

**IDENTIFIKASI SISTEM PANASBUMI TELAGA NGEBEL, JAWA TIMUR  
MENGUNAKAN ANALISIS GRADIEN DAN PEMODELAN INVERSI  
DATA GAYABERAT  
(Skripsi)**

Oleh

**Syeikha Puspita Dewi**

**2215051031**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG**

**2026**

**IDENTIFIKASI SISTEM PANASBUMI TELAGA NGEBEL, JAWA TIMUR  
MENGUNAKAN ANALISIS GRADIEN DAN PEMODELAN INVERSI  
DATA GAYABERAT**

**Oleh  
Syeikha Puspita Dewi**

**Skripsi**

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

**Pada**

**Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG**

**2026**

## ABSTRAK

### IDENTIFIKASI SISTEM PANASBUMI TELAGA NGEBEL, JAWA TIMUR MENGUNAKAN ANALISIS GRADIEN DAN PEMODELAN INVERSI DATA GAYABERAT

Oleh

**SYEIKHA PUSPITA DEWI**

Daerah panasbumi Telaga Ngebel, Jawa Timur, merupakan salah satu daerah prospek panasbumi yang ditandai dengan keberadaan manifestasi berupa fumarol dan mata air panas. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan serta sistem panasbumi menggunakan metode gayaberat melalui analisis *derivative* dan pemodelan inversi 3D. Pengolahan data gayaberat dilakukan dengan beberapa tahapan koreksi, dilanjutkan dengan pemisahan anomali regional dan anomali residual. Selanjutnya, dilakukan analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk menentukan struktur dan jenis struktur, serta pemodelan inversi 3D untuk mengetahui distribusi densitas bawah permukaan. Analisis FHD dan SVD berhasil mengidentifikasi adanya dua struktur yang saling berdekatan dan diidentifikasi sebagai zona depresi pada zona terakumulasi reservoir dengan densitas yang rendah. Berdasarkan hasil inversi 3D, sistem panasbumi daerah penelitian tersusun atas tiga zona utama, yaitu zona dengan densitas  $> 2,9$  g/cc pada kedalaman  $>2,5$  km diidentifikasi sebagai sumber panas, zona dengan densitas rendah 1,9-2,0 g/cc diidentifikasi sebagai zona reservoir, zona dengan densitas sedang 2,3-2,7 g/cc diidentifikasi sebagai zona impermeabel. Zona reservoir diinterpretasikan berada pada batuan vulkanik yang memiliki porositas dan permeabilitas tinggi akibat rekahan dan alterasi hidrotermal, sedangkan sumber panas diinterpretasikan berkaitan dengan batuan andesit yang berasosiasi dengan aktifitas magmatik.

Kata kunci: Telaga Ngebel, gayaberat, panasbumi, derivatif, inversi.

## **ABSTRACT**

### **IDENTIFICATION OF THE GEOTHERMAL SYSTEM IN TELAGA NGEBEL, EAST JAVA USING GRADIENT ANALYSIS AND GRAVITY DATA INVERSION MODELING**

By

**SYEIKHA PUSPITA DEWI**

*The Telaga Ngebel geothermal area, East Java, is one of the prospective geothermal areas characterized by the presence of manifestations in the form of fumaroles and hot springs. This study aims to identify subsurface structures and the geothermal system using the gravity method through derivative analysis and 3D inversion modeling. Gravity data processing was carried out through several correction stages, followed by the separation of regional and residual anomalies. Furthermore, First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) analyses were conducted to determine the structures and types of structures, while 3D inversion modeling was performed to determine the subsurface density distribution. Based on the FHD and SVD analyses, two closely spaced structures were identified and interpreted as depression zones within the reservoir accumulation zone with low density. Based on the 3D inversion results, the geothermal system in the study area consists of three main zones, namely a zone with a density of  $>2,9$  g/cc at depths of  $>2,5$  km, identified as the heat source; a low-density zone of  $1,9$ – $2,0$  g/cc, identified as the reservoir zone; and a moderate-density zone of  $2,3$ – $2,7$  g/cc, indicated as an impermeable zone. The reservoir zone is interpreted to be located within volcanic rocks that have high porosity and permeability due to fractures and hydrothermal alteration, whereas the heat source is interpreted to be associated with andesitic rocks related to magmatic activity.*

*Keywords: Telaga Ngebel, gravity, geothermal, derivative, inversion.*

**Judul** : Identifikasi Sistem Panasbumi Telaga Ngebel,  
Jawa Timur Menggunakan Analisis Gradien dan  
Pemodelan Inversi Data Gayaberat

**Nama Mahasiswa** : **Syeikha Puspita Dewi**

**Nomor Pokok Mahasiswa** : 2215051031

**Program Studi** : Teknik Geofisika

**Fakultas** : Teknik



**Pembimbing 1**

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

NIP. 197209281999031001

**Pembimbing 2**

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

NIP. 198509172019031004

**2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika**

Dr. Ir. Syamsurrijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA. IPM  
NIP. 197307162000121002

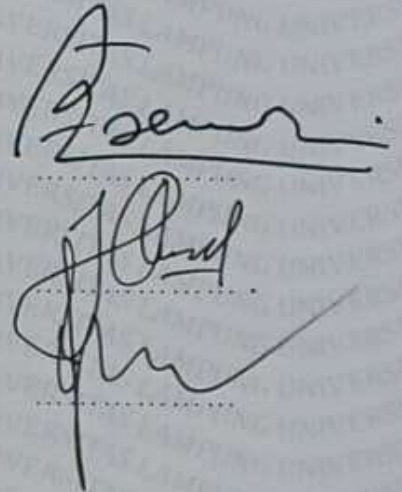
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

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

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

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



2. Dekan Fakultas Teknik

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

NIP. 196910302000031001



Tanggal Lulus Ujian Tugas Akhir: 4 Juni 2026

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa karya Tugas Akhir yang judul “Identifikasi Sistem Panasbumi Telaga Ngebel, Jawa Timur Menggunakan Analisis Gradien dan Pemodelan Inversi Data Gayaberat” merupakan hasil karya, pemikiran, dan penelitian pribadi yang disusun untuk memenuhi salah satu syarat meraih gelar sarjana. Apabila dalam penulisan Tugas Akhir terdapat kutipan, pendapat, maupun hasil penelitian dari pihak lain, seluruhnya telah dicantumkan secara jelas sesuai sumber aslinya. Seluruh data, analisis, serta pembahasan yang terdapat pada Tugas Akhir ini telah dilakukan sendiri dengan mengacu pada kaidah ilmiah yang berlaku. Apabila di kemudian hari pernyataan ini terbukti tidak benar sebagaimana mestinya, maka saya siap menerima segala konsekuensi dan sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026

Penulis,



Syeikha Puspita Dewi

NPM 2215051031

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Syeikha Puspita Dewi, lahir di Rejomulyo pada 1 Juni 2004. Penulis adalah anak sulung dari empat bersaudara, putri pasangan Bapak Subarnadi dan Ibu Miani. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari TK Trikora tamat pada tahun 2010. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan di SD Negeri 1 Rejomulyo lulus pada tahun 2016. Pendidikan selanjutnya ditempuh di SMP Negeri 2 Natar selesai pada tahun 2019. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 13 Bandar Lampung lulus pada tahun 2022.

Pada tahun 2022 penulis resmi diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama menempuh perkuliahan, penulis tidak hanya berfokus pada kegiatan akademik, tetapi juga aktif mengikuti kegiatan organisasi kemahasiswaan. Penulis pernah tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana sebagai anggota bidang sosial budaya masyarakat. Selain itu, penulis juga aktif menjadi anggota divisi advokasi pada organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa. Penulis juga merupakan anggota divisi internal Himpunan Ahli Geofisika Indonesia *Student Chapter* Universitas Lampung 2025, dan menjadi kepala divisi *fieldtrip* pada Himpunan Ahli Geofisika Indonesia *Student Chapter* Universitas Lampung 2026. Penulis juga mendapatkan kesempatan menjadi Asisten Praktikum Eksplorasi Geothermal pada semester genap 2025/2026. Pada tahun 2025, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Ogan Jaya, Sungkai Utara, Lampung Timur, serta menjalani Kerja

Praktik di Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi yang berada pada divisi panasbumi pada bulan Oktober-November 2025 dengan judul “Pengolahan dan Pemodelan 2D Data Gayaberat Daerah Panasbumi Tehoru, Maluku Tengah”. Penulis melanjutkan kegiatan penelitian secara mandiri di kampus dengan judul “Identifikasi Sistem Panasbumi Telaga Ngebel, Jawa Timur Menggunakan Analisis Gradien dan Pemodelan Inversi Data Gayaberat” sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika Universitas Lampung.

## **PERSEMBAHAN**

Pertama, penulis ucapkan syukur atas kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan kekuatan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan karya ini dengan baik. Penulis juga menyampaikan terima kasih atas kemudahan dan kelancaran yang telah diberikan selama proses penyusunan karya ini. Dengan rasa penuh cinta dan hormat penulis persembahkan tulisan ini kepada:

### **Ibu dan Bapak Tercinta**

Terima kasih atas setiap doa, pengorbanan, kasih sayang, dukungan, serta kerja keras yang telah diberikan kepada penulis. Setiap perjalanan dan keberhasilan penulis tidak lepas dari doa-doa, nasihat, serta ketulusan Ibu dan Bapak. Karya sederhana ini penulis persembahkan sebagai salah satu bentuk kebanggaan di antara begitu banyak hal yang sudah Ibu dan Bapak berikan.

### **Naufal, Sheryl, dan Almas**

Karya ini penulis persembahkan untuk adik-adik tersayang yang terus memberikan semangat dan keceriaan selama proses penyusunan karya ini. Semoga karya ini dapat menjadi motivasi dan panutan bagi kalian untuk terus mengejar impian yang kalian inginkan.

## MOTTO HIDUP

**“Jadilah baik. Sesungguhnya Allah menyukai orang-orang yang berbuat baik”**

(QS Al-Baqarah: 195)

***“Yesterday is over, tomorrow is yet to come, today is yet unknown”***

(Miji - Our Unwritten Seoul)

***“Never let anyone, including yourself belittle your dreams”***

(Joshua Hong)

***“Study as if your future depends on the effort you make today”***

## KATA PENGANTAR

Dengan puji dan syukur kepada Allah SWT atas segala nikmat, rahmat, dan karunia-Nya Tugas Akhir yang berjudul “Identifikasi Sistem Panasbumi Telaga Ngebek, Jawa Timur Menggunakan Analisis Gradien dan Pemodelan Inversi Data Gayaberat” ini berhasil diselesaikan. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwasannya Tugas Akhir ini memiliki keterbatasan dan masih memerlukan penyempurnaan. Karena hal tersebut, penulis berharap terhadap kritik maupun saran yang positif serta dapat menjadi bahan evaluasi dan perbaikan di kemudian hari. Dengan penuh rasa syukur penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang turut berkontribusi baik langsung maupun tidak langsung selama penelitian dan penyusunan Tugas Akhir. Semoga Tugas Akhir ini mampu memberikan kontribusi, wawasan ilmu, serta menjadi referensi kepada pembaca dan penelitian selanjutnya, khususnya dalam bidang geofisika panasbumi.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026

Penulis



Syeikha Puspita Dewi

NPM 2215051031

## SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Identifikasi Sistem Panasbumi Telaga Ngebel, Jawa Timur Menggunakan Analisis Gradien dan Pemodelan Inversi Data Gayaberat” dengan lancar. Shalawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu ‘alaihi wassalam yang senantiasa menjadi sumber teladan dalam kesabaran dan menuntut ilmu. Tugas Akhir ini disusun sebagai perjalanan yang penuh proses dan pembelajaran bagi penulis. Berkat doa, dukungan, bantuan banyak pihak yang telah memberikan semangat, sehingga penulis dapat menuntaskan karya ini hingga akhir. Dengan penuh rasa hormat dan ketulusan, penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, yang telah memberikan dukungan, arahan, dan fasilitas yang diberikan selama menempuh perkuliahan di Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung sekaligus Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan masukan, kritik, dan saran kepada penulis. Terima kasih atas bimbingan yang telah diberikan sehingga penulis dapat memperbaiki dan menyempurnakan Tugas Akhir ini lebih baik.
4. Prof. Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T., selaku Dosen Pembimbing I, terima kasih atas arahan, perhatian, serta bimbingan dengan penuh kesabaran kepada

penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir. Terima kasih atas masukan, ilmu, dan saran yang telah diberikan kepada penulis.

5. Bapak Ilham Dani, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan masukan, bimbingan, dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik.
6. Ibu Nanda Hanyfah, selaku Dosen Pembimbing Akademik, atas perhatian, bimbingan yang diberikan kepada penulis selama melaksanakan masa studi di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, yang telah memberikan ilmu, pengalaman, serta pembelajaran selama menjalani masa studi. Semoga ilmu yang diberikan menjadi bekal bagi penulis di masa mendatang.
8. Bapak tercinta, terima kasih atas segala perjuangan, kerja keras, dan pengorbanan yang telah diberikan selama ini. Setiap nasihat, motivasi, dan dukungan yang diberikan membuat penulis yakin bahwa penulis bisa sampai dititik ini. Terima kasih karena telah menjadi panutan penulis untuk dapat mengejar pendidikan hingga ke perguruan tinggi. Semoga Bapak selalu diberikan kesehatan, kebahagiaan, dan rezeki yang lancar.
9. Ibu tercinta, yang telah melahirkan dan memberikan kasih sayang dan cintanya kepada penulis. Terima kasih atas dukungan yang tidak berhenti diberikan kepada penulis, atas kesabaran yang begitu luas, serta kelapangan hati yang menemani setiap proses yang penulis lalui hingga sampai saat ini. Terima kasih telah menjadi wanita yang paling sabar yang pernah penulis kenal, selalu menjadi sosok panutan dengan penuh keteguhan dan kasih sayang. Besar harapan penulis agar Ibu selalu diberikan kesehatan, umur yang panjang, hati yang bahagia, serta kehidupan yang penuh cinta dan keberkahan.
10. Adik-adikku tersayang, Naufal, Sheryl, dan Almas, terima kasih karena kalian menjadi salah satu hal yang membuat penulis terus semangat untuk melangkah sejauh ini. Semoga kalian tumbuh menjadi seseorang yang bahagia, kuat, dan bisa mencapai semua hal baik yang kalian impikan. Semoga kelak kita menjadi anak-anak yang mampu buat Ibu dan Bapak bangga.

11. *My Bestie* Vivi, terima kasih sudah menjadi sahabat yang selalu mendengarkan dan memahami setiap keluh kesahku. Terima kasih untuk setiap momen-momen seru yang kita lewati. Ayo kita realisasikan *wishlist* kita yang seru-seru itu.
12. *My roommates in* Bandung, Salsa dan Presti, terima kasih untuk momen-momen sederhana selama di Bandung, yang selalu *excited* tiap minggunya untuk menjelajahi tiap sudut kota Bandung. Terima kasih untuk *support* selama proses penyusunan Tugas Akhir ini. *Thanks for all the stories as* kakak tertua yang selalu *related* satu sama lain. Semoga suatu hari nanti kita bisa melihat kembali semua proses ini dengan rasa bangga.
13. Asda, Khalila, Sabrina, Yuniar, Ulivia, dan Fitra, yang penulis sayangi, terima kasih atas kebersamaannya semenjak menjadi mahasiswa baru hingga saat ini, terima kasih sudah kebersamai selama perjalanan perkuliahan ini.
14. Amalia, Zeno, Tyas, dan Firda, teman-teman panasbumiku, terima kasih sudah kebersamai, serta memberikan saran dan masukan. Selalu seru kumpul bareng kalian.
15. Divisi Panasbumi PSDMBP yang telah memberikan kesempatan kepada penulis dalam menjalankan Kerja Praktik, penulis mengucapkan terima kasih atas kesempatan, bimbingan, pengalaman, serta wawasan yang berharga.
16. Keluarga besar Teknik Geofisika angkatan 2022 terima kasih atas kebersamaan, cerita, dan perjalanan yang telah dilalui bersama selama masa perkuliahan.
17. Diri penulis sendiri, terima kasih sudah menyelesaikan apa yang sudah kamu mulai, kamu keren sudah sampai dititik ini, dan tetaplah bertumbuh untuk versi yang lebih baik lagi.

Bandar Lampung, 12 Juni 2026

Penulis



Syeikha Puspita Dewi

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>MENGESAHKAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>PERNYATAAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>viii</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>x</b>
<b>MOTTO HIDUP</b> .....	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>SANWACANA</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xxi</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 Lokasi Daerah Penelitian .....	5
2.2 Geologi Daerah Penelitian .....	6
2.3 Stratigrafi Daerah Penelitian .....	8
2.4 Implikasi Tektonik Daerah Penelitian .....	9

2.5	Geomorfologi Daerah Penelitian.....	10
2.6	Penelitian Terdahulu.....	11
<b>III.</b>	<b>TEORI DASAR .....</b>	<b>13</b>
3.1	Metode Gayaberat .....	13
3.2	Konsep Dasar Metode Gayaberat.....	13
3.2.1	Gayaberat Newton.....	13
3.2.2	Percepatan Gayaberat.....	14
3.2.3	Potensial Gayaberat.....	16
3.3	Koreksi-Koreksi Gayaberat.....	17
3.3.1	Koreksi Lintang ( <i>Latitude Correction</i> ).....	18
3.3.2	Koreksi Udara Bebas ( <i>Free Air Correction</i> ).....	18
3.3.3	Koreksi Bouguer .....	20
3.3.4	Koreksi Medan ( <i>Terrain Correction</i> ).....	21
3.4	Estimasi Densitas .....	22
3.4.1	Metode Nettleton.....	24
3.4.2	Metode Parasnis .....	25
3.5	Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual.....	25
3.5.1	Anomali Bouguer Lengkap.....	25
3.5.2	Analisis Spektrum.....	26
3.5.3	<i>Moving average</i> .....	28
3.6	Analisis <i>Derivative</i> .....	29
3.6.1	<i>First horizontal derivative (FHD)</i> .....	29
3.6.2	<i>Second Vertical Derivative (SVD)</i> .....	29
3.7	Pemodelan Inversi 3-D.....	31
3.8	Panasbumi .....	33
3.8.1	Reservoir .....	35
3.8.2	Struktur Geologi.....	37
3.8.3	Batuan Penudung ( <i>Caprock</i> ).....	37
3.8.4	Sumber Panas ( <i>Heat source</i> ).....	38
3.8.5	Daerah resapan ( <i>Recharge Area</i> ) .....	38
<b>IV.</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>39</b>
4.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	39

4.2	Alat dan Bahan Penelitian.....	39
4.3	Prosedur Penelitian.....	40
4.3.1	Studi Literatur .....	40
4.3.2	Anomali Bouguer Lengkap.....	40
4.3.3	Analisis Spektrum .....	41
4.3.4	Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual.....	41
4.3.5	<i>First horizontal derivative</i> (FHD) dan <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD).....	41
4.3.6	<i>Inverse Modelling</i> (3D).....	42
4.4	Jadwal Kegiatan Penelitian .....	43
4.5	Diagram Alir.....	44
<b>V.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>45</b>
5.1	Data Penelitian .....	45
5.2	Topografi Daerah Penelitian .....	45
5.3	Anomali Bouguer Lengkap .....	46
5.4	Analisis Spektrum .....	48
5.5	<i>Filter Moving average</i> .....	52
5.6	Anomali Regional .....	52
5.7	Anomali Residual.....	54
5.8	Analisis <i>Derivative</i> .....	55
5.8.1	<i>First horizontal derivative</i> (FHD).....	55
5.8.2	<i>Second Vertical Derivative</i> (SVD) .....	57
5.9	<i>Inverse Modelling</i> 3D.....	59
5.9.1	Lintasan A-A' .....	61
5.9.2	Lintasan B-B' .....	64
5.9.3	Lintasan C-C' .....	66
5.9.4	Lintasan D-D' .....	68
5.10	Identifikasi Sistem Panasbumi Telaga Ngebel .....	70
<b>VI.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>74</b>
6.1	Kesimpulan .....	74
6.2	Saran.....	75
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>76</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi daerah penelitian.....	5
2. Peta geologi daerah penelitian .....	7
3. Stratigrafi Peta Geologi Lembar Madiun.....	8
4. Tektonik lempeng Indonesia bagian Barat.....	10
5. Gaya tarik-menarik antara dua benda bermassa.....	14
6. Potensial dan kuat medan massa tiga dimensi (3D).....	16
7. Model bentuk bumi berbentuk elips.....	18
8. Koreksi udara bebas terhadap gayaberat.....	19
9. Koreksi Bouguer terhadap gayaberat.....	21
10. Pengaruh bukit dan lembah terhadap pengukuran gayaberat.....	21
11. Estimasi rapat massa dilakukan menggunakan metode Nettleton .....	24
12. Grafik hubungan amplitudo dan bilangan gelombang.....	28
13. Model konseptual sistem panasbumi .....	34
14. Perpindahan panas di bawah permukaan .....	35
15. Sistem dominasi uap .....	36
16. Sistem dominasi air.....	37
17. Diagram alir .....	44
18. Peta topografi daerah penelitian.....	46
19. Peta anomali Bouguer lengkap.....	47
20. Peta lintasan analisis spektrum.....	48
21. Grafik LnA dan k lintasan 1 .....	49
22. Grafik LnA dan k lintasan 2.....	50
23. Grafik LnA dan k lintasan 3.....	51

24. Peta anomali regional daerah panasbumi Telaga Ngebel.....	53
25. Peta anomali residual daerah panasbumi Telaga Ngebel .....	54
26. Peta <i>first horizontal derivtaive</i> .....	56
27. Peta <i>second vertical derivative</i> .....	58
28. Peta <i>overlay</i> SVD dan indikasi patahan .....	59
29. Peta lintasan slice 3D pada peta residual .....	60
30. Peta distribusi densitas inversi 3d pada peta anomali residual .....	61
31. Grafik lintasan anomali residual, grafik lintasan gradien horizontal anomali residual, grafik lintasan SVD anomali residual, model distribusi densitas, model interpretasi struktur patahan dan sistem panasbumi lintasan A-A' .....	63
32. Grafik lintasan anomali residual, grafik lintasan gradien horizontal anomali residual, grafik lintasan SVD anomali residual, model distribusi densitas, model interpretasi struktur patahan dan sistem panasbumi lintasan B- .....	65
33. Grafik lintasan anomali residual, grafik lintasan gradien horizontal anomali residual, grafik lintasan SVD anomali residual, model distribusi densitas, model interpretasi struktur patahan dan sistem panasbumi lintasan C-C'.....	67
34. Grafik lintasan anomali residual, grafik lintasan gradien horizontal anomali residual, grafik lintasan SVD anomali residual, model distribusi densitas, model interpretasi struktur patahan dan sistem panasbumi lintasan D-D' .....	69
35. <i>Overlay</i> peta geologi daerah penelitian dan indikasi patahan.....	70
36. Interpretasi sistem panasbumi berdasarkan pemodelan data gayaberat.....	71

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Tabel densitas batuan .....	23
2. Operator Henderson & Zietz (1949) .....	30
3. Operator Elkins (1951).....	31
4. Operator Rosenbach (1953) .....	31
5. Alat dan bahan penelitian .....	39
6. Tabel kegiatan penelitian Tugas Akhir .....	43

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia terletak pada zona pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia yang menjadikan sebagai salah satu negara dengan cadangan energi panas bumi terbesar di dunia. Interaksi antar lempeng tersebut menghasilkan jalur vulkanik aktif yang memanjang dari Pulau Sumatera, Pulau Jawa, hingga Nusa Tenggara. Proses subduksi yang berlangsung secara terus-menerus memicu aktivitas magmatisme dalam pembentukan sistem panas bumi di sepanjang jalur tersebut (Hall, 2012).

Energi panasbumi termasuk suatu sumber energi alternatif yang berasal dari panas alami. Indonesia diperkirakan memiliki sekitar 40% potensi energi panasbumi dari total potensi panasbumi di dunia. Namun, di Indonesia pemanfaatan energi panasbumi masih relatif rendah dibandingkan dengan total yang tersedia (Putri & Sulhan, 2023).

Pulau Jawa salah satu pulau dengan potensi yang signifikan di Indonesia dengan potensi panasbumi terbesar kedua setelah Pulau Sumatera. Pada tahun 2019 pemanfaatan potensi panasbumi baru tercapai sebanyak 9% dari total sumber daya yang dimiliki (Ahluriza & Harmoko, 2025). Menurut Sidik & Harmoko (2025), Provinsi Jawa Timur sendiri memiliki 13 titik potensi panasbumi yang tersebar diberbagai wilayah, salah satu yang telah ditetapkan sebagai Wilayah Kerja Panasbumi (WKP) adalah WKP Telaga Ngebel yang mencakup Kabupaten Ponorogo dan Kabupaten Madiun, dengan potensi cadangan terduga sebesar 120 MW berdasarkan SK Menteri ESDM No. 1788 K/33/MEM/2007. WKP Telaga Ngebel dikelola oleh PT Bakrie Darmakarya Energi dengan potensi kapasitas yang direncanakan mencapai 165 MW.

Daerah Telaga Ngebel berada pada kompleks vulkanik Gunung Wilis yang secara geologi tersusun oleh batuan vulkanik berumur Tersier hingga Kuartar dan telah mengalami proses denudasi lanjut (Bronto, 2006). Proses tersebut menyebabkan perubahan morfologi gunung api yang mengalami pengikisan intensif serta berkembangnya rekahan dan jalur permeabilitas yang berpotensi menjadi jalur fluida hidrotermal. Manifestasi panasbumi di sekitar Telaga Ngebel, seperti mata air panas dan fumarol menunjukkan adanya sistem panasbumi bawah permukaan yang masih aktif. Sistem hidrotermal umumnya dikontrol oleh adanya struktur geologi berupa patahan dan rekahan sebagai jalur migrasi fluida panas reservoir menuju ke permukaan (Hochstein & Sudarman, 2015). Selain itu, deformasi tektonik Jawa Timur yang berkaitan dengan *back-arc thrust* berperan dalam pembentukan dan reaktivasi struktur geologi yang mempengaruhi fluida panasbumi (Widjajanti dkk., 2024).

Sistem panasbumi dapat diidentifikasi menggunakan metode geofisika, salah satunya yaitu metode gayaberat yang digunakan dalam penelitian ini. Metode gayaberat merupakan metode geofisika yang digunakan mengukur variasi percepatan gayaberat bumi akibat perbedaan densitas batuan di bawah permukaan (Telford dkk., 1990). Nilai anomali gayaberat ditandai karena adanya kontras densitas antara batuan penyusun. Batuan yang memiliki densitas tinggi akan menampilkan anomali positif sedangkan untuk batuan yang memiliki densitas rendah akan menghasilkan anomali negatif. Metode gayaberat dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur geologi, batas litologi, serta variasi kondisi bawah permukaan (Blakely, 1996). Sistem panasbumi sangat dipengaruhi oleh proses hidrotermal yang menyebabkan penurunan densitas batuan akibat perubahan mineral dan peningkatan porositas. Sehingga menghasilkan anomali gayaberat rendah yang sering diasosiasikan dengan zona reservoir panasbumi (Hochstein & Sudarman, 2015). Zona anomali rendah juga sering diinterpretasikan sebagai daerah alterasi atau zona rekahan yang menjadi jalur sirkulasi fluida hidrotermal.

Data gayaberat satelit merupakan data hasil pengukuran tidak langsung atau data hasil pengukuran dari udara. Data *Global Gravity Model Plus* (GGMPlus) 2013 merupakan model medan gayaberat yang memiliki resolusi tinggi yang mampu menghasilkan estimasi medan gayaberat dengan resolusi spasial sekitar 200

m (Hirt dkk., 2013). Data GGMPPlus 2013 dapat digunakan untuk melakukan pemodelan dan mengetahui kontras densitas bawah permukaan sehingga dapat digunakan untuk melakukan identifikasi seperti kedalaman, densitas, dan geometri struktur (Suprianto dkk., 2021).

Penelitian mengenai potensi panasbumi di WKP Telaga Ngebel sejauh ini masih didominasi mengenai studi geologi permukaan dan identifikasi manifestasi, sebagaimana yang dilakukan oleh Wijaya dkk., (2025). Selain itu, terdapat penelitian oleh Harahap dkk., (2022) telah memanfaatkan data magnetotellurik (MT) untuk mengetahui sistem panasbumi pada daerah Telaga Ngebel, yang menghasilkan model bawah permukaan 2D serta menghasilkan keberadaan lapisan *caprock*, zona reservoir, dan sumber panas. Kajian bawah permukaan menggunakan metode gayaberat sendiri masih jarang dilakukan, terutama dalam menentukan zona reservoir, mendelineasi distribusi litologi bawah permukaan, dan identifikasi struktur. Sehingga perlu dilakukan analisis menggunakan data gayaberat untuk mendukung interpretasi keberadaan sistem panasbumi pada daerah penelitian.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian Tugas Akhir ini dapat dilihat sebagai berikut.

1. Bagaimana struktur geologi bawah permukaan sistem panasbumi berdasarkan analisis *derivative* data gayaberat?
2. Bagaimana model distribusi densitas bawah permukaan hasil pemodelan inversi 3D data gayaberat pada daerah penelitian?
3. Bagaimana interpretasi sistem panasbumi berdasarkan struktur geologi dan distribusi densitas bawah permukaan?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan pada penelitian Tugas Akhir ini dapat dilihat sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi struktur geologi berdasarkan analisis *derivative* data gayaberat.
2. Membuat model distribusi densitas bawah permukaan menggunakan pemodelan inversi (3D) data gayaberat.

3. Menginterpretasi sistem panasbumi berdasarkan distribusi densitas bawah permukaan dan struktur bawah permukaan hasil pengolahan data gayaberat.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian Tugas Akhir ini dapat dilihat sebagai berikut.

1. Data yang digunakan dalam penelitian adalah data gayaberat satelit *Global Gravity Model Plus (GGMPlus)* 2013.
2. Keberadaan dan jenis struktur bawah permukaan ditentukan menggunakan analisis *derivative*.
3. Pemodelan distribusi densitas dilakukan menggunakan inversi 3D data gayaberat, serta interpretasi sistem panasbumi dibatasi berdasarkan hasil analisis data gayaberat.

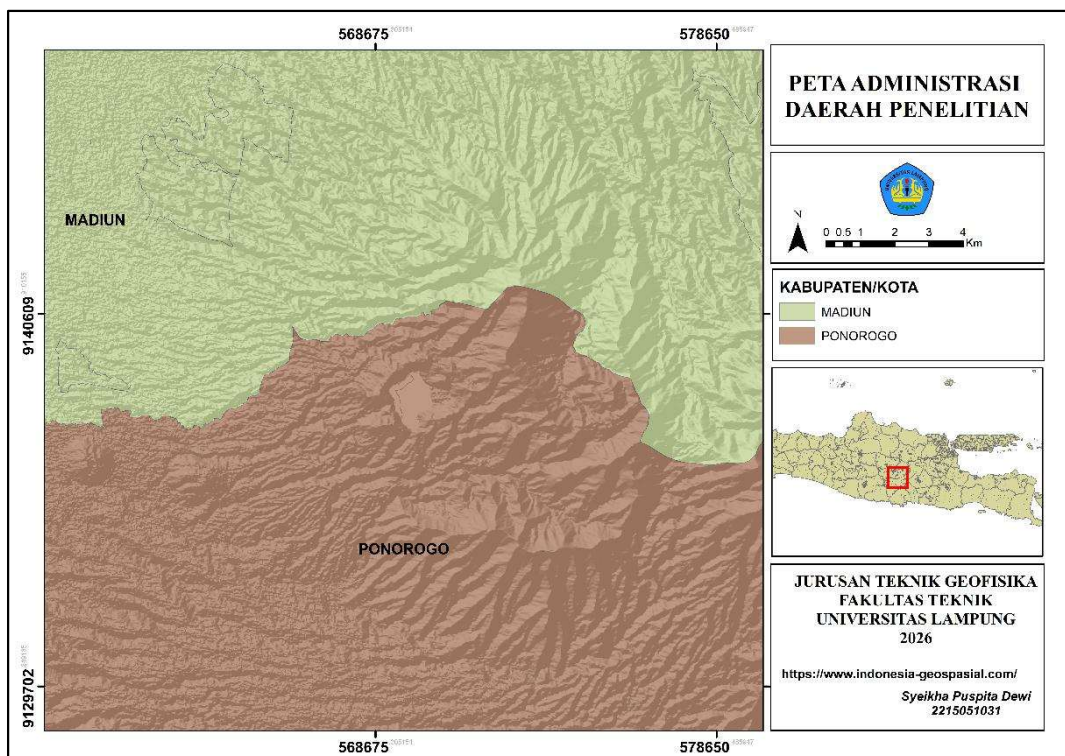
#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat melengkapi analisis bawah permukaan pada WKP Telaga Ngebel berdasarkan metode gayaberat serta menjadi referensi bagi penelitian berikutnya.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Lokasi Daerah Penelitian

Wilayah penelitian ini secara administratif ditunjukkan oleh Gambar 1 berada pada Kecamatan Ngebel, Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur. Secara geografis, wilayah ini berada pada posisi geografis  $111^{\circ}29'$  BT -  $111^{\circ}35'$  BT dan  $7^{\circ}53'$  LS -  $7^{\circ}58'$  LS. Kawasan Telaga Ngebel berada di sebelah Barat kaki Gunung Wilis, yang dikenal sebagai salah satu gunung berapi tua di wilayah Jawa Timur. Selain itu, pada sebelah utara berbatasan dengan kabupaten Madiun. Kawasan Telaga Ngebel termasuk dalam wilayah dengan topografi berbukit dan bergunung, dikelilingi hutan lindung yang masih dalam kawasan Pegunungan Wilis.



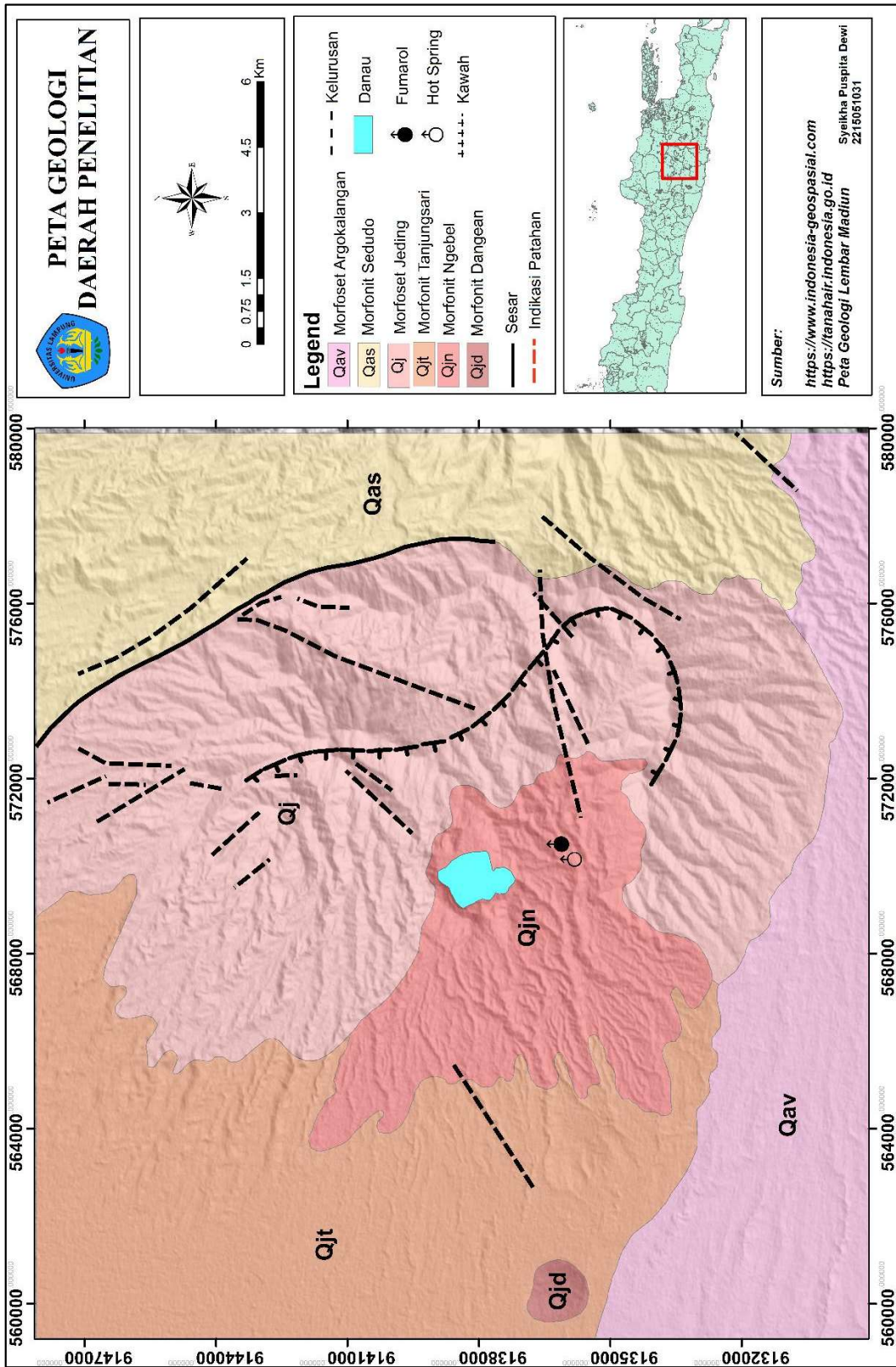
Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian

## 2.2 Geologi Daerah Penelitian

Pulau Jawa merupakan hasil dari serangkaian kompleks yang melibatkan pembentukan cekungan, patahan, perlipatan, serta aktivitas vulkanisme di bawah pengaruh berbagai rezim tegangan yang berubah dari masa ke masa. Secara umum, Pulau Jawa memiliki tiga pola struktur, yakni pola struktur yang berorientasi timur laut-barat daya yang dikenal sebagai Pola Meratus, pola berarah utara-selatan atau disebut Pola Sunda, sedangkan yang pola berarah timur-barat yang dikenal sebagai Pola Jawa. Subduksi yang berorientasi dari timur laut-barat daya (NE-SW) hingga relatif timur-barat (EW), yang telah berlangsung sejak Oligosen hingga saat ini, merupakan faktor utama yang mengontrol pembentukan susunan geologi Pulau Jawa pada periode Tersier (Yudiantoro dkk., 2021).

Secara geologi, kawasan Telaga Ngebel dan sekitarnya merupakan bagian dari kompleks vulkanik Gunung Wilis yang termasuk dalam deretan gunung api tua di Jawa Timur. Kompleks Gunungapi Wilis merupakan salah satu gunung api yang menyusun rangkaian vulkanik berkomposisi magma basaltik hingga andesitik di sepanjang Busur Sunda. Busur magmatik Sunda-Banda terbentuk akibat dari proses penunjaman Lempeng Indo-Australia ke arah utara di bawah Lempeng Eurasia yang menyebabkan terbentuknya zona subduksi. Busur magmatik tersebut dicirikan oleh keberadaan gunung api berumur Miosen-Pliosen dan Kuartar, yang mengindikasikan adanya fenomena migrasi busur vulkanik tidak hanya berarah timur-barat, melainkan juga mengarah ke utara (Soeria-Atmadja dkk., 1994).

Gunung Wilis merupakan gunung api strato (*stratovolcano*) yang sudah tidak aktif dengan ketinggian puncaknya mencapai 2.563 mdpl dan termasuk dalam zona fisiografi Pegunungan Wilis-Lawu yang tersusun atas batuan vulkanik berumur Kuartar hingga Tersier. Telaga Ngebel terbentuk sebagai hasil aktivitas vulkanisme dan magmatisme, yang berperan dalam pembentukan sistem panasbumi di wilayah tersebut, sehingga cekungan yang terbentuk terisi oleh air hujan dan air tanah membentuk danau seperti yang ada saat ini (Ismunandar dkk., 2024). Peta Geologi daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (Hartono dkk., 1992)



4. Satuan Morfoset Jeding (Qj)

Satuan ini merepresentasikan endapan dari sub-kerucut atau lereng atas gunungapi, bisa berupa aliran lava atau endapan lahar. Sub satuan Jeding dikenal berkaitan dengan bagian Barat kerucut gunungapi. Batuan penyusun satuan ini adalah lava andesit piroksen, breksi gunungapi, dan sisipan tuf dan batuapung.

5. Morfonit Tanjungsari (Qjt)

Satuan batuan vulkanik ini berada pada periode awal umur Kuartar. Satuan batuan vulkanik yang lebih muda dari Qjn, kemungkinan terdiri dari endapan lava dan material piroklastik yang membentuk lereng menengah gunungapi. Batuan penyusun satuan ini yaitu tuf lapili batuapung bersisipan tuf kasar.

6. Morfonit Ngebel (Qjn)

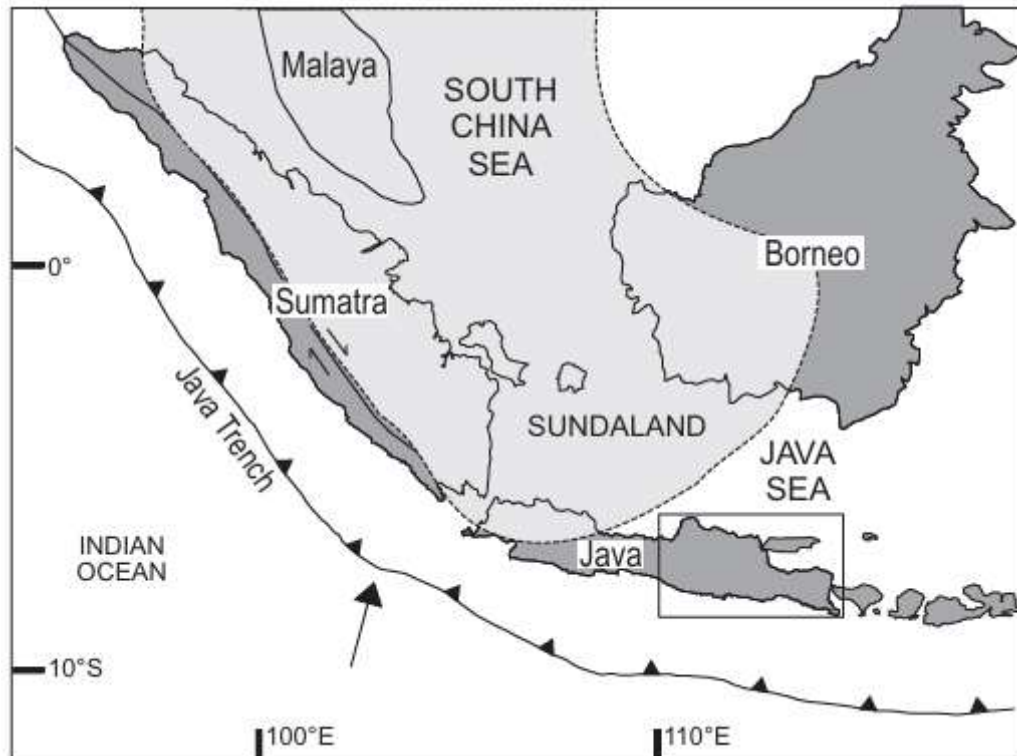
Pada periode awal Kuartar, terendapkan batuan yang paling tua tersusun dari produk vulkanik awal yaitu lava andesit piroksen, breksi gunungapi, dan sisipan tuf dan batuapung.

#### **2.4 Implikasi Tektonik Daerah Penelitian**

Secara tektonik, Jawa Timur merupakan bagian dari sistem busur vulkanik aktif hasil dari penunjaman Lempeng Indo-Australia dengan Lempeng Eurasia pada Gambar 4. Proses subduksi Lempeng Indo-Australia yang menunjani ke arah utara di bawah Lempeng Eurasia pada sepanjang Palung Jawa sehingga menghasilkan magmatisme intensif, deformasi kerak, serta pembentukan jalur gunung api Kuartar di Pulau Jawa. Karena memiliki ciri tegasan kompresi regional berarah relatif utara-selatan yang memicu pembentukan patahan naik, lipatan, serta reaktivasi struktur yang mengontrol perkembangan morfologi dan sistem vulkanik di Jawa Timur (Hamilton, 1988).

Pola struktur di daerah penelitian terbagi menjadi tiga arah utama, yaitu arah timur laut- barat daya merupakan Pola Meratus yang berada disebelah barat, terlihat adanya Patahan Cimandiri, terdapat pola singkapan batuan Pra-Tersier dibagian Tengah tepatnya daerah Krangsambung. Bagian timur diketahui terdapat patahan pembatas Cekungan Padi. Pada arah pola struktur utara-selatan atau Pola Sunda didominasi oleh ekspresi berupa patahan-patahan pada bagian barat khususnya

Cekungan Asri, Cekungan Sunda, dan Cekungan Arjuna. Selanjutnya, yaitu Pola Jawa terdapat patahan-patahan naik seperti Patahan Beribis dan patahan di Cekungan Bogor pada bagian barat. Pada bagian tengah terlihat pola sesar Zona Serayu dan Zona Serayu Selatan, sedangkan pada bagian timur arah dicerminkan oleh keberasaan Sesar Pegunungan Gendeng (Bachri, 2014).



Gambar 4. Tektonik lempeng Indonesia bagian Barat (Smyth dkk., 2008)

Gunung Wilis dan Gunung Lawu berada dalam segmen busur vulkanik Jawa yang perkembangan geologinya dipengaruhi oleh struktur regional arah barat-timur hingga barat laut-tenggara. Aktivitas tektonik regional dipengaruhi oleh evolusi Cekungan Kendeng dan Zona Solo yang berada di utara jalur gunung api, sehingga menghasilkan interaksi antara proses vulkanisme dan tektonik kompresional (Fahrudin & Aribowo, 2024).

## 2.5 Geomorfologi Daerah Penelitian

Secara geomorfologi, kawasan Telaga Ngebel tersusun oleh kerucut gunung api, perbukitan lava, kubah vulkanik, serta cekungan vulkanik. Telaga Ngebel merupakan danau vulkanik yang terbentuk pada depresi atau kawah hasil aktivitas

gunung api purba di Kompleks Vulkanik Ngebel (Ismunandar dkk., 2024). Aktivitas magmatisme belangsung sejak Neogen hingga Kuartar membentuk bentang alam vulkanik yang didominasi oleh kerucut gunung api, lereng vulkanik, serta dataran hasil endapan material piroklastik (Hall, 2012).

Geomorfologi daerah Gunung Wilis disebabkan oleh aktivitas vulkanik sehingga menghasilkan bentang alam beragam yang menyusun morfologi utama wilayah tersebut. Selain itu, deformasi kerak yang berkaitan dengan sistem *back-arc thrust* di Jawa Timur menyebabkan terbentuknya reaktivasi struktur dan rekahan. Struktur-struktur ini yang akan berperan dalam mengontrol perkembangan relief permukaan, arah lembah, dan pola aliran sungai (Widjajanti dkk., 2024).

Gunung api di Jawa Timur menunjukkan karakter geomorfologi gunung api tua yang telah mengalami denudasi lanjut. Morfologi yang relatif membulat dan berkembangnya lembah sungai yang mencerminkan dominasi proses erosi jangka panjang, biasanya gunung api tua berada di wilayah tropis (Bronto, 2006). Pelapukan intensif pada batuan vulkanik menghasilkan tanah tebal dan relief perbukitan bergelombang hingga terjal, yang menunjukkan tahap evolusi geomorfik lebih lanjut dibandingkan gunung api Kuartar yang lebih muda.

## 2.6 Penelitian Terdahulu

Yudiantoro dkk. (2021) melakukan penelitian mengenai interaksi fluida hidrotermal dengan batuan kawasan panasbumi Kompleks Vulkanik Ngebel, Ponorogo, Jawa Timur. Penelitian ini menjelaskan bahwa daerah Ngebel memiliki empat penyusun satuan vulkanik yaitu Gubung Jeding dengan litologi breksi aliran piroklastik dan lava andesit basaltik, Gunung kemlandingan dengan lava andesit piroksen, Gunung Manyutan dengan lava andesit hornblende, dan Gunung Ngebel sebagai fase muda yang didominasi oleh lava andesit. Selain itu, penelitian ini juga mendapatkan geokimia fluida yang terdapat di daerah Ngebel, dimana diketahui terdapat manifestasi mata air panas dan *mud pool* dengan suhu permukaan masing-masing mencapai 70°C hingga 80°C. Estimasi temperatur reservor berdasarkan geotermometer Na-K berkisar antara 189°C hingga 206°C, dengan tipe fluida air panas termasuk ke dalam jenis klorida yang mencirikan zona *upflow* dari sistem panas bumi aktif. Hasil analisis petrografi menunjukkan bahwa batuan andesit

basaltik di sekitar zona manifestasi telah mengalami proses alterasi hidrotermal, yang ditandai oleh penggantian mineral primer plagioklas dan piroksen oleh mineral sekunder berupa montmorillonit, kalsedon, kuarsa, dan oksida besi.

Harahap dkk. (2022) meneliti mengenai determinasi zona reservoir panasbumi menggunakan metode Magnetotellurik (MT) di kawasan prospek panas bumi Telaga Ngebel, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi nilai resistivitas bawah permukaan guna mengidentifikasi komponen sistem panas bumi di kawasan tersebut. Hasil inversi 2-D, didapatkan nilai resistivitas 0  $\Omega$ .m hingga 2.000  $\Omega$ .m. Sistem panas bumi di kawasan Telaga Ngebel diidentifikasi terdiri atas tiga lapisan utama. Lapisan pertama adalah lapisan penudung (*caprock*) yang dicirikan oleh nilai resistivitas rendah kurang dari 10  $\Omega$ .m dan diinterpretasikan tersusun oleh litologi breksi vulkanik. Lapisan kedua adalah zona reservoir dengan nilai resistivitas berada antara 10  $\Omega$ .m hingga 239  $\Omega$ .m yang diinterpretasikan tersusun oleh litologi tuff. Lapisan ketiga adalah lapisan sumber panas (*heat source*) yang dicirikan oleh nilai resistivitas tinggi >239  $\Omega$ .m dan diinterpretasikan tersusun oleh litologi lava.

Wijaya dkk., (2025) melakukan penelitian mengenai kontrol struktur geologi terhadap distribusi zona alterasi batuan di kawasan Telaga Ngebel dan sekitarnya, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan survei penginderaan jauh, survei lapangan, pengambilan sampel batuan teralterasi, serta pengukuran data struktur geologi. Berdasarkan analisis *lineament* menggunakan perangkat lunak ArcGIS berbasis data DEMNAS menunjukkan bahwa kepadatan struktur di kawasan ini tergolong tinggi, terutama di bagian Selatan Telaga Ngebel, yang dicirikan oleh perpotongan beberapa patahan geser (*strike-slip fault*). Perpotongan patahan-patahan tersebut berperan sebagai jalur naiknya fluida hidrotermal menuju permukaan. Alterasi propilitik yang dicirikan oleh kehadiran mineral klorit tersebar di sekitar Telaga Ngebel dan bagian Selatannya, pada zona dengan kepadatan struktur tinggi. Sementara itu, alterasi argilik yang dicirikan oleh kehadiran mineral lempung berkembang di luar zona propilitik pada area dengan kepadatan struktur lebih rendah. Penelitian menyimpulkan bahwa sesar geser yang menjadi pengontrol zona alterasi.

### **III. TEORI DASAR**

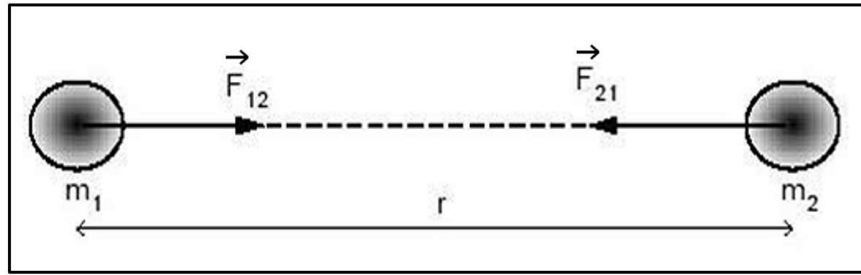
#### **3.1 Metode Gayaberat**

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika pasif yang memanfaatkan pengukuran variasi percepatan gayaberat di permukaan bumi karena perbedaan nilai densitas batuan di bawah permukaan (Blakely, 1996). Metode ini bertujuan untuk menginterpretasikan bawah permukaan berdasarkan distribusi nilai percepatan gayaberat. Perubahan nilai percepatan gayaberat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain efek pasang surut, kondisi topografi, koreksi udara bebas, bentuk bumi, dan perbedaan densitas bagian di bawah permukaan (Karunianto dkk., 2017). Keberadaan suatu sumber atau masa di bawah permukaan yang dapat menimbulkan gangguan terhadap medan gayaberat relatif yang dikenal sebagai anomali gayaberat. Perbedaan nilai gayaberat yang dihasilkan umumnya sangat kecil, sehingga pengukurannya memerlukan ketelitian alat dengan tingkat akurasi yang tinggi agar perbedaan gayaberat bumi dapat terukur secara akurat melalui perbandingan nilai pengukuran antar titik observasi (Ryka & Afifah, 2019).

#### **3.2 Konsep Dasar Metode Gayaberat**

##### **3.2.1 Gayaberat Newton**

Hukum Newton I menjelaskan bahwa terdapat gaya tarik antara dua benda bermassa berbanding dengan hasil kali massa kedua benda tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara pusat massa keduanya. Dengan demikian, semakin besar jarak yang memisahkan pusat massa kedua benda tersebut maka semakin kecil gaya tarik-menarik antara kedua massa (Reynold, 1998). Interaksi antara dua buah massa yang saling tarik-menarik dapat dilihat pada Gambar 5.



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

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

Keterangan:

$\vec{F}$  : Gaya gravitasi (N)

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

$m_1$  : Massa benda 1 (kg)

$m_2$  : Massa benda 2 (kg)

$r^2$  : Jarak antara dua buah massa (m)

$\hat{r}$  : Vektor satuan arah

### 3.2.2 Percepatan Gravitasi

Hukum II Newton menyatakan hubungan gaya dengan percepatan. Besar gaya yang bekerja pada suatu benda sebanding dengan massa benda serta percepatan benda. Apabila percepatan tersebut kearah vertikal, maka percepatan itu berasal dari pengaruh gravitasi sesuai dengan Persamaan 2.

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

Interaksi antara bumi sebagai benda bermassa ( $M$ ) dan suatu benda bermassa pada permukaan bumi ( $m$ ), dan jarak ( $R$ ) terhadap pusat massa kedua objek tersebut memenuhi hukum yang sama yang dapat dinyatakan dalam Persamaan 4.

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

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

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

Keterangan:

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

$r$  : Jari-jari bumi (m)

$m$  : Massa benda (kg)

$M$  : Massa bumi (kg)

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

$\hat{r}$  : Vektor satuan arah

Pada Persamaan 4, diketahui besarnya percepatan gayaberat bumi ( $\vec{g}$ ) dipengaruhi oleh massa bumi ( $M$ ) dan kuadrat jari-jari bumi ( $R$ ), di mana nilainya berbanding lurus dengan massa bumi dan hubungan terbalik dengan kuadrat radius bumi. Semakin besar massa bumi maka semakin meningkat percepatan gayaberat, sedangkan semakin besar jarak dari pusat bumi, akan semakin kecil nilai percepatan gayaberat. Galileo Galilei melakukan pengukuran percepatan gayaberat pertama kali yang kemudian nilai percepatan gayaberat bumi didefinisikan berdasarkan hasil pengukuran tersebut. Nilai satuan percepatan dinyatakan dalam satuan Gal, dimana 1 Gal sama dengan  $1 \text{ cm/s}^2$ . Pada eksplorasi gayaberat, anomali gayaberat umumnya dinyatakan dalam orde miligal (mGal), dengan 1 mGal bernilai  $10^{-3}$  Gal atau setara dengan  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ .

Besarnya percepatan gayaberat  $g$  ( $m/s^2$ ) ditentukan oleh massa benda  $m$  (kg). Massa tersebut merupakan hasil perkalian antara densitas atau massa jenis  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) dengan volume  $V$  ( $\text{m}^3$ ). Oleh karena itu, nilai gayaberat yang terukur pada suatu lokasi mencerminkan distribusi massa jenis serta *volume* material penyusunnya. Hubungan antara densitas, massa, dan volume dinyatakan pada Persamaan 5.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Keterangan:

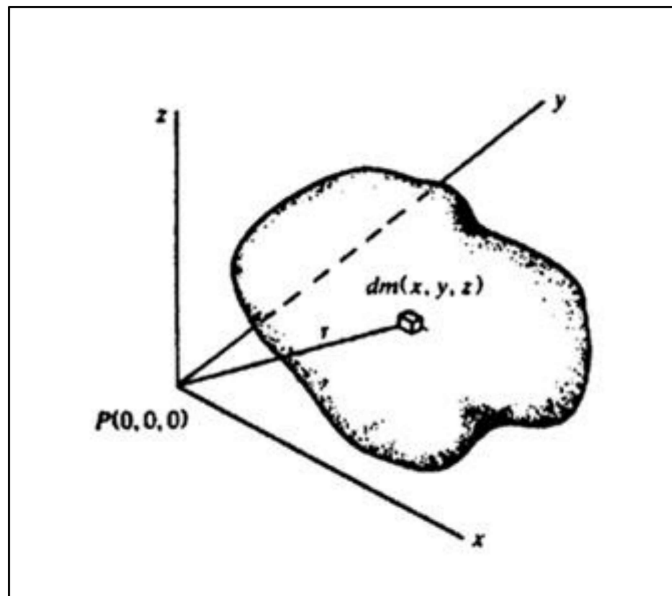
$\rho$  : Densitas ( $\text{kg/m}^3$ )

$M$  : Massa benda (kg)

$V$  : Volume benda ( $\text{m}^3$ )

### 3.2.3 Potensial Gayaberat

Potensial gayaberat adalah besarnya energi yang dibutuhkan untuk mengubah posisi suatu benda bermassa dari satu titik menuju titik lainnya di dalam medan gravitasi. Medan potensial akan timbul apabila terdapat benda memiliki massa dalam suatu ruang. Selain itu, usaha oleh gaya gayaberat ditentukan oleh posisi awal dan akhir, bukan ditentukan oleh lintasan yang dilaluinya (Blakely, 1996). Potensial gayaberat tiga dimensi terlihat pada Gambar 6.



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

Potensial gayaberat dari benda diatas dapat dituliskan pada Persamaan 8.

$$U(\vec{r}) = \int_{\infty}^{\vec{r}} (\vec{\nabla}u) d\vec{r} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla}u(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{m} = -\vec{g}(\vec{r}) \quad (7)$$

$$U(\vec{r}) = - \int_{\infty}^{\vec{r}} \frac{\vec{F}}{m} d\vec{r}$$

$$U(\vec{r}) = - \int_{\infty}^{\vec{r}} \vec{g} d\vec{r}$$

$$U(r) = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (8)$$

Pemindahan suatu massa dari jarak yang jauh ( $\infty$ ) menuju titik yang berjarak  $r$  dari pusat massa memerlukan usaha yang menghasilkan potensial gayaberat sebagaimana dinyatakan pada Persamaan 11 dan Gambar 6 menunjukkan bahwa potensial dan percepatan gayaberat suatu benda bermassa tiga dimensi di titik luar benda dapat diperoleh dengan membagi massa menjadi elemen-elemen yang lebih kecil  $dm$ , kemudian ditentukan dengan integral sehingga diperoleh total potensial serta percepatan gayaberat akibat kontribusi seluruh massa tersebut.

Potensial yang dihasilkan oleh elemen massa  $dm$  pada titik  $(x,y,z)$  yang berjarak  $r$  dari titik pengamatan  $P(0,0,0)$  dinyatakan pada Persamaan 9.

$$U(\vec{r}) = G \frac{dm}{r} = G\rho \frac{dx dy dz}{r} \quad (9)$$

Dimana  $\rho(x,y,z)$  menyatakan densitas massa dan  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$  sehingga potensial total dari total massa adalah

$$U(\vec{r}) = G\rho \iiint_{x_0 y_0 z_0}^{x,y,z} \frac{dx dy dz}{r} \quad (10)$$

Karena  $g$  merupakan percepatan gayaberat pada arah sumbu  $z$  (vertikal) dan dengan densitas  $\rho$  diasumsikan konstan, maka

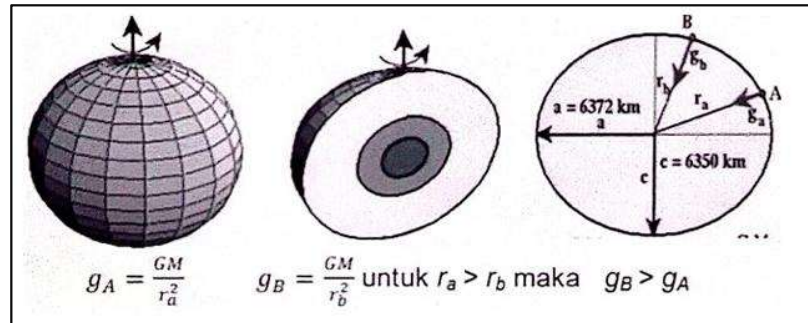
$$g_z = -\frac{dU}{dz} = G\rho \int_x \int_y \int_z \frac{z}{r^3} dx dy dz \quad (11)$$

### 3.3 Koreksi-Koreksi Gayaberat

Dalam melakukan eksplorasi gayaberat, perubahan nilai densitas yang besar dapat ditimbulkan oleh perubahan rapat massa batuan di bawah permukaan. Nilai gayaberat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu posisi lintang, kondisi topografi, elevasi di area titik observasi, pasang surut bumi, serta variasi rapat massa bawah permukaan (Telford dkk., 1990). Hasil pengukuran gayaberat secara langsung tidak hanya dipengaruhi oleh perbedaan rapat massa bawah permukaan, namun keempat faktor lainnya juga dapat mempengaruhi hasil bacaan nilai gayaberat yang terukur. Perlu dilakukan koreksi gayaberat untuk mengurangi pengaruh faktor luar agar anomali yang dihasilkan mencerminkan variasi densitas batuan di bawah permukaan.

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

Karena Bumi memiliki bentuk yang menyerupai bola pepat menyebabkan jari-jari antara kutub dan khatulistiwa diperlukan koreksi lintang, sehingga nilai percepatan gayaberat di kutub lebih besar daripada di khatulistiwa yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Model bentuk bumi berbentuk elips (Sarkowi, 2014)

Koreksi ini diperlukan karena adanya pengaruh rotasi bumi yang menimbulkan gaya sentrifugal serta bentuk bumi yang tidak bulat sempurna, serta variasi ukuran jari-jari bumi antara kutub dan khatulistiwa (Telford dkk., 1990). Terdapat dua cara untuk melakukan koreksi lintang, salah satunya adalah metode diferensi IGRF67 (untuk derajat lintang/*latitude*) atau IGRF84 (untuk radian).

a) IGRF 67

$$g_{\theta} = 978031,8 (1 + 0,0053924 \sin^2 \theta - 0,0000059 \sin^2 2 \theta) \quad (12)$$

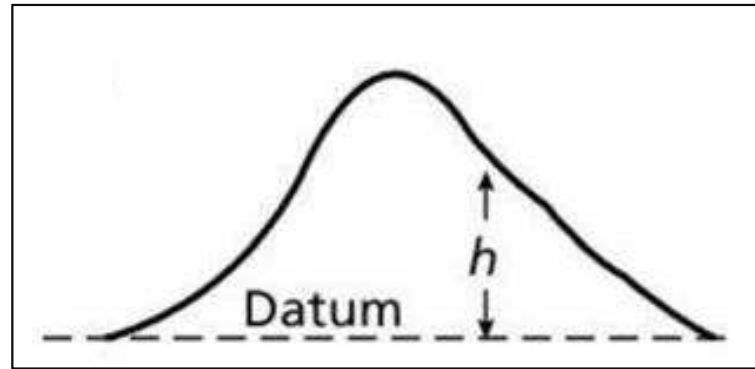
b) IGRF 84

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

Lintang geografis ( $\theta$ ) merupakan sudut yang menyatakan suatu titik terhadap garis khatulistiwa. Nilai lintang  $0^\circ$  berada di khatulistiwa, sedangkan lintang  $90^\circ$  berada di wilayah kutub.

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

Koreksi udara bebas adalah koreksi karena perbedaan elevasi dengan menganggap ruang antara titik ukur dan permukaan referensi hanya berisi udara, bukan batuan. Koreksi ini bertujuan memperoleh nilai anomali medan gayaberat pada permukaan topografi yang ditampilkan pada Gambar 8.



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

Dengan mengasumsikan bahwa bumi berbentuk bola dengan massa terkonsentrasi di pusat, maka percepatan gayaberat di permukaan laut dapat dinyatakan pada Persamaan 4 (Reynold, 1998). Gayaberat pada suatu titik pengamatan yang terletak pada ketinggian  $h$  meter di atas muka laut dapat dilihat pada Persamaan 14.

$$g_h = \frac{GM}{(R+h)^2} = \frac{GM}{R^2} \left(1 - \frac{2h}{R}\right) \quad (14)$$

Perbedaan gayaberat antara permukaan laut dengan ketinggian  $h$  meter adalah koreksi udara bebas (*free air correction*).

$$\delta g_F = g_h - g_0 = -\left(\frac{2g_0 h}{R}\right) = 0,3086h \quad (15)$$

Keterangan:

$g_0$  : Percepatan gayaberat di permukaan laut ( $m/s^2$ )

$R$  : Jari-jari bumi (m)

$\delta g_F$  : Koreksi udara bebas ( $m/s^2$ )

Oleh karena itu, koreksi udara bebas dituliskan dengan Persamaan 16.

$$\delta g_F = 0,3086h \quad (16)$$

Koreksi udara bebas mengabaikan massa batuan pada sekitar lokasi pengukuran terhadap bidang *geoid*. Nilai koreksi akan bernilai positif apabila titik pengukuran berada di atas *geoid*. Semakin besar elevasi  $h$  menyebabkan nilai gravitasi menurun, sehingga perlu ditambahkan agar hasil pengukuran dapat disesuaikan dengan nilai pada bidang *geoid*. Sebaliknya, jika titik pengukuran terletak di bawah *geoid* koreksi akan menjadi negatif atau dikurangkan. Namun,

koreksi umum dilakukan dengan ditambahkan karena permukaan bumi berada di atas bidang *geoid*.

Persamaan 17 merupakan perhitungan untuk menentukan nilai anomali udara bebas (*Free Air Anomaly*).

$$FAA = g_{obs} - g_{\theta} + \delta g_F \quad (17)$$

Keterangan:

$FAA$  : Anomali udara bebas (mGal)

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

$g_{\theta}$  : Gayaberat normal/geoid (mGal)

### 3.3.3 Koreksi Bouguer

Koreksi Bouguer digunakan untuk mengoreksi efek massa yang berada di atas permukaan laut rata-rata terhadap pengukuran gayaberat. Sehingga dengan melakukan koreksi Bouguer, anomali yang didapatkan mencerminkan perubahan kepadatan massa di bawah permukaan (Sarkowi, 2014). Untuk menentukan nilai ini perlu dilakukan koreksi pada Persamaan 19 (Telford dkk., 1990).

$$g_B = 2\pi G\rho h \quad (18)$$

$$g_B = 0,04192\rho h \quad (19)$$

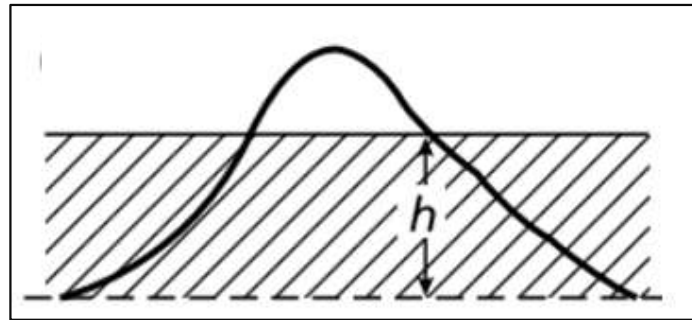
Keterangan:

$g_B$  : Nilai gayaberat terkoreksi Bouguer (mGal)

$\rho$  : Nilai densitas batuan ( $\text{kg/m}^3$ )

$h$  : Ketinggian permukaan dari datum (m)

Koreksi Bouguer merupakan kebalikan dari dengan koreksi udara bebas, dimana titik pengukuran yang berada pada bagian atas bidang *geoid* nilai koreksi Bouguer dilakukan dengan mengurangi efek massa batuan terhadap hasil pengukuran gayaberat. Hal ini terjadi karena massa batuan di atas bidang *geoid* yang menyebabkan nilai percepatan gayaberat pada titik pengukuran menjadi lebih besar dibandingkan nilai gayaberat pada *geoid*. Oleh karena itu, untuk menyesuaikan nilai tersebut terhadap bidang referensi *geoid* koreksi Bouguer harus dikurangi. Sebaliknya, apabila titik pengukuran berada di bawah *geoid*, nilai koreksi perlu ditambahkan. Ilustasi koreksi Bouguer pada gayaberat dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Koreksi Bouguer terhadap gayaberat (Kearey dkk., 2002)

Setelah dilakukan pengoreksian melalui koreksi udara bebas dan koreksi Bouguer diperlukan perhitungan anomali bouguer sederhana yang dituliskan pada Persamaan 20.

$$ABS = FAA - g_B \quad (20)$$

Keterangan:

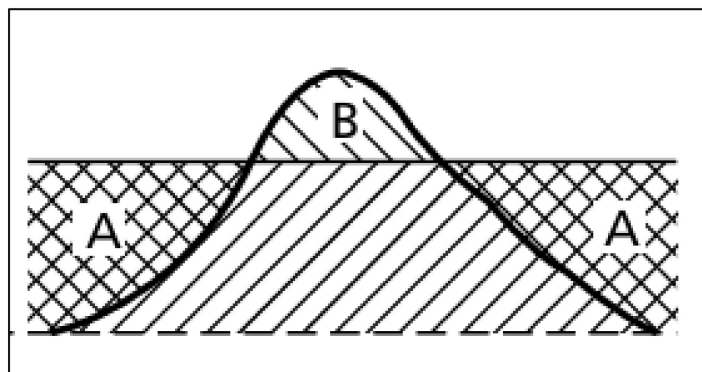
$g_B$  : Koreksi Bouguer (mGal)

$FAA$  : Anomali udara bebas (mGal)

$ABS$  : Anomali Bouguer sederhana (mGal)

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

Koreksi medan dilakukan untuk memperhitungkan pengaruh ketidakrataan distribusi massa di sekitar titik observasi. Koreksi ini, pada titik pengukuran diasumsikan berada pada permukaan datar, luas, dan homogen. Namun, topografi di lapangan umumnya tidak rata, seperti perbukitan maupun lembah, sehingga diperlukan koreksi medan untuk menyesuaikan pengaruh tersebut yang diilustrasikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengaruh bukit dan lembah terhadap pengukuran gayaberat (Kearey dkk., 2002)

Diperlukan koreksi medan agar hasil koreksi gayaberat menjadi akurat. *Hammer Chart* digunakan dalam proses koreksi medan, dimana area titik pengukuran dibagi atas beberapa segmen berbentuk cincin untuk memperkirakan pengaruh topografi terhadap gayaberat. Koreksi medan dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 21 (Reynold, 1998).

$$TC = \frac{2\pi\rho G}{N} [r_2 - r_1 + (r_1^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} - (r_2^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}] \quad (21)$$

Keterangan:

- $TC$  : Koreksi medan (mGal)  
 $N$  : Jumlah segmen dalam cincin  
 $\rho$  : Densitas Bouguer  
 $G$  : Konstanta gayaberat  
 $r_1$  dan  $r_2$  : Jari-jari luar  
 $z$  : Perbedaan elevasi antara gayaberat dan elevasi rata-rata segmen

Koreksi medan dijumlahkan dengan nilai anomali bouguer sederhana karena komponen gayaberat horizontal pada koreksi medan menyebabkan nilai gayaberat terukur menjadi lebih kecil. Diperlukan suatu koreksi medan sehingga diperoleh anomali Bouguer lengkap seperti pada Persamaan 22.

$$ABL = ABS + TC \quad (22)$$

Keterangan:

- $ABL$  : Anomali Bouguer lengkap (mGal)  
 $ABS$  : Anomali Bouguer sederhana (mGal)  
 $TC$  : Koreksi medan (mGal)

### 3.4 Estimasi Densitas

Distribusi rapat massa batuan dapat diketahui dengan menggunakan metode geofisika yaitu metode gayaberat. Nilai rapat massa batuan dapat ditentukan karena adanya faktor, seperti rapat massa material penyusunnya, fluida yang terkandung, dan porositas. Sifat densitas juga dapat dipengaruhi oleh berbagai proses geologi, termasuk mekanisme pembentukan batuan, tingkat pepadatan akibat tekanan dan kedalaman, serta tingkat pelapukan batuan.

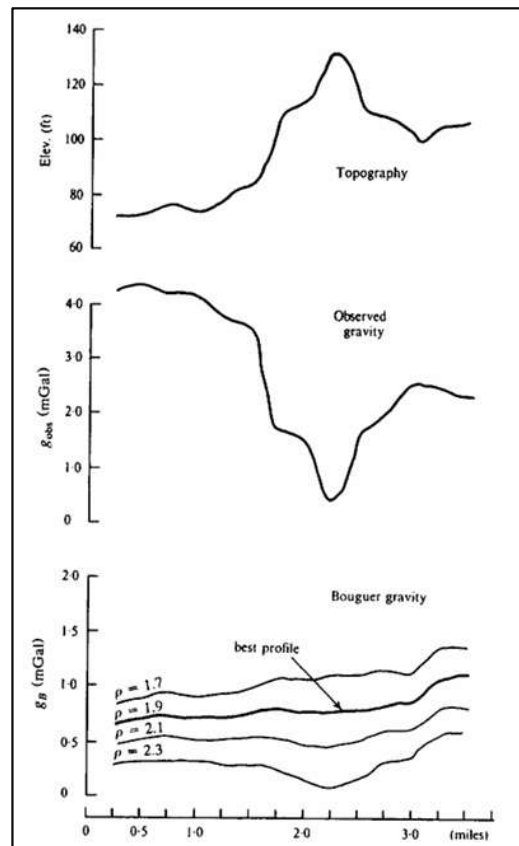
Dalam menentukan rapat massa batuan dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya, yaitu analisis di daerah survei yaitu dengan penentuan rapat massa secara kualitatif, sedangkan untuk metode Nettleton dilakukan secara tidak langsung dan metode Parasnis yang dilakukan secara kuantitatif. Berikut merupakan tabel densitas menurut Tabel 1 oleh Telford dkk., (1990).

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

<i>Rock Type</i>	<i>Range (g/cc)</i>	<i>Average (g/cc)</i>
<i>Sediments</i>		
<i>Overburden</i>		1,92
<i>Soil</i>	1,2 - 2,4	1,92
<i>Gravel</i>	1,63 - 2,6	2,21
<i>Clay</i>	1,7 - 2,4	2
<i>Sand</i>	1,7 - 2,3	2
<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 rocks</i>		2,5
<i>Igneous Rocks</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	2,71
<i>Grandiorite</i>	2,67 - 2,79	2,73
<i>Porphyry</i>	2,5 - 2,75	2,75
<i>Quartz diorite</i>	2,62 - 2,96	2,79
<i>Diorite</i>	2,65 - 2,95	2,85
<i>Lavas</i>	2,80 - 3,00	2,9
<i>Diabase</i>	2,50 - 3,20	2,9
<i>Basalt</i>	2,70 - 3,0	2,93
<i>Gabbro</i>	2,70 - 3,50	3,03
<i>Peridotite</i>	2,78 - 3,37	3,09
<i>Acid igneous</i>	2,30 - 3,11	2,67
<i>Basic igneous</i>	2,09 - 3,17	2,79
<i>Metamorphic Rocks</i>		
<i>Quartzite</i>	2,5 - 2,70	2,6
<i>Schist</i>	2,39 - 2,9	2,64
<i>Graywacke</i>	2,6 - 2,7	2,7
<i>Marble</i>	2,6 - 2,9	2,79
<i>Serpentine</i>	2,4 - 3,10	2,79
<i>Slate</i>	2,7 - 2,9	2,79

<i>Metamorphic Rocks</i>		
<i>Gneiss</i>	2,59 - 3,0	2,7
<i>Amphibolite</i>	2,90 - 3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,2 - 3,4	3,37
<i>Metamorphic</i>	2,4 - 3,1	2,74

### 3.4.1 Metode Nettleton



Gambar 11. Estimasi rapat massa dilakukan menggunakan metode Nettleton  
(Telford dkk., 1990)

Metode Nettleton cukup memadai untuk memperkirakan densitas batuan dekat dengan permukaan dengan menggunakan profil gayaberas melintasi topografi yang tidak berkorelasi dengan variasi densitas. Metode ini menghitung nilai gayaberas yang diukur di lapangan menjadi profil Bouguer dengan mencoba beberapa nilai densitas. Nilai densitas yang tepat akan menghasilkan profil gayaberas yang paling tidak mengikuti bentuk topografi. Jika densitas yang dipilih salah maka profil gayaberas justru akan tampak mengikuti atau membalik topografi,

metode ini berlaku pada elevasi antara stasiun tertinggi dan terendah. Estimasi densitas Nettleton dapat dilihat pada Gambar 11.

### 3.4.2 Metode Parasnis

Perkiraan rapat massa metode Parasnis diperoleh menggunakan anomali gayaberat dirumuskan pada Persamaan 23.

$$ABL = g_{obs} - g_{\theta} + \delta g_F - g_B = 0 \quad (23)$$

Suku terakhir persamaan merupakan koreksi medan, yaitu nilai-nilai koreksi medan yang masih dinyatakan sebelum dikalikan dengan rapat massa batuan.

$$(g_{obs} - g_{\theta} + 0,3085h) = (2\pi Gh)\rho \quad (24)$$

$$y = \rho x \quad (25)$$

Berdasarkan Persamaan 25, nilai rapat massa  $\rho$  dapat ditentukan dari gradien garis garis lurus terbaik dimana ABL dianggap sebagai penyimpangan hubungan linier tersebut (Yuliasuti dkk., 2017).

## 3.5 Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual

### 3.5.1 Anomali Bouguer Lengkap

Anomali Bouguer Lengkap adalah peta anomali gayaberat yang telah melalui sejumlah tahapan koreksi, maka perubahan nilai anomali yang tampak semata-mata mencerminkan variasi densitas batuan di bawah permukaan. Nilai anomali Bouguer lengkap menunjukkan perbedaan antara gayaberat pengamatan dan gayaberat referensi teoritis yang telah dikoreksi pengaruh ketinggian serta massa topografi di sekitar titik pengukuran (Liana dkk., 2020). Secara matematis anomali Bouguer dituliskan pada Persamaan 26.

$$ABL = g_{obs} + \delta g_F - g_B + TC - g_{\theta} \quad (26)$$

Keterangan:

$ABL$  : Anomali Bouguer lengkap (mGal)

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

$g_B$  : Koreksi Bouguer (mGal)

$\delta g_F$  : Koreksi udara bebas (mGal)

$g_{\theta}$  : Koreksi lintang ( $m/s^2$ )

### 3.5.2 Analisis Spektrum

Analisis spektrum merupakan proses yang diawali dengan mentransformasikan data anomali gayaberat dari domain spasial ke domain frekuensi dengan menguraikannya menjadi sinyal-sinyal sinusoidal menggunakan Transformasi Fourier. Transformasi akan menghasilkan spektrum *amplitude* serta *fase*, yang kemudian dimanfaatkan untuk menaksir kedalaman melalui perhitungan *amplitude* (A) dan bilangan gelombang (k). Parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan ukuran *window filter* sebagai dasar dalam proses penyaringan dan pemisahan anomali regional maupun residual. Fungsi Transformasi Fourier diturunkan pada Persamaan 30.

$$F(U) = G\Delta\rho F\left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (27)$$

Berdasarkan Persamaan 30 di atas maka diperoleh Persamaan 28.

$$F(U) = 2\pi G\Delta\rho \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (28)$$

Menentukan lintasan dapat dilakukan dengan Transformasi Fourier anomali gayaberat dapat dilakukan menggunakan Persamaan 30.

$$F(g_z) = G\Delta\rho F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) = G\Delta\rho \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (29)$$

$$F(g_z) = -2\pi G\Delta\rho e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (30)$$

Keterangan :

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

$\Delta\rho$  : Anomali densitas (g/cc)

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

$r$  : Jarak antar posisi (m)

$z_1$  : Kedalaman benda anomali (m)

$z_0$  : Ketinggian titik amat (m)

$k$  : Bilangan gelombang (rad/m)

$g_z$  : Anomali gayaberat (mGal)

$\left(\frac{\partial}{\partial z}\right)$  : Turunan parsial terhadap variabel  $z$

$\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right)$  : Turunan parsial dari  $\frac{1}{r}$  terhadap  $z$

Apabila distribusi rapat massa menunjukkan sifat tidak teratur dan tidak menunjukkan adanya keterkaitan antara data gayaberat yang diperoleh akan mendapatkan pola yang tidak menentu, maka  $2\pi G\Delta\rho = 1$  sehingga hasil transformasi Fourier anomali gayaberat dapat dilihat pada Persamaan 31.

$$A = C e^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (31)$$

Keterangan:

A : Amplitudo

C : Konstanta

Penentuan lebar jendela untuk pemisahan anomali regional dengan residual dapat dilakukan melalui spektrum amplitudo dalam bentuk logaritma hasil Transformasi Fourier. Sehingga proses ini menghasilkan persamaan berbentuk linier, di mana komponen bilangan gelombang  $k$  memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan spektrum amplitudo.

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (32)$$

Batas pemisahan antara zona regional orde pertama dan zona residual orde kedua dapat ditentukan melalui regresi linear pada persamaan garis lurus. Nilai  $k$  yang diperoleh pada batas kedua zona tersebut kemudian digunakan untuk menentukan lebar jendela. Keterkaitan antara panjang gelombang dan nilai  $k$  didapatkan menggunakan Persamaan 33 (Blakely, 1996).

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ dimana } \lambda = n\Delta x \quad (33)$$

Keterangan:

$n$  : Lebar jendela

$k$  : Bilangan gelombang *cutoff*

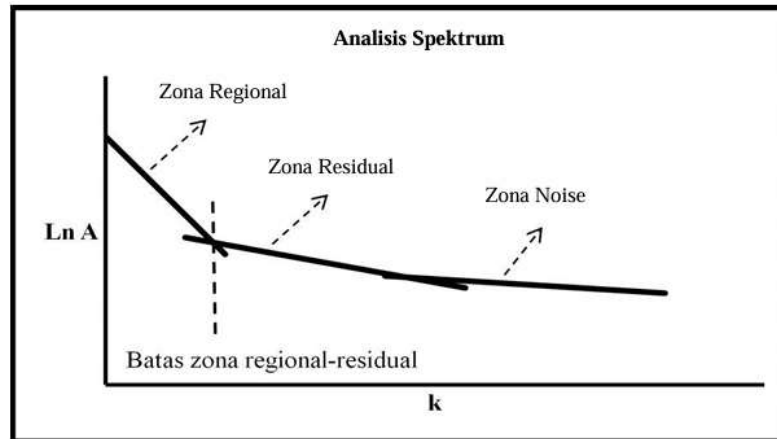
Maka didapatkan estimasi lebar jendelanya dapat dilihat pada Persamaan 34.

$$n = \frac{\lambda}{\Delta x} = \frac{2\pi}{k\Delta x} \quad (34)$$

Keterangan:

$\Delta x$  : Spasi pengukuran

Ilustrasi proses penentuan kedalaman proses regresi data logaritma spektrum amplitudo hasil transformasi Fourier ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik hubungan amplitudo dan bilangan gelombang (Sarkowi, 2014)

### 3.5.3 *Moving average*

Anomali Bouguer hasil pengukuran merupakan gabungan atas berbagai sumber anomali serta struktur bawah permukaan, sehingga diperlukan pemisahan antara anomali regional dan residual. *Moving average* merupakan teknik penyaringan data yang dilakukan menggunakan cara menentukan nilai rata-rata dari sejumlah nilai data dalam satu jendela (*window*) tertentu. Sekumpulan data dalam jendela tersebut akan dirata-ratakan menjadi satu nilai baru, kemudian jendela digeser ke titik data berikutnya untuk melakukan proses yang sama secara berulang (Yufajjiru dkk., 2019). Secara matematis Persamaan *Moving average* diberikan pada Persamaan 35.

$$\Delta g_{\alpha}(x_i) = \Delta g(x_i) - \frac{1}{N} \sum_{i=n/2}^{n/2} \Delta g(x_i - l) \quad (35)$$

Pemisahan anomali regional dan anomali residual dilakukan menggunakan dua jendela, dapat dilihat pada dengan Persamaan 36.

$$\Delta \bar{g}_{\alpha,\beta}(x) = \Delta \bar{g}_{\alpha}(x) - \Delta \bar{g}_{\beta}(x) \quad (36)$$

Keterangan:

$\alpha, \beta$  : Lebar jendela *filter*

$\Delta \bar{g}_{\alpha}$  : Anomali residual sisa *filter* jendela  $\alpha$

$\Delta g$  : Harga gayaberat pada titik amat

$N$  : Jumlah data yang diproses

Persamaan *moving average* 2D untuk lebar jendela  $N \times N$  dapat dilihat pada Persamaan 37.

$$\Delta g_{reg}\left(\frac{N+1}{2}, \frac{N+1}{2}\right) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\Delta g(i, j)}{N^2} \quad (37)$$

Dan anomali residualnya pada Persamaan 38.

$$\Delta g_{res}(i, j) = \Delta g(i, j) - \Delta g_{reg}(i, j) \quad (38)$$

### 3.6 Analisis Derivative

#### 3.6.1 First horizontal derivative (FHD)

*First horizontal derivative* yang disebut juga *Horizontal Gradient* merupakan metode pengolahan data yang digunakan untuk mempertajam batas-batas anomali dan mengidentifikasi lokasi batas lateral suatu struktur geologi bawah permukaan. FHD menghitung perubahan gradien horizontal dari suatu medan potensial secara lateral. FHD ini memiliki keunggulan lebih stabil terhadap gangguan *noise* sehingga baik digunakan dalam memetakan batas-batas sumber anomali baik yang dalam maupun yang dangkal (Wijanarko dkk., 2021). Nilai FHD didapatkan dengan menghitung persamaan sebagai berikut (Blakely, 1996).

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (39)$$

Keterangan:

$\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)$  : Turunan terhadap gradien horizontal arah x

$\left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)$  : Turunan terhadap gradien horizontal arah y

#### 3.6.2 Second Vertical Derivative (SVD)

*Second Vertical Derivative* termasuk salah satu metode *filtering* yang digunakan untuk mempertajam anomali dan menonjolkan sumber-sumber anomali yang dangkal serta mempertegas batas-batas struktur geologi bawah permukaan. Metode SVD dilakukan melalui menghitung turunan kedua terhadap arah vertikal (sumbu z). Metode SVD ini dihasilkan dari penurunan Persamaan Laplace di permukaan dapat dilihat pada Persamaan 40 berikut.

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (40)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (41)$$

Sehingga untuk nilai *second vertical derivative*-nya pada Persamaan 42.

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left( \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \quad (42)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} \quad (43)$$

Selanjutnya untuk data penampang 1-D dapat dilakukan pada Persamaan 44.

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (44)$$

Keterangan:

$\nabla^2$  : Operator Laplace

$\Delta g$  : Nilai bouguer gayaberat total

$\partial x$  : Nilai turunan sumbu x

$\partial y$  : Nilai turunan sumbu y

Pada Persamaan 44 menyatakan bahwa turunan kedua anomali gayaberat terhadap kedalaman (z) sama dengan turunan kedua terhadap arah horizontal (x). Anomali SVD dapat diperoleh melalui pendekatan *derivative* horizontal yang lebih sederhana. Nilai nol pada turunan kedua anomali Bouguer dapat diartikan sebagai batas kontak antara dua jenis batuan yang memiliki perbedaan densitas. Kontak batuan tersebut dapat mencerminkan keberadaan struktur geologi seperti patahan maupun intrusi batuan (Sarkowi, 2010). Untuk menentukan perhitungan SVD, dapat digunakan beberapa operator *filter 2D* sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2,3, dan 4.

Tabel 2. Operator Henderson & Zietz (1949)

<b>Operator Filter SVD menurut Henderson &amp; Zietz (1949)</b>				
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
-0,0838	-2,6667	17,0000	-2,6667	-0,0838
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000

Tabel 3. Operator Elkins (1951)

<b>Operator Filter SVD menurut Elkins (1951)</b>				
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)

<b>Operator Filter SVD menurut 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

### 3.7 Pemodelan Inversi 3-D

Pemodelan inversi merupakan suatu metode matematis untuk menentukan parameter bawah permukaan menggunakan data pengukuran yang diperoleh di permukaan. Inversi adalah proses kebalikan dari pemodelan kedepan yaitu inversi mengubah data menjadi model. Pemodelan inversi merupakan proses penyesuaian model hingga didapatkan kesesuaian antara data hasil perhitungan dengan data observasi yang lebih baik dihitung secara otomatis. Pemodelan inversi merupakan *fitting* data karena pada prosesnya dicari parameter model yang menghasilkan respon yang *fit* data pengamatan (Grandis, 2009). Hubungan antara data dengan parameter model dinyatakan sebagai matriks berikut.

$$d = Kx + e \quad (45)$$

Dimana  $d$  adalah vektor data pengamatan,  $K$  adalah Matriks Kernel,  $x$  adalah vektor model, dan  $e$  adalah konstanta yang merepresentasikan distribusi densitas bawah permukaan. Komponen vertikal percepatan gayaberat yang dihasilkan oleh distribusi densitas  $\rho(\vec{r}')$  pada suatu volume  $V$  dinyatakan pada Persamaan 46.

$$g_z(\vec{r}) = G \iiint_V \rho(\vec{r}') \frac{z - z'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dV' \quad (46)$$

Sementara itu *error* atau ketidaksesuaian antar data dapat dilihat pada Persamaan 47.

$$\phi_d = \|Wd(Kx - d^{obs})\|^2 \quad (47)$$

Fungsi objektif model secara lebih spesifik untuk keperluan inversi gayaberat tiga dimensi. Perumusan tersebut menggunakan fungsi pembobotan kedalaman  $w(z)$  untuk mengoreksi penurunan sensitivitas data gayaberat terhadap kedalaman, serta komponen yang mengontrol kehalusan model ke arah  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ . Fungsi objektif model tersebut dinyatakan pada Persamaan 48.

$$\begin{aligned} \phi_m(\rho) = & a_s \int_V w_s \{w(z)[\rho(r) - \rho_0]\}^2 dv \\ & + a_x \int_V w_x \left\{ \frac{w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial x} \right\}^2 dv \\ & + a_y \int_V w_y \left\{ \frac{w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial y} \right\}^2 dv \\ & + a_z \int_V w_z \left\{ \frac{w(z)[\rho(r) - \rho_0]}{\partial z} \right\}^2 dv \end{aligned} \quad (48)$$

Keterangan dari persamaan tersebut adalah  $w_s$ ,  $w_x$ ,  $w_y$ , dan  $w_z$  merupakan fungsi pembobotan masing-masing komponen, sedangkan  $a_s$ ,  $a_x$ ,  $a_y$ , dan  $a_z$  merupakan koefisien yang menentukan kontribusi relatif setiap komponen dalam fungsi objektif. Adapun  $w(z)$  merupakan fungsi pembobotan kedalaman dan  $\rho_0$  merupakan model densitas acuan yang digunakan sebagai referensi awal dalam proses inversi. Solusi inversi diperoleh dengan meminimalkan fungsi objektif terhadap vektor model  $m$ , yang dilakukan dengan menetapkan turunan pertama fungsi objektif terhadap model sama dengan nol ( $\partial\Phi/\partial m = 0$ ). Penyelesaian persamaan tersebut menghasilkan solusi inversi pada Persamaan 49.

$$x = (K^T K + \lambda w_m^T w_m)^{-1} K^T d^{obs} \quad (49)$$

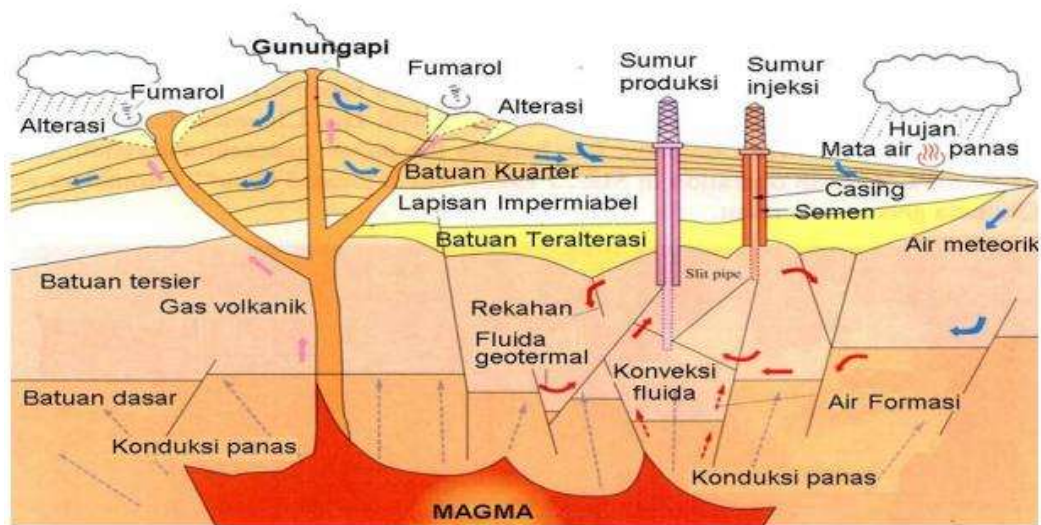
Pada Persamaan 49,  $x$  merupakan vektor model hasil inversi yang merepresentasikan distribusi densitas bawah permukaan.  $K$  adalah matriks kernel atau matriks sensitivitas yang menghubungkan parameter model dengan data gayaberat, sedangkan  $K^T$  merupakan transpose dari matriks kernel. Simbol  $d^{obs}$  menyatakan vektor data observasi anomali gayaberat. Parameter  $\lambda$  merupakan faktor regularisasi yang berfungsi mengontrol keseimbangan antara kecocokan

model terhadap data observasi dan kehalusan model yang dihasilkan. Sementara itu,  $w_m$  merupakan matriks pembobot model dan  $w_m^T$  adalah transpose dari matriks pembobot model.

### 3.8 Panasbumi

Panasbumi merupakan suatu sumber energi panas yang tersimpan di dalam lapisan bumi, baik dalam bentuk air panas, uap, maupun batuan panas yang terbentuk akibat proses geologis yang berlangsung secara alami. Sistem panasbumi dapat didefinisikan sebagai perpindahan panas secara konvektif yang terjadi dalam volume kerak bumi yang terbatas, di mana sumber panas berasal dari magma atau bersifat terbarukan karena secara alami terus diproduksi oleh bumi melalui proses peluruhan radioaktif dan panas sisa dari pembentukan bumi itu sendiri.

Suatu sistem panas bumi pada umumnya tersusun atas tiga komponen utama yang saling berhubungan. Komponen pertama adalah sumber panas (*heat source*), yaitu tubuh magma maupun batuan panas yang berada di kedalaman dan berfungsi sebagai penghasil energi termal. Komponen kedua adalah reservoir, yaitu batuan permeabel yang berfungsi menyimpan dan mengalirkan fluida panas bumi. Komponen ketiga adalah batuan penutup (*caprock*), yaitu lapisan batuan impermeabel yang berada di atas reservoir dan berfungsi sebagai penghalang agar fluida panas tidak keluar ke permukaan secara bebas (Hochstein, 1990). Selain ketiga komponen tersebut, keberadaan fluida sebagai media pembawa panas dan zona *recharge* sebagai daerah pengisian kembali fluida juga menjadi bagian penting dalam keberlangsungan sistem panas bumi. Konseptual sistem panasbumi dapat dilihat pada Gambar 13.

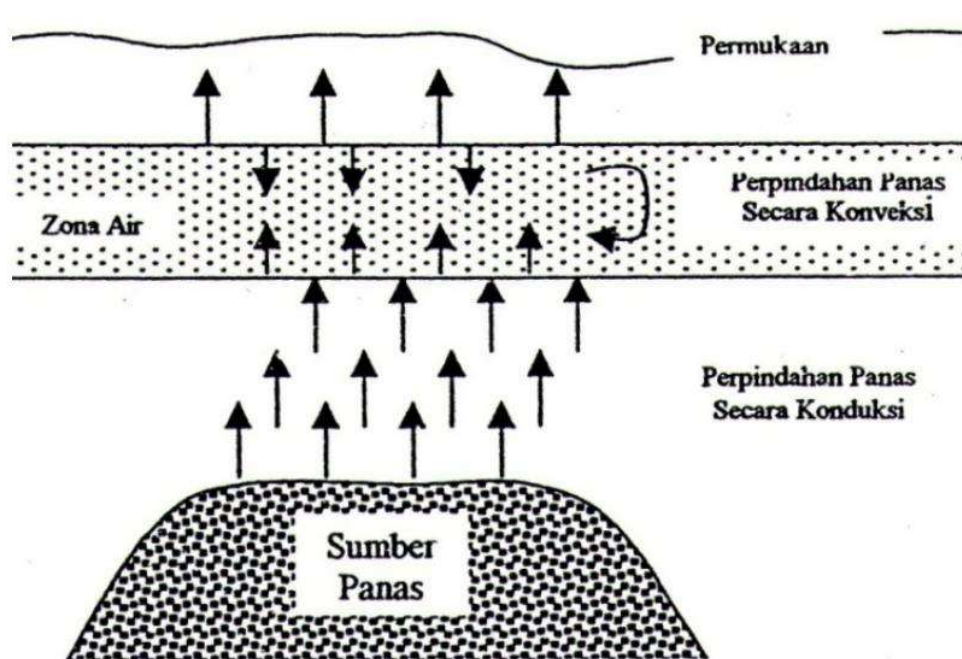


Gambar 13. Model konseptual sistem panasbumi

Syarat terbentuknya sistem panasbumi yaitu sebagai berikut (Suharno, 2013):

1. Terdapat sumber panas (*heat source*) berupa batuan plutonik, magma yang telah dingin.
2. Batuan berpori atau reservoir tempat air panas atau uap panas yang terjebak.
3. Sistem seperti struktur geologi yang meloloskan air memiliki sifat permeabel, seperti patahan, rekahan, perlipatan, ketidakselarasan, dan *collapse*.
4. Batuan penudung (*caprock*) memiliki sifat kedap air (*impermeable*), umumnya batuan lempung.
5. Memiliki daerah resapan air (*recharge area*) dan siklus hidrologi untuk mengisi cadangan reservoir.

Perpindahan panas merupakan dasar sistem panasbumi yang dapat berlangsung melalui proses konduksi maupun konveksi dapat dilihat pada Gambar 14. Secara konduksi perpindahan panas melewati batuan, sementara secara konveksi berlangsung akibat adanya interaksi antara fluida air dengan suatu sumber panas tertentu. Akibat gaya apung (*bouyancy*) yang membuat perpindahan panas secara konveksi. Air bergerak kebawah karena adanya gaya gayaberat, namun apabila air kontak dengan suatu sumber panas maka air akan mengalami kenaikan temperatur dan menjadi lebih ringan sehingga air akan naik ke atas dan air yang dingin akan turun ke bawah (Saptadji, 2001).



Gambar 14. Perpindahan panas di bawah permukaan (Saptadji, 2001)

### 3.8.1 Reservoir

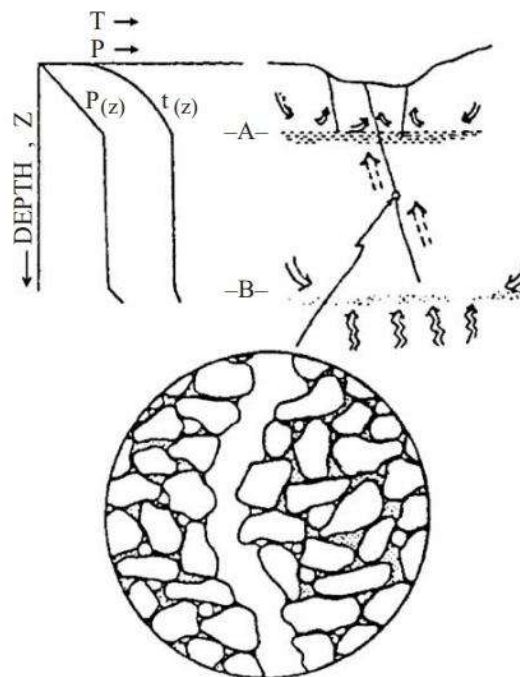
Reservoir panasbumi yang umum dimanfaatkan adalah sistem hidrotermal, yakni susunannya yang fluidanya dapat berupa air, uap, atau gabungan dari keduanya sesuai pada kondisi tekanan dan temperatur reservoir. Temperatur reservoir yang berada di bawah titik didih air pada tekanan tersebut, fluida berbentuk air (satu fasa). Sebaliknya, jika temperatur melebihi titik didih, fluida berupa uap panas lanjut lanjut (*superheated steam*). Ketika temperatur dan tekanan reservoir tepat berada pada kondisi saturasi, fluida hadir sebagai campuran dua fasa antara air dan uap (Basid dkk., 2014).

Menurut Hochstein, (1990) sistem panasbumi dibedakan berdasarkan pada besarnya temperatur, yaitu:

1. Reservoir sistem panasbumi dengan temperatur rendah memiliki kandungan fluida bertemperatur kecil yaitu lebih kecil dari 125°C.
2. Reservoir sistem panasbumi dengan temperatur sedang memiliki kandungan fluida bertemperatur antara 125°C-225°C.
3. Reservoir sistem panasbumi dengan temperatur tinggi memiliki kandungan fluida bertemperatur di atas 225°C.

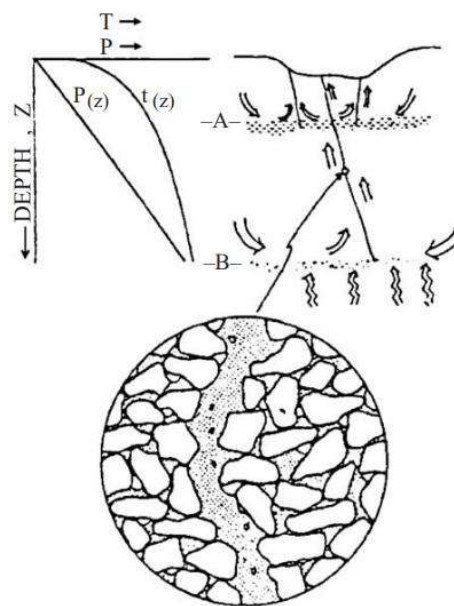
Sistem hidrotermal memiliki jenis kandungan fluida utama dan jenis fluida produksinya yaitu dapat dibedakan sebagai berikut:

1. Sistem satu fasa, temperatur air pada sistem ini berkisar 90-180°C dan tidak mendidih bahkan selama eksploitasi.
2. Sistem dua fasa memiliki dua jenis, yaitu:
  - a. Sistem dominasi uap, sumur-sumur produksi pada sistem ini akan menghasilkan uap kering atau uap basah akibat pori-pori pada reservoir yang berisi uap panas. Saturasi air akan sama atau hanya lebih sedikit dari satuan air konat sehingga air terperangkap di pori-pori dan tidak bergerak. Temperatur pada sistem ini umumnya relatif tetap terhadap kedalaman. Sistem doominasi uap dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Sistem dominasi uap (Saptadji, 2001)

- b. Sistem dominasi air, memiliki sumur-sumur yang menghasilkan fluida dua fasa yaitu campuran uap air. Air akan mengalir melalui rongga-rongga melalui saluran terbuka atau rekahan. Sistem ini memiliki tekanan dan temperatur yang berbeda terhadap kedalaman sangat berlainan yang dapat diilustrasikan pada Gambar 16.



Gambar 16. Sistem dominasi air (Saptadji, 2001)

### 3.8.2 Struktur Geologi

Struktur geologi memiliki peran sebagai pengontrol utama sistem panasbumi melalui pembentukan jalur permeabilitas fluida hidrotermal (Hochstein, 1990). Zona patahan biasanya memiliki permeabilitas yang tinggi sehingga memungkinkan fluida hidrotermal bersirkulasi dari sumber panas menuju reservoir dan akhirnya terdapat di permukaan dalam bentuk manifestasi berupa sumber air panas, fumarol, dan alterasi hidrotermal (Arifin dkk., 2025).

Sistem rekahan juga dapat berperan sebagai jalur aliran fluida panasbumi. Rekahan merupakan media air meteorik masuk ke dalam sistem panasbumi, kemudian dipanaskan oleh sumber panas di kedalaman dan kembali naik ke permukaan melalui jaringan rekahan tersebut (Arifin dkk., 2025). Struktur geologi memiliki peran pengontrol pembentukan dan distribusi sistem panasbumi, terutama keberadaan patahan, rekahan, maupun struktur vulkanik seperti kaldera. Struktur tersebut meningkatkan permeabilitas batuan sehingga fluida hidrotermal bersirkulasi dari kedalaman menuju permukaan (Ningrum dkk., 2023).

### 3.8.3 Batuan Penudung (*Caprock*)

Lapisan penudung adalah formasi batuan yang mempunyai nilai permeabilitas sangat rendah sehingga dapat menjadi penutup reservoir dalam sistem panasbumi. Lapisan ini terbentuk akibat alterasi hidrotermal yaitu proses hubungan

antarfluida panas terhadap kondisi batuan sekitarnya yang menghasilkan mineral lempung. Karena mineral lempung akan menutup pori-pori batuan maka dapat menurunkan permeabilitas dan merangkap fluida panas menuju permukaan (Escobedo dkk., 2021).

#### **3.8.4 Sumber Panas (*Heat source*)**

Sumber panas termasuk bagian komponen utama dalam sistem panasbumi yang aktif sebagai energi panas fluida hidrotermal di dalam reservoir. Sumber panas biasanya berasal dari intrusi magma atau batuan panas pada kedalaman tertentu yang memiliki temperatur tinggi akibat aktivitas magmatik di dalam kerak bumi. Panas dari magma akan mentransferkan panas ke batuan sekitarnya dan memanaskan air meteorik yang masuk ke dalam sistem melalui rekahan dan patahan sehingga terbentuk suatu fluida panasbumi (Prabowo & Husein, 2025).

#### **3.8.5 Daerah resapan (*Recharge Area*)**

Daerah resapan merupakan komponen utama dalam sistem panasbumi yang berperan sebagai jalur masuknya air meteorik ke dalam sistem fluida panasbumi. Air meteorik yang bersumber dari hujan akan meresap perlahan melalui pori-pori dan rekahan batuan di bawah permukaan akibat gaya gravitasi. Air yang meresap tersebut pada kedalaman akan mengalami pemanasan yang disebabkan oleh sumber panas, baik berupa tubuh magma maupun intrusi batuan beku panas yang berada di kerak bumi. Fluida yang telah terpanaskan tersebut selanjutnya akan terakumulasi pada zona permeabel di dalam batuan dan membentuk reservoir panasbumi. Fluida yang mengalami tekanan dan temperatur yang tinggi akan memicu terjadinya proses *boiling*, yaitu pemisahan fase antara air dan uap yang menghasilkan fluida reservoir bertekanan tinggi sebagai sumber energi utama dalam panasbumi (Khasmadin & Harmoko, 2021).

## IV. METODOLOGI PENELITIAN

### 4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu dan tempat penelitian Tugas Akhir ini dilakukan di:

Tempat : Laboratorium Instrumentasi Geofisika, Jurusan Teknik Geofisika,  
Universitas Lampung

Alamat : Gedung Teknik Geofisika - Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.  
1, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung,  
Lampung, 35142.

Waktu : Januari 2026 s.d. Mei 2026

### 4.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

Tabel 5. Alat dan bahan penelitian

No	Alat dan Bahan	Fungsi
1	Data Gayaberat	Data gayaberat merupakan data sekunder yang didapatkan dari data satelit GGMPPlus pada daerah panasbumi Telaga Ngebel, Jawa Timur <a href="https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/">https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/</a>
2	Peta Geologi Regional	Referensi geologi daerah penelitian, digitasi struktur, serta korelasi dengan pemodelan
3	Data DEM SRTM Jawa Timur	Referensi peta lokasi penelitian dan ketinggian
4	<i>Software</i> Oasis Montaj 8.4	<i>Software</i> untuk mencari nilai koreksi medan, dan dilakukan untuk menampilkan hasil model 3D inversi

5	<i>Software</i> Surfer	<i>Software</i> yang digunakan untuk melakukan pemisahan anomali regional dan anomali residual
6	Microsoft Excel	Digunakan untuk melakukan koreksi-koreksi data gayaberat
7	<i>Software</i> ArcGIS 10.8	<i>Software</i> ini digunakan untuk membuat peta pada lokasi penelitian
8	Data SHP Kabupaten	Referensi peta lokasi penelitian
9	<i>Software</i> Grav3D	<i>Software</i> ini digunakan untuk membuat model 3D inversi

### 4.3 Prosedur Penelitian

#### 4.3.1 Studi Literatur

Studi literatur menjadi tahap permulaan yang dilakukan dalam melakukan penelitian untuk memahami dasar teori dan metode yang akan digunakan. Kegiatan ini dilakukan dengan mencari sumber seperti buku referensi, jurnal penelitian, prosiding, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan metode dan penelitian yang akan digunakan. Selain itu, studi literatur dilakukan dengan mencari informasi geologi sebagai pendukung dalam memahami kondisi geologi daerah penelitian. Informasi tersebut diharapkan menjadi landasan teori yang kuat sehingga dapat membantu dalam menentukan metodologi penelitian serta mendukung analisis dan interpretasi hasil penelitian.

#### 4.3.2 Anomali Bouguer Lengkap

Anomali Bouguer Lengkap merupakan nilai yang dihasilkan dari berbagai tahapan koreksi-koreksi data gayaberat yang meliputi koreksi pasang surut, koreksi apungan, koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi Bouguer, dan koreksi medan. Nilai ini didapatkan dari hasil penjumlahan nilai anomali Bouguer sederhana dengan nilai koreksi medan yang nantinya akan menggambarkan pengaruh variasi densitas batuan bawah permukaan. Selanjutnya, data Anomali Bouguer Lengkap diproses dengan *gridding* menggunakan *software* Surfer dengan melakukan *import* data untuk menghasilkan peta anomali Bouguer.

### 4.3.3 Analisis Spektrum

Analisis spektrum dilakukan dengan menggunakan Transformasi Fourier, yaitu proses mengkonversi data dari domain jarak ke domain frekuensi. Analisis spektrum sendiri bertujuan untuk memperkirakan kedalaman sumber anomali regional dan residual berdasarkan kandungan frekuensi pada data gayabarat. Pada penelitian ini analisis spektrum dilakukan dengan 3 lintasan, selanjutnya Transformasi Fourier dilakukan dengan *software* Numeri. Hasil dari transformasi tersebut selanjutnya dilakukan pengolahan pada Microsoft Excel yang nantinya diperoleh kurva bilangan gelombang (K) serta amplitudo (Ln A). kurva tersebut yang nantinya akan memuat anomali regional dan anomali residual dengan menentukan zona *cutt off* dengan melihat kemiringan pada kurva tersebut. Dari nilai tersebut digunakan dalam menentukan nilai lebar jendela.

### 4.3.4 Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual

Data anomali Bouguer masih dipengaruhi oleh sumber anomali dengan kedalaman yang berbeda, yaitu anomali residual dan anomali regional. Sehingga, diperlukan proses pemisahan anomali untuk membedakan anomali dangkal dan anomali regional agar dapat dimanfaatkan dalam menganalisis struktur bawah permukaan lebih akurat. Dalam melakukan pemisahan anomali regional dan anomali residual dilakukan dengan *filter Moving average*. *Filter* ini merupakan teknik perata-rataan nilai anomali yang memiliki karakteristik *low-pass filter*, sehingga cenderung meloloskan frekuensi yang rendah.

### 4.3.5 *First horizontal derivative (FHD)* dan *Second Vertical Derivative (SVD)*

Beberapa tahapan yang dilakukan untuk melakukan analisis FHD dan SVD menggunakan *software* Surfer. Proses diawali dengan memasukkan data residual hasil pemisahan anomali serta dilakukan turunan pertama horizontal dan turunan vertikal kedua dengan memanfaatkan fitur-fitur yang tersedia. *Output* dilakukan dengan memvisualisasikan sehingga dapat mempermudah untuk dilakukan analisis lanjutannya seperti menentukan batas struktur, patahan, dan menggambar sesuatu yang detail keberadaan struktur geologi yang ada di bawah permukaan.

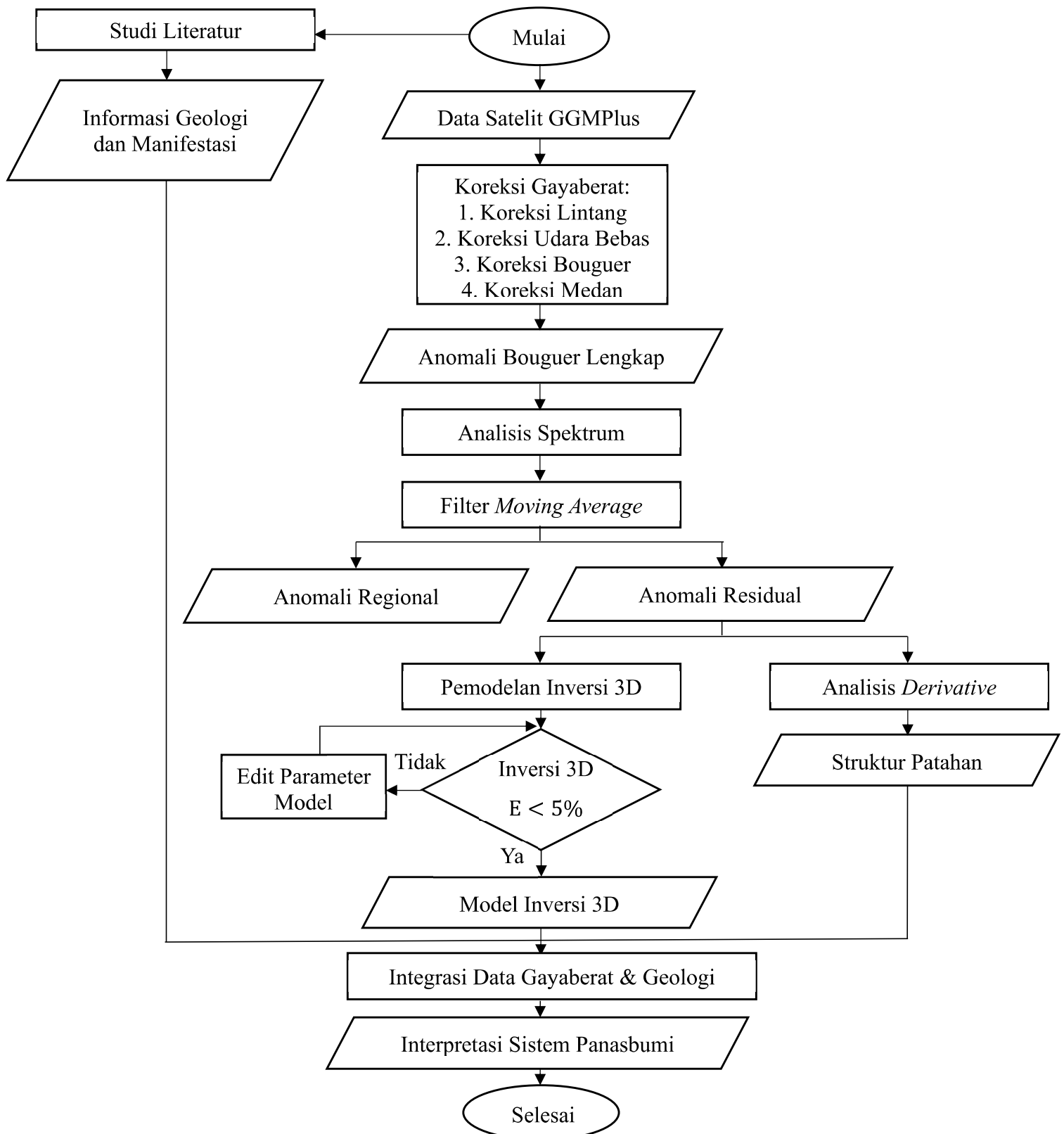
#### 4.3.6 *Inverse Modelling (3D)*

Pemodelan dilakukan untuk menggambarkan bawah permukaan dengan menggunakan pemodelan inversi 3D dengan *software* Grav3D yang terdiri dari tiga program, yaitu gmDataViewer, *MeshTools3D*, dan Grav3D-Gui. Proses pemodelan dilakukan menggunakan sebuah *mesh* yang tersusun dari beberapa sel kecil untuk merepresentasikan distribusi densitas penyebab anomali gayaberat. Sebelum dilakukan proses inversi, ditambahkan terlebih dahulu nilai *error* data gayaberat menggunakan gmDataViewer. Nilai *error* akan menggambarkan noise pada data. Selanjutnya, untuk menentukan ukuran *mesh* disesuaikan dengan daerah penelitian menggunakan *MeshTools3D*. Data anomali gayaberat, *mesh*, dan topografi kemudian dimasukkan ke dalam Grav3D-gui untuk dilakukan proses inversi hingga diperoleh nilai gayaberat hasil perhitungan yang mendekati data gayaberat observasi.



#### 4.5 Diagram Alir

Diagram alir penelitian Tugas Akhir ini dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Diagram alir

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Kesimpulan pada hasil pembahasan yang telah dilakukan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Struktur daerah penelitian ditentukan menggunakan analisis *derivative* yaitu *First horizontal derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Berdasarkan analisis *derivative* struktur pada daerah penelitian dominan berarah barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya. Hubungan antar struktur yang teridentifikasi dengan pola yang sama diinterpretasikan membentuk struktur graben yang dapat berfungsi sebagai zona akumulasi suatu fluida.
2. Pemodelan inversi 3D data gayaberasat menghasilkan distribusi densitas dengan rentang nilai 1,9 g/cc hingga 2,9 g/cc. Zona dengan densitas yang tinggi berkisar 2,9 g/cc diinterpretasikan sebagai sumber panas yang berada pada kedalaman >2,5 km. Zona dengan densitas rendah pada rentang 1,9 g/cc-2,1 g/cc diinterpretasikan sebagai reservoir yang berada pada 0,5 km hingga 2,0 km yang tersebar di beberapa lokasi. Zona dengan densitas berkisar 2,3 g/cc-2,7 g/cc sebagai zona dengan densitas sedang yang diinterpretasikan sebagai zona impermeabel berfungsi sebagai batuan penudung.
3. Berdasarkan hasil inversi 3D, sistem panasbumi daerah Telaga Ngebel tersusun atas sumber panas dengan densitas yang tinggi pada kedalaman > 2,5 km, reservoir dapat diidentifikasikan dari densitas (1,9 g/cc - 2,1 g/cc) pada 0,5 hingga 2,0 km di beberapa lokasi, dan batuan penudung diidentifikasikan dengan zona yang memiliki densitas sedang (2,3 g/cc - 2,7 g/cc). Hasil analisis *derivative* diinterpretasikan adanya struktur yang berperan sebagai jalur migrasi fluida

hidrotermal serta mengontrol kemunculan manifestasi panasbumi di daerah penelitian, diindikasikan struktur tersebut membentuk zona depresi atau struktur graben.

## **6.2 Saran**

Metode gayaberat yang digunakan dalam penelitian ini masih belum cukup untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan secara menyeluruh, sehingga penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan hasil penelitian ini dengan data magnetotellurik (MT) untuk memvalidasi identifikasi *caprock*, agar model sistem panasbumi yang dihasilkan menjadi lebih komprehensif dan ambiguitas interpretasi dapat diminimalkan melalui validasi setiap metode.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahluriza, P., & Harmoko, U. (2025). Analisis Pemanfaatan Tidak Langsung Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 2(1), 53–59. <https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11075>
- Arifin, N. F., Turmudzi, T., Sirbani, & Marbun, N. V. (2025). Penentuan Batas Zona Low Density Untuk Eksplorasi Panas Bumi di Gunung Ungaran Menggunakan Pemodelan Gayaberat 3D Berbasis Satelit dan Analisis Fault Fracture Density. *Bulletin of Geology*, 9(2), 36–53. <https://doi.org/10.5614/bull.geol.2025.9.2.3>
- Bachri, S. (2014). Pengaruh Tektonik Regional Terhadap Pola Struktur dan Tektonik Pulau Jawa. *Jurnal Geologi Dan Sumberdaya Mineral*, 15(4), 215–221.
- Basid, A., Andrini, N., & Arfiyaningsih, S. (2014). Pendugaan Reservoir Sistem Panasbumi dengan Menggunakan Survey Geolistrik, Resistivitas dan Self Potential (Studi Kasus: Daerah Manifestasi Panas Bumi di Desa Lombang, Kecamatan Batang-Batang, Sumenep). *Jurnal Neutrino*, 7(1), 57. <https://doi.org/10.18860/neu.v7i1.2640>
- Blakely, R. J. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic*. Cambridge University Press.
- Bronto, S. (2006). Fasies Gunung Api dan Aplikasinya. *Jurnal Geologi Indonesia*, 1(2), 59–71. <https://doi.org/https://doi.org/10.17014/ijog.1.2.59-71>
- Escobedo, D., Patrier, P., Beaufort, D., Gibert, B., Levy, L., Findling, N., & Mortensen, A. (2021). Contribution of the Paragenetic Sequence of Clay Minerals to Re-Examination of the Alteration Zoning in the Krafla Geothermal System. *Minerals*, 11, 1–30.

<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min11090935>

- Fahrudin, & Aribowo, Y. (2024). Geological Structure Impacts to Hydrocarbon Potential and Active Faults in the East Java Basin, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 9(3), 373–377. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2024.9.3.16736>
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- Hall, R. (2012). Late Jurassic – Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571, 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.021>
- Hamilton, W. B. (1988). Plate Tectonics and Island Arc. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1503–1527.
- Harahap, Z. A., Haryanto, A. D., Firmansyah, Y., & Alfadli, M. K. (2022). Determinasi Zona Reservoir dengan Data magnetotellurik di Zona Prospek Panas Bumi Telaga Ngebel, Jawa Timur. *Padjajaran Geoscience Journal*, 6(2), 803–811.
- Hartono, U., Bahharuddin, & Brata, K. (1992). *Peta Geologi Lembar Madiun, Jawa Timur*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New ultra-high resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical Research Letters*, 40(Section 2). <https://doi.org/10.1002/grl.50838>.New
- Hochstein, M. P., & Sudarman, S. (2015). Indonesian Volcanic Geothermal Systems. *Proceedings World Geothermal Congress, April*, 19–25.
- Ismunandar, W., Raharjanti, N. A., & Yudiantoro, D. F. (2024). Vulkanostratigrafi Komplek Vulkanik Gunung Wilis Bagian Barat, Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur. *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 22, 217–230.
- 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), 89–98.
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. John Wiley & Sons Ltd.

- Khasmadin, M. F., & Harmoko, U. (2021). Kajian Potensi dan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Wilayah Kerja Panas Bumi Patuha Ciwidey. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 101–113.  
<https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11187>
- Liana, Y. R., Wea, T. M. M., Syarifah, W., Supriyadi, S., & Khumaedi, K. (2020). Analisis Anomali Bouguer Data Gaya Berat Studi Kasus di Kota Lama Semarang. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 4(2), 63.  
<https://doi.org/10.30595/jrst.v4i2.6301>
- Ningrum, C. W., Stanzah, E., & Majid, A. A. (2023). Energi Panas Bumi : Sumber Daya yang Dibentuk oleh Struktur Geologi Citra Wahyu Ningrum Edo Stanzah Assyeh Annasrul Majid. *Ocean Engineering: Jurnal Ilmu Teknik Dan Teknologi Maritim*, 2(2), 24–33.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.58192/ocean.v2i2.1120>
- Prabowo, L. A., & Husein, S. (2025). Identification Of Permeable Structures And Heat Source In The Geothermal Working Area Of Galunggung Volcano And The Heat Source Connectivity To The Karaha-Cakrabuana Area Using Gravity Data. *Jurnal of Applied Geophysics*, 8(1), 34–47.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22146/jag.60835>
- Putri, D. A. A., & Sulhan, M. (2023). The Development of Geothermal Energy As A Renewable Power Plant. *Jurnal of Earth Energy Engineering*, 12((2)), 11–15. <https://doi.org/10.25299/jeee.2023.13956>
- Reynold, J. M. (1998). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd.
- Ryka, H., & Afifah, R. S. (2019). Pemodelan Geologi Bawah Permukaan Bantar Karet, Jawa Barat Menggunakan Metode Gayaberat. *Jurnal Geoelebes*, 3(2), 59–65. <https://doi.org/10.20956/geoelebes.v3i2.6689>
- Saptadji, N. M. (2001). *Teknik Panasbumi*. ITB Press.
- 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 Gaya Berat*. Graha Ilmu.
- Sidik, M., & Harmoko, U. (2025). Potensi Energi Panas Bumi di Jawa Timur Sebagai Energi Alternatif Pengganti Energi Fossil. *JEBT: Jurnal Energi Baru*

- & *Terbarukan*, 3(1), 49–60. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13158>
- Smyth, H. R., Hall, R., & Nichols, G. J. (2008). Cenozoic Volcanic Arc History Of East Java, Indonesia : The Stratigraphic Record of Eruptions On An Active Continental Margin. *The Geological Society of America*, 2436(10), 199–222. [https://doi.org/10.1130/2008.2436\(10\)](https://doi.org/10.1130/2008.2436(10)).
- Soeria-Atmadja, R., Maury, R. C., Bellon, H., Ringgoprawiro, H., Polve, M., & Priadi, B. (1994). Tertiary Magmatic Belts in Java. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(1–2), 13–27.
- Suharno. (2013). *Eksplorasi Geothermal*. Lembaga Penelitian Universitas Lampung.
- Suprianto, A., Supriyadi, Priyantari, N., & Cahyono, B. E. (2021). Correlation Between GGMPPlus, Topex and BGI Gravity Data in Volcanic Areas of Java Island. *Journal of Physics: Conference Series*, 1825(1), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1825/1/012023>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Widjajanti, N., Pratama, C., Azizi, I. H., & Yulaikhah, Y. (2024). Strain Accumulation Along the Eastern Java Back Arc Thrust System Inferred from a Dense Global Navigation Satellite System Network. *Geosciences*, 14(346), 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/geosciences14120346>
- Wijanarko, E., Sunarjanto, D., & Nur, D. (2021). Identifikasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Menggunakan Metode Horizontal Gradient, Euler Deconvolution and Second Vertical *Derivative*. Studi Eksplorasi Panas Bumi Baturaden, Jawa Tengah. *Lembaran Publikasi Minyak Dan Gas Bumi*, 55(1), 23–33.
- Wijaya, A., Kusumayudha, S. B., Yudiantoro, D. F., & Asfahani, M. G. (2025). Geological Structural Control on the Distribution of Rock Alteration in Ngebel Lake and Surrounding Areas, Ponorogo, Indonesia. *International Journal of Science and Society*, 7(1), 139–153.
- Yudiantoro, D. F., Pratiknyo, P., & Sayudi, D. S. (2021). Hydrothermal Fluids-Rock Interactions in the Geothermal Area of the Ngebel Volcano Complex Ponorogo, East Java, Indonesia. *RSF Conference Series: Engineering and*

*Technology*, 1(1), 267–280.

- Yufajjiru, L., Dhiwaurrais, M., Firdaus, A., M, D. A. L. H., & Amanda, L. T. (2019). Studi Pemisahan Anomali Regional dan Residual Gayaberat Menggunakan *Moving average* dan Chebyshev Tipe 1 Lowpass *Filter* . *Prosiding Seminar Nasional Geofisika*, 64–72.
- Yulastuti, Suntoko, H., & Yarianto, S. B. S. (2017). Bouger Density Analysis using Nettleton Method at Banten NPP Site. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 19(1), 43–49.