

**IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI GUNUNG
SIBAYAK BERDASARKAN ANALISIS *SECOND VERTICAL
DERIVATIVE* (SVD) DAN PEMODELAN 3D DATA
GAYABERAT**

(Skripsi)

Oleh

Dini Anjani

2215051077



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2026

**IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI GUNUNG
SIBAYAK BERDASARKAN ANALISIS *SECOND VERTICAL
DERIVATIVE* (SVD) DAN PEMODELAN 3D DATA
GAYABERAT**

Oleh

Dini Anjani

Skripsi

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

Pada

**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI GUNUNG SIBAYAK BERDASARKAN ANALISIS *SECOND VERTICAL DERIVATIVE* (SVD) DAN PEMODELAN 3D DATA GAYA

Oleh

Dini Anjani

Sistem panas bumi Gunung Sibayak memiliki kompleksitas geologi yang dipengaruhi oleh aktivitas magmatik dan struktur tektonik, sehingga memerlukan pendekatan geofisika yang mampu menggambarkan variasi sifat fisis bawah permukaan secara lateral dan vertikal. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi zona reservoir panas bumi berdasarkan analisis *Second vertical derivative* (SVD) dan pemodelan 3D data gayaberat. Data yang digunakan berupa anomali Bouguer lengkap yang dianalisis menggunakan metode spektrum untuk menentukan kedalaman sumber anomali, serta SVD untuk mengidentifikasi pola struktur bawah permukaan. Hasil pengolahan selanjutnya dimodelkan dalam bentuk 3D distribusi densitas untuk mengevaluasi geometri sistem panas bumi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sumber anomali berada pada kedalaman sekitar 1,5–3,0 km yang mengindikasikan keberadaan intrusi magma dangkal sebagai sumber panas. Analisis SVD memperlihatkan lineament dominan berarah barat laut–tenggara dan utara–selatan yang diinterpretasikan sebagai sesar dan rekahan hingga kedalaman 1–2 km, berperan sebagai jalur permeabilitas fluida hidrotermal. Zona prospek reservoir diidentifikasi pada bagian tengah–selatan dengan nilai densitas rendah berkisar 1,99–2,30 gr/cc pada kedalaman 1,0–2,5 km. Konsistensi parameter tersebut menunjukkan keterkaitan dengan kontrol struktur geologi. Berdasarkan integrasi seluruh parameter, zona tersebut diinterpretasikan sebagai reservoir panas bumi yang prospektif untuk pengembangan lebih lanjut.

Kata kunci: Panas Bumi, Gayaberat, *Second vertical derivative*, Pemodelan 3D, Gunung Sibayak.

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF GEOTHERMAL RESERVOAR ZONES OF MOUNT SIBAYAK BASED ON SECOND VERTICAL DERIVATIVE (SVD) ANALYSIS AND 3D GRAVITY DATA MODELING

By

Dini Anjani

The geothermal system of Mount Sibayak exhibits geological complexity influenced by magmatic activity and tectonic structures, requiring a geophysical approach capable of describing subsurface physical property variations both laterally and vertically. This study aims to identify geothermal reservoir zones based on Second vertical derivative (SVD) analysis and 3D gravity data modeling. The data used consist of complete Bouguer anomaly, analyzed using spectral methods to determine the depth of anomaly sources, and SVD to identify subsurface structural patterns. The processed data were further modeled into a 3D density distribution to evaluate the geometry of the geothermal system. The results indicate that the anomaly sources are located at depths of approximately 1.5–3.0 km, suggesting the presence of shallow magmatic intrusions as the heat source. SVD analysis reveals dominant lineaments trending northwest–southeast and north–south, interpreted as faults and fractures at depths of 1–2 km, which act as permeability pathways for hydrothermal fluids. The prospective reservoir zone is identified in the central–southern area, characterized by low density values ranging from 1.99–2.30 g/cc at depths of 1.0–2.5 km. The consistency of these parameters indicates a strong correlation with geological structural controls. Based on the integration of all parameters, the zone is interpreted as a prospective geothermal reservoir for further development.

Keywords: Geothermal, Gravity, Second vertical derivative, 3D Modeling, Mount Sibayak.

Judul Skripsi

: **Identifikasi Zona Reservoar Panas Bumi
Gunung Sibayak Berdasarkan Analisis
Second vertical derivative (SVD) dan
Pemodelan 3D Data Gayaberat.**

Nama Mahasiswa

: **Dini Anjani**

Nomor Pokok Mahasiswa

: **2215051077**

Program Studi

: **Teknik Geofisika**

Fakultas

: **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA.

NIP. 197112101997021001

Ilham Dani, S.T., M.T.

NIP. 198509172019031004

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

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

NIP. 197307162000121002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA.** _

Sekretaris : **Ilham Dani, S.T., M.T.**

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

Dekan Fakultas Teknik


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

Tanggl Lulus Ujian Skripsi : 8 Mei 2026

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi berjudul "*Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi Gunung Sibayak Berdasarkan Analisis Second vertical derivative (SVD) dan Pemodelan 3D Data Gayaberat*" adalah hasil karya saya sendiri, yang disusun berdasarkan data, analisis, dan pengetahuan yang saya peroleh selama proses penelitian. Skripsi ini tidak memuat karya orang lain yang pernah dipublikasikan, kecuali secara tertulis disebutkan sebagai rujukan, dan bukan merupakan hasil plagiarisme.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan dapat saya pertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari terdapat kekeliruan atau pelanggaran terkait karya ini, maka saya bersedia menerima konsekuensi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Bandar Lampung, 8 Mei 2026



NPM. 2215051077

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Dini Anjani lahir pada tanggal 30 Januari 2005 di Tanjung Sari, Palembang. Penulis merupakan anak ke 4 dari 4 bersaudara. Pendidikan penulis dimulai di Sekolah Dasar (SD) Negeri 1 Tanjung Senang, Bandar Lampung dan berhasil diselesaikan pada tahun 2016. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 20 Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2019. Pendidikan menengah atas ditempuh di Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 13 Bandar Lampung dan diselesaikan pada tahun 2022. Setelah menyelesaikan pendidikan di tingkat SMA, penulis melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi negeri di Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) pada program studi S1 Teknik Geofisika.

Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan baik dalam bidang akademik maupun non-akademik sebagai bentuk pengembangan kemampuan dan pengalaman. Penulis tergabung dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (HIMA TG BHUWANA) pada periode 2023–2025 sebagai anggota bidang Sains dan Teknologi (SAINTEK). Dalam organisasi tersebut, penulis turut berkontribusi dalam berbagai kegiatan yang bersifat edukatif dan pengembangan keilmuan di bidang geofisika.

Selain itu, penulis juga dipercaya sebagai Sekretaris Pelaksana dalam kegiatan Bhuwana *Course* yang merupakan kegiatan internal yang bertujuan untuk meningkatkan kompetensi mahasiswa. Penulis juga terlibat sebagai anggota bidang

KRT dalam kegiatan berskala nasional, yaitu *Geophysics Academic and Event (GEAVENT)*. Tidak hanya itu, penulis juga berpartisipasi sebagai anggota divisi kesekretariatan dalam kegiatan nasional *Geophysics Whiz Event and Seminar (GWES)-10*, yang menjadi wadah pengembangan kemampuan akademik serta kompetisi di bidang geofisika.

Dalam bidang akademik, penulis juga mengikuti program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) pada kegiatan riset yang dilaksanakan pada bulan Juli hingga November 2024. Kegiatan ini memberikan pengalaman bagi penulis dalam melakukan penelitian serta pengembangan kemampuan analisis ilmiah.

Sebagai bagian dari pengabdian kepada masyarakat, penulis melaksanakan kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada bulan Januari hingga Februari 2025 yang berlokasi di Desa Sendang Mukhti, Kabupaten Lampung Tengah. Melalui kegiatan ini, penulis berperan aktif dalam berbagai program kerja yang bertujuan untuk membantu masyarakat serta menerapkan ilmu yang telah diperoleh selama perkuliahan.

Selanjutnya, penulis melaksanakan kegiatan Kerja Praktik (KP) di PT Elnusa Tbk pada tanggal 1 hingga 30 Juli 2025 yang berlokasi di lapangan panas bumi Way Ratai. Kegiatan ini memberikan pengalaman langsung kepada penulis dalam dunia industri, khususnya dalam bidang eksplorasi panas bumi serta penerapan metode geofisika di lapangan.

Sebagai tahap akhir dalam menyelesaikan pendidikan sarjana, penulis melaksanakan kegiatan Tugas Akhir (TA) di Jurusan Teknik Geofisika dengan judul "*Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi Gunung Sibayak Berdasarkan Analisis Second vertical derivative (SVD) dan Pemodelan 3D Data Gayaberat*". Penelitian ini dilakukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik serta sebagai kontribusi ilmiah dalam pengembangan studi geofisika, khususnya dalam eksplorasi panas bumi.

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur,
persembahkan ini penulis ungkapkan sebagai bentuk terima kasih yang tulus.
Terima kasih ya Allah, tuhan yang maha pengasih lagi maha penyayang, atas
segala rahmat, kekuatan, dan petunjuk-Mu yang tiada akhir mengiringi setiap
langkah hingga akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini.
dan karya tulisan ini penulis persembahkan kepada:

MAMA TERCINTA

Terima kasih atas rasa kasih sayang dan cinta tanpa syarat, pengorbanan yang
tidak terhingga, serta dukungan dan doa yang selalu menyertai di setiap langkah.
Semoga kelak penulis bisa membahagiakan mama sebagaimana mama memberi
kebahagiaan kepada penulis.

KAKAK-KAKAK TERSAYANG

Terima kasih atas segala doa, dukungan, dan senyuman yang diberikan Tete, Ayuk, dan Abang. Semoga penulis dapat menjadi manusia yang baik dan mengangkat derajat keluarga.

GRANIT

Terima kasih atas suka, duka, dan pengalaman selama penulis menjalani hari hari sebagai mahasiswa. Masa kaderisasi merupakan masa yang paling menyenangkan untuk penulis.

DIRIKU SENDIRI

terima kasih atas setiap keringat, waktu, dan usaha yang tak pernah benar-benar berhenti. Terima kasih telah bertahan di saat lelah, tetap melangkah di saat ragu, dan tidak menyerah meski jalan terasa berat. Perjalanan ini mungkin tidak selalu mudah, tetapi setiap langkah telah membentukku menjadi lebih kuat.

MOTTO

“Bangkit, jalan, berkembang dan raih yang menjadi tujuan.”

-Mama

"Janganlah kamu bersikap lemah, dan janganlah (pula) kamu bersedih hati, padahal kamulah orang-orang yang paling tinggi (derajatnya), jika kamu orang-orang yang beriman."

(QS. Ali 'Imran: 139)

"Mohonlah pertolongan (kepada Allah) dengan sabar dan salat. Sesungguhnya (salat) itu benar-benar berat, kecuali bagi orang-orang yang khusyuk."

(QS. Al-Baqarah : 45)

“Always take care of your people. Stay true. Stay honest to your ambitions. don’t give up with your dreams because dreams always come true.”

-Park Jongseong

“Anyone can be anything, but u can be everything.”

-Han Jisung

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat rahmat dan karunia-nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *“Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi Gunung Sibayak Berdasarkan Analisis Second vertical derivative (SVD) dan Pemodelan 3D Data Gayabarat”*. Adapun maksud dan tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Dalam penulisan skripsi ini penulis menyadari masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca pada umumnya, serta bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 8 Mei 2026

Dini Anjani
NPM. 2215051077

SANWACANA

Puji syukur tak lupa penulis panjatkan atas kehadiran Allah subhanahu wa ta'ala, Tuhan yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku dekan fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA, IPM., selaku ketua jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA., selaku sekretaris Jurusan Teknik Geofisika dan pembimbing I penulis yang telah sabar membimbing, mengarahkan, dan memberikan masukan berharga selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas ilmu, arahan, dan saran yang telah diberikan dengan penuh dedikasi.
4. Bapak Ilham Dani, S.T., M.T., selaku pembimbing II yang telah memberikan banyak ilmu, bantuan, saran dan masukan kepada penulis.
5. Bapak Prof. Ir. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D., IPU. ASEAN Eng., selaku dosen penguji dalam skripsi yang telah memberikan saran, motivasi serta evaluasi yang membangun dalam penyempurnaan skripsi.
6. Seluruh dosen dan civitas Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan dukungan selama masa studi. Setiap proses pembelajaran menjadi bagian penting dalam perjalanan akademik penulis.

7. Untuk Mama tercinta, terima kasih atas cinta yang tidak pernah berkurang, doa yang selalu menguatkan, dan pengorbanan yang tidak pernah terhitung. Mama adalah alasan terbesar penulis untuk terus bertahan dan menyelesaikan setiap proses hingga titik ini. Dalam setiap langkah yang penuh ragu, selalu ada doa Mama yang menjadi penenang dan penguat. Terima kasih telah selalu percaya, bahkan saat penulis meragukan diri sendiri. Terima kasih atas kesabaran, perhatian, dan kasih sayang yang begitu tulus tanpa syarat. Semua yang penulis capai hari ini tidak lepas dari peran besar Mama di dalamnya.
8. Teteh, Ayuk, Abang, Nuha, dan Nusa sebagai keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan segala hal yang baik untuk penulis. Terima kasih banyak atas keringat yang telah dikeluarkan untuk penulis dan terima kasih banyak atas kepercayaan yang tidak pernah pudar untuk penulis.
9. Seseorang yang tidak pernah lelah menjadi pundak, tidak pernah lelah menjadi pendengar, dan tidak pernah lelah menjadi penghibur selama penulis berkuliah, Sabri Jonesti. Bertemu denganmu merupakan hal yang sangat berarti untuk penulis.
10. Untuk teman sedih, susah, seru, dan senang selama semester 7 dan 8 penulis, Ika Widia. Terima kasih karena telah menjadi pendengar yang saling mendengarkan.
11. Untuk teman yang telah membantu penulis dalam mengerjakan pengolahan, Razan, Paulina dan Shabra. Terima kasih sudah memberikan semangat untuk penulis.
12. Untuk Edu, Nadia, Wanti dan Ulivia yang telah membuat hari-hari penulis di Lab PPDG lebih seru dan menyenangkan, terima kasih banyak telah membantu penulis dari awal hingga akhir penelitian.
13. Untuk bang Rezky, bang Raihan, bang Frederick, bang Ahya, bang Izridho dan bang Rifan terima kasih banyak atas arahan, pelajaran dan waktu kebersamaan selama di Lab PPDG.
14. Teman, sahabat dan segalanya penulis sejak SMA, Ayu Nabila dan Anggun Fadilla yang selalu ingat akan pertemanan kita, kalian merupakan teman terbaik yang penulis kenal dari SMA.

15. Teman-teman masa KKN penulis, Early, Keke, Anya, Leo, Adit, dan Ijul. Terima kasih atas kenangan sebulan yang kita lalui, mari bertemu di hari sukses kita nanti.
16. Teman-teman kerja praktik ELNUSA, Asda, Razan, Yusroni, Rangga, dan Harsya. Terima kasih sudah menemani semasa penulis melaksanakan Kerja Praktik.
17. Keluarga besar Teknik Geofisika angkatan 2022 GRANIT. Terima kasih atas kenangan, suka, dan duka yang sudah dijalani bersama sama.
18. Untuk bintangnya penulis, Christopher Bahg. Kata-kata yang pernah kau ucapkan telah membuat penulis berani mengambil langkah yang tidak pernah dibayangkan. Semoga kita dapat bertemu kelak secepatnya.
19. Untuk diriku sendiri, terima kasih karena sudah bertahan sampai saat ini. Jangan pernah berhenti, terus bergerak dan buktikan bahwa kamu adalah wanita hebat.

Bandar Lampung, 8 Mei 2026

Dini Anjani

NPM. 2215051077

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN	x
MOTTO	xi
KATA PENGANTAR	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR TABEL	xiv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Lokasi Penelitian	4
2.2 <i>Tectonic setting</i> Daerah Penelitian	5
2.3 Fisiografi Regional	6
2.4 Geologi Regional Daerah Penelitian	7
2.5 Penelitian Terdahulu	10
III. TEORI DASAR	13
3.1 Data <i>Global Gayaberat Modul Plus</i> (GGMPlus)	13
3.2 Metode Gayaberat	14
3.3 Prinsip Metode Gayaberat	14
3.4 Rapat Massa Batuan	17
3.5 Koreksi-Koreksi Metode Gayaberat pada data GGMplus	18
3.5.1 Koreksi Lintang (<i>Latitude Correction</i>)	19
3.5.2 Koreksi Udara Bebas (<i>Free Air Correction</i>)	19
3.5.3 Koreksi Bouguer (<i>Bouguer Correction</i>)	29
3.5.4 Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>)	20
3.6 Anomali Bouguer	20

3.7 Analisis Spektrum.....	21
3.8 Filter <i>Bandpass</i>	23
3.9 <i>First Horizontal Derivative</i> (FHD).....	25
3.10 <i>Second vertical derivative</i> (SVD).....	26
3.11 <i>Inverse Modelling</i>	29
3.12 Sistem Panasbumi.....	29
IV. METODOLOGI PENELITIAN.....	36
4.1 Waktu dan Tempat Penelitian	36
4.2 Alat dan Bahan.....	38
4.3 Prosedur Penelitian.....	38
4.3.1 Studi Literatur.....	38
4.3.2 Data Gayaberat Observasi	38
4.3.3 Anomali Bouguer Lengkap (ABL).....	39
4.3.4 Analisis Spektrum	40
4.3.5 Pemisahan Anomali Regional Dan Residual.....	41
4.3.6 Analisis <i>Derivative</i>	42
4.3.7 Pemodelan Bawah Permukaan	43
4.4 Diagram Alir	44
V. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
5.1 Data Penelitian	45
5.2 Topografi Daerah Penelitian	46
5.3 Densitas Rata-Rata Batuan.....	47
5.4 Anomali Bouguer Lengkap	48
5.5 Analisis Spektrum	49
5.6 Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual	51
5.6.1 Bandpass Filter	51
5.6.2 Anomali Regional.....	51
5.6.3 Anomali Residual	52
5.7 Gradien Gayaberat.....	54
5.8 Analisis <i>Derivative</i>	57
5.9 <i>Inverse Modelling</i>	62
5.10 Korelasi SVD dan Pemodelan 3D.....	69
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	77
6.1 Kesimpulan.....	77
6.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA.....	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta Administrasi Daerah Penelitian.....	4
2. Struktur Sumatra dan Pergerakan Lempeng Tektonik, Barber dkk. (2005) .	5
3. Fisiografi Pulau Sumatra mengacu pada Van Bammelen (1949)	7
4. Lembar Geologi Daerah Penelitian	8
5. Peta geologi daerah penelitian	9
6. Gaya tarik antara dua benda (kemendikdasmen, 2020)	15
7. Kurva $\ln A$ vs K	25
8. Sistem Panasbumi (Dickson dan Fanelli, 2004)	32
9. Data Data Pada GGMPlus.....	39
10. Diagram Alir Penelitian	44
11. Cuplikan data .txt gayaberat accelerations (ga) dan Terrain Height	45
12. Peta topografi	46
13. Parasnis	47
14. Peta anomali bouger lengkap daerah penelitian	48
15. Grafik $\ln A$ dan k	49
16. Peta regional daerah penelitian	52
17. Peta residual daerah penelitian.....	53
18. Peta <i>First Horizontal Derivative</i> (FHD)	55
19. Peta <i>second vertical derivative</i> (SVD).....	56
20. Peta analisis derivative	58
21. Analisis Derivative lintasan A	59
22. Analisis Derivative lintasan B.....	60
23. Analisis Derivative lintasan C.....	61
24. Model distribusi densitas 3D.....	63
25. Model distribusi zona reservoir	64

26. 3D pada kedalaman 2250 m.....	66
27. 3D pada kedalaman 1150 m.....	66
28. 3D pada kedalaman 550 m.....	68
29. 3D pada kedalaman -2150 m	68
30. Korelasi analisis SVD Lintasan A-A' dengan 3D.....	71
31. Korelasi analisis SVD Lintasan B-B' dengan 3D	73
32. Korelasi analisis SVD Lintasan C-C' dengan 3D	75

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian terdahulu.....	10
2. Densitas batuan (Telford dkk., 1990).....	17
3. Operator Henderson dan Zietz (1949).....	29
4. Operator Elkins (1951).....	29
5. Operator Rosenbach (1953)	29
6. Jadwal kegiatan penelitian	37
7. Alat dan bahan.	38
8. Analisis dari grafik lintasan A	60
9. Analisis dari grafik lintasan B.....	61
10. Analisis dari grafik lintasan A	62

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia, didorong oleh aktivitas tektonik dan vulkanik aktif sepanjang busur magma hasil subduksi lempeng. Keberadaan lebih dari 130 gunung api aktif ini telah membentuk lebih dari 300 daerah prospek panas bumi yang tersebar dari Sumatra hingga Sulawesi dan Maluku (Hadi dkk., 2020). Kondisi geodinamik yang kompleks ini tidak hanya menciptakan sumber panas yang melimpah, tetapi juga membentuk sistem reservoir dengan karakteristik unik, mulai dari sistem vulkanik tinggi hingga sistem sedimentari non-vulkanik (Thamrin dkk., 2021). kompleksitas struktur bawah permukaan seperti pola patahan, keberadaan tubuh intrusif, dan heterogenitas batuan sering kali menjadi tantangan utama dalam fase eksplorasi, yang berujung pada tingginya risiko investasi dan kegagalan pengeboran (Zuhro dkk., 2023).

Karakterisasi sistem panas bumi saat ini mengalami kemajuan signifikan dengan mengadopsi pendekatan integrasi multi-metode geofisika guna memetakan dan mengkuantifikasi komponen bawah permukaan secara holistik. Dalam praktiknya, metode gayabarat menjadi tulang punggung utama dalam pendekatan ini, karena kemampuannya tidak hanya mengidentifikasi keberadaan reservoir, tetapi juga membatasi geometri tubuh intrusif sebagai *heat source*, menduga ketebalan *cap rock*, serta memetakan sebaran struktur patahan yang mengontrol sirkulasi fluida panas. Tujuan akhir dari proses ini adalah membangun model konseptual tiga dimensi yang akurat dan dapat diandalkan untuk memandu strategi eksplorasi dan pengembangan, sehingga secara signifikan dapat meminimalkan risiko teknis dan finansial (Cumming, 2016).

Provinsi Sumatera Utara menjadi salah satu daerah di Indonesia yang menyimpan potensi sumber energi panas bumi yang sangat tinggi, suatu potensi yang lahir secara geologis dari posisi Pulau Sumatera yang terletak pada zona tumbukan aktif antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia. Interaksi tektonik ini tidak hanya membentuk Bukit Barisan dan deretan gunungapi kuarter, tetapi juga menciptakan sistem panas bumi hidrotermal yang terkait dengan intrusi magma andesitis-dasitis muda. Di antara sejumlah manifestasi termal di provinsi ini, Gunung Sibayak di Kabupaten Karo menonjol sebagai lapangan prospek dengan indikasi sistem panas bumi yang jelas, ditandai oleh keberadaan fumarola, solfatara, dan mata air panas yang tersebar di lerengnya.

Zona reservoir di daerah vulkanik kompleks seperti Sibayak memerlukan pemahaman mendalam tentang struktur bawah permukaan, di mana metode gayaberat berperan sebagai teknik eksplorasi awal yang efektif dan *cost-efficient*. Data gayaberat, mampu merekam variasi densitas batuan yang dapat mengindikasikan tubuh intrusif sebagai *heat source*, zona alterasi argilik sebagai *cap rock*, serta batuan reservoir vulkaniklastik yang terfraktur.

Pemrosesan lanjutan dengan teknik *Second vertical derivative* (SVD) dan analisis *edge detection* berperan penting untuk mempertajam batas anomali dan mengidentifikasi struktur pengontrol seperti patahan dan kaldera. Lebih lanjut, pemodelan inversi 3D dari data gayaberat memungkinkan estimasi kedalaman, ketebalan, dan distribusi lateral reservoir secara kuantitatif. Integrasi pendekatan ini tidak hanya mengonfirmasi keberadaan sistem panas bumi, tetapi juga menyediakan kerangka geometris awal yang kritis untuk menyusun strategi eksplorasi detail, termasuk penentuan prioritas target pemboran (Muhammad dan Saepuloh, 2022).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hasil analisis spektrum anomali gayaberat dalam menentukan kedalaman sumber anomali di sistem panas bumi Gunung

Sibayak?

2. Bagaimana interpretasi metode *Second vertical derivative* (SVD) dalam mengidentifikasi struktur geologi dan intrusi yang berperan pada sistem panas bumi Gunung Sibayak?
3. Bagaimana model zona reservoir sistem panas bumi Gunung Sibayak yang disusun berdasarkan integrasi hasil analisis SVD dan pemodelan 3D data gayaberat?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sendiri bertujuan untuk:

1. menentukan kedalaman anomali dengan analisis spektrum anomali gayaberat.
2. Melakukan analisis *Second vertical derivative* (SVD) untuk menentukan struktur geologi dan intrusi sistem panas bumi Gunung Sibayak.
3. Menyusun model zona reservoir sistem panas bumi Gunung Sibayak berdasarkan integrasi analisis SVD dan pemodelan 3D data gayaberat.

1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data utama yang digunakan adalah data gayaberat satelit GGMplus (*Global Gayaberat Model Plus*) dengan resolusi spasial 14 x 13 Kilometer.
2. Penelitian berfokus pada zona reservoir sistem panas bumi di daerah Gunung Sibayak, Provinsi Sumatera Utara.
3. Penelitian berfokus pada Gunung Sibayak Sumatera Utara.

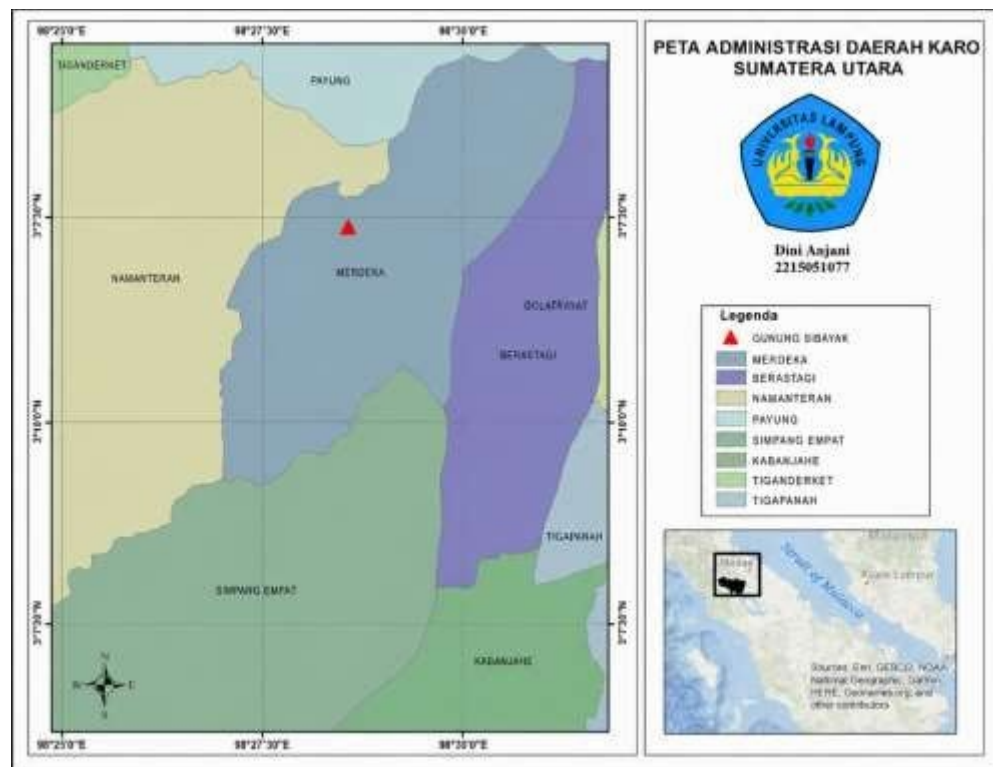
1.5 Manfaat Penelitian

Hasil identifikasi berupa sebaran zona reservoir dan model konseptual sistem panas bumi Gunung Sibayak yang dapat dijadikan sebagai acuan awal untuk tahap eksplorasi panas bumi yang lebih detail.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Penelitian

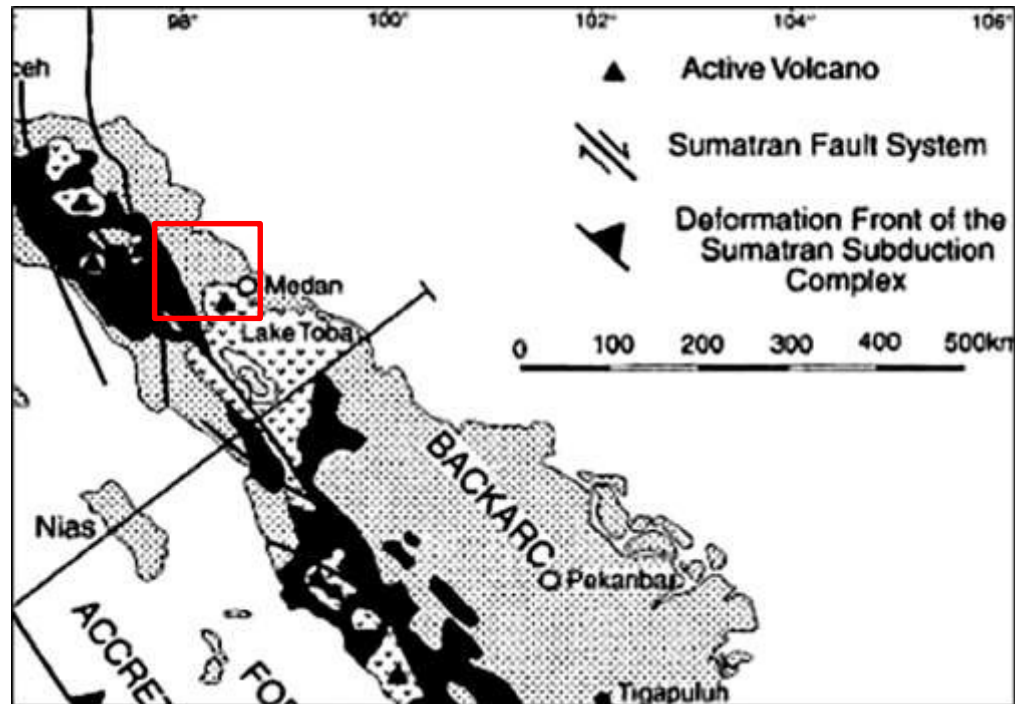
Lokasi penelitian berfokus pada Gunung Sibayak, dan zona panas bumi di sekitarnya yang termasuk dalam Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Sibayak. Secara administratif, daerah ini terletak di Kecamatan Simpang Empat, Merdeka, Kabupaten Karo, Provinsi Sumatera Utara seperti pada peta gambar 1.



Gambar 1. Peta administrasi daerah penelitian

2.2 Tectonic setting Daerah Penelitian

Gunung Sibayak sebagai bagian dari sistem vulkanik Kuartar di Sumatera Utara, terbentuk dalam konteks tektonik kompresional akibat subduksi miring (*oblique subduction*) Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Eurasia.



Gambar 2. Struktur sumatra dan pergerakan lempeng tektonik (Barber dkk., 2005).

Seperti yang terlihat pada gambar 2, Subduksi ini tidak hanya menghasilkan zona penunjaman (*Sunda-Java Trench*), tetapi juga membentuk Patahan Besar Sumatera (*Sumatra Fault System/SFS*) yang merupakan sesar mendatar dekstral utama, serta deretan gunungapi sepanjang Busur Vulkanik Sumatera.

Secara lebih spesifik, Gunung Sibayak terletak pada segmen SFS di wilayah Sumatera Utara, di mana interaksi antara komponen kompresional (akibat subduksi) dan komponen geser (akibat patahan besar) menciptakan lingkungan tektonik yang kompleks. Konfigurasi ini menghasilkan zona tarikan (*pull-apart*) dan zona rekahan (*fracture zone*) yang memfasilitasi naiknya magma dan membentuk sistem panas bumi hidrotermal. Aktivitas vulkanisme dan hidrotermal di Sibayak sangat dipengaruhi oleh struktur-

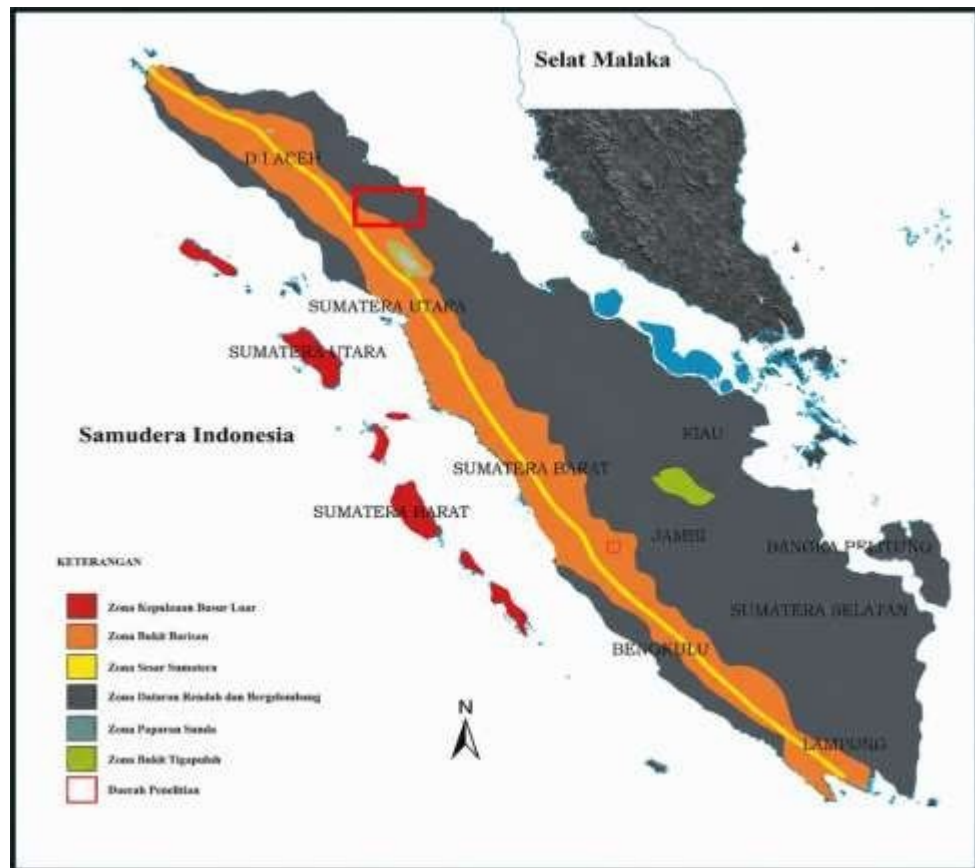
struktur sekunder yang berasosiasi dengan SFS, yang berperan sebagai jalur permeabel bagi pergerakan fluida panas dari sumber magma dangkal menuju reservoir di kedalaman lebih rendah.

Pada skala lokal, interaksi antara struktur regional SFS dengan struktur vulkanik seperti kaldera dan rekahan radial dari tubuh gunungapi menciptakan kompartemen-kompartemen reservoir yang terpisah namun saling berhubungan melalui jaringan patahan. Kompleksitas struktur ini menyebabkan variasi spasial yang signifikan pada parameter reservoir, dengan demikian, *tectonic setting* daerah ini tidak hanya menjelaskan keberadaan Gunung Sibayak sebagai gunungapi strato, tetapi juga mendasari terbentuknya sistem panas bumi yang terkait dengan konduktivitas panas tinggi dan sirkulasi hidrotermal yang intensif di bawah permukaan.

2.3 Fisiografi Regional

Pulau Sumatra menurut klasifikasi Van Bemmelen (1949) terbagi menjadi enam zona fisiografi, yaitu Pegunungan Barisan, zona Sesar Sumatra, Perbukitan Tigapuluh, wilayah perbukitan rendah dan dataran bergelombang, zona Paparan Sunda, serta zona kepulauan busur luar (Gambar 3). Zona penelitian yang terletak di kawasan Gunung Sibayak, Kabupaten Karo, Provinsi Sumatera Utara, berdasarkan fisiografi regional berada dalam wilayah Busur Vulkanik Sunda bagian barat laut Pulau Sumatra.

Menurut klasifikasi fisiografi Van Bemmelen (1949), daerah ini termasuk ke dalam Zona Pegunungan Barisan yang dicirikan oleh aktivitas tektonik dan vulkanisme Kuartar yang intens. Kawasan Gunung Sibayak didominasi oleh morfologi pegunungan vulkanik dengan litologi utama berupa lava andesit–dasit dan endapan piroklastik hasil aktivitas gunungapi Kuartar. Gunung Sibayak memiliki ketinggian sekitar 2.094 mdpl dengan puncak berupa kawah aktif yang masih menunjukkan manifestasi panas bumi seperti fumarol, solfatara, dan mata air panas.



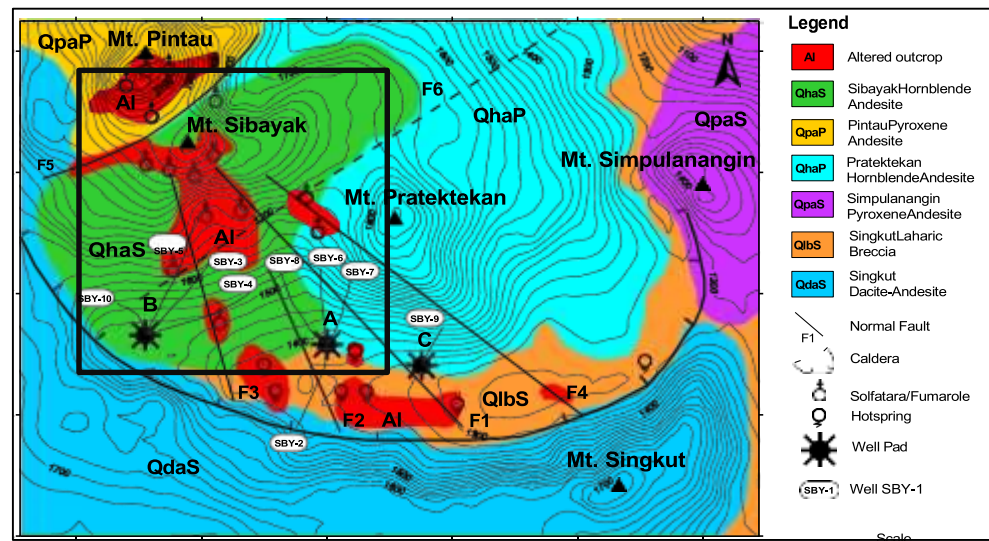
Gambar 3. Fisiografi pulau sumatra (bammelen van., 1949).

Lereng bagian utara dan timur relatif lebih landai sehingga berkembang sebagai jalur akses dan pemanfaatan lahan, sedangkan lereng selatan dan barat memiliki kemiringan lebih curam yang dikontrol oleh struktur geologi berupa sesar dan rekahan. Seperti pada gambar 3 tersebut, kondisi fisiografi dikombinasikan dengan curah hujan tinggi berkisar 2.000–3.000 mm/tahun, berpengaruh signifikan terhadap proses pelapukan, erosi, serta perkembangan sistem rekahan dalam mengontrol sistem panas bumi Gunung Sibayak.

2.4 Geologi Regional Daerah Penelitian

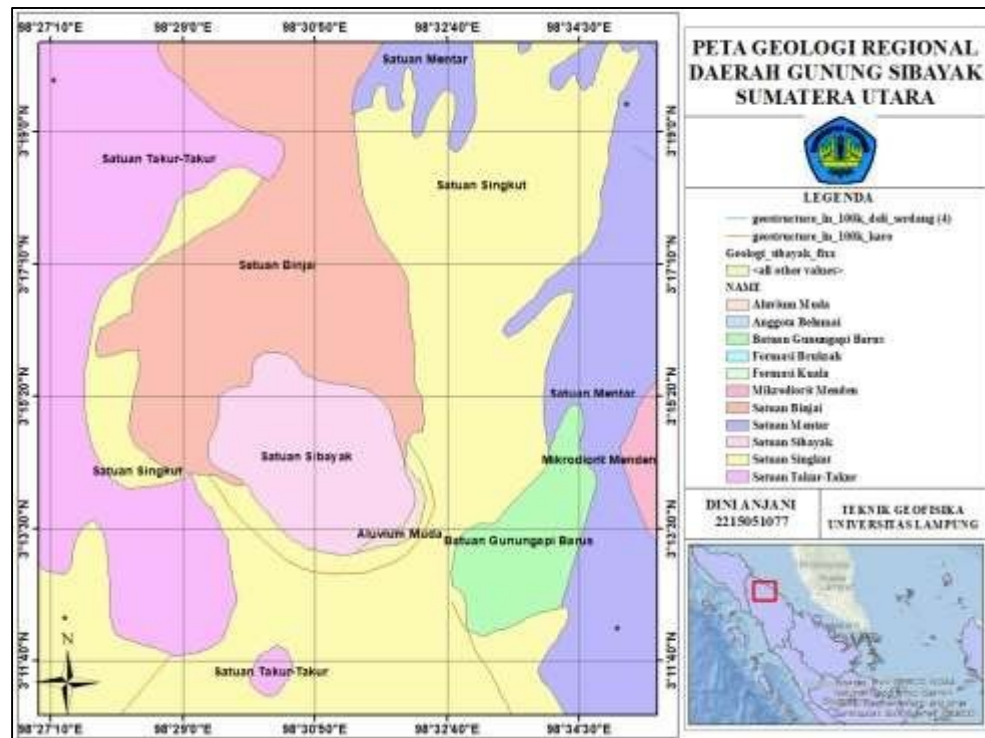
Daerah Gunung Sibayak terletak di Kabupaten Karo, Provinsi Sumatera Utara, sekitar 60 km di barat daya Kota Medan. Secara fisiografi, daerah ini termasuk dalam Zona Vulkanik Busur Sumatra bagian utara dan merupakan bagian dari Taman Nasional Gunung Leuser. Gunung Sibayak merupakan

gunungapi strato (kerucut) yang terbentuk di dalam Kaldera Singkut, sebuah kaldera tua hasil erupsi eksplosif masif pada masa Pleistosen. Morfologi daerah penelitian didominasi oleh bentang alam vulkanik kompleks yang mencakup kubah-kubah vulkanik muda (G. Sibayak, G. Pintau, G. Pratektekan) yang dikelilingi oleh tepian kaldera seperti yang terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Lembar geologi daerah penelitian (Daud dkk., 2000)

Dalam skala regional, daerah ini berada pada jalur pertemuan antara Zona Punggungan Vulkanik (*Volcanic Arc*) Busur Sumatra dengan Cekungan Sumatra Utara di sebelah timurnya. Konfigurasi ini merupakan hasil dari proses tektonik penunjaman Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Eurasia. Aktivitas vulkanik Kuartir yang intens menindih struktur-struktur perlipatan dan pensesaran berumur Tersier yang menjadi basement daerah ini.



Gambar 5. Peta geologi daerah penelitian

Pola sesar berarah barat laut - tenggara (NW-SE) yang terlihat pada gambar 5 berkembang di busur Sumatra memiliki kesamaan dengan pola struktur yang diamati pada sistem geologi lain di Sumatera Utara, seperti di Situs Bawömataluö, Pulau Nias, yang juga ditandai oleh struktur sesar naik dan sinklin berarah sama (Koestoro dan Intan, 2016). Struktur ini mengontrol sebaran manifestasi panas bumi di permukaan. Lingkungan pengendapan kuartar di daerah ini juga mempengaruhi sistem panas bumi. Studi sedimentologi dan stratigrafi Holosen di dataran pantai Medan-Belawan menunjukkan bahwa fluktuasi muka laut global sangat mempengaruhi proses pengendapan dan pembentukan lapisan penutup alami (Moechtar dkk., 2007). Endapan aluvium dan vulkanik lepas Kuartar di daerah Sibayak berperan analog sebagai batuan penutup (*cap rock*) yang menyekat reservoir panas bumi.

Selain struktur setengah kaldera yang telah disebutkan sebelumnya, struktur permukaan yang mudah diidentifikasi adalah patahan-patahan dengan arah barat laut–tenggara (NW–SE) serta patahan-patahan yang berarah barat daya–

timur laut. Patahan-patahan tersebut terletak di dalam lingkaran kaldera, batuan andesit dari Gunung Sibayak umumnya memiliki tekstur porfiritik dengan kandungan fenokris yang melimpah (bahkan kadang mencapai 70%). Komposisinya terdiri atas plagioklas, biotit, hornblende, dan kuarsa yang tertanam dalam massa dasar mikrokristalin berupa plagioklas, mineral opak, biotit, dan kuarsa. Plagioklas tersebut terkadang mengalami alterasi menjadi agregat klorit, aktinolit, dan serisit, sedangkan hornblende umumnya mengalami proses kloritisasi atau berubah menjadi oksida.

Potensi panas bumi Gunung Sibayak telah dikembangkan sebagai lapangan panas bumi komersial dengan tantangan teknis operasional yang khas, seperti lost circulation dan suhu tinggi. Studi terkini menunjukkan bahwa pengeboran panas bumi, termasuk di Sumatera, telah mengadopsi pendekatan optimasi seperti penggunaan *artificial neural network* (ANN) untuk memprediksi *rate of penetration* (ROP) guna meningkatkan efisiensi operasi (Fathaddin dkk., 2023).

2.5 Penelitian Terdahulu

Berdasarkan tinjauan pustaka, terdapat beberapa penelitian terdahulu yang menjadi acuan penting untuk metodologi dalam studi ini yaitu sebagai berikut.

Tabel 1. Penelitian terdahulu

No	Judul	Studi Kasus
1	"Karakterisasi Struktur Patahan pada Lapangan Panas Bumi X (Sumatra) Berdasarkan Pemetaan Geologi, Penginderaan Jauh, dan Data Gayaberat" (Mulyani dkk., 2022).	Hasil penelitian berhasil memetakan sebaran patahan dangkal (kedalaman <1100 m) yang didominasi oleh struktur berarah timur-barat dan patahan dalam yang sejajar dengan Sesar Besar Sumatra. Struktur patahan antitetik yang bersifat <i>leaking</i> (permeabel) diidentifikasi berkorelasi dengan manifestasi permukaan, sedangkan struktur geser utama cenderung bersifat sealing dan

No	Judul	Studi Kasus
		membentuk pull-apart basin sebagai zona akumulasi fluida panas.
2	"Pemodelan Struktur Dan Reservoir Lapangan Panas Bumi Bonjol Dari Anomali Gaya Berat" (Zaenudin dkk., 2013).	, hasil inversi 3D menunjukkan bahwa reservoir panas bumi berada pada kedalaman sekitar 1400 m dengan densitas sekitar 1,7 gr/cm ³ di bagian selatan dan timur, sedangkan sumber panas (heat source) berada di bagian barat laut pada kedalaman sekitar 7000 m dengan densitas lebih tinggi, yaitu sekitar 2,8 gr/cm ³ .
3	"Pemodelan 3D Gayaberat dan Analisis Struktur Detail untuk Pengembangan Lapangan Panasbumi Kamojang" (Banu dkk, 2014).	Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi kedua metode tersebut efektif dalam mengkarakterisasi reservoir dan struktur kontrol, serta merekomendasikan korelasi lebih lanjut dengan data manifestasi permukaan dan sumur produksi untuk optimasi pengembangan lapangan.

Ketiga penelitian terdahulu tersebut secara kolektif membangun landasan metodologis yang kuat untuk penelitian ini. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa integrasi antara analisis SVD (untuk interpretasi struktur dangkal) dan pemodelan inversi 3D (untuk visualisasi distribusi densitas dalam) merupakan pendekatan yang efektif dan komprehensif dalam mengkarakterisasi sistem panas bumi, mulai dari identifikasi struktur kontrol, delineasi reservoir, hingga estimasi sumber panas.

BAB III TEORI DASAR

3.1 Data *Global Gayaberat Modul Plus* (GGMPlus)

GGMPlus merupakan salah satu model medan gravitasi yang berasal dari data satelit dan digunakan untuk pengukuran gravitasi. Model ini dikembangkan dengan menggabungkan data dari satelit seperti GRACE dan GOCE, EGM2008, serta data gravitasi topografi dari SRTM yang memiliki resolusi tinggi. Pengembangan GGMPlus merupakan hasil kolaborasi antara Universitas Curtin di Perth, Australia Barat, dan Universitas Teknik Munich di Jerman. Data yang diperoleh dari GGMPlus berupa data grid dengan resolusi spasial tinggi (± 200 m) yang mencakup nilai percepatan gravitasi atau anomali gayaberat yang telah dikoreksi, sehingga dapat digunakan untuk analisis struktur bawah permukaan. Selain itu, tersedia juga parameter lain seperti ketinggian quasigeoid, defleksi vertikal arah Utara–Selatan dan Barat–Timur, serta anomali gravitasi yang mencerminkan perbedaan kerapatan batuan di bawah permukaan (Suprianto dkk., 2021).

Menurut Hinze dkk. (2013), pengukuran data gravitasi pada model GGMPlus dilakukan dengan menggunakan dua satelit utama, yaitu GRACE dan GOCE. Cara kerjanya adalah dengan memanfaatkan respon waktu alami dari sumber gravitasi relatif terhadap bumi. Dengan metode ini, perubahan kecil dalam gaya gravitasi yang dialami satelit dapat diukur secara akurat. Data hasil pengukuran tersebut kemudian diolah menjadi model medan gravitasi global dan diturunkan menjadi data anomali gayaberat resolusi tinggi, yang selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk memisahkan anomali regional dan residual, serta untuk analisis spektrum, serta interpretasi struktur geologi dan zona reservoir.

3.2. Metode Gayaberat

Metode gayaberat adalah salah satu metode geofisika yang memanfaatkan variasi kecil medan gayaberat bumi untuk mendeteksi perbedaan densitas batuan bawah permukaan, sehingga dapat digunakan untuk eksplorasi sumber daya alam maupun pemetaan struktur geologi (Telford dkk., 1990). Prinsip dasarnya mengacu pada hukum gayaberat Newton yang menyatakan bahwa gaya tarik antara dua benda berbanding lurus dengan massa masing-masing dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak di antara keduanya. Oleh karena itu, dengan mengukur variasi percepatan gayaberat dari satu titik ke titik lainnya, dapat diperoleh informasi mengenai distribusi densitas batuan bawah permukaan. Metode ini sangat berguna untuk mendeteksi struktur geologi seperti lipatan, sesar, batuan intrusi, dan perbedaan litologi, terutama di wilayah yang tidak memungkinkan dilakukan eksplorasi langsung melalui pengeboran. (Soemintadiredja, 1991).

Metode gayaberat merupakan teknik yang sangat berperan dalam mengidentifikasi wilayah prospek panas bumi. Teknik ini memiliki kemampuan untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan melalui perbedaan nilai densitas batuan, sehingga dapat mengenali elemen-elemen penting dalam sistem panas bumi, seperti lapisan penudung (*cap rock*), zona reservoir, hingga pusat panas (*heat source*). Selain itu, metode ini juga dapat mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan yang berfungsi sebagai jalur migrasi dan perangkap fluida, termasuk area pengisian (*recharge*) dan pelepasan (*discharge*), yang merupakan bagian esensial dari terbentuknya sistem panas bumi (Telford dkk., 1990).

3.3 Prinsip Metode Gayaberat

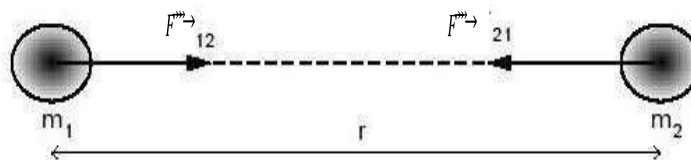
Metode gayaberat adalah salah satu teknik dalam geofisika yang berlandaskan pada pengukuran medan gravitasi bumi. Nilai percepatan gravitasi yang diamati di permukaan bumi tidak bersifat seragam karena dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti ketinggian tempat, lintang geografis, bentuk topografi, serta variasi densitas batuan bawah permukaan. Prinsip pada metode ini mempunyai kemampuan dalam membedakan rapat

massa suatu material terhadap lingkungan sekitarnya. Dengan demikian, struktur bawah permukaan dapat diidentifikasi. Dalam penerapan metode ini diperlukan setidaknya dua alat gravimeter: satu ditempatkan di base station untuk merekam variasi pasang surut gayaberat, sedangkan alat lainnya dibawa ke setiap titik pengamatan untuk mencatat perubahan nilai gravitasi. Umumnya, pelaksanaan survei gayaberat ini dilakukan dengan sistem looping (Supriyadi, 2009).

Secara teoritis, nilai gayaberat dihitung berdasarkan model bumi ellipsoid yang homogen, namun kenyataan di lapangan menunjukkan adanya penyimpangan nilai dari gayaberat normal. Penyimpangan inilah yang disebut sebagai anomali gayaberat, yang menjadi dasar interpretasi dalam studi geofisika. Anomali positif biasanya menandakan adanya batuan berdensitas tinggi seperti intrusi atau batuan beku, sedangkan anomali negatif mengindikasikan keberadaan batuan berdensitas rendah seperti cekungan sedimen atau zona alterasi (Soemintadiredja, 1991).

Hukum Gayaberat Newton menjelaskan bahwa gaya tarik antara dua objek berbanding lurus dengan hasil kali massa keduanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara pusat massanya. Dengan kata lain, semakin besar massa benda atau semakin dekat jaraknya, maka gaya gayaberat yang terjadi akan semakin kuat.

Hukum ini digunakan sebagai dasar dalam metode gayaberat, di mana gaya tarik gayaberat bumi terhadap massa batuan digunakan untuk menginterpretasikan variasi distribusi massa di bawah permukaan bumi seperti pada gambar 6.



Gambar 6. Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009).

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

Keterangan :

$\vec{F}$: Vektor gaya Newton (N)

m_1, m_2 : Massa benda 1 dan massa benda 2 (kg)

r : Jarak antara dua buah benda (m)

G : Konstanta Gayaberat Universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg s}^{-2}$)

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

Keterkaitan antara keduanya dijelaskan melalui Hukum Newton II yang menyebutkan bahwa suatu gaya merupakan hasil dari perkalian antara massa benda dengan percepatannya (a). Apabila percepatan tersebut memiliki arah vertikal, maka jenis percepatan yang berlaku adalah percepatan gayaberat (g).

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

$$G \frac{Mm}{r^2} \hat{r} = m\vec{g} \quad (3)$$

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

Keterangan :

$\vec{F}$: gaya (N)

G : konstanta universal Gayaberat ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)

M : massa bumi (kg)

m : massa benda (kg)

$\hat{r}$: jarak antar pusat massa benda terhadap massa bumi (m)

$\vec{g}$: percepatan gayaberat (m/s^2)

Besarnya percepatan gayaberat $\vec{g}$ yang diukur dalam satuan meter per detik kuadrat (m/s^2) memiliki hubungan berbanding lurus dengan massa bumi M . Massa bumi ini sendiri merupakan hasil perkalian antara massa jenis atau densitas ρ yang dinyatakan dalam kilogram per meter kubik (kg/m^3) dengan volume objek V dalam meter kubik (m^3).

$$g \rightarrow = G \frac{\rho V}{r^2} \hat{r} \quad (5)$$

Keterangan :

ρ : densitas (m^3/kg) atau (gr/cc)

V : Volume (m^3) atau (cc)

Dengan kata lain, gayaberat yang terdeteksi oleh instrumen pengukuran pada suatu lokasi bukan hanya dipengaruhi oleh jumlah massa yang ada, oleh kerapatan atau densitas material penyusunnya serta volume yang dimilikinya. Oleh karena itu, variasi nilai gaya gayaberat yang terukur dapat diinterpretasikan sebagai refleksi langsung dari perbedaan densitas dan volume massa batuan atau material di bawah permukaan, sehingga konsep ini menjadi dasar dalam metode gayaberat untuk mengidentifikasi struktur geologi tersembunyi.

3.4 Rapat Massa Batuan

Densitas yang juga dikenal sebagai rapat massa batuan (ρ), merupakan parameter fisik yang sangat penting dalam penerapan metode gayaberat. Dalam perhitungan anomali Bouguer, diperlukan nilai densitas rata-rata pada wilayah survei. Berikut merupakan variasi nilai densitas (Telford dkk., 1990) yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Nilai percepatan gravitasi yang terukur di permukaan bumi akan bervariasi akibat pengaruh sebaran densitas material yang berada di bawah permukaan bumi. Salah satu metode yang digunakan untuk menentukan rapat massa batuan dengan menentukan atau membuat grafik dari nilai koreksi Bouguer dengan nilai anomali udara bebas.

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

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
Batuan Sedimen		
<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
Batuan Beku		
<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>Porphyry</i>	2,60 – 2,89	2,74
<i>Quartz diorite</i>	2,62 – 2,92	2,79
<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
Batuan Metamorf		
<i>Quarzite</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>Phyllite</i>	2,68 – 2,80	2,74
<i>Granulite</i>	2,52 – 2,7	2,65

3.5 Koreksi-Koreksi Metode Gayaberat pada data GGMplus

Koreksi-koreksi pada pengolahan Nilai percepatan gayaberat yang terukur di permukaan bumi akan bervariasi akibat pengaruh sebaran densitas material yang berada di bawah permukaan bumi. Dalam pengolahan metode gayaberat beberapa proses koreksi yang harus dilakukan untuk menghasilkan nilai anomali gayaberat, Adapun koreksi gayaberat yang digunakan tersebut antara lain:

3.5.1 Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)

Koreksi Lintang (*Latitude Correction*) adalah Koreksi yang dilakukan karena bentuk bumi yang tidak bulat sempurna (*Oblate Spheroid*) dan terdapat perbedaan panjang jari-jari bumi di kutub dengan di katulistiwa (Hinze, dkk 2013). Secara teoritis, nilai gayaberat meningkat dari ekuator menuju kutub karena bentuk bumi yang tepat dan efek rotasi bumi. Jika tidak dilakukan koreksi lintang, data gayaberat akan mengandung kesalahan sistematis yang dapat menutupi anomali lokal yang menjadi target interpretasi geologi. Rumus standar koreksi lintang mengacu pada model referensi internasional (misalnya IGRF atau GRS80), di mana nilai gayaberat normal dihitung berdasarkan lintang titik pengamatan, lalu dikurangkan dari nilai observasi. Menurut Widiyanto dkk. (2018), koreksi lintang merupakan langkah fundamental dalam menghitung anomali Bouguer yang akurat.

$$g_a = 0,811 \sin^2 \phi \quad (6)$$

Keterangan:

$\sin^2 \phi$: pengaruh lintang

$$\Delta g = g_{obs} - g_a \quad (7)$$

Keterangan:

Δg : Anomali medan gayaberat.

g_{obs} : Gayaberat observasi GGMPLUS.

g_a : Gayaberat teoritis (normal gayaberat) pada ellipsoid.

3.5.2 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Koreksi udara bebas (*Free Air Correction*) merupakan koreksi untuk menyesuaikan pengaruh ketinggian titik observasi terhadap nilai gayaberat yang terukur. Secara fisik, semakin tinggi suatu titik dari permukaan laut, nilai gayaberat yang diukur akan semakin kecil karena jaraknya menjauh dari pusat massa bumi. Koreksi udara bebas dilakukan dengan menambahkan nilai koreksi berdasarkan ketinggian titik pengamatan terhadap datum referensi (biasanya permukaan laut rata-rata) (Rahmadani dkk. 2017).

$$FAC = 0,3086 h \quad (8)$$

Keterangan :

FAC : *Free Air Correction* (m/sec^2)

h : ketinggian (meter)

Anomali udara bebas (*free air anomaly*) dapat dituliskan dengan persamaan 9.

$$FAA = g_{obs} - g_{lintang} + FAC \quad (9)$$

Keterangan:

FAA : *Free Air Anomaly*

g_{obs} : Gayaberat Observasi

$g_{lintang}$: Gayaberat Lintang

FAC : *Free Air Correction* (m/sec^2)

3.5.3 Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*) adalah koreksi yang bertujuan untuk menghilangkan pengaruh massa topografi (batuan di atas permukaan laut) terhadap nilai gayaberat terukur. Setelah dilakukan koreksi lintang dan koreksi udara bebas, data gayaberat masih dipengaruhi oleh keberadaan massa batuan antara titik pengamatan dengan bidang referensi (datum). Koreksi Bouguer dilakukan dengan cara mengurangi pengaruh gaya tarik massa batuan tersebut, menggunakan asumsi densitas rata-rata tertentu.

Menurut Sari (2019), koreksi Bouguer membuat data gayaberat yang dihasilkan lebih merepresentasikan variasi densitas bawah permukaan, bukan akibat topografi permukaan. Koreksi ini dapat dihitung dengan pendekatan lempeng Bouguer sederhana atau Bouguer lengkap yang mempertimbangkan topografi sekitarnya. Besar koreksi bouguer (*Bouguer Correction*) dapat dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut.

$$BC = 2\pi G\rho h \quad (10)$$

$$BC = 0,04191\rho h \quad (11)$$

Keterangan:

BC : koreksi bouguer (mGal)

ρ : rapat massa batuan rata-rata(kg/m³)

h : ketinggian (m)

3.5.4 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi medan (*Terrain Correction*) merupakan koreksi akibat adanya efek massa disekitar titik observasi misalnya gunung, gedung, lembah, dan lain-lain. Meskipun koreksi Bouguer telah memperhitungkan pengaruh massa topografi dengan asumsi lempeng datar, pada kenyataannya permukaan bumi jarang benar-benar datar. Adanya variasi topografi seperti bukit, lembah, dan pegunungan menimbulkan pengaruh gayaberat tambahan yang tidak diperhitungkan dalam koreksi Bouguer sederhana. Oleh karena itu, koreksi medan dilakukan untuk memperhitungkan efek topografi sebenarnya di sekitar titik pengamatan. Koreksi medan sangat penting terutama di daerah bergunung atau berbukit karena tanpa koreksi ini nilai anomali Bouguer akan bias (Hidayat dkk. 2017).

$$TC = \frac{0,04193}{n} \rho \{ (r_2 - r_1) + \sqrt{r_2^2 + L^2} - \sqrt{r_1^2 + L^2} \} \quad (12)$$

Keterangan:

TC : Gayaberat berdasarkan koreksi medan (mGal)

n : Jumlah kompartemen tiap zona

ρ : Densitas (g/cc)

r_1 : jari-jari radius dalam (m)

r_2 : jari-jari radius luar (m)

L : Selisih ketinggian dari titik pengukuran (m)

Untuk menghitung pengaruh topografi atau koreksi medan, dapat digunakan pelat transparan yang dikenal sebagai Hammer Chart, yang ditempatkan di peta topografi. *Hammer Chart* membagi wilayah di sekitar titik pengukuran menjadi beberapa zona yang merupakan bagian dari silinder-silinder konsentris.

3.6 Anomali Bouguer

Anomali Bouguer merupakan hasil akhir dari serangkaian koreksi pada data gayabarat, yaitu setelah dilakukan koreksi apungan, lintang, udara bebas, Bouguer, dan medan (Blakely 1996). Anomali ini mencerminkan perbedaan antara nilai gayabarat terukur yang sudah terkoreksi dengan nilai gayabarat teoritis sesuai model bumi ideal. Menurut Rahmadani dkk. (2017), anomali Bouguer positif biasanya terkait dengan batuan lebih rapat atau intrusi beku, sedangkan anomali negatif umumnya menunjukkan zona dengan densitas lebih rendah seperti cekungan sedimen. Persamaan untuk mendapatkan nilai anomali bouguer sederhana (SBA) adalah dengan mengurangkan anomali udara bebas (FAA) dengan koreksi bouguer (BC).

$$SBA = FAA - BC \quad (13)$$

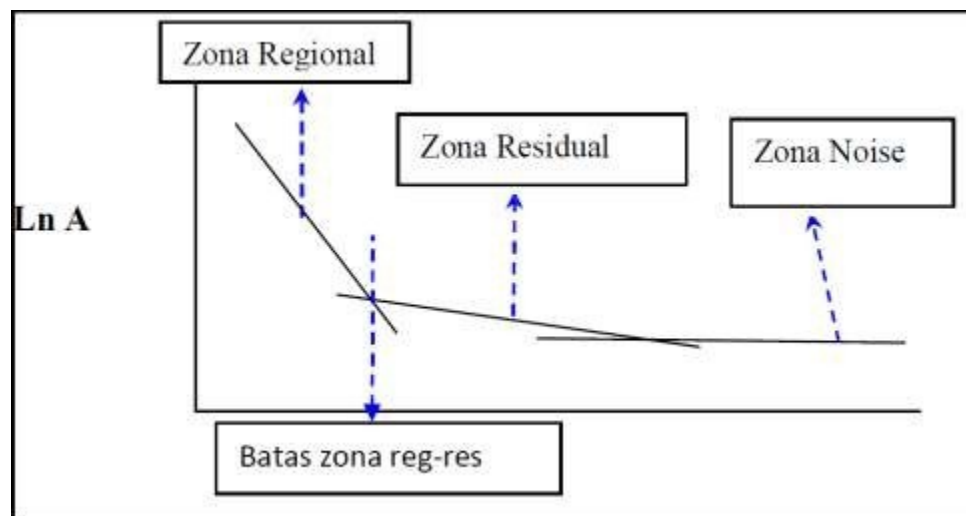
Sedangkan untuk mencari nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL) adalah dengan menjumlahkan nilai anomali bouguer sederhana (SBA) dengan koreksi terrain (TC).

$$CBA = SBA + TC \quad (14)$$

3.7 Analisis Spektrum

Analisis spektrum pada metode gayabarat merupakan salah satu pendekatan kuantitatif yang digunakan untuk menentukan karakteristik kedalaman dan distribusi sumber anomali berdasarkan kandungan frekuensinya. Pendekatan ini dilakukan dengan mentransformasikan data anomali dari

domain ruang ke domain frekuensi melalui *Fast Fourier Transform* (FFT), sehingga memungkinkan identifikasi komponen frekuensi tinggi dan rendah secara terpisah. Anomali yang dihasilkan oleh sumber dangkal umumnya memperlihatkan spektrum frekuensi tinggi, sedangkan sumber dalam menunjukkan dominasi frekuensi rendah (Blakely dkk., 1995). Menurut Nabighian dkk. (2005), analisis spektrum menjadi alat penting dalam interpretasi kuantitatif karena mampu memberikan estimasi kedalaman rata-rata sumber anomali secara matematis. Selain itu, menurut Hinze dkk. (2013), metode ini efektif untuk menentukan ketebalan kerak, kedalaman dasar sedimen, serta batas kontak geologi besar seperti sesar dan zona intrusi. Dalam konteks eksplorasi panas bumi dan mineral, Telford dkk. (1990) menegaskan bahwa pemisahan spektrum regional dan residual melalui analisis frekuensi dapat meningkatkan keakuratan interpretasi struktur bawah permukaan. Hasil transformasi Fourier divisualisasikan dalam bentuk grafik $\ln A$ (amplitudo) pada sumbu y dan K (bilangan gelombang) pada sumbu x seperti pada gambar 7.



Gambar 7. Kurva $\ln A$ terhadap k (Blakely, 1996).

Zona regional ditentukan dari regresi linier pada bagian spektrum dengan bilangan gelombang rendah, sementara zona residual diperoleh dari bilangan gelombang menengah hingga tinggi, sedangkan bagian akhir biasanya diasosiasikan dengan *noise*. Metode ini efektif memisahkan anomali dangkal dan dalam memperkirakan kedalaman bidang kontras densitas (Putra, 2018).

Spektrum diperoleh dari nilai potensial yang berada pada suatu bidang horizontal. Persamaan yang digunakan adalah transformasi Fourier, yaitu (Blakely 1996).

$$\mathcal{F}(U) = G m \mathcal{F}\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } \mathcal{F}\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi G m \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (15)$$

Keterangan :

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

U : potensial gayaberat

m : massa

G : konstanta gayaberat universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg s}^{-2}$)

r : jarak

Pergerakan vertikal gayaberat yang ditimbulkan oleh suatu massa titik merupakan hasil turunan dari potensial gayaberatnya:

$$g_z = G m \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \quad (16)$$

$$\mathcal{F}[g_z] = G m \mathcal{F}\left[\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right] \quad (17)$$

$$\mathcal{F}[g_z] = G m \frac{\partial}{\partial z} \mathcal{F}\left[\frac{1}{r}\right] \quad (18)$$

Transformasi Fourier pada lintasan yang diinginkan adalah

$$\mathcal{F}(g_z) = 2\pi G m e^{|k|(z_0-z_1)}, z_1 > z_0 \quad (19)$$

Apabila sebaran densitas bersifat acak dan tidak memperlihatkan keterkaitan antar nilai gayaberat, maka parameter m bernilai 1, sehingga hasil transformasi Fourier dari anomali gayaberat dinyatakan menjadi:

$$A = C e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (20)$$

Keterangan :

A : amplitudo

C : konstanta

Untuk memperoleh hubungan antara amplitudo (A) dengan bilangan

gelombang (k) dan kedalaman ($z_0 - z_1$) dilakukan dengan melogaritmakan persamaan $A = C e^{|k|(z_0 - z_1)}$, sehingga bilangan gelombang k berbanding lurus dengan spectral amplitude.

$$\ln A = \ln C e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (21)$$

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (22)$$

Persamaan di atas dapat dianalogikan dalam persamaan garis lurus:

$$y = mx + c \quad (23)$$

Dimana $\ln A$ sebagai sumbu y , $|k|$ sebagai sumbu x , dan $(z_0 - z_1)$ sebagai kemiringan garis (*gradien*). Oleh karena itu, kemiringan garis tersebut mencerminkan kedalaman sumber, baik yang bersifat dalam maupun dangkal $|k|$ sebagai sumbu x didefinisikan dengan bilangan gelombang yang besarnya dan satuannya *cycle/meter*, dengan λ adalah panjang gelombang. Hubungan λ dengan Δx diperoleh dari persamaan:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{N\Delta x} \quad (24)$$

Nilai λ sama dengan Δx , ada faktor lain pada Δx yang disebut konstanta pengali, sehingga $\lambda = N \cdot \Delta x$, konstanta N didefinisikan sebagai lebar jendela, jadi lebar jendela dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (25)$$

Dimana Δx adalah domain spasi yang akan digunakan dalam *Fast Fourier Transform* (FFT), dan k_c adalah bilangan gelombang *cutoff*. Semakin besar nilai bilangan gelombang (k), dengan hubungan yang dinyatakan sebagai berikut $k = 2\pi f$ sehingga frekuensi yang sangat rendah umumnya berkaitan dengan sumber anomali regional, sedangkan frekuensi tinggi mencerminkan sumber anomali residual. Dari persamaan (26) diperoleh hubungan antara frekuensi dan bilangan gelombang, yaitu:

$$f = \frac{1}{k_c \Delta x} \quad (26)$$

Komponen frekuensi rendah biasanya merepresentasikan struktur geologi dalam seperti batuan dasar atau pola tektonik regional, sedangkan komponen frekuensi tinggi mengindikasikan keberadaan struktur dangkal seperti sesar lokal, intrusi batuan, atau zona mineralisasi.

3.8 Filter *Bandpass*

Filter *bandpass* merupakan salah satu teknik penyaringan dalam domain frekuensi yang berfungsi untuk melewatkan rentang frekuensi tertentu, sekaligus meredam frekuensi yang lebih rendah (*low frequency*) dan lebih tinggi (*high frequency*). Dalam pengolahan data anomali Bouguer menggunakan perangkat lunak Oasis Montaj, filter ini diaplikasikan dengan menentukan batas frekuensi minimum dan maksimum berdasarkan hasil analisis spektrum, sehingga hanya anomali dengan panjang gelombang tertentu yang dipertahankan. Proses ini memungkinkan isolasi sinyal yang berkaitan dengan kedalaman atau sumber geologi spesifik. Hasil dari penyaringan *bandpass* ini berupa anomali terfilter yang telah bebas dari pengaruh regional yang terlalu dalam maupun noise dangkal yang tidak relevan.

Penggunaan filter *bandpass* dalam pemisahan anomali bertujuan untuk meningkatkan resolusi interpretasi terhadap target geologi tertentu dengan mengontrol kontribusi panjang gelombang data. Berbeda dengan filter *moving average* yang menghasilkan komponen regional secara langsung, filter *bandpass* lebih selektif karena hanya mempertahankan rentang frekuensi yang diinginkan. Dengan demikian, anomali yang dihasilkan mencerminkan respon dari sumber dengan kedalaman tertentu sesuai dengan rentang frekuensi yang dipilih. Secara matematis, filter *bandpass* dapat direpresentasikan sebagai kombinasi antara *low pass* dan *high pass* filter, sehingga respon frekuensi yang dihasilkan hanya berada pada interval tertentu yang telah ditentukan berdasarkan karakteristik spektrum data.

3.9 *First Horizontal Derivative (FHD)*

First Horizontal Derivative Pada data anomali gayaberat, yang dimaksud adalah perubahan nilai anomali dari satu titik ke titik lain dalam jarak tertentu. Turunan horizontal dari anomali gayaberat yang dihasilkan oleh suatu tubuh geologi cenderung menegaskan bagian tepi dari tubuh tersebut. Oleh karena itu, metode *Horizontal Derivative* dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi posisi batas kontak densitas secara horizontal berdasarkan data gayaberat. (Cordell dan Grauch, 1982).

Metode ini dapat dimanfaatkan untuk merepresentasikan struktur bawah permukaan, baik yang bersifat dangkal maupun yang lebih dalam. Satuan FHD adalah mGal m⁻¹. Besarnya amplitudo *Horizontal Derivative* dinyatakan sebagai berikut (persamaan 28) (Cordell dan Grauch, 1982).

$$FHD = \frac{\Delta g}{\Delta x} = \frac{g(i+1) - g(i)}{\Delta x} \quad (27)$$

Δg : Perubahan nilai anomali gayaberat antara dua titik

Δx : Jarak horizontal antara dua titik pengukuran

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

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

3.10 *Second vertical derivative (SVD)*

Second vertical derivative adalah metode derivatif yang menekankan perubahan vertikal dalam data geofisika. Teknik ini digunakan untuk memperjelas anomali residual dengan mengurangi pengaruh dari anomali regional yang berskala besar. SVD sangat berguna untuk meningkatkan resolusi detail dari fitur-fitur geologi dangkal (Blakely, 1996).

Perhitungan *gradien* dimaksudkan digunakan untuk menonjolkan fitur-fitur halus pada data gayaberat yang tidak tampak secara visual pada data asli. Nilai gradien yang tinggi umumnya berkaitan dengan kontras sifat fisik bawah permukaan yang besar, dan sebaliknya *Gradien* dan juga besarnya

biasanya digunakan untuk menggambarkan batas-batas sumber anomali. SVD dari komponen gayaberat vertikal, g_z , dapat dihitung dalam *domain spasial* dari *gradien horizontal* dengan menggunakan Persamaan Laplace dalam Persamaan (29) (LaFehr dan nabighian, 2012).

$$SVD = \frac{\partial^2 g_z}{\partial z^2} = \left(\frac{\partial^2 g_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g_z}{\partial y^2} \right) \quad (28)$$

Keterangan:

$\frac{\partial^2 g_z}{\partial z^2}$: adalah turunan kedua dari anomali total terhadap arah vertikal z.

Untuk anomali memanjang di sepanjang sumbu y, SVD dapat diperkirakan dengan turunan *horizontal* kedua dari data gayaberat di sepanjang sumbu x dalam Persamaan (30) (LaFehr dan nabighian, 2012).

$$\frac{\partial^2 g_z}{\partial z^2} \approx - \frac{\partial^2 g_z}{\partial x^2} \quad (29)$$

Dalam domain bilangan gelombang, atau domain Fourier, SVD umumnya dihitung menggunakan persamaan berikut (31)

$$\frac{\partial^2 g_z}{\partial z^2} = F^{-1}(|K|2G_z) \text{ dengan } |k|^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (30)$$

Keterangan:

G_z : Transformasi *Fourier* dari g_z ,

k_x dan k_y : Nomor gelombang pada x-dan y-sumbu masing-masing.

F^{-1} : Operator transformasi *Fourier* terbalik. (LaFehr dan nabighian, 2012)

Persamaan SVD data 1-D di atas Hal ini menunjukkan bahwa anomali *Second vertical derivative* dapat diperoleh melalui turunan horizontal, yang dalam praktiknya lebih sederhana untuk dilakukan.

Hasil pemodelan memperlihatkan bahwa pada patahan vertikal, zona patahan dicirikan oleh nilai SVD = 0. Sementara itu, karakteristik patahan naik dapat dikenali dari pola nilai SVD-nya, di mana pada patahan vertikal nilai $|SVD_1| \cong |SVD_2|$ (Sarkowi, 2010). Untuk menghitung nilai SVD, terdapat beberapa operator filter yang dapat digunakan, yang rinciannya dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5 berikut ini.

Tabel 3. Operator Henderson dan Zietz (1949).

Operator Filter SVD menurut Henderson dan Zietz (1949)				
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

Tabel 4. Operator Elkins (1951)

Operator Filter SVD menurut Operator Elkins (1951)				
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000
-0,0833	-0,0667	-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

Tabel 5. Operator Rosenbach (1953)

Operator Filter SVD menurut Operator Rosenbach (1953)				
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

Nilai nol dari turunan kedua pada anomali Bouguer biasanya diartikan sebagai batas atau kontak antara dua lapisan batuan dengan kontras densitas yang berbeda. Kontak ini bisa menunjukkan keberadaan struktur geologi seperti sesar atau intrusi (Sarkowi, 2010). Menurut Sarkowi (2010), dalam penggunaan metode *Second vertical derivative* (SVD), penentuan jenis patahan seperti patahan normal, patahan naik, atau patahan turun dapat dilakukan dengan mengamati nilai maksimum (SVDmax) dan minimum (SVDmin) dari SVD, yang membantu dalam mengidentifikasi karakteristik patahan tersebut.

3.11 *Invers Modelling*

Pemodelan inversi merupakan salah satu metode interpretasi dalam geofisika yang digunakan untuk mendapatkan model bawah permukaan berdasarkan data pengamatan. Dalam metode ini, satu atau lebih parameter dari model

geofisika dihitung secara langsung dari data yang diperoleh di lapangan, sehingga model yang dihasilkan mampu menghasilkan respon teoritis yang mendekati atau sesuai dengan data aktual. Karena proses ini melibatkan pencarian parameter yang membuat model cocok dengan data observasi, pemodelan inversi sering juga dikenal sebagai proses pencocokan data atau data *fitting* (Grandis, 2009).

Tingkat kesesuaian antara hasil model dan data observasi umumnya dinyatakan dalam bentuk suatu fungsi objektif, yang harus diminimalkan selama proses inversi. Fungsi objektif ini mencerminkan perbedaan antara data hasil perhitungan model dan data observasi, dan semakin kecil nilai fungsi tersebut, maka semakin baik kecocokan antara model dengan data. proses inversi berfokus pada pencarian nilai minimum dari fungsi objektif tersebut, yang secara langsung berkaitan dengan pencarian parameter model yang optimal.

Karakteristik dari minimum fungsi objektif inilah yang digunakan sebagai dasar untuk menyesuaikan parameter-parameter dalam model. Secara umum, model awal akan dimodifikasi atau diperbarui secara bertahap sampai respons teoritis yang dihasilkan model tersebut benar-benar sesuai dengan data pengamatan. Proses iteratif ini memungkinkan pemodelan inversi menghasilkan solusi yang paling mendekati kondisi bawah permukaan sebenarnya (Sarkowi, 2014).

3.12 Sistem Panasbumi

Energi Panasbumi adalah bentuk energi yang tersimpan dalam bumi, terutama dalam bentuk air panas maupun uap, yang berada pada kondisi geologi tertentu di kedalaman beberapa kilometer di bawah permukaan kerak bumi. Energi ini terbentuk akibat proses geotermal alami yang berlangsung selama jutaan tahun. Wilayah yang mengandung energi Panasbumi dikenal sebagai daerah Panasbumi (*geothermal area*) atau medan Panasbumi (*geothermal field*), yang didukung oleh kondisi batuan dan hidrologi tertentu (Santoso, 2004). Sebuah sistem Panasbumi umumnya terdiri dari lima komponen utama

yang saling berkaitan dan berperan penting dalam keberadaan serta pemanfaatan energi geotermal, yaitu:

a. Sumber Panas (*Heat source*)

Sumber panas dalam sistem geotermal bisa berasal dari berbagai fenomena geologi seperti intrusi batuan beku, keberadaan dapur magma atau tingginya gradien temperatur di suatu lokasi. Energi panas dari sumber ini ditransfer ke batuan dan fluida sekitarnya melalui tiga mekanisme utama, yaitu konduksi (melalui media padat), konveksi (melalui pergerakan fluida), dan radiasi (pemancaran energi panas dalam bentuk gelombang elektromagnetik) (Gupta dan Roy, 2007).

b. Reservoir

Reservoir Panasbumi merupakan suatu formasi batuan di bawah permukaan yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan dan jalur aliran fluida panas, baik dalam bentuk air panas maupun uap. Batuan yang membentuk reservoir harus memiliki dua sifat penting: porositas dan permeabilitas. Porositas memungkinkan batuan untuk menyimpan fluida panas, sedangkan permeabilitas memungkinkan fluida tersebut dapat mengalir melalui pori-pori batuan untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi.

c. Batuan Penudung (*Caprock*)

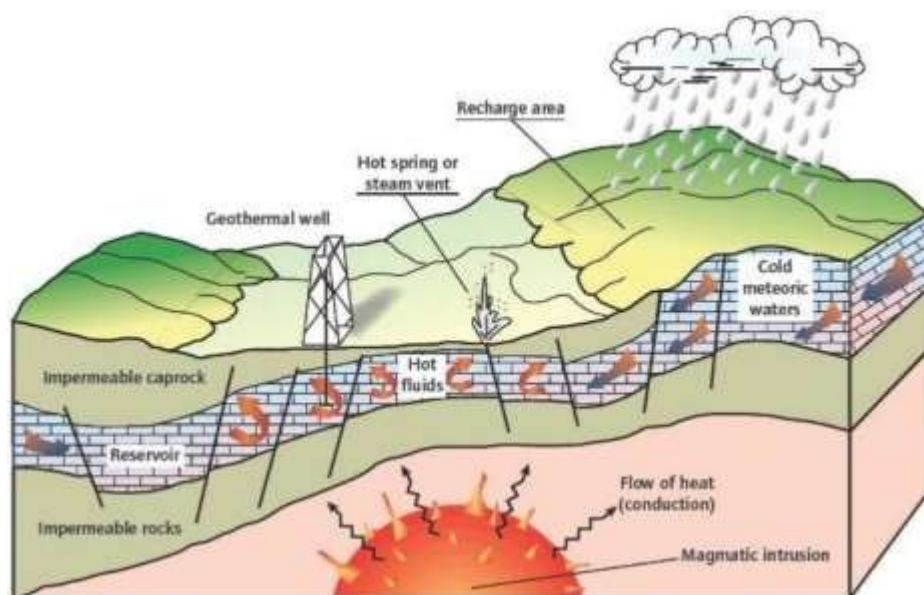
Lapisan penutup atau *caprock* berfungsi untuk menahan fluida panas agar tidak bocor atau keluar dari reservoir. Meskipun lapisan ini tidak sepenuhnya mencegah hilangnya panas (*heat loss*), namun kehilangan panas akibat radiasi atau konduksi melalui batuan penudung jauh lebih kecil dibandingkan kehilangan panas melalui konveksi. Batuan penudung biasanya memiliki karakteristik berupa permeabilitas yang sangat rendah, ketebalan yang cukup, dan terletak tepat di atas reservoir. batuan penudung ini sering terjadi proses alterasi karena interaksi antara fluida panas dengan batuan yang menghasilkan manifestasi geotermal di permukaan berupa mata air panas, uap, atau endapan mineral hasil reaksi hidrotermal (Gupta dan Roy, 2007).

d. Struktur Geologi

Struktur geologi mencakup semua bentuk deformasi batuan akibat aktivitas tektonik, seperti patahan dan sesar. Struktur-struktur ini sangat penting karena berperan sebagai jalur utama pergerakan fluida panas dari kedalaman menuju permukaan. Jalur-jalur patahan ini sering kali menjadi tempat munculnya manifestasi permukaan seperti fumarol, mata air panas, dan endapan sulfur. Oleh karena itu, keberadaan dan arah struktur geologi sangat menentukan dalam perencanaan eksplorasi dan pengembangan sistem Panasbumi.

e. Daerah Resapan (*Recharge Area*)

daerah resapan adalah wilayah di mana air dari permukaan tanah meresap ke bawah secara intensif dan menjadi sumber utama pengisian ulang fluida dalam sistem Panasbumi. Air yang meresap ini kemudian masuk ke sistem reservoir dan mengalami pemanasan dari sumber panas yang ada di kedalaman. Daerah ini sering kali berada pada wilayah yang lebih tinggi secara topografis dan berperan sebagai "kawah" alami dari sistem Panasbumi karena darinya air masuk dan mengalir ke dalam sistem panas bumi.



Gambar 8. Sistem panas bumi (Dickson dan Fanelli, 2004).

Keberadaan suatu sistem Panasbumi di suatu wilayah umumnya dapat dikenali melalui kemunculan berbagai manifestasi di permukaan. Manifestasi permukaan ini merupakan indikasi langsung dari aktivitas geotermal di bawah tanah dan menjadi petunjuk awal dalam kegiatan eksplorasi Panasbumi. Gejala-gejala permukaan ini menunjukkan bahwa terdapat sistem Panasbumi aktif yang sedang bekerja di kedalaman. Beberapa jenis manifestasi permukaan yang umum ditemukan antara lain:

1. Fumarol dan Solfatara

Fumarol merupakan celah atau lubang di permukaan tanah yang mengeluarkan uap dan gas yang bersuhu tinggi, yang umumnya berasal dari aktivitas gunungapi. Fumarol biasanya dijumpai di sekitar kawah gunungapi atau muncul melalui rekahan-rekahan batuan akibat tekanan internal. Tidak jarang endapan kristal belerang terbentuk di sekitar celah keluarnya gas karena pendinginan dan pengendapan. Kehadiran gas-gas belerang ini sering kali menjadi ciri khas dari aktivitas hidrotermal yang cukup kuat.

2. Mata Air Panas

Mata air panas terbentuk ketika air tanah yang meresap ke dalam lapisan batuan terdalam bersentuhan dengan panas yang berasal dari dapur magma. Batuan panas tersebut dapat menyimpan energi termal selama ribuan tahun. Setelah mengalami pemanasan, air akan bergerak naik ke permukaan melalui rekahan atau retakan batuan akibat pengaruh tekanan dan perbedaan densitas. Apabila volume air panas cukup besar, maka mata air panas ini dapat membentuk kolam atau genangan air panas di permukaan. Fenomena ini merupakan salah satu manifestasi geotermal yang paling umum dijumpai di berbagai daerah Panasbumi.

3. Lumpur Panas

Lumpur panas terbentuk sebagai hasil dari kondensasi uap panas yang bercampur dengan material halus di permukaan atau di dekat permukaan tanah. Gelembung-gelembung yang terlihat pada lumpur panas biasanya disebabkan oleh pelepasan gas CO₂ dari dalam sistem hidrotermal.

Lumpur panas ini dapat muncul secara alami di permukaan dan sering dijumpai di sekitar zona rekahan aktif atau sesar.

4. Uap Tanah

Manifestasi berupa uap tanah terjadi ketika lapisan tanah di bawah permukaan mengandung air panas yang suhunya hampir mencapai titik didih. Kondisi ini memungkinkan sebagian air mengalami penguapan sebelum mencapai permukaan, menghasilkan uap yang keluar melalui pori-pori atau rekahan tanah. Uap tanah biasanya terlihat sebagai kabut putih yang muncul dari permukaan dan menjadi indikasi bahwa terdapat fluida panas tidak jauh dari kedalaman dangkal.

5. *Geyser*

Geyser adalah fenomena langka namun mencolok, berupa semburan periodik air panas dan uap yang keluar secara vertikal dari permukaan tanah. Fenomena ini terbentuk akibat adanya rongga atau saluran di bawah tanah yang terisi air dari resapan permukaan. Ketika tekanan dan suhu meningkat karena adanya pemanasan dari bawah, air tersebut berubah menjadi uap dan mendorong air di atasnya keluar sebagai semburan. Semakin besar volume air yang terjebak dalam rongga, maka semakin tinggi tekanan yang terbentuk, dan semakin kuat serta tinggi pula semburan *geyser* yang terjadi.

6. Kawah

Kawah merupakan bentuk depresi atau cekungan terbuka di puncak gunungapi yang terbentuk akibat letusan atau aktivitas vulkanik lainnya. Kawah ini menjadi tempat keluarnya berbagai material vulkanik seperti lava, dan gas-gas panas. Aktivitas hidrotermal di sekitar kawah umumnya sangat intensif dan sering dikaitkan dengan proses pembentukan alterasi batuan.

7. Batuan Alterasi

Batuan alterasi terbentuk sebagai hasil dari interaksi antara batuan asal dengan fluida Panasbumi yang bersirkulasi dalam sistem hidrotermal.

Alterasi ini menyebabkan perubahan komposisi mineral dalam batuan akibat pengaruh berbagai faktor seperti suhu tinggi, tekanan, jenis fluida, tingkat keasaman (pH), jenis batuan, dan lamanya proses interaksi berlangsung. Batuan hasil alterasi sering menunjukkan perubahan warna, tekstur, dan kekuatan fisik, dan keberadaannya di permukaan sering digunakan sebagai indikator keberadaan sistem geotermal aktif di bawahnya (Suharno, 2013).

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

Waktu : November 2025 – April 2026

Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika (PPDG), Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

Alamat : Laboratorium Terpadu Jurusan Teknik Geofisika Lt. 3 - Jl. Brojonegoro, Gedung Teknik Geofisika, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142.

Tabel 6. Jadwal kegiatan penelitian

[illegible]

4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

Tabel 7. Alat dan bahan

No.	Alat dan Bahan	Fungsi
1.	Data GGMplus	Data yang digunakan dalam pengolahan
2.	<i>Softfile</i> Peta Lembar Geologi	Referensi Geologi Daerah Penelitian dan Korelasi terhadap SVD
3.	Laptop	Hardware Pengolahan Data
4.	<i>Software</i> ArcGIS 10.8	Software untuk membuat Peta Lokasi
5.	<i>Software</i> Surfer 13	Software untuk melakukan pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual
6.	<i>Software</i> Oasis Montaj	Software untuk mendapatkan nilai Koreksi Medan, Peta Kontur Anomali, dan SVD
7.	<i>Software</i> Grav3D	untuk melakukan <i>Inverse Modelling</i>
8.	<i>Software</i> Excel	untuk melakukan pengolahan data mentah

4.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang digunakan untuk melaksanakan tugas akhir pengolahan ini dibagi dalam beberapa bagian antara lain sebagai berikut:

4.3.1 Studi Literatur

Tahap awal pelaksanaan penelitian dengan mencari studi literatur. Kegiatan ini bertujuan dalam hal mempelajari dasar-dasar ilmu yang menjadi landasan penelitian. Studi literatur juga berfungsi sebagai sarana pengumpulan informasi terkait referensi, acuan termasuk tinjauan pustaka dan teori-teori dasar yang akan membantu kelancaran proses penelitian.

4.3.2 Data Gayaberat Observasi

Dalam penelitian ini, data Gayaberat yang digunakan berasal dari data sekunder yang diperoleh melalui citra satelit. Data tersebut mencakup nilai Gayaberat observasi (g_{obs}) serta koordinat lintang dan bujur yang dihasilkan dari kombinasi beberapa satelit gravitasi seperti GOCE,

EGM2008, dan GRACE. Selain itu, data ini juga melibatkan koreksi efek gravitasi gelombang pendek dengan resolusi kurang lebih 5000 meter yang mencakup seluruh wilayah penelitian, dan diunduh dari situs GGMPlus 2013 Global Model.

4.3.3 Anomali Bouguer Lengkap (ABL)

Anomali Bouguer lengkap merupakan hasil koreksi dari data gayaberat yang menggambarkan variasi distribusi densitas atau rapat massa di bawah permukaan suatu wilayah. Nilai ini sangat penting karena memberikan informasi geofisika yang dapat digunakan untuk interpretasi kondisi geologi bawah permukaan. Dalam penelitian ini, data gayaberat yang digunakan bersumber dari data sekunder yang diperoleh melalui citra satelit GGMPlus 2013 seperti pada gambar 9.

Index of /models/GGMplus

Name	Last modified	Size	Description
 Parent Directory		-	
 data/	2015-04-01 11:53	-	
 gallery/	2013-05-31 10:47	-	
 pdf_journal_papers/	2015-03-26 14:05	-	
 software/	2015-03-26 14:01	-	
 video/	2013-05-31 10:58	-	
 GGMplus_readme.dat	2013-09-13 17:39	6.6K	
 GGMplus_tilelist_public.dat	2013-05-24 15:45	72K	
 hirt2013_ultrahighres_gravity.pdf	2013-09-13 17:30	676K	

Gambar 9. Data data pada GGMplus

Dalam GGMPlus tersedia beragam jenis data, tetapi pada penelitian ini hanya dimanfaatkan data Gayaberat Accelerations dan data topografi, yang kemudian diambil (ekstraksi) sesuai dengan batas wilayah studi. Dataset pada GGMPlus mencakup skala global dan telah dibagi ke dalam beberapa segmen area, sehingga penentuan batas koordinat lintang dan bujur daerah penelitian menjadi hal yang sangat penting sebelum proses pengambilan data dilakukan.

Pada penelitian kali ini *file* GA yang digunakan adalah file N00E095 dikarenakan luasan wilayah penelitian berada pada koordinat pada

Google Earth titik 1 : 3.268693°, 98.489746° titik 2 : 3.240585°, 98.544099° titik 3 : 3.227194°, 98.468071° titik 4 : 3.206163°, 98.510198°, Sehingga termasuk dalam rentang data N00E095. Tahap selanjutnya adalah proses ekstraksi data menggunakan MATLAB, yaitu mengambil data Gayaberat *Acceleration* dan topografi sesuai dengan batas wilayah penelitian. Proses ekstraksi ini dilakukan dengan memanfaatkan script yang tersedia pada situs GGMPlus. Berikutnya, ekstraksi dilakukan dengan memasukkan koordinat batas daerah penelitian serta beberapa fungsi perhitungan ke dalam script, sehingga diperoleh peta interpolasi Gayaberat *Acceleration* dan *Terrain Height*, serta file .txt yang berisi nilai percepatan gravitasi dan elevasi wilayah studi. Setelah proses ekstraksi selesai, data tersebut kemudian diinput ke Microsoft Excel untuk dilakukan pengolahan lanjutan, yaitu perhitungan berbagai koreksi gayaberat hingga menghasilkan anomali Bouguer.

Data gayaberat yang digunakan dalam pengolahan merupakan data sekunder hasil observasi pengukuran lapangan dalam bentuk data ABL, sehingga pada tahap pengolahannya tidak diperlukan lagi koreksi untuk memperoleh nilai ABL. Selanjutnya, data tersebut dilakukan proses *gridding* untuk menghasilkan peta kontur Anomali Bouguer Lengkap dengan menggunakan perangkat lunak Surfer 13..

4.3.4 Analisis Spektrum

Dalam tahapan analisis spektrum pada penelitian ini, langkah awal yang dilakukan adalah pemilihan beberapa lintasan berdasarkan distribusi nilai anomali Bouguer lengkap, terutama pada area yang menunjukkan sebaran nilai anomali tinggi dan rendah. Pemilihan lintasan ini bertujuan untuk merepresentasikan secara menyeluruh variasi gayaberat di daerah penelitian. Metode analisis spektrum yang digunakan mengaplikasikan *Transformasi Fourier*, yaitu suatu teknik matematis yang berfungsi untuk mengubah data dari domain spasial atau jarak menjadi domain frekuensi.

Melalui proses *Transformasi Fourier*, akan diperoleh informasi berupa komponen riil dan imajiner, serta nilai frekuensi untuk masing-masing lintasan yang telah dipilih. Setelah itu, dilakukan perhitungan amplitudo, logaritma natural dari amplitudo ($\ln A$), serta bilangan gelombang (k). Seluruh nilai yang diperoleh ini kemudian dianalisis lebih lanjut dengan melakukan *plotting* grafik antara $\ln A$ terhadap bilangan gelombang (k), sehingga dapat diperoleh kurva perubahan yang merepresentasikan karakteristik frekuensi anomali gayaberat pada wilayah tersebut.

4.3.5 Pemisahan Anomali Regional Dan Residual

Anomali Bouguer dalam metode gayaberat muncul sebagai akibat dari perbedaan densitas batuan yang terdapat di bawah permukaan bumi. Variasi densitas ini bisa berasal dari massa batuan yang berada relatif dekat dengan permukaan, maupun dari struktur geologi yang berada pada kedalaman yang lebih besar. Komponen anomali yang dihasilkan oleh massa batuan dangkal dikenal sebagai anomali residual, sedangkan komponen yang berasal dari batuan yang lebih dalam disebut sebagai anomali regional.

Dalam penelitian ini, proses pemisahan karakter anomali dilakukan dengan menggunakan pendekatan filter bandpass. Filter bandpass merupakan metode penyaringan dalam domain frekuensi yang bekerja dengan melewatkan rentang frekuensi tertentu serta meredam frekuensi rendah dan frekuensi tinggi di luar batas yang telah ditentukan. Data anomali gayaberat diproses dengan menentukan batas frekuensi bawah dan atas berdasarkan hasil analisis spektrum, sehingga hanya komponen anomali dengan panjang gelombang tertentu yang dipertahankan. Rentang frekuensi yang dipilih tersebut merepresentasikan target kedalaman tertentu dalam sistem bawah permukaan.

4.3.6 Analisis *Derivative*

Setelah diperoleh hasil pemisahan anomali regional dan anomali residual menggunakan metode filter *bandpass*, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis turunan (*Derivative*) terhadap data anomali gayabarat. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mendeteksi keberadaan struktur geologi di bawah permukaan yang mungkin tidak terlihat secara langsung dari data anomali Bouguer. Pada penelitian ini, pendekatan *Derivative* yang digunakan mencakup dua metode utama, yaitu *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second vertical derivative* (SVD).

Analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dimanfaatkan untuk mendeteksi perubahan horizontal yang tajam pada data gayabarat, yang sering kali berkaitan dengan keberadaan batas-batas densitas lateral, seperti sesar atau kontak batuan. Keberadaan sesar atau struktur lainnya diinterpretasikan dari kemunculan puncak nilai maksimum atau minimum pada hasil FHD, yang mengindikasikan perubahan densitas secara tiba-tiba di bawah permukaan. metode *Second vertical derivative* (SVD) digunakan untuk menonjolkan efek gayabarat dari sumber yang relatif dangkal dengan mengurangi pengaruh regional yang berasal dari kedalaman lebih besar. Pada penelitian ini, analisis SVD dilakukan dengan menerapkan operator Elkins, yang dikenal efektif untuk mempertegas batas anomali dan memetakan struktur-struktur bawah permukaan secara lebih rinci, khususnya dalam konteks interpretasi geologi struktural.

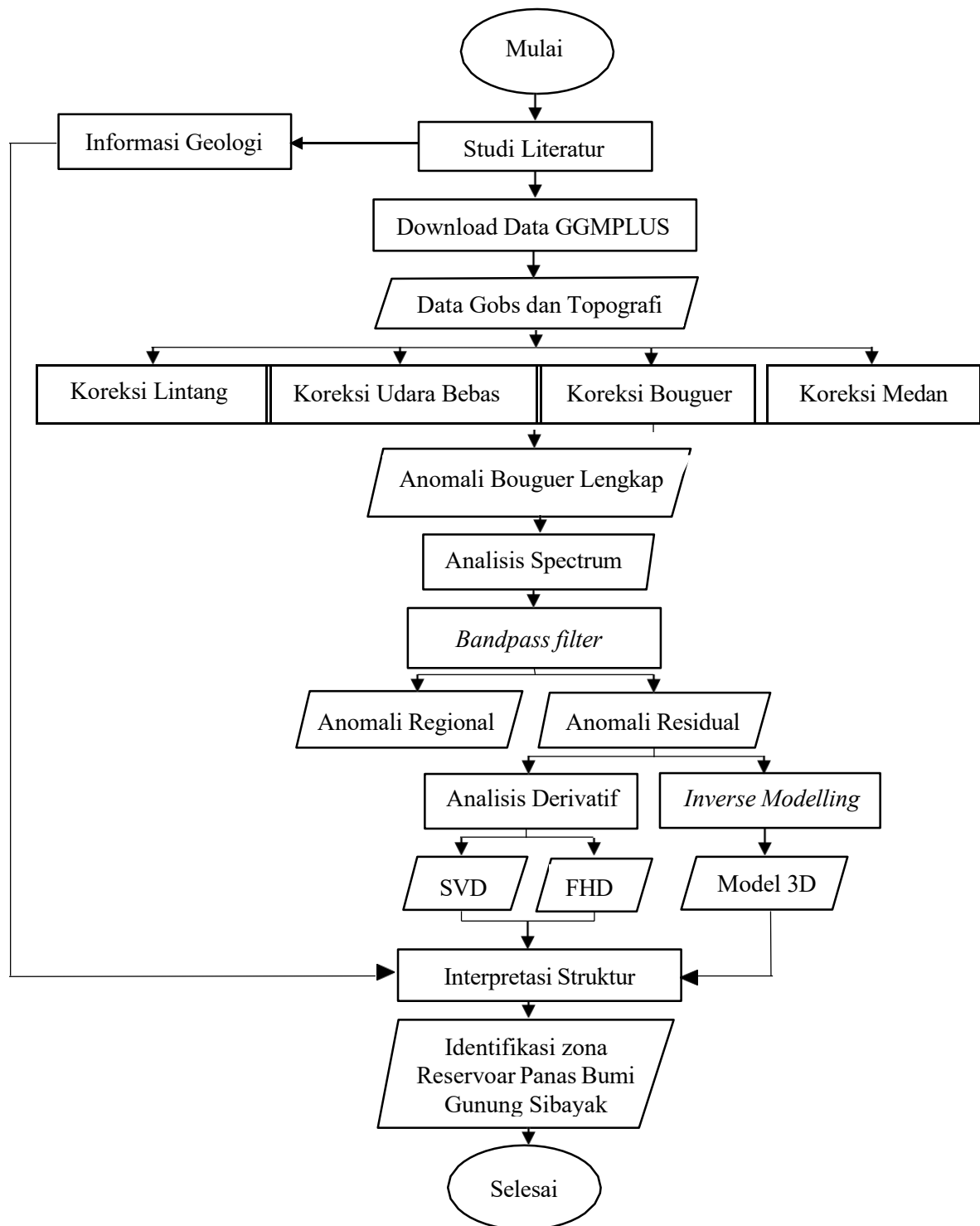
Hasil dari kedua jenis analisis turunan tersebut baik FHD maupun SVD kemudian digunakan sebagai data pendukung utama dalam proses interpretasi geofisika. Informasi ini sangat membantu dalam menyusun peta sebaran struktur geologi bawah permukaan di daerah penelitian, seperti mendeteksi lokasi dan orientasi sesar, zona patahan, atau batas-batas formasi batuan, yang semuanya berperan penting dalam memahami karakteristik geologi wilayah tersebut.

4.3.7 Pemodelan Bawah Permukaan

Pemodelan geologi bawah permukaan dalam penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan dua pendekatan, yaitu SVD dan *inverse modelling* (3D). Pada tahap *inverse modelling* 3D, pemodelan dilakukan secara lebih komprehensif dengan menginput data mesh (jaring 3D) dan data anomali gayabarat yang telah melalui proses filtering dan koreksi sebelumnya. Tahapan ini dilakukan untuk membangun representasi tiga dimensi bawah permukaan yang secara geofisika mendekati kondisi nyata.

Dengan kata lain, proses inversi dilakukan untuk memperkirakan distribusi densitas batuan secara spasial berdasarkan data observasi gayabarat. Target kedalaman inversi difokuskan hingga sekitar 3–4 km untuk mengkarakterisasi secara lengkap sistem panas bumi, mulai dari lapisan batuan penudung (*cap rock*) yang umumnya berada pada kedalaman 0,3–1,2 km, reservoir utama pada kedalaman 1–2 km, hingga sumber panas (*heat source*) yang diperkirakan berada di bawah 2 km. Hasil dari *inverse modelling* ini memberikan gambaran tiga dimensi mengenai variasi densitas dan keberadaan struktur geologi yang tersembunyi di bawah permukaan, yang sangat penting dalam mendukung interpretasi geologi secara keseluruhan.

4.4 Diagram Alir



Gambar 10. Diagram alir penelitian

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis spektrum anomali gayabarat menunjukkan bahwa sumber anomali berada pada kedalaman sekitar 1,5–3,0 km, yang mengindikasikan keberadaan sumber panas magmatik di bawah sistem Gunung Sibayak berdasarkan oleh penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa sistem panas bumi di daerah tersebut dikontrol oleh aktivitas magmatik dangkal, berupa intrusi magma yang belum sepenuhnya membeku.
2. Analisis SVD memperlihatkan lineament dominan berarah barat laut–tenggara dan utara–selatan yang merepresentasikan sesar dan rekahan hingga kedalaman sekitar 1–2 km. Secara geologi, struktur ini memotong satuan vulkanik (Qh, Qls) dan berasosiasi dengan zona manifestasi, sehingga berfungsi sebagai jalur permeabilitas utama bagi fluida hidrotermal.
3. Integrasi SVD, model 3D densitas, dan peta geologi menunjukkan zona reservoir berada di tengah–selatan, dengan densitas rendah (1,99–2,30 gr/cc) pada kedalaman sekitar 1,0–2,5 km. Secara geologi, zona ini berkembang pada batuan vulkanik teralterasi dan terfraktur, diapit oleh batuan lebih kompak sebagai *cap rock*, membentuk sistem panas bumi lengkap yang terdiri dari sumber panas, jalur struktur (sesar), dan akumulasi fluida pada reservoir berpori.

6.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah memperluas cakupan data dan metode analisis agar hasil identifikasi zona reservoir menjadi lebih komprehensif dan akurat. Penggunaan metode gravitasi dengan analisis *Second vertical derivative* (SVD) sebaiknya dikombinasikan dengan metode geofisika lain seperti magnetotelurik (MT) atau geolistrik resistivitas untuk memperoleh gambaran bawah permukaan yang lebih detail, khususnya dalam mengidentifikasi batas litologi, zona alterasi, serta jalur fluida panas bumi. Integrasi multi-metode ini akan meningkatkan keandalan interpretasi dibandingkan hanya mengandalkan satu jenis data.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Geologi. (2014). *Peta potensi panas bumi Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Banu, I. K., Susilo, A., & Soemintadiredja, P. (2014). Pemodelan 3D gayaberat dan analisis struktur detail untuk pengembangan lapangan panasbumi Kamojang. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 5(3), 145–158.
- Barber, A. J., Crow, M. J., & Milsom, J. S. (2005). *Sumatra: Geology, resources and tectonic evolution*. Geological Society of London.
- Blakely, R. J. (1996). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press.
- Blakely, R. J., Simpson, R. W., & Grauch, V. J. S. (1995). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. *In The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps* (pp. 181–197). Society of Exploration Geophysicists.
- Cordell, L., & Grauch, V. J. S. (1982). Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. *in Society of Exploration Geophysicists, 53rd Annual International Meeting, Expanded Abstracts*, 246–247.
- Cumming, W. (2016). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. *Proceedings of the 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University*.
- Daud, Y., Atmojo, J. P., Sudarman, S., & Ushijima, K. (2000). Reservoir delineation of the Sibayak geothermal field, Indonesia using magnetotelluric and gayaberat data. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*, 1–6.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *What is geothermal energy?* International Geothermal Association.
- Fathaddin, M. T., Pane, I. F., & Saputra, A. (2023). Optimization of rate of penetration (ROP) in geothermal drilling using artificial neural network: A case study from Sumatra. *Geothermics*, 107, 102584.
- Grandis, H. (2009). *Introduction to geophysical inversion*. Institut Teknologi Bandung Press.

- Gupta, H. K., & Roy, S. (2007). *Geothermal energy: An alternative resource for the 21st century*. Elsevier.
- Hadi, M. N., Setiawan, A., & Priyono, A. (2020). Potensi dan pengembangan panas bumi di Indonesia: Tinjauan terkini. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 1(2), 45–56.
- Hidayat, R., Srigutomo, W., & Sulistiyono, S. (2017). Analisis koreksi medan gayaberat pada daerah topografi kompleks. *Jurnal Geofisika Indonesia*, 16(1), 12–20.
- Hinze, W. J., von Frese, R. R. B., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4279–4283.
- Ibrahim, M. M., Utami, P., & Raharjo, I. B. (2022). Analisis struktur geologi berdasarkan data gravitasi menggunakan metode *Second vertical derivative* (SVD) pada lapangan panas bumi “X”. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing (JGRS)*, 3(2), 52–59.
- Indonesian Petroleum Association. (2006). *Proceedings of the 35th Indonesian Petroleum Association annual convention and exhibition*. Indonesian Petroleum Association.
- Koestoro, L. P., & Intan, F. S. (2016). Ragam hias geomorfologi dan struktur geologi pada situs Bawömataluö, Pulau Nias, Sumatera Utara. *Berkala Arkeologi Sangkhakala*, 19(1), 1–15.
- LaFehr, T. R., & Nabighian, M. N. (2012). Fundamentals of gravity exploration. In *Geophysical Monograph Series* (Vol. 16). Society of Exploration Geophysicists.
- Moechtar, H., Subiyanto, & Kamiludin, U. (2007). Sedimentologi dan stratigrafi Holosen dataran pantai Medan–Belawan, Provinsi Sumatera Utara, dikaitkan dengan fluktuasi muka laut global. *Jurnal Geologi Kelautan*, 5(2), 64–78.
- Muhammad, F., & Saepuloh, A. (2022). Identifikasi struktur geologi dan daerah prospek panas bumi berdasarkan analisis data gravity gradien satelit (GGMPlus) di daerah Gunung Sibayak, Sumatera Utara. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 8(2), 85–96.
- Mulyani, S., Daud, Y., Pasiki, R. G., & Siagian, H. (2022). Karakterisasi struktur patahan pada lapangan panas bumi X (Sumatra) berdasarkan pemetaan geologi, penginderaan jauh, dan data gravity gradien. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 17(2), 109–124.

- Nabighian, M. N., Ander, M. E., Grauch, V. J. S., Hansen, R. O., LaFehr, T. R., Li, Y., & Ruder, M. E. (2005). Historical development of the gravity method in exploration. *Geophysics*, 70(6), 63ND–89ND.
- Nasution, A., & Pane, I. F. (2020). Karakteristik morfologi dan struktur vulkanik Gunung Sibayak, Karo, Sumatera Utara. *Jurnal Geologi Indonesia*, 15(1), 33–45.
- Putra, D. B. (2018). Pemisahan anomali spektrum gayaberat untuk estimasi kedalaman struktur geologi di daerah X. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 14(3), 201-215.
- Rahmadani, F., Srigutomo, W., & Sutarno, D. (2017). Analisis koreksi udara bebas pada pengolahan data gayaberat. *Jurnal Fisika Indonesia*, 21(62), 1–5.
- Ryacudu, R., & Sjahbuddin, H. (1994). Stratigrafi dan lingkungan pengendapan Formasi Tampur di Paparan Malaka. In *Prosiding Ikatan Ahli Geologi Indonesia*
- Santoso, D. (2004). *Dasar-dasar energi panas bumi*. ITB Press.
- Sari, N. M. (2019). *Analisis koreksi Bouguer dalam pengolahan data gayaberat untuk eksplorasi geothermal*. Skripsi, Universitas Gadjah Mada.
- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi struktur daerah panasbumi Ulubelu berdasarkan analisa data SVD anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*, 16(2), 112–119.
- Sarkowi, M. (2014). *Pemodelan geofisika*. Universitas Brawijaya Press.
- Setiadi, H., Srigutomo, W., & Sutarno, D. (2010). Penerapan filter moving average untuk pemisahan anomali regional dan residual data gayaberat. *Jurnal Matematika dan Sains*, 15(2), 45–52.
- Soemintadiredja, P. (1991). *Metode gayaberat: Teori dan aplikasi*. ITB Press.
- Sosromihardjo, S. (1988). *Stratigrafi Cekungan Sumatera Utara*. Laporan Intern, Pertamina.
- Sugianto, & Rahadinata, Y. (2015). Pemodelan gayaberat 3D daerah panas bumi Dolok Marawa. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 1(2), 67–78.
- Suharno. (2013). *Alterasi hidrotermal dan mineralisasi epitermal*. UPN "Veteran" Yogyakarta Press.
- Supriyadi, A. (2009). *Panduan praktis pengukuran gayaberat untuk eksplorasi geofisika*. Penerbit Universitas Indonesia.
- Suprianto, A., Srigutomo, W., & Sutarno, D. (2021). Evaluasi model medan gravitasi global GGMPlus untuk aplikasi geofisika di Indonesia. *Jurnal Geofisika Indonesia*, 20(1), 1–10.

- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Thamrin, M., Hermawan, I., & Suryantini. (2021). Klasifikasi sistem panas bumi Indonesia: Dari sistem vulkanik tinggi hingga sedimentari. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, 31(1), 23–34.
- Van Bemmelen, R. W. (1949). *The geology of Indonesia*. Government Printing Office.
- Widianto, E., Srigutomo, W., & Sutarno, D. (2018). Analisis koreksi lintang pada data gayabarat untuk pemetaan struktur bawah permukaan. *Jurnal Fisika Indonesia*, 22(64), 22–28.
- Widodo, S. (2009). *Pemetaan geomorfologi daerah panas bumi Sibayak, Sumatera Utara*. Tesis, Universitas Gadjah Mada.
- Zaenudin, A., Ahmad, R., & Sarkowi, M. (2013). Pemodelan struktur dan reservoir lapangan panas bumi Bonjol dari anomali gaya berat. *Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung*, 207–213.
- Zuhro, A. A., Suryantini, & Abdurrokhim. (2023). Analisis risiko investasi dan mitigasi kegagalan pemboran pada tahap eksplorasi panas bumi di Indonesia. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 19(1), 45–60.