) antara fungsi objektif model dan data *misfit*, serta ditentukan agar sebanding dengan tingkat konsistensi kesalahan data. Nilai parameter yang semakin besar mengindikasikan bahwa model yang dihasilkan memiliki tingkat kecocokan yang lebih baik terhadap data pengamatan. Pada inversi dua dimensi (2-D), pengaturan fungsi objektif model dan *data misfit* dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\phi_m = \|L(m - m_0)\|^2 \quad (41)$$

$$\theta_d = (d - f(m))^2 R_{dd}^{-d} (d - F(m)) \quad (42)$$

Keterangan:

- $d$  : Vektor data observasi  
 $F(m)$  : Operator pemodelan *forward*  
 $R_{dd}$  : Matrik kovarian error  
 $L$  : operator linier  
 $m$  : model vektor unknown

Penyelesaian permasalahan inversi dilakukan secara iteratif dengan menerapkan metode *Nonlinear Conjugate Gradient* (NLCG) secara langsung untuk meminimalkan fungsi objektif yang didefinisikan sebagai berikut:

$$m^{i+1} = m^i + \alpha^{i+1} h^{i-1} \quad (43)$$

Keterangan:

- $m^{i+1}$  : Model parameter baru pada iterasi ke -  $i + 1$   
 $m^i$  : Model parameter pada iterasi ke -  $i$   
 $\alpha^i$  : Panjang langkah (*step length*) pada iterasi ke -  $i$   
 $h^{i-1}$  : Arah pencarian (*search direction*) dari metode NLCG

Arah pencarian yang diperoleh melalui metode *Nonlinear Conjugate Gradient* (NLCG) dan dihitung untuk meminimalkan fungsi objektif menggunakan teknik *line search*. Tingkat ketidaksesuaian rata-rata antara data hasil prediksi dan data observasi direpresentasikan oleh galat RMS (*root mean square*). Pada program inversi dua dimensi (2-D), nilai galat RMS ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{((d-F(m))^T R_{dd}^{-2} (d-F(m)))}{N}} \quad (44)$$

Keterangan:

$RMS$  : *Root mean square error* (ukuran rata-rata kesalahan)

$d$  : Vektor data observasi lapangan

$F(m)$  : Data hasil prediksi model  $m$

$d - F(m)$  : Selisih antara data observasi dan prediksi

$(d - F(m))^T$  : Transpose dari residual

$R_{dd}^{-2}$  : Matriks pembobot/*error covariance inverse*

$N$  : Jumlah titik data

Efisiensi komputasi dari algoritma ini dipengaruhi oleh jumlah iterasi ( $N_{cg}$ ), di mana nilai  $N_{cg}$  bergantung pada parameter regulasi  $\lambda$ . Penggunaan nilai  $\lambda$  yang besar cenderung menghasilkan jumlah iterasi yang lebih sedikit. Sebaliknya, apabila nilai  $\lambda$  semakin kecil, maka diperlukan iterasi dalam jumlah lebih banyak untuk mencapai kondisi konvergen (Limswipin dkk., 2020).

## IV. METODOLOGI PENELITIAN

### 4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada waktu dan lokasi sebagai berikut:

- Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika (PPDG) Teknik Geofisika Universitas Lampung.
- Alamat : Gedung Teknik Geofisika, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142
- Waktu : Januari – Mei 2026

### 4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

Tabel 5. Data yang digunakan dalam penelitian

No.	Jenis Data	Sumber Data
1.	Data Gayaberat	Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panasbumi (PSDMBP)
2.	Data Magnetotelurik	Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panasbumi (PSDMBP)
3.	Peta Geologi	Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panasbumi (PSDMBP)
4.	Peta Lokasi Penelitian dan Data DEMNAS	Data spasial ini digunakan untuk mendukung interpretasi geologi serta pemetaan zona penelitian yang tersedia pada: <a href="https://www.indonesia-geospasial.com">https://www.indonesia-geospasial.com</a>

Tabel 6. Peralatan yang digunakan dalam penelitian

No.	Hardware/Software	Fungsi
1.	Laptop	Perangkat utama untuk mengoperasikan <i>software</i> pengolahan dan analisis data Gayaberat dan Magnetotelurik
2.	Software Ms. Excel 2021	Melakukan perhitungan koreksi – koreksi Gayaberat
3.	Software Global Mapper	Menentukan daerah regional dan lokal dengan data DEMNAS untuk mencari nilai <i>terrain Correction</i>
4.	Software Geosoft Oasis Montaj	Melakukan perhitungan <i>Terrain Correction</i> berdasarkan daerah regional dan lokal
5.	Software Surfer	Melakukan <i>gridding</i> data dan menghasilkan peta kontur anomali gayaberat
6.	Software Dosbox Numeri	Digunakan untuk mencari nilai amplitude (A), LN A, Frekuensi serta nilai bilangan gelombang k dari lintasan yang sudah dibuat pada <i>software</i>
7.	Software Grav3D	Memodelan inversi 3D Gayaberat
8.	Software Arcgis	Membuat dan menganalisis peta spasial untuk pemodelan dan pemetaan
9.	Software SSMT2000	Pengolahan data deret waktu ( <i>time-series</i> ) hasil pengukuran MT di lapangan menjadi data fungsi transfer ( <i>cross-power</i> ) dalam domain frekuensi.
10.	Software MTEditor	Melakukan penyuntingan ( <i>editing</i> ) kurva resistivitas semu dan fase. Dilakukan untuk membuang data yang terkena <i>noise</i> (gangguan elektromagnetik) agar data lebih bersih sebelum dimodelkan.
11.	Software WinGLink	Memodelan inversi 1D dan 2D data MT
12.	Software Ms. Word 2021	Menyusun laporan penelitian dan hasil identifikasi penelitian.

Tabel 7. Jadwal Pelaksanaan 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	3	4
Studi literatur	■																			
Pengolahan Data	■																			
Penyusunan Proposal	■																			
Bimbingan Proposal	■				■				■				■				■			
Seminar Proposal	■												■	■						
Penyusunan Hasil	■												■	■						
Seminar Hasil	■												■	■						
Revisi Hasil	■												■	■						
Sidang Komprehensif	■												■	■						

### 4.3 Prosedur Penelitian

#### 4.3.1 Tahapan Pengolahan Data Metode Gayaberat

##### 1. Koreksi data Metode Gayaberat

Penelitian ini menggunakan data pengukuran langsung oleh PSDMBP dengan nilai yang tersedia adalah tanggal, jam, nilai reading, nilai konversi mGal, nilai *Tide Correction*, nilai Relative gObs, nilai X, nilai Y, dan nilai Elevasi. Data tersebut kemudian dilakukan *drift Correction*, *Terrain Correction*, *Bouguer Correction* sehingga mendapatkan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA).

##### 2. Analisis Spektrum

Karena *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) merupakan nilai resultan dari berbagai komponen anomali, maka dalam tahap pengolahan dan interpretasi data metode gravitasi perlu dilakukan pemisahan menjadi anomali regional dan anomali residual. Analisis spektrum digunakan untuk menghitung kedalaman sumber anomali gayaberat di bawah permukaan bumi. Fungsi yang bergantung pada waktu dan jarak dapat direpresentasikan dalam domain frekuensi atau bilangan gelombang dengan menggunakan transformasi Fourier yang dilakukan dengan melakukan *slicing* pada peta kontur CBA yang kemudian dilakukan pencarian nilai A, LN A, Frekuensi dan bilangan k dengan menggunakan *software* Dosbox Numeri, dimana hasil dari tiap *slicing* dilakukan perhitungan rata-rata untuk menghasilkan lebar jendela. Dari nilai lebar jendela tersebut dapat dilakukan pemisahan anomali regional dan residual menggunakan *software* Surfer.

##### 3. Analisis *Derivative*

Analisis *derivative* digunakan untuk mengidentifikasi batasan serta tipe patahan guna memperoleh gambaran kondisi bawah permukaan dan mengetahui distribusi patahan di wilayah penelitian. Penelitian ini menerapkan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Proses analisis dilakukan melalui membuat sayatan yang saling tegak lurus terhadap arah dugaan patahan. Penentuan posisi patahan didasarkan pada nilai minimum dan maksimum pada peta FHD, serta pada nilai nol (*zero crossing*) pada peta SVD.

##### 4. Pemodelan Inversi 3D

Pada penelitian ini diterapkan pemodelan inversi tiga dimensi (*3D inverse modelling*) dari data residual menggunakan *Software* Grav3D Sementara itu,

*Software Surfer* digunakan untuk menentukan parameter batas *grid* maksimum, minimum, serta *spasi* blok, yang selanjutnya digunakan sebagai input dalam pengaturan Grav3D. Proses ini menghasilkan keluaran berupa data koordinat  $x$ ,  $y$ , kedalaman (*depth*), dan densitas (*density*). Model yang diperoleh kemudian divalidasi dengan mengacu pada informasi geologi permukaan, struktur geologi, serta stratigrafi di wilayah penelitian agar interpretasi yang dihasilkan bersifat konsisten dan realistis secara geologi.

### 4.3.2 Tahapan Pengolahan Data Metode Magnetotelurik

#### 1. Pemilihan *Time Series*

Tahap seleksi *time series* dilakukan untuk menentukan interval waktu pengukuran magnetotelurik yang paling representatif. Pemilihan ini bertujuan memperoleh sinyal yang efektif serta meminimalkan pengaruh derau (*noise*). Data yang digunakan pada tahap ini meliputi komponen medan listrik dan medan magnet pada arah  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ , yaitu  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ , dan  $H_z$ .

#### 2. *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *Robust Processing*

Data hasil seleksi *time series* masih berada dalam domain waktu. Selanjutnya, data tersebut ditransformasikan ke dalam domain frekuensi menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Pada tahap ini juga diterapkan *Robust Processing* untuk mengidentifikasi dan mengeliminasi data *outlier* maupun data yang tidak normal. Proses FFT dan *Robust Processing* diterapkan menggunakan perangkat lunak SSMT2000.

#### 3. Seleksi *Crosspower*

Seleksi *crosspower* dilakukan pada titik-titik data mode TE dan TM agar membentuk tren yang konsisten. Proses ini dilakukan dengan memisahkan data yang terindikasi sebagai derau dan mempertahankan data yang merepresentasikan sinyal, oleh karena itu kurva yang dihasilkan mencerminkan kondisi bawah permukaan secara lebih akurat.

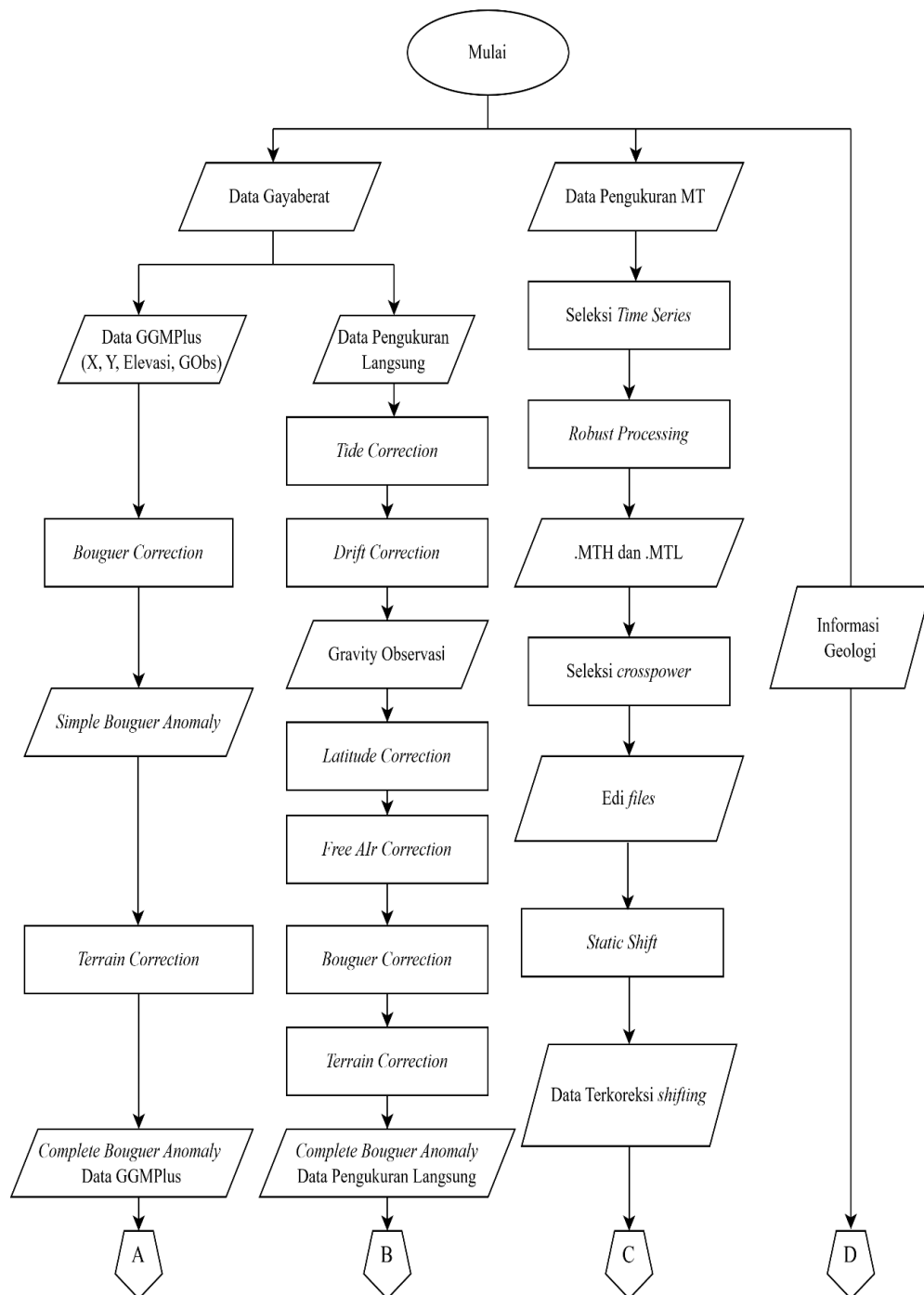
#### 4. Koreksi *Static Shift* dan Pemodelan Inversi 2D

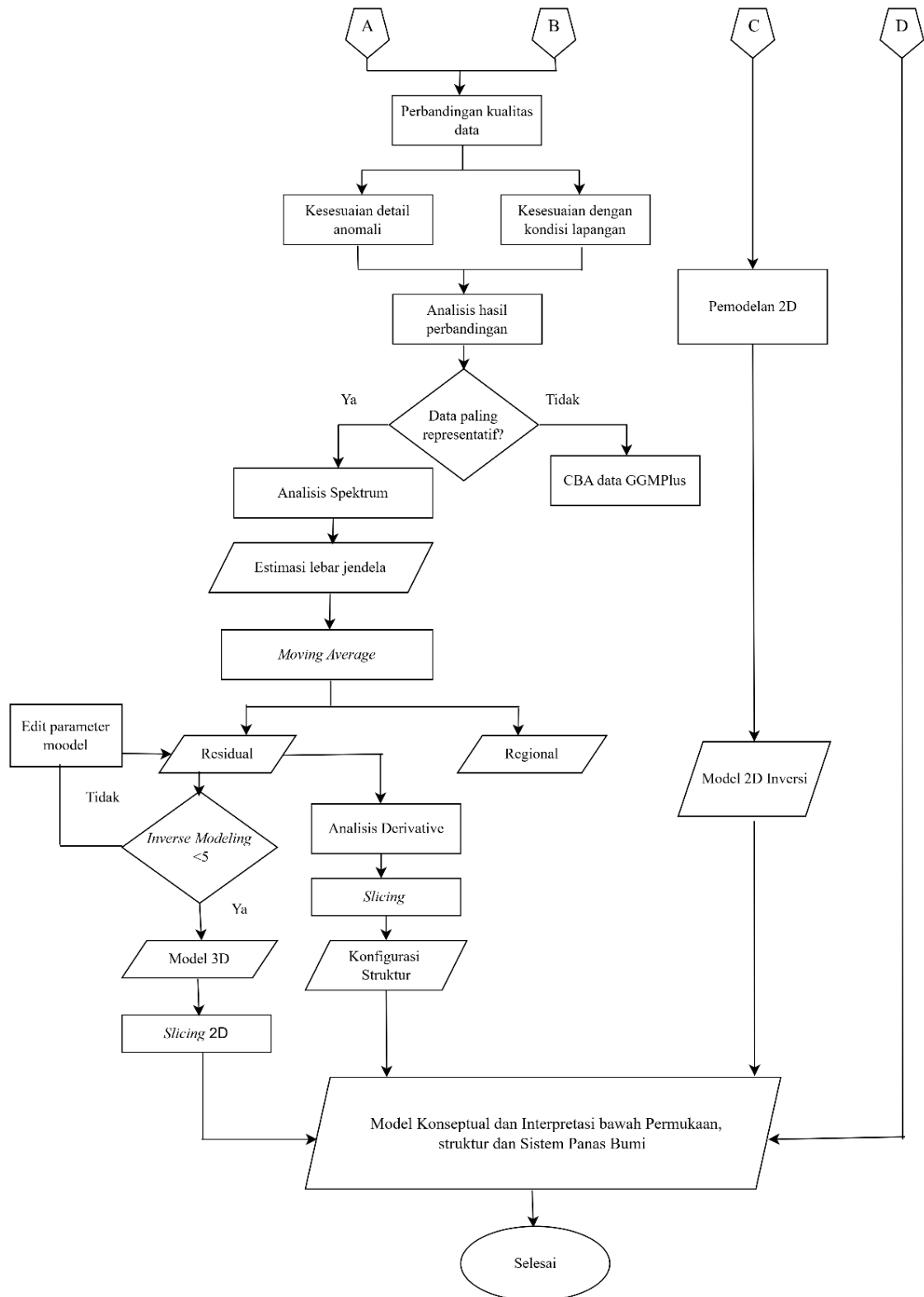
Koreksi *static shift* dilakukan untuk menyesuaikan grafik respons yang menunjukkan pergeseran, yaitu ketika kurva TE dan TM tidak saling berhimpit karena pengaruh heterogenitas vertikal dan efek topografi ketika pengukuran data.

Tahap koreksi tersebut dilakukan sebelum proses pemodelan dimulai. Pemodelan yang digunakan berupa inversi dua dimensi (2-D) menggunakan kurva *Bostick*. Proses koreksi *static shift* serta inversi 2-D dilakukan melalui menggunakan perangkat lunak WinGlink.

#### 4.4 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 14





Gambar 14. Diagram Alir Penelitian

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil perbandingan antara data anomali gayaberat hasil pengukuran langsung dan data GGMPPlus, kedua data menunjukkan pola anomali regional yang relatif serupa, terutama pada persebaran zona anomali tinggi dan rendah serta arah tren struktur utama di daerah penelitian. Hal ini menunjukkan bahwa model GGMPPlus cukup efektif dalam merepresentasikan kondisi regional bawah permukaan. Namun, data pengukuran langsung memiliki resolusi spasial yang lebih tinggi, ditunjukkan oleh kontur yang lebih rapat, gradien anomali yang lebih tegas, serta detail struktur geologi dan zona anomali lokal yang lebih jelas dibandingkan data GGMPPlus yang cenderung lebih halus dan regional.
2. Berdasarkan hasil dari analisis derivatif yang dilakukan dengan metode gayaberat dengan menggunakan *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD), pada lintasan A–A' teridentifikasi dua sesar, yaitu Sesar normal Alahanmati dan Sesar Normal Padang Baru. Sementara itu, pada lintasan B–B' juga ditemukan dua Sesar normal, yakni Sesar Normal Padang Baru dan Sesar Normal Takis.
3. Berdasarkan model inversi 3D data gayaberat, terlihat variasi distribusi densitas batuan hingga kedalaman sekitar 3000 meter dengan rentang nilai 1,0–2,8 g/cc. Perbedaan densitas divisualisasikan melalui gradasi warna yang menunjukkan perubahan sifat fisik batuan bawah permukaan. Warna biru tua hingga biru muda merepresentasikan densitas rendah berkisar 1,0–1,6 g/cc, warna hijau hingga kuning menunjukkan densitas sedang sekitar 1,7–2,3 g/cc, Sementara itu, warna

jingga hingga merah muda menunjukkan densitas tinggi berkisar 2,4–2,8 g/cc.

4. Berdasarkan hasil penampang model resistivitas 2D Magnetotelurik, zona resistivitas rendah ditunjukkan oleh warna merah hingga kuning dengan nilai sekitar 0–12 Ohm-m, di bawah lapisan tersebut berkembang zona resistivitas sedang berwarna hijau hingga hijau kebiruan dengan kisaran nilai sekitar 12–78 Ohm-m. Zona resistivitas tinggi yang ditunjukkan warna biru hingga ungu dengan nilai lebih dari 78 Ohm-m diinterpretasikan sebagai batuan beku kompak atau intrusi panas yang berperan sebagai sumber panas (*heat source*).
5. Sistem panasbumi pada daerah penelitian bertipe *outflow* yang dikontrol oleh Sesar Normal Alahanmati sebagai zona *recharge* dan Sesar Normal Padang Baru sebagai zona *discharge*, dengan *heat source* yang diperkirakan berada pada kedalaman >3000 m, reservoir berkembang pada kedalaman 1000–2500 m sebagai zona akumulasi fluida panas, serta *caprock* yang berperan menahan dan mengarahkan aliran fluida secara lateral. Fluida meteoritik yang masuk melalui Sesar Alahanmati dipanaskan di kedalaman, kemudian tertahan oleh *caprock* dan mengalir menyamping menuju reservoir hingga akhirnya naik melalui Sesar Padang Baru dan struktur turunannya (Sesar Takis) sebagai manifestasi di permukaan. Variasi suhu ( $\pm 49$ – $88^{\circ}\text{C}$ ), pH netral, serta keberadaan travertin pada manifestasi Padang Baru, Sungai Takis, Sungai Limau, dan Sungai Langkuik menunjukkan fluida telah mengalami pendinginan, pencampuran, dan interaksi batuan selama migrasi, sehingga menguatkan interpretasi bahwa manifestasi tersebut merupakan bagian dari sistem *outflow* yang berkembang secara lateral dari sumber panas yang lebih dalam.

## 6.2 Saran

Pada penelitian ini disarankan agar cakupan data magnetotelurik diperluas serta didukung dengan penambahan data geokimia, sehingga identifikasi setiap zona dapat dilakukan secara lebih akurat dan mewakili kondisi bawah permukaan serta identifikasi sistem panasbumi secara lebih baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agung, N. (2018). Geothermal power generation in Indonesia , a country within the ring of fire : Current status , future development and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(March 2017), 2893–2901. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.096>
- Ananda, R., Arisbaya, I., & Grandis, H. (2025). The GGMPPlus Global Gravity Data from the Geophysical Exploration Perspective. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1458(1), 3–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1458/1/012041>
- Blakely, R. J. (1995). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Blakely, R. J. (1996). *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Brotopuspito, K. S. (2001). *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Universitas Gadjah Mada.
- Corrado, S., Aldega, L., Celano, A. S., De Benedetti, A. A., & Giordano, G. (2014). Cap rock efficiency and fluid circulation of natural hydrothermal systems by means of XRD on clay minerals (Sutri, Northern Latium, Italy). *Geothermics*, 50, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.011>
- Djudjun, A. (2005). Penyelidikan Gaya Berat Daerah Panas Bumi Sipoholon-Tarutung Kabupaten Tapanuli Utara Propinsi Sumatera Utara. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*.
- ESDM. (2017). *Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1*.
- Grandis, H. (2009). Pemodelan Inversi Geofisika. In *Himpunan Ahli Geofisika Indonesia* (Nomor 80).
- Hermawan, D., Widodo, S., & Mulyadi, E. (2012). Sistem Panas Bumi Daerah

Candi Umbul-Telomoyo Berdasarkan Kajian Geologi dan Geokimia. *Makalah Ilmiah Pusat Sumber Daya Geologi*, 7, 1–6.

Hermawan, L. T., & Prabhawati, A. (2024). Implementasi Just Energy Transition Partnership Indonesia menuju Net Zero Emissions tahun 2060. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan Implementasi*. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.24161>

Hinze, W. J., Frese, R. R. . von, & Saad, A. H. (2014). Gravity and Magnetic Exploration. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*.

Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2012). *New ultra-high resolution picture of Earth ' s gravity field. Section 2*. <https://doi.org/10.1002/grl.50838>.New

Hutapea, F., Soemintadiredja, P., & Permana, A. (2000). *Geothermal Eksplorasi Using geochemical Method In Method In Bonjol Area, Pasaman Regency, West Sumatera*.

Irfan, R., & Daud, Y. (2019). Geothermal reservoir boundary delineation using 3D magnetotelluric inversion . case study : the “ delta ” geothermal field of Indonesia Geothermal reservoir boundary delineation using 3D magnetotelluric inversion . case study : the “ delta ” geothermal fi. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/254/1/012006>

Kholid, M., Lim, D., & Widodo, S. (2007). Penyelidikan Terpadu (Geologi, Geokomia Dan Geofisika) Daerah Panas Bumi Bonjol, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat. *Prosiding Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Dan Non Lapangan Tahun 2007 Pusat Sumber Daya Geologi*, 1–15.

Limswipin, E. N., Rasimeng, S., Karyanto, K., & Indragiri, N. M. (2020). Inversi 2D Data Magnetotelurik Untuk Mengetahui Keberadaan Hidrokarbon Daerah Bula, Maluku. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 4(3), 243–254. <https://doi.org/10.23960/jge.v4i3.38>

Longman, I. M. (1959). Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun. *Journal of Geophysical Research* 64(12), 2351–2355.

Maula, A. H. (2022). Identifikasi Reservoar Panasbumi Bonjol Berdasarkan Analisa Data Magnetotelurik, Geolistrik dan Geokimia. *Skripsi*. Universitas

Lampung.

- Murdani, Sarkowi, M., Saputra, D., & Darmawan, A. (2020). Pemodelan 2 Dimensi Data Magnetotellurik Daerah Prospek Panasbumi Lapangan “JGT.” *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 3(1), 98–108.
- Nugraha, B. H. (2023). Identifikasi Daerah Prospek Reservoar Panasbumi Maritaing Berdasarkan Analisis Data Metode Gayaberat dan Magnetotellurik. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Panjaitan, S. (2010). *Geologi daerah panas bumi ulubelu tanggamus, lampung utara berdasarkan analisis metode magnetotellurik (mt)*. 69–91.
- Pramadhana, D. A., Putra, B. H., & Syirojudin, M. (2024). STUDI PEMETAAN SESAR REMBANG-MADURA-KANGEAN-SAKALA TURUNAN. *Jurnal Geosaintek*, 10(1), 51–62.
- Rahima, N. A. (2020). Studi Pemodelan Struktur Bawah Permukaan menggunakan Metode Gayaberat di Daerah Panas Bumi Kec. Lasusua kab. Kolaka Utara. *UIN ALAUDIN MAKASSAR*.
- Ramadhan, A. B., Lepong, P., & Rahadinata, T. (2020). *Analisa Struktur Bawah Permukaan Daerah Prospek Panas Bumi “GF-TNH” Sumatera Barat Berdasarkan Metode Gaya Berat*. 3, 1–10.
- Rosid, S. (2005). *Gravity Method in Exploration Geophysics*. Department of Physics, University of Indonesia.
- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi Struktur daerah Panasbumi Ulubelu Berdasarkan Analisa data SVD Anomali Bouguer. *J. Sains MIPA*, Vol. 16, N, 111–118.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gayaberat*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). *Fisika untuk sains dan teknik*. Salemba Teknika.
- Simpson, F., & Bahr, K. (2005). Practical magnetotellurics. *Practical Magnetotellurics*, 9780521817, 1–254.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511614095>
- Sudrajad, B. (2023). Analisis Deskriptif Perbandingan Data Sekunder Gravitasi GGMplus Terhadap Data Gravitasi Lapangan Panas Bumi Gunung Lawu dan Data Gravitasi Stasiun Referensi (gravity base station) di Pulau Papua. *Jurnal*

- Fisika Papua*, 2(1), 25–34. <https://doi.org/10.31957/jfp.v2i1.22>
- Suniah, & Rochayati, N. (2025). Interaksi Tiga Lempeng di Kawasan Indonesia Timur. *Education, Social Sciences, and Linguistics: Conference Series*, 1(2), 127–132. <https://journal.ummat.ac.id/index.php/ecs>
- Susilawati. (2005). *Energi panasbumi: a present from the heart of the earth*. Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia.
- Syamsuriadi, S. (2013). *Penentuan Struktur Permukaan Kota Makassar dengan Menggunakan Metode Gayaberat (Gravity)*. Makasar: Universitas Hasanudin.
- Syukri, M., Saad, R., Marwan, Tarmizi, Fadhli, Z., & Safitri, R. (2018). Volcanic Hazard Implication Based on Magnetic Signatures Study of Seulawah Agam Geothermal System, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1120(1), 0–9. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1120/1/012028>
- Telford, W., Gedaart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*.
- Wachisbu, M. I. M., & Santosa, B. J. (2015). Pemodelan Data Magnetotellurik dengan Remote Reference untuk Eksplorasi Cekungan Migas Studi Kasus: Lapangan Em-4. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(1), B17–B20. <http://www.esdm.go.id/berita/artikel/56-artikel/4586-peluang->
- Wiguna, I. P. A. P., Rosid, M. S., & Saputra, F. R. T. (2024). Comparison of Land Surface and GGMPlus Satellite Gravity Data Results (Case Study: The Kalibening Basin). *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(8), 4579–4588. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i8.7318>
- Wulandari, F. I., & Setiawan, A. (2015). *Pemodelan Struktur Bawah Permukaan 3D Purwokerto dan Sekitarnya Berdasarkan Data Anomali Gravitasi Bouguer Lengkap*. 19(57), 6–12.
- Yufajjiru, L., Dhiwaurrais, M., Firdaus, A., Anisah, D., Rizqi, S., & Amanda, L. T. (2019). *Studi Pemisahan Anomali Regional dan Residual Gravitasi Menggunakan Moving Average dan Chebyshev Tipe I Lowpass Filter*.
- Zaenudin, A., Ahmad, R., & Sarkowi, M. (2013). *Pemodelan Struktur dan Reservoir Lapangan Panas Bumi Bonjol Dari Anomali Gaya Berat*. 207–213.
- Zaenudin, A., Sarkowi, M., & Suharno. (2013). Pemodelan Sintetik Gradien Gayaberat untuk Identifikasi Sesar. *Seminar Nasional Sains & Teknologi V, November*, 269–279.

Zarkasyi, A., Syaifuddin, F., & Setiawan, N. S. (2019). Aplikasi Metode Magnetotelurik Dalam Interpretasi Struktur Panas Bumi: Daerah Panas Bumi Gunung Karua, Tana Toraja Sulawesi Selatan. *Jurnal Geosaintek*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v5i1.5062>