

**PEMODELAN SISTEM PANAS BUMI CUBADAK PASAMAN  
BERDASARKAN ANALISIS GRADIEN  
DAN PEMODELAN 3D DATA GAYABERAT**  
(Skripsi)

Oleh  
**Presti Diah Utami**  
2215051067



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2026**

**PEMODELAN SISTEM PANAS BUMI CUBADAK PASAMAN  
BERDASARKAN ANALISIS GRADIEN  
DAN PEMODELAN 3D DATA GAYABERAT**

**Oleh  
Presti Diah Utami**

**Skripsi**

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

**Pada**

**Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG**

**2026**

## ABSTRAK

### PEMODELAN SISTEM PANAS BUMI CUBADAK PASAMAN BERDASARKAN ANALISIS GRADIEN DAN PEMODELAN 3D DATA GAYABERAT

Oleh

**Presti Diah Utami**

Cubadak, Pasaman, Sumatera Barat merupakan salah satu daerah prospek panas bumi yang ditandai dengan kemunculan manifestasi di permukaan berupa mata air panas. Keberadaan manifestasi tersebut mengindikasikan adanya sistem panas bumi di bawah permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sistem panas bumi di daerah tersebut menggunakan metode gayaberat guna memperoleh gambaran kondisi bawah permukaan. Data yang digunakan berasal dari GGMPlus yang kemudian melalui beberapa tahapan pengolahan, meliputi koreksi data, pemisahan Anomali Regional dan residual menggunakan analisis spektrum dan metode *moving average*. Selanjutnya dilakukan analisis turunan, yaitu *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD), untuk mengidentifikasi batas struktur geologi dan menentukan keberadaan sesar. Selain itu, dilakukan pemodelan inversi 3D untuk memperkirakan distribusi densitas batuan bawah permukaan yang berkaitan dengan sistem panas bumi. Hasil analisis turunan pada penampang A–A' dan B–B' menunjukkan indikasi lima sesar normal yang diinterpretasikan berperan sebagai jalur permeabilitas aliran fluida hidrotermal. Hasil inversi 3D menunjukkan distribusi densitas bawah permukaan berkisar antara 1,9–2,9 g/cm<sup>3</sup>. Zona berdensitas rendah, yaitu sekitar 1,9–2,23 g/cm<sup>3</sup>, diinterpretasikan sebagai reservoir panas bumi. Sementara itu, zona berdensitas tinggi, yaitu sekitar 2,73–2,9 g/cm<sup>3</sup>, diinterpretasikan sebagai sumber panas yang kemungkinan berkaitan dengan aktivitas magmatik.

Kata kunci: Analisis Derivatif, Cubadak, Gayaberat, Inversi 3D, Panas Bumi.

## **ABSTRACT**

### **GEOTHERMAL SYSTEM MODELING OF CUBADAK PASAMAN BASED ON GRADIENT ANALYSIS AND 3D MODELING OF GRAVITY DATA**

**By**

**Presti Diah Utami**

*Cubadak, Pasaman Regency, West Sumatra, is one of the geothermal prospect areas characterized by the presence of surface manifestations in the form of hot springs. The existence of these manifestations indicates the presence of a geothermal system. This study aims to model the geothermal system in the area using the gravity method to obtain an overview of subsurface conditions. The gravity method employed utilizes GGMPlus data, which are processed through several stages, including data correction and the separation of regional and residual anomalies using spectral analysis and the moving average method. Furthermore, derivative analyses, namely the First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD), are conducted to identify geological structure boundaries and delineate the presence of faults. In addition, 3D inversion modeling is performed to estimate the subsurface rock density distribution associated with the geothermal system. The results of derivative analysis along sections A–A' and B–B' indicate the presence of five normal faults, which are interpreted to act as permeability pathways for hydrothermal fluids. The results of the 3D inversion show that the subsurface density distribution ranges from (1,9 - 2,9 g/cm<sup>3</sup>). Zones with low density, (1,9–2,23 g/cm<sup>3</sup>), are interpreted as geothermal reservoirs. Zones with high density, approximately (2,73–2,9 g/cm<sup>3</sup>), are interpreted as heat sources likely associated with magmatic activity.*

**Keywords:** 3D Inversion, Cubadak, Derivative Analysis, Gravity Method, Geothermal.

Judul

**Pemodelan Sistem Panas Bumi  
Cubadak Pasaman Berdasarkan  
Analisis Gradien Dan Pemodelan 3D  
Data Gayaberat**

Nama Mahasiswa

**Presti Diah Utami**

Nomor Pokok Mahasiswa

**2215051067**

Program Studi

**Teknik Geofisika**

Fakultas

**Teknik**



**1. Komisi Pembimbing**

Pembimbing 1

Pembimbing 2

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

**Prof. Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.,**

**CRP.**

**IPM.**

**NIP. 197209281999031001**

**NIP. 197509112000121002**

**2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika**

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

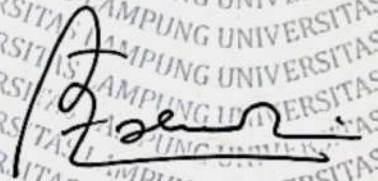
**NIP. 197307162000121002**

**MENGESAHKAN**

1. Tim penguji

Ketua

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



Sekretaris

**Prof. Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si., IPM.**



Anggota

**Prof. Dr. Ir. Karyanto, S.Si., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **26 Mei 2026**

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan secara penuh kesadaran bahwa skripsi berjudul “Pemodelan Sistem Panas Bumi Cubadak Berdasarkan Analisis Gradien dan Pemodelan 3D Data Gayaberat” merupakan hasil karya ilmiah yang saya susun sendiri. Penulisan ini didasarkan pada data, hasil pengolahan, serta pemahaman yang diperoleh selama proses penelitian berlangsung. Seluruh sumber yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini, baik yang dikutip secara langsung maupun tidak langsung, telah dicantumkan secara lengkap dan jelas dalam daftar pustaka sesuai dengan kaidah dan etika penulisan ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran atau ketidaksesuaian terhadap pernyataan ini, saya bersedia menerima segala konsekuensi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung, 9 Juni 2026



**Presti Diah Utami**

NPM. 2215051067

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Presti Diah Utami, dilahirkan pada 28 Juli 2003. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri 1 Muara Dua pada tahun 2009–2015, penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Ulubelu hingga tahun 2018. Setelah itu, penulis menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Ulubelu dan lulus pada tahun 2021. Pada tahun 2022 penulis diterima sebagai mahasiswa di Universitas Lampung, Jurusan Teknik Geofisika, melalui jalur melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis aktif dalam kegiatan akademik dan non-akademik. Pada bidang akademik, penulis memiliki pengalaman sebagai asisten eksplorasi geothermal pada tahun 2026. pada bidang non-akademik, penulis aktif dalam organisasi kemahasiswaan. Penulis menjabat sebagai Sekretaris Biro Kesekretariatan Rumah Tangga (KRT) Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Universitas Lampung periode 2025. Selain itu, penulis juga menjabat sebagai Ketua Divisi Keuangan (*Finance*) HAGI *Student Chapter* Universitas Lampung pada tahun 2026. Penulis mengikuti kegiatan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Fajar Mataram, Kecamatan Seputih Mataram, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung. Penulis melaksanakan kerja praktik di Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi (PSDMBP) pada divisi geotermal selama periode Oktober - November 2025 dengan judul “Pemodelan 2D *Forward Modelling* Data Gayaberat Daerah Panas Bumi Cubadak Pasaman Sumatera Barat”. Penulis kemudian menyusun tugas akhir sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

## **PERSEMBAHAN**

Dengan penuh rasa syukur, penulis memanjatkan puji dan terima kasih ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, serta kekuatan yang telah diberikan, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini. Tanpa limpahan kasih sayang dan pertolongan-Nya, perjalanan ini tidak akan dapat dilalui hingga tahap ini.

## **AYAH DAN IBU**

Terima kasih atas cinta, kasih sayang, pengorbanan, dan doa yang senantiasa mengiringi perjalanan penulis. Setiap perjuangan yang penulis lalui tidak pernah lepas dari kekuatan doa ayah dan ibu yang selalu menjadi penopang di saat lelah dan penguat di saat ragu. Karya ini bukan sekadar tulisan, melainkan wujud kecil dari usaha yang disertai doa tulus dari ayah dan ibu.

## **ADIKKU TERSAYANG**

Terima kasih telah menjadi sosok yang tidak pernah berhenti memberikan dukungan, semangat, perhatian dalam setiap langkah penulis. Kehadiranmu bukan hanya menemani, tetapi juga menjadi kekuatan yang membuat penulis terus melangkah dengan yakin. Semoga kita selalu menjadi kebanggaan bagi orang tua kita, senantiasa berjalan berdampingan dalam doa, serta saling menguatkan dalam setiap langkah kehidupan yang kita tempuh.

## **DIRIKU SENDIRI**

Terima kasih karena telah mampu bertahan melewati setiap proses yang tidak mudah. Tetap percaya pada diri sendiri, tetap kuat dalam menghadapi berbagai keadaan, dan tetap melangkah meskipun perlahan. Rasa bangga patut diberikan untuk setiap langkah kecil yang telah di lalui. Walaupun sering merasa rapuh dan mudah menangis, namun tidak pernah berhenti untuk mencoba dan terus berjuang. Semua itu menjadi bukti bahwa proses ini dijalani dengan penuh ketulusan dan keteguhan hati. Teruslah melangkah dengan penuh keyakinan.

**Keluarga Besar Granit Teknik Geofisika 2022**

serta

**Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung**

## **MOTTO**

Allah memang tidak menjanjikan hidupmu akan selalu mudah, tapi dua kali Allah berjanji bahwa: “ Disetiap kesulitan pasti ada kemudahan”

**(QS. Al-Insyirah ayat 5-6)**

“Wahai orang-orang yang beriman! Mohonlah pertolongan (kepada Allah) dengan sabar dan salat. Sungguh, Allah beserta orang-orang yang sabar”

**(Q.S Al-Baqarah ayat 153)**

**Selama masih ada usaha, selalu ada jalan untuk mencapai tujuan.**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan kekuatan yang diberikan, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penelitian yang berjudul “Pemodelan Sistem Panas Bumi Cubadak Pasaman Berdasarkan Analisis Gradien dan Pemodelan 3D Data Gayabarat” disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung. Selama proses penyusunan, penulis tidak terlepas dari berbagai hambatan dan tantangan. Namun, dengan adanya doa, dukungan, serta bantuan dari berbagai pihak, seluruh proses tersebut dapat dilalui hingga tahap akhir. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Harapannya, karya ini memberikan manfaat, menambah wawasan, serta menjadi referensi bagi pengembangan ilmu geofisika, khususnya dalam bidang eksplorasi panas bumi.

Bandar Lampung, 9 Juni 2026



**Presti Diah Utami**

NPM. 2215051067

## SANWACANA


Penulis mengucapkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, serta kemudahan yang telah diberikan, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Yang berjudul “Pemodelan Sistem Panas Bumi Daerah Cubadak Pasaman Berdasarkan Analisis Gradien dan Pemodelan 3D Data Gayaberat”. Dalam proses penyusunannya, penulis menyadari bahwa menyelesaikan skripsi ini tidak terlepas dari berbagai bentuk dukungan, bantuan, serta doa dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM., selaku Sekertaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung
4. Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., CRP., selaku dosen pembimbing I tugas akhir, yang dengan penuh kesabaran telah meluangkan waktu, dan pikiran untuk membimbing serta memberikan arahan dan masukan yang sangat berarti hingga skripsi ini dapat terselesaikan.
5. Prof. Dr. Ir. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si., IPM., selaku pembimbing II tugas akhir, yang telah memberikan arahan, masukan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lebih baik.
6. Prof. Dr. Ir. Karyanto, S.Si., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran, serta masukan yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.

7. Bapak Ilham Dani, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing akademik, yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama masa perkuliahan.
8. Seluruh dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, yang telah memberikan ilmu, wawasan, dan pengalaman berharga kepada penulis selama menempuh pendidikan.
9. Ayah, cinta pertama penulis yang selalu menjadi sumber kekuatan dalam setiap langkah. Terima kasih atas doa yang tak pernah terputus, serta segala usaha dan pengorbanan yang telah ayah berikan kepada penulis. Terima kasih, karena telah mengajarkan penulis untuk tetap kuat dalam keadaan apa pun. Dari Ayah, penulis belajar bahwa hidup tidak selalu mudah, tetapi harus dijalani dengan keteguhan dan kesabaran.
10. Ibu, surgaku, yang tak pernah henti memberikan doa dan kasih sayang. Terima kasih karena selalu mengingatkan penulis untuk tetap menjadi pribadi yang baik. Tanpa Ibu, rasanya langkah penulis tidak akan sekuat ini. Sejauh apa pun penulis melangkah, Ibu akan selalu menjadi rumah-tempat penulis kembali, tanpa syarat dan tanpa batas. Terima kasih Ibu, untuk cinta yang tidak pernah habis dan pengorbanan yang tidak pernah Ibu minta untuk dibalas.
11. Adikku tersayang, yang terus memberikan semangat, dukungan dalam setiap langkah perjalanan penulis. Terima kasih untuk tawa, kebersamaan, dan hal-hal kecil mungkin terlihat sepele, tetapi sangat berarti. Tersimpan rasa sayang yang begitu besar, meski tidak selalu terucap. Terima kasih sudah menjadi adik yang baik.
12. Teruntuk kekasihku, terima kasih telah menemani setiap perjalanan penulis, Terima kasih karena selalu mendukung, mendengarkan setiap cerita, dan mau menjadi tempat berbagi keluh kesah. Semoga kita selalu saling mendukung dan berjalan bersama dalam setiap langkah ke depan.
13. Syeikha dan Salsa, sahabat seperjuanganku, terima kasih atas kebersamaan dan semangat yang senantiasa kalian berikan. Terima kasih telah menjadi teman berbagi cerita, tempat saling menguatkan, serta yang selalu menemani setiap proses selama masa perkuliahan hingga sampai di titik ini. Momen mengelilingi Bandung bersama kalian menjadi bagian dari cerita indah dan kenangan yang tidak akan terlupakan dalam perjalanan ini.

14. Teman-teman PKM tercinta terima kasih atas perjalanan yang telah kita lalui bersama. Begitu banyak momen yang tercipta, penuh tawa, canda, cerita, dan kebersamaan yang tak terlupakan.
15. Untuk rekan-rekan penghuni Laboratorium Instrumentasi Geofisika terima kasih sudah menjadi tempat berbagi dan bertukar pikiran selama melakukan proses penyusunan skripsi ini.
16. Untuk Meitra sahabatku sejak SD hingga sekarang, terima kasih telah menjadi tempat berbagi cerita, begitu banyak perjalanan yang kita lalui bersama, tetap menjadi sahabat yang saling menguatkan satu sama lain.
17. Sahabat komakku Finka, Feni, Citra, Arofa, Nelly terima kasih untuk semua keseruan, kebersamaan, nanti kita tetap harus sering kumpul-kumpul ya dan mengagendakan makan-makan yang rasanya tidak akan ada habisnya.
18. Terima kasih kepada keluarga besar penulis atas doa, dukungan, serta motivasi yang terus diberikan selama menempuh pendidikan perkuliahan.
19. Diri penulis sendiri, apresiasi karena telah mampu melalui perjalanan panjang ini. Banyak hal tidak mudah yang harus di hadapi, namun tetap memilih untuk melangkah, bertahan, setiap langkah kecil yang telah dilalui adalah bagian dari perjalanan yang berarti. Teruslah mensyukuri nikmat yang Tuhan berikan, tetap semangat untuk terus berusaha, dan berbahagia di mana pun berada.
20. Keluarga besar Granit Teknik Geofisika angkatan 2022, Terima kasih atas berbagai pengalaman yang telah dilalui bersama. Kenangan yang tercipta menjadi bagian yang berharga untuk dikenang.
21. Selama proses penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak doa, bantuan, dan kontribusi dari berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.

Bandar Lampung, 9 Juni 2026



**Presti Diah Utami**  
NPM 2215051067

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>MENGESAHKAN .....</b>	<b>vi</b>
<b>PERNYATAAN.....</b>	<b>vii</b>
<b>RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>viii</b>
<b>PERSEMBAHAN .....</b>	<b>ix</b>
<b>MOTTO .....</b>	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>SANWACANA.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xx</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Daerah Penelitian.....	5
2.2 Geologi Regional.....	5
2.3 Stratigrafi .....	8
2.4 Morfologi.....	11
2.5 Penelitian Terdahulu .....	11
<b>III. TEORI DASAR.....</b>	<b>15</b>

3.1	Data <i>Global Gravity Model Plus</i> (GGMPlus).....	15
3.2	Metode Gayaberat.....	15
3.3	Konsep Dasar Metode Gayaberat.....	16
3.3.1	Hukum Newton.....	16
3.3.2	Potensial Gayaberat.....	17
3.3.3	Rapat Massa Batuan.....	18
3.4	Koreksi-Koreksi dalam Metode Gayaberat.....	20
3.4.1	Koreksi Lintang.....	20
3.4.2	Koreksi Udara Bebas.....	21
3.4.3	Koreksi Bouguer.....	22
3.4.4	Koreksi Medan.....	22
3.4.5	Anomali Bouguer Lengkap.....	24
3.5	Densitas Bawah Permukaan Rata-Rata.....	25
3.5.1	Metode Nettleton.....	25
3.5.2	Metode Parasnis.....	25
3.6	Analisis Spektrum.....	25
3.7	Filter <i>Moving Average</i> .....	28
3.8	Analisis <i>Derivative</i> .....	29
3.8.1	<i>First Horizontal Derivative</i> .....	29
3.8.2	<i>Second Horizontal Derivative</i> .....	30
3.9	Pemodelan Inversi 3-D.....	32
3.10	Panas Bumi.....	32
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGI.....</b>	<b>36</b>
4.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	36
4.2	Alat dan Bahan.....	36
4.3	Pengolahan Data.....	37
4.3.1	Nilai Anomali Bouguer Lengkap.....	37
4.3.2	Analisis Spektrum.....	37
4.3.3	Pemisahan Anomali Regional dan Residual.....	38
4.3.4	Analisis Derivatif.....	38
4.3.5	Pemodelan Inversi 3D.....	38
4.4	Diagram Alir.....	40

<b>V. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
5.1 Topografi Daerah Penelitian .....	41
5.2 Anomali Bouguer Lengkap .....	42
5.3 Analisis Spektrum .....	44
5.3.1 Lintasan A-A' .....	45
5.3.2 Lintasan B-B' .....	46
5.3.3 Lintasan C-C' .....	46
5.4 Anomali Regional.....	48
5.5 Anomali Residual .....	49
5.6 Analisis Derivatif.....	52
5.6.1 <i>First Horizontal Derivative</i> .....	52
5.6.2 <i>Second Vertical Derivative</i> .....	53
5.7 <i>Inverse Modelling 3D</i> .....	61
5.7.1 Lintasan A-A' .....	63
5.7.2 Lintasan B-B' .....	66
5.8 Model Konseptual Sistem Panas Bumi Daerah Penelitian .....	70
<b>VI. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>72</b>
6.1 Kesimpulan.....	72
6.2 Saran .....	73
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>74</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai massa jenis batuan (Telford dkk., 1990). .....	19
2. Parameter SVD (Handerson & Zietz, 1949) .....	31
3. Paramater SVD (Elkins, 1951).....	31
4. Parameter SVD (Rosenbach ,1953) .....	31
5. Alat dan bahan.....	36
6. Pelaksanaan kegiatan penelitian.....	39
7. Kedalaman Anomali Regional dan residual berdasarkan analisis spektrum.....	47
8. Bilangan gelombang (Kc) dan lebar jendela (N) .....	47
9. Hasil analisis derivatif.....	57

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi daerah penelitian.....	6
2. Peta geologi daerah penelitian .....	7
3. Stratigrafi Regional daerah penelitian .....	10
4. Peta morfologi.....	11
5. Peta resistivitas <i>line 1</i> .....	13
6. Peta resistivitas <i>line 2</i> .....	14
7. Gaya tarik menarik antara dua benda.....	16
8. Potensial dan kuat medan massa 3 dimensi .....	18
9. Perbedaan nilai gayaberat di kutub dan khatulistiwa.....	20
10. Koreksi udara bebas terhadap data gayaberat .....	21
11. Pengaruh bukit dan lembah terhadap pengukuran gayaberat.....	23
12. Kurva $\ln A$ terhadap $k$ (Blakely, 1996) .....	26
13. Model sistem panas bumi (Dickson & Fanelli, 2004).....	33
14. Model konseptual sistem panas bumi (Putrohari, 2009).....	34
15. Diagram alir penelitian.....	40
16. Peta topografi daerah penelitian.....	41
17. Peta Anomali Bouguer Lengkap .....	43
18. Lintasan analisis spektrum Anomali Bouguer Lengkap .....	45
19. Grafik $\ln A$ dan $k$ lintasan A-A' .....	45
20. Grafik $\ln A$ dan $k$ lintasan B-B' .....	46
21. Grafik $\ln A$ dan $k$ lintasan C-C' .....	46
22. Peta Anomali Regional.....	50
23. Peta Anomali Residual .....	51
24. Peta <i>First Horizontal Derivative</i> (FHD) residual.....	54

25. Peta <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD) residual.....	55
26. Lintasan penampang derivatif pada peta anomali SVD.....	56
27. Hasil <i>plotting</i> perkiraan sesar di peta FHD.....	58
28. Hasil <i>plotting</i> perkiraan sesar di peta SVD.....	59
29. Hasil <i>plotting</i> perkiraan sesar di peta geologi berdasarkan analisis derivatif.	60
30. Peta lintasan slicing 3D dari Anomali Residual.....	61
31. Model distribusi densitas 3D (a) Model 3D dilihat dari arah selatan, (b) Model 3D dilihat dari arah timur, (c) Model 3D hasil slice dari arah barat daya sampai timur laut.....	62
32. Penampang Anomali Residual, penampang gradien horizontal orde 1 dan orde 2 Anomali Residual, model distribusi densitas hasil pemodelan inversi anomali dan hasil interpretasi model interpretasi struktur sesar dan sistem panasbumi untuk lintasan A-A' .....	64
33. Interpretasi Lintasan A-A' berdasarkan analisis pemodelan gayaberat yang didukung dengan pemodelan MT.....	65
34. Penampang Anomali Residual, penampang gradien horizontal orde 1 dan orde 2 Anomali Residual, model distribusi densitas hasil pemodelan inversi anomali dan hasil interpretasi struktur sesar, reservoir panasbumi untuk lintasan B-B' .....	67
35. Interpretasi Lintasan B-B' berdasarkan analisis pemodelan gayaberat yang didukung dengan pemodelan MT .....	68
36. Peta tahanan jenis MT dan distribusi densitas pada kedalaman 1250m.....	69
37. Model konseptual sederhana panas bumi Cubadak Pasaman .....	70

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi panas bumi merupakan energi termal yang berasal dari kerak bumi dan tersimpan dalam bentuk fluida panas (air dan uap), serta batuan yang mengandung gas dan mineral. Sumber energi ini umumnya berada pada kedalaman beberapa kilometer di bawah permukaan. Keberadaan sistem panas bumi biasanya ditandai oleh munculnya manifestasi permukaan, seperti mata air panas dan fumarol, yang menunjukkan adanya gradien temperatur tinggi. Sistem panas bumi tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu sumber panas (*Heat source*), batuan yang berpori dan *permeable* sebagai reservoir, ketersediaan fluida, dan batuan penutup (*Caprock*) yang berfungsi menahan akumulasi fluida panas dibawah permukaan (Broto, 2011).

Secara geologi, Indonesia terletak pada jalur cinci api (*ring of fire*) dan berada di pertemuan lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik (Pambudi, 2018). Indonesia memiliki potensi panas bumi dengan estimasi sumber daya mencapai sekitar 23,9 GW (ESDM, 2023), potensi di Indonesia secara keseluruhan terdapat sekitar 312 titik, yang sebagian besar berada di sepanjang jalur vulkanik aktif. Salah satu daerah yang menunjukkan potensi yaitu Cubadak yang berada di kabupaten Pasaman, Sumatera Barat (Joni & Rahadinata, 2018). Secara regional, daerah Cubadak berada pada jalur tektonik aktif yang dipengaruhi oleh sesar berarah baratlaut-tenggara di Sumatera bagian barat. Batuan yang mendominasi daerah Cubadak adalah batuan vulkanik kuartar, khususnya aliran lava dengan komposisi andesit hingga andesit-basaltik.

Berdasarkan hasil survey geologi oleh PSDG (2008), di Cubadak memiliki manifestasi berupa mata air panas. Temperatur mata air panas Cubadak berkisar antara 68,4 - 74,8°C, sedangkan mata air panas di Sawah mudik menunjukkan suhu

sekitar 31°C. Kemunculan manifestasi tersebut menjadi indikasi adanya sistem panas bumi pada zona depresi Cubadak yang terbentuk akibat aktivitas sesar normal dan dipengaruhi oleh sistem sesar Sumatera, namun informasi mengenai kondisi bawah permukaan yang mengontrol sistem tersebut masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami karakteristik struktur geologi, distribusi densitas batuan, dan kemungkinan keberadaan zona reservoir yang berperan dalam sistem panas bumi Cubadak.

Metode gayaberat merupakan metode geofisika yang bekerja dengan menganalisis perubahan medan gravitasi bumi akibat adanya perbedaan nilai densitas batuan. Dalam eksplorasi geofisika, metode ini digunakan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan. Interpretasi struktur bawah permukaan dilakukan melalui analisis anomali Bouguer yang terukur di permukaan. Analisis dilakukan dengan membandingkan variasi nilai gayaberat pada setiap titik pengamatan, sehingga perbedaan tersebut dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi dan distribusi massa di bawah permukaan (Sarkowi, 2014). Informasi tersebut memungkinkan identifikasi bagian-bagian utama sistem panas bumi, meliputi struktur geologi, zona reservoir, serta sumber panas (*heat source*). Selain itu, metode ini juga berperan dalam mengenali struktur bawah permukaan yang berfungsi sebagai jalur aliran dan perangkap fluida, termasuk daerah pengisian (*recharge area*) dan daerah (*discharge area*), yang merupakan elemen penting dalam pembentukan sistem panas bumi (Telford dkk., 1990).

GGMplus 2013 merupakan data gayaberat satelit yang termasuk dalam model gayaberat global (*Global Gravity Model*) dengan tingkat resolusi tinggi. Data ini jarak antar *grid* sekitar 200 meter pada arah utara-selatan (Hirt dkk., 2013). GGMplus 2013 dapat menggambarkan kondisi medan gayaberat suatu wilayah secara lebih rinci dibandingkan model resolusi rendah karena memiliki resolusi yang lebih tinggi sebagai data sekunder. Hasil pengolahan anomali gayaberat dapat dimanfaatkan untuk menginterpretasikan kedalaman, nilai densitas, serta bentuk struktur bawah permukaan yang menjadi penyebab anomali gayaberat melalui proses pemodelan (Sudrajad, 2018).

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, penelitian ini dilakukan untuk memperoleh gambaran mengenai sistem panas bumi serta kondisi struktur bawah

permukaan pada daerah penelitian. Hasil pemodelan 3D digunakan untuk menduga keberadaan reservoir panas bumi yang didukung oleh kajian literatur dari Metode Magnetotelurik (MT) sebagai pembanding interpretasi. Sementara itu, analisis gradien data gayabarat diterapkan untuk mengidentifikasi keberadaan dan pola struktur bawah permukaan. Penelitian ini diharapkan memberikan informasi awal yang berguna dalam upaya pengembangan energi panas bumi secara optimal serta mendukung pengelolaan panas bumi yang berkelanjutan.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

1. Menggambarkan sebaran anomali gayabarat di daerah Cubadak Pasaman Sumatera barat.
2. Menganalisis keberadaan struktur berdasarkan analisis *derivative* data gayabarat panas bumi Cubadak Pasaman.
3. Memodelkan sistem panas bumi di daerah penelitian berdasarkan hasil analisis data gayabarat 3D.

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan dalam penelitian ini sebagai berikut

1. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data satelit GGMplus (*Global Gravity Model Plus*) 2013.
2. Pemisahan antara Anomali Regional dan Anomali Residual dilakukan menggunakan *filter moving average*.
3. Pemodelan dalam penelitian dilakukan dengan menerapkan metode pemodelan inversi 3D.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat membentikan informasi sistem panas bumi di daerah Cubadak, khususnya terkait kondisi struktur bawah permukaan, distribusi densitas batuan. Informasi yang di peroleh diharapkan mampu meningkatkan pemahaman mengenai zona prospek yang berpotensi untuk pengembangan energi panas bumi. Selain itu, penelitian ini juga dapat dijadikan sebagai referensi dan bahan pertimbangan untuk penelitian berikutnya.

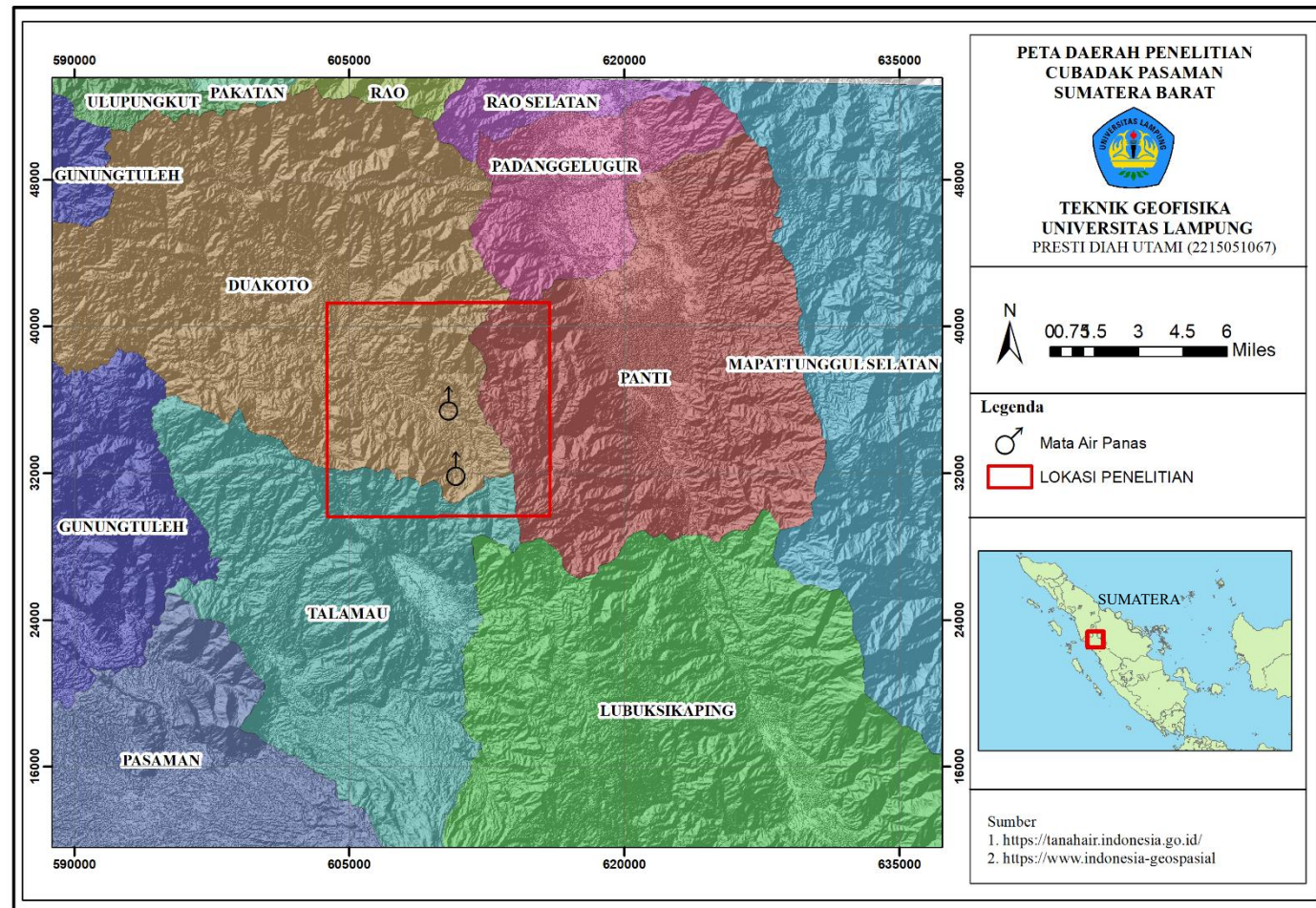
## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Daerah Penelitian

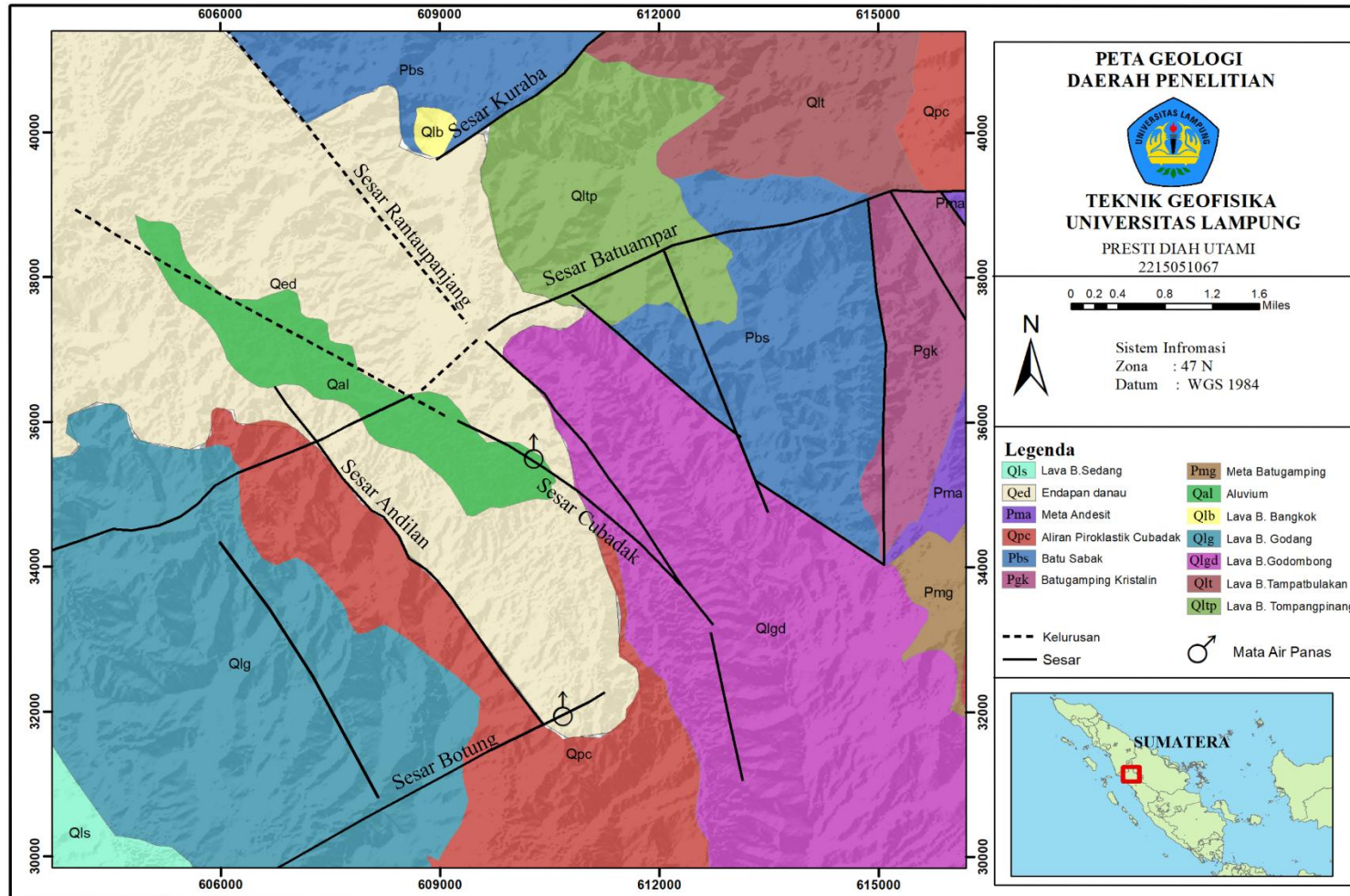
Area penelitian berada di Cubadak, yang secara administratif berada di Kecamatan Duo Koto, Kabupaten Pasaman, Provinsi Sumatera Barat. Lokasi berada pada koordinat 603820 sampai 616011 UTM X dan 29610 sampai 41303 UTM Y dengan sistem koordinat UTM (*Universal Transverse Mercator*) dengan datum WGS 1984 pada Zona 47N. Wilayah ini termasuk dalam jalur vulkanik Sumatera, dengan kondisi topografi daerah penelitian umumnya berupa perbukitan hingga pegunungan dengan morfologi yang dikontrol oleh aktivitas tektonik dan vulkanik. Gambar 1 menunjukkan daerah penelitian Cubadak ditandai dengan kotak merah yang pada peta.

### 2.2 Geologi Regional

Secara geologi, daerah Cubadak Terdiri dari berbagai satuan batuan secara berurutan dari yang paling tua hingga paling muda yaitu Batusabak (Pbs), Meta Andesit (Pma), Meta Batugamping (Pmg), Batugamping Kristalin (Pgk), Aliran piroklastik cubadak (Qpc), Lava Bukit Godang (Qlg), Lava Bukit Godombong (Qlgd), Lava Bukit Bangkok (Qlb), Lava Bukit Tampakbulakan (Qlt), Lava Bukit Tombangpinang (Qltp), Lava bukit Sedang (Qls), Endapan Danau (Qed) dan Aluvium (Qal) yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (Badan Informasi Geospasial, 2018)



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (Modifikasi Tim Survey Terpadu PSDG, 2008)

### 2.3 Stratigrafi

Secara stratigrafi satuan batuan dibagi menjadi 13 satuan batuan yang mencakup batuan vulkanik, sedimen, malihan dan endapan permukaan. Batuan vulkanik didominasi oleh lava dan aliran piroklastik, sedangkan batuan sedimen meliputi batugamping kristalin dan endapan danau. Kelompok batuan malihan meliputi batusabak, meta-andesit, serta meta batugamping. Selain itu endapan permukaan. Urutan stratigrafi dari yang termuda sampai tertua, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

#### 1. Satuan Batusabak (Pbs)

Secara geologi, satuan ini merupakan batuan metamorf hasil ubahan dari formasi kuantan yang berumur Permo-Karbon. Litologi penyusunnya didominasi oleh batusabak, disertai meta batulempung dan kuarsit. Batuan ini telah mengalami deformasi tektonik secara berulang, yang di tandai dengan banyaknya struktur cermin sesar atau kekar.

#### 2. Satuan Meta Andesit (Pma)

Secara stratigrafi, satuan meta andesit termasuk ke dalam formasi vulkanik panti yang diperkirakan terbentuk pada umur Permo-Trias. Sebagian besar batuan pada satuan ini telah mengalami deformasi kuat yang ditandai oleh berkembangnya sesar. Selain itu, satuan ini dipotong oleh sesar berarah baratlaut–tenggara dan barat–timur, yang keberadaannya ditunjukkan oleh ditemukannya sesar.

#### 3. Satuan Meta Gamping (Pmg)

Secara stratigrafi, satuan meta-batugamping termasuk kedalam Formasi Silungkang yang diperkirakan terbentuk pada zaman Permo-Trias. Litologi berupa batu gamping yang telah mengalami proses deformasi dan metamorfisme hingga berubah menjadi marmer. Batuan ini termasuk batugamping yang telah mengalamik rekristalisasi.

#### 4. Satuan Batugamping Kristalin (Pgk)

Secara stratigrafi (Pgk) diklasifikasikan termasuk kedalam formasi silungkang yang berumur Permo-Trias. Litologinya berupa batugamping yang telah mengalami proses kristalisasi.

5. Satuan Aliran Piroklastik Cubadak (Qpc)

Satuan ini didominasi oleh material tuf dengan ukuran butir berkisar abu hingga lapili. Komponen penyusunnya berupa fragmen batuan andesit-basalt serta skoria berukuran pasir sampai kerikil yang umumnya bersifat cukup kompak aliran piroklastik akibat erupsi celah (*fissure eruption*) yang berkembang mengikuti jalur sesar berarah barat-laut-tenggara.

6. Satuan Lava Bukit Godang (Qlg)

Satuan ini tersusun atas aliran lava dengan komposisi berkisar dari diorit hingga andesit-dasitik, dengan litologi dominan berupa andesit dasitik. Satuan ini diperkirakan terbentuk sekitar  $1,2 \pm 0,2$  juta tahun yang lalu dan termasuk dalam kala Plistosen.

7. Satuan Satuan Lava Bukit Godombong (Qlgd)

Satuan ini tersusun atas aliran lava dengan komposisi basalt . Satuan (Qlgd) diperkirakan terbentuk sekitar  $1,1 \pm 0,2$  juta tahun yang lalu dan termasuk dalam kala Plistosen.

8. Satuan Lava Bukit Bangkok (Qlb)

Satuan ini tersusun atas aliran lava dengan komposisi andesitik. Litologi utamanya berupa andesit piroksen. Berdasarkan hubungan stratigrafi (Qlb) relatif terhadap satuan batuan di sekitarnya, satuan Qlb ini diperkirakan terbentuk pada kala Plistosen.

9. Satuan Lava Bukit Tampakbulakan (Qlt)

Satuan ini tersusun atas aliran lava berkomposisi dasitik. Litologii penyusunnya berupa dasit. Satuan (Qlt) diperkirakan berumur Plistosen.

10. Satuan Lava Bukit Tombangpinang (Qltp)

Satuan ini tersusun atas aliran lava dengan andesit-basaltik. Litologi penyusunannya berupa andesit-basaltik. Satuan (Qltp) diperkirakan berumur Plistosen, tersusun atas aliran lava dengan andesit-basaltik. Litologi penyusunannya berupa andesit-basaltik.

11. Satuan Lava Bukit Sedang (Qls)

Satuan (Qls) tersusun atas lava yang berkomposisi obsidian, dengan litologi utama berupa obsidian. Satuan ini diperkirakan berumur Plistosen Satuan ini diinterpretasikan menerobos satuan endapan danau, yang dibuktikan oleh adanya

kontak langsung dengan batuan sedimen danau di kaki bukit sedang. secara hubungan stratigrafi relatif terhadap satuan batuan lainnya.

### 12. Satuan Endapan Danau (Qed)

Satuan endapan danau diinterpretasikan terbentuk dengan mengisi zona depresi. Proses pengendapannya berlangsung sejak kuartar (Plistosen) hingga Holosen. Sebagian endapan ini berada di atas satuan aliran piroklastik cubadak (Qpc) yang juga berkembang pada zona depresi yang sama. Litologinya tersusun atas perlapisan batulempung, batupasir, dan konglomerat. Komponen penyusunnya berupa material rombakan yang berasal dari batuan di sekitarnya, seperti fragmen batusabak dan kuarsit.

### 13. Aluvium (Qal)

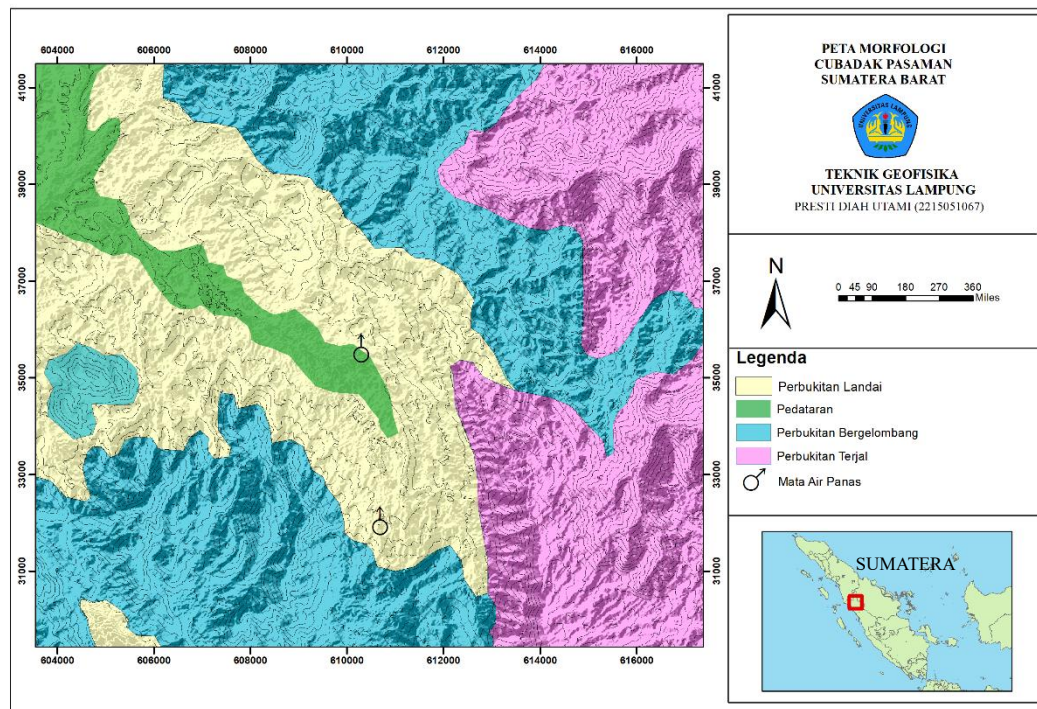
Satuan Aluvium (Qal) merupakan endapan sekunder yang berasal dari hasil pelapukan dan pengangkutan batuan yang telah ada sebelumnya dipermukaan. Material penyusunnya berupa sedimen lepas yang terdiri atas lempung, pasir serta fragmen batuan seperti andesit, basalt, kuarsit, dan batusabak. Satuan tersebut umumnya dijumpai memanjang mengikuti aliran Sungai Pasaman dan berkembang pada daerah bermorfologi datar.

LITOLOGI UMUR		BATUAN MALIHAN	BATUAN SEDIMEN	BATUAN VULKANIK		ENDAPAN PERMUKAAN
				Lava	Piroklastik	
KUARTER	Holosen		Qed			Qal
	Plistosen			Qls Qltp Qlb Qlq Qlqgd	Qlt Qpc	
TERSIER	Pliosen					
	Miosen					
	Oligosen					
	Eosen					
Jura & Kapur						
Permo-trias		Pmg Pma	Pgk			
Permo-karbon		Pbs				

Gambar 3. Stratigrafi Regional daerah penelitian (Modifikasi Tim Survey Terpadu PSDG, 2008)

## 2.4 Morfologi

Peta morfologi Cubadak, pasaman Sumatera Barat dapat dilihat pada Gambar 4 menunjukkan pembagian bentuk lahan. Wilayah penelitian secara umum didominasi oleh perbukitan bergelombang dan perbukitan terjal, yang ditandai oleh kerapatan kontur yang cukup tinggi hingga sangat rapat. Perbukitan terjal terutama berkembang di bagian timur area penelitian, menunjukkan kemiringan lereng yang besar. Sementara itu, satuan dataran rendah tampak memanjang di bagian tengah wilayah dan dikelilingi oleh perbukitan. Titik manifestasi yang ditunjukkan pada peta berada di zona perbukitan bergelombang hingga mendekati dataran rendah, yang mengindikasikan kemungkinan keterkaitan dengan kondisi morfologi dan struktur geologi setempat.



Gambar 4. Peta morfologi (Modifikasi Tim Survey Terpadu PSDG, 2008)

## 2.5 Penelitian Terdahulu

Khikmah (2022), pada penelitian yang berjudul 'Pendugaan Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Cubadak, Sumatera Barat Berdasarkan Data Anomali Gayaberat dan Analisis *Theta Map*' penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur geologi serta memodelkan kondisi bawah permukaan dengan analisis peta residual dan *theta map*, diperoleh pola kelurusan sesar yang

dominan, yang berkaitan dengan aktivitas sesar utama di daerah penelitian. hasil pemodelan 2.5 D menunjukkan bawah permukaan daerah tersusun atas 5 satuan batuan yaitu aluvium, endapan danau, lava bukit godombong, aliran piroklastik cubadak dan batusabak.

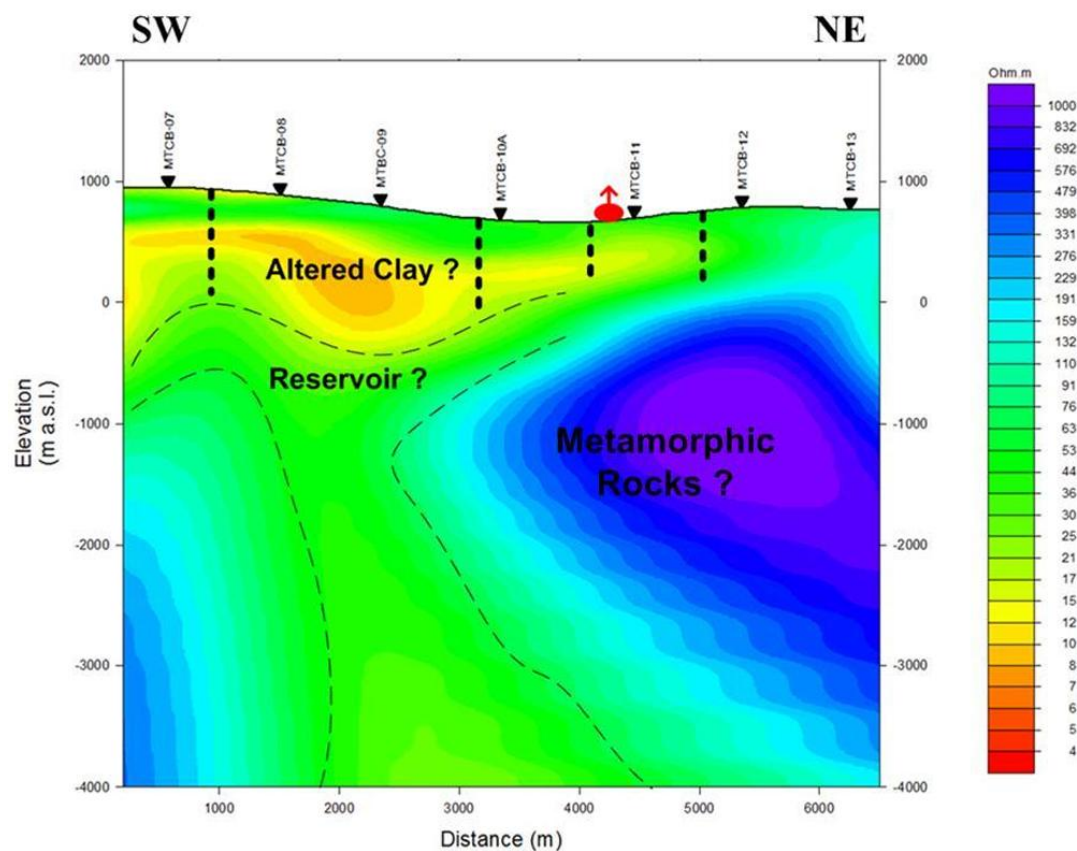
Manifestasi panas bumi di daerah Cubadak ditandai oleh kemunculan beberapa mata air panas dengan suhu antara  $37,1^{\circ}\text{C}$  hingga  $74,8^{\circ}\text{C}$  serta nilai pH yang relatif netral, yaitu berkisar 6,35–6,84. Berdasarkan komposisi dan konsentrasi unsur kimianya, air panas di daerah tersebut diklasifikasikan sebagai tipe air klorida-bikarbonat. Kandungan boron yang cukup tinggi mengindikasikan bahwa fluida panas bumi kemungkinan mengalir melalui batuan sedimen sebelum muncul ke permukaan. Interpretasi ini didukung oleh hasil analisis diagram segitiga Na-K-Mg yang menunjukkan bahwa sampel air panas berada pada zona immature water, sehingga belum mencapai kesetimbangan kimia dengan batuan reservoir. Perhitungan geotermometer Na-K memperkirakan temperatur reservoir panas bumi mencapai sekitar  $235^{\circ}\text{C}$ . Nilai temperatur tersebut menunjukkan bahwa sistem panas bumi Cubadak termasuk ke dalam kategori sumber daya berentalpi tinggi (high enthalpy) (KESDM, 2017).

Joni & Rahadinata (2018), pada penelitian yang berjudul Struktur Sistem Panas Bumi Daerah Cubadak Berdasarkan Pemodelan Inversi 3-D Data Magnetotelurik. Berdasarkan pemodelan 3D tahanan jenis, tujuan utama penelitian mengidentifikasi struktur sistem panas bumi Cubadak, Hasil pemodelan menunjukkan adanya zona tahanan jenis rendah ( $< 11 \text{ Ohm-m}$ ) di sekitar manifestasi Cubadak dan Sawah Mudik yang diinterpretasikan sebagai zona alterasi argilik kaya mineral lempung dan berfungsi sebagai lapisan penudung (*caprock*). Zona ini mulai teridentifikasi pada kedalaman sekitar 100 meter di bawah manifestasi Cubadak dan 250 meter di bawah manifestasi Sawah Mudik. Pada kedalaman yang lebih besar, terjadi peningkatan nilai tahanan jenis ( $\geq 60 \text{ Ohm-m}$ ) yang diinterpretasikan sebagai zona transisi hingga puncak reservoir (top reservoir). Top reservoir diperkirakan berada pada kedalaman sekitar 1.000 meter di bawah manifestasi Cubadak dan 1.250 meter di bawah manifestasi Sawah Mudik.

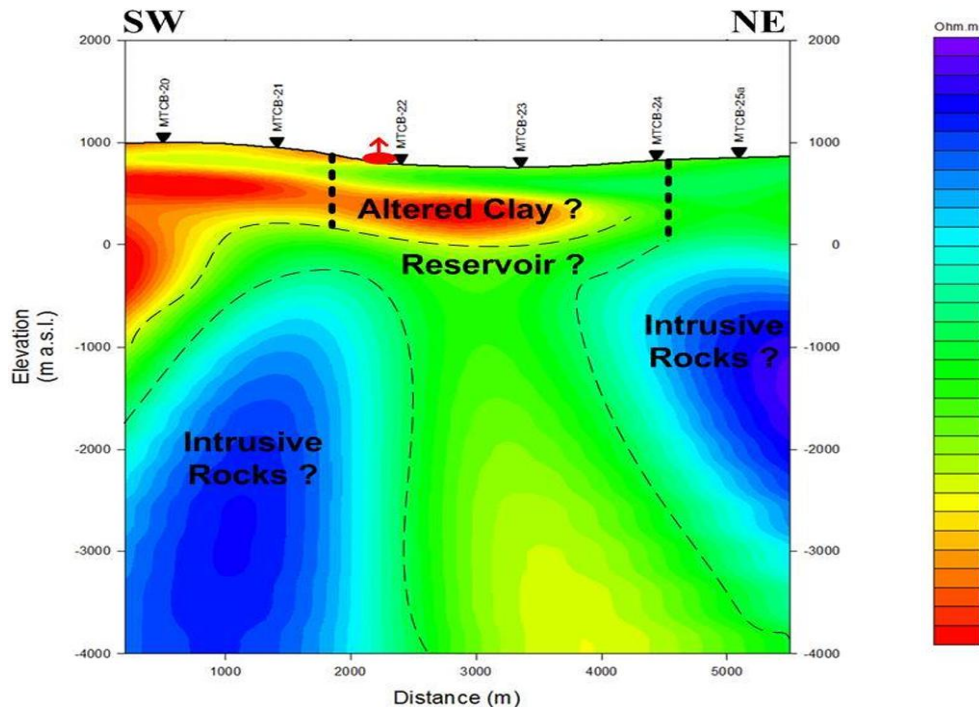
Pada tahun 2017, Syahwanti dan rekan-rekannya melakukan penelitian yang berjudul Struktur Resistivitas 2-D Panas bumi cubadak Terungkap dari data

magnetotelurik. Hasil pemodelan inversi memperlihatkan keberadaan zona dengan resistivitas rendah ( $<10 \Omega\text{m}$ ) diinterpretasikan sebagai lapisan lempung teralterasi (*clay cap*). Lapisan ini bersifat relatif impermeabel dan berperan sebagai penutup. Di bagian bawahnya, teridentifikasi zona dengan resistivitas menengah ( $20\text{--}70 \Omega\text{m}$ ) yang diinterpretasikan sebagai zona reservoir. Kedalaman bagian atas reservoir bervariasi, mulai dari 250 sampai  $-1000 \text{ m}$  dibawah MSL, menunjukkan reservoir yang relatif dangkal. Pada kedalaman lebih besar teridentifikasi zona resistivitas tinggi yang diinterpretasikan sebagai batuan intrusif atau batuan metamorf yang berperan sebagai sumber panas.

Hasil interpretasi mengindikasikan bahwa mata air panas Cubadak termasuk dalam zona aliran keluar (*outflow*), sementara mata air panas Sawah Mudik berada pada zona aliran naik (*upflow*) sistem panas bumi. Struktur sesar berarah SW–NE berperan sebagai pengontrol sistem, sekaligus menjadi jalur migrasi fluida termal ke permukaan.



Gambar 5. Peta resistivitas *line 1* (Syahwanti dkk., 2017)



Gambar 6. Peta resistivitas *line 2* (Syahwanti dkk., 2017)

Berdasarkan penelitian terdahulu, telah dilakukan penelitian menggunakan Metode Magnetotelurik (MT) untuk mengidentifikasi struktur sistem panas bumi dan menggunakan metode gayaberat untuk mengkaji struktur bawah permukaan melalui analisis theta map hingga pemodelan 2D. Namun, belum ada kajian yang menggunakan data gayaberat dengan pendekatan analisis gradien serta pemodelan tiga dimensi untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan dan sistem panas bumi di daerah Cubadak. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan guna mendapatkan gambaran yang lebih rinci mengenai sistem panas bumi di daerah Cubadak melalui penerapan analisis gradien serta pemodelan tiga dimensi (3D) data gayaberat.

### III. TEORI DASAR

#### 3.1 Data *Global Gravity Model Plus* (GGMPlus)

GGMPlus merupakan produk data satelit yang dimanfaatkan untuk pemodelan medan gaya tarik bumi. Pengembangannya memanfaatkan kombinasi data topografi, dengan data satelit GRACE (ITG2010) dan GOCE (TIM-4). Model ini menyediakan lima parameter utama medan gaya tarik massa, yaitu percepatan gayaberat, anomali atau gangguan gayaberat, serta defleksi vertikal arah utara-selatan, defleksi vertikal arah timur-barat, serta tinggi kuasigeoid. Integrasi data GRACE dan GOCE dengan model EGM2008 menjadi dasar penyempurnaan GGMPlus. Proses pembentukannya melibatkan sintesis harmonik bola medan gayaberat, pemodelan maju, serta perhitungan gayeberat normal di permukaan, yang kemudian digabungkan sehingga menghasilkan model gayaberat dengan resolusi spasial yang tinggi (Suprianto dkk., 2021). Nilai percepatan gayaberat dipermukaan bumi yang dihasilkan dari pengukuran satelit disajikan dalam data GGMplus. Data tersebut disusun dalam bentuk grid dengan jarak antar titik sekitar 220m. Namun. Sebelum digunakan pada tahap pemodelan data gayaberat tersebut harus melalui beberapa koreksi koreksi agar hasil analisis yang diperoleh lebih akurat (Putra dkk., 2021).

#### 3.2 Metode Gayaberat

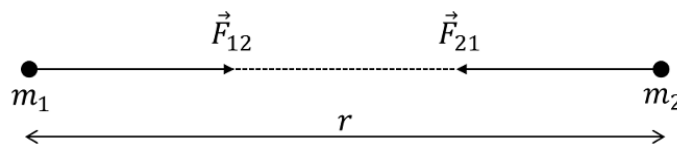
Metode gayaberat adalah salah satu metode geofisika yang memanfaatkan perubahan nilai medan gayaberat sebagai parameter pengamatan utama. (Sarkowi, 2014). Variasi percepatan gayaberat bumi dipengaruhi dari berbagai faktor, meliputi efek pasang surut, kondisi morfologi, bentuk bumi, serta perbedaan densitas. Variasi densitas bawah permukaan menjadi faktor penting karena berpengaruh terhadap terbentuknya anomali gayaberat (Karunianto dkk., 2017).

Kondisi bawah permukaan bumi dapat diketahui menggunakan metode gayaberat dengan cara mengamati variasi medan gayaberat (Suhadiyatno, 2008).

### 3.3 Konsep Dasar Metode Gayaberat

#### 3.3.1 Hukum Newton

Prinsip dasar metode gayaberat didasarkan oleh Hukum gayaberat Newton I yang menyatakan bahwa setiap benda yang memiliki massa akan saling tarik-menarik. Kuat gaya tarik dipengaruhi oleh besarnya massa kedua benda serta jarak dianatar keduanya. Semakin besar massanya, gaya yang dihasilkan akan semakin kuat, sedangkan peningkatan jarak antar pusat massa akan menyebabkan gaya tersebut melemah, karena nilainya berbanding terbalik dengan kuadrat jarak (Reynolds, 1998). Ilustrasi konsep gayaberat dapat dilihat pada Gambar 7 apabila hukum ini diterapkan pada dua benda  $m_1$  dan  $m_2$  dipisahkan sejauh jarak  $r$  dihitung menggunakan Persamaan 1.



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

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

Keterangan:

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

$G$  : Konstanta gayaberat ( $6.67 \times 10^{-11} Nm^2 Kg^{-2}$ )

$r^2$  : Jarak antar massa (m)

$m$  : Massa benda (Kg)

$\hat{r}$  : Vektor satuan arah

Sementara itu, Hukum newton II menjelaskan hubungan antara gaya dan gerak, yaitu bahwa besar gaya yang bekerja pada suatu benda merupakan hasil perkalian antara massa benda tersebut dan percepatannya.

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

Percepatan yang dialami oleh objek bermassa  $m_2$  sebagai respons terhadap tarikan benda bermassa  $m_1$  pada jarak  $r$  dapat diuraikan secara ringkas menggunakan Persamaan 3.

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

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

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

Keterangan:

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

$M$  : Massa bumi (kg)

$m$  : Massa benda (kg)

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

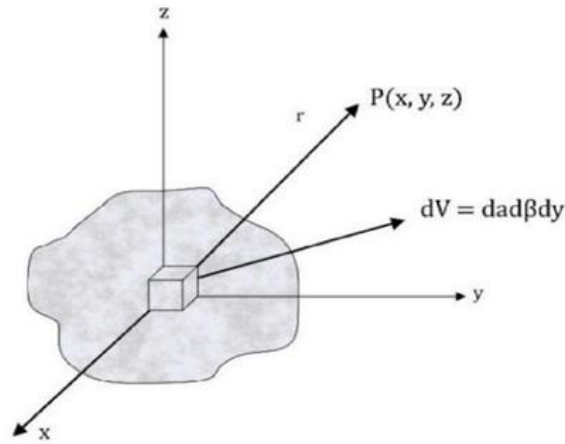
$r$  : Jari-jari bumi (km)

$G$  : Konstanta gayaberat universal ( $6,672 \times 10^{-11} Nm^3 kg^{-1} s^{-2}$ )

$\hat{r}$  : Vektor satuan arah

### 3.3.2 Potensial Gayaberat

Potensial gayaberat merepresentasikan bentuk energi yang muncul akibat perpindahan suatu massa dari satu posisi ke posisi lainnya dalam suatu medan gayaberat. Setiap benda bermassa akan membentuk medan potensial di ruang sekitarnya. Medan ini memiliki sifat konservatif, sehingga besarnya usaha yang dibutuhkan tidak tergantung pada lintasan perpindahan melainkan ditentukan oleh kedudukan awal dan akhir. (Rosid, 2005). Ilustrasi visual tiga dimensi mengenai potensial dan kuat medan ditunjukkan pada Gambar 8.



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

Apabila terdapat distribusi massa dengan bentuk tidak beraturan yang menyebar secara kontinu dan memiliki rapat massa  $\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)$ , maka potensial gayaberat titik  $P(x, y, z)$  dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta g_x(x, y, z) = G \int \int \int \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2]} d\alpha d\beta d\gamma \quad (6)$$

Metode gayaberat dihasilkan dengan melakukan diferensiasi pada Persamaan (6) terhadap  $x, y$  dan  $z$  yang dihasilkan adalah:

$$\Delta g_x(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(x - \alpha)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (7)$$

$$\Delta g_y(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(y - \beta)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (8)$$

$$\Delta g_z(x, y, z) = -G \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_0^\infty \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)(z - \gamma)}{[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2]^{3/2}} d\alpha d\beta d\gamma \quad (9)$$

Berdasarkan Persamaan (9), nilai medan gayaberat dipermukaan bumi menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh sebaran massa dibawah permukaan yang direpresentasikan fungsi densitas  $\rho$ . Selain itu, bentuk nyata dari permukaan bumi turut tercermin dalam batas-batas integral yang digunakan.

### 3.3.3 Rapat Massa Batuan

Batuan merupakan komponen utama penyusun bumi. Salah satu sifat fisik batuan yang penting adalah densitas atau rapat massa yaitu besaran yang

menyatakan perbandingan antara massa suatu material dengan volumenya. Sifat fisik yang nilainya bisa sangat berbeda antar jenis batuan, tergantung pada jenis mineral penyusunnya dan tingkat porositasnya (Rosari dkk., 2017). Densitas menunjukkan tingkat kerapatan material penyusun batuan (Ridha & Darminto, 2016). Pada Tabel 1 disajikan nilai densitas batuan.

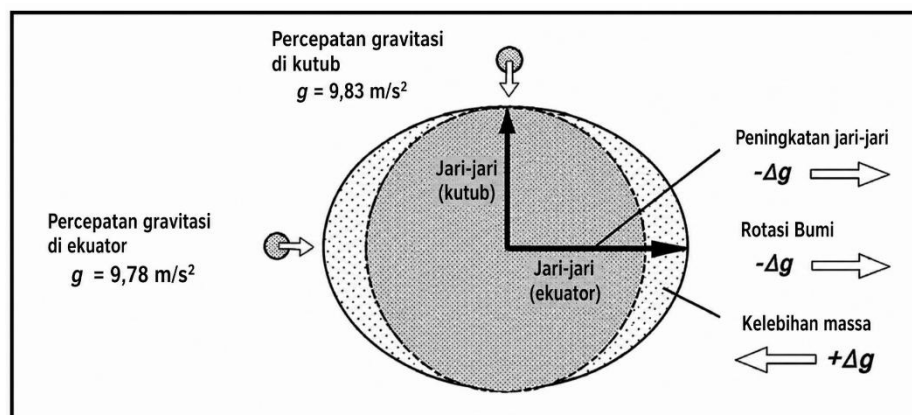
Tabel 1. Nilai massa jenis batuan (Telford dkk., 1990).

<i>Rock type</i>	<i>Range (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Average (g/cm<sup>3</sup>)</i>
<i>Sediment</i>		
<i>Overburden</i>		1,92
<i>Soil</i>	1,2 – 2,4	1,92
<i>Clay</i>	1,63 – 2,6	2,21
<i>Gravel</i>	1,7 – 2,4	2,0
<i>Sand</i>	1,7 – 2,3	2,0
<i>Sandstone</i>	1,61 – 2,76	2,35
<i>Shale</i>	1,77 – 3,2	2,4
<i>Limestone</i>	1,93 – 2,90	2,55
<i>Dolomite</i>	2,28 – 2,90	2,7
<i>Sedimentary rock (av.)</i>		2,5
<i>Igneous rock</i>		
<i>Rhyolite</i>	2,35 – 2,70	2,52
<i>Andesite</i>	2,4 – 2,8	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	2,03
<i>Peridotite</i>	2,78 – 3,37	3,15
<i>Acid igneous</i>	2,30 – 3,11	2,61
<i>Basic igneous</i>	2,09 – 3,17	2,79
<i>Metamorphic rocks</i>		
<i>Quartzite</i>	2,5 – 2,70	2,60
<i>Schists</i>	2,39 – 2,9	2,64
<i>Graywacke</i>	2,6 – 2,7	2,65
<i>Marble</i>	2,6 – 2,9	2,75
<i>Serpentine</i>	2,4 – 3,10	2,78
<i>Slate</i>	2,7 – 2,9	2,79
<i>Gneiss</i>	2,59 – 3,0	2,80
<i>Amphibolite</i>	2,90 – 3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,2 – 3,54	3,37
<i>Metamorphic</i>	2,4 – 3,1	2,74

### 3.4 Koreksi-Koreksi dalam Metode Gayaberat

#### 3.4.1 Koreksi Lintang

Bumi berotasi pada porosnya sehingga distribusi massanya tidak merata secara sempurna. Massa bumi cenderung terakumulasi ke arah poros rotasi, menyebabkan variasi nilai percepatan gayaberat di berbagai lintang. Oleh karena itu, nilai perkiraan gayaberat rata-rata dinyatakan sebagai fungsi lintang (Ramadhani, 2014). Nilai gayaberat berbanding terbalik terhadap kuadrat jari-jari bumi, sehingga besar gayaberat di suatu tempat dipengaruhi oleh posisi lintangnya. Koreksi ini dikakukan untuk menyesuaikan nilai gayaberat terhadap posisi lintang grafis, karena setiap lintang memiliki nilai gayaberat yang berbeda (Lowrie, 2007).



Gambar 9. Perbedaan nilai gayaberat di kutub dan khatulistiwa (Sarkowi, 2014).

Menurut Moritz (1980) nilai gayaberat teoritik pada suatu lintang  $\varphi$  dinyatakan sebagai berikut:

$$g_{\theta} = 978032,7(1 + 5,3024 \cdot 10^{-3} \sin^2 \varphi - 5,8 \cdot 10^{-6} \sin^2 2\varphi) mGal \quad (10)$$

Dan menurut *Geodetic reference system* (GRS – 1967) koreksi gayaberat teoritik pada lintang  $\varphi$ :

$$g_{\theta} = 978031,8(1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi) mGal \quad (11)$$

Keterangan:

$g_{\theta}$  : Percepatan gayaberat pada lintang  $\theta$  ( $m/s^2$ )

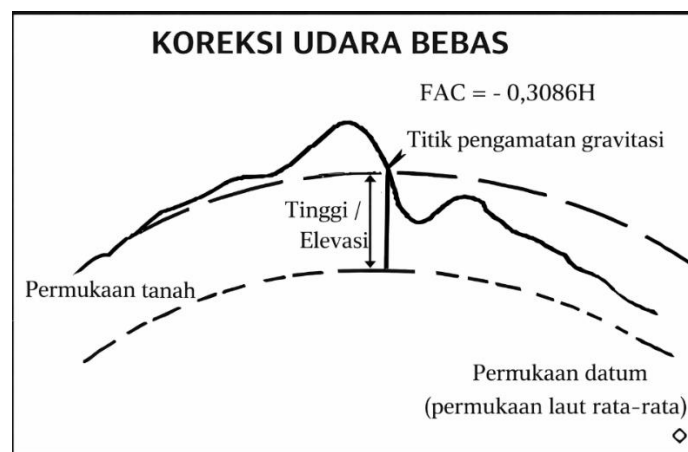
$g_0$  : Percepatan gayaberat standar pada ekuator ( $978031,8 \text{ m/s}^2$ )

$\theta$  : Lintang geografis (radian)

$\text{Sin}\theta$  : Fungsi sinus pada lintang  $\theta$

### 3.4.2 Koreksi Udara Bebas

Berdasarkan hukum Newton, besarnya nilai gayaberat dipengaruhi oleh jarak terhadap pusat bumi. Karena setiap titik pengukuran memiliki ketinggian yang berbeda, maka di perlukan koreksi nilai gayaberat pada masing masing titik pengamatan. Elevasi pada setiap titik pengukuran di tentukan terhadap bidang acuan yang disebut datum (Kurniadi, 2017). Pengukuran gayaberat yang dilakukan pada elevasi  $h$  dan diatas ketinggian MSL (*mean sea level*) maka akan menghasilkan nilai percepatan gayaberat yang lebih kecil (Syamsuriadi, 2013).



Gambar 10. Koreksi udara bebas terhadap data gayaberat (Zhou, 1990)

Persamaan (12) digunakan untuk perhitungan koreksi udara bebas :

$$FAC = 0,3086 h \quad (12)$$

Keterangan:

$FAC$  : Koreksi udara bebas

$h$  : Ketinggian (m)

Nilai koreksi udara bebas adalah 0,308765 miliGal/mGal atau 3,08765 microGal/cm. makin tinggi suatu lokasi semakin kecil nilai gayaberatnya demikian pula sebaliknya. Anomali udara bebas (FAA), dirumuskan pada Persamaan (13).

$$FAA = g_{obs} (g_{\varphi} + FAC) \quad (13)$$

Keterangan:

$g_{obs}$  : Gayaberat observasi

$FAA$  : Koreksi udara bebas

$g_{\varphi}$  : Besarnya gayaberat teoritis pada lintang

### 3.4.3 Koreksi Bouguer

Koreksi ini untuk menghilangkan perbedaan ketinggian terhadap hasil pengukuran gayaberat, dengan tetap memperhitungkan pengaruh massa batuan di bawah titik tersebut agar nilai yang dihasilkan lebih akurat. Perhitungan koreksi Bouguer dilakukan berdasarkan persamaan berikut:

$$BC = 2\pi G_{\rho h} \quad (14)$$

Menurut Brotopuspito (2001), nilai  $2\pi G = 0,04192$  maka menjadi Persamaan 15.

$$BC = 0,04192 \rho h \quad (15)$$

Keterangan:

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

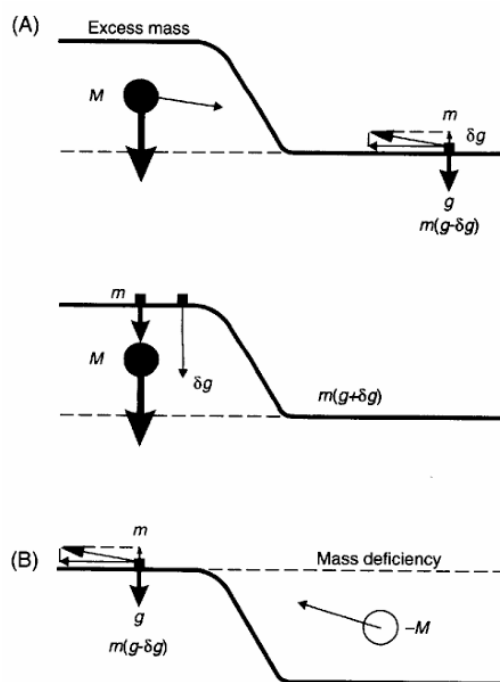
$BC$  : Koreksi Bouguer (mGal)

$h$  : Ketinggian (m)

### 3.4.4 Koreksi Medan

Koreksi ini diterapkan akibat adanya pengaruh bentuk topografi disekitar lokasi pengamatan. Permukaan bumi yang bergelombang atau tidak rata, seperti keberadaan bukit, lembah, maupun relief yang cukup tajam dapat memengaruhi nilai gayaberat yang terukur. Selain faktor alami, efek medan juga dapat

dipengaruhi oleh objek buatan, seperti bangunan bertingkat yang berada di sekitar lokasi pengukuran (Kurniadi, 2017). Koreksi dilakukan untuk menghilangkan *noise* yang berasal dari massa di sekitar daerah pengukuran yang dapat mempengaruhi nilai anomali Bouguer (Tsoulis, 2001).



Gambar 11. Pengaruh bukit dan lembah terhadap pengukuran gayaberat (Reynolds, 1998)

Pengaruh topografi terhadap percepatan gayaberat ( $g$ ) dijelaskan dalam Gambar 11. Misalkan ada suatu stasiun gayaberat yang terletak di samping sebuah bukit seperti pada Gambar 11 (A). Lempong batuan yang membentuk bukit tersebut (massa  $M$ ) memiliki pusat massa yang berada di atas bidang tempat gravimeter diletakkan. Terdapat gaya tarik menarik antara kedua massa tersebut. Jika gaya tersebut diuraikan menjadi komponen horizontal dan vertikal, dan hanya komponen vertikal yang dipertimbangkan, maka dapat dilihat bahwa pengukuran  $g$  di stasiun gayaberat akan terbaca lebih kecil (terkurangi) sebesar  $\delta g$ . Sebaliknya, jika stasiun gayaberat berada di dekat lembah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 (B), maka lembah tersebut dapat dianggap memiliki defisiensi massa ( $-M$ ). Kekurangan massa ini menyebabkan pengukuran  $g$  di stasiun gayaberat juga terkurangi sebesar  $\delta g$ . Dengan demikian, setiap pengukuran gayaberat yang dilakukan di dekat bukit

atau lembah membutuhkan suatu koreksi tambahan agar dapat memperhitungkan distribusi massa yang tidak merata. Koreksi ini secara efektif menghilangkan pengaruh topografi agar sesuai dengan asumsi koreksi Bouguer, yaitu bahwa bumi terdiri dari lempeng batuan horizontal semi-tak hingga.

Secara matematis, rumus koreksi medan dirumuskan pada Persamaan (16) sebagai berikut:

$$\delta g_{seg} = \frac{2\pi\rho G}{N} [r_2 - r_1 + (r_1^2 + z^2)^{1/2} - (r_2^2 + z^2)^{1/2}] (g.u) \quad (16)$$

Keterangan:

$\delta g_{seg}$  : Gayaberat segmen *hammert chart*

$N$  : Jumlah segmen dalam cincin

$\rho$  : Densitas Bouguer

$z$  : Perbedaan elevasi antara stasiun dan elevasi rata-rata segmen

$G$  : Konstanta gayaberat

$r_2$  dan  $r_1$  : Jari jari luar *anulus*

### 3.4.5 Anomali Bouguer Lengkap

Anomali Bouguer Lengkap (ABL) adalah nilai gayaberat pada titik pengamatan yang diperoleh setelah koreksi gayaberat diterapkan (Kurniadi, 2017). Setelah nilai gayaberat observasi (*observed gravity/Gobs*)<sub>0</sub> direduksi menggunakan koreksi-koreksi gayaberat, maka diperoleh nilai anomali yang dikenal sebagai Anomali Bouguer Lengkap. Menurut Eobinson (1988) besar nilai ABL merupakan selisih nilai antara nilai gayaberat hasil pengukuran dan nilai gayaberat teoritis, dengan mempertimbangkan bahwa titik pengamatan tidak berada tempat pada bidang referensi. Perhitungan nilai Anomali Bouguer Lengkap ditunjukkan pada Persamaan 17.

$$CBA = SBA + TC \quad (17)$$

Keterangan:

$SBA$  : Anomali Bouguer Sederhana (mGal)

*CBA* : Anomali Bouguer Lengkap (mGal)

*TC* : Nilai koreksi *terrain* (mGal)

### **3.5 Densitas Bawah Permukaan Rata-Rata**

Perhitungan anomali boguer diperlukan nilai densitas rata-rata yang mewakili daerah penelitian. Penentuan nilai densitas ini dilakukan melalui beberapa metode, seperti metode Nettleton, metode Parasnis, serta analisis laboratorium.

#### **3.5.1 Metode Nettleton**

Metode ini diterapkan dengan melibatkan koreksi Bouguer serta koreksi medan. Apabila densitas yang digunakan dalam perhitungan mendekati densitas batuan sebenarnya di permukaan, maka profil anomali gayaberat yang diperoleh akan tampak lebih halus. Lintasan penampang ditentukan pada area yang memiliki variasi kondisi topografi. Nilai anomali Bouguer pada setiap titik pengamatan sepanjang lintasan kemudian diplot menggunakan beberapa variasi nilai rapat massa. Rapat massa permukaan dianggap tepat apabila anomali yang dihasilkan tidak menunjukkan hubungan dengan bentuk topografi (Sarkowi, 2014).

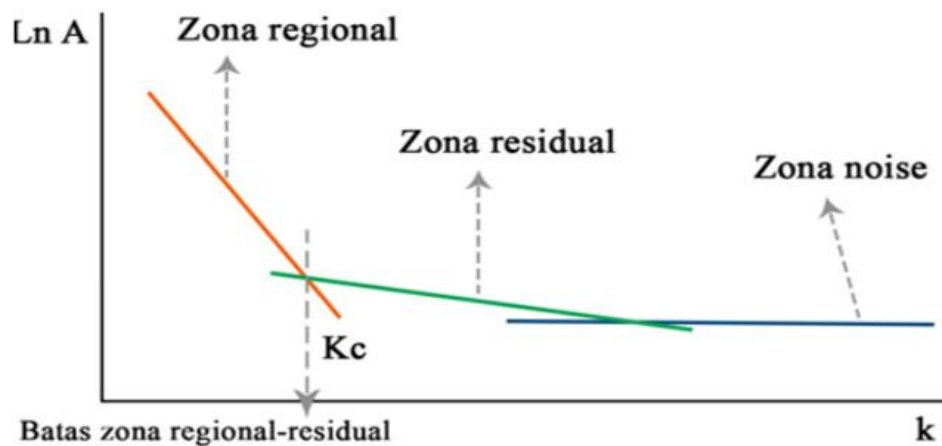
#### **3.5.2 Metode Parasnis**

Metode ini mengasumsikan kondisi permukaan wilayah penelitian tidak memiliki variasi relief yang signifikan. Namun, metode ini berkurang apabila diterapkan pada daerah yang sebagian besar titik pengamatannya berada pada ketinggian rendah, khususnya mendekati permukaan laut karena elevasi yang kecil akan menghasilkan gradien persamaan garis regresi linear yang sangat dipengaruhi oleh titik-titik pengukuran dengan elevasi yang lebih tinggi.

### **3.6 Analisis Spektrum**

Analisis spektrum adalah metode yang digunakan untuk memisahkan anomali melalui tahapan penyaringan (*filtering*). Pendekatan ini memanfaatkan hasil Transformasi *fourier* untuk memperoleh parameter berupa bilangan gelombang ( $k$ ) dan amplitudo ( $A$ ), yang selanjutnya dimanfaatkan untuk memperkirakan kedalaman sumber anomali serta menentukan lebar jendela yang sesuai dalam proses pemisahan data (Azmi, 2024). Melalui transformasi *fourier*, data anomali diubah dari domain ruang ke domain gelombang, sehingga informasi

kedalaman dapat dikaji melalui analisis spektrum. Gradien dengan nilai besar umumnya berkaitan dengan Anomali Regional yang bersumber dari kedalaman lebih dalam, sementara nilai gradien yang rendah umumnya merepresentasikan Anomali Residual yang berasal dari sumber dangkal (Zulfawati dkk., 2019). Gambar 12 menampilkan hasil transformasi tersebut dalam bentuk grafik.



Gambar 12. Kurva Ln A terhadap k (Blakely, 1996)

Nilai *cut-off* ( $k_c$ ) diperoleh dari titik perpotongan antara Anomali Regional dengan Anomali Residual pada grafik spektrum. Titik tersebut digunakan sebagai batas frekuensi yang membedakan pengaruh sumber anomali dalam dan dangkal. Lebar jendela *filter* pada proses pemisahan anomali gayaberat ditentukan berdasarkan nilai  $N$  yang diperoleh (Karunianto dkk., 2017).

Data potensial gayaberat yang diukur pada suatu bidang horizontal digunakan untuk memperoleh spektrum, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (18). Selanjutnya bentuk persamaan tersebut dikembangkan menjadi persamaan (19).

$$F(U) = G \Delta \rho F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (18)$$

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2 \Delta \rho \frac{e^{|k|(z_0 - z_1)}}{|k|} \quad (19)$$

Keterangan:

$\Delta \rho$  : Rapat massa ( $g/cm^3$ )

$U$  : Potensial gayaberat ( $m/s^2$ )

$G$  : Konstanta gayaberat  
 $r$  : Jarak antar posisi (m)

Pada persamaan (18) dan persamaan (19) diperoleh persamaan (20)

$$F(U) = 2\pi G \Delta \rho \frac{e^{|k|(z_0 - z_1)}}{|k|} \quad (20)$$

Transformasi *Fourier* terhadap anomali gayaberat sepanjang lintasan ditunjukkan pada Persamaan sebagai berikut:

$$F(g_z) = 1G \Delta \rho F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) \quad (21)$$

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

$$F(g_z) = 2\pi G \Delta \rho e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (23)$$

Keterangan:

$g_z$  : Nilai anomali gayaberat (mGal)  
 $k$  : Nilai bilangan gelombang (rad/m)  
 $z_0$  : Elevasi titik pengamatan (m)  
 $z_1$  : Kedalaman sumber anomali (m)  
 $\Delta \rho$  : Perbedaan densitas  
 $r$  : Jarak  
 $\left(\frac{\partial}{\partial z}\right)$  : Turunan parsial terhadap variabel  $z$   
 $\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right)$  : Turunan parsial dari  $\frac{1}{r}$  terhadap  $z$

Dengan asumsi bawah sebaran densitas bersifat acak serta tidak adanya keterkaitan antar nilai gayaberat disetiap titik pengamatan, maka paramater  $\mu = 1$ , hasil tranformasi *fourier* terhadap anomali gayaberat dapat disederhanakan dan dinyakan dalam bentuk Persamaan (24) sebagai berikut.

$$A = C e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (24)$$

Keterangan:

$A$  : Amplitudo

$C$  : Konstanta

Penerapan transformasi logaritma digunakan untuk menjelaskan keterkaitan antara amplitudo spektrum ( $A$ ), bilangan gelombang ( $k$ ), dan kedalaman ( $z_0 - z_1$ ). Melalui pendekatan ini, terlihat bahwa nilai bilangan gelombang ( $k$ ) meningkat seiring bertambahnya amplitudo spektral.

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| \ln C \quad (25)$$

Persamaan (26) dapat diibaratkan sebagai bentuk persamaan garis lurus:

$$y = mx + c \quad (26)$$

Nilai  $\ln A$  diposisikan sebagai sumbu  $y$ , sedangkan  $k$  ditempatkan sebagai sumbu  $x$  dan ( $z_0 - z_1$ ) menunjukkan kemiringan garis atau gradien pada grafik spektrum. Gradien yang diperoleh tersebut kemudian digunakan untuk memperkirakan kedalaman sumber anomali, baik yang berasal dari dangkal maupun dalam.

### 3.7 Filter *Moving Average*

*Moving average* merupakan teknik penyaringan data dengan prinsip perataan nilai anomali gayaberat (Setyanta dkk., 2008). Pada metode ini, nilai anomali dihitung menggunakan rata-rata data disetiap titik pegamatan secara berurutan. Proses ini dilakukan dengan menggeser jendela perhitungan dari satu titik ke titik berikutnya, sehingga menghasilkan nilai yang lebih halus. Hasil perataan kemudian dianggap merepresentasikan komponen regional

Secara matematis, metode *moving average* dengan ukuran jendela  $N \times N$  dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\Delta g_{regional} = \left( \frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2} \right) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\Delta g(i,j)}{N^2} \quad (27)$$

Perhitungan Anomali Residualnya sebagai berikut:

$$\Delta g_{residual} = \Delta g_{ABL} - \Delta g_{regional} \quad (28)$$

Dilihat dari karakteristik spektrum filternya, ukuran jendela  $N \times N$  berpengaruh langsung terhadap batas bawah panjang gelombang (*low cut*) atau batas atas frekuensi spasial (*high cut*) pada filter *low-pass*. Dengan demikian, semakin besar ukuran jendela, semakin panjang pula komponen gelombang regional yang dihasilkan. Secara sederhana, penggunaan jendela yang lebih kecil membuat nilai regional semakin mendekati anomali Bouguer sebenarnya (Sarkowi, 2014). Anomali Regional dicirikan oleh pola sebaran yang luas dan mencakup area yang lebih besar. Ditinjau dari kedalamannya Anomali Regional lebih dalam (Supriyadi dkk., 2019).

### 3.8 Analisis Derivative

#### 3.8.1 First Horizontal Derivative

*First horizontal derivative* yang juga dikenal sebagai gradien horizontal, merupakan hasil turunan pertama data anomali gayaberat terhadap arah horizontal. parameter ini menggambarkan besarnya perubahan nilai anomali gayaberat antar titik pengamatan dalam jarak tertentu (Haerudin dkk., 2020). Dengan demikian metode ini dapat menonjolkan zona-zona yang mengalami perubahan kontras secara lateral. Salah satu keunggulan FHD adalah tingkat sensitivitasnya terhadap gangguan (*noise*) yang relatif lebih rendah. Metode ini cukup efektif untuk memetakan serta menginterpretasikan struktur bawah permukaan, baik yang ebrada pada kedalaman dangkal maupun yang lebih dalam. FHD dilakukan menggunakan *software* Surfer 16 pada menu calculus dengan memasukkan nilai arah  $0^0$  pada sumbu x dan  $90^0$  pada sumbu y.

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (29)$$

Keterangan:

$\frac{\partial g}{\partial y}$  : Turunan horizontal medan gayaberat pada arah y

$\frac{\partial g}{\partial x}$  : Turunan horizontal medan gayaberat pada arah x

### 3.8.2 *Second Horizontal Derivative*

*Second vertical Derivative* adalah turunan orde kedua terhadap arah vertikal (sumbu z). Metode ini digunakan untuk mengkaji perubahan anomali secara vertikal. SVD berfungsi sebagai *high-pass* filter yang mendapatkan data residual, sehingga dapat membantu mengidentifikasi jenis patahan/sesar. Secara teoritis *second vertical derivative* diperoleh dari penurunan Persamaan laplace yang terdapat pada Persamaan (30).

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (30)$$

Atau

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (31)$$

Sehingga *second vertical derivative*-nya sebagai berikut:

$$SVD = \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left( \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \quad (32)$$

Berikut untuk data 1-D (data penampang) persamaannya sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (33)$$

Keterangan:

$\nabla^2$  : Operator laplace

$\Delta g$  : Nilai Bouguer gayaberat total

$\partial x$  : Nilai turunan sumbu x

$\partial y$  : Nilai turunan sumbu y

*Second vertical derivative (SVD)* digunakan untuk memperjelas zona anomali bernilai nol pada data gayaberat. Nilai 0 menunjukkan adanya perbedaan kepadatan batuan secara lateral, yang biasanya berkaitan dengan keberadaan patahan (Ibrahim dkk., 2022). Jenis patahan dapat diketahui dari karakteristik tertentu dapat dilihat pada Persamaan dibawah ini.

$|SVD|_{maks} > |SVD|_{min}$  untuk sesar normal

$|SVD|_{max} < |SVD|_{min}$  untuk patahan naik

$|SVD|_{maks} = |SVD|_{min}$  untuk patahan mendatar

Perhitungan nilai SVD dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa operator filter 2D yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter SVD (Handerson & Zietz, 1949)

<b>Operator Filter SVD Henderson &amp; Zietz (1949)</b>				
0.0000	0.0000	-0.0833	0.0000	0.0000
0.0000	1.0000	-2.6667	1.0000	0.0000
-0.0833	-2.6667	17.0000	-2.6667	-0.0833
0.0000	1.0000	-2.6667	1.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-0.0833	0.0000	0.0000

Tabel 3. Paramater SVD (Elkins, 1951)

<b>Operator Filter SVD Elkins (1951)</b>				
0.0000	-0.0833	0.0000	-0.0833	0.0000
-0.0833	-0.6667	-0.0334	-0.6667	-0.0833
0.0000	-0.0334	1.0668	-0.0334	0.0000
-0.0833	-0.6667	-0.0334	-0.6667	-0.0833
0.0000	-0.0833	0.0000	-0.0833	0.0000

Tabel 4. Parameter SVD (Rosenbach ,1953)

<b>Operator Filter SVD Rosenbach (1953)</b>				
0.0000	-0.0416	0.0000	-0.0416	0.0000
-0.0416	-0.3332	-0.7500	-0.3332	-0.0416
0.0000	-0.7500	4.0000	-0.7500	0.0000
-0.0416	-0.3332	-0.7500	-0.3332	-0.0416
0.0000	-0.0416	0.0000	-0.0416	0.0000

### 3.9 Pemodelan Inversi 3-D

*Inverse modelling* atau pemodelan kebelakang merupakan proses yang digunakan untuk menentukan parameter model berdasarkan data hasil pengamatan. Dalam proses inversi ini, diperlukan suatu model awal yang menggambarkan kondisi awal bawah permukaan, yaitu berupa nilai densitas rata-rata batuan yang digunakan sebagai dasar perhitungan selanjutnya (Maimunah dkk., 2022). Metode inversi merupakan tahapan pengolahan data hasil pengukuran atau data observasi yang memanfaatkan pendekatan matematis dan statistik untuk memperoleh informasi dari data dalam menganalisis karakteristik bawah permukaan. Proses ini, data observasi dianalisis dengan menyesuaikannya terhadap model matematika melalui teknik pencocokan kurva (*Curve fitting*), sehingga diperoleh model bawah permukaan yang paling mendekati kondisi sebenarnya (Melani dkk., 2021).

Inversi gayaberat dilakukan untuk mengetahui persebaran densitas bawah permukaan, sehingga dapat menjelaskan variasi densitas secara tiga dimensi serta memperkirakan parameter fisik batuan. Pada tahap pemodelan *mesh* dan data anomali sisa dimasukkan untuk membangun model tiga dimensi. Tahap analisis kemudian dilakukan untuk mengidentifikasi keberadaan reservoir, sumber panas, serta struktur sesar sebagai upaya konfirmasi kondisi geologi bawah permukaan (Rasimeng dkk., 2024)

### 3.10 Panas Bumi

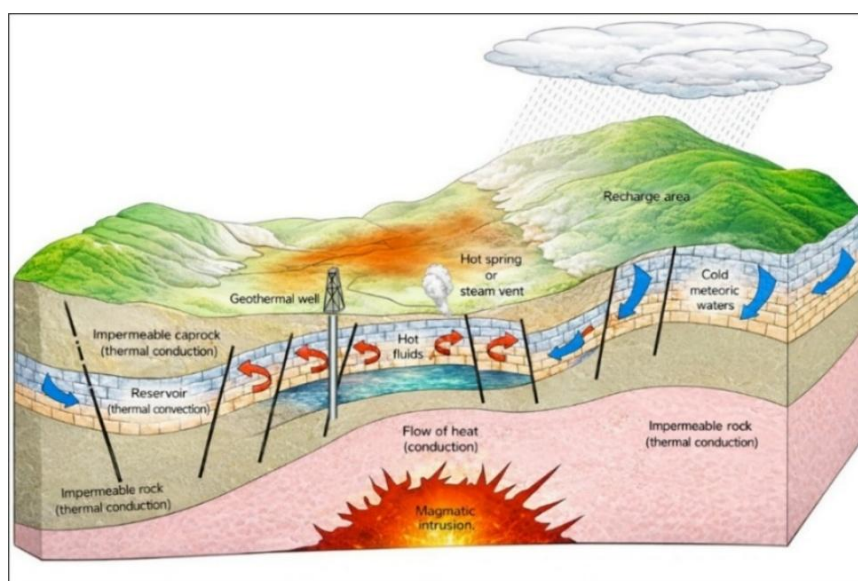
Sistem panas bumi adalah sumber energi yang tersimpan dibawah permukaan bumi dalam bentuk fluida panas, baik berupa air maupun uap, yang terbentuk akibat kondisi geologi tertentu. Di dalamnya terdapat sumber panas sebagai penghasil energi termal dan fluida yang berperan mengalirkan panas tersebut dari kedalaman hingga ke permukaan. Keberadaan energi panas tersebut umumnya dapat dikenali dari adanya anomali panas di permukaan, yang ditunjukkan oleh nilai gradien temperatur yang tinggi (Broto, 2011). Menurut Suharno (2013) sistem panas bumi dapat terbentuk apabila memenuhi beberapa syarat sebagai berikut:

1. Batuan berpori (reservoir) untuk menyimpan air panas dan uap panas.
2. Sumber panas (*heat source*) yang berasal dari plutonik atau magma yang telah mengalami pendinginan.

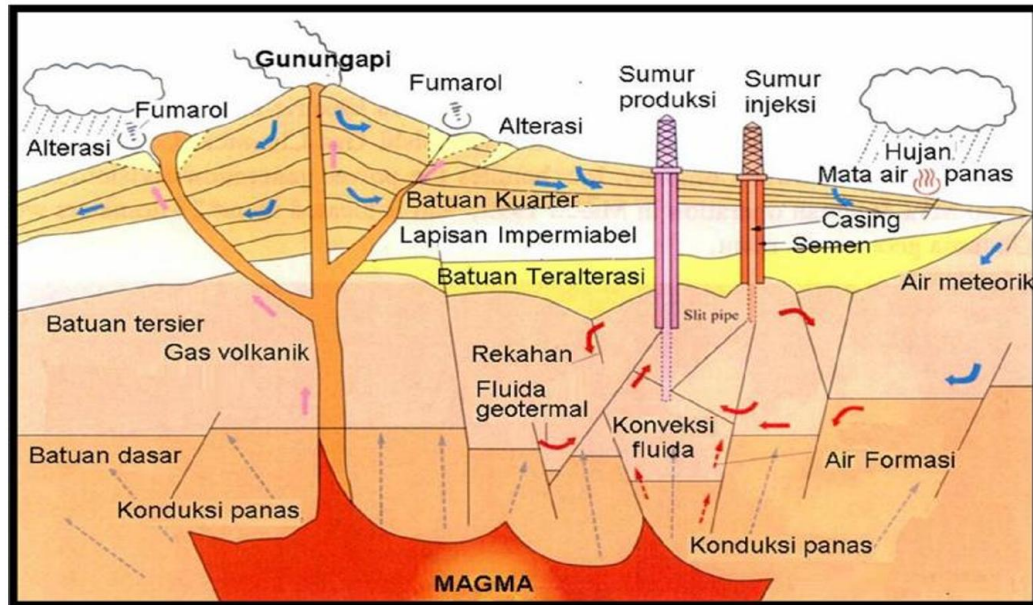
3. Struktur geologi seperti patahan, rekahan, dan ketidakselarasan dibutuhkan sebagai jalur utama
4. Lapisan penutup (*caprock*) yang bersifat kedap air.
5. Daerah resapan air (*recharge area*) serta aliran air bawah permukaan yang cukup untuk menjaga ketersediaan fluida di dalam reservoir.

Berdasarkan klasifikasinya, sistem panas bumi terbagi menjadi tiga tipe utama (Hochstein & Brownie, 2000) sebagai berikut:

1. Sistem hidrotermal merupakan mekanisme perpindahan energi panas dari sumbernya naik ke permukaan melalui proses konveksi akibat sirkulasi fluida meteorik. Sistem ini rembesan fluida fase cair umumnya berasal dari air meteorik yang masuk melalui daerah resapan. Sistem hidrotermal tersusun atas komponen utama berupa reservoir, sumber panas, zona resapan serta area manifestasi di permukaan.
2. Sistem vulkanik yaitu sistem yang menyalurkan energi panas secara langsung dari dapur magma menuju permukaan melalui pergerakan magma. Pada kondisi ini, keberadaan fluida meteorik umumnya dangat tetbatas atau .
3. Sistem vulkanik-hidrotermal, merupakan sistem gabungan antara sistem hidrotermal dan sistem vulkanik. Pada sistem ini, fluida yang berasal dari magma berinteraksi dan bercampur dengan air meteorik, sehingga menghasilkan sistem panas bumi dengan karakter yang lebih kompleks.



Gambar 13. Model sistem panas bumi (Dickson & Fanelli, 2004).



Gambar 14. Model konseptual sistem panas bumi (Putrohari, 2009)

Gambar 14 menunjukkan keberadaan rekahan di permukaan memungkinkan air masuk dan meresap ke dalam pori-pori batuan. Air tersebut kemudian bergerak ke arah bawah maupun menyamping selama masih terdapat jalur yang memungkinkan fluida mengalir. Saat fluida mencapai zona sumber panas (*heat source*), terjadi kenaikan temperatur yang menyebabkan sebagian air mengalami perubahan fase menjadi uap. Peningkatan suhu menyebabkan bertambahnya volume fluida yang diikuti oleh kenaikan tekanan di dalam sistem.

Menurut Suharno (2013) keberadaan sistem panas bumi umumnya dapat dikenali kemunculan berbagai manifestasi di permukaan. Fenomena tersebut menjadi petunjuk adanya aktivitas panas bumi dibawah permukaan. Beberapa bentuk manifestasi yang sering dijumpai sebagai indikasi sistem panas bumi antara lain berupa:

1. Geysir

Geysir merupakan semburan air panas dan uap yang berasal dari air tanah. Semburan ini terjadi karena air mengisi celah atau saluran bawah permukaan, kemudian terdorong keatas oleh tekanan uap dari bawah. Semakin besar jumlah air yang terakumulasi, semakin kuat tekanan uap sehingga semburan yang dihasilkan menjadi lebih tinggi.

## 2. Lumpur panas

Lumpur panas termasuk salah satu kenampakan manifestasi panas bumi yang terdapat dipermukaan. Manifestasi ini umumnya disertai kandungan uap panas dalam jumlah kecil serta  $CO_2$  yang sukar mengembun. Lumpur panas terbentuk dari hasil pengembunan uap panas dalam kondisi cair, sementara gelembung-gelembung yang muncul terjadi akibat keluarnya gas  $CO_2$ .

## 3. Mata air panas (*hot spring*)

Kemunculan mata air panas terjadi ketika air tanah bersentuhan dengan batuan panas di sekitar dapur magma, lalu naik ke permukaan melalui rekahan. Jika jumlah air yang keluar besar, mata air panas dapat berkembang menjadi kolam air panas

## 4. Kawah

Kawah merupakan cekungan berbentuk corong yang terdapat di puncak atau sekitar gunung api. Kawah ini menjadi tempat keluarnya material vulkanik, seperti gas, lava, dan tepra, ke permukaan.

## 5. Uap tanah (*steaming ground*)

Uap tanah merupakan manifestasi panas bumi yang ditunjukkan oleh munculnya uap panas ke permukaan. Uap ini berasal dari lapisan dangkal yang mengandung air panas dengan suhu mendekati titik didih, sehingga terjadi proses penguapan di permukaan.

## 6. Fumarola dan solfatara

Fumarola adalah lubang atau celah tempat keluarnya gas-gas vulkanik, yang umumnya dijumpai di sekitar gunung api atau sepanjang rekahan batuan. Solfatara merupakan salah satu tipe fumarol yang dicirikan oleh pelepasan gas-gas belerang, seperti  $SO_2$  dan  $H_2$ . Pada beberapa lokasi, endapan belerang dapat mengkristal dan melapisi rekahan batuan di sekitarnya.

## IV. METODOLOGI

### 4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir dilakukan di:

Tempat : Laboratorium Geofisika Geothermal, Teknik Geofisika, Universitas Lampung

Alamat : Gedung Teknik Geofisika, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 3514

Waktu : Januari – Mei 2026

### 4.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat pada Tabel 5.

Tabel 5. Alat dan bahan

No	Alat dan Bahan	Fungsi dan Sumber
1	Data	Data GGMPPlus
2	SHP Batas Administrasi Kecamatan	Data dasar dalam penyusunan peta lokasi daerah penelitian Diunduh pada <a href="https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web">https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web</a>
3	Data DEM Sumatera Barat	Digunakan untuk referensi peta lokasi penelitian dan ketinggian Diunduh pada laman <a href="https://tanahair.indonesia.go.id">https://tanahair.indonesia.go.id</a>

---

4	<i>Soft file</i> Peta Lembar Geologi	Referensi geologi daerah penelitian, digitasi struktur, serta korelasi dengan analisis <i>derivative</i> dan 3D
5	<i>Software</i> Surfer	<i>Software</i> digunakan untuk pengolahan data anomali Bouguer dan analisis <i>derivative</i>
6	<i>Software</i> Oasis Montaj	<i>Software</i> untuk melakukan koreksi medan
7	<i>Software</i> Numeri	<i>Software</i> untuk mendapatkan nilai K dan Ln A
8	<i>Software</i> Grav3D	<i>Software</i> untuk pengolahan inversi 3D
9	<i>Software</i> ArcGis 10.8	Digunakan untuk menyusun peta penelitian

---

### 4.3 Pengolahan Data

#### 4.3.1 Nilai Anomali Bouguer Lengkap

Peta Anomali Bouguer Lengkap (ABL) didapatkan setelah dilakukan tahapan koreksi terhadap data gayaberat. Nilai ABL dihitung dengan menjumlahkan anomali Bouguer sederhana dengan koreksi medan yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah dilakukan melalui beberapa tahapan koreksi. Setelah seluruh koreksi dilakukan, nilai ABL dihitung dengan menjumlahkan nilai Anomali Bouguer Sederhana dengan nilai koreksi medan yang telah diperoleh sebelumnya. Setelah nilai Anomali Bouguer Lengkap diperoleh, data tersebut kemudian diolah melalui proses *gridding* menggunakan Surfer 16 untuk membentuk sebaran data dalam bentuk kontur.

#### 4.3.2 Analisis Spektrum

Estimasi kedalaman sumber anomali, baik regional maupun residual dapat dilakukan melalui pendekatan analisis spektrum. Proses ini diterapkan dengan melakukan perubahan pada data anomali Bouguer lengkap menggunakan transformasi Fourier, sehingga data yang semula berada pada domain ruang (jarak) dapat dikonversi ke domain frekuensi. Hasil transformasi FFT menghasilkan komponen bilangan real dan imajiner pada setiap lintasan. Data tersebut kemudian diolah lebih lanjut untuk memperoleh parameter amplitudo (A), logaritma amplitudo (Ln A), frekuensi, serta bilangan gelombang (k). Parameter k dan Ln A

selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan lebar jendela (N) pada tahap pemisahan anomali.

#### **4.3.3 Pemisahan Anomali Regional dan Residual**

Data anomali masih mengandung pengaruh dari sumber yang bersifat regional (lebih dalam) maupun residual (lebih dangkal). Untuk membedakan anomali yang dangkal dan dalam diperlukan pemisahan data anomali menggunakan metode *moving average*. *Moving average* ini bekerja sebagai *low pass* filter, yaitu menyaring sinyal berfrekuensi tinggi dan mempertahankan sinyal berfrekuensi rendah. Tahap *filtering* dan pemisahan anomali dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *software* Surfer 16.

#### **4.3.4 Analisis Derivatif**

Analisis ini menerapkan Metode *First Horizontal Derivative* (FHD) digunakan menonjolkan batas struktur seologi dengan memanfaatkan perbedaan nilai maksimum dan minimum anomali. Dengan zona perubahan sifat fisik bawah permukaan dapat diidentifikasi dengan lebih jelas. Sementara *second vertical derivative* (SVD) diterapkan untuk menonjolkan pengaruh sumber dangkal, memperjelas keberadaan struktur, serta mengidentifikasi batas-batas struktur dangkal didaerah penelitian. Proses SVD dilakukan menggunakan *software* Surfer dengan memasukkan data Anomali Residual sebagai input. Dalam pengolahannya digunakan beberapa operator turunan vertikal. Dari hasil yang diperoleh operator yang menghasilkan pola kontur yang paling mendekati kontur Anomali Residual untuk digunakan dalam interpretasi.

#### **4.3.5 Pemodelan Inversi 3D**

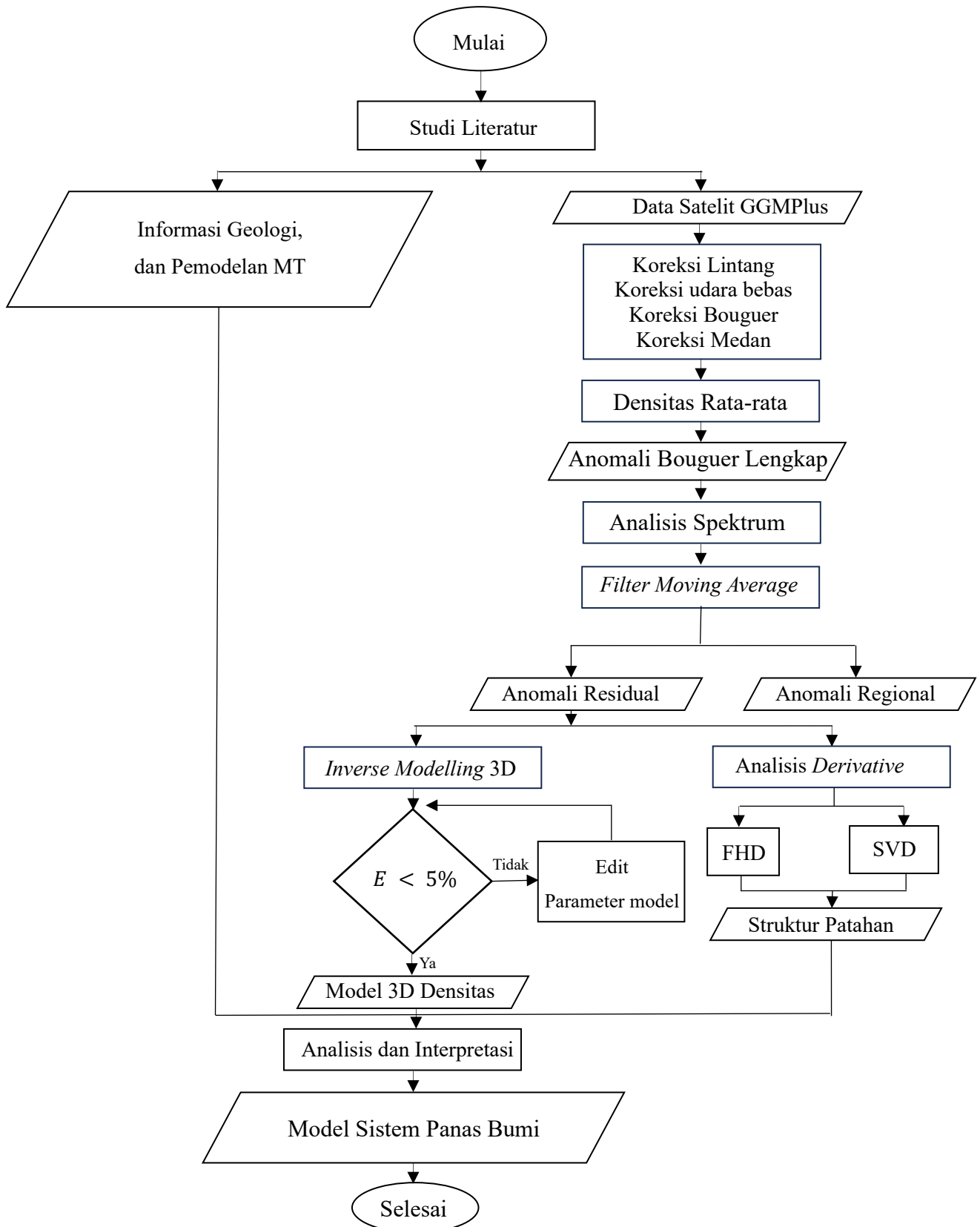
Pemodelan inversi tiga dimensi (3D) merupakan proses pemodelan kebelakang (*inverse modelling*). Kondisi bawah permukaan dimodelkan secara tiga dimensi dengan perangkat lunak Grav3D, data untuk pemodelan meliputi anomali gayaberat, data topografi, serta data *mesh* sebagai parameter pemodelan. Proses inversi ini adalah untuk menggambarkan sebaran densitas batuan pada bagian bawah permukaan. Hasil pemodelan tersebut kemudian digunakan untuk interpretasi dalam mengidentifikasi keberadaan zona resevoir.

Tabel 6. Pelaksanaan kegiatan penelitian

Kegiatan	Januari				Februari				Maret				April				Mei			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																				
Persiapan Data																				
Pengolahan Data																				
Penyusunan Laporan Dan Bimbingan Usul																				
Seminar Usul																				
Bimbingan Hasil																				
Seminar Hasil																				
Revisi Dan Persiapan Sidang Komprehensif																				
Sidang Komprehensif																				

#### 4.4 Diagram Alir

Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Diagram alir penelitian

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Distribusi anomali Bouguer lengkap di daerah Cubadak Pasaman berada pada rentang -17 mGal hingga -6 mGal. Zona anomali rendah berada pada rentang -17 hingga -14 mGal diinterpretasikan sebagai batuan berdensitas rendah yang berada disekitar area manifestasi. Sementara itu zona anomali tinggi berada pada rentang -10 hingga -6 mGal diinterpretasikan sebagai batuan yang memiliki densitas yang lebih tinggi.
2. Identifikasi struktur geologi melalui analisis derivatif *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) pada penampang A-A' dan B-B'. hasil korelasi antara nilai maksimum dan minimum FHD dengan SVD 0 menunjukkan adanya lima indikasi sesar yaitu sesar normal (sesar turun). Struktur ini berperan menjadi jalur permeabilitas yang mendukung migrasi fluida pada sistem panas bumi Cubadak.
3. Pemodelan sistem panas bumi Cubadak yang ditunjukkan pada Gambar 37 menunjukkan zona reservoir yang berdensitas rendah  $1,9 - 2,08 \text{ g/cm}^3$  pada kedalaman  $\pm 500$  hingga  $2800 \text{ m}$ . Sementara zona *heat source* yang berdensitas tinggi  $2,9 \text{ g/cm}^3$  berada pada kedalaman  $\pm 3000$  hingga  $4000 \text{ m}$ . Zona *caprock* yang dihasilkan dari MT. Sistem panas bumi di daerah penelitian dikontrol oleh struktur sesar yang berfungsi sebagai jalur permeabilitas bagi sirkulasi fluida hidrotermal.

## **6.2 Saran**

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan metode geomagnetik dan seismik guna melengkapi informasi bawah permukaan yang diperoleh dari data gayaberat dan magnetotelurik. Selain itu, penggunaan beberapa metode geofisika diharapkan dapat mengurangi ambiguitas interpretasi serta menghasilkan model sistem panas bumi yang lebih komprehensif dan memiliki tingkat keyakinan yang lebih tinggi dalam penentuan zona prospek panas bumi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Azmi, M. L. (2024). Analisis Sesar Sekitar Wilayah Danau Toba Berdasarkan Data Anomali Gravitasi: Fault Analysis Around Lake Toba Area Based On Gravity Anomaly DATA. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 4(3), 29-38.
- Broto, S. (2011). Aplikasi Metode Geomagnet Dalam Eksplorasi Panasbumi. *Teknik*, 32(1), 79-87.
- Blakely, R. J. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Haerudin, N., Despa, D., & Suharno. (2020). Penentuan Patahan dan Saluran Fluida Panas Bumi Rajabasa Bagian Selatan dengan Kombinasi Metode Second Horizontal Derivatif (SHD) dan Audio Magnetotelluric (AMT). *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung*, 1(1), 11–19. <https://doi.org/10.23960/jpi.v1n1.12>
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New Ultrahigh-Resolution Picture Of Earth's Gravity Field. *Geophysical Research Letters*, 40(16), 4279–4283. <https://doi.org/10.1002/grl.50838>
- Ibrahim, M. M., Utami, P., & Raharjo, I. B. (2022). Analisis Struktur Geologi Berdasarkan Data Gravitasi Menggunakan Metode Second Vertical Derivative (SVD) Pada Lapangan Panas Bumi "X". *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 3(2), 59–59. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2022.v3i2.76>
- Joni, W., & Rahadinata, T. (2018). Struktur Sistem Panas Bumi Daerah Cubadak Berdasarkan Pemodelan Inversi 3-D Data Magnetotelurik. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 13(1), 59-69.
- Karunianto, A. J., Haryanto, D., Hikmatullah, F., & Laesanpura, A. (2017). Penentuan Anomali Gayaberat Regional dan Residual Menggunakan Filter

- Gaussian Daerah Mamuju Sulawesi Barat. *Eksplorium*, 38(2), 89. <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2017.38.2.3921>
- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral (2017). *Potensi Panas Bumi Indonesia*. Direktorat Panas Bumi. Jakarta.
- Kurniadi, Y. (2017). Identifikasi Zona Sesar Menggunakan Metode Gravity di Wilayah Ciater, Subang, Jawa Barat. *Skripsi*. Institut Teknologi Bandung.
- Maimuna, A. K., Miftakhunnisa, A. F., & Segoro, Y. A. (2022). Pemodelan Inversi 3 Dimensi untuk Identifikasi Dugaan Keberadaan Sesar menggunakan Data Anomali Gaya Berat di Laut Flores (Studi Kasus Gempa Flores 14 Desember 2021). *Progress: Jurnal Geofisika*, 1(1), 55-62.
- Maulana, I. (2012). Analisis 4D Mikrogravity dan Gradien Vertikal 4D Mikrogravity: Studi Kasus Amblesan Semarang. *Skripsi*. Universitas Indonesia
- Melani, O., Fara, T. A., Anjelika, L., Safitri, D. E., Wibowo, R. C., & Zaelani, A. (2021). Penerapan Metode Inversi Dalam Pendugaan Nilai Resistivitas. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 6(2), 91–101. <https://doi.org/10.24967/teksis.v6i2.1413>
- Putra, N. S., Arman, Y., & Zulfian, Z. (2021). Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Potensi Panas Bumi Pada Lembar Kota Agung Menggunakan Data Global Gravity Model Plus (GGMplus). *Prisma Fisika*, 9(2), 183. <https://doi.org/10.26418/pf.v9i2.49545>
- Rasimeng, S., Pratama, T. P. E., & Wibowo, R. C. (2024). Structural Geology Identification based on Derivative Analysis Gravity Data in Tangkuban Perahu Mountain. *Journal of Engineering and Scientific Research*, 6(1). <https://doi.org/10.23960/jesr.v6i1.163>
- Ramadhani, W. (2014). Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Dengan Menggunakan Metode Gravity Di Desa Sumbermanjing Wetan Dan Desa Druju–Malangselatan. *Skripsi*, Universitas Brawijaya.
- Ridha, M., & Darminto, D. (2016). Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi dan Kedalaman. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 12(3).

- Rosid, S. (2005). *Gravity Method in Exploration Geophysics*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Rosari, A. A., Muris, M., & Arsyad, M. (2017). Analisis Sifat Fisis Dan Sifat Mekanik Batuan Karst Maros. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika (JSPF)*, 13(3), 278-281.
- Ridha, M., & Darminto, D. (2016). Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi dan Kedalaman. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 12(3). <https://doi.org/10.12962/j24604682.v12i3.1403>
- Setyanta, B., I, S., & Simamora, W. H. (2008). Model Geologi Bawah Permukaan Daerah Muarawahau Hasil Analisis Anomali Gayaberat Berdasarkan Estimasi Kedalaman dengan Metode Analisis Spectral. *Sumber Daya Geologi Bandung*, 18(06), 335–348.
- Syamsuriadi. (2013). Penentuan Struktur Bawah Permukaan Kota Makassar Dengan Menggunakan Metode Gayaberat (Gravity). *Skripsi*. Universitas Hasanudin.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gayaberat*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Suharno. (2013). *Eksplorasi Geothermal*. Bandar Lampung: Lembaga Penelitian Universitas Lampung.
- Suprianto, A., Supriyadi, Priyantari, N., & Eko Cahyono, B. (2021). Correlation Between GGMPlus, Topex and BGI Gravity Data in Volcanic Areas of Java Island. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012023>
- Supriyadi, S., Khumaedi, K., Sugiyanto, S., & Setiaswan, F. (2019). Pemisahan Anomali Regional dan Residual Data Gayaberat Studi Kasus di Kota Lama Semarang. *Physics Education Research Journal*, 1(1), 29. <https://doi.org/10.21580/perj.2019.1.1.3927>
- Syahwanti, H., Srigutomo, W., & Kholid, M. (2017). 2-D Resistivity Structure of Cubadak Geothermal Area Revealed from Magnetotelluric Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 62(1).
- Sudrajad, B. (2018). Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Wilayah Kabupaten Nabire di Bagian Utara Leher Burung Pulau Papua Menggunakan Pemodelan

- Inversi Tiga Dimensi (3D) dan Analisis Horisontal Derivatif Berdasarkan Data Anomali Gravitasi GGMplus. *Thesis*. Universitas Gadjah Mada.
- Suhadiyatno. (2008). Pemodelan Metode 3D dengan menggunakan Matlab. *Skripsi*. Fisika. Universitas Indonesia.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sherrif, R.E., (1990). *Applied Geophysics second Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tim Penyelidikan Panas Bumi Wilayah Sumatera Barat (2008). *Laporan Penyelidikan Geologi, Geokimia dan geofisika Terpadu Daerah Panas Bumi Cubadak, Kabupaten Pasaman Sumatera Barat*. Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi: Bandung.
- Tsoulis, D. (2001). Terrain correction computations for a densely sampled DTM in the Bavarian Alps. *Journal of Geodesy*, 75(5–6), 291–307. <https://doi.org/10.1007/s001900100176>
- Zulfawati, L., Minardi, S., & Angraini, L. M. (2019). Analisis Spektrum Pada Data Gaya Berat Daerah Lombok Tengah Dan Lombok Timur Untuk Menentukan Estimasi Ketebalan Sedimen. *Jurnal Inovasi dan Pembelajaran Fisika*, 6(1), 34-44.