

**PEMODELAN PANAS BUMI BERDASARKAN ANALISIS
DATA GAYABERAT DI DAERAH WKP GUNUNG ENDUT,
BANTEN**

(Skripsi)

**Oleh
Yuniar Adelia Pratiwi
2215051057**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**PEMODELAN PANAS BUMI BERDASARKAN ANALISIS
DATA GAYABERAT DI DAERAH WKP GUNUNG ENDUT,
BANTEN**

Oleh

Yuniar Adelia Pratiwi

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PEMODELAN PANAS BUMI BERDASARKAN ANALISIS DATA GAYABERAT DI DAERAH WKP GUNUNG ENDUT, BANTEN

Oleh

Yuniar Adelia Pratiwi

Daerah Gunung Endut di Provinsi Banten merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi panas bumi, yang ditandai oleh adanya manifestasi permukaan berupa mata air panas, seperti di daerah Cikawah dan Handeuleum. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur geologi serta memodelkan sistem panas bumi bawah permukaan dengan menggunakan metode gayaberat. Pengolahan data dilakukan melalui pendekatan *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk mendeteksi keberadaan serta pola struktur. Selain itu, dilakukan pemodelan inversi tiga dimensi (3D) untuk mengetahui distribusi densitas batuan di bawah permukaan. Hasil analisis derivatif menunjukkan adanya tiga struktur sesar pada lintasan A–A' dan B–B' dengan arah dominan barat laut–tenggara dan timur laut–barat daya, yang berperan sebagai jalur permeabilitas fluida hidrotermal. Hasil pemodelan inversi menunjukkan variasi densitas batuan berkisar antara 1,00 hingga lebih dari 3,00 gr/cc. Zona berdensitas rendah (1,00 – 2,20 gr/cc) diinterpretasikan sebagai batuan dengan porositas dan permeabilitas tinggi, seperti tuf dan breksi yang telah mengalami alterasi, sehingga berpotensi sebagai reservoir atau jalur aliran fluida hidrotermal. Sementara itu, zona berdensitas tinggi (2,80 – 3,00 gr/cc) diinterpretasikan sebagai batuan kompak atau tubuh instrusi yang berperan sebagai sumber panas. Hasil analisis geokimia menunjukkan bahwa fluida panas bumi di daerah Gunung Endut didominasi oleh tipe klorida yang berasal dari reservoir atau zona *upflow*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kondisi bawah permukaan serta menjadi dasar dalam pengembangan dan eksplorasi sumber daya panas bumi di daerah Gunung Endut, Banten.

Kata kunci: Gunung Endut, panas bumi, metode gayaberat, FHD, SVD, inversi 3D

ABSTRACT

GEOHERMAL MODELING BASED ON GRAVITY DATA ANALYSIS IN THE MOUNT ENDUT WKP AREA, BANTEN

By

Yuniar Adelia Pratiwi

The Mount Endut area in Banten Province is one of the areas with geothermal potential, which is characterized by the presence of surface manifestations in the form of hot springs, such as in the Cikawah and Handeuleum areas. This study aims to identify geological structures and model the subsurface geothermal system using the gravity method. Data processing is carried out through the First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) approaches to detect the presence and pattern of structures. In addition, three-dimensional (3D) inversion modeling is carried out to determine the distribution of rock density below the surface. The results of the derivative analysis indicate the presence of three fault structures on the A–A' and B–B' paths with dominant northwest–southeast and northeast–southwest directions, which act as hydrothermal fluid permeability pathways. The results of the inversion modeling show variations in rock density ranging from 1,00 to more than 3,00 gr/cc. The low-density zone (1,00 – 2,20 gr/cc) is interpreted as rocks with high porosity and permeability, such as tuff and breccia that have undergone alteration, thus potentially acting as reservoirs or hydrothermal fluid flow pathways. Meanwhile, the high-density zone (2,80 – 3,00 gr/cc) is interpreted as compact rocks or intrusive bodies that act as heat sources. The results of geochemical analysis indicate that geothermal fluids in the Mount Endut area are dominated by chloride types originating from reservoirs or upflow zones. This research is expected to provide an overview of subsurface conditions and become a basis for the development and exploration of geothermal resources in the Mount Endut area, Banten.

Keywords: Mount Endut, geothermal, gravity method, FHD, SVD, 3D inversion

Judul Skripsi : **Pemodelan Panas Bumi Berdasarkan Analisis Data
Gayaberat Di Daerah WKP Gunung Endut, Banten**

Nama Mahasiswa : **Yuniar Adelia Pratiwi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2215051057**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1



Prof. Ir. Drs. Suharno, B.Sc. M.S., Ph.D.,

IPU., ASEAN. Eng.

NIP. 199102072018032001

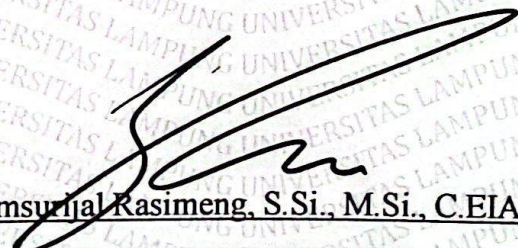
Pembimbing 2



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

NIP. 199008052019032014

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika



Dr. Ir. Syamsurjal Kasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA, IPM.

NIP. 197307162000121002

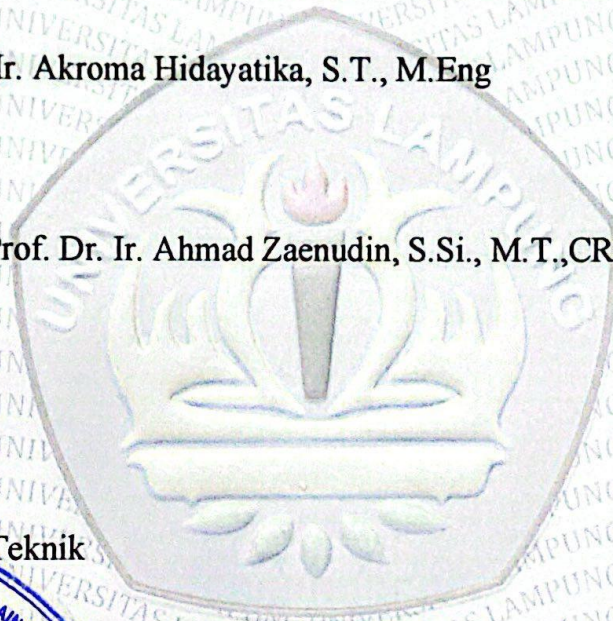
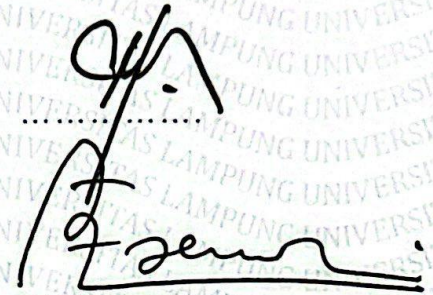
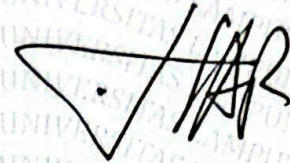
MENGESAIHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Ir. Drs. Suharno, B.Sc. M.S., Ph.D., IPU.,
ASEAN. Eng.

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

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



2. Dekan Fakultas Teknik


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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 30 April 2026

PERNYATAAN

Dengan ini, saya menyatakan bahwa skripsi berjudul "*Pemodelan Panas Bumi Berdasarkan Analisis Data Gayaberat Di Daerah WKP Gunung Endut, Banten*" merupakan hasil karya dan pemikiran saya sendiri, yang disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana. Seluruh sumber yang digunakan dalam penulisan ini, telah dicantumkan dalam daftar pustaka sesuai dengan kaidah, dan etika penulisan ilmiah yang berlaku. Apabila di kemudian hari ditemukan adanya ketidaksesuaian terhadap pernyataan ini, saya bersedia menerima segala konsekuensi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Bandar Lampung, 19 Mei 2026



Yuniar Adelia Pratiwi
NPM. 2215051057

RIWAYAT HIDUP



Nama lengkap penulis adalah Yuniar Adelia Pratiwi, lahir di Lampung pada tanggal 26 Juni 2004 sebagai anak ketiga dari tiga bersaudara dalam keluarga yang sederhana yang penuh kehangatan. Pendidikan formal dimulai di PAUD Anggrek pada tahun 2009-2010, kemudian dilanjutkan pendidikan sekolah dasar di SD Negeri 2 Merak Batin, Natar, Lampung Selatan pada tahun 2010-2016, Selanjutnya, penulis menempuh pendidikan di MTs Guppi Natar, Lampung Selatan pada tahun 2016 hingga 2019, dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Natar, Lampung Selatan dengan jurusan Ilmu Pengetahuan Alam pada tahun 2019 hingga lulus pada tahun 2022.

Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama menjalani masa perkuliahan, penulis turut berperan secara aktif dalam sejumlah kegiatan di bidang akademik maupun organisasi tingkat mahasiswa. Pengalaman organisasi yang pernah diikuti antara lain menjadi anggota Bidang Kesekretariatan dan Rumah Tangga (KRT) di Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HIMA TG Bhuwana).

Pada tahun 2025, penulis menjalani program Kuliah Kerja Nyata (KKN) yang berlokasi di Desa Marga Jaya, Kecamatan Selagai Lingga, Lampung Tengah. Disamping itu, penulis juga menjalankan Kerja Praktik di Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi (PSDMBP) khususnya pada divisi mineral. Sebagai tahap akhir pendidikan, penulis menyusun Tugas Akhir di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

PERSEMBAHAN

Segala puji dan rasa syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia kesehatan, kemudahan, serta kekuatan yang telah dianugerahkan, sehingga karya ini dapat diselesaikan dengan baik. Tanpa pertolongan-Nya, segala usaha tidak akan berarti. Dengan segenap rasa hormat dan cinta yang tulus, karya sederhana ini penulis persembahkan kepada:

AYAH DAN IBU TERCINTA

Terima kasih atas setiap doa yang senantiasa mengiringi, dukungan yang tidak pernah berhenti, serta kasih sayang tulus yang selalu diberikan dalam setiap perjalanan hidup penulis. Pengorbanan, kesabaran, dan ketulusan Ayah dan Ibu menjadi peran paling penting dan berharga dalam perjalanan ini. Setiap pencapaian yang diraih merupakan hasil dari doa dan restu yang selalu menyertai.

KAKAK-KAKAKKU TERSAYANG

Rasa terima kasih yang sebesar-besarnya atas kehadiran, kepedulian, dukungan, serta motivasi yang senantiasa tuncurahkan. Kehadiran kalian menjadi penyemangat, tempat berbagi cerita, serta penguat dalam menghadapi setiap proses kehidupan. Semoga kebahagiaan, kesehatan, dan kesuksesan selalu menyertai langkah kalian.

UNTUK PENULIS SENDIRI

Terima kasih karena telah mampu bertahan, tetap gigih berjuang, dan pantang menyerah dalam melewati berbagai rintangan yang hadir sepanjang proses ini berjalan. Segala usaha, ketekunan, dan pengorbanan yang telah dilakukan menjadi bukti bahwa setiap perjuangan akan menghasilkan pelajaran serta pengalaman yang berharga. Semoga setiap Langkah yang ditempuh ke depan membawa keberhasilan dan kebahagiaan.

MOTTO HIDUP

**“Allah tidak mengatakan hidup ini mudah. Tetapi Allah berjanji, bahwa
sesungguhnya Bersama kesulitan ada kemudahan”**

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

*“Life can be heavy, especially if you try to carry it all at once, part of growing up and
moving into new chapters of your life is about catch or release. What I mean by that
is, knowing what things to release.”*

(Taylor Swift)

“Hidup bukan saling mendahului, bermimpilah sendiri-sendiri”

(Hindia)

“Allah is always with me”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi yang berjudul “*Pemodelan Panas Bumi Berdasarkan Analisis Data Gayabarat Di Daerah WKP Gunung Endut, Banten*” dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan karya ilmiah ini dilakukan guna memenuhi salah satu ketentuan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur geologi serta membangun model sistem panas bumi yang berada di bawah permukaan kawasan Gunung Endut, Banten. Penulis memahami bahwa dalam proses penyusunan skripsi ini masih terdapat berbagai kekurangan dan keterbatasan. Sehubungan dengan hal tersebut, masukan dan saran yang membangun sangat diharapkan sebagai bahan pertimbangan untuk perbaikan dan pengembangan ke depannya. Penulis berharap agar hasil dari penelitian ini mampu memberikan kontribusi positif bagi kemajuan ilmu geofisika, terutama pada bidang eksplorasi energi panas bumi.

Bandar Lampung, 19 Mei 2026



Yuniar Adelia Pratiwi
NPM. 2215051057

SANWACANA

Dengan penuh rasa syukur atas segala karunia dan pertolongan yang diberikan oleh Allah Subhanahu wa Ta'ala, penulis berhasil menyelesaikan skripsi yang berjudul "*Pemodelan Panas Bumi Berdasarkan Analisis Data Gayaberat Di Daerah WKP Gunung Endut, Banten.*" Penyelesaian karya ini tidak terlepas dari limpahan rahmat, kemudahan, serta kekuatan yang Allah berikan pada setiap tahapan penyusunannya. Selama proses pengerjaan skripsi ini berlangsung, penulis menyadari sepenuhnya bahwa peran, bantuan, dan kontribusi dari berbagai pihak memiliki makna yang begitu berarti. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.T., CRP., sebagai Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, yang telah memberikan dukungan, arahan serta fasilitas kepada penulis selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, yang telah memberikan banyak bantuan serta kemudahan kepada penulis dalam menyelesaikan studi secara tepat waktu.
4. Prof. Ir. Drs. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D., IPU., ASEAN.Eng., selaku Dosen Pembimbing I, yang dengan penuh dedikasi telah memberikan petunjuk, pendampingan, serta berbagai saran yang berguna sepanjang proses penyelesaian skripsi ini.
5. Ibu Ir. Akroma Hidayatika, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing II, yang dengan sikap sabar dan ketelitian senantiasa memberikan saran, motivasi, serta

bimbingan penuh hingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan hasil yang baik.

6. Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., CRP., sebagai Dosen Penguji yang telah memberikan penilaian, masukan, serta evaluasi yang membangun untuk meningkatkan dan menyempurnakan kualitas skripsi ini sampai terselesaikan.
7. Seluruh dosen di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan, wawasan, serta pengalaman yang sangat berharga kepada penulis sepanjang menjalani masa studi.
8. Cinta pertama dan panutan penulis, Ayah tercinta. Terima kasih atas kepercayaan, kasih sayang yang tulus, pengorbanan tiada henti, doa, dukungan yang senantiasa menguatkan langkah penulis dalam meraih cita-cita. Semua pencapaian ini tidak lepas dari peran besar ayah dalam setiap proses perjalanan hidup penulis.
9. Pintu surgaku, Ibu tercinta. Terima kasih atas doa yang tidak pernah putus, kasih sayang yang tulus ikhlas, serta pengorbanan yang begitu luar biasa. Ketulusan dan dukungan Ibu menjadi pondasi kekuatan terbesar bagi penulis dalam melewati setiap rintangan hingga dapat sampai di titik ini.
10. Kepada kakak-kakak tersayang, yang selalu memberikan semangat, dukungan, serta motivasi agar penulis terus berusaha memberikan yang terbaik dalam menyelesaikan studi.
11. Teruntuk seseorang yang terkasih, penulis ingin mengungkapkan rasa terima kasih atas segala perhatian, dukungan, kebersamaan, dan kesediaannya untuk tetap menemani penulis selama menjalani proses studi hingga selesai. Terima kasih karena telah menjadi tempat berbagi cerita dan keluh kesah. Kehadiranmu memberikan warna serta makna dalam setiap langkah yang penulis jalani.
12. Untuk sahabat seperjalanan, PPI sisters, penulis mengucapkan terima kasih atas kebersamaan yang bermakna serta dukungan yang tak pernah surut. Setiap proses yang dilalui terasa lebih ringan dan berkesan karena dijalani bersama.
13. Teruntuk teman-teman (PKM), penulis mengucapkan rasa terima kasih atas seluruh momen kebersamaan, canda tawa, serta kenangan menyenangkan yang selalu mewarnai di setiap pertemuan.

14. Kepada sahabat penulis sejak SMP (MANGESTU), terima kasih atas waktu, perhatian, dan kesediaannya untuk selalu mendengarkan setiap cerita penulis selama ini, dan untuk persahabatan yang hangat dan penuh kenangan.
15. Penulis juga ingin menyampaikan apresiasi kepada diri sendiri atas ketekunan dan semangat yang telah ditunjukkan dalam menghadapi berbagai tantangan sepanjang perjalanan pengerjaan skripsi ini. Terima kasih atas segala upaya, kesabaran, dan ketekunan yang dijaga hingga studi ini dapat diselesaikan dengan hasil yang memuaskan. Pencapaian ini menjadi bukti dari kerja keras yang telah dilakukan.
16. Keluarga Besar Granit 22 (Teknik Geofisika Angkatan 2022), yang telah hadir sebagai bagian dalam proses perjalanan berkembang, serta memperlancar rasa kebersamaan selama menempuh masa studi.
17. Penulis turut menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang tidak bisa disebutkan namanya satu per satu, atas segala bantuan, dukungan, dan kontribusi yang telah diberikan dalam proses penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, baik dari segi isi maupun penyajiannya. Oleh sebab itu, masukan dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan sebagai bahan evaluasi dan penyempurnaan di masa yang akan datang. Penulis berharap agar hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu geofisika, serta menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

Bandar Lampung, 19 Mei 2026



Penulis

Yuniar Adelia Pratiwi

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
MOTTO HIDUP	x
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWANCANA	xii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Lokasi Penelitian	5
2.2. Tektonik dan Struktur Daerah Penelitian.....	7

2.3. Fisiografi Regional	8
2.4. Geomorfologi Regional	10
2.5. Geologi Regional.....	10
2.6. Stratigrafi Regional	13
2.7. Sistem Panasbumi.....	15
2.7.1. Sumber Panas	17
2.7.2. Batuan Reservoir	17
2.7.3. <i>Caprock</i>	18
2.7.4. Struktur Geologi.....	18
2.7.5. <i>Recharge Area</i>	19
2.8. Geokimia Daerah Penelitian	19
2.9. Penelitian Terdahulu	20
III. TEORI DASAR.....	23
3.1. Metode Gayaberat	23
3.2. Konsep Dasar Gayaberat	23
3.2.1. Gayaberat Newton	23
3.2.2. Percepatan Gayaberat	24
3.2.3. Potensial Gayaberat	25
3.2.4. Densitas Batuan	27
3.3. Koreksi–Koreksi dalam Metode Gayaberat	29
3.3.1. Koreksi Lintang	29
3.3.2. Koreksi Udara Bebas (<i>Free Air Correction</i>).....	29
3.3.3. Koreksi Bouguer Lengkap	30
3.3.4. Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>).....	30
3.3.5. Anomali Bouguer Lengkap	32
3.4. Analisis Spektrum	33
3.5. Filter <i>Upward Continuation</i>	36

3.6. <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i>	37
3.7. <i>First Horizontal Derivative (FHD)</i>	39
3.8. <i>Inverse Modelling</i>	39
IV. METODOLOGI PENELITIAN	41
4.1. Waktu dan Tempat Penelitian	41
4.2. Alat dan Bahan	41
4.3. Prosedur Penelitian.....	42
4.3.1. Pengumpulan Data.....	42
4.3.2. Koreksi Bouguer	43
4.3.3. Penentuan Densitas Batuan Rata-rata	44
4.3.4. Koreksi Medan.....	44
4.3.5. Anomali Bouguer Lengkap (ABL).....	45
4.3.6. Pemisahan Anomali.....	46
4.3.7. Analisis Derivatif.....	47
4.3.8. Pemodelan Inversi Bawah Permukaan	47
4.4. Jadwal Kegiatan.....	47
4.5. Diagram Alir	49
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	50
5.1. Data Penelitian.....	50
5.2. Pembahasan	52
5.2.1. Topografi Daerah Penelitian	52
5.2.2. Penentuan Nilai Densitas Rata-rata.....	53
5.2.3. Anomali Bouguer Lengkap	53
5.2.4. Anomali Regional.....	55
5.2.5. Anomali Residual	56
5.2.6. <i>First Horizontal Derivative</i> dan <i>Second Vertical Derivative</i>	57
5.2.7. Analisis Derivatif.....	60

5.2.8. Pemodelan <i>Inverse</i> 3D	67
5.2.9. Analisis Geokimia Panas Bumi	69
5.2.10. Model Konseptual Sistem Panas Bumi	70
VI. KESIMPULAN DAN SARAN.....	73
6.1. Kesimpulan	73
6.2. Saran.....	74

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta administrasi daerah penelitian.....	6
2. Gambaran fisiografi area penelitian.....	9
3. Peta geologi regional daerah penelitian.....	12
4. Kolom stratigrafi pada peta geologi lembar Leuwidamar.....	15
5. Elemen penyusun sistem panas bumi.....	17
6. Diagram Cl-SO ₄ -HCO ₃ , Diagram Na-K-Mg.....	20
7. Gaya tarik menarik antara dua benda.....	24
8. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi.....	26
9. Koreksi apungan (Reynols, 1997).....	29
10. Kurva lnA terhadap k (Blakely, 1996).....	36
11. Data <i>gravity acceleration</i> GGMplus.....	43
12. Kontur anomali Bouguer lengkap untuk RAPS.....	45
13. Grafik ln A – k daerah penelitian.....	46
14. Diagram alir.....	49
15. Peta topografi daerah penelitian.....	52
16. Grafik BC vs FAA.....	53
17. Peta anomali Bouguer lengkap daerah penelitian.....	54
18. Peta anomali regional daerah penelitian.....	55

19. Peta anomali residual daerah penelitian	56
20. Peta <i>First Horizontal Derivative</i>	58
21. Peta <i>Second Vertical Derivative</i>	59
22. Lintasan Penampang <i>derivative</i> pada peta geologi daerah penelitian.....	61
23. Kurva hasil analisis <i>derivative</i> pada lintasan A – A'	62
24. Kurva hasil analisis <i>derivative</i> pada lintasan B – B'	63
25. Kurva hasil analisis <i>derivative</i> pada lintasan C – C'	64
26. Hasil plotting struktur patahan pada peta geologi	65
27. Model inversi 3D data gayaberat	68
28. Penampang 2D distribusi densitas hasil slicing model inversi 3D data gayaberat pada lintasan C – C'	68
29. Model konseptual sistem panas bumi Gunung Endut, Banten.....	71

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai densitas batuan.....	27
2. Operator Henderson & Zietz (1949)	38
3. Operator Elkins (1951).....	38
4. Operator Rosenbach (1953).....	39
5. Alat dan bahan	41
6. Pengolahan data koreksi Bouguer	44
7. Pelaksanaan kegiatan penelitian	48
8. Cuplikan data penelitian	51
9. Hasil analisis grafik FHD dan SVD lintasan A – A', B – B', dan C – C'	64

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia terletak di sepanjang jalur Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*), yakni kawasan tektonik aktif sebagai hasil dari pertemuan tiga lempeng besar, yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Interaksi tersebut menyebabkan tingginya aktivitas geologi, seperti gempa bumi dan vulkanisme, yang berkaitan erat dengan proses subduksi. Dalam kegiatan eksplorasi panas bumi, metode gayaberat dimanfaatkan sebagai salah satu pendekatan geofisika yang terbilang efektif karena mampu mendeteksi variasi nilai densitas batuan yang terdapat di bawah permukaan bumi. Kontras densitas yang terdeteksi tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan struktur geologi, seperti sesar maupun zona rekahan, yang berfungsi sebagai jalur pergerakan fluida hidrotermal ke arah permukaan.

Indonesia dikenal sebagai salah satu negara dengan potensi energi panas bumi yang melimpah. Berdasarkan data estimasi, total potensi panas bumi di Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 11.073 MWe, dengan jumlah cadangan sebesar 17.506 MWe. Sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan, panas bumi memiliki peranan penting dalam penyediaan energi listrik sekaligus mendukung pengembangan sektor ketenagalistrikan nasional. Selain itu, terdapat sekitar 331 titik potensi panas bumi yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia, mulai dari Sabang hingga Merauke (ESDM, 2017). Salah satu daerah yang memiliki potensi panas bumi tersebut adalah Gunung Endut yang berada di Provinsi Banten.

Gunung Endut yang berada di Kabupaten Lebak, Provinsi Banten, merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi panas bumi di Indonesia. Kawasan tersebut termasuk ke dalam sistem geothermal aktif di bagian barat Pulau Jawa yang terbentuk akibat interaksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Gunung Endut ditandai dengan adanya manifestasi panas bumi di permukaan, seperti mata air panas, yang mengindikasikan adanya sistem panas bumi di bawah permukaan.

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang umum dimanfaatkan dalam kegiatan eksplorasi untuk mengenali kondisi geologi bawah permukaan melalui analisis variasi medan gravitasi bumi. Variasi tersebut dipengaruhi oleh perbedaan densitas batuan di bawah permukaan yang tercermin pada anomali gayaberat, khususnya anomali Bouguer yang terukur di permukaan. Data tersebut kemudian dapat digunakan untuk menginterpretasikan distribusi massa batuan pada setiap titik pengamatan (Sarkowi, 2014).

Melalui pendekatan metode gayaberat, dapat diperoleh gambaran kondisi geologi daerah prospek panas bumi secara lebih menyeluruh, termasuk dalam mengidentifikasi keberadaan struktur sesar. Analisis ini didasarkan pada perbedaan nilai densitas batuan yang merepresentasikan keragaman struktur geologi yang terdapat di bawah permukaan bumi (Telford dkk., 1990).

Dalam penelitian ini, data gayaberat yang dimanfaatkan bersumber dari satelit GGMplus (*Global Gravity Model Plus*) pada tahun 2013. Model ini memiliki keunggulan berupa resolusi spasial yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan data gayaberat dari satelit lain, seperti TOPEX dan BGI, sehingga cukup efektif digunakan pada tahap survei awal untuk memperoleh gambaran kondisi geologi sebelum dilakukan pengukuran langsung di lapangan (Hirt dkk., 2013). Oleh sebab itu, penelitian ini difokuskan pada analisis potensi panas bumi di daerah Gunung Endut, Banten, menggunakan metode gayaberat untuk mengidentifikasi karakteristik bawah permukaan di wilayah tersebut.

Dalam studi ini, metode gayaberat digunakan sebagai pendekatan utama yang umum diterapkan dalam pada eksplorasi panas bumi. Metode tersebut mampu memberikan informasi mengenai kondisi struktur geologi bawah permukaan berdasarkan variasi densitas batuan. Selain itu, dilakukan pemodelan inversi 3D terhadap anomali Bouguer lengkap guna memperoleh gambaran distribusi densitas bawah permukaan, serta analisis karakteristik geokimia sistem panas bumi di wilayah Gunung Endut, Banten.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis data gayaberat menggunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk mengidentifikasi anomali serta indikasi struktur geologi bawah permukaan di Gunung Endut, Banten.
2. Menginterpretasikan karakteristik struktur geologi di wilayah Gunung Endut, Banten.
3. Memodelkan sistem panas bumi daerah Gunung Endut berdasarkan hasil interpretasi data gayaberat.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam pelaksanaan penelitian ini adalah:

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder bersifat *open source* yang diperoleh melalui *website* GGMPPlus.
2. Analisis derivatif yang diterapkan dalam penelitian ini, yaitu *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk mengidentifikasi serta menginterpretasikan arah dan keberadaan struktur geologi bawah permukaan.
3. Pemodelan dilakukan pada skala regional–lokal sesuai cakupan wilayah WKP Gunung Endut dan ketersediaan titik pengukuran gayaberat.
4. Estimasi kedalaman reservoir dan zona prospek dilakukan berdasarkan pendekatan geofisika gayaberat tanpa analisis temperatur atau geokimia fluida panas bumi secara langsung.

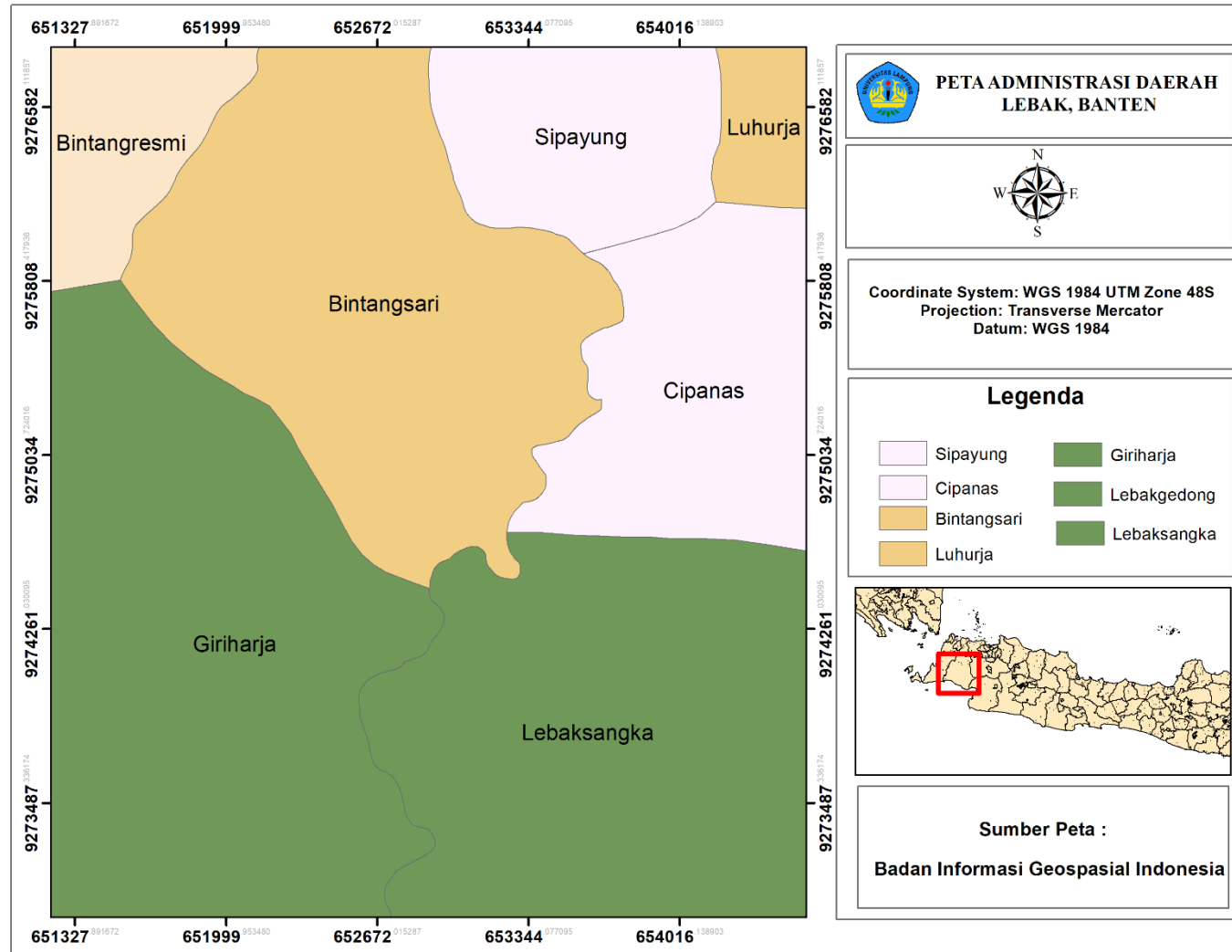
1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu menyajikan gambaran awal mengenai potensi energi panas bumi yang terdapat di Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Gunung Endut melalui analisis pemodelan anomali gayaberat. Hasil penelitian yang diperoleh dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi zona prospek serta struktur bawah permukaan yang berperan penting dalam kegiatan eksplorasi lanjutan. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan dan penerapan metode geofisika, terutama metode gayaberat, untuk kajian panas bumi serta mendukung upaya pemanfaatan energi terbarukan di wilayah Banten. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat berfungsi sebagai acuan bagi penelitian berikutnya yang berhubungan dengan penerapan metode gayaberat dalam kegiatan eksplorasi potensi sumber daya panas bumi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di kawasan Gunung Endut yang secara administratif masuk dalam lingkup wilayah Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. Wilayah tersebut merupakan bagian dari Pegunungan Selatan Banten dan termasuk jalur gunungapi Kuartar di Pulau Jawa. Secara geografis, lokasi penelitian berada pada kisaran koordinat $6^{\circ}38'00''$ - $6^{\circ}50'00''$ LS dan $106^{\circ}15'22''$ - $106^{\circ}22'39''$ BT, dengan ketinggian sekitar 1.207 mdpl serta luas wilayah kurang lebih 25,6 hektar. Kondisi morfologi daerah ini bervariasi dari bergelombang hingga bergunung, dengan penutupan lahan berupa hutan tropis dan sebagian area pertanian. Dari aspek geologi, Gunung Endut merupakan bagian dari sistem zona vulkanik yang sudah tidak aktif, namun masih menunjukkan indikasi potensi panas bumi. Hal tersebut ditunjukkan oleh keberadaan struktur sesar dengan orientasi dominan barat-timur dan utara-selatan. Selain itu, aktivitas hidrotermal di kawasan penelitian dicirikan oleh munculnya manifestasi permukaan dalam bentuk mata air panas beserta kehadiran zona alterasi pada batuan vulkanik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem panas bumi di daerah penelitian masih berkembang, yang diduga memiliki keterkaitan dengan adanya intrusi batuan pada kedalaman serta pergerakan sirkulasi fluida hidrotermal yang berlangsung di bawah permukaan bumi. Oleh sebab itu, pendekatan geofisika, khususnya metode gayaberat, digunakan untuk mengkaji karakteristik bawah permukaan pada wilayah penelitian ini.



Gambar 1. Peta administrasi daerah penelitian

2.1. Tektonik dan Struktur Daerah Penelitian

Kondisi tektonik regional di wilayah Jawa Barat, termasuk daerah Gunung Endut, dipengaruhi oleh proses subduksi Lempeng Indo-Australia yang menyusup ke bawah Lempeng Eurasia di sepanjang zona Palung Jawa. Proses ini membentuk busur vulkanik aktif serta sistem struktur sesar yang berkembang secara kompleks. Interaksi kedua lempeng tersebut berlangsung dalam jangka waktu geologi yang Panjang, menghasilkan deformasi berupa kompresi dan ekstensi yang memicu aktivitas magmatik, pembentukan cekungan sedimen, serta perkembangan pegunungan vulkanik (Simandjuntak & Barber, 1996). Secara spesifik, Gunung Endut berada pada zona peralihan antara cekungan Jawa Barat selatan dan Pegunungan Seribu, dengan laju subduksi sekitar 6-7 cm/tahun dan sudut penunjaman sekitar 45-60° (Hall, 2012). Aktivitas subduksi ini berperan dalam pembentukan magma di mantel atas yang kemudian naik ke kerak bumi, sehingga berkontribusi terhadap terbentuknya sistem panas bumi melalui sirkulasi fluida hidrotermal di sepanjang zona lemah tektonik. Di wilayah Banten, struktur geologi berkembang dalam bentuk lipatan dan sesar dengan orientasi dominan barat - timur, baratlaut - tenggara, serta timurlaut - baratdaya (Ervan dan Subagio, 2021).

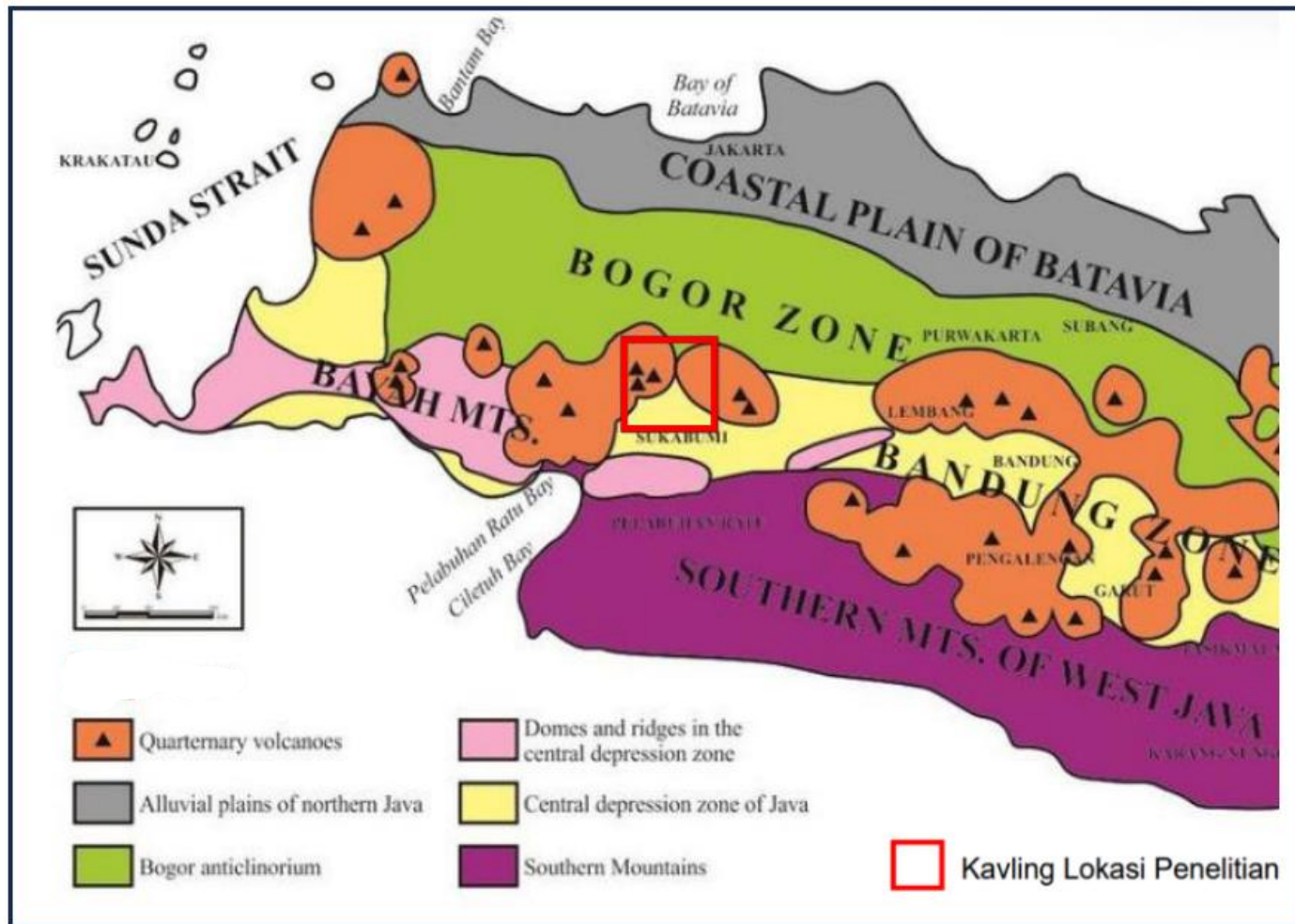
Struktur geologi di daerah penelitian diinterpretasikan terbentuk pada fase tektonik Kuartar yang dikontrol oleh aktivitas tektonik regional akibat interaksi lempeng besar di Indonesia (Van Bemmelen, 1949). Berdasarkan penelitian sebelumnya struktur geologi di Kawasan Gunung Endut dapat dikelompokkan menjadi beberapa kelompok, di antaranya sesar normal berarah barat - baratlaut dan timur - timurlaut yang memiliki peran signifikan dalam mengendalikan proses intrusi magma serta aktivitas vulkanik di wilayah tersebut. Selain itu, terdapat sesar mendatar dengan kecenderungan arah timur - timurlaut hingga barat - baratlaut yang memotong satuan batuan hingga ke lapisan batuan dasar. Aktivitas struktur ini juga memicu proses peremajaan (*rejuvenation*) yang berperan dalam pembentukan lapisan penudung (*cap rock*) di sekitar manifestasi panas bumi, seperti di daerah Cikawah.

Keberadaan sesar mendatar dengan arah relatif seragam memengaruhi terjadinya transportasi fluida panas menuju sumber mata air panas di sekitar wilayah Gunung Endut, yang dikontrol oleh morfologi *horst* dan *graben* (Pramadhani dkk., 2015). Selain itu, berkembang pula struktur sesar dengan orientasi mendekati arah utara – selatan yang memotong dan memperbarui struktur geologi yang telah terbentuk pada periode sebelumnya.

2.2. Fisiografi Regional

Wilayah penelitian yang berada di Kawasan Gunung Endut, berdasarkan kondisi secara fisiografi regional berada pada titik pertemuan tiga zona utama, yakni Zona Bogor, Zona Punggungan dan Kubah yang termasuk dalam Zona Depresi, serta Zona Gunungapi Kuarter (Van Bemmelen, 1949). Zona Bogor merupakan bagian dari pegunungan muda yang terbentuk akibat aktivitas tektonik. Sementara itu, Zona Punggungan dan Kubah dicirikan oleh struktur perbukitan yang berkembang akibat proses lipatan dan patahan. Zona Gunungapi Kuarter mencerminkan aktivitas vulkanisme yang relatif lebih muda di wilayah tersebut.

Secara administratif, wilayah kerja panas bumi (WKP) Gunung Endut memiliki luas sekitar 100–150 km² dan terletak di Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. Kawasan ini termasuk dalam Zona Pegunungan Bayah dan didominasi oleh batuan vulkanik andesit dengan puncak Gunung Endut mencapai ketinggian sekitar 1.175 mdpl. Morfologi lereng utara relatif landai dengan kemiringan sekitar 15–25°, sehingga lebih mudah diakses, sedangkan lereng selatan memiliki kemiringan lebih curam, yaitu sekitar 35–50°, sehingga lebih rentan terhadap erosi dan longsor. Curah hujan di wilayah ini tergolong tinggi, berada pada kisaran antara 2.500–3.500 mm per tahun, dengan intensitas curah hujan tertinggi umumnya terjadi pada rentang bulan November sampai dengan Maret.



Gambar 2. Gambaran fisiografi area penelitian (dimodifikasi oleh Rendra, P, 2029 dari Van Bemmelen, 1949).

2.3. Geomorfologi Regional

Gunung Endut memiliki karakter morfologi berupa perbukitan terlipat yang terbentuk akibat proses sedimentasi dan aktivitas patahan pada masa lampau (Pramadhani dkk, 2015). Di wilayah ini juga berkembang struktur antiklinorium yang menjadi salah satu ciri geologi penting, terbentuk akibat tekanan lateral dari interaksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Pada periode Kuartar, aktivitas vulkanisme muda, termasuk pembentukan Gunung Endut, menutupi satuan batuan yang lebih tua. Proses sedimentasi yang berlangsung secara terus – menerus kemudian membentuk topografi yang didominasi oleh lereng curam di beberapa bagian, dengan puncak yang relatif tidak terlalu tinggi dibandingkan gunung lain di Pulau Jawa.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, geomorfologi daerah Gunung Endut dapat diklasifikasikan menjadi empat satuan utama dengan mempertimbangkan karakteristik morfologi wilayah, pola jaringan sungai, kemiringan lereng, intensitas erosi, serta kondisi struktur geologi. Satuan tersebut meliputi kompleks kerucut vulkanik yang mencakup sekitar 35% wilayah, satuan gunung api sekitar 25%, perbukitan bergelombang sekitar 32%, serta dataran yang meliputi sekitar 8% (Widodo, 2009).

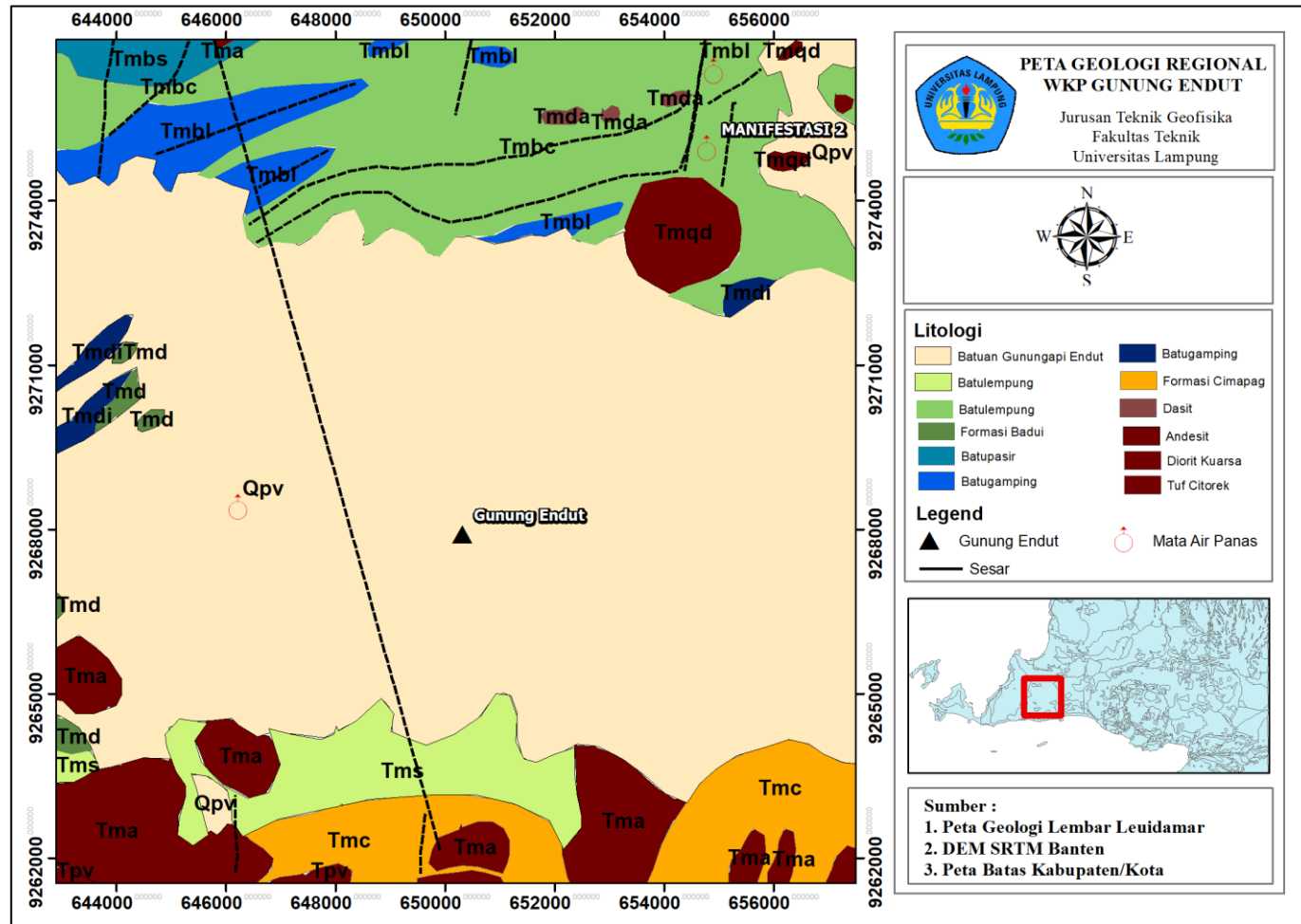
Secara umum, morfologi Gunung Endut didominasi oleh bentang alam vulkanik dengan keberadaan kompleks kubah yang mencapai ketinggian sekitar 1.207 mdpl. Wilayah ini tersusun oleh perbukitan dan pegunungan yang terbentuk akibat aktivitas vulkanik serta proses erosi pada satuan batuan berumur tersier hingga kuartar. Kompleks vulkanik tersebut diperkirakan masih memiliki sumber panas residual dari aktivitas magmatik, yang berkontribusi terhadap proses pembentukan dan perkembangan sistem panas bumi di wilayah tersebut (Badan Geologi, 2014).

2.4. Geologi Regional

Daerah Gunung Endut secara administratif di wilayah Kabupaten Lebak, Provinsi Banten, dan menjadi bagian dari area Taman Nasional Gunung Halimun Salak.

Gunung Endut diklasifikasikan sebagai gunung api tipe strato (*stratovolcano*) yang memiliki bentuk morfologi kerucut, terbentuk dari akumulasi material hasil erupsi eksplosif yang terjadi secara berulang. Secara fisiografi regional, wilayah ini berada zona peralihan di antara Zona Bogor, Zona Punggungan dan Kubah yang termasuk dalam Zona Depresi, serta Zona Gunungapi Kuarter. Zona tersebut dicirikan oleh perbukitan terlipat yang mengalami proses sedimentasi dan deformasi di lingkungan laut dalam sejak zaman Tersier, kemudian tertutupi oleh aktivitas vulkanik yang lebih muda dan membentuk struktur antiklinorium (Van Bemmelen, 1949). Gunung Endut memiliki luas wilayah prospek panas bumi mencapai 13 km^2 yang terletak pada koordinat $6^{\circ}33'57'' \text{ S} - 6^{\circ}41'00'' \text{ S}$ dan $106^{\circ}15'24'' \text{ E} - 106^{\circ}22'33'' \text{ E}$ berdasarkan ketetapan yang dikeluarkan oleh Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi (PSDMBP). Potensi panas bumi Gunung Endut secara umum diyakini dengan suhu reservoir terduga mencapai 180°C , dan potensi sumber daya hingga 95 Mwe berdasarkan data analisis terdahulu (Pramadhani dkk, 2015).

Manifestasi di daerah kaki Gunung Endut berupa kemunculan mata air panas di lokasi Cikawah 1 dan Cikawah 2 yang memiliki suhu permukaan pada kisaran $53-88^{\circ}\text{C}$, serta Handeuleum dengan suhu sekitar 57°C , telah diidentifikasi oleh ESDM (2010). sebagai bagian dari sistem panas bumi. Sesar mendatar dan sesar normal yang berorientasi dominan ke arah timurlaut–baratdaya diinterpretasikan sebagai jalur pergerakan utama yang mengontrol kemunculan manifestasi panas bumi di kawasan Cikawah, sedangkan sesar berarah baratlaut–tenggara diduga berperan dalam mengontrol kemunculan manifestasi di daerah Handeuleum.



Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian

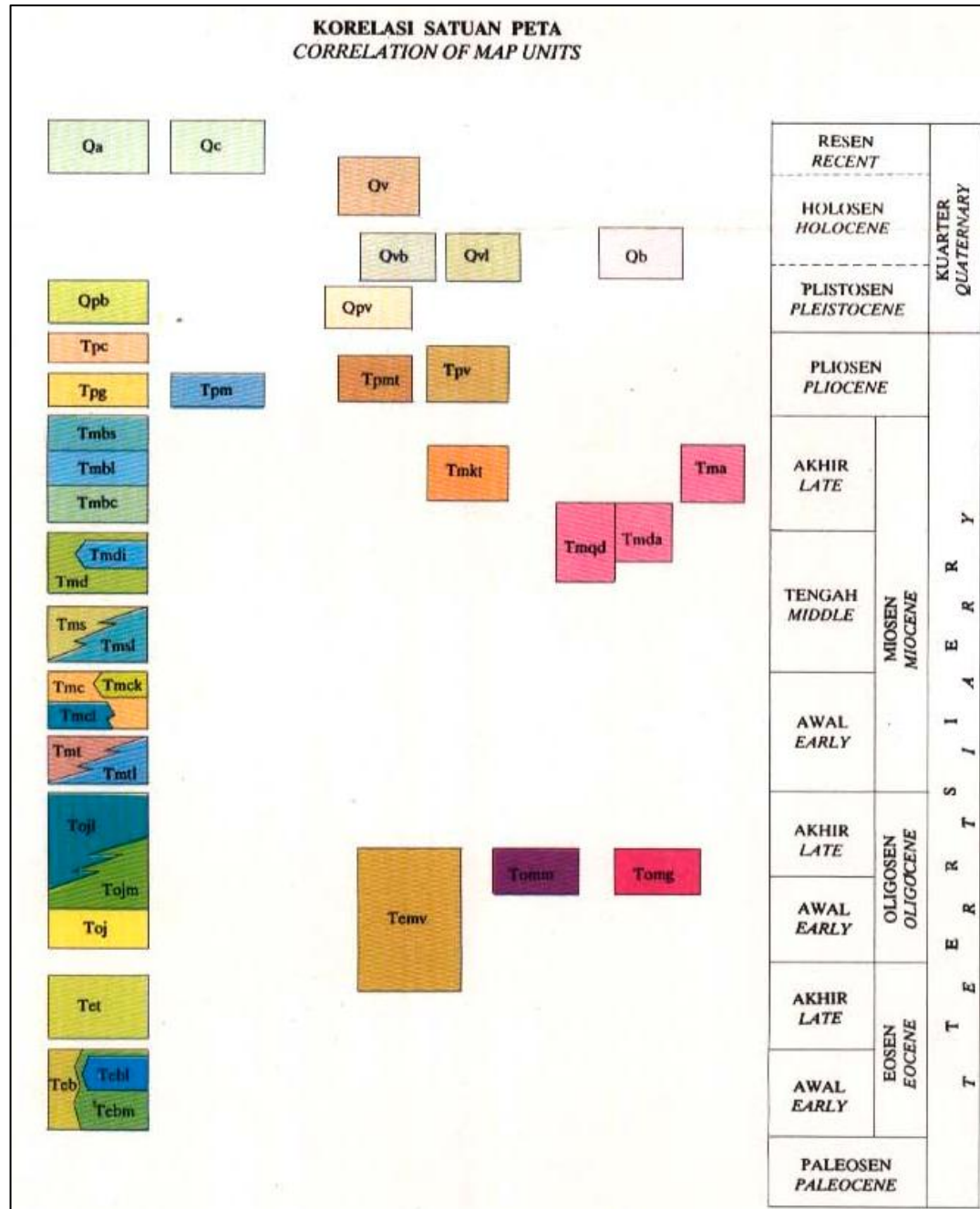
2.5. Stratigrafi Regional

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Leuwidamar yang disusun oleh Sujatmiko dan Santoso (1992), wilayah sekitar Gunung Endut tersusun atas beberapa satuan batuan yang terbentuk sejak Miosen Awal hingga Holosen. Urutan stratigrafi di daerah ini menunjukkan bahwa satuan batuan tertua adalah Formasi Camapag (Tmc) yang berumur Miosen Awal. Formasi ini diendapkan pada lingkungan laut dangkal hingga laut dalam dan tersusun atas batugamping yang disertai dengan napal serta batulempung sebagai litologi penyusunnya. Pembagian satuan batuan di wilayah penelitian dapat diurutkan dari yang paling muda hingga yang lebih tua berdasarkan karakteristik litologi dan umur pembentukannya sebagai berikut:

1. Batuan Gunung api Endut (Qpv), Terdiri atas satuan batuan breksi gunung api, lava, serta tuf berumur plistosen yang di endapkan di fasies gunung api medial.
2. Anggota Batulempung Formasi Bojongmanik (Tmbc), Diendapkan pada lingkungan laguna sampai laut, dan dicirikan dengan kehadiran
3. batulempung, batulempung pasir, dan lignit. Keberadaannya secara umum membentuk perselingan dengan batupasir dari Anggota Batupasir Formasi Bojongmanik.
4. Anggota Batugamping Formasi Bojongmanik (Tmbl), Menyisip di antara Anggota Batupasir dan Batulempung Formasi Bojongmanik yang membentuk perselingan. Diendapkan pada lingkungan laguna sampai laut, dan dicirikan dengan kehadiran batugamping dan batugamping pasir yang mengandung moluska.
5. Batuan Beku Andesit (Tma), Terdiri atas batuan beku intrusif berjenis andesit, andesit hornblende, andesit hipersten, batuan basal, diabas, serta andesit yang telah mengalami propilitisasi. Terbentuk pada miosen akhir dengan mengintrusi Formasi Cimapag (Tmc) pada fasies gunung api medial.
6. Anggota Batulempung Formasi Sareweh (Tms), terendapkan dalam ketidakselarasan di atas Formasi Cimapag pada kala Miosen Awal. Anggota Batulempung terbentuk di tahapan akhir setelah Anggota Batugamping.
7. Formasi Cimapag (Tmc), Terbentuk di Miosen Awal pada lingkungan laut dangkal sampai darat. Dicitakan sedimen gunung api yang terdiri dari breksi

atau konglomerat, lava, urat kuarsa, dan batuan teralterasi. Memiliki anggota batugamping yang dicirikan dengan litologi batugamping, napal, dan batulempung.

8. batulempung, batulempung pasiran, dan lignit. Keberadaannya secara umum membentuk perselingan dengan batupasir dari Anggota Batupasir Formasi Bojongmanik.
9. Anggota Batugamping Formasi Bojongmanik (Tmbl), Menyisip di antara Anggota Batupasir dan Batulempung Formasi Bojongmanik yang membentuk perselingan. Diendapkan pada lingkungan laguna sampai laut, dan dicirikan dengan kehadiran batugamping dan batugamping pasiran yang mengandung moluska.
10. Anggota Batulempung Formasi Sareweh (Tms) diendapkan secara tidak selaras di atas Formasi Cimanggis yang berumur Miosen Awal. Anggota Batulempung terbentuk di tahapan akhir setelah Anggota Batugamping.
11. Formasi Cimapag (Tmc), Terbentuk di Miosen Awal pada lingkungan laut dangkal sampai darat. Satuan ini dicirikan oleh material vulkanik seperti breksi, konglomerat, lava, dan tuf, serta batuan sedimen yang telah mengalami alterasi. Memiliki anggota batugamping yang dicirikan dengan litologi batugamping, napal, dan batulempung.



Gambar 4. Kolom stratigrafi pada peta geologi lembar Leuwidamar (Sujatmiko dan S. Santosa, 1992).

2.6. Sistem Panasbumi

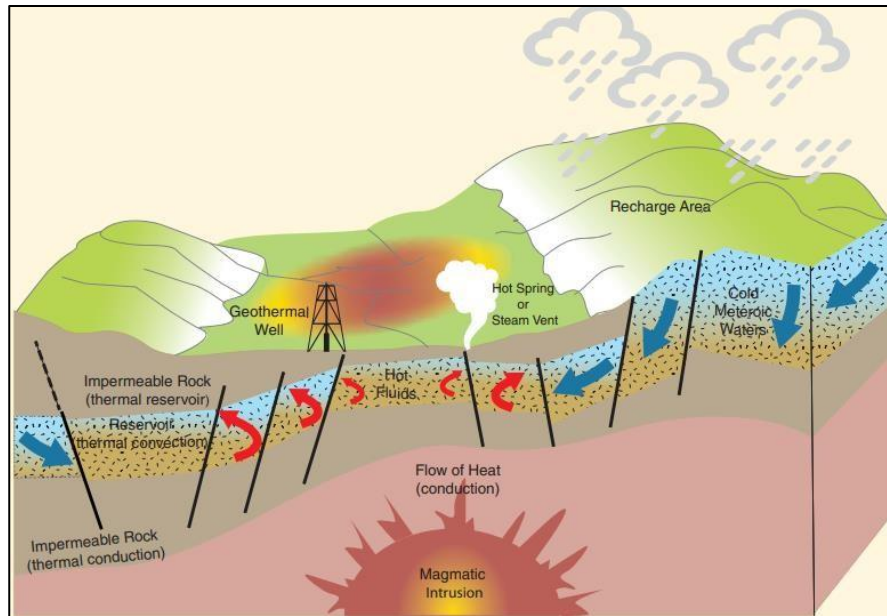
Panas bumi terbentuk akibat aktivitas vulkanisme dan magmatisme yang dipengaruhi oleh tektonik lempeng. Panas yang bersumber dari bawah permukaan bumi mengalami transport secara konduktif ke batuan, atau secara konveksi melalui fluida di sekitarnya sehingga menjadi sumber daya ekonomis yang dapat

dieksploitasi untuk memenuhi kebutuhan akan energi. Skema perpindahan panas dengan fluida sebagai media transportasi sangat erat kaitannya dengan alterasi hidrotermal.

Energi panas bumi adalah energi termal yang terbentuk secara alami di dalam bumi dan berpindah melalui dua mekanisme utama, yaitu konduksi langsung dan aliran fluida (Suparno, 2009). Kawasan panas bumi (*geothermal area* atau *geothermal field*) didefinisikan sebagai suatu wilayah di permukaan bumi yang menyimpan energi panas dengan karakteristik kondisi geologi dan hidrologi tertentu. Sementara itu, sistem panas bumi merupakan suatu kesatuan yang melibatkan interaksi antara fluida dan batuan bersuhu tinggi, baik yang terjadi secara alami di lapangan maupun yang dikaji dalam skala laboratorium (Santoso, 2004).

Perpindahan panas secara konduksi terjadi dengan cara merambat melalui media padat, seperti material batuan, sedangkan mekanisme konveksi berlangsung akibat pergerakan fluida, khususnya air. Mekanisme konveksi dipengaruhi oleh perbedaan densitas yang disebabkan oleh perubahan suhu. Air yang mengalami pemanasan akan menjadi lebih ringan sehingga bergerak naik, sedangkan air yang lebih dingin dan lebih rapat akan bergerak turun akibat gaya gravitasi. Proses ini menghasilkan sirkulasi fluida yang dikenal sebagai arus konveksi dalam sistem panas bumi (Saptadji, 2001).

Untuk bisa menghasilkan sumber daya panas yang bernilai ekonomis dan dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi, perlu adanya sebuah sistem panas bumi yang ideal. Elemen-elemen penyusun sistem panas bumi secara umum terdiri atas lima komponen pokok yang saling berkaitan (Gambar 5).



Gambar 5. Skema sistem panas bumi (Dickson & Fanelli, 2004).

2.6.1. Sumber Panas

Terbentuknya sistem panas bumi membutuhkan keberadaan sumber panas yang berfungsi sebagai penggerak sirkulasi fluida hidrotermal yang berwujud campuran antara uap dan air. Temperatur bumi yang semakin dalam mengalami peningkatan suhu merupakan sumber panas utama dalam sistem panas bumi. Panas dari bawah permukaan menghasilkan arus konveksi yang mendorong aktivitas vulkanisme dan magmatisme. Energi panas kemudian ditransfer ke fluida di sekitarnya sehingga menghasilkan fluida hidrotermal yang bergerak melalui rekahan dan pori-pori batuan.

2.6.2. Batuan Reservoir

Batuan reservoir merupakan lapisan batuan dengan tingkat porositas dan permeabilitas yang memadai, sehingga mampu menyimpan sekaligus mengalirkan fluida hidrotermal. Energi panas yang ditransfer secara konduktif pada lingkungan

aktivitas tektonik lempeng diperkuat oleh pergerakan magma serta aliran hidrotermal sehingga terbentuk zona reservoir hidrotermal. Reservoir berfungsi sebagai tempat akumulasi fluida panas, baik dalam bentuk air maupun uap. Zona reservoir terbentuk akibat pengaruh aktivitas tektonik dan pergerakan magma yang diikuti oleh sirkulasi fluida hidrotermal di bawah permukaan. Agar dapat berfungsi secara optimal, batuan reservoir perlu memiliki tingkat porositas dan permeabilitas yang tinggi, dengan dimensi atau kapasitas yang memadai, temperatur yang tinggi, serta ketersediaan fluida yang mencukupi.

2.6.3. Caprock

Caprock merupakan lapisan batuan yang terletak di atas zona reservoir dan berfungsi sebagai penutup yang menghambat keluarnya fluida hidrotermal ke permukaan. Lapisan ini memiliki sifat permeabilitas yang sangat rendah atau bersifat impermeabel, sehingga mampu menahan akumulasi fluida panas di bawahnya. Secara umum, caprock tersusun atas batuan hasil alterasi hidrotermal, seperti lempung, illit, dan smektit, yang terbentuk sebagai hasil dari proses interaksi kimiawi antara fluida bersuhu tinggi dengan batuan induk di sekitarnya. Keberadaan caprock sangat penting dalam menjaga kestabilan sistem panas bumi serta memastikan fluida tetap terperangkap di dalam reservoir.

2.6.4. Struktur Geologi

Struktur geologi seperti sesar dan rekahan, memiliki peran penting dalam keberlangsungan sistem panas bumi, mengingat fungsinya sebagai jalur utama pergerakan fluida hidrotermal yang mengalir dari zona sumber panas menuju reservoir dan selanjutnya ke permukaan. Sesar umumnya membentuk zona rekahan yang bersifat permeabel, sehingga memungkinkan fluida panas bergerak naik ke permukaan. Namun, dalam kondisi tertentu, sesar tersebut juga dapat berperan sebagai penghalang aliran fluida apabila terisi oleh material alterasi yang bersifat impermeabel.

2.6.5. Recharge Area

Recharge area merupakan zona tempat masuknya air meteorit, seperti air hujan, atau air permukaan, ke dalam sistem bawah permukaan. Air tersebut meresap melalui pori-pori dan rekahan batuan, kemudian bergerak menuju bagian yang lebih dalam melalui struktur geologi yang berkembang. Proses ini berperan penting dalam menjaga ketersediaan fluida dalam sistem panas bumi.

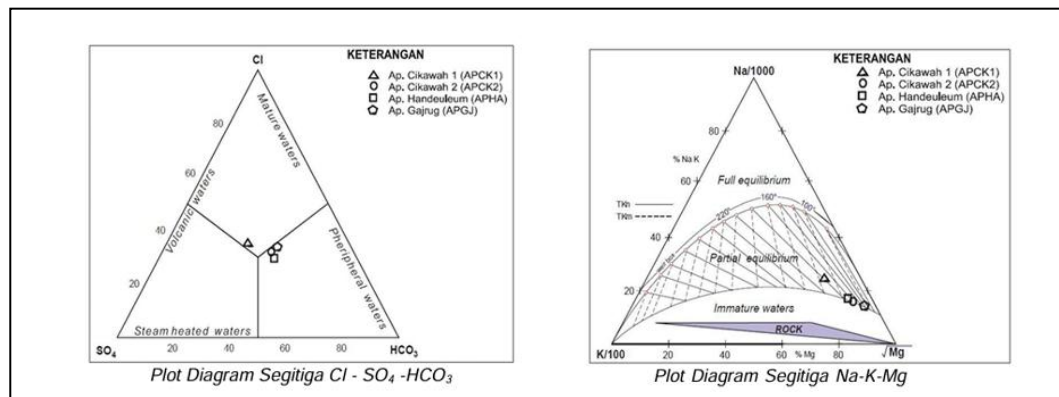
Muffler (1987) mengelompokkan sistem panas bumi berdasarkan temperatur reservoir menjadi beberapa kategori, yaitu:

1. Sistem panas bumi bersuhu rendah ($< 90^{\circ}\text{C}$)
2. Sistem panas bumi bersuhu menengah ($90 - 150^{\circ}\text{C}$)
3. Sistem panas bumi bersuhu tinggi ($> 150^{\circ}\text{C}$)
4. Sistem panas bumi superkritis ($> 374^{\circ}\text{C}$)

2.7. Geokimia Daerah Penelitian

Kawasan panas bumi Gunung Endut secara administratif terletak di Kabupaten Lebak, Provinsi Banten, pada jarak sekitar 40 km di sebelah selatan Kota Rangkasbitung (Sobirin dkk., 2017). Berdasarkan analisis geokimia yang ditunjukkan pada Gambar 6, diagram $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$, sampel air panas di Cikawah termasuk dalam tipe klorida, sedangkan manifestasi di Handeuleum termasuk dalam tipe bikarbonat. Air bertipe klorida umumnya berkaitan dengan fluida yang berasal dari reservoir atau zona upflow, sedangkan tipe bikarbonat menunjukkan adanya proses pencampuran dengan air meteorit pada zona outflow (Idral dkk., 2023).

Kemunculan manifestasi tersebut menjadi indikasi bahwa aktivitas sistem panas bumi yang masih terus berlangsung pada kedalaman di bawah permukaan bumi dan berkaitan erat dengan kondisi geologi vulkanik setempat. Analisis komposisi kimia fluida juga dilakukan menggunakan plot segitiga Na-K-Mg guna mengidentifikasi kondisi equilibrium fluida terhadap batuan reservoir. Fluida yang berada pada kondisi kesimbangan atau kesetimbangan parsial menunjukkan interaksi yang cukup lama dengan batuan reservoir sebelum fluida muncul di permukaan (Giggenbach, 1988).



Gambar 6. Diagram Cl – SO₄ – HCO₃ dan diagram Cl – Li – B

Hasil analisis geokimia menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki kualitas sangat baik dengan nilai Ion Balance (IB) kurang dari 5% (Sobirin et al., 2017). Diagram Cl-SO₄-HCO₃ menunjukkan bahwa Cikawah 1 bertipe klorida, sedangkan Cikawah 2, Handeuleum, dan Gajrug bertipe bikarbonat. Air bertipe bikarbonat umumnya terbentuk pada daerah marginal atau dekat permukaan akibat proses kondensasi uap dan interaksi dengan air tanah yang kaya CO₂ (Giggenbach, 1988). Diagram Cl-Li-B menunjukkan rasio B/Cl dan Li/Cl yang rendah, yang secara umum mengindikasikan zona outflow.

Berdasarkan perhitungan geotermometer SiO₂ dan Na/K, temperatur reservoir diperkirakan berada pada kisaran 162–180°C, sedangkan suhu permukaan hanya berkisar antara 53–88°C. Perbedaan ini menunjukkan bahwa fluida telah mengalami proses pendinginan dan pencampuran selama perjalanannya menuju permukaan. Dengan demikian, sistem panas bumi Gunung Endut diklasifikasikan sebagai sistem berentalpi menengah dengan fluida yang telah mengalami interaksi fluida–batuan serta pencampuran dengan air meteorit sebelum muncul sebagai manifestasi di permukaan (Idral dkk., 2023).

2.8. Penelitian Terdahulu

Idral dkk, 2023 mengkaji potensi sumber daya panas bumi di wilayah Gunung Endut, Banten, dengan menggunakan pendekatan terpadu yang melibatkan aspek geologi, geokimia, dan geofisika. Hasil penelitian menunjukkan bahwa manifestasi panas bumi di Cikawah dan Handeuleum memiliki suhu permukaan antara 53°C hingga 88°C

dengan Ph netral, serta suhu bawah permukaan hasil perhitungan geotermometer SiO_2 dan Na-K berkisar 162-180°C, yang tergolong sistem panas bumi enthalpi menengah. Secara geologi, daerah ini tersusun atas batuan vulkanik Kuartar Gunung Endut (breksi, lava, dan tufa) serta batuan sedimen Formasi Cimapag, Sareweh, dan Bojongmanik. Struktur geologi utama berupa sesar berarah NE-SW dan NW-SE yang mengontrol munculnya manifestasi panas bumi. Berdasarkan hasil integrasi metode gravitasi, geomagnet, dan resistivitas, ditemukan indikasi adanya intrusi batuan di bawah zona manifestasi yang diinterpretasikan sebagai sumber panas. Dari hasil analisis terpadu, sistem panas bumi Gunung Endut memiliki luas prospek sekitar 4,5 km² dengan estimasi potensi energi sekitar 60 MWe, di mana Cikawah merupakan zona *upflow* dan Handeuleum merupakan zona *outflow*.

Rhamadania, 2012 melakukan penelitian untuk mengkaji sebaran distribusi struktur geologi bawah permukaan di wilayah Gunung Endut dengan memanfaatkan data gayaberas hasil pengukuran lapangan. Proses pengolahan data meliputi koreksi medan, koreksi udara bebas (*free-air correction*), serta koreksi Bouguer, yang keseluruhannya menghasilkan nilai anomali Bouguer lengkap (*complete Bouguer anomaly*). Hasil pengolahan tersebut selanjutnya dianalisis melalui pembuatan peta kontur anomali dan pemodelan 2D untuk menginterpretasikan sebaran densitas batuan bawah permukaan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa daerah Gunung Endut tersusun atas batuan vulkanik Kuartar dan batuan sedimen Miosen yang telah mengalami alterasi akibat aktivitas hidrotermal. Nilai anomali Bouguer tinggi diinterpretasikan sebagai keberadaan batuan beku intrusif dengan densitas tinggi yang diduga menjadi sumber panas sistem geotermal, sedangkan anomali rendah mengindikasikan zona batuan teralterasi dan rekahan yang berfungsi sebagai zona reservoir dan jalur fluida panas bumi. Hasil pemodelan 2D juga mengidentifikasi beberapa sesar berorientasi baratlaut–tenggara serta timurlaut–baratdaya yang berperan dalam mengendalikan kemunculan manifestasi panas bumi di daerah Cikawah dan Handeuleum.

Rangga Zanuvar, 2009 melakukan penelitian berjudul “Pemodelan 2 Dimensi Data Magnetotellurik di Daerah Panas Bumi Gunung Endut, Banten” untuk memetakan dan mengidentifikasi struktur bawah permukaan beserta karakteristik sistem panas bumi yang ada. Hasil dari pemodelan inversi 2D menunjukkan keberadaan tiga lapisan utama, yaitu lapisan batuan penutup beresistivitas tinggi, lapisan lempung alterasi beresistivitas rendah sebagai *cap rock*, dan lapisan beresistivitas menengah yang berfungsi sebagai zona reservoir pada kedalaman 700–1200 meter. Selain itu, keberadaan intrusi magmatik dengan resistivitas tinggi di bagian barat daya daerah penelitian diinterpretasikan sebagai sumber panas sistem geotermal. Zona prospek panas bumi seluas 7,5 km² berada di sekitar manifestasi Cikawah dengan pola aliran fluida ke arah timur laut. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam memahami struktur bawah permukaan serta mendukung analisis pemodelan dua dimensi di wilayah WKP Gunung Endut.

III. TEORI DASAR

3.1. Metode Gayaberat

Metode gayaberat merupakan salah satu metode dalam geofisika yang digunakan untuk mengukur variasi medan gravitasi di permukaan bumi. Perubahan nilai gravitasi yang terukur tersebut dipengaruhi oleh perbedaan densitas batuan yang terdapat di bawah permukaan, jenis material penyusun, jarak terhadap pusat bumi, serta kondisi topografi wilayah pengamatan (Sarkowi, 2014). Menurut Djudjun (2005), metode ini memiliki peran penting dalam berbagai kajian geologi, khususnya dalam pemetaan kondisi bawah permukaan. Prinsip dasar metode gayaberat berkaitan dengan gaya tarik-menarik antar massa, di mana besarnya massa suatu benda akan menentukan besar gaya gravitasi yang dihasilkan. Metode ini sangat efektif dalam mengidentifikasi struktur geologi kedalaman bawah permukaan sebab metode ini sensitif terhadap perbedaan densitas di antara berbagai jenis batuan. Perbedaan densitas ini merepresentasikan adanya perbedaan kondisi geologi pada lapisan bawah permukaan. Oleh karena itu, persebaran densitas yang bersifat heterogen dapat diinterpretasikan sebagai indikasi keberadaan struktur geologi, seperti sesar maupun zona rekahan (Setiadi dkk., 2014).

3.2. Konsep Dasar Gayaberat

3.2.1. Gayaberat Newton

Prinsip dasar metode gayaberat berlandaskan pada hukum gravitasi Newton, yang menyatakan bahwa setiap dua benda bermassa akan tarik-menarik terpisah pada jarak tertentu. Besarnya gaya tersebut bergantung pada massa kedua benda dan jarak di antara keduanya dapat dirumuskan sebagai berikut (Serway Jewett, 2009):

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

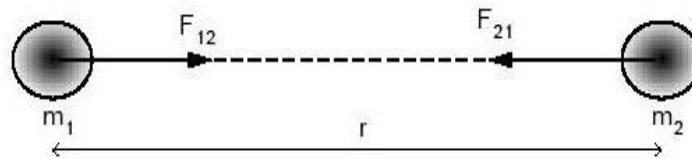
Dimana:

F : Gaya tarik menarik (N)

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

r^2 : Jarak antara dua buah benda (m)

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



Gambar 7. Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009).

3.2.2. Percepatan Gayaberat

Hukum kedua Newton menjelaskan hubungan antara gaya, massa, dan percepatan, di mana besar gaya yang bekerja pada suatu benda berbanding lurus terhadap massa benda dan percepatan yang ditimbulkannya. Dalam konteks gaya gravitasi, percepatan gravitasi dapat dinyatakan sebagai hasil pembagian antara gaya gravitasi dan massa benda. Dengan demikian, hubungan matematis antara gaya dan percepatan gravitasi dapat dituliskan sebagai:

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

Persamaan (2) di atas dapat disusun ulang menjadi:

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

Apabila pada massa persamaan tersebut dinyatakan sebagai m , sementara massa pada persamaan sebelumnya dinyatakan sebagai M , maka dengan mensubstitusikan persamaan (1) ke dalam persamaan (2) akan diperoleh persamaan sebagai berikut

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{1}{m} \vec{F} = \frac{1}{m} \left(G \frac{Mm}{r^2} \hat{r} \right) \quad (4)$$

$$\vec{g} = G \frac{M}{r^2} \hat{r} \quad (5)$$

Keterangan:

\vec{g} : percepatan tarik bumi (m/s^2)

- M : massa bumi (kg)
 m : massa benda (kg)
 \vec{F} : gaya tarik bumi (N)
 \hat{r} : jari-jari bumi (km)
 r^2 : vector satuan arah

Persamaan (4) menunjukkan bahwa \vec{g} merupakan percepatan gravitasi bumi atau medan gravitasi. Pada persamaan tersebut, M merepresentasikan massa bumi dalam satuan kilogram, r adalah jarak dari pusat bumi dalam satuan meter, sedangkan G merupakan konstanta gravitasi universal yang bernilai sekitar $6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$.

Mengacu pada persamaan (4), nilai percepatan gravitasi rata-rata yang terdapat di permukaan bumi berada pada rentang $9,6 \text{ m/s}^2$ hingga 10 m/s^2 . Pengukuran percepatan gravitasi untuk pertama kalinya dilakukan oleh Galileo, sehingga satuan percepatan gravitasi selain dapat dinyatakan dalam sistem MKS (m/s^2), juga dapat dinyatakan dalam sistem CGS (cm/s^2) yang dikenal dengan sebutan gal atau mGal.

Upaya pertama untuk mengukur besaran percepatan gayaberat di bumi dilakukan oleh Galileo, kemudian didefinisikan pada persamaan (6).

$$1 \text{ Gal} = 1 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} = 10^{-2} \text{ m/s}^2 \text{ (dalam c.g.s)} \quad (6)$$

Untuk pengukuran yang lebih sensitif, percepatan gravitasi biasanya dinyatakan dalam miligal (mGal), seperti ditunjukkan pada persamaan (7) dan (8), karena perubahan yang terdeteksi oleh alat ukur sangat kecil.

$$1 \mu\text{Gal} = 10^{-3} \text{ mGal} = 10^{-6} \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2 \quad (7)$$

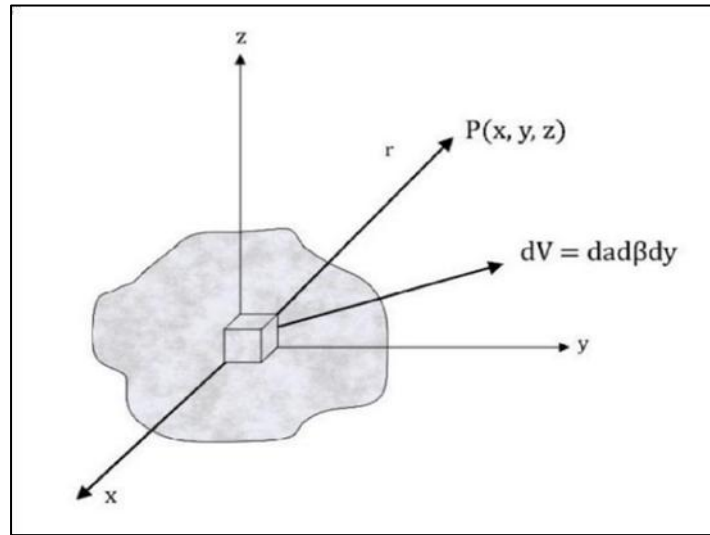
$$1 \text{ mGal} = 10 \text{ g.u} = 10^{-5} \text{ m/s}^2 \quad (8)$$

Dalam kerangka sistem satuan MKS, nilai percepatan gravitasi dapat dinyatakan dalam satuan m/s^2 atau $\mu\text{m/s}^2$.

3.2.3. Potensial Gayaberat

Potensial gayaberat merupakan energi yang berkaitan dengan posisi suatu massa

dalam medan gravitasi. Adanya massa pada suatu titik dalam ruang akan menimbulkan medan potensial di seluruh daerah sekitarnya. Medan ini dikategorikan sebagai medan konservatif, yang berarti usaha yang dilakukan di dalam medan gayaberasat tidak dipengaruhi oleh jalur pergerakan yang dilalui, melainkan hanya ditentukan oleh posisi awal dan posisi akhir benda (Rosid, 2005).



Gambar 8. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi (Maulana, 2012).

Apabila terdapat distribusi massa dalam ruang tiga dimensi yang memiliki bentuk tidak beraturan dan dapat direpresentasikan sebagai sebaran rapat massa $\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)$, maka besaran potensial gayaberasat pada titik P (x, y, z) dapat dituliskan sebagai,

$$U(x, y, z) = G \iiint \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (9)$$

Medan gayaberasat akibat yang ditimbulkan oleh adanya distribusi massa dapat diperoleh melalui proses diferensiasi persamaan potensial terhadap variabel x, y dan z yang menghasilkan,

$$\Delta g_x(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty U \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(x-\alpha)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (10)$$

$$\Delta g_y(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(x-\beta)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (11)$$

$$\Delta g_z(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(x-\gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{\frac{3}{2}}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (12)$$

Berdasarkan persamaan (12), besaran medan gayaberat Δg di permukaan bumi menunjukkan variasi yang ditentukan oleh sebaran massa pada lapisan bawah permukaan. Perubahan medan gayaberat tersebut dipengaruhi oleh kontras densitas antar batuan yang direpresentasikan melalui fungsi densitas. Sementara itu, kondisi topografi permukaan bumi yang sebenarnya turut diperhitungkan dalam proses integrasi pada perhitungan tersebut (Sarkowi, 2007).

3.2.4. Densitas Batuan

Densitas atau massa jenis batuan merupakan salah satu parameter fisika yang sangat penting dalam metode gayaberat. Nilai densitas tersebut dibutuhkan dalam perhitungan anomali Bouguer, terutama untuk menentukan densitas rata-rata pada wilayah penelitian. Nilai densitas batuan dapat bervariasi dipengaruhi beberapa faktor, antara lain tingkat porositas, kondisi tekanan, serta proses pelapukan yang berlangsung pada batuan (Brotopuspito, 2001).

Tabel 1. Nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
<i>Overburden</i>		1,92
<i>Soil</i>	1,20-2,40	1,92
<i>Clay</i>	1,63-2,60	2,21
<i>Gravel</i>	1,70-2,40	2,00
<i>Sand</i>	1,70-2,30	2,00
<i>Sandstone</i>	1,61-2,76	2,35
<i>Shale</i>	1,77-3,20	2,40
<i>Limestone</i>	1,93-2,90	2,55
<i>Dolomit</i>	2,28-2,90	2,70
<i>Loess</i>	1,40-1,93	1,64
<i>Silt</i>	1,80-2,20	1,93
<i>Chalk</i>	1,53-2,60	2,01

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
<i>Halite</i>	2,10-2,60	2,22
<i>Glacier Ice</i>	0,88-0,92	0,90
<i>Rhyolite</i>	2,35-2,70	2,52
<i>Andesit</i>	2,40-2,80	2,61
<i>Granite</i>	2,50-2,81	2,64
<i>Granodiorite</i>	2,67-2,79	2,73
<i>Porphyry</i>	2,60-2,89	2,74
<i>Quartz diorite</i>	2,62-2,96	2,79
<i>Diorite</i>	2,72-2,99	2,85
<i>Lavas</i>	2,80-3,00	2,90
<i>Diabase</i>	2,50-3,20	2,91
<i>Basalt</i>	2,70-3,30	2,99
<i>Gabbro</i>	2,70-3,50	3,03
<i>Peridotite</i>	2,78-3,37	3,15
<i>Syenite</i>	2,60-2,95	2,77
<i>Acid igneous</i>	2,30-3,11	2,61
<i>Basic igneous</i>	2,09-3,17	2,79
<i>Quartzite</i>	2,50-2,70	2,60
<i>Schists</i>	2,39-2,90	2,64
<i>Graywacke</i>	2,60-2,70	2,65
<i>Marble</i>	2,60-2,90	2,75
<i>Serpentine</i>	2,40-3,10	2,78
<i>Slate</i>	2,70-2,90	2,79
<i>Gneiss</i>	2,59-3,00	2,80
<i>Amphibolite</i>	2,90-3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,20-3,54	3,37
<i>Phyllite</i>	2,68-2,80	2,74
<i>Granulite</i>	2,52-2,70	2,65

3.3. Koreksi–Koreksi dalam Metode Gayaberat

3.3.1. Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)

Koreksi lintang perlu dilakukan karena bentuk bumi sesungguhnya tidaklah bulat sempurna, melainkan berbentuk elipsoid, sehingga terdapat perbedaan jari-jari antara wilayah khatulistiwa dan kutub. Kondisi ini menyebabkan nilai percepatan gravitasi di daerah kutub cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan daerah khatulistiwa. Selain itu, rotasi bumi turut mempengaruhi variasi nilai gravitasi tersebut. Koreksi lintang (g_θ) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Blakely, 1996).

$$(g_\theta) = 978032,7(1 + 0,0053024 \sin^2\theta - 0,0000058 \sin^2\theta) \quad (13)$$

Mengacu pada persamaan (13), semakin tinggi nilai lintang suatu lokasi, maka semakin besar nilai percepatan gravitasi yang terukur akan semakin tinggi, sehingga medan gravitasi secara umum menunjukkan nilai yang lebih tinggi di kawasan kutub (Sarkowi, 2014).

3.3.2. Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Pengukuran gayaberat yang dilaksanakan pada ketinggian tertentu di atas permukaan laut akan menghasilkan nilai percepatan gravitasi yang lebih rendah di bandingkan dengan nilai pada permukaan referensi (*mean sea level*). Oleh karena itu, koreksi udara bebas perlu diterapkan guna menghilangkan pengaruh faktor ketinggian terhadap nilai gravitasi yang diperoleh dari hasil pengukuran (Syamsuriadi, 2013). Menurut Brotopuspito (2001), besar koreksi udara bebas dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$FAC = 0,3086 h \quad (14)$$

FAC : *Free Air Correction*

h : Ketinggian (m)

Nilai anomali udara bebas (*Free Air Anomaly*), dapat diperoleh melalui persamaan

berikut:

$$FAA = g_{obs} - g_{\varphi} + 0,3086 h \quad (15)$$

FAA : *Free Air Anomaly*

g_{obs} : Gravitasi Observasi

3.3.3. Koreksi Bouguer

Dalam pengolahan data gayaberas, koreksi Bouguer digunakan untuk menghilangkan kontribusi gravitasi akibat massa batuan yang terletak di antara titik penelitian dan bidang acuan. Nilai koreksi tersebut diperoleh melalui persamaan berikut:

$$BC = 2\pi G\rho h \quad (16)$$

Dengan nilai konstanta $2\pi G = 0,04191$, maka persamaan tersebut dapat dinyatakan menjadi:

$$BC = 0,04191\rho \quad (17)$$

dimana,

BC : *Bouguer Correction* (mGal/m)

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

ρ : Rapat massa batuan rata-rata ($2,67 \text{g/cm}^3$)

h : Ketinggian (m)

3.3.5. Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi medan diperlukan untuk memperhitungkan pengaruh variasi topografi di sekitar lokasi pengamatan, seperti keberadaan perbukitan maupun lembah yang dapat mempengaruhi nilai gravitasi. Topografi yang tidak merata dapat menyebabkan nilai gravitasi menjadi lebih rendah atau lebih tinggi dari kondisi sebenarnya. Koreksi medan dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi massa batuan di sekitar titik pengamatan agar nilai gravitasi yang diperoleh menjadi lebih akurat (Dobrin & Savit, 1960).

Koreksi medan diterapkan untuk meninjau kembali pengaruh ketidakseragaman distribusi massa batuan di sekitar lokasi pengamatan. Pada proses koreksi Bouguer, titik observasi dianggap berada pada suatu bidang datar yang luas sehingga variasi topografi tidak diperhitungkan. Namun, kondisi lapangan yang sebenarnya umumnya menunjukkan keberadaan bentuk muka bumi yang beragam, seperti perbukitan, lembah, maupun perubahan elevasi lainnya yang dapat memengaruhi nilai gravitasi hasil pengukuran. Meskipun koreksi Bouguer telah dilakukan, pengaruh massa batuan di sekitar titik pengamatan, baik yang berada di atas maupun di bawah permukaan. Oleh karena itu, koreksi medan diperlukan untuk memperhitungkan efek topografi yang tidak beraturan sehingga nilai gravitasi yang diperoleh menjadi lebih representatif terhadap kondisi sebenarnya. Jika daerah pengukuran memiliki topografi yang relatif datar, maka pengaruh koreksi medan dapat diabaikan. Sebaliknya, pada daerah dengan relief yang kompleks, seperti adanya perbukitan atau lembah, koreksi ini menjadi sangat penting untuk diterapkan (Susilawati, 2005).

Jika kondisi topografi di area penelitian cukup datar, maka koreksi medan tidak perlu diterapkan. Besarnya koreksi medan dapat ditentukan melalui persamaan tertentu:

$$g = \frac{0,04193}{n} \rho \{(r_2 - r_1) + \sqrt{r_2^2 + L^2} - \sqrt{r_1^2 + L^2}\} \quad (18)$$

Dimana:

- g : Respons gayaberat (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)

Perhitungan koreksi medan dapat dilakukan dengan menggunakan alat bantu berupa lembar transparan yang dikenal sebagai *Hammer Chart*, yang diletakkan di

atas peta topografi. Metode ini bekerja dengan membagi area pengamatan menjadi beberapa zona berbentuk cincin konsentris di sekitar titik pengukuran, sehingga kontribusi massa batuan dari setiap zona dapat dihitung secara sistematis.

3.3.4. Anomali Bouguer Lengkap

Anomali bouguer lengkap merupakan selisih antara nilai gayaberat hasil pengukuran di lapangan dan nilai gravitasi teoritis yang telah melalui tahap koreksi yang meliputi koreksi *drift*, koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi Bouguer, dan koreksi medan. Besarnya anomali ini dipengaruhi oleh variasi distribusi densitas batuan di bawah permukaan. Kehadiran batuan dengan densitas lebih tinggi yang berada pada medium berdensitas lebih rendah akan menimbulkan anomali positif, sedangkan batuan yang memiliki densitas lebih rendah daripada lingkungan sekitarnya cenderung menimbulkan anomali negatif (Reynolds, 1997).

Menurut Hinze (2013), anomali Bouguer didefinisikan sebagai perbedaan antara nilai gravitasi terukur dan gravitasi teoritis pada suatu titik pengamatan. Nilai anomali tersebut mencerminkan perubahan distribusi massa batuan di bawah permukaan, baik secara horizontal maupun vertikal. Dalam eksplorasi geofisika, analisis anomali Bouguer berperan penting karena mampu memberikan informasi mengenai variasi densitas batuan bawah permukaan. Oleh karena itu, anomali Bouguer banyak dimanfaatkan untuk mengidentifikasi struktur geologi serta pola penyebaran densitas batuan pada wilayah penelitian. Secara matematis, anomali Bouguer lengkap dapat dirumuskan dalam persamaan berikut (Brotopuspito, 2001):

$$BA = g_{obs} - g_{\phi} + FAC + BC + TC \quad (19)$$

dimana,

g_{obs} : Harga gayaberat pengukuran di titik tersebut

FAC : *Free Air Correction*/ koreksi udara bebas

BC : *Bouguer Correction*/ koreksi Bouguer

TC : *Terrain Correction*/ koreksi medan

Nilai anomali yang digunakan dalam tahap analisis merupakan nilai yang telah dikoreksi terhadap pengaruh elevasi titik pengamatan.

3.4. Analisis Spektrum

Analisis spektrum digunakan untuk memperkirakan kedalaman sumber penyebab anomali gayaberat di bawah permukaan. Metode ini memanfaatkan transformasi Fourier untuk mengubah data dari domain spasial ke domain frekuensi atau bilangan gelombang (Blakely, 1996). Hasil analisis spektrum kemudian digunakan sebagai dasar dalam penerapan filter *upward continuation*, yang bertujuan memisahkan anomali berdasarkan kedalaman sumbernya. Melalui transformasi Fourier, sinyal dapat diuraikan menjadi beberapa komponen gelombang dengan frekuensi yang berbeda-beda, sehingga distribusi anomali yang berasal dari sumber pada kedalaman tertentu dapat diidentifikasi. Komponen gelombang tersebut pada dasarnya merupakan representasi sinyal asli yang dinyatakan dalam domain frekuensi (Kadir, 2000).

Spektrum diperoleh dari distribusi medan potensial pada suatu bidang horizontal yang selanjutnya dianalisis menggunakan transformasi Fourier (Blakely, 1996):

$$F(U) = G\Delta\rho F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } \mathcal{F}\left(\frac{1}{r}\right) = 2\Delta\rho \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (20)$$

Dimana:

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

U : Besaran potensial gayaberat (m/s^2)

$\Delta\rho$: Perbedaan massa jenis (gr/cc)

G : Konstanta gayaberat ($\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$)

r : Jarak antar posisi (m)

Berdasarkan persamaan (20) maka diperoleh persamaan (21).

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi G \Delta \rho \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (21)$$

Transformasi Fourier anomali gayaberat pada lintasan dijelaskan pada persamaan (22), (23), dan (24).

$$F(g_z) = 1G \Delta \rho F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) \quad (22)$$

$$F(g_z) = G \Delta \rho \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (23)$$

$$F(g_z) = 2\pi G \Delta \rho e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (24)$$

Keterangan:

\vec{g}_z : nilai anomali gayaberat (mGal)

k : nilai bilangan gelombang (rad/m)

z_0 : elevasi titik pengamatan (m)

z_1 : kedalaman sumber anomali (m)

Jika distribusi densitas massa dianggap acak dan tidak menunjukkan keterkaitan dengan nilai anomali gayaberat, maka parameter $m=1$. Dalam kondisi tersebut, transformasi Fourier dari anomali gayaberat dapat dituliskan sebagai berikut:

$$A = C e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (25)$$

Dimana:

A = amplitudo (mGal)

C = konstanta

Untuk memperoleh hubungan antara amplitudo spektrum (A) dan bilangan gelombang (k) pada bawah permukaan, digunakan pendekatan logaritmik. Pendekatan ini menunjukkan bahwa nilai bilangan gelombang k memiliki hubungan linier terhadap amplitudo spektrum, sehingga persamaan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (26)$$

Persamaan yang diperoleh dari analisis spektrum dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan garis lurus, yaitu:

$$y = mx + c \quad (27)$$

Dengan demikian, kedalaman rata-rata sumber anomali dapat ditentukan melalui nilai kemiringan (*slope*) dari grafik tersebut (Hinze, dkk., 2010), yang dinyatakan sebagai:

$$z(k) = \frac{|slope|}{4\pi} \quad (28)$$

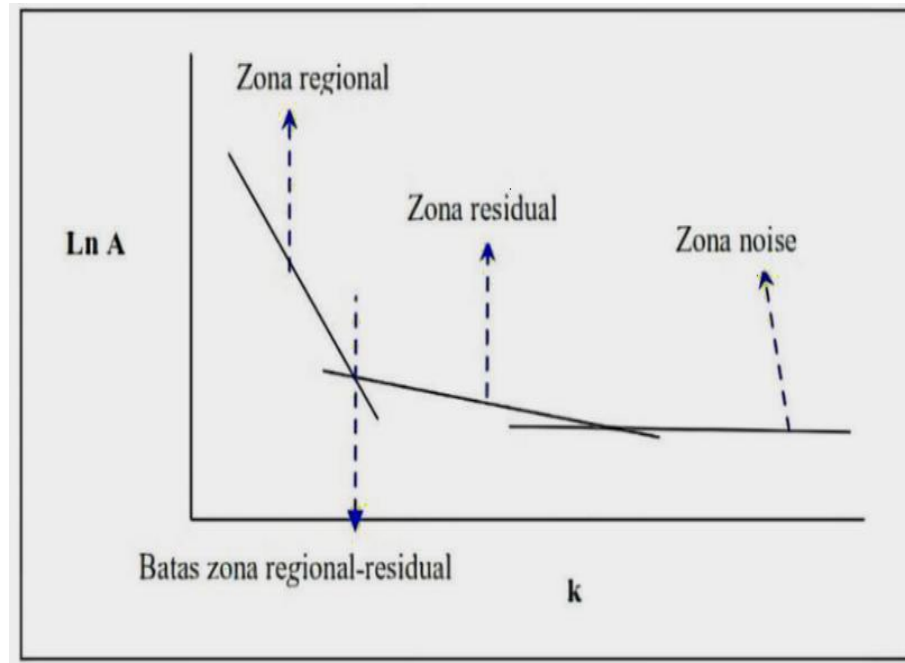
Pada persamaan, nilai $\ln A$ berfungsi sebagai sumbu y , $|k|$ sebagai sumbu x , sedangkan besaran $(z_0 - z_1)$ berperan sebagai kemiringan atau gradien. Karena gradien tersebut berkaitan langsung dengan kedalaman sumber penyebab anomali, dengan $|k|$ sebagai sumbu x didefinisikan dengan bilangan gelombang yang besarnya $\frac{2\pi}{\lambda}$ dengan satuan *cycle/meter*, dengan λ menyatakan panjang gelombang. Hubungan antara panjang gelombang dan interval spasial Δx dinyatakan pada persamaan (29).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{N\Delta x} \quad (29)$$

Nilai λ dipengaruhi oleh interval spasial Δx , namun terdapat faktor lain berupa konstanta pengali, sehingga $\lambda = N \cdot \Delta x$. Konstanta N didefinisikan sebagai lebar jendela, sehingga lebar jendela dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (30)$$

Parameter Δx merupakan jarak antar titik yang digunakan dalam proses *Fast Fourier Transform* (FFT), sedangkan k_c adalah bilangan gelombang batas *cutoff*. Nilai k , yang semakin besar frekuensi tinggi. Hubungan antara bilangan gelombang dan frekuensi sebagai $k = 2\pi f$, dimana frekuensi rendah berkaitan dengan anomali regional, sedangkan frekuensi tinggi mencerminkan anomali residual.



Gambar 10. Kurva $\ln A$ terhadap k (Blakely, 1996).

3.5. Filter *Upward Continuation*

Metode *Upward Continuation* merupakan salah satu teknik transformasi pada data medan potensial yang digunakan untuk memindahkan hasil pengukuran dari suatu bidang observasi ke bidang lain yang berada pada elevasi yang lebih tinggi (Telford, 1990). Metode ini bertujuan untuk memisahkan anomali berdasarkan kedalaman sumbernya, sehingga dapat membedakan antara komponen regional dan residual. Dengan melakukan transformasi ke ketinggian yang lebih besar, pengaruh sumber anomali yang dangkal akan semakin melemah dan tampak lebih halus, sedangkan kontribusi dari sumber yang lebih dalam menjadi lebih dominan. Secara matematis, prinsip *upward continuation* dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$U(x', y', z_0 - h) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\frac{h}{2\pi}}{\{(x-x')^2 + (y-y')^2 + h^2\}^{\frac{3}{2}}} U(x, y, z_0) \right) dx dy \quad (31)$$

$h > 0$, dengan $U(x', y', z_0 - h)$ merupakan nilai medan potensial pada bidang hasil *upward continuation* pada ketinggian h terhadap bidang permukaan yang besarnya medan $U(x, y, x_0)$ telah diketahui.

Dalam penerapannya, Dalam penerapannya, metode ini lebih efektif dilakukan dalam domain frekuensi karena nilai medan potensial pada setiap titik hasil transformasi harus diketahui secara pasti. Oleh karena itu, transformasi Fourier sering digunakan untuk mempermudah proses perhitungan (Blakely, 1995).

Secara matematis, proses *upward continuation* dalam domain frekuensi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$F(U_u) = F(U) \cdot F(\varphi_u) \quad (32)$$

Dimana,

$$\varphi_u(k) = e^{-zk} \quad (33)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, proses *upward continuation* menyebabkan terjadinya pelemahan amplitudo pada setiap bilangan gelombang (k) kecuali pada $k=0$. Nilai bilangan gelombang yang lebih besar akan mengalami atenuasi yang lebih signifikan dibandingkan nilai yang lebih kecil. Tingkat pelemahan ini akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya nilai ketinggian. Oleh karena itu, pemilihan nilai ketinggian dalam proses *upward continuation* harus diperhatikan dengan baik, karena nilai yang terlalu besar dapat mengurangi atau bahkan menghilangkan anomali yang berasal dari sumber yang menjadi target interpretasi.

3.6. *Second Vertical Derivative (SVD)*

Metode *Second Vertical Derivative (SVD)* diterapkan untuk memperjelas keberadaan anomali dangkal dengan cara mengurangi dominasi komponen regional. Melalui proses tersebut, struktur geologi bawah permukaan dapat diidentifikasi lebih mudah. Metode ini mengacu pada persamaan Laplace, secara luas digunakan dalam analisis distribusi anomali gayaberat pada permukaan bumi. Secara matematis, pendekatan SVD diperoleh dari persamaan Laplace untuk medan gayaberat di permukaan, sehingga dapat dinyatakan persamaan sebagai berikut.

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (34)$$

Atau:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (35)$$

Dengan demikian, turunan vertikal kedua (*second vertical derivative*) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} \right) \quad (36)$$

Persamaan SVD pada data gayaberat menunjukkan bahwa nilai turunan vertikal kedua memiliki besar yang sama dengan turunan horizontal kedua, tetapi dengan tanda yang berlawanan. Dalam interpretasi data gayaberat, turunan kedua dari anomali Bouguer sering dimanfaatkan untuk mengenali batas kontras densitas antar lapisan batuan. Secara geologi, nilai yang dihasilkan dapat membantu untuk mengungkap keberadaan struktur bawah permukaan, seperti sesar atau tubuh intrusi (Sarkowi, 2010). Perhitungan nilai SVD dapat dilakukan menggunakan berbagai jenis operator filter dua dimensi seperti pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Operator Henderson & Zietz (1949) .

Operator Filter SVD menurut Henderson & 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 3. Operator Elkins (1951).

Operator Filter SVD menurut Elkins (1951)				
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0,0000	-0,0334	1,0668	-0,0334	0,0000
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000

Tabel 4. Operator Rosenbach (1953).

Operator Filter SVD menurut 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

3.7. *First Horizontal Derivative (FHD)*

Metode *First Horizontal Derivative* (FHD) pada data anomali gayaberat digunakan untuk mengukur perubahan nilai anomali terhadap arah horizontal tertentu. Nilai FHD diperoleh dengan menghitung turunan pertama anomali pada arah sumbu x dan y, sehingga menghasilkan gradien horizontal medan gayaberat. Teknik ini banyak dimanfaatkan untuk mendeteksi batas lateral struktur geologi bawah permukaan, seperti kontak litologi maupun zona sesar.

FHD dapat memberikan gambaran mengenai karakteristik struktur geologi pada berbagai kedalaman, baik yang relatif dangkal maupun yang lebih dalam. Besarnya gradien horizontal total dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (Cordell dan Grauch, 1982):

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial y}\right)^2} \quad (37)$$

dengan $\frac{\partial g}{\partial x}$ dan $\frac{\partial g}{\partial y}$ yang menyatakan turunan horizontal anomali gayaberat terhadap arah sumbu x dan y. Nilai FHD umumnya dinyatakan dalam satuan mGal/m.

3.8. *Inverse Modeling*

Inversi pada metode gayaberat bertujuan untuk menentukan distribusi densitas bawah permukaan yang dapat menjelaskan respon data pengukuran di lapangan. Dalam proses inversi, dilakukan pencocokan antara data observasi dan model matematis melalui metode *curve fitting*. Tahapan ini bertujuan untuk memperoleh

model yang paling mendekati kondisi sebenarnya di bawah permukaan. Dengan demikian, proses inversi dapat digunakan memperkirakan parameter fisik batuan yang sebelumnya belum diketahui (Sarkowi & Wibowo, 2021).

Pemodelan inversi (*inversion modeling*) merupakan pendekatan yang memanfaatkan parameter model yang diturunkan dari data hasil pengukuran. Proses ini melibatkan pendekatan matematis dan statistik untuk mengekstraksi informasi sistem berdasarkan data observasi yang tersedia. Dalam konteks ini, sistem fisik direpresentasikan oleh data hasil pengamatan, sedangkan tujuan utama inversi adalah menentukan model atau parameter yang dapat menjelaskan data tersebut. Proses estimasi parameter model seringkali menghadapi berbagai kendala, sehingga permasalahan inversi umumnya diselesaikan menggunakan pendekatan regresi linier. Konsep ini melibatkan proses memformulasikan hubungan antara variabel-variabel yang diamati dalam suatu model matematis. Model yang dihasilkan dianggap optimal apabila mampu meminimalkan kesalahan antara data hasil observasi dan hasil perhitungan model (Grandis, 2009).

Dalam pemodelan gravitasi 3D, pendekatan umum adalah membagi volume bawah permukaan menjadi elemen-elemen prisma segi empat (*rectangular prisma*). Anomali gravitasi vertikal (Δg_z) yang dihasilkan oleh masing-masing prisma dihitung menggunakan persamaan teoritis yang dikembangkan oleh Okabe (1979) dan disempurnakan oleh Holstein dkk. (2007). Rumus ini mempertimbangkan kontribusi setiap elemen prisma terhadap medan gravitasi total di permukaan.

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan pada waktu dan lokasi sebagai berikut:

- Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika (PPDG), Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung
- Alamat : Laboratorium Terpadu Jurusan Teknik Geofisika Lt. 3 - Jl. Brojonegoro No. 1 Gedong Meneng, Rajabasa, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142
- Waktu : Oktober 2025 – April 2026

4.2. Alat dan Bahan

Penelitian ini memanfaatkan beberapa alat dan bahan yang mendukung proses pengolahan serta interpretasi data, antara lain:

Tabel 5. Alat dan bahan.

No.	Alat dan Bahan	Fungsi
1.	Data GGMplus	Data yang digunakan dalam pengolahan gayaberat
2.	<i>Softfile</i> Peta Lembar Geologi	Referensi Geologi Daerah Penelitian dan Korelasi dengan hasil analisis SVD
3.	Laptop	Perangkat untuk pengolahan data
4.	Software ArcGIS 10.8	Software untuk membuat Peta Lokasi
5.	Software Surfer 13	Software untuk melakukan pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual
6.	Software Oasis Montaj 8.4	Untuk memperoleh nilai koreksi medan, Peta Kontur Anomali, dan analisis SVD
7.	<i>Grablox</i> dan <i>Bloxer</i>	Digunakan dalam proses pemodelan tiga dimensi bawah permukaan

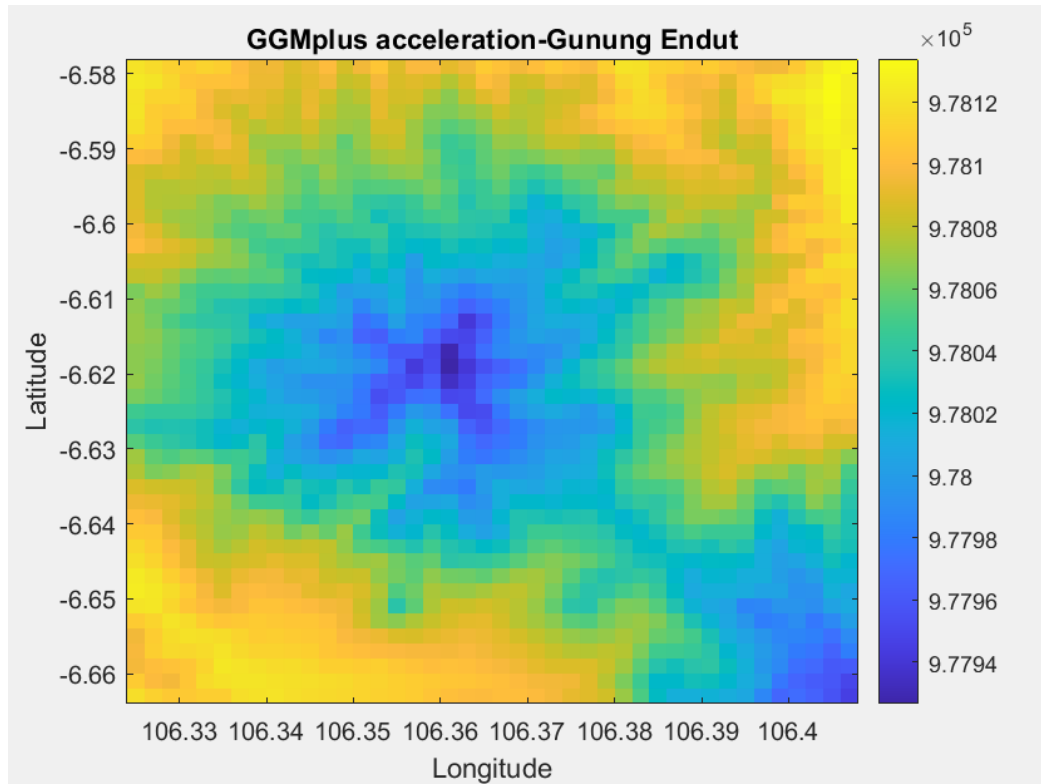
4.3. Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dalam studi ini terdapat beberapa langkah sebagai berikut.

4.3.1. Pengumpulan Data

Penelitian ini memanfaatkan data gayaberat satelit GGMplus, data DEM, serta peta geologi regional yang meliputi area Gunung Endut, Banten. Data DEM berperan penting sebagai informasi topografi dan digunakan dalam proses koreksi medan untuk memperhitungkan pengaruh relief permukaan terhadap nilai anomali gayaberat. Data gayaberat yang digunakan berupa file S10E105, yang dipilih karena lokasi penelitian berada pada kisaran lintang sekitar 6° LS dan bujur sekitar 107° BT, sehingga termasuk dalam cakupan data tersebut. Proses selanjutnya dilakukan ekstraksi data menggunakan perangkat lunak MATLAB, dengan mengambil parameter percepatan gravitasi dan elevasi sesuai batas wilayah penelitian.

Ekstraksi data dilakukan berdasarkan koordinat area penelitian dengan memanfaatkan skrip perhitungan, sehingga diperoleh nilai percepatan gravitasi (*gravity acceleration*) dan ketinggian (*height*) pada setiap titik. Pada Gambar 11 merupakan hasil ekstraksi yang kemudian dipindahkan ke Microsoft Excel untuk dilakukan pengolahan lebih lanjut, terutama dalam tahap koreksi data gayaberat hingga diperoleh nilai anomali Bouguer.



Gambar 11. Data *Gravity acceleration* GGMplus.

4.3.2. Koreksi Bouguer

Dalam proses pengolahan data gayaberas, koreksi Bouguer diterapkan guna menghilangkan pengaruh massa batuan yang berada di antara titik pengamatan dan bidang acuan. Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa titik observasi berada pada permukaan datar yang luas dengan distribusi densitas batuan yang seragam. Perhitungan koreksi dilakukan menggunakan Microsoft Excel dengan nilai densitas (ρ) sebesar 2,54 gr/cc yang diperoleh melalui metode Parasnis, sedangkan nilai elevasi (h) diambil dari data Digital Elevation Model (DEM). Hasil dari proses tersebut menghasilkan Anomali Bouguer Sederhana (ABS), yaitu selisih antara anomali udara bebas dan nilai koreksi Bouguer. Hasil pengolahan selanjutnya disajikan dalam bentuk peta pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengolahan data koreksi Bouguer

No	LONGITUDE	LATITUDE	X	Y	GravObs	ELEVASI	TC	LATITUDE (RADIAN)	G-Lintang	FAC	FAA	BC	SBA	TC2	CBA
1	106.311	-6.665	644314	3263092	978081.9	651	1.436	-0.116326195	978102.2573	-200.8	180.84	69.32	111.22	3.65	114.87
2	106.311	-6.663	644315	3263313	978079.7	656	1.379	-0.116291288	978102.2167	-202.44	179.93	69.85	110.08	3.50	113.58
3	106.311	-6.661	644316	3263534	978095.1	580	1.229	-0.116256381	978102.1742	-178.99	171.91	61.76	110.16	3.12	113.28
4	106.311	-6.659	644316	3263755	978104.1	533	1.207	-0.116221475	978102.1326	-164.48	166.46	56.75	109.7	3.07	112.77
5	106.311	-6.657	644317	3263976	978103	535	1.241	-0.116186568	978102.0911	-165.1	166.01	56.97	109.04	3.15	112.20
6	106.311	-6.655	644317	3264197	978106.4	511	1.218	-0.116151662	978102.0496	-157.69	162.04	54.41	107.64	3.09	110.73
7	106.311	-6.653	644318	3264418	978100.4	535	1.28	-0.116116755	978102.0081	-165.1	163.49	56.97	106.53	3.25	109.78
8	106.311	-6.651	644319	3264640	978096	552	1.65	-0.116081849	978101.9666	-170.35	164.38	58.78	105.61	4.19	109.80
9	106.311	-6.649	644319	3264861	978090.2	575	1.887	-0.116046942	978101.9252	-177.45	165.72	61.22	104.5	4.79	109.29
10	106.311	-6.647	644320	3265082	978091.2	567	1.636	-0.116012035	978101.8837	-174.98	164.29	60.37	103.92	4.16	108.08
11	106.311	-6.645	644320	3265303	978099.4	525	1.649	-0.115977129	978101.8423	-162.02	159.57	55.9	103.67	4.19	107.86
12	106.311	-6.643	644321	3265524	978105.9	488	1.638	-0.115942222	978101.8008	-150.6	154.7	51.96	102.74	4.16	106.90
13	106.311	-6.641	644322	3265745	978115	438	1.736	-0.115907316	978101.7594	-135.17	148.41	46.64	101.77	4.41	106.18
14	106.311	-6.639	644322	3265966	978123.3	394	1.804	-0.115872409	978101.7178	-121.59	143.17	41.95	101.22	4.58	105.80
15	106.311	-6.637	644323	3266188	978126.3	373	2.053	-0.115837502	978101.6766	-115.11	140.33	39.72	100.62	5.22	105.83
16	106.311	-6.635	644323	3266409	978123	392	1.677	-0.115802596	978101.6353	-120.97	142.34	41.74	100.6	4.26	104.86
17	106.311	-6.633	644324	3266630	978110.4	456	1.384	-0.115767689	978101.5939	-140.72	149.53	48.55	100.37	3.52	104.49
18	106.311	-6.631	644324	3266851	978099.9	505	1.243	-0.115732783	978101.5525	-155.84	154.19	53.77	100.42	3.16	103.58
19	106.311	-6.629	644325	3267072	978085.4	570	1.379	-0.115697876	978101.5112	-175.9	159.79	60.69	99.099	3.50	102.60
20	106.311	-6.627	644326	3267293	978082.9	584	1.228	-0.11566297	978101.4698	-180.22	161.65	62.18	99.47	3.12	102.59
21	106.311	-6.625	644326	3267514	978093.3	531	1.051	-0.115628063	978101.4285	-163.87	155.74	56.54	99.199	2.67	101.87
22	106.311	-6.623	644327	3267735	978101.8	488	0.891	-0.115593156	978101.3872	-150.6	151.01	51.96	99.049	2.26	101.31
23	106.311	-6.621	644327	3267957	978104	475	0.843	-0.11555825	978101.3459	-146.59	149.24	50.58	98.663	2.14	100.80
24	106.311	-6.619	644328	3268178	978102.4	483	0.801	-0.115523343	978101.3046	-149.05	150.15	51.43	98.721	2.03	100.76
25	106.311	-6.617	644329	3268399	978100.1	492	0.759	-0.115488437	978101.2634	-135.17	148.41	46.64	98.281	1.93	100.21
26	106.311	-6.615	644329	3268620	978099.7	489	1.066	-0.11545353	978101.2221	-150.91	149.38	52.07	97.316	2.71	100.02
27	106.311	-6.613	644330	3268841	978096.4	501	0.95	-0.115418623	978101.1809	-154.61	149.83	53.34	96.483	2.41	98.90
28	106.311	-6.611	644330	3269062	978095.1	505	1.001	-0.115383717	978101.1396	-155.84	149.8	53.77	96.033	2.54	98.58
29	106.311	-6.609	644331	3269284	978099.1	483	1.061	-0.11534881	978101.0984	-149.05	147.06	51.43	95.627	2.69	98.32
30	106.311	-6.607	644331	3269505	978110.1	424	1.11	-0.115313904	978101.0572	-130.85	139.89	45.15	94.743	2.82	97.56
31	106.311	-6.605	644332	3269726	978105.9	446	1.049	-0.115278997	978101.016	-137.64	142.52	47.49	95.031	2.66	97.70
32	106.311	-6.603	644333	3269947	978099.3	472	1.084	-0.115244091	978100.9748	-145.66	143.98	50.26	93.727	2.75	96.48
33	106.311	-6.601	644333	3270168	978097.6	482	0.911	-0.115209184	978100.9336	-148.75	145.41	51.32	94.09	2.31	96.40
34	106.311	-6.599	644334	3270389	978102.8	454	0.848	-0.115174277	978100.8925	-140.1	142.01	48.34	93.671	2.15	95.82
35	106.311	-6.597	644334	3270610	978108.4	425	0.834	-0.115139371	978100.8513	-131.16	138.7	45.25	93.451	2.12	95.57
36	106.311	-6.595	644335	3270832	978105.2	438	0.693	-0.115104464	978100.8102	-135.17	139.56	46.64	92.92	1.76	94.68
37	106.311	-6.593	644336	3271053	978114.1	391	0.762	-0.115069558	978100.7691	-120.66	133.99	41.63	92.361	1.93	94.30
38	106.311	-6.591	644336	3271274	978111.5	401	0.656	-0.115034651	978100.728	-123.75	134.52	42.7	91.823	1.67	93.49
39	106.311	-6.589	644337	3271495	978114.3	387	0.739	-0.114999744	978100.6869	-119.43	133.04	41.21	91.835	1.88	93.71
40	106.311	-6.587	644337	3271716	978115.8	376	0.716	-0.114964838	978100.6458	-116.03	131.19	40.04	91.153	1.82	92.37

4.3.3. Penentuan Densitas Batuan Rata-rata

Dalam analisis gayaberat, nilai densitas batuan menjadi faktor penting karena digunakan sebagai dasar dalam perhitungan anomali Bouguer. Oleh sebab itu, diperlukan penentuan densitas rata-rata pada area penelitian. Pada studi ini, nilai tersebut diperoleh menggunakan metode Paransis dengan cara memplot grafik di Microsoft Excel, yaitu Anomali Udara Bebas (FAA) diplot sebagai sumbu Y dan Koreksi Bouguer (BC) sebagai sumbu X. Kemudian dilakukan penarikan garis regresi yang melewati titik nol, di mana nilai kemiringan garis mencerminkan densitas batuan (ρ). Dari hasil tersebut, selanjutnya dapat dihitung nilai Anomali Bouguer Sederhana (ABS).

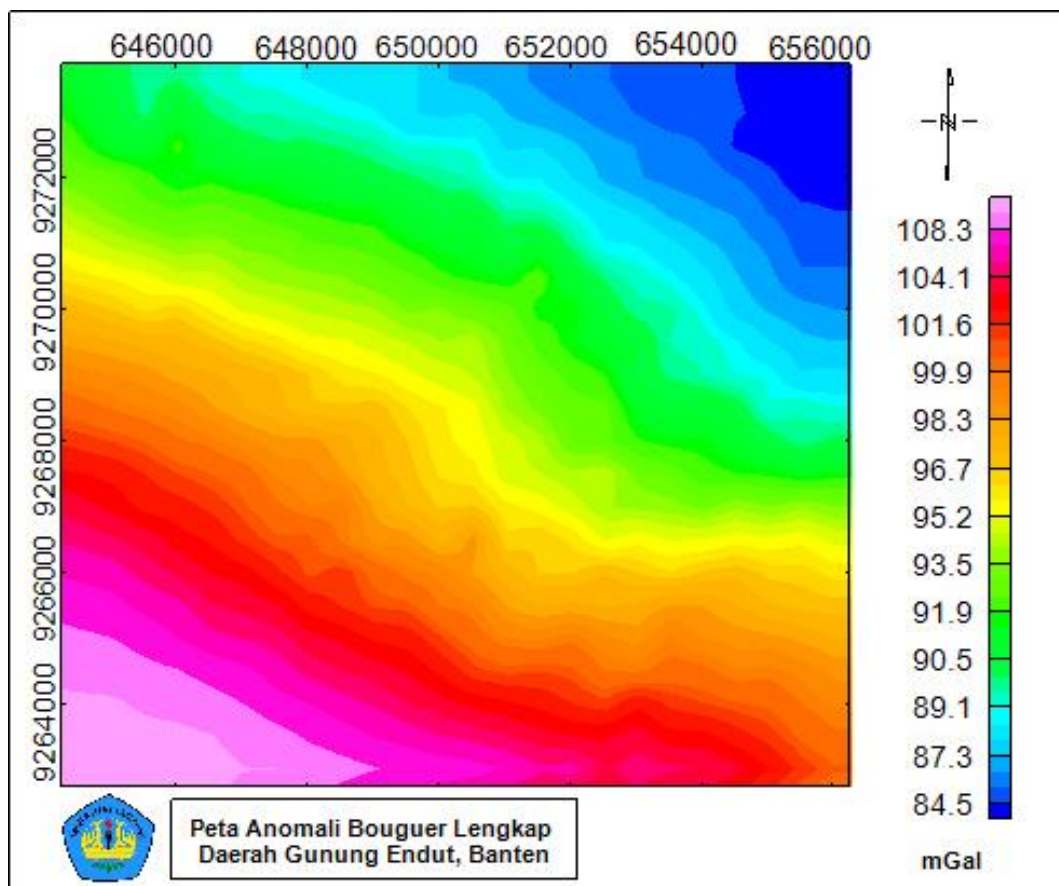
4.3.4. Koreksi Medan

Koreksi medan dilakukan untuk menghilangkan pengaruh variasi topografi di wilayah penelitian. Perbedaan relief permukaan tersebut dapat memengaruhi hasil pengukuran gayaberat, baik dengan menambah maupun mengurangi gaya tarik akibat massa batuan. Misalnya, keberadaan lembah cenderung menurunkan nilai

percepatan gayaberat, sedangkan bukit dapat meningkatkan nilainya. Perhitungan koreksi medan ini dilakukan menggunakan data koordinat dan elevasi yang diperoleh dari DEM dengan bantuan software Global Mapper 20.

4.3.5. Anomali Bouguer Lengkap

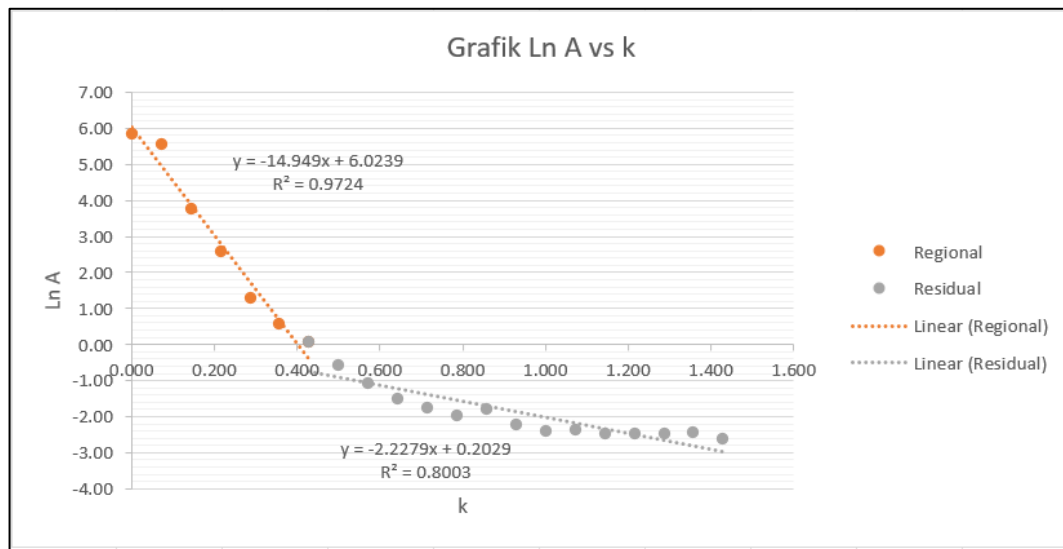
Setelah seluruh tahapan koreksi gayaberat selesai dilakukan, diperoleh nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL) yang merupakan hasil penjumlahan antara Anomali Bouguer Sederhana (ABS) dan koreksi medan (*terrain correction*). Data tersebut selanjutnya diolah menggunakan metode *gridding* pada perangkat lunak Oasis Montaj untuk menghasilkan peta kontur Anomali Bouguer Lengkap, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Kontur anomali Bouguer lengkap untuk RAPS

Tahap selanjutnya adalah melakukan analisis menggunakan metode *Radially Averaged Power Spectrum* (RAPS) untuk memperkirakan kedalaman sumber

anomali. Metode ini dilakukan dengan menganalisis hubungan antara nilai $\ln A$ dan bilangan gelombang dalam bentuk grafik. Di mana kedalaman sumber ditentukan berdasarkan nilai kemiringan (*slope*) dari grafik tersebut.



Gambar 13. Grafik $\ln A - k$ daerah penelitian

Grafik hubungan antara $\ln A$ dan k (Gambar 13) digunakan untuk menentukan kedalaman anomali regional maupun residual berdasarkan persamaan garis tren. Nilai gradien dari grafik tersebut mencerminkan kedalaman masing-masing anomali.

4.3.6. Pemisahan Anomali

Pada penelitian ini, pemisahan antara anomali regional dan anomali residual dilakukan dengan menggunakan metode *upward continuation*. Metode tersebut bertujuan memperoleh komponen anomali regional yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam menentukan anomali residual. Nilai anomali residual diperoleh dari selisih antara anomali Bouguer lengkap dengan anomali regional. Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak Oasis Montaj. Prinsip metode ini adalah memproyeksikan medan potensial ke elevasi yang lebih tinggi sehingga pengaruh sumber anomali dangkal akan semakin berkurang, sedangkan kontribusi sumber yang lebih dalam (regional) menjadi lebih dominan. Dengan demikian, anomali residual dapat diperoleh dengan mengurangkan nilai anomali regional dari anomali Bouguer lengkap.

4.3.7. Analisis Derivatif

Analisis turunan pada penelitian ini dilakukan dengan menerapkan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Metode SVD digunakan untuk menonjolkan anomali dangkal sehingga mempermudah dalam mengidentifikasi batas struktur geologi di daerah penelitian. Hasil pengolahan FHD disajikan dalam bentuk peta dan grafik yang dimanfaatkan untuk mengidentifikasi struktur sekunder berdasarkan perubahan distribusi nilai anomali. Sementara itu, analisis SVD menghasilkan pola anomali yang digunakan untuk menafsirkan keberadaan struktur geologi melalui karakteristik distribusi anomali tersebut. Kombinasi kedua analisis derivatif tersebut digunakan sebagai pendukung interpretasi struktur geologi bawah permukaan, khususnya untuk memahami pola persebaran dan konfigurasi struktur geologi pada wilayah penelitian.

4.3.8. Pemodelan Inversi Bawah Permukaan

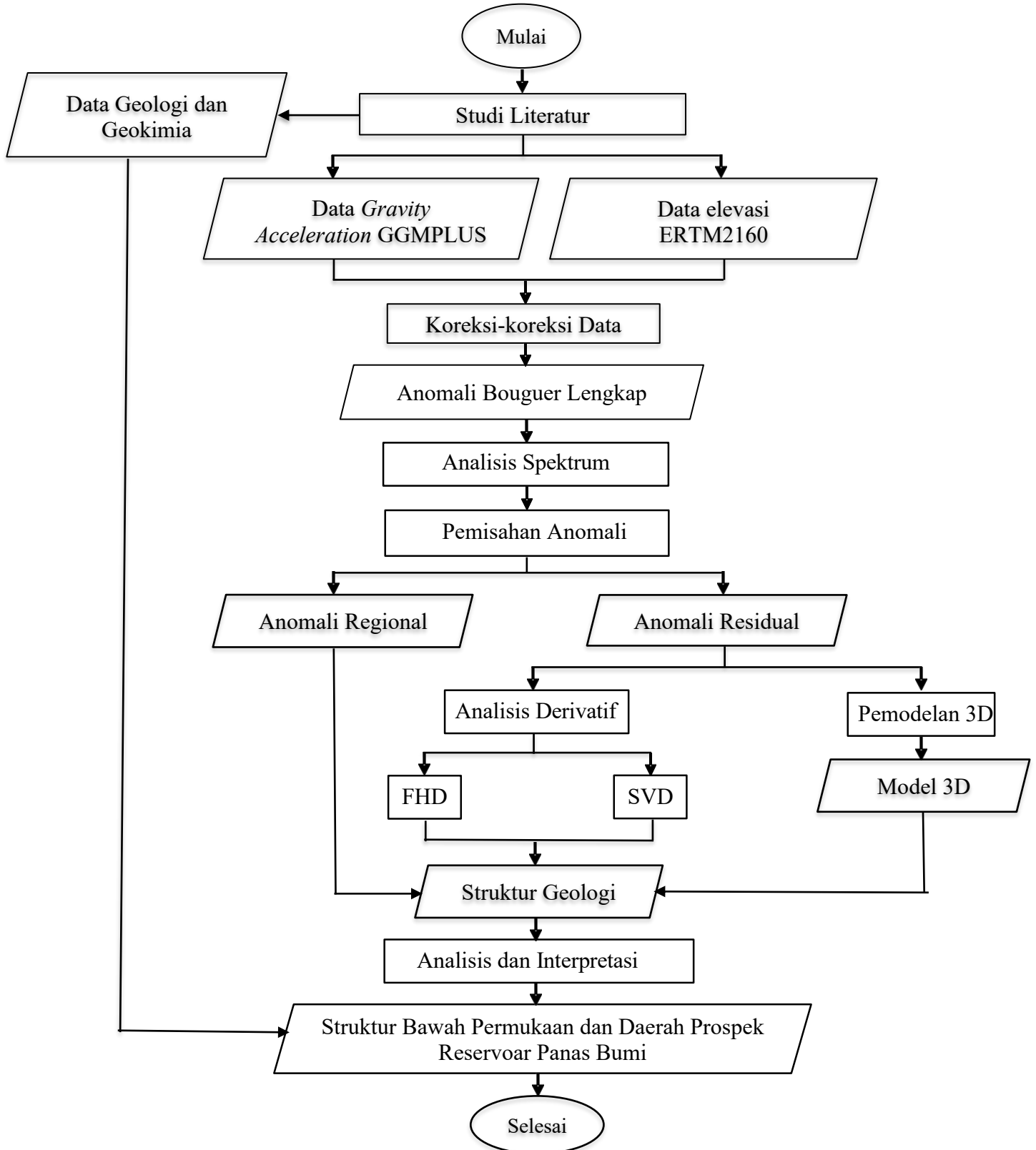
Pemodelan bawah permukaan dilakukan melalui pendekatan inversi 3D dengan bantuan perangkat lunak Geosoft Oasis Montaj dan Grablox. Proses inversi diawali dengan memasukkan data anomali residual ke dalam model berbasis *mesh*, yang selanjutnya digunakan untuk membangun representasi distribusi densitas batuan yang mendekati kondisi sebenarnya. Model hasil inversi kemudian dievaluasi untuk mengidentifikasi zona-zona yang berpotensi sebagai reservoir maupun sumber panas (*heat source*) pada sistem panas bumi di daerah penelitian.

4.4. Jadwal Kegiatan

Rencana pelaksanaan kegiatan penelitian disusun yang ditunjukkan pada Tabel 7.

4.5. Diagram Alir

Diagram alir penelitian yang digunakan sebagai berikut pada Gambar 14.



Gambar 14. Diagram alir

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Analisis data gayaberat menggunakan metode FHD dan SVD menunjukkan bahwa pada penampang A – A', B – B', dan C – C' menunjukkan adanya enam struktur sesar yang dominan berarah barat laut – tenggara dan timur laut – barat daya. Struktur tersebut diinterpretasikan sebagai zona rekahan yang berperan sebagai jalur permeabilitas fluida hidrotermal. Berdasarkan analisis geokimia, fluida panas bumi di daerah Gunung Endut bertipe klorida yang berasal dari reservoir atau zona *upflow*.
2. Karakteristik struktur geologi di wilayah Gunung Endut dikontrol oleh sistem sesar dengan orientasi utama barat laut–tenggara dan timur laut–barat daya. Struktur ini memotong satuan batuan vulkanik dan sedimen serta berperan penting dalam mengontrol kemunculan manifestasi panas bumi. Pada penampang A – A' teridentifikasi satu sesar turun dan dua sesar naik, penampang B – B' teridentifikasi satu sesar naik, dan penampang C – C' teridentifikasi satu sesar turun dan satu sesar naik. Struktur sesar tersebut berfungsi sebagai jalur migrasi fluida dari kedalaman menuju permukaan.
3. Pemodelan sistem panas bumi berdasarkan data gayaberat menunjukkan bahwa distribusi densitas bawah permukaan berkisar antara 1,0 - 3,0 gr/cc. Zona densitas rendah (1,0 – 2,20 gr/cc) diinterpretasikan sebagai batuan teralterasi dengan porositas dan permeabilitas tinggi yang berperan sebagai reservoir. Zona densitas tinggi (2,80 – 3,0 gr/cc) diinterpretasikan sebagai batuan kompak atau intrusi yang berfungsi sebagai sumber panas.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disarankan agar penelitian selanjutnya menggunakan data gayaberasat hasil pengukuran lapangan secara langsung dengan resolusi yang lebih tinggi, sehingga interpretasi struktur bawah permukaan dapat dilakukan dengan lebih detail dan akurat. Selain itu, pemodelan 3D dengan resolusi yang lebih tinggi serta kajian terpadu antara data geologi, geokimia, dan geofisika juga perlu dilakukan agar penentuan zona prospek panas bumi di wilayah Gunung Endut dapat dilakukan dengan lebih akurat dan dapat mendukung kegiatan eksplorasi panas bumi pada tahap selanjutnya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan awal dalam menentukan lokasi survei lanjutan maupun kegiatan eksplorasi panas bumi di daerah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Blakely, R.J. (1996). *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Badan Geologi. (2020). *Peta geologi lembar Lebak, Jawa Barat (Skala 1:250.000)*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Brotopuspito, K.S. (2001). *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Bureau Gravimetric International. (2013). *GGMplus2013Global Model*. <https://Bgi.Obs-Mip.Fr/Data-Products/Grids-and-Models/Modele-Global-Ggmplus2013/>.
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *What is geothermal energy?* Institute of Geosciences and Earth Resources, CNR.
- Diyanti, A. (2014). *Interpretasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Daerah Leuwidamar Berdasarkan Analisis Spektrum Data Gayaberat*. Skripsi. Prodi Fisika FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung.
- Djudjun, A. (2005). *Penyelidikan GayaBerat Daerah Panas Bumi Sipoholon Tarutung Kabupaten Tapanuli Utara Provinsi Sumatera Utara*. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*. Pusat Sumber Daya Geologi. Bandung.
- Dobrin, M. B., & Savit, C. H. (1960). *Introduction to geophysical prospecting* (Vol. 4). New York: McGraw-hill.
- Elkins, T. A. (1951). The second derivative method of gravity interpretation. *Geophysics*, 16(1), 29-50
- ESDM. 2017. *Potensi Panasbumi Indonesia Jilid 1*. Direktorat Panasbumi. Jakarta.
- Ervan, M., & Subagio. (2021). *Potensi geologi daerah Banten dan sekitarnya berdasarkan analisis data anomali gayaberat*. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 22(3), 165-175.

- Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, 52(12), 2749-2765.
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia. Jakarta.
- Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian earth sciences*, 20(4), 353-431.
- Hall, R. (2012). Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571, 1–41.
- Henderson, R. G., & Zietz, I. (1949). The computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields. *Geophysics*, 14(4), 508-516.
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R., Von Frese, R., & Saad, A. H. (2013). *Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications*. Cambridge University Press.
- Kadir, W. G. A. (2000). Eksplorasi GayaBerat dan Magnetik. Jurusan Teknik Geofisika, *Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral*, Institut Teknologi Bandung.
- Maulana, I. (2012). Analisis 4D Mikrogravity dan Gradien Vertikal 4D Mikrogravity: Studi Kasus Amblesan Semarang. *Universitas Indonesia*.
- Muffler, L. J. P., & Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7(2–4), 53–89. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(78\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0375-6505(78)90002-0)
- Idral, A., Pramadhani, F., & Sobirin, A. (2023). Geochemical characteristics and geothermal system of Mount Endut, Banten, Indonesia. *Indonesian Journal of Geoscience*, 10(1), 45–56.
- Nugraha, P. (2016). Penentuan Kedalaman Optimum Anomali GayaBerat Denga Metode Korelasi Antara Analisis Spektrum dan Continuation Studi Kasus Semarang Jawa Tengah. *Universitas Negeri Semarang*.
- Pramadhani, F., Rokhmatulloh, & Supriatna. (2015). *Potensi panas bumi berdasarkan karakteristik fisik wilayah: Studi kasus Daerah Wayang-Windu, Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat dan Daerah Gunung Endut, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten*. Universitas Indonesia.
- Reynolds, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley & Sons Ltd. *Chichester*, UK.
- Rosenbach, O. (1953). A contribution to the computation of the" second derivative" from gravity data. *Geophysics*, 18(4), 894-907.

- Rosid, S. (2005). Gravity Method in Exploration Geophysics. *Universitas Indonesia, Depok*.
- Santoso, D. (2004). "Eksplorasi Energi Geothermal". *Bandung: Penerbit ITB*.
- Saptadji, N. M. (2001). Teknik Panas Bumi. *Bandung, Penerbit ITB*.
- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi struktur daerah panasbumi ulubelu berdasarkan analisa data svd anomali bouguer. *Jurnal Sains MIPA, 16(2)*, 111-118.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gayaberat*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Sarkowi, M., Fudholi, A., Wibowo, R C., Yogi, I B., Minardi, S., dan Kadir, W G A. (2022). Horizontal Gravity Gradient To Reduce Ambiguity In Gravity Modeling. *Unpublish*.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). Fisika untuk sains dan teknik. *Jakarta, Salemba Teknika*.
- Setiadi, I., Setyanta, B., & Widijono, B. S. (2010). Delineasi cekungan sedimen sumatra selatan berdasarkan analisis data gayaberat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral, 20(2)*, 93-106.
- Setijadji, L. D. (2018). Geologi vulkanik dan potensi panas bumi di Jawa Barat selatan. *Bulletin of the Geological Society of Indonesia, 45(1)*, 12–25
- Simandjuntak, T. O., & Barber, A. J. (1996). An outline of the geology of Indonesia. In T. O. Simandjuntak & A. J. Barber (Eds.), *The geology of Indonesia* (pp. 1–21). Indonesian Association of Geologists.
- Sobirin, A., Pramadhani, F., & Idral, A. (2017). Karakteristik sistem panas bumi Gunung Endut, Banten. *Prosiding Seminar Nasional Kebumihan, 1(1)*, 123–130.
- Suharno, 2011. Sistem Panasbumi Rendingan-Ulubelu-Waipanas Tanggamus, Lampung, Indonesia. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan Himpunan Ahli Geofisika Indonesia ke 29.
- Sujatmiko, & Santoso, S. (1992). *Peta Geologi Lembar Lewidamar, Jawa* (Skala 1 : 100.000). Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Departemen Pertambangan dan Energi Republik Indonesia.
- Sunardi, E., & Kimura, J. (1998) Temporal chemical variation in Late Cenozoic volcanic rocks around the Bandung Basin, West Java, Indonesia. *Jurnal Min. Petr. Econ. Geol.*, 93, 103-128.

- Suparno, S. (2009). Energi panas bumi: A present from the heart of the earth. *Departemen Fisika-FMIPA Universitas Indonesia, Depok.*
- Susilawati. (2005). *Pemodelan Metode Gayaberat. Departemen Fisika-FMIPA Universitas Indonesia, Depok.*
- Syamsuriadi. (2013). Penentuan Struktur Bawah Permukaan Kota Makassar dengan Menggunakan Metode Gayaberat (Gravity). *Skripsi. Universitas Hasanudin.*
- Telford, W M, Geldart, L P, dan Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics, Second Edition.* Cambridge University Press: New York.
- Van Bemmelen, R. W. (1949). The Geology of Indonesia, Volume IA. *The Hague Martinus Nijhoff, Nedherland, 732.*
- Widodo, S. (2009). *Evaluasi Potensi Panasbumi Daerah Danau Ranau Wilayah Kabupaten Lampung Barat-Provinsi Lampung dan Kabupaten OKU Selatan- Provinsi Sumatera Selatan.* Pusat Sumber Daya Geologi: Bandung.