

**KARAKTERISASI SISTEM PANAS BUMI LESUGOLO, NUSA  
TENGGERA TIMUR, BERDASARKAN ANALISIS *DERIVATIVE* DAN  
*INVERSE MODELLING* 3D DATA GAYABERAT**

(Skripsi)

Oleh

**Salsa Bila Warohmah**

**2215051033**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG**

**2026**

**KARAKTERISASI SISTEM PANAS BUMI LESUGOLO, NUSA  
TENGGERA TIMUR, BERDASARKAN ANALISIS *DERIVATIVE* DAN  
*INVERSE MODELLING* 3D DATA GAYABERAT**

**Oleh  
Salsa Bila Warohmah**

**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

### KARAKTERISASI SISTEM PANAS BUMI LESUGOLO, NUSA TENGGERA TIMUR, BERDASARKAN ANALISIS *DERIVATIVE* DAN *INVERSE MODELLING 3D* DATA GAYABERAT

Oleh

**SALSA BILA WAROHMAH**

Sistem panas bumi Lesugolo merupakan salah satu kawasan dengan prospek panas bumi yang dicirikan oleh kehadiran manifestasi berupa mata air panas di permukaan. Tujuan penelitian ini merupakan mengidentifikasi struktur geologi dan memodelkan sistem panas bumi menggunakan metode gayaberat. Analisis dilakukan dengan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk memetakan keberadaan struktur sesar serta *inverse modelling 3D* untuk mengetahui model distribusi densitas batuan di bawah permukaan. Hasil analisis *derivative* pada penampang A-A', B-B', dan C-C' berhasil mengkonfirmasi keberadaan dua sesar geologi yang telah diketahui sebelumnya sekaligus mengidentifikasi enam titik indikasi sesar baru yang berperan sebagai jalur permeabilitas bagi fluida hidrotermal. Hasil *inverse modelling 3D* menunjukkan distribusi densitas bawah permukaan berkisar antara  $2,0 \text{ g/cm}^3$  hingga  $2,9 \text{ g/cm}^3$ . Zona dengan densitas rendah diinterpretasikan sebagai zona reservoir yang tersusun oleh batuan sedimen vulkanoklastik tersier berupa tufa pasiran dan breksi tersier yang bersifat *porous*. Zona reservoir tersebut teridentifikasi mulai dari kedalaman 350 m hingga 1500 m di bawah *mean sea level*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi di bawah permukaan dan menjadi dasar dalam langkah penyelidikan lebih dalam mengenai potensi panas bumi di daerah Lesugolo.

Kata kunci: Analisis *derivative*, gayaberat, *inverse modelling 3D*, Lesugolo.

## **ABSTRACT**

### **CHARACTERIZATION OF THE LESUGOLO GEOTHERMAL SYSTEM, EAST NUSA TENGGARA, BASED ON DERIVATIVE ANALYSIS AND 3D INVERSE MODELLING OF GRAVITY DATA**

*By*

**SALSA BILA WAROHMAH**

*The Lesugolo geothermal system is one of the areas with geothermal prospects, characterized by the presence of hot springs manifestations at the surface. This study aims to identify geological structures and model the geothermal system using the gravity method. The analysis was carried out using the First Horizontal Derivative (FHD) and Second Vertical Derivative (SVD) methods to delineate fault structures, as well as 3D inverse modelling to determine the distribution of rock density in the subsurface. The derivative analysis on cross sections A-A, B-B' and C-C' successfully confirmed the existence of two previously known geological faults and identified six new fault indication points that act as permeability pathways for hydrothermal fluids. The result of 3D inverse modelling indicate that the subsurface density distribution ranges from 2.0 g/cm<sup>3</sup> to 2.9 g/cm<sup>3</sup>. Zones with low density are interpreted as reservoir zones composed of tertiary volcanoclastic sedimentary rocks, consisting of sandy tuff and Tertiary breccia with porous characteristic. The reservoir zone is identified at depths ranging from 350 m to 1500 m below mean sea level (MSL). This study is expected to provide an overview of subsurface conditions and serve as a basis for further investigation into the geothermal potential of the Lesugolo area.*

*Keywords: Derivative analysis, gravity method, inverse modelling 3D, Lesugolo.*

Judul Skripsi : **Karakterisasi Sistem Panas Bumi Lesugolo, Nusa Tenggara Timur, Berdasarkan Analisis *Derivative* dan *Inverse Modelling* 3D Data Gayabarat**

Nama Mahasiswa : **Salsa Bila Warohmah**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215051033

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**



1. **Komisi Pembimbing**

Pembimbing 1

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

**M.T**

NIP. 197209281999031001

Pembimbing 2

**Nanda Hanyfa Maulida, S.T., M.T**

NIP. 199308262022032013

2. **Ketua Jurusan Teknik Geofisika**

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

NIP. 197307162000121002

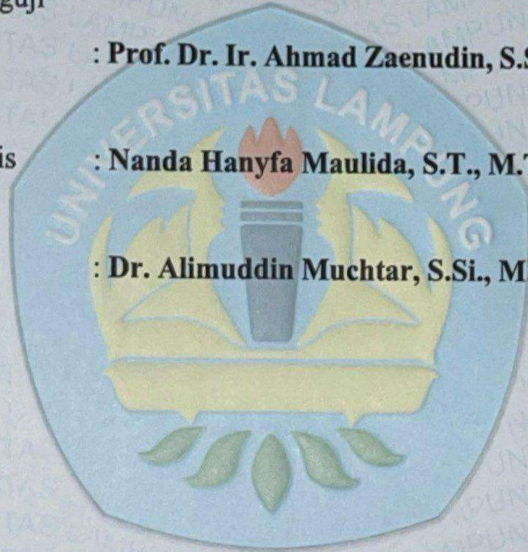
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

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

Sekretaris : Nanda Hanyfa Maulida, S.T., M.T.

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



*[Handwritten signatures in black and blue ink]*

2. Dekan Fakultas Teknik



*[Handwritten signature]*  
**Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**

NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 25 Mei 2026

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “Karakterisasi Sistem Panas Bumi Lesugolo, Nusa Tenggara Timur, Berdasarkan Analisis *Derivative* dan *Inverse Modelling* 3D Data Gayaberat” sepenuhnya merupakan hasil karya dan pemikiran saya sendiri, yang disusun sebagai salah satu persyaratan guna meraih gelar Sarjana Teknik. Seluruh referensi yang digunakan dalam penulisan ini, baik berupa kutipan langsung maupun tidak langsung, telah disebutkan dan dicantumkan secara tepat dalam daftar pustaka sesuai dengan ketentuan serta etika penulisan ilmiah. Jika di kemudian hari terdapat pelanggaran atau ketidaksesuaian terhadap pernyataan ini, saya siap menerima seluruh konsekuensi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Bandar Lampung, 15 Juni 2026



**Salsa Bila Warohmah**

NPM. 2215051033

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Liwa pada tanggal 3 November 2003 sebagai anak sulung dari dua bersaudara oleh pasangan Bapak Zar'an dan Ibu Neta Purwati yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi penuh dalam mengenyam pendidikan. Pendidikan penulis diawali di TK Aisyiyah Busthanul Athfal pada tahun 2010, kemudian penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 1 Sebarus pada tahun 2010-2016.

Setelah menuntaskan pendidikan dasar, penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri Sekuting Terpadu pada tahun 2016-2019. Pada tahun 2019, penulis masuk ke sekolah menengah atas di SMA Negeri 1 Liwa dan berhasil menyelesaikannya pada tahun 2022. Pada tahun yang sama, Penulis diterima sebagai mahasiswa di Jurusan Teknik Geofisika di Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis aktif terlibat dalam berbagai organisasi kemahasiswaan. Adapun pengalaman organisasi tersebut di antaranya keanggotaan pada Divisi Pengembangan Sumber Daya Manusia di BEM Fakultas Teknik Universitas Lampung, Bidang Kaderisasi di Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika, serta Divisi Human Resource Development pada *SEG Student Chapter* Universitas Lampung. Pada tahun 2025, penulis mengikuti program Kuliah Kerja Nyata yang dilaksanakan di Desa Mekar Asri, Sungkai Tengah, Kabupaten Lampung Utara. Di samping itu, penulis juga menjalankan kegiatan Kerja Praktik di Tim Kerja Panas Bumi pada Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi. Setelah seluruh rangkaian kegiatan tersebut, penulis kemudian menyusun Tugas Akhir di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung sebagai salah satu persyaratan guna meraih gelar Sarjana Teknik.

## **PERSEMBAHAN**

Alhamdulillah rabbi ‘alamin, puji dan syukur senantiasa terpanjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, dan kekuatan yang tiada henti mengalir sehingga karya ini dapat diselesaikan dengan baik. Dengan limpahan rasa syukur serta kerendahan hati, karya ini penulis persembahkan kepada:

### **EMAK DAN BAPAK TERCINTA**

Yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, serta dukungan dalam setiap langkah. Terima kasih atas seluruh pengorbanan dan ketulusan dalam membimbing, mendidik, dan mencintai penulis pada setiap keadaan. Bahkan ketika penulis belum mampu memenuhi harapan. Semua itu menjadi kekuatan terbesar bagi penulis sehingga mampu berada pada titik ini.

### **ADIK TERSAYANG**

Yang senantiasa mendukung penulis dalam setiap hal dan menjadi teman dalam melewati setiap suka dan duka kehidupan. Semoga apa yang penulis capai pada hari ini, bisa menjadi motivasi untuk terus meraih cita-cita yang lebih tinggi.

### **DIRI PENULIS SENDIRI**

Terima kasih atas 1001 cara upaya bertahan untuk tetap hidup, disaat ada 1000 alasan untuk menyerah. Terima kasih atas segala usaha, keyakinan dan konsistensi sehingga mampu menyelesaikan pendidikan ini dengan baik.

**Keluarga Besar Granit Teknik Geofisika 2022**

Serta

**Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung**

## MOTTO HIDUP

**“Karena sesungguhnya setelah kesulitan itu ada kemudahan, setelah kesulitan itu ada kemudahan”**

(QS Al- Insyirah ayat 5-6)

***“It will pass, it will pass. The good, the bad, the unknown, everything. It all passes”***

(Rachel Vennya Roland)

***“To live for the hope of it all”***

(Taylor Swift)

***“Living to the highest purpose”***

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas curahan rahmat juga karunia-Nya sehingga skripsi dengan judul “Karakterisasi Sistem Panas Bumi Lesugolo, Nusa Tenggara Timur, Berdasarkan Analisis *Derivative* dan *Inverse Modelling* 3D Data Gayaberat” dapat diselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan guna meraih gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung dan menganalisis anomali gayaberat guna mengidentifikasi struktur geologi dan sistem panas bumi bawah permukaan di daerah Lesugolo, Nusa Tenggara Timur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi di bawah permukaan dan guna mendukung penyelidikan lebih dalam mengenai potensi panas bumi di Indonesia.

Bandar Lampung, 15 Juni 2026



**Salsa Bila Warohmah**

NPM. 2215051033

## SANWACANA

Atas izin dan limpahan karunia Allah SWT, skripsi yang berjudul “*Karakterisasi Sistem Panas Bumi Lesugolo, Nusa Tenggara Timur, Berdasarkan Analisis Derivative dan Inverse Modelling 3D Data Gayabarat*” ini dapat terselesaikan dengan baik. Proses penyusunan karya ini tidak lepas dari peran serta bantuan dan dukungan berbagai pihak, yang senantiasa memberikan uluran tangan selama proses ini berlangsung. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si., C.EIA., IPM. Selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si., C.EIA. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, sekaligus sebagai dosen penguji yang senantiasa memberikan saran serta masukan guna penyempurnaan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. selaku Dosen Pembimbing 1 yang dengan penuh kesabaran dan kerendahan hatinya senantiasa memberikan bimbingan dan arahan dalam proses penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Nanda Hanyfa Maulida, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 2 yang senantiasa memberikan arahan, masukan serta koreksi sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
6. Bapak Asep Sugianto, S.T., M.T. selaku Pembimbing Lapangan pelaksanaan Kerja Praktik dan Tugas Akhir dari PSDMBP yang senantiasa memberikan arahan, kesempatan berdiskusi, dan pengalaman kerja praktik yang berharga dan tak terlupakan.

7. Seluruh dosen dan staf Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung, yang senantiasa memberikan ilmu, pengetahuan dan pengalaman berharga selama masa perkuliahan di Universitas Lampung.
8. Bapakku tersayang, tiada bentuk terima kasih yang lebih besar penulis ucapkan kepada Bapak atas segala dukungan, pengorbanan, dan doa yang senantiasa mengalir sepanjang nafas Penulis. Dukungan dan kerja keras Bapak yang mengantarkan Penulis sampai di hari ini. Terima kasih selalu menguatkan penulis disaat Bapak pun dalam keadaan rapuh dan memeluk Penulis dalam setiap keadaan. Segala pesan dan didikan Bapak membentuk Penulis menjadi perempuan tangguh, berani dan tidak mudah menyerah. *Every bold word i speak, is a tribute to the Man who raised me brave. I love you, Bapak.*
9. Emak yang terkasih, izinkan penulis mengucapkan terima kasih dan rindu yang tak pernah putus. Terima kasih atas segala doa yang pernah Emak panjatkan sehingga penulis bisa sampai pada hari ini. Penulis yakin bahwa segala keajaiban dan pertolongan Allah sampai hari ini adalah atas ridho Emak. Lagi-lagi terima kasih atas kuat dan lapangnya hati Emak dalam menerima setiap ketidaksempurnaan penulis. Andai keabadian dapat dipanjatkan melalui doa, nama Emak akan menjadi nama pertama yang penulis panjatkan. Terima kasih Emak atas kuatnya Emak menahan rasa sakit, semoga kesabaran Emak menjadi alasan kelak Emak masuk ke surga Allah tanpa hisab. *I dedicate this victory to you, hope you smiling proudly.*
10. Adikku satu-satunya, anugerah terindah dan sahabat sepanjang hidup penulis. Terima kasih selalu berusaha menjadi adik yang baik, selalu menjadi tempat ternyaman penulis untuk berbagi dan senantiasa mendukung setiap keputusan yang penulis ambil. Sukseslah dan lampau kakakmu ini, sampai kapanpun kamu akan menjadi adik kecil kesayanganku, jadilah wanita dewasa selayaknya wanita tangguh. *In every universe, in every lifetime, i would always choose you to being my sister.*
11. Kakak-kakak Perempuan, Wo Anggi, Ngah Desi, Kaka Yuli dan Ngah Rika yang senantiasa mendukung dan memberikan semangat kepada penulis. Terima kasih atas segala bentuk perhatian, dukungan serta bantuan materi kepada penulis yang diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan

pendidikan ini. Terima kasih senantiasa memberikan perhatian kepada orang tua Penulis disaat penulis jauh dari rumah.

12. Among yang tercinta, terima kasih telah menjaga penulis bertahun-tahun. Doa Among adalah salah satu alasan Penulis bisa sampai di titik ini. Semoga Among diberikan kesehatan dan umur yang panjang.
13. Alak-alakku tercinta, Alak Ros, Alak Nahrawi, Alak Erna dan Alak Ayi. Terima kasih telah menyayangi penulis selayaknya anak sendiri dan selalu memberikan dukungan dan bantuan kepada Penulis. Semoga Penulis dapat membalas jasa Alak sekalian.
14. Mbak Devi, tetanggaku yang sangat murah hati. Terima kasih atas segala bentuk bantuan, perhatian kepada penulis dan penjagaan kepada keluarga Penulis saat Penulis jauh dari Rumah. Semoga Mbak Devi dan keluarga selalu dilimpahkan kesehatan dan rezeki yang mengalir.
15. Sahabat satu payung penelitianku, Syeikha dan Presti. Terima kasih atas kebersamaan, perjuangan dan *support* yang telah diberikan. Terima kasih telah mengukir cerita menyusuri setiap sudut Kota Bandung, seminar proposal hingga di garis *finish*. Semoga kita dapat menggapai setiap sukses yang kita impikan. *I love you both*.
16. Safira dan Dinda, *my Sisters from another Mother*. Terima kasih karena tetap memilih berjalan bersama dalam setiap suka, duka dan berbagai pasang surut kehidupan. Di balik kata-kata pedas yang sering terlontar satu sama lain, ada ketulusan hati yang siap menjadi tempat bersandar dan hadir tanpa syarat dalam kehidupan Penulis. Semoga kita dapat bersama-sama meraih kesuksesan itu.
17. Teman-temanku “PKM” *sisters*, yang menjadi teman penulis selama masa perkuliahan. Segala canda, tawa, suka, duka dan diskusi hingga tertidur lelap di kamar kost yang sempit menjadi bagian berharga dari perjalanan yang setiap perjuangan terasa lebih ringan. Bersama kalian, kehidupan di kampus berubah menjadi kenangan indah yang akan selalu dikenang. Terima kasih selalu berada di sisi penulis di kala banyak masalah yang menghampiri. Kalian bukan sekedar teman, melainkan bagian penting dari perjalanan hidup yang akan selalu terkenang.

18. Teman-teman penghuni Laboratorium Instrumentasi Geofisika, yang menjadi teman berdiskusi yang baik selama proses penyusunan skripsi. Terima kasih atas segala bantuan dan dukungan, *see you on top*.
19. Tim Kerja Panas Bumi PSDMBP yang telah memberikan kesempatan bagi Penulis untuk melaksanakan Kerja Praktik dan memberikan data dalam penyusunan skripsi ini, terima kasih atas segala ilmu dan pengalaman yang berharga.
20. Diri penulis sendiri, yang telah menyelesaikan apa yang telah dimulai dan memilih untuk bertahan sampai sejauh ini dengan kekuatan hatinya. Maaf karena mimpi Salsa kecil belum bisa terwujud. *Sometimes we don't get what we want and it feels like the universe is being unfair. But maybe, it's not rejection. It is redirection. Because something better is waiting for you. You just don't see it yet. I hope little Salsa is smiling today, we made it here.*
21. Keluarga besar Granit Teknik Geofisika angkatan 2022, yang telah menorehkan warna baru dalam canvas kehidupan Penulis. Terima kasih atas segala kenangan yang telah kita ukir bersama.
22. Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu, atas segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan selama proses penyelesaian skripsi ini.

Bandar Lampung, 15 Juni 2026



**Salsa Bila Warohmah**

NPM. 2215051033

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iv</b>
<b>MENGESAHKAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>PERNYATAAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	<b>viii</b>
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	<b>ix</b>
<b>MOTTO HIDUP</b> .....	<b>x</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>SANWACANA</b> .....	<b>xii</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 Tujuan .....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>4</b>
2.1 Lokasi Penelitian.....	4
2.2 Tektonik Regional Daerah Penelitian .....	5
2.3 Geologi Daerah Penelitian .....	6
2.4 Stratigrafi Daerah Penelitian .....	8
2.5 Sistem Panas Bumi Daerah Penelitian .....	9
2.6 Penelitian Terdahulu .....	11

<b>III. TEORI DASAR.....</b>	<b>14</b>
3.1 Sistem Panas Bumi.....	14
3.2 Metode Gayaberat .....	20
3.3 Konsep Dasar Metode Gayaberat.....	21
3.3.1 Hukum Gravitasi Universal.....	21
3.3.2 Hukum Newton II .....	22
3.4 Potensial Gayaberat.....	23
3.5 Densitas Batuan Rata-rata .....	25
3.6 Koreksi- koreksi Data Gayaberat .....	27
3.6.1 Koreksi Pasang Surut ( <i>Tide Correction</i> ).....	28
3.6.2 Koreksi Apungan ( <i>Drift Correction</i> ) .....	30
3.6.3 Koreksi Lintang ( <i>Latitude Correction</i> ) .....	31
3.6.4 Koreksi Udara Bebas ( <i>Free Air Correction</i> ).....	32
3.6.5 Koreksi Bouguer ( <i>Bouguer Correction</i> ) .....	33
3.6.6 Koreksi Medan ( <i>Terrain Correction</i> ).....	35
3.7 Anomali Bouguer .....	35
3.8 Estimasi Densitas Rata-rata Bawah Permukaan .....	36
3.8.1 Metode Nettleton.....	36
3.9 Anomali Bouguer Lengkap .....	37
3.10 Analisis Spektrum .....	38
3.11 Filter <i>Moving Average</i> .....	41
3.12 Analisis <i>Derivative</i> .....	43
3.12.1 <i>First Horizontal Derivative (FHD)</i> .....	43
3.12.2 <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i> .....	43
3.13 Pemodelan Inversi 3 Dimensi .....	45
<b>IV. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>47</b>
4.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	47
4.2 Alat dan Bahan .....	47
4.3 Prosedur Penelitian.....	48
4.3.1 Studi Literatur .....	49
4.3.2 Pengumpulan Data .....	49
4.3.3 Koreksi Data Gayaberat .....	49

4.3.4	Estimasi Densitas Batuan Rata-rata .....	50
4.3.5	Anomali Bouguer Lengkap .....	50
4.3.6	Analisis Spektrum .....	50
4.3.7	Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual .....	50
4.3.8	Analisis <i>Derivative</i> .....	51
4.3.9	Pemodelan Inversi 3D .....	51
4.4	Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	52
4.5	Diagram Alir .....	53
<b>V.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>55</b>
5.1	Data Penelitian .....	55
5.2	Topografi Daerah Penelitian .....	56
5.3	Nilai Densitas Rata-rata .....	57
5.4	Anomali Bouguer Lengkap .....	60
5.5	Analisis Spektrum .....	61
5.5.1	Lintasan 1 .....	62
5.5.2	Lintasan 2 .....	63
5.5.3	Lintasan 3 .....	64
5.6	Filter <i>Moving Average</i> .....	65
5.7	Anomali Regional .....	66
5.8	Anomali Residual.....	67
5.9	Analisis <i>Derivative</i> .....	69
5.9.1	<i>First Horizontal Derivative</i> .....	69
5.9.2	<i>Second Vertical Derivative</i> .....	70
5.10	<i>Inverse Modelling</i> 3D.....	71
5.10.1	Lintasan A-A' .....	73
5.10.2	Lintasan B-B' .....	75
5.10.3	Lintasan C-C' .....	77
5.10.4	Model Distribusi Densitas pada Berbagai Variasi Kedalaman..	79
5.11	Karakterisasi Sistem Panas Bumi Lesugolo.....	89
<b>VI.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>92</b>
6.1	Kesimpulan .....	92
6.2	Saran.....	93
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi daerah penelitian.....	4
2. Tektonik Busur Banda.....	6
3. Peta geologi daerah penelitian .....	7
4. Model hidrologi tentatif daerah panas bumi Lesugolo .....	10
5. Model konseptual sistem panas bumi .....	15
6. Sistem panas bumi ideal.....	18
7. Gaya tarik menarik antara dua buah benda .....	22
8. Potensial dan kuat medan massa 3D .....	24
9. Pengaruh pasang surut bumi dan <i>drift instrument</i> terhadap gravitasi .....	28
10. Skema pengambilan data gayaberat <i>looping</i> .....	31
11. Koreksi udara bebas terhadap Gayaberat .....	33
12. Koreksi Bouguer .....	34
13. Estimasi nilai densitas menggunakan metode Nettleton.....	37
14. Pembagian zona anomali dengan grafik Ln vs K .....	40
15. Diagram Alir .....	54
16. Desain akuisisi Tim Penyelidikan Terpadu PSDG .....	55
17. Peta topografi wilayah penelitian.....	56
18. Lintasan perhitungan densitas metode Nettleton pada peta topografi .....	58
19. Grafik lintasan 1 perhitungan densitas menggunakan metode Nettleton.....	58
20. Grafik lintasan 2 perhitungan densitas menggunakan metode Nettleton.....	59
21. Grafik lintasan 3 perhitungan densitas menggunakan metode Nettleton.....	59
22. Peta Anomali Bouguer lengkap wilayah penelitian .....	60
23. Peta lintasan analisis spektrum wilayah penelitian .....	62

24. Grafik Ln A vs K lintasan 1 .....	63
25. Grafik Ln A vs K lintasan 2 .....	63
26. Grafik Ln A vs K lintasan 3 .....	64
27. Peta Anomali regional wilayah penelitian .....	66
28. Peta Anomali residual wilayah penelitian.....	67
29. <i>Overlay</i> peta geologi dan kontur anomali residual .....	68
30. Peta sebaran nilai FHD wilayah penelitian .....	69
31. Peta sebaran nilai SVD wilayah penelitian .....	70
32. Peta lintasan <i>slicing</i> 3D pada kontur residual .....	72
33. Model distribusi densitas hasil inversi 3D .....	73
34. Penampang lintasan A-A' .....	74
35. Penampang lintasan B-B' .....	76
36. Penampang lintasan C-C' .....	78
37. Model distribusi densitas pada kedalaman 350 m dan 800 m.....	84
38. Model distribusi densitas pada kedalaman 1.500 m dan 2.000 m.....	85
39. <i>Overlay</i> model distribusi densitas pada kedalaman 350 m dan 800 m .....	86
40. <i>Overlay</i> model distribusi densitas pada kedalaman 1.500 m dan 2.000 m .....	87
41. Model reservoir panas bumi daerah penelitian .....	88
42. Peta batas prospek reservoir daerah penelitian .....	91

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Stratigrafi daerah penelitian .....	9
2. Penelitian Terdahulu .....	11
3. Konversi satuan gayaberat .....	23
4. Nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990).....	26
5. Operator Filter SVD (Henderson & Zietz, 1949).....	44
6. Operator Filter SVD (Elkins, 1951).....	45
7. Operator Filter SVD (Rosenbach, 1953).....	45
8. Alat dan bahan.....	47
9. Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	52
10. Kedalaman anomali regional dan anomali residual .....	64
11. Bilangan Gelombang ( $K_c$ ) dan lebar jendela (N) .....	65
12. Hasil analisis kurva SVD lintasan A-A' .....	75
13. Hasil analisis kurva SVD lintasan B-B' .....	77
14. Hasil analisis kurva SVD lintasan C-C' .....	79

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan sebuah negara berbentuk kepulauan yang dianugerahi kekayaan sumber daya alam yang melimpah, salah satu di antaranya adalah energi panas bumi. Kondisi ini disebabkan karena posisi Indonesia yang sangat strategis secara geologis, yakni terletak pada jalur Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*). Posisi yang strategis tersebut menempatkan Indonesia sebagai salah satu negara pemilik potensi panas bumi terbesar di dunia. Potensi energi panas bumi Indonesia tersebar di 285 titik wilayah sepanjang busur vulkanik dengan estimasi potensinya mencapai 29,215 GWe (Immanuel dkk., 2019).

Salah satu daerah di Indonesia dengan potensi energi panas bumi yang besar adalah Pulau Flores yang terletak di Provinsi Nusa Tenggara Timur. Hal ini sejalan dengan ketetapan Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (KESDM) Republik Indonesia Nomor 2268 K/30/MEM pada tahun 2017 yang menjadikan Pulau Flores sebagai Pulau Panas Bumi (*Geothermal Island*). Potensi panas bumi di Pulau Flores diperkirakan menyimpan cadangan sebesar 402,5 MW dengan potensi keseluruhan sekitar 1.000 MW yang tersebar pada 16 titik prospek. Salah satu titik prospek panas bumi tersebut berada di wilayah panas bumi Lesugolo. Daerah Lesugolo berada di bagian timur laut Pulau Flores dengan potensi panas bumi diperkirakan sebesar 45 MW (Christiantoro dkk., 2023).

Energi panas bumi merupakan sumber energi panas yang tersimpan dalam uap panas, air panas dan batuan di dalam suatu sistem panas bumi. Energi ini berasal dari panas alami yang terdapat dalam kerak bumi. Sistem panas bumi adalah sebuah daerah panas bumi (*geothermal area*) atau medan panas bumi (*geothermal field*) sebagai tempat terdapatnya energi panas bumi di kedalaman beberapa kilometer di dalam kerak bumi pada kondisi geologi tertentu (Broto & Putranto 2011).

Menurut Suharno (2013), sistem panas bumi umumnya terdiri atas lima komponen utama, di antaranya adalah sumber panas (*heat source*), batuan berpori (*porous rocks*), struktur geologi seperti patahan atau sesar, batuan penutup (*cap rock*), serta daerah resapan air (*recharge area*). Keberadaan sistem panas bumi tersebut secara umum diketahui dari kenampakan manifestasi di permukaan seperti adanya mata air panas (*hot spring*), lubang asap (fumarol), semburan air tanah (geyser), uap tanah (*steaming ground*), lumpur panas, kawah (*crater*), serta batuan yang mengalami alterasi (Suharno, 2013). Untuk memahami kondisi bawah permukaan pada daerah dengan prospek panas bumi, diperlukan metode geofisika yang mampu menyajikan gambaran mengenai struktur, variasi batuan, dan komponen yang ada pada sistem panas bumi tersebut.

Salah satu metode geofisika yang banyak dimanfaatkan adalah metode gayaberat, metode ini bekerja berdasarkan perbedaan nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990). Metode gayaberat biasa digunakan untuk mengidentifikasi komponen penting dalam sistem panas bumi seperti sumber panas (*heat source*) dan reservoir. Pada penerapannya, metode gayaberat mampu mengidentifikasi variasi densitas batuan di bawah permukaan yang mempunyai keterkaitan dengan pembentukan suatu sistem panas bumi. Selain itu, metode ini juga dimanfaatkan untuk pemodelan struktur bawah permukaan yang selanjutnya digunakan untuk analisis. Melalui proses analisis diharapkan dapat diperoleh informasi serta gambaran yang lebih jelas juga detail mengenai kondisi wilayah prospek panas bumi (Rizkiani & Rustadi., 2019).

Pada penelitian ini, penulis melakukan identifikasi prospek panas bumi daerah Lesugolo berdasarkan analisis *derivative* dan *inverse modelling* 3D data gayaberat. Data yang digunakan merupakan data lapangan yang diukur oleh Tim Penyelidikan Geologi, Geokimia dan Geofisika Terpadu PSDG pada tahun 2002. Melalui pendekatan tersebut, diharapkan penelitian ini dapat menyediakan informasi dan gambaran yang lebih rinci mengenai kondisi geologi di bawah permukaan serta komponen-komponen penyusun sistem panas bumi di daerah penelitian. selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan dalam upaya penyelidikan lebih lanjut mengenai potensi panas bumi di Indonesia.

## **1.2 Tujuan**

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung nilai sebaran anomali gayaberat daerah panas bumi Lesugolo.
2. Mengidentifikasi struktur geologi pada sistem panas bumi daerah Lesugolo berdasarkan anomali gayaberat dan analisis *derivative*.
3. Membuat dan menginterpretasikan model 3D bawah permukaan untuk menganalisis sistem panas bumi daerah Lesugolo.

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan adalah data sekunder yaitu data pengukuran langsung tahun 2002 oleh Pusat Sumber Daya Geologi sebanyak 195 titik data.
2. Wilayah studi adalah area prospek panas bumi yang berada di daerah Lesugolo, Kabupaten Ende, Provinsi Nusa Tenggara Timur.
3. Penerapan analisis *derivative* untuk melihat persebaran serta batas kontak struktur geologi dan pemodelan 3D pada daerah Lesugolo, Kabupaten Ende, Nusa Tenggara Timur.

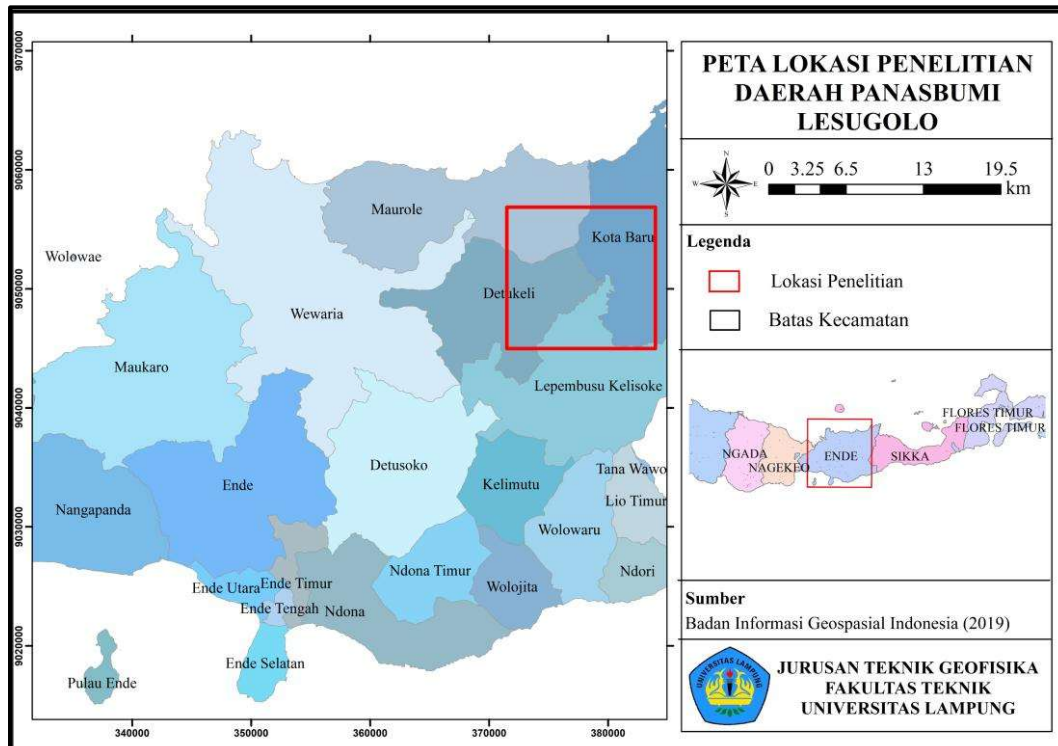
## **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat menyediakan informasi mengenai struktur yang ada di bawah permukaan serta memberikan gambaran mengenai kondisi di bawah permukaan untuk identifikasi sistem panas bumi di daerah Lesugolo. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan dalam perencanaan eksplorasi panas bumi yang berkelanjutan di daerah Lesugolo.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Lokasi Penelitian

Daerah penelitian ini berada pada daerah prospek panas bumi Lesugolo yang terletak di tiga kecamatan yaitu Kecamatan Kota Baru, Detukeli, dan Lepembusu Kelisoke yang secara administratif berada pada Kabupaten Ende, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Secara geografis, wilayah Lesugolo berada pada koordinat  $8^{\circ}32'00''$  sampai  $8^{\circ}38'00''$  LS dan  $121^{\circ}50'30''$  sampai  $121^{\circ}56'30''$  BT, atau setara dengan koordinat 372500 sampai 383000 UTMX serta 904500 sampai 905600 UTMY dalam sistem UTM (*Universal Transverse Mercator*) pada zona 51S. Peta lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.



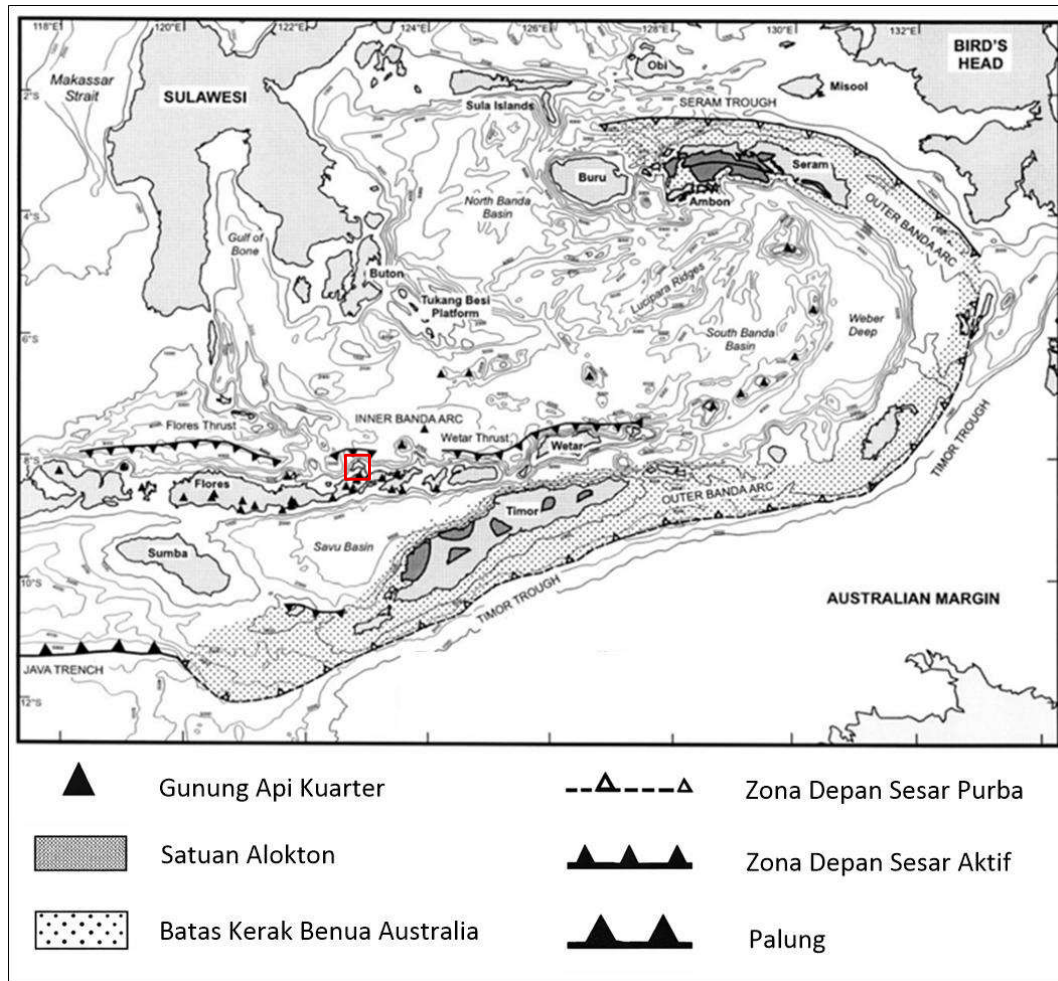
Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian

## 2.2 Tektonik Regional Daerah Penelitian

Kepulauan Nusa Tenggara merupakan sebuah bagian dari sistem Busur Banda. Busur Banda dikenal dengan tektonik regionalnya yang kompleks. Kompleksitas tersebut dikarenakan wilayahnya yang terbentuk akibat interaksi konvergen antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Lempeng Indo-Australia bergerak ke arah utara dan menunjam ke bawah Lempeng Eurasia, membentuk sistem subduksi yang memanjang dari Jawa hingga ke wilayah timur Indonesia. Proses ini mengakibatkan terbentuknya busur vulkanik aktif yang ditandai dengan adanya deretan gunung api Kuartar dan banyaknya aktivitas magmatik di wilayah Nusa Tenggara (Hamilton, 1979).

Secara tektonik, Kepulauan Nusa Tenggara dikelompokkan ke dalam empat zona utama. Zona pertama adalah zona *Back Arc* (busur belakang) yang meliputi Laut Flores dan Laut Banda. Kemudian yang kedua yaitu zona *Inner Arc* (busur dalam) yang mencakup pulau-pulau Flores, Adonara, Solor, Romblen, Pantar Alor, Kambing dan Wetar yang mana aktivitas vulkanisme masih berlangsung hingga saat ini. Selanjutnya zona ketiga yaitu zona *Outer Arc* (busur vulkanik luar) ditempati oleh pulau Sawu, Roti, Semau, Timor, Tanimbar, Kepulauan Aru dan Seram yang umumnya tersusun oleh batuan sedimen hasil pengangkatan akibat tekanan konvergensi lempeng. Zona keempat adalah *Fore Arc* (busur depan) yang ditempati oleh Basin Sawu dan Basin Weber, merupakan zona transisi antara palung subduksi dengan busur kepulauan di atasnya.

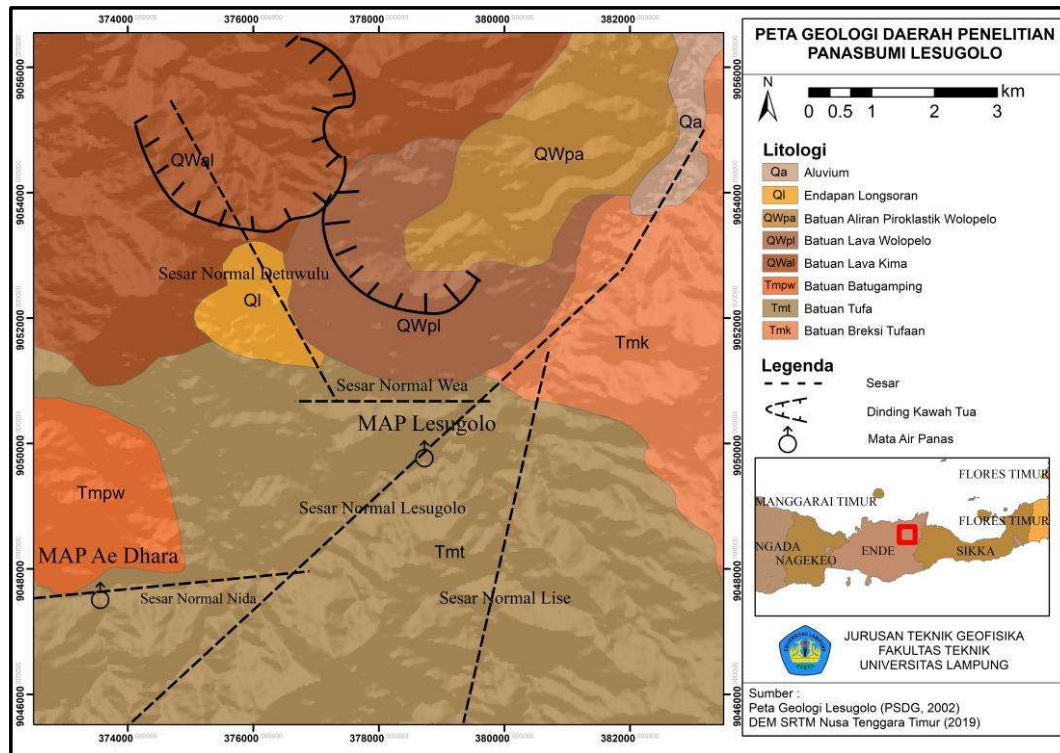
Keberadaan sistem subduksi aktif di kawasan ini turut memberikan implikasi langsung terhadap potensi panas bumi di wilayah Busur Banda. Menurut Hochstein dkk (2010), Busur Banda dicirikan oleh nilai *line density* yang relatif rendah, yaitu sekitar satu sistem panas bumi bertemperatur tinggi pada setiap panjang 100 km jalur busur vulkanik. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun aktivitas vulkanik dan magmatik di kawasan ini cukup intensif, distribusi sistem panas bumi bertemperatur tinggi tidak merata secara spasial di sepanjang jalur busur. Tatanan tektonik Busur Banda secara keseluruhan ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Tektonik Busur Banda (Hall & Wilson, 2000)

### 2.3 Geologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian yang berada di wilayah prospek panas bumi Lesugolo termasuk dalam Lembar Geologi Ende. Wilayah ini terletak di bagian timur laut Pulau Flores. Menurut Aswin dan Tim Penyelidikan Geologi, Geokimia, dan Geofisika Terpadu Daerah Panas bumi Lesugolo Kabupaten Ende Nusa Tenggara Timur (2002), daerah prospek panas bumi Lesugolo tersusun oleh dua kelompok besar batuan. Bagian selatan tersusun oleh batuan sedimen vulkanoklastik berumur Tersier, sedangkan di bagian utara disusun oleh batuan vulkanik berumur Kuartar. Mata air panas Ae Dhara dan Lesugolo muncul pada satuan batuan Tufa (Tmt), sementara mata air panas Ae Petu dan Lowo Geru muncul pada satuan batuan Lava Watuapi (QWal). Peta geologi daerah penelitian disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian (Modifikasi Aswin dkk., 2002)

Gambar 3 merupakan peta yang menyajikan informasi geologi daerah penelitian mulai dari informasi litologi, keberadaan manifestasi dan struktur geologi di wilayah penelitian. Sementara untuk informasi secara geomorfologi, daerah Lesugolo dan sekitarnya terdiri dari pegunungan, perbukitan dan dataran dengan ketinggian antara 25-1.150 mdpl. Wilayah tersebut dibagi menjadi tiga satuan geomorfologi berdasarkan interpretasi peta geologi, peta topografi dan pengamatan di lapangan, yaitu satuan geomorfologi Pegunungan Kaldera Tua, satuan geomorfologi Perbukitan Bergelombang dan satuan geomorfologi Dataran Aluvial. Satuan Pegunungan kaldera tua berada di sebelah utara hingga barat laut Lesugolo. Satuan ini disusun atas batuan gunungapi berumur Kuartar berupa aliran piroklastik dan lava yang berada pada ketinggian 150-1.150 mdpl. Satuan Perbukitan Bergelombang menempati bagian selatan Lesugolo dan tersusun oleh batuan sedimen Tersier berupa sedimen vulkanik seperti tufa, breksi tufaan dan sedikit batugamping. Satuan geomorfologi Dataran Aluvial berada di sepanjang sungai Ndondo pada bagian timur laut Lesugolo. Tersusun oleh satuan aluvium berupa material lepas yang berasal dari tufa, breksi, andesit serta batuan lain yang

telah mengalami mineralisasi berukuran lempung-bongkah dan berada di ketinggian 25-100 mdpl.

#### 2.4 Stratigrafi Daerah Penelitian

Aswin dkk (2002), mengemukakan bahwa stratigrafi daerah penelitian pada daerah prospek panas bumi Lesugolo dibagi menjadi beberapa satuan, di antaranya:

1. Aluvium (Qa)

Satuan ini merupakan satuan yang paling muda dan diperkirakan terbentuk saat kala Holosen-Resen dan berupa material lepas yang belum terkonsolidasi berupa batuan beku dan batuan sedimen.

2. Endapan Longsoran (Ql)

Satuan ini menempati bagian tengah Lesugolo dan terdiri dari tufa halus berwarna putih dan breksi polimik pada bagian bawahnya.

3. Satuan Batuan Aliran Piroklastik Wolopelo (QWpa)

Satuan ini terletak di bagian timur laut Lesugolo berupa breksi aliran yang diperkirakan terbentuk pada kala Pleistosen.

4. Satuan Batuan Aliran lava Wolopelo (QWpl)

Satuan ini menempati bagian sebelah timur Lesugolo. Singkapan berupa lava andesit berwarna abu-abu, keras dan dijumpai kekar kolom (*columnar joint*) dan kekar melembar yang berumur Pleistosen.

5. Satuan Batuan Aliran Lava Watuapi (QWal)

Satuan ini diperkirakan berumur pleistosen dan menempati bagian barat laut Lesugolo, berupa lava andesit yang diselingi oleh breksi, serta aliran dan lapisan tipis tuff aglomerat yang berada pada *rim structure* kaldera Watuapi.

6. Satuan Batuan Batugamping (Tmpw)

Satuan batuan batugamping ini menempati daerah bagian barat daya Lesugolo, berwarna coklat kekuningan, berlapis dan kompak.

7. Satuan Batuan Tufa (Tmt)

Satuan ini berumur Miosen Tengah dan berada di bagian selatan wilayah Lesugolo. Litologinya berupa sedimen volkaniklastik yang tersusun atas

tuff pasiran kasar, tuff karbonatan, tuff berlapis serta sisipan tuff hijau pada bagian tengah dan juga breksi tukaan.

#### 8. Satuan Breksi Tukaan (Tmk)

Satuan ini merupakan satuan tertua yang diperkirakan berumur Miosen Bawah. Persebarannya berada di bagian timur sampai timur laut Lesugolo dan tersusun atas breksi tukaan dan sisipan tuff pasiran dengan tebal sekitar 600 meter.

Satuan litologi tersebut dirincikan dalam Tabel 1 yang memuat informasi mengenai umur dari litologi daerah penelitian.

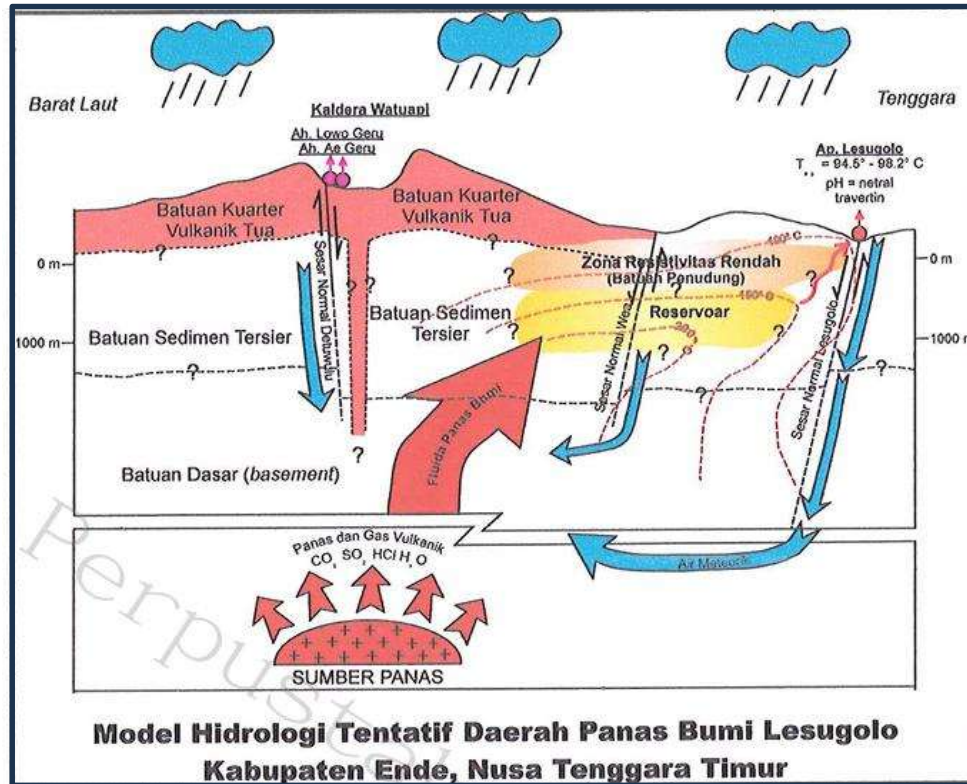
Tabel 1. Stratigrafi daerah penelitian (Modifikasi Aswin dkk., 2002)

	UMUR		ENDAPAN PERMUKAAN	BATUAN SEDIMEN	BATUAN VULKANIK	BATUAN BEKU
K U A R T E R	HOLOSEN		Qa			
			Ql			
T E R S I E R	PLEISTOSEN				QWpa	
					QWpl	
					QWal	
T E R S I E R	MIOSEN	ATAS		Tmpw		
		TENGAH		Tmt		
		BAWAH		Tmk		

### 2.5 Sistem Panas Bumi Daerah Penelitian

Panas bumi adalah energi panas alami yang terakumulasi di dalam tanah. Sistem panas bumi umumnya terdiri dari sistem hidrotermal, yang meliputi siklus air, proses pemanasan, serta kondisi yang memungkinkan fluida panas terakumulasi. Terbentuknya sistem panas bumi, diperlukan beberapa syarat, yaitu keberadaan air sebagai fluida, batuan sebagai sumber panas (*heat source*), batuan

penampung, dan batuan penutup sebagai lapisan penudung (Basid dkk., 2014). Model hidrologi tentatif daerah Lesugolo disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Model hidrologi tentatif daerah panas bumi Lesugolo (PSDG, 2002)

Gambar 4 menyajikan ilustrasi model hidrologi di daerah penelitian yang disayat dari barat laut ke arah tenggara. Model tersebut memberikan gambaran konseptual mengenai keberadaan komponen penyusun sistem panas bumi di daerah penelitian serta kondisi geologi di bawah permukaannya. Selain itu, model tersebut juga menyajikan informasi geokimia mengenai karakteristik manifestasi panas bumi yang muncul di permukaan. Lesugolo adalah sebuah wilayah prospek panas bumi yang terletak di bagian timur laut Pulau Flores, Kabupaten Ende, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Kajian geologi terdahulu mengidentifikasi keberadaan tiga manifestasi air panas dan dua manifestasi air hangat di Wilayah Lesugolo. Berdasarkan studi tersebut diketahui juga bahwa daerah Lesugolo tersusun dari dua kelompok batuan, yakni batuan sedimen vulkanoklastik tersier di bagian selatan serta batuan vulkanik kuarter di bagian utara. Fluida pada sistem panas bumi di wilayah ini diduga muncul melalui sesar normal dengan tipe hidrologi *outflow* dengan sumber panas (*heat source*) berasal dari bagian utara daerah Lesugolo.

## 2.6 Penelitian Terdahulu

Sebagai landasan dari penelitian ini, dilakukan studi literatur untuk mengkaji sejumlah penelitian terdahulu yang dianggap relevan dengan topik yang menjadi fokus pada penelitian ini. Ringkasan penelitian tersebut dirincikan pada Tabel 2, yang memuat informasi mengenai nama dan tahun penelitian serta judul dan hasil penelitian.

Tabel 2. Penelitian terdahulu

No	Penulis	Judul	Hasil Penelitian
1	Penyelidikan Panas Bumi Pusat Sumber Daya Geologi (2002)	Penyelidikan Geologi, Geokimia dan Geofisika Terpadu Daerah Panas Bumi Lesugolo-Kabupaten Ende Nusa Tenggara Timur	Penelitian ini dilakukan di daerah prospek panas bumi Lesugolo dengan tujuan untuk mengidentifikasi sistem geologi di wilayah Lesugolo berdasarkan studi geologi, geokimia dan geofisika (seperti gayaberat, geolistrik dan magnetik). Dari hasil identifikasi geologi, didapatkan hasil bahwa daerah Lesugolo tersusun atas dua kelompok besar batuan yaitu batuan sedimen vulkanoklastik yang berumur tersier pada bagian selatan dan batuan sedimen vulkanik Kuartar pada bagian utara, serta diketahui bahwa model panas bumi di daerah Lesugolo merupakan hidrotermal bertipe <i>outflow</i> . Sementara dari penyelidikan geofisika, didapatkan hasil berupa adanya manifestasi panas bumi yang diduga keberadaannya berasosiasi dengan batuan intrusi dan struktur-struktur sesar di wilayah Lesugolo.

No	Penulis	Judul	Hasil Penelitian
2	Richardo Barry Astro (2019)	Analisis Data Magnetik Untuk Mengetahui Struktur Bawah Permukaan Daerah Potensi Panas Bumi Lesugolo Kabupaten Ende	Kajian ini dilakukan untuk mengetahui pola sebaran anomali magnetik lokal untuk identifikasi struktur geologi di bawah permukaan daerah lesugolo berdasarkan analisis data magnetik. Berdasarkan kajian ini, didapatkan adanya anomali magnetik positif dan negatif dengan kontras yang mengindikasikan adanya sumber anomali di bawah permukaan. Zona dengan anomali negatif diindikasikan sebagai reservoir panas bumi. Selain itu ditemukan juga sesar yang berada pada daerah penelitian yaitu sesar normal lesugolo dan sesar normal lise.
3	Wiranata Simbolon (2022)	Identifikasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Berdasarkan Data Anomali Gayaberat (Studi Kasus: Daerah Panas bumi Lesugolo, Nusa Tenggara Timur	Kajian ini dilakukan untuk mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan daerah Lesugolo dan menggambarkan persebaran densitas batuan berdasarkan pemodelan 2,5 D data pengukuran gayaberat. Hasil dari <i>forward modelling 2,5D</i> menunjukkan bahwa di daerah Lesugolo terdapat 3 satuan litologi, yaitu Satuan Breksi Tufaan (Tmk) dengan densitas $2,6 \text{ g/cm}^3$ , Satuan Tufa (Tmt) dengan densitas $2,45 \text{ g/cm}^3$ , serta Satuan Gunungapi Tua (Qtv) dengan densitas $2,5 \text{ g/cm}^3$ .

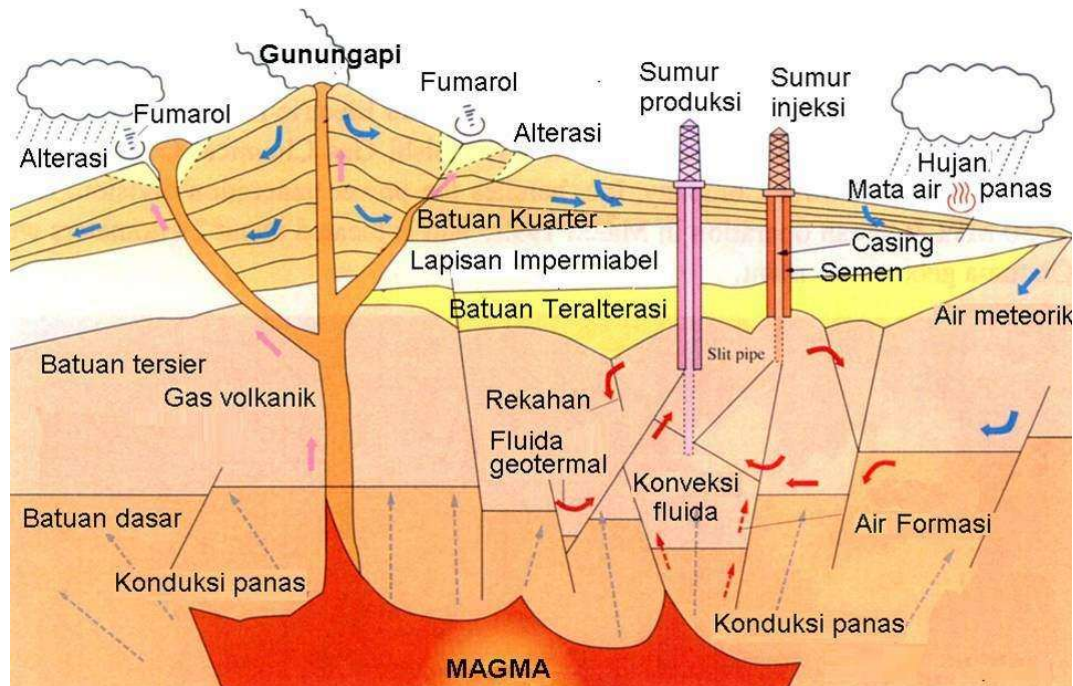
Secara keseluruhan, penelitian terdahulu di daerah Lesugolo telah berhasil mengidentifikasi karakteristik geologi dan struktur di bawah permukaan daerah Lesugolo berdasarkan analisis data magnetik dan data gayaberat hingga tahap *forward modelling* 2,5D. Hasil dari penelitian-penelitian tersebut memberikan informasi mengenai kondisi geologi, persebaran litologi, dan indikasi zona prospek panas bumi daerah penelitian. Namun, belum ada studi terdahulu di daerah ini yang mengidentifikasi sistem panas bumi dengan mengintegrasikan analisis *derivative* dan pemodelan inversi 3D menggunakan data gayaberat. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini guna mendapatkan informasi mengenai struktur yang menjadi jalur permeabilitas fluida pada sistem panas bumi daerah Lesugolo dengan menggunakan analisis *derivative* serta pemodelan 3D untuk analisis komponen sistem panas bumi hingga memperoleh model sistem panas bumi dengan lebih detail.

### III. TEORI DASAR

#### 3.1 Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi adalah suatu proses migrasi energi panas yang terjadi secara alamiah dalam volume tertentu di kerak bumi, aliran panas dikirimkan dari *heat source* (sumber panas) menuju zona pelepasan panas (Hochstein & Browne, 2000). Umumnya distribusi panas dipengaruhi oleh dua mekanisme utama, yaitu konduksi panas melalui batuan padat dan konveksi panas yang terjadi melalui pergerakan fluida. Sistem panas bumi biasanya dijumpai di wilayah yang memiliki gradien geotermal cenderung tinggi, terutama di zona pertemuan lempeng, dimana nilai suhu gradien panas bumi cenderung lebih tinggi dibandingkan suhu rata-rata. Menurut Suharno (2013), syarat-syarat terbentuknya sistem panas bumi adalah memiliki 5 komponen inti: sumber panas (*heat source*), reservoir, struktur geologi seperti patahan atau sesar, batuan penutup (*cap rock*), daerah resapan atau *recharge area*, serta siklus hidrologi. Sistem panas bumi dapat diklasifikasikan menjadi tiga sistem sebagai berikut:

1. Sistem hidrotermal, yaitu sistem panas bumi yang perpindahan panasnya terjadi melalui proses konveksi dari sumber panas (*heat source*) menuju permukaan dengan melibatkan fluida meteorik.
2. Sistem vulkanik (*volcanogenic system*), yaitu sistem panas bumi dengan sumber panas (*heat source*) yang berasal dari aktivitas magmatik. Perpindahan panasnya umumnya terjadi secara konveksi dari magma ke permukaan bumi.
3. Sistem vulkanik-hidrotermal, yang asal sumber panas (*heat source*)nya merupakan kombinasi dari sistem hidrotermal dan sistem vulkanik yang dicirikan dengan keberadaan fluida magmatik yang naik ke permukaan, selanjutnya mengalami pencampuran dengan air meteorik.



Gambar 5. Model konseptual sistem panas bumi (Putrohari, 2009)

Model konseptual sistem panas bumi disajikan pada Gambar 5 yang menggambarkan komponen-komponen penyusun sistem panas bumi. Umumnya, terdapat 5 komponen utama penyusun sistem panas bumi, di antaranya diuraikan sebagai berikut:

#### 1. Sumber Panas (*Heat Source*)

Pada sistem panas bumi, sumber panas (*heat source*) dihasilkan karena adanya persebaran temperatur dan energi panas yang terdapat di bawah permukaan bumi biasanya berupa batuan plutonik atau magma yang mendingin. Distribusi panas yang terjadi secara konduksi dan konveksi ini akan mempengaruhi suhu pada permukaan. Secara alami, suhu di dalam bumi akan meningkat secara konsisten sejalan dengan meningkatnya kedalaman. Suhu bumi akan berubah pada setiap kedalaman atau biasa disebut dengan *geothermal gradient*.

#### 2. Batuan Reservoir (*Reservoir Rock*)

Batuan reservoir merupakan formasi batuan yang letaknya ada di antara sumber panas (*heat source*) dan tempat penampungan panas, biasanya bersifat memiliki porositas dan permeabilitas yang baik dan menjadi tempat penyimpanan fluida termal seperti air panas dan uap panas. Jika suhu reservoir lebih rendah dibandingkan dengan titik didih air, maka fluida dominan dari fasa air. Sebaliknya

apabila suhu reservoir lebih tinggi dari titik didih air, maka fluida yang terbentuk akan didominasi oleh fasa uap (Basid dkk., 2014).

Menurut Hochstein & Browne (2000), berdasarkan perbedaan temperatur reservoir panas bumi diklasifikasikan menjadi tiga sistem panas bumi, yaitu:

- a. Sistem panas bumi dengan temperatur rendah, dengan temperatur fluida kurang dari 125°C dan memiliki entalpi rendah.
- b. Sistem panas bumi dengan temperatur sedang, dengan temperatur fluida antara 125°C sampai dengan 225°C dan memiliki entalpi menengah atau sedang.
- c. Sistem panas bumi dengan temperatur tinggi, dengan temperatur fluida lebih dari 225°C dan memiliki entalpi tinggi.

### 3. Struktur Geologi (Patahan/Sesar)

Sesar didefinisikan sebagai retakan di kerak bumi yang terbentuk akibat adanya pergerakan berlawanan antar dua blok batuan. Sesar terbentuk akibat adanya gaya-gaya dari dalam bumi (endogen) yang beraksi dengan kekuatan yang besar. Akibatnya, lapisan kerak bumi yang memiliki sifat kaku dan tidak bisa melengkung atau melipat, melainkan merespons dengan menciptakan rekahan atau patahan. Ukuran sesar sangat bervariasi, mulai dari hanya beberapa kilometer hingga ribuan kilometer (Rusmilawati dkk., 2019). Struktur geologi seperti patahan atau sesar, memegang peranan yang sangat penting dalam sistem panas bumi. Struktur tersebut menciptakan zona-zona lemah yang memungkinkan terjadinya intrusi batuan panas. Selain itu, keberadaan patahan meningkatkan permeabilitas batuan sehingga fluida panas bumi dapat tersimpan dan mengalir di dalam reservoir. Struktur tersebut juga memiliki peran sebagai jalur migrasi fluida panas bergerak menuju permukaan dan berkembang menjadi manifestasi panas bumi (Mulyani dkk., 2022).

### 4. Batuan Penudung (*Cap rock*)

Batuan penudung (*cap rock*) merupakan salah satu komponen penting dalam sistem panas bumi yang berfungsi sebagai penutup reservoir dan bertugas untuk mencegah fluida termal keluar atau mengalami kebocoran dari reservoir ke permukaan. Keberadaan batuan penudung sangat penting karena berperan dalam mempertahankan akumulasi fluida panas serta menjaga tekanan di dalam reservoir sehingga sistem panas bumi dapat tetap terbentuk dan berkembang. Oleh karena

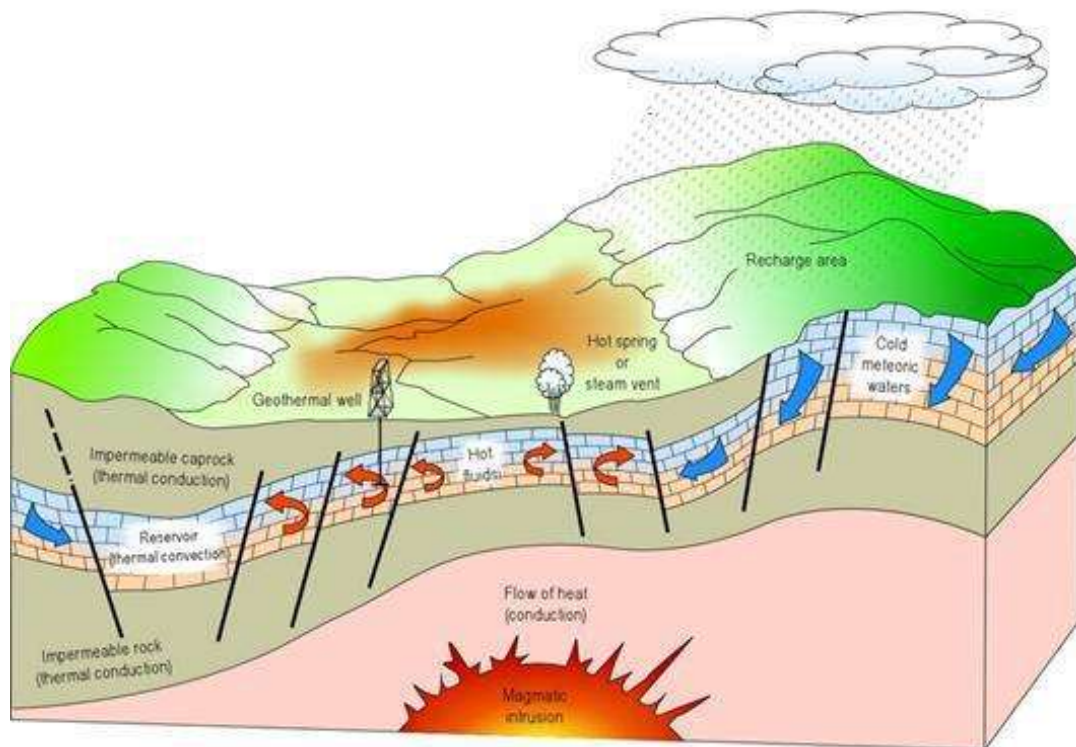
itu, batuan penudung umumnya memiliki permeabilitas yang sangat rendah (*impermeable*) sehingga mampu menghambat pergerakan fluida panas ke arah atas. Pada banyak sistem panas bumi, batuan penudung sering tersusun oleh batuan lempung hasil alterasi hidrotermal (Rihda dkk., 2018).

Dalam sistem panas bumi, batuan penudung dapat berupa *cap rock* maupun *clay cap*. *Cap rock* umumnya tersusun oleh batuan vulkanik, seperti basalt atau andesit, yang memiliki permeabilitas rendah akibat proses pendinginan, kompaksi, maupun alterasi. Pembentukan lapisan ini dipengaruhi oleh kondisi geologi dan aktivitas magmatik yang berkembang pada suatu sistem panas bumi. Sementara itu, *clay cap* merupakan lapisan hasil alterasi hidrotermal tipe argilik yang didominasi oleh mineral-mineral lempung, seperti kaolinit, smektit, dan ilit. Lapisan ini memiliki tingkat kedap yang lebih tinggi dibandingkan *cap rock* karena ukuran butir mineral lempung yang sangat halus mampu menutup pori-pori dan rekahan batuan. Akibatnya, *clay cap* berfungsi sebagai penghalang yang efektif terhadap migrasi fluida panas ke permukaan dan sering dijadikan salah satu indikator penting dalam eksplorasi panas bumi.

##### 5. Daerah Resapan Air (*Recharge Area*)

*Recharge area* merupakan wilayah yang berperan sebagai tempat utama masuknya air ke dalam sistem air tanah. Daerah resapan yang baik umumnya memiliki kondisi geologi dan morfologi yang memungkinkan air permukaan mengalami infiltrasi ke dalam tanah dalam jumlah yang cukup besar. Apabila fungsi resapan ini terganggu atau tidak berjalan dengan baik, maka cadangan air tanah yang tersimpan dapat berkurang. (Riastika, 2012).

Menurut Hendrasto (2018), daerah resapan (*recharge area*) merupakan wilayah yang menerima dan menampung air tawar, baik yang bersumber dari curah hujan maupun dari sumber permukaan seperti laut, danau, dan sungai. Air tersebut selanjutnya mengalami infiltrasi ke dalam tanah melalui celah, rekahan atau patahan pada lapisan batuan. Dalam sistem hidrologi, aliran sungai dan limpasan permukaan berperan sebagai keluaran (*discharge*) yang tidak terpisahkan dari proses masukan (*recharge*). Proses tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya curah hujan, penguapan, infiltrasi, serta mekanisme hidrologi lainnya. Model sistem panas bumi ideal diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Sistem panas bumi ideal ( Dickson & Fanelli, 2004)

Gambar 6 menyajikan ilustrasi model sistem panas bumi yang ideal menurut Dickson & Fanelli (2004), yakni memiliki sumber panas (*heat source*), reservoir, *cap rock*, daerah imbuhan, struktur geologi serta manifestasi panas bumi di permukaan. Keberadaan sistem panas bumi umumnya dicirikan oleh kemunculan manifestasi di permukaan. Jenis-jenis manifestasi yang biasanya dapat diidentifikasi sebagai tanda keberadaan suatu sistem panas bumi adalah sebagai berikut (Suharno, 2013).

#### 1. Fumarol dan Solfatara

Fumarol merupakan uap panas yang muncul melalui rekahan atau celah pada batuan, biasanya disertai gas-gas tertentu, lalu mengembun menjadi uap air di permukaan. Sementara solfatara merupakan celah atau rekahan pada batuan yang mengeluarkan uap air panas yang berasosiasi dengan gas  $\text{CO}_2$  serta  $\text{H}_2\text{S}$ . di sekitar area rekahan tersebut, sering dijumpai endapan sulfur dalam jumlah yang cukup melimpah akibat proses pengendapan dari gas-gas yang keluar (Tamboto dkk., 2023).

## 2. Lumpur panas

Lumpur panas atau *mud pool* merupakan bentuk manifestasi panas bumi yang ada di permukaan yang dapat digunakan sebagai salah satu indikasi keberadaan sumber daya atau sistem panas bumi. Manifestasi ini biasanya kenampakannya mengandung sedikit uap serta gas CO<sub>2</sub>, tidak terkondensasi dan biasanya cairan yang ada di lumpur tersebut berasal dari kondensasi uap. Kondensasi uap panas tersebut juga yang menyebabkan lumpur terdapat dalam keadaan cair (Saptadji, 2001).

## 3. Mata air panas

Mata air panas adalah sumber air yang keluar ke permukaan bumi. Mata air panas terbentuk ketika air tanah mengalami pemanasan setelah bersentuhan dengan magma, lalu bergerak naik ke permukaan melalui celah atau retakan batuan hingga muncul sebagai sumber panas (*heat source*). Temperatur mata air panas dapat dikategorikan sebagai hangat apabila berada di bawah 50°C, sementara dikategorikan panas jika suhunya lebih dari 125° C (Suharno, 2013). Mata air panas yang memiliki sifat asam umumnya adalah manifestasi permukaan dari sistem panas bumi yang didominasi oleh fasa uap, sementara mata air panas yang bersifat netral umumnya merepresentasikan sistem panas bumi yang didominasi oleh fasa air.

## 4. Geysir

Geysir merupakan jenis mata air panas yang secara periodik menyemburkan air ke udara dengan interval waktu yang tidak tetap. Tinggi semburan yang dihasilkan sangat bervariasi, yakni kurang dari satu meter hingga mencapai ratusan meter. Interval antar waktu semburan pun tidak sama, ada yang terjadi dalam hitungan detik hingga hitungan hari. Durasi semburan air ke permukaan pun beragam, dari hitungan detik sampai beberapa jam. Keberadaan geysir menunjukkan adanya sistem panas bumi didominasi air (Saptadji, 2001).

## 5. Uap tanah

Uap tanah (*steaming ground*) adalah sebuah manifestasi panas bumi yang ditandai oleh keluarnya uap panas langsung dari permukaan tanah. Uap tersebut berasal dari lapisan dangkal di bawahan permukaan yang mengandung air panas dengan suhu setara atau melebihi titik didihnya. Apabila gradien temperatur

melebihi 30° C/m, kondisi ini menjadi sangat berbahaya bagi makhluk hidup karena suhu yang terlalu tinggi akan menghambat pertumbuhan vegetasi dan tidak dapat bertahan hidup (Saptadji, 2001).

#### 6. Batuan teralterasi

Batuan teralterasi adalah batuan yang mengalami perubahan akibat adanya interaksi dengan fluida panas bumi. Proses ini dikendalikan oleh berbagai faktor seperti temperatur, tekanan, tipe batuan, komposisi fluida, tingkat keasaman (pH), serta lamanya waktu kontak antara batuan dan air atau fluida. Proses ini menyebabkan terjadinya perubahan kandungan mineral pada batuan.

### 3.2 Metode Gayaberat

Metode gayaberat adalah sebuah metode geofisika yang bekerja dengan menghitung perubahan medan gayaberat bumi. Perubahan nilai gayaberat dapat terjadi akibat adanya perbedaan densitas di bawah permukaan, perbedaan jenis batuan, jarak titik pengukuran terhadap bumi, serta variasi bentuk permukaan bumi (topografi) (Sarkowi, 2014). Menurut Suhadiyatno (2008), metode gayaberat dapat dimanfaatkan untuk mendapatkan gambaran kondisi bawah permukaan bumi dengan mendeteksi nilai anomali gayaberat lokal atau residual. Pola sebaran anomali gayaberat di bawah permukaan bumi dapat merepresentasikan kondisi geologi bawah permukaan karena nilai anomali muncul karena perbedaan densitas batuan secara lateral.

Metode gayaberat adalah metode geofisika yang peka pada perubahan vertikal. Seiring dengan berjalannya waktu, perkembangan metode ini semakin pesat hingga membuat metode gayaberat banyak digunakan untuk mendukung penelitian ketebalan lapisan sedimen, penentuan batas batuan dasar (*basement*), eksplorasi sumber energi dan air tanah, serta berbagai keperluan rekayasa dalam bidang sipil. Selain itu, metode gayaberat juga banyak digunakan dalam pemetaan struktur geologi (Firdaus dkk., 2016)

Dalam kegiatan identifikasi prospek panas bumi metode gayaberat menjadi salah satu metode yang penting untuk digunakan. Metode ini mampu mengidentifikasi komponen sistem panas bumi yaitu reservoir, sumber panas atau *heat source*, batuan penutup (*cap rock*), struktur geologi, zona imbuhan (*recharge*

*area*) serta daerah luahan (*discharge area*) yang diidentifikasi melalui adanya perbedaan densitas batuan (Telford, 1990). Menurut Setiadi dkk (2005), keutamaan metode gayaberat adalah kemampuannya dalam membedakan secara efektif antara kepadatan material sumber anomali dengan densitas medium di sekitarnya. Melalui analisis terhadap perbedaan densitas ini, kondisi dan struktur penyusun bawah permukaan tersebut dapat diidentifikasi. Oleh karena itu, variasi persebaran densitas di dalam bumi dapat digunakan sebagai petunjuk keberadaan struktur geologi internal.

### 3.3 Konsep Dasar Metode Gayaberat

#### 3.3.1 Hukum Gravitasi Universal

Metode gayaberat merupakan sebuah metode yang berlandaskan pada Hukum Newton untuk gravitasi universal. Menurut Telford dkk (1990), Hukum Newton I menegaskan bahwa besarnya gaya tarik menarik diantara dua buah benda dengan massa  $m_1$  dan  $m_2$  akan berbanding lurus dengan hasil perkalian antara massa dari kedua benda tersebut serta berbanding terbalik dengan kuadrat jarak yang memisahkan kedua pusat massanya. Pernyataan matematis hukum tersebut dirumuskan pada Persamaan 1 (Serway & Jewett, 2009):

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

Keterangan:

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

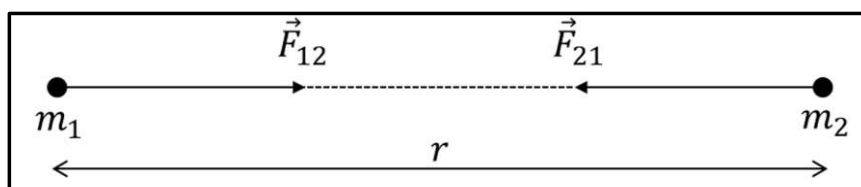
$G$  : Konstanta gayaberat universal ( $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ )

$m_1 m_2$  : Massa tiap partikel/benda (kg)

$r$  : Jarak kedua pusat massa benda (m)

$\hat{r}$  : Vektor satuan arah

Konsep dari gaya tarik menarik antara dua buah benda pada hukum Newton I diilustrasikan pada Gambar 7.



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

### 3.3.2 Hukum Newton II

Newton juga menyatakan hubungan antara gaya dan percepatan pada Hukum Newton II. Berdasarkan Hukum Newton II, dapat diketahui bahwa gerak dari suatu benda ditentukan oleh gaya yang bekerja pada benda tersebut, dimana menurut hukum tersebut gaya ( $F$ ) adalah hasil kali antara besar massa ( $m$ ) dan percepatan ( $g$ ) yang dialami oleh benda tersebut. Secara sistematis dirumuskan pada Persamaan 2 :

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

Laju perubahan kecepatan yang dialami oleh suatu benda dengan massa  $m_2$  akibat tarikan benda bermassa  $m_1$  pada jarak  $r$  dapat dijelaskan pada Persamaan 3:

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

Apabila ditetapkan pada percepatan gaya tarik bumi, persamaan di atas menjadi seperti pada Persamaan 4 dan 5 sebagai berikut:

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

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

Keterangan :

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

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

$M$  : Massa bumi (kg)

$m$  : Massa partikel/ (kg)

$r$  : Jari-jari bumi (km)

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

$\hat{r}$  : Vektor satuan arah

Percepatan gravitasi terjadi akibat adanya interaksi tarik menarik antara dua massa. Interaksi ini menimbulkan gaya tarik menarik yang menyebabkan masing-masing massa mengalami percepatan dengan arah yang saling berlawanan. Nilai percepatan gayaberat yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan selanjutnya

diolah melalui serangkaian koreksi hingga menghasilkan nilai Anomali Bouguer (Telford dkk., 1990). Pengukuran besaran percepatan gravitasi bumi untuk pertama kali diukur oleh Galileo, pengukuran percepatan gravitasi atau nilai gayaberat tersebut kemudian didefinisikan oleh sistem CGS pada Persamaan 6 sebagai berikut:

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

Sedangkan dalam satuan Sistem Internasional (SI), gayaberat biasa diukur dalam  $1 \mu\text{m/s}^2$  atau biasa disebut *gravity unit* (g.u). Konversi satuan gayaberat dijabarkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konversi satuan gayaberat

No	Satuan CGS	Satuan Sistem Internasional (SI)
1	1 mGal	$10^{-2} \text{ m/s}^2 = 1 \text{ cm/s}^2$
2	1 mGal	$10^{-5} \text{ m/s}^2 = 10^{-3} \text{ cm/s}^2$
3	10 mGal	$10^{-6} \text{ m/s}^2 = 1 \text{ g. u}$

### 3.4 Potensial Gayaberat

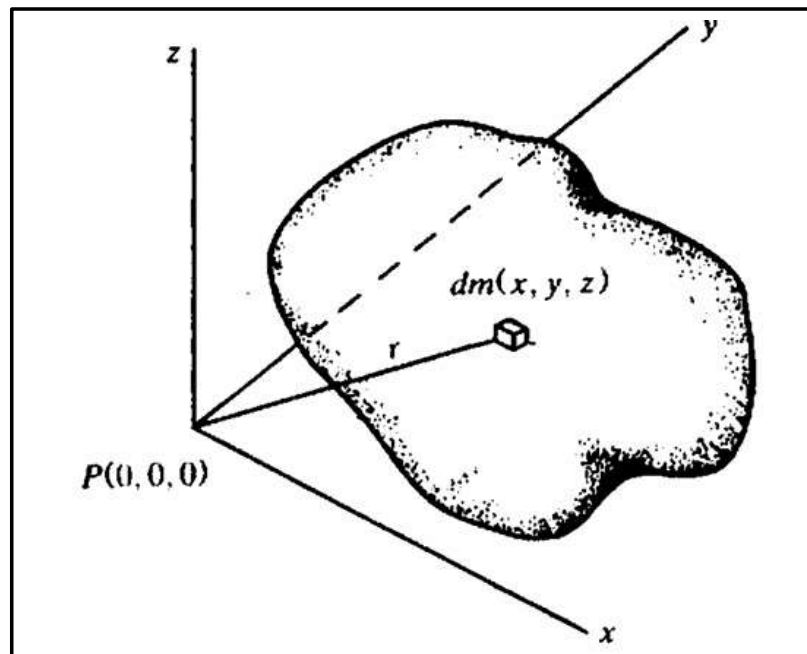
Potensial gayaberat merupakan energi yang dibutuhkan untuk memindahkan massa dari lokasi satu ke lokasi lainnya. Keberadaan massa pada suatu lokasi akan menghasilkan medan potensial pada area sekelilingnya. Medan potensial ini sifatnya konservatif, sehingga usaha yang dilakukan tidak dipengaruhi oleh jalur perpindahan atau panjangnya lintasan perpindahan, namun hanya bergantung pada oleh posisi awal dan posisi akhir. Apabila massa tersebut dikembalikan ke posisi semula, maka usaha yang dilakukan akan bernilai nol. Dalam kajian fisika, medan potensial tersebut dinyatakan sebagai turunan atau gradien dari suatu potensial skalar sebagaimana dituliskan pada Persamaan 7 (Blakely, 1996) :

$$g = -\nabla U (r) \quad (7)$$

Keterangan :

$g$  : Percepatan gayaberat ( $\text{m/s}^2$ )

$\nabla U$  : Gradien potensial gayaberat ( $\text{m/s}^2$ )



Gambar 8. Potensial dan kuat medan massa 3D (Telford dkk, 1990)

Gambar 8 merupakan ilustrasi dari visual tiga dimensi mengenai potensial dan kuat medan yang ditimbulkan oleh suatu massa. Jika bumi diasumsikan sebagai bola homogen, bermassa massa  $M$  dan berjari-jari  $R$ , maka potensial gayaberat dapat dituliskan dengan Persamaan 8:

$$U(\vec{r}) = \int_{\infty}^r (\nabla U) \cdot d\vec{r} \quad (8)$$

$$\nabla U(\vec{r}) = \frac{F(\vec{r})}{m} = g\vec{r} \quad (9)$$

$$U(\vec{r}) = - \int_{\infty}^r \frac{F}{m} d\vec{r} = - \int_{\infty}^r g \cdot d\vec{r} = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (10)$$

Keterangan :

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

$\nabla U$  : Gradien potensial ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$F(r)$  : Besarnya gayaberat (N)

$m$  : Massa sumber (kg)

$g(r)$  : Percepatan gayaberat ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$G$  : Konstanta gayaberat universal ( $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ )

$r$  : Jarak (m)

Berdasarkan Persamaan 10, besarnya potensial yang ditimbulkan oleh elemen massa  $dm$  pada titik  $(x, y, z)$  dengan jarak  $r$  dari P  $(0, 0, 0)$  dituliskan dengan Persamaan 11:

$$dU = G \frac{dm}{r} = G\rho \frac{dxdydz}{r} \quad (11)$$

Dengan  $\rho(x, y, z)$  adalah densitas dan  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , sehingga diperoleh potensial total dari massa dengan Persamaan 12:

$$U = G \int_x \int_y \int_z \frac{\rho}{r} dx dy dz \quad (12)$$

Karena  $g$  merupakan percepatan gayaberat di sumbu  $z$  (arah vertikal) dengan asumsi  $\rho$  konstan, sehingga didapatkan Persamaan 13:

$$g = \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right) = G \rho \int_x \int_y \int_z \frac{z}{r^3} dx dy dz \quad (13)$$

Keterangan :

$g$  : Percepatan gayaberat arah vertikal ( $m/s^2$ )

$dU$  : Potensial elemen massa ( $m^2/s^2$ )

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

$dm$  : Elemen massa (m)

$\rho$  : Densitas ( $g/cm^3$ )

$d(x, y, z)$  : Perubahan ke arah sumbu (x, y, dan z)

$G$  : Konstanta gayaberat universal ( $6,67 \times 10^{-11} N m^3 kg^{-1} s^{-2}$ )

$\frac{\partial u}{\partial z}$  : Turunan potensial terhadap arah z

Melalui Persamaan 13, dapat ditentukan besarnya medan gayaberat di permukaan bumi yang menunjukkan variasi antar lokasi. Variasi nilai medan gayaberat bumi ini disebabkan karena pengaruh penyebaran massa di bawah permukaan, yang diwakili oleh fungsi densitas ( $\rho$ ). Sementara itu, kondisi nyata permukaan bumi direpresentasikan oleh batas-batas integral dalam persamaan tersebut (Sarkowi, 2007).

### 3.5 Densitas Batuan Rata-rata

Menurut Ridha & Darminto (2016), densitas atau rapat massa batuan adalah sifat fisik yang menunjukkan seberapa rapat susunan material penyusun batuan.

besarnya densitas atau rapat massa batuan ditentukan oleh jenis mineral, tingkat porositas dan juga fluida yang mengisi pori-pori batuan tersebut. Pada proses pengolahan data gayaberasat, untuk menemukan nilai anomali Bouguer memerlukan nilai densitas rata-rata. Maka dari itu, penting untuk kita mengetahui nilai densitas.

Tabel 4 menyajikan variasi densitas menurut Telford dkk (1990):

Tabel 4. Nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Rata-rata (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Batuan Sedimen</b>		
<i>Overburden</i>		1,92
Tanah	1,20-2,40	1,92
Lempung	1,63-2,60	2,21
Kerikil	1,70-2,40	2,00
Pasir	1,70-2,30	2,00
Batupasir	1,61-2,76	2,35
Serpih	1,77-3,20	2,40
Batugamping	1,93-2,90	2,55
Dolomit	2,28-2,90	2,70
<i>Loess</i>	1,40-1,93	1,64
Lanau	1,80-2,20	1,93
Batu kapur	1,53-2,60	2,01
Halit	2,10-2,60	2,22
<i>Glacier Ice</i>	0,88-0,92	0,90
<b>Batuan Beku</b>		
Riolit	2,35-2,70	2,52
Andesit	2,40-2,80	2,61
Granit	2,50-2,81	2,64
Granodiorit	2,67-2,79	2,73
Porpiri	2,60-2,89	2,74
Kuarsa diorit	2,62-2,96	2,79
Diorit	2,72-2,99	2,85
Lava	2,80-3,00	2,90
Diabas	2,50-3,20	2,91

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Rata-rata (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Batuan Beku</b>		
Basal	2,70-3,30	2,99
Gabro	2,70-3,50	3,03
Periodit	2,78-3,37	3,15
Syenit	2,60-2,95	2,77
Batuan beku asam	2,30-3,11	2,61
Batuan beku basa	2,09-3,17	2,79
<b>Batuan Metamorf</b>		
<i>Quartzite</i>	2,50-2,70	2,60
Sekis	2,39-2,90	2,64
Grawak	2,60-2,70	2,65
Marmer	2,60-2,90	2,75
<i>Serpentine</i>	2,40-3,10	2,78
Batusabak	2,70-2,90	2,79
<i>Gneiss</i>	2,59-3,00	2,80
Ampfibolit	2,90-3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,20-3,54	3,37
Filit	2,68-2,80	2,74
<i>Granulite</i>	2,52-2,70	2,65

### 3.6 Koreksi- koreksi Data Gayaberat

Anomali gayaberat merupakan perbedaan antara hasil pengukuran gayaberat di lapangan dengan nilai acuan referensi. Secara teoritis, bentuk bumi sering diasumsikan bulat sempurna, bersifat homogen, dan tidak berotasi. Namun dalam kondisi nyata, bentuk bumi tidak benar-benar bulat, melainkan sedikit pepat di bagian kutub (berbentuk ellipsoid). Permukaan bumi juga tidak rata, susunan material di dalamnya tidak seragam, dan densitasnya berbeda-beda di tiap tempat. Selain itu, gaya gravitasi dari benda langit seperti bulan dan matahari ikut memengaruhi, dan rotasi bumi membuat nilai percepatan gayaberat di permukaan tidak seragam dan berbeda-beda di setiap lokasi. Menurut Telford dkk (1990),

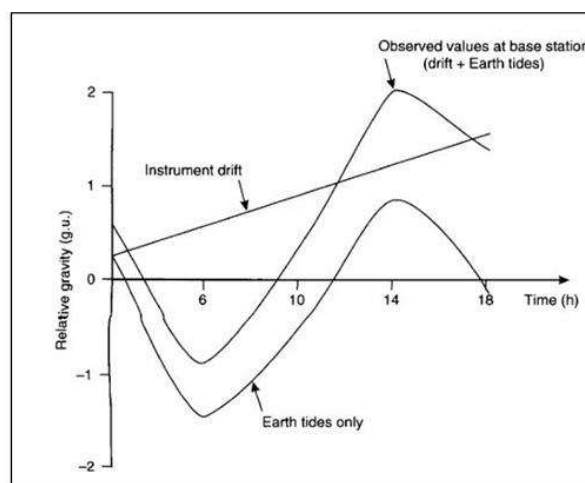
variasi nilai gayaberat di permukaan bumi dipengaruhi oleh lima faktor utama, di antaranya adalah:

1. Ketinggian
2. Pasang surut
3. Lintang
4. Topografi
5. Perbedaan densitas bawah permukaan

Dalam pengolahan data gayaberat, ada beberapa koreksi yang perlu dilakukan agar pengaruh gangguan atau noise dari fenomena alami yang ditimbulkan dari pengukuran atau pengambilan data gayaberat. Koreksi-koreksi ini perlu dilakukan agar hasil akhirnya lebih akurat dan benar-benar mencerminkan kondisi bawah permukaan. Secara umum, pengolahan data gayaberat melibatkan koreksi-koreksi, di antaranya sebagai berikut:

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

Koreksi pasang surut (*tide correction*) adalah sebuah koreksi yang diterapkan dalam pengolahan data gayaberat yang bertujuan untuk mengeliminasi efek tarikan gravitasi bulan dan matahari terhadap bumi. Tarikan kedua benda langit ini bisa membuat permukaan laut naik-turun dan menimbulkan deformasi kecil pada kerak bumi (*earth distortion*). Oleh karena itu, koreksi pasang surut perlu diperlukan agar nilai pengukuran kembali mewakili kondisi normal bumi (Susanti dkk., 2022).



Gambar 9. Pengaruh pasang surut bumi dan *drift instrument* terhadap gravitasi (Reynolds, 1997)

Gambar 9 memperlihatkan kurva variasi gravitasi relatif terhadap waktu di stasiun dasar pengukuran. Kurva ini memperlihatkan komponen pasang surut bumi (*earth tides*) yang bersifat periodik serta *drift instrument* berupa pergeseran nol alat secara linear terhadap waktu. Nilai observasi yang terukur di stasiun adalah kombinasi antara efek pasang surut dan *drift instrument* yang perlu dikoreksi untuk mendapatkan nilai gravitasi yang akurat.

Nilai dari koreksi pasang surut juga berubah-ubah secara berkala sejalan mengikuti pergeseran posisi bulan dan matahari relatif terhadap bumi. Dalam pengolahan data gayaberat, nilai koreksi ini diterapkan untuk mengeliminasi pengaruh pasang surut terhadap data pengamatan. Secara matematis, koreksi pasang surut didasarkan pada Persamaan 14 (Longman, 1959):

$$Tide = G(r) + \left[ \left( \frac{c}{R} \right)^3 \left( \sin 2\theta_m + \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{6} \frac{r}{c} \left( \frac{c}{R} \right)^4 (5\cos 3\theta_m + 3\cos \theta_m) \right] \quad (14)$$

Keterangan:

$Tide$  : Nilai koreksi tidal (mGal)

$\theta_m$  : Posisi lintang (radian)

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

$c$  : Jarak rata-rata bumi terhadap bulan (km)

$R$  : Jarak antara pusat bumi ke bulan (km)

$r$  : Radius bumi ke titik P (km)

Koreksi pasang surut diterapkan dengan dengan mencatat nilai gayaberat secara berkala pada stasiun yang sama (*base station*). Data pembacaan gravimeter itu lalu diplot terhadap waktu sehingga terbentuk pola atau persamaan yang bisa dipakai untuk menentukan besar koreksi pasang surut. Kemudian besarnya koreksi pasang surut ini selanjutnya ditambahkan dengan besarnya bacaan gayaberat seperti pada Persamaan 15:

$$g_t = g_{obs} + tidal_{obs} \quad (15)$$

Keterangan:

$g_t$  : Nilai gayaberat terkoreksi pasang surut (mGal)

$g_{obs}$  : Nilai gayaberat bacaan (mGal)

$tidal_{obs}$  : Nilai koreksi tidal (mGal)

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

Koreksi apungan (*drift correction*) merupakan koreksi atau penyesuaian yang bertujuan menghapus pengaruh perubahan kondisi instrumen ukur (gravimeter) terhadap hasil pengukuran. Koreksi ini diperlukan karena pada saat proses pengukuran, gravimeter dapat mengalami guncangan atau getaran yang menyebabkan perubahan pada titik nol pembacaan alat. Akibatnya, nilai gayaberat yang terbaca bisa bergeser. Untuk menghilangkan pengaruh tersebut, pengukuran dilakukan dengan metode *looping*, yakni melakukan pembacaan kembali pada titik acuan (*base station*) dalam satu rangkaian pengukuran, sehingga besar penyimpangan alat dapat ditentukan (Octonovrilna & Pudja, 2009). Pada pengukuran metode gayaberat, kesalahan pembacaan yang berasal dari alat dapat diperbaiki dengan menerapkan koreksi apungan (*drift correction*). Alat yang digunakan di lapangan, seperti gravimeter, bekerja menggunakan sensor pegas. Seiring waktu penggunaan, sifat atau konstanta pegas pada alat tersebut dapat mengalami perubahan, sehingga memengaruhi hasil pembacaan (Telford dkk., 1990). Untuk mencari nilai koreksi apungan pada setiap titik pengukuran digunakan rumus seperti pada Persamaan 16:

$$g_{drift} = \left\{ \frac{(g_{N_{akhir}} - g_{N_{awal}})}{t_{akhir} - t_{awal}} (t_{stasiun} - t_{awal}) \right\} \quad (16)$$

Keterangan:

$g_{drift}$  : Koreksi apungan pada saat pembacaan titik ikat

$g_N$  : Besar gravitasi yang telah dikoreksi pasang surut (mGal)

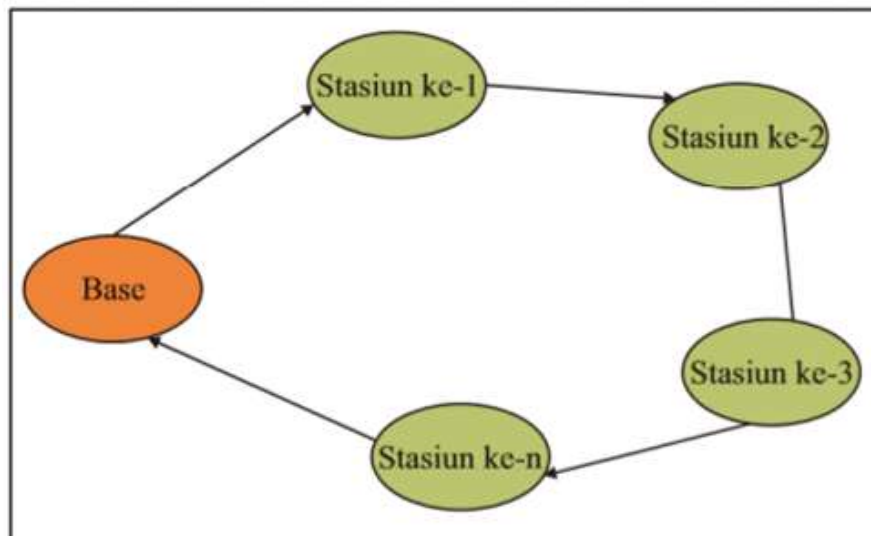
$g_{N_{awal}}$  : Besar  $g_N$  pada stasiun awal dalam satu *looping* (mGal)

$g_{N_{akhir}}$  : Besar  $g_N$  pada stasiun terakhir (mGal)

$t_{awal}$  : Waktu pembacaan di stasiun awal

$t_{akhir}$  : Waktu pembacaan di stasiun akhir

$t_{stasiun}$  : Waktu pengukuran stasiun ke-n, dengan  $n = 1, 2, 3 \dots$  dst (s)



Gambar 10. Skema pengambilan data *gayaberat looping*

Skema pada Gambar 10 menunjukkan alur pengukuran metode *gayaberat* yang dimulai dari stasiun *base*, kemudian dilanjutkan ke stasiun ke-1, stasiun ke 2, hingga stasiun ke-n, sebelum akhirnya kembali lagi ke stasiun *base*. Pola ini digunakan untuk meminimalkan kesalahan akibat *drift instrument* serta memastikan konsistensi data hasil pengukuran.

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

Koreksi lintang merupakan sebuah koreksi yang ditujukan untuk menghilangkan pengaruh perbedaan jari-jari bumi terhadap nilai *gayaberat*. Hal ini disebabkan karena bentuk bumi tidak benar-benar bulat, melainkan mendekati spheroid. Oleh karena itu, digunakan spheroid referensi sebagai pendekatan bentuk bumi, yaitu ellipsoid yang merepresentasikan muka laut rata-rata (*geoid*) dengan mempertimbangan pengaruh objek di atas permukaan bumi. Menurut Supriyadi dkk (2019), koreksi lintang bertujuan untuk memperoleh nilai *gayaberat* teoritis. Koreksi ini dapat dihitung dengan dua metode, yaitu menggunakan Persamaan IGRF 67 untuk satuan derajat lintang atau Persamaan IGRF 84 untuk satuan radian. IGRF 67

$$g_{\theta} = 978031,8 (1 + 0,0053924 \sin^2 \theta - 0,0000059 \sin^2 2 \theta) \quad (17)$$

IGRF 84

$$g_{\theta} = 978032,7 (1 + 0,0053024 \sin^2 \theta - 0,0000058 \sin^2 2 \theta) \quad (18)$$

Keterangan:

$g_\theta$  : Nilai gayaberat teoritis (mGal)

$\theta$  : Sudut lintang (radian)

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

Koreksi udara bebas (*Free Air Correction*) merupakan sebuah koreksi dalam pengolahan data gayaberat yang bertujuan untuk mencari nilai gravitasi absolut dari suatu titik observasi (Syamsuriadi dkk., 2013). Koreksi ini diterapkan untuk meniadakan pengaruh topografi atau perbedaan elevasi yang memengaruhi pembacaan nilai gayaberat tanpa mempertimbangkan efek massa batuan di antaranya. Dengan demikian, koreksi udara bebas adalah penyesuaian terhadap selisih nilai gayaberat yang terukur pada permukaan laut rata-rata (*mean sea level*) terhadap nilai gayaberat yang terukur pada elevasi  $h$  meter, dengan asumsi tidak terdapat material batuan di antara kedua titik tersebut (Reynolds, 1997). Nilai gayaberat dihitung dengan mengasumsikan bahwa bumi berbentuk ideal berupa spheroid, tidak mengalami rotasi, dan massanya terpusat di bagian inti, sebagaimana dinyatakan oleh Persamaan 19:

$$g_0 = G \frac{M}{R^2} \quad (19)$$

Nilai gayaberat yang diukur stasiun pengamatan dengan ketinggian  $h$  (meter) dari *mean sea level* dituliskan dengan Persamaan 20:

$$g_h = G \frac{M}{(R+h)^2} = g_0 + h \frac{\partial g_0}{\partial R} \quad (21)$$

Selisih nilai gayaberat antara titik yang berada pada *mean sea level* dan titik yang terletak pada ketinggian  $h$  (meter) dinyatakan sebagai koreksi udara bebas (FAC) sebagaimana pada Persamaan 22:

$$FAC = \partial g_f = g_h - g_0 = -\left(\frac{2g_0 h}{R}\right) = 0,3086h \quad (22)$$

Keterangan:

$g_h$  : Nilai gayaberat pada stasiun pengukuran

$g_0$  : 981785 mGal

$R$  : 6371000 meter

$M$  :  $5,97 \times 10^{27}$  kg

$h$  : Ketinggian (m)

$\frac{\partial g_0}{\partial R}$  : Gradien percepatan gayaberat terhadap jari-jari bumi (mGal/m)

Sehingga besarnya anomali pada posisi tersebut dirumuskan pada Persamaan 23 :

$$FAA = g_{obs} - (g_{\varphi} + FAC) \quad (23)$$

Keterangan:

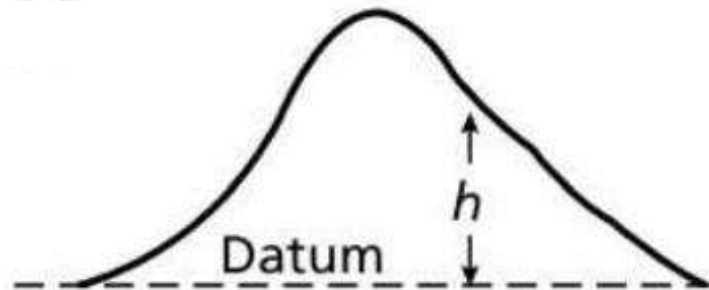
$g_{obs}$  : Besarnya gayaberat observasi (mGal)

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

$FAC$  : *Free Air Correction* (mGal)

$FAA$  : *Free Air Anomaly* (mGal)

Perhitungan nilai koreksi udara bebas bisa dilakukan melalui penjumlahan dan pengurangan. Penambahan pada koreksi udara bebas dilakukan apabila titik pengamatan terletak di atas bidang geoid, karena nilai percepatan gravitasi ( $g$ ) akan berkurang seiring dengan bertambahnya ketinggian ( $h$ ), sehingga diperlukan penambahan koreksi untuk menyesuaikan dengan kondisi di permukaan geoid. Sebaliknya, apabila titik pengamatan berada di bawah bidang geoid, maka koreksi dilakukan dengan cara pengurangan (Bosy, 2016).



Gambar 11. Koreksi udara bebas terhadap Gayaberat (Keary & Brooks, 1991)

Gambar 11 merupakan ilustrasi yang menunjukkan koreksi udara bebas terhadap gayaberat, di mana nilai pengukuran gayaberat pada ketinggian  $h$  di atas datum harus dikoreksi agar setara dengan nilai gayaberat pada permukaan datum.

### 3.6.5 Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Koreksi Bouguer diterapkan untuk mereduksi pengaruh perbedaan elevasi dengan tetap memperhitungkan keberadaan massa batuan di bawah titik pengamatan. Perbedaan elevasi tersebut berpengaruh terhadap besar kecilnya nilai

percepatan gayaberat yang terukur pada suatu titik pengamatan (Liana dkk., 2020). Rahima (2020), menyatakan bahwa perhitungan koreksi bouguer dilakukan dengan mencari nilai gaya tarik gravitasi yang ditimbulkan oleh massa batuan yang dimodelkan sebagai suatu lapisan atau *slab* dengan ketebalan ( $h$ ) dan nilai densitas rata-rata  $\rho$ . Dalam pendekatannya, massa batuan di bawah titik pengamatan diasumsikan sebagai suatu lempeng horizontal yang luasnya tak terbatas yang memiliki ketebalan setara dengan elevasi stasiun pengukuran serta densitas yang seragam. Sehingga besarnya koreksi Bouguer dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 24:

$$BC = 2\pi G\rho h \quad (24)$$

Menurut Brotopuspito (2001), karena nilai  $2\pi G = 0,04191$ , maka nilai *Bouguer Correction* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 25 :

$$BC = 0,04191\rho h \quad (25)$$

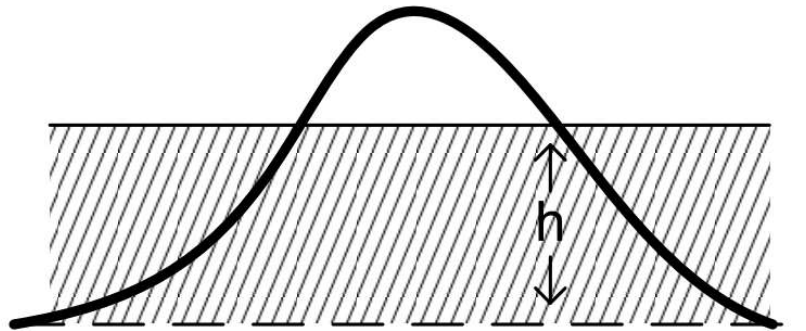
Keterangan:

$BC$  : Besarnya koreksi Bouguer (mGal)

$\rho$  : Densitas batuan rata-rata ( $\text{g/cm}^3$ )

$h$  : ketinggian (m)

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



Gambar 12. Koreksi Bouguer

Gambar 12 menunjukkan skema koreksi Bouguer dalam gravimetri, yaitu bagaimana massa batuan di atas datum dan perbedaan elevasi titik pengukuran mempengaruhi nilai gravitasi yang harus dikoreksi.

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

Koreksi medan (*terrain correction*) adalah sebuah koreksi yang dilakukan untuk menghilangkan pengaruh topografi yang tidak seragam di daerah pengukuran data gayaberat, karena variasi bentuk permukaan seperti bukit dan lembah menyebabkan distribusi massa di sekitar titik pengamatan menjadi tidak teratur dan memengaruhi hasil pengukuran gayaberat. Dalam pengolahan data gayaberat, perhitungan koreksi bouguer didasarkan pada asumsi bahwa titik pengukuran terletak pada permukaan yang rata dan luas. Akan tetapi, pada kondisi lapangan yang sebenarnya, topografi di sekitar titik pengukuran umumnya bervariasi. Oleh karena itu, untuk mengoreksi pengaruh variasi topografi tersebut terhadap nilai gayaberat terukur, dilakukan koreksi topografi yang dikenal sebagai koreksi medan (Sugita dkk., 2020). Besarnya koreksi medan dapat dituliskan seperti pada Persamaan 26:

$$TC = \frac{0,04193}{n} \rho(r_2 - r_1) + \left( \sqrt{r_2^2 - z^2} \right) - \left( \sqrt{r_1^2 - z^2} \right) \text{ mGal} \quad (27)$$

Keterangan :

$TC$	: <i>Terrain Correction</i> (mGal)
$n$	: Banyaknya bagian pada setiap zona
$\rho$	: Nilai Densitas batuan ( $\text{g/cm}^3$ )
$r_1$ dan $r_2$	: Jari-jari luar dan dalam (m)
$z$	: Perbedaan ketinggian terhadap titik pengamatan (m)

### 3.7 Anomali Bouguer

Anomali Bouguer merupakan perbedaan antara nilai gayaberat teramati (*gobs*) dengan gayaberat teoritis (*gn*) atau bisa juga dipahami sebagai hasil penjumlahan dari koreksi-koreksi pada gayaberat. Selisih tersebut menggambarkan adanya variasi densitas daerah pengukuran dengan daerah sekitarnya dalam arah lateral ataupun vertikal. Nilai anomali positif menunjukkan kontras densitas besar di bawah permukaan, nilai anomali positif dominan ditemukan di survey dasar samudera. Sedangkan nilai anomali negatif mengindikasikan perbedaan densitas yang kecil, biasanya ditemukan di survey darat (Hardiansyah, 2016).

Metode gayaberat memiliki tujuan untuk menggambarkan kondisi di bawah permukaan dengan melihat perbedaan densitas batuan (Hinze, 2013). Setelah data

hasil pengukuran diberi berbagai koreksi, data tersebut dapat digunakan untuk menghitung anomaly percepatan gravitasi (Blakely, 1996). Nilai Anomali Bouguer sederhana (*simple Bouguer anomaly*) diperoleh dengan cara mengurangi nilai anomali udara bebas (*free air anomaly*) dengan koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*) seperti pada Persamaan 28:

$$SBA = FAA - BC \quad (28)$$

Keterangan:

*FAA* : Nilai koreksi udara bebas (mGal)

*BC* : Nilai koreksi bouguer (mGal)

*SBA* : Nilai anomali bouguer sederhana (mGal)

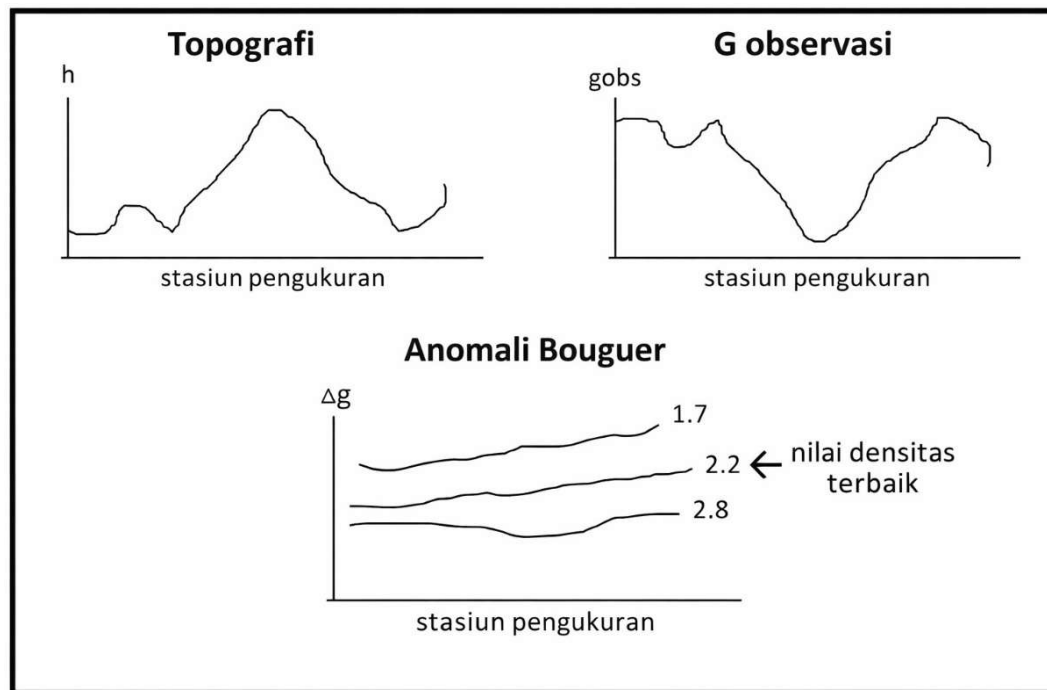
### 3.8 Estimasi Densitas Rata-rata Bawah Permukaan

Densitas atau rapat massa didefinisikan sebagai jumlah yang terkandung dalam suatu unit volume. Pada proses pengolahan data gayaberat, untuk menemukan nilai anomali Bouguer memerlukan nilai densitas rata-rata. berikut merupakan metode dalam menghitung nilai densitas rata-rata.

#### 3.8.1 Metode Nettleton

Metode estimasi densitas Nettleton merupakan sebuah metode yang digunakan untuk memperkirakan nilai densitas batuan di bawah permukaan. Metode ini berlandaskan pada analisis hasil perhitungan koreksi Bouguer dan koreksi medan yang disajikan dalam bentuk grafik. Apabila nilai densitas yang dipakai sesuai dengan densitas batuan di bawah permukaan, maka akan menghasilkan profil anomali gayaberat yang tampak lebih halus. Nilai densitas yang dianggap tepat akan diperoleh jika nilai anomali gayaberatnya tidak berkorelasi dengan topografi wilayah tersebut (Reynolds, 1997). Dalam praktiknya, metode ini diterapkan dengan melakukan *plotting* pada anomali Bouguer dengan beberapa variasi densitas lalu membandingkannya dengan profil topografi. Nilai densitas yang menghasilkan korelasi yang paling minimum terhadap topografi merupakan nilai densitas yang dianggap paling representatif. Prinsip dasar metode Nettleton adalah hubungan antara koreksi Bouguer dan koreksi medan, yakni penggunaan nilai densitas yang sesuai dengan densitas batuan di bawah permukaan

akan menghasilkan penampang anomali gayaberat yang lebih mulus (*smooth*) (Rohadi & Darsono, 2015). Gambar 13 merupakan ilustrasi estimasi densitas menggunakan metode Nettleton menurut Telford dkk (1990). Gambar ini menunjukkan bahwa data gayaberat lapangan dipengaruhi oleh bentuk topografi, sehingga perlu dikoreksi untuk mendapatkan nilai anomali Bouguer yang merepresentasikan kondisi di bawah permukaan yang sebenarnya.



Gambar 13. Estimasi nilai densitas menggunakan metode Nettleton (Telford dkk., 1990)

### 3.9 Anomali Bouguer Lengkap

Anomali Bouguer Lengkap (*Complete Bouguer Anomaly*) merupakan nilai anomali gayaberat yang telah melewati berbagai tahap koreksi data gayaberat, sehingga variasi nilai anomali percepatan gayaberat yang didapatkan hanya dipengaruhi oleh perbedaan densitas batuan penyusun di bawah permukaan bumi. Koreksi-koreksi yang dilakukan meliputi koreksi lintang, koreksi pasang surut, koreksi udara bebas, koreksi medan dan koreksi Bouguer. Dengan kata lain, Anomali Bouguer Lengkap dapat dipahami sebagai selisih antara gayaberat yang diukur di lapangan dengan gayaberat teoritis pada titik tersebut (Liana dkk., 2020).

Untuk mencari nilai anomali Bouguer lengkap atau *Complete Bouguer Anomaly* adalah dengan menjumlahkan nilai anomali Bouguer sederhana atau

*Simple Bouguer Anomaly* dan koreksi medan atau *Terrain Correction* seperti pada Persamaan 29:

$$CBA = SBA + TC \quad (29)$$

Keterangan:

*CBA* : Nilai anomali Bouguer lengkap (mGal)

*SBA* : Nilai anomali bouguer sederhana (mGal)

*TC* : Nilai koreksi medan (mGal)

### 3.10 Analisis Spektrum

Analisis spektrum merupakan sebuah teknik dalam memperhitungkan kedalaman dari anomali. Metode ini berprinsip pada transformasi *Fourier*, yakni bekerja dengan cara mengonversi data dari domain jarak, ruang ataupun waktu ke domain frekuensi atau bilangan gelombang. Pada grafik hasil analisis spektrum, nilai gradien berkaitan dengan kedalaman sumber anomali. Nilai gradien yang lebih besar biasanya merepresentasikan anomali regional dan gradien yang relatif kecil merepresentasikan sumber yang lebih dangkal (anomali residual) (Apriani, 2017).

Analisis spektrum digunakan untuk mengetahui respons anomali yang bersumber dari komponen regional, residual atau *noise* (Nursalam 2021). Hasilnya bisa dimanfaatkan untuk menentukan nilai lebar jendela saat melakukan *filtering* anomali serta untuk menentukan ukuran jendela saat melakukan filtering anomali serta untuk membedakan batas antara anomali regional dan residual. Transformasi *Fourier* sendiri bekerja dengan memecah suatu gelombang yang kompleks menjadi kumpulan gelombang sinus tersebut digabungkan kembali, bentuknya akan mendekati gelombang awal (Kadir, 2000). Persamaan transformasi Fourier dituliskan dengan Persamaan 30 dan 31 berikut:

$$F(U) = G\Delta\rho F\left(\frac{1}{r}\right) \quad (30)$$

$$F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (31)$$

Berdasarkan persamaan di atas, maka didapatkan Persamaan 32:

$$F(U) = 2\pi G\Delta\rho \frac{e^{|k|(z_0-z)}}{|k|} \quad (32)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, diperoleh persamaan transformasi Fourier dari anomali gayaberat pada Persamaan 33 sebagai berikut:

$$F(g_z) = 1G\Delta\rho F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) = G\Delta\rho \frac{\partial}{\partial z} F \frac{1}{r} \quad (33)$$

Diperoleh persamaannya menjadi seperti pada Persamaan 34:

$$F(g_z) = 2\pi G\Delta\rho e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (34)$$

Keterangan :

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

$G$  : Konstanta gayaberat universal ( $6,672 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$ )

$\Delta\rho$  : Perbedaan densitas ( $\text{g/cm}^3$ )

$r$  : Jarak (m)

$k$  : Bilangan gelombang (rad/m)

$z_0$  : Ketinggian titik amat (m)

$z_1$  : Kedalaman benda anomali (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  $z$

Melalui penerapan transformasi Fourier terhadap data anomali gayaberat sepanjang lintasan yang akan diestimasi kedalamannya, dapat diperoleh nilai bilangan gelombang ( $k$ ) serta nilai amplitudo ( $A$ ). Selanjutnya kedua nilai tersebut akan dimanfaatkan untuk mengetahui nilai lebar jendela, yang kemudian digunakan sebagai nilai *input* pada saat proses penyaringan (*filtering*) guna memisahkan anomali regional serta anomali residual). Apabila sebaran densitas bersifat acak dan tidak terdapat hubungan (korelasi) antar nilai gayaberat pada tiap titik, maka  $2\pi\gamma\mu = 1$ . Dengan asumsi tersebut, maka persamaan transformasi Fourier untuk anomali gayaberat dituliskan dengan Persamaan 35:

$$A = Ce^{|k|(z_0 - z_1)} \quad (35)$$

Keterangan:

$A$  : Amplitudo

$C$  : Konstanta

$k$  : Bilangan gelombang (rad/m)

$z$  : Kedalaman (m)

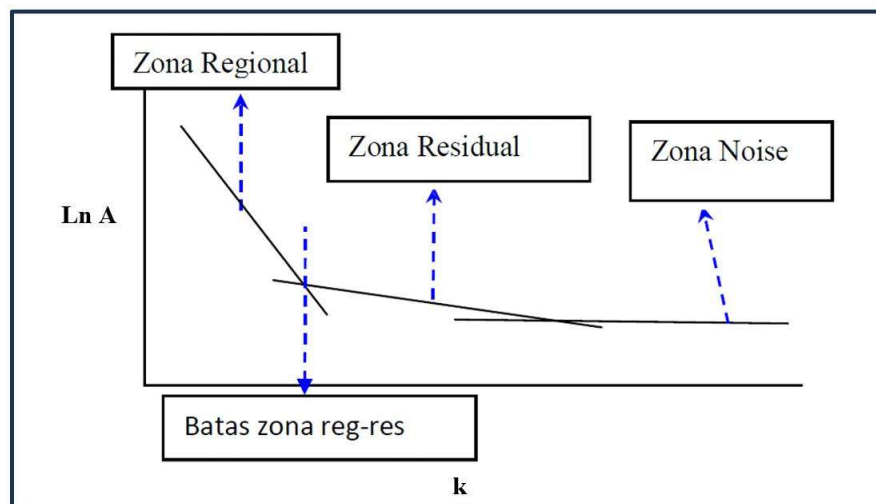
Besarnya estimasi nilai lebar jendela dapat diketahui dengan menerapkan algoritma pada spektrum amplitudo yang diperoleh berdasarkan persamaan sebelumnya. Proses tersebut akan menghasilkan hubungan linier yang ditampilkan sebagai garis lurus pada Gambar 14, dimana komponen bilangan gelombang ( $k$ ) akan berbanding lurus dengan spektrum amplitudonya, seperti Persamaan 36:

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (36)$$

Persamaan 36 dapat diibaratkan dengan rumus garis lurus seperti pada Persamaan 37:

$$y = mx + c \quad (37)$$

$\ln A$  diposisikan sebagai sumbu vertikal ( $y$ ), dan  $|k|$  sebagai sumbu horizontal ( $x$ ), serta kemiringan garis lurus (gradien) yang terbentuk dari hubungan tersebut direpresentasikan oleh selisih kedalaman ( $z_0 - z_1$ ). Pembagian zona anomali dengan grafik Ln terhadap K disajikan pada Gambar 14.



Gambar 14. Pembagian zona anomali dengan grafik Ln vs K (Blakely, 1996)

Gambar 14 menyajikan pemisahan komponen data berdasarkan domain frekuensi (bilangan gelombang  $k$ ), sebagaimana kurva  $\ln A$  terhadap  $k$  dibagi menjadi tiga zona yakni zona regional (frekuensi rendah) yang merepresentasikan struktur dalam dan luas, zona residual (frekuensi menengah) yang mencerminkan anomali lokak, serta zona *noise* (frekuensi tinggi) yang didominasi oleh gangguan.

### 3.11 Filter *Moving Average*

*Moving Average* adalah filter yang merata-ratakan nilai yang berdekatan dengan rentang yang diatur oleh sebuah *window*. Beberapa nilai dari sebuah *window* akan menjadi sebuah nilai yang terata-ratakan dan kemudian bergerak ke *data point* selanjutnya, dan mengulangi langkah serupa (Yufajjiru dkk., 2020). Secara matematis, perhitungan *moving average* dituliskan pada Persamaan 38:

$$\Delta g_{reg}(i) = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (38)$$

Keterangan:

$i$  : Nomor stasiun

$n$  :  $\frac{N-1}{2}$

$N$  : Lebar jendela

$\Delta g_{reg}$  : Besarnya anomali regional

Dalam pemisahan anomali regional dan residual menggunakan filter *moving average*, lebar jendela menjadi sebuah hal yang perlu diperhatikan. Dalam menentukan nilai lebar jendela, nilai bilangan gelombang *cut off* yang dihasilkan oleh analisis spektrum merupakan *input* dari perhitungan dalam mempertimbangkan nilai lebar jendela (*window*) (Setiadi dkk., 2010). Nilai lebar jendela pada pemisahan anomali regional dan residual diperoleh melalui Persamaan 39:

$$N = \frac{2\pi}{k_c - \Delta x} \quad (39)$$

Keterangan:

$N$  : Nilai lebar jendela

$\Delta x$  : Besarnya spasi pengukuran

$k_c$  : Nilai *cut off*

Sementara penerapan metode *moving average* pada peta dua dimensi, nilai pada suatu titik dapat diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata seluruh nilai yang berada dalam sebuah jendela berbentuk persegi, di mana titik yang dihitung terletak sebagai pusat jendela tersebut. Sebagai contoh, pada *moving average* dengan lebar jendela 3, maka nilai anomali regional didapatkan dengan Persamaan 40:

$$\Delta g_{reg} = \frac{1}{9} \sum_{N=1}^9 \Delta g(n) \quad (40)$$

Setelah didapatkan  $\Delta g_{reg}$  Maka  $\Delta g_{res}$  dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 41:

$$\Delta g_{residual} = \Delta ABL - \Delta g_{reg} \quad (41)$$

Keterangan:

$\Delta g_{residual}$  : Nilai anomali residual

$\Delta ABL$  : Nilai anomali Bouguer lengkap

$\Delta g_{reg}$  : Nilai anomali regional

Hasil dari pemisahan anomali regional dan residual menggunakan filter *moving average* dimanfaatkan sebagai dasar dalam pembuatan model geologi bawah permukaan. Penentuan nilai lebar jendela (*window*) berperan penting karena digunakan dalam menentukan kedalaman anomali regional (dalam) dan kedalaman anomali residual (dangkal) (Telford dkk., 1976). Menurut Nugraha (2016), filter *moving average* merupakan sebuah filter dalam pemisahan anomali regional dan residual yang biasanya dimanfaatkan dalam filter *Digital Signal Processing* (DSP). *Moving average* dikenal karena cara kerjanya sederhana dan mudah diterapkan. Pada pengolahan anomali Bouguer, *output* yang dihasilkan dari filter ini berupa nilai anomali regional. Prinsip kerja filter ini dilakukan dengan merata-ratakan sejumlah data yang dimasukkan dalam rentang waktu tertentu, kemudian memperoleh hasil dalam bentuk batas dari nilai keluaran. Adapun persamaannya adalah sebagai Persamaan 42:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i-j] \quad (42)$$

Keterangan:

$y[i]$  : Nilai output sinyal

$M$  : Lebar jendela

$x[i-j]$  : Nilai input sinyal

### 3.12 Analisis Derivative

#### 3.12.1 First Horizontal Derivative (FHD)

*First Horizontal Derivative* (FHD) atau turunan pertama horizontal (*horizontal gradient*) merupakan sebuah metode yang dapat dipakai untuk mendapatkan informasi mengenai batas kontak batuan (Rosid & Siregar, 2017). Metode ini menghasilkan pola khas berupa nilai tertinggi (maksimum) atau terendah (minimum) yang berada tepat di batas luar objek penyebab anomali. Nilai dari *First Horizontal Derivative* ini dapat diketahui dengan melakukan perhitungan langsung menggunakan rumus pada Persamaan 43 berikut (Blakely, 1996):

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial y}\right)^2} \quad (43)$$

Keterangan:

*FHD* : Nilai *First Horizontal Derivative* (mGal/m)

$\Delta g$  : Nilai anomali Bouguer (mGal)

$\frac{\partial \Delta g}{\partial x}$  : Turunan pertama perubahan nilai gravitasi pada arah x (mGal/m)

$\frac{\partial \Delta g}{\partial y}$  : Turunan pertama perubahan nilai gravitasi pada arah y (mGal/m)

#### 3.12.2 Second Vertical Derivative (SVD)

Elkins pada tahun 1951 mengembangkan metode *Second Vertical Derivative* yang berfungsi untuk menghitung nilai gravitasi pada permukaan bumi yang diasumsikan sebagai bidang horizontal pada tanah yaitu kedalaman  $z = 0$  (Sari, 2012). *Second Vertikal Derivative* (SVD) merupakan turunan kedua horizontal (*horizontal gradient*) yang dapat memberi gambaran mengenai suatu anomali residual (sisa) yang berkaitan dengan struktur yang dangkal serta biasa digunakan untuk identifikasi struktur geologi patahan yang ditandai dengan nilai nol (0) (Safira dkk, 2024). Nilai SVD dapat diperoleh melalui perhitungan turunan FHD karena medan potensial gayaberat mengikuti persamaan *Laplace* yang dirumuskan pada Persamaan 44 (Blakely, 1996):

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (44)$$

atau

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (45)$$

Sehingga nilai *Second Vertical Derivative* (SVD) dirumuskan dalam Persamaan 46:

$$SVD = \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left( \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} \right) \quad (46)$$

Selanjutnya, persamaan untuk data 1-D (data penampang) diperoleh Persamaan 47:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left[ \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right] \quad (47)$$

Keterangan:

$\nabla^2$  : Operator *Laplace*

$\Delta g$  : Nilai anomali Bouguer (mGal)

$\partial y$  : Nilai turunan sumbu y (mGal/m)

$\partial x$  : Nilai turunan sumbu x (mGal/m)

$\partial z$  : Nilai turunan sumbu z (mGal/m)

Persamaan 47 menjelaskan bahwa SVD anomali gayaberat pada permukaan bumi yaitu setara dengan negatif dari turunan orde dua horizontal. Sementara nilai nol pada turunan kedua anomali Bouguer dipahami sebagai kontak atau batas antara batuan dengan densitas yang berbeda, hal ini mengindikasikan adanya patahan atau intrusi (Sarkowi, 2010). Terdapat beberapa operator filter SVD yang dijabarkan pada Tabel 5, Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 5. Operator Filter SVD (Henderson & Zietz, 1949)

<b>Henderson &amp; Zietz (1949)</b>				
0,0000	0,0000	-0,0833	0,0000	0,0000
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
-0,0833	-2,6667	17,0000	-2,6667	-0,0833
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0833	0,0000	0,0000

Tabel 6. Operator Filter SVD (Elkins, 1951)

<b>Elkins (1951)</b>				
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000
-0,0833	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,0000	-0,0334	1,0668	-0,0334	0,0000
-0,0833	-0,6667	-0,0334	-0,6667	-0,0833
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000

Tabel 7. Operator Filter SVD (Rosenbach, 1953)

<b>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

Untuk mengetahui jenis sesar (patahan), yakni apakah termasuk jenis patahan normal atau patahan naik dapat diidentifikasi dari nilai absolut  $SVD_{min}$  dan nilai absolut  $SVD_{max}$ . Proses penentuan jenis patahan ini menggunakan prinsip yang telah ditetapkan sebagai berikut (Zaenudin & Yulistina, 2018) :

1. Apabila nilai  $|SVD|$  minimum lebih kecil daripada  $|SVD|$  maksimum, maka jenis sesar diidentifikasi sebagai sesar normal atau sesar turun
2. Apabila nilai  $|SVD|$  minimum lebih besar daripada nilai  $|SVD|$  maksimum, maka jenis sesar diidentifikasi sebagai sesar naik.
3. Apabila nilai  $|SVD|$  minimum sama dengan  $|SVD|$  maksimum, maka jenis sesar diidentifikasi sebagai sesar mendatar.

### 3.13 Pemodelan Inversi 3 Dimensi

Inversi adalah perhitungan matematis untuk mengetahui informasi dari sistem yang didasarkan pada kecocokan data hitungan dengan data observasi. Dalam proses inversi, data lapangan dianalisis dengan mencocokkan kurva antara hasil perhitungan model matematika dan data hasil pengukuran di lapangan. Proses

ini bertujuan untuk memperkirakan parameter fisik batuan yang sebelumnya belum diketahui (*unknown parameter*) (Suhadiyatno, 2007). Hubungan antara data dengan parameter model dinyatakan sebagai matriks pada Persamaan 48

$$d = Gm \quad (48)$$

Dimana  $d$  adalah vektor data pengamatan,  $G$  adalah matriks kernel, dan  $m$  adalah vektor model yang merepresentasikan distribusi densitas bawah permukaan. Proses inversi pada data gayaberasat dilakukan untuk melihat sebaran densitas bawah permukaan, sehingga menggambarkan variasi densitas dan membantu memperkirakan parameter fisik batuan. Proses inversi dilakukan dengan mencocokkan kurva antara data lapangan dan hasil perhitungan model. Pada tahap pemodelan, mesh dan data anomali sisa dimasukkan untuk membuat model 3D. Selanjutnya, tahap analisis dipakai untuk mengenali reservoir, sumber panas, dan sesar guna memastikan kondisi strukturnya. Pembuatan model inversi 3D memerlukan pengaturan grid yang teliti dan dapat dikombinasikan dengan data atau metode pengukuran lain (Rasimeng dkk., 2024).

## IV. METODOLOGI PENELITIAN

### 4.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu dan tempat pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Waktu : Januari 2026-April 2026
- Tempat : Laboratorium Geofisika Geothermal, Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
- Alamat : Jalan Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142

### 4.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini dirincikan pada tabel 8.

Tabel 8. Alat dan bahan

No	Alat dan Bahan	Fungsi/Sumber
1	Data Gayaberat	Data yang digunakan adalah data sekunder berupa data pengukuran langsung yang diberikan oleh Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) dengan jumlah 195 data
2	<i>Soft file</i> Peta Lembar Geologi	Sebagai acuan geologi daerah penelitian, digitasi struktur dan korelasi dengan analisis <i>derivative</i> dan pemodelan 3D gayaberat
3	<i>Software</i> ArcGis 10.8	<i>Software</i> yang digunakan untuk menyusun peta lokasi penelitian dan peta geologi

No	Alat dan Bahan	Fungsi/Sumber
4	Data DEM SRTM Nusa Tenggara Timur	Referensi peta lokasi penelitian dan peta geologi diunduh pada laman <a href="https://www.indonesia-geospasial.com/2020/01/download-dem-srtm-30-meter-se-indonesia.html">https://www.indonesia-geospasial.com/2020/01/download-dem-srtm-30-meter-se-indonesia.html</a>
5	Data SHP Kabupaten Ende	Referensi peta lokasi penelitian diunduh pada laman <a href="https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/">https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/</a>
6	Laptop	<i>Hardware</i> pengolahan data dan penyusunan tugas akhir
7	<i>Software Global Mapper 26.1</i>	<i>Software</i> yang digunakan untuk mengambil data lokal dan data regional
8	<i>Software Geosoft Oasis Montaj 6.4.2</i>	<i>Software</i> yang digunakan untuk mencari nilai <i>terrain correction</i> (koreksi medan)
9	<i>Software Surfer</i>	<i>Software</i> yang digunakan untuk melakukan pengolahan data gayaberat, membuat lintasan analisis spektrum dan analisis <i>derivative</i>
10	<i>Software Numeri</i>	<i>Software</i> yang digunakan dalam analisis spektrum
11	<i>Microsoft Excel</i>	<i>Software</i> yang digunakan untuk menghitung nilai koreksi data gayaberat dan menghitung Ln A dan k hasil dari analisis spektrum
12	<i>Software Grav3D</i>	<i>Software</i> yang digunakan dalam pengolahan dan pemodelan inversi 3D

#### 4.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilaksanakan dalam penelitian untuk tugas akhir ini dirincikan sebagai berikut:

#### 4.3.1 Studi Literatur

Studi literatur pada penelitian ini dilakukan dari dimulainya penelitian hingga akhir penelitian untuk mendapatkan informasi selengkap-lengkapnyanya yang terkait dengan penelitian. Data-data tersebut di antaranya berupa teori dan konsep dasar yang berkaitan dengan metode yang digunakan dan tinjauan pustaka yang berkaitan dengan penelitian terdahulu yang menggunakan metode yang sama atau di tempat yang sama serta informasi lain yang berkaitan dengan strktur geologi dan stratigrafi daerah penelitian.

#### 4.3.2 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder pengukuran langsung daerah Lesugolo yang diberikan oleh Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP), data DEM SRTM, data SHP area penelitian, Peta Geologi Daerah Panas bumi Lesugolo karya Tim Penyelidikan Geologi, Geokimia dan Geofisika Terpadu PSDG tahun 2002.

#### 4.3.3 Koreksi Data Gayaberat

Tahapan pengolahan koreksi data gayaberat dalam penelitian ini dilakukan untuk mendapat nilai Anomali Bouguer lengkap dari data penelitian. Koreksi yang dilakukan pada pengolahan data gayaberat ini meliputi koreksi lintang, kemudian dilanjutkan dengan koreksi *drift* (koreksi bacaan alat). Setelah itu dilakukan *gravity correction* untuk mendapatkan nilai gayaberat observasi. Kemudian dilanjutkan dengan mencari nilai *Latitude Radians* untuk mendapatkan gayaberat normal sehingga didapatkan nilai koreksi udara bebas. Koreksi udara bebas dilakukan untuk menghilangkan pengaruh ketinggian titik pengukuran di atas permukaan laut. Selanjutnya dilakukan koreksi medan untuk menghilangkan perbedaan topografi. Kemudian dilakukan koreksi bouguer guna mengeliminasi pengaruh massa batuan di antara titik pengukuran dan permukaan referensi. Pada koreksi ini digunakan asumsi densitas rata-rata batuan sebesar  $2,54 \text{ g/cm}^3$  sebagai hasil dari perhitungan metode Nettleton yang sudah dirata-ratakan.

#### 4.3.4 Estimasi Densitas Batuan Rata-rata

Densitas didefinisikan sebagai jumlah zat yang terkandung dalam suatu unit. Dalam pengolahan data gayaberat, densitas dibutuhkan dalam proses menentukan nilai *Complete Bouguer Anomaly*. Densitas yang digunakan dalam penelitian ini merupakan rata-rata dari variasi densitas di daerah penelitian. Penentuan densitas rata-rata bawah permukaan dilakukan menggunakan metode Nettleton, yang memanfaatkan hubungan antara anomali gayaberat dan topografi. Prinsip dasar metode ini menyatakan bahwa nilai densitas dianggap benar apabila anomali Bouguer memiliki korelasi minimum atau tidak lagi berkorelasi dengan topografi.

#### 4.3.5 Anomali Bouguer Lengkap

Nilai dari Anomali Bouguer Lengkap (*Complete Bouguer Anomaly*) merupakan nilai anomali gayaberat yang merepresentasikan pola distribusi densitas batuan di bawah permukaan. Anomali ini merupakan hasil dari superposisi kontribusi sumber anomali dalam (regional) dan sumber anomali dangkal (residual) yang muncul akibat pengaruh massa batuan di sekitar dan di bawah area pengukuran. Anomali Bouguer lengkap dihasilkan dari penjumlahan nilai koreksi medan dan anomali Bouguer sederhana.

#### 4.3.6 Analisis Spektrum

Analisis spektrum diterapkan guna memperkirakan kedalaman anomali gayaberat serta menentukan lebar jendela (*window*) yang paling optimal untuk proses penyaringan atau *filtering* pada proses pemisahan anomali regional residual pada daerah penelitian. Analisis spektrum diterapkan dengan cara mentransformasikan Fourier lintasan-lintasan yang telah ditetapkan pada peta kontur Anomali Bouguer lengkap menggunakan *software* Numeri.

#### 4.3.7 Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual

Proses pemisahan anomali regional dan residual pada penelitian ini dilakukan dengan menerapkan filter *moving average*. Metode ini digunakan untuk memisahkan komponen anomali berdasarkan karakteristik frekuensinya yaitu dengan meloloskan sinyal berfrekuensi tinggi (*low pass filter*). Melalui proses

*moving average* diperoleh komponen sinyal berfrekuensi rendah yang telah dibatasi data anomali Bouguer, sehingga dapat menampilkan pola anomali regional.

#### **4.3.8 Analisis Derivative**

Pada penelitian ini, analisis turunan dilakukan dengan menerapkan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan metode *Second Vertical Derivative* (SVD). Metode *First Horizontal Derivative* digunakan untuk memperoleh informasi mengenai nilai puncak maksimum dan minimum pada data anomali untuk melihat batas-batas struktur yang menjadi penyebab adanya anomali. Sementara metode *Second Vertical Derivative* diterapkan untuk memperoleh informasi mengenai keberadaan struktur sekunder di bawah permukaan melalui analisis grafik dan peta anomali SVD. Proses ini dilakukan dengan menggunakan *software* Surfer.

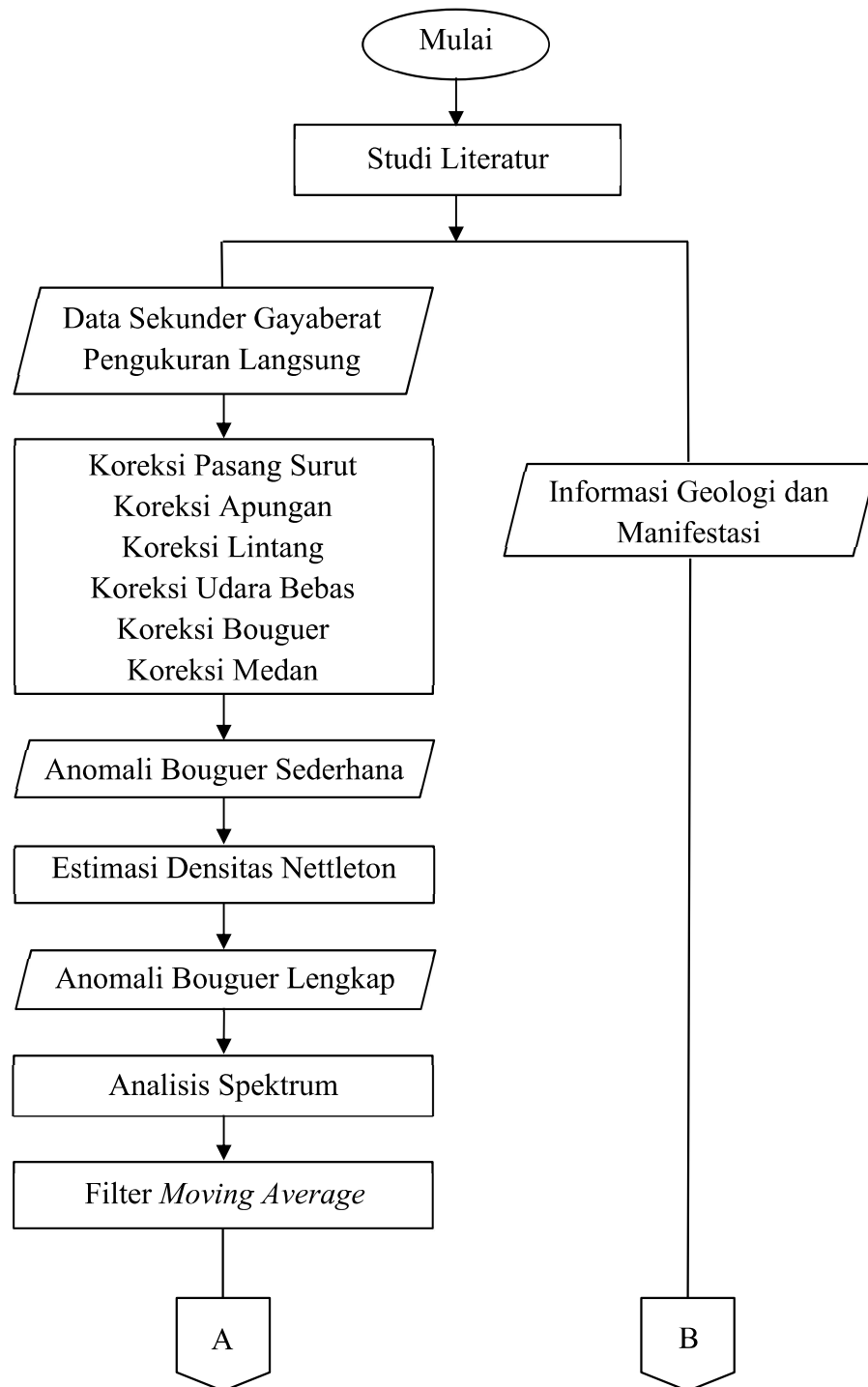
#### **4.3.9 Pemodelan Inversi 3D**

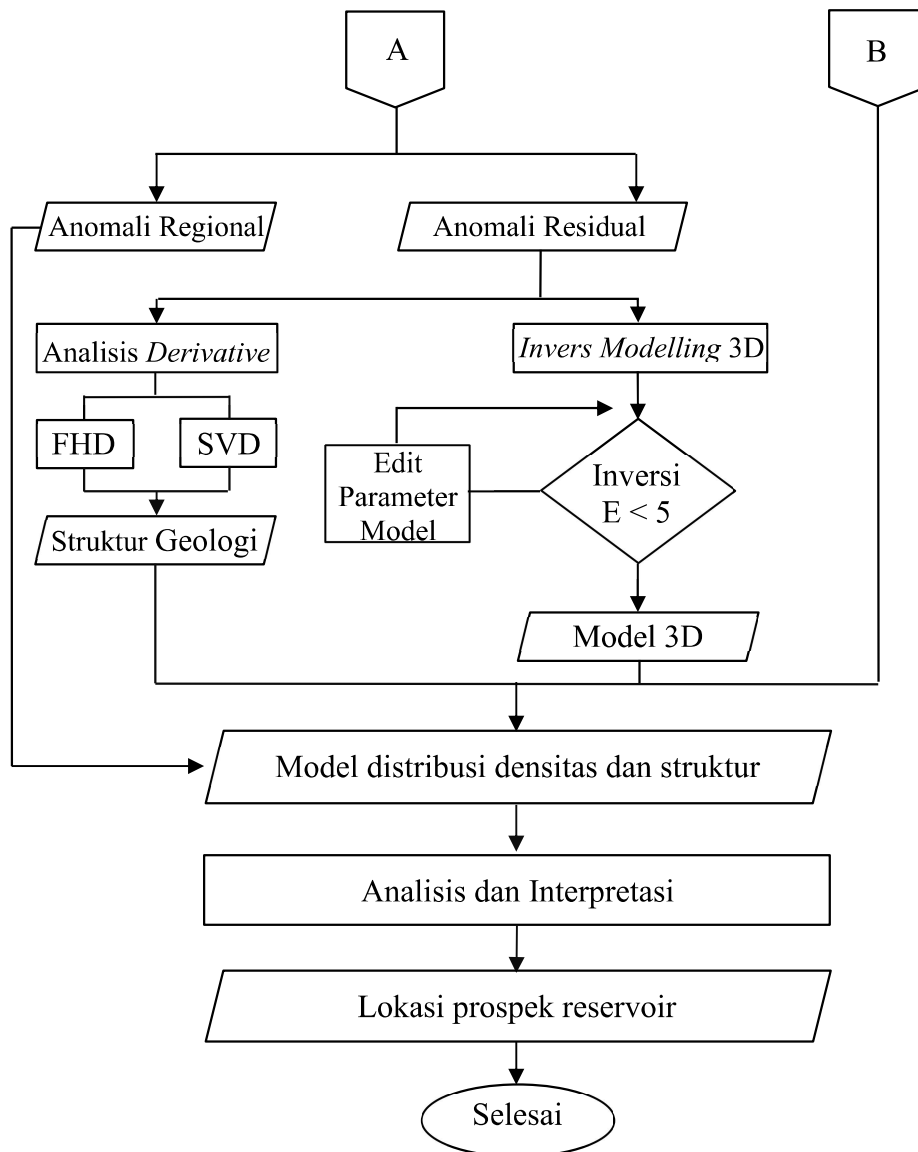
Pemodelan inversi 3D pada penelitian ini digunakan untuk memodelkan persebaran densitas anomali gayaberat sehingga dapat diidentifikasi dimana letak zona reservoir dan sumber panas (*heat source*) yang menjadi bagian dari sistem panas bumi di daerah Lesugolo. Pemodelan inversi 3D pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* Grav3D yang mencakup tiga program yaitu *DataViewer*, *MeshTool3d*, dan *Grav3Dgui*.



#### 4.5 Diagram Alir

Langkah-langkah penelitian ini dirincikan pada diagram alir sebagai berikut:





Gambar 15. Diagram Alir

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data yang telah dijabarkan pada hasil dan pembahasan dalam penelitian ini, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Didapatkan sebaran nilai anomali regional dan anomali residual pada wilayah penelitian, yakni anomali regional yang memiliki rentang nilai mulai dari 102 mGal sampai dengan 121 mGal dan anomali residual yang memiliki rentang nilai -8 mGal sampai dengan 9 mGal. Anomali negatif pada anomali residual diketahui berkaitan dengan indikasi prospek reservoir.
2. Analisis *derivative* pada penelitian ini terbukti efektif untuk mengidentifikasi struktur patahan. Hal ini ditunjukkan oleh sebaran kontur SVD dengan nilai 0 mGal/m<sup>2</sup> yang memiliki kesesuaian dengan pola patahan berdasarkan peta geologi dan studi literatur. Hasil interpretasi mengindikasikan adanya struktur berarah barat daya - timur laut yang memotong lokasi mata air panas Lesugolo. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sesar tersebut berperan sebagai jalur permeabilitas kemunculan mata air panas di daerah penelitian.
3. Diperoleh model distribusi densitas bawah permukaan dari hasil inversi 3D menggunakan data anomali residual, dengan rentang densitas batuan antara 2,0 g/cm<sup>3</sup> hingga 2,9 g/cm<sup>3</sup>. Berdasarkan model tersebut, teridentifikasi zona yang berperan sebagai reservoir yakni pada zona dengan densitas 2,0 g/cm<sup>3</sup> sampai dengan 2,15 g/cm<sup>3</sup> berupa batuan tufa pasir yang mulai teridentifikasi pada kedalaman 350 m sampai dengan 1.500 m di bawah *mean sea level*.

## 6.2 Saran

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa diperlukan penelitian lanjutan dengan mengintegrasikan metode gayaberat dengan metode geofisika lainnya, seperti metode magnetotellurik (MT) atau metode geolistrik, guna memperoleh gambaran kondisi bawah permukaan yang lebih komprehensif. Selain itu, penelitian selanjutnya juga disarankan untuk memperluas cakupan area penelitian agar dapat mencakup zona-zona anomali yang belum terjangkau dalam penelitian ini, sehingga distribusi lateral struktur bawah permukaan dapat dipetakan secara lebih menyeluruh. Pendekatan terpadu ini diharapkan mampu meningkatkan keakuratan dalam mengidentifikasi zona yang diindikasikan sebagai *cap rock* dan menemukan keberadaan sumber panas (*heat source*) sehingga dapat dibuat model konseptual sistem panas bumi yang lebih rinci dan representatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Apriani, M. (2017). *Estimasi Ketebalan Sedimen dengan Analisis Power Spectral pada Data Anomali Gayaberat DKI Jakarta*. Jakarta: Pusat Gempabumi dan Tsunami BMKG.
- Astro, R.B. (2019). Analisis Data Magnetik untuk Mengetahui Struktur Bawah Permukaan Daerah Potensi Panas Bumi Lesugolo Kabupaten Ende. *Tesis*. Institut Teknologi Bandung.
- Badan Informasi Geospasial. (2016). Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS). <https://tanahair.indonesia.go.id>. Diakses pada 16 Februari 2026.
- Badan Informasi Geospasial (2016). Shapefile Geologi Seluruh Indonesia. <https://www.indonesia-geospasial.com>. Diakses pada 16 Februari 2026.
- Basid, A., Andriani, N., & Arfiyaningsih, S. (2014). Pendugaan Reservoir Sistem Panas bumi Dengan Menggunakan Survey Geolistrik, Resistivitas, dan Self Potensial (Studi Kasus: Daerah Manifestasi Panas bumi di Desa Lombang, Kecamatan Batang-Batang, Sumenep). *Jurnal Neutrino*, 7(1), 61–62.
- Blakely, R. (1996). *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. England: Cambridge University Press.
- Broto, S. & Putranto, T. P. (2011). Aplikasi Metode Geomagnet dalam Eksplorasi Panas Bumi. *Teknik*, 32(1), 79–87.
- Dian Nur Rizkiani, D., & Rustadi, R. (2019). Interpretasi Sistem Panas Bumi Suwawa Berdasarkan Data Gaya Berat. *Jurnal Geofisika Eksplorasi* 5(2), 130–140. <https://doi.org/10.23960/jge.v>
- Elkins, T. (1951). The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. *Geophysics Journal*, 23.
- Firdaus, M. W., Setyawan, A., & Yusuf, M. (2016). Identifikasi Letak dan Jenis Sesar Berdasarkan Metode Gayaberat SVD Studi Kasus Sesar Lembang, Kota

- Bandung, Jawa Barat. *Youngster Physics Journal*, 5(1), 21–26.
- Grandis, D. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Bandung: Himpunan Ahli Geofisika (HAGI).
- Haerudin, N., Pardede, V. J., & Rasimeng, S. (2009). Analisis Reservoir Daerah Potensi Panas Bumi Gunung Rajabasa Kalianda dengan Metode Tahanan Jenis dan Geotermometer. *Jurnal Ilmu Dasar*, 10(2), 141-146.
- Hall, R., & Wilson, M. E. J. (2000). Neogene sutures in eastern Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6), 781–808. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(00\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00040-7).
- Hamilton, W. (1979). *Tectonics of the Indonesian Region*. Washinton D.C: U.S Geological Survey Press.
- Hardiansyah, B. (2016). Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas bumi TG-II dengan Menggunakan Metode Gaya Berat. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Henderson, R., & Zietz, I. (1949). The Computation of Second Vertical Derivative of Geomagnetic Fields. *Geophysics Journal*, 14.
- Hendrasto, F., Hutasoit, L., Kusuma, S. B., & Sapiie, B. (2018). Penerapan Model Nreca pada Daerah Resapan Lapangan Panas bumi Wayang Windu, Jawa Barat. *Riset Geologi dan Pertambangan*, 28(1), 61. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2018.v28.428>
- Herdianita, N., & Natasha, N. (2017). Geothermal Potency (Greenfield) of the Eastern Banda Arc Island, Indonesia. *Prosiding Joint Convention Malang*. Malang, Indonesia.
- Hinze, W. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices, and Applications (1 Ed)*. England: Cambridge University Press.
- Hochstein, M. P., Simanjuntak, J., & Sudarman, S. (2010). Geothermal Prospects of the Eastern Banda Arc Islands (Indonesia). *Proceeding World Geothermal Congress*.
- Hochstein, M., & Browne, P. R. (2000). *Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources*. New Zealand: The University of Auckland

- Immanuel, Y. P., Saptia, B. M., Hakim, M., Amin, A., & Kalidasa, F. N. (2019). Evaluation Geothermal Potential using Fault and Fracture Density , Petrography , And Water Geochemistry Analysis ; Case Study in Ranau Lake, Lampung-South Sumatra Province. *ITB International Geothermal Workshop*, 1–7.
- Kadir, W. G. (2000). *Eksplorasi Gaya Berat dan Magnetik*. Bandung: Teknik Geofisika Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, ITB.
- 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), 63-68.
- Mulyani, S., Daud, Y., Pasiki, R. G., & Siagian, H. (2022). Karakterisasi Struktur Patahan pada Lapangan Panas Bumi X (Sumatra) Berdasarkan Pemetaan Geologi, Penginderaan Jauh, dan Data Gaya Berat. *Buletin Sumber Daya Geologi* 17(2), 109–124.
- Nugraha, P. (2016). Penentuan Kedalaman Optimum Anomali Continuation Studi Kasus Semarang Jawa Tengah. *Skripsi*. Universitas Negeri Semarang.
- Nursalam, M. (2021). Analisis Sesar dengan Data Gayaberat Menggunakan Metode SVD (Second Vertical Derivative) di Daerah Panas bumi “MN”. *Skripsi*. Universitas Hasanuddin.
- Octonovrilna, L., & Pudja, I. P. (2009). Analisa Perbandingan Anomali Gravitasi Dengan Persebaran Intrusi Air Asin (Studi Kasus Jakarta 2006-2007). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 10(1), 39–57. <https://doi.org/10.31172/jmg.v10i1.32>
- Rahima, N. A. (2020). Studi Pemodelan Struktur Bawah Permukaan menggunakan Metode Gaya Berat di Daerah panas bumi Kec. Lasusua kab. Kolaka Utara. *Skripsi*. UIN Alauddin Makassar.
- Rasimeng, S., Pratama, T.P.E., & Wibowo, R.C. (2024). Structural Geology Identification based on Derivative Analysis Gravity Data in Tangkuban Perahu Mountain. *Journal of Engineering and Scientific Research*, 6(1).
- Reynolds, J. (1997). *An Introduction to Applied and Enviromental Geophysics*. England: John Wiley and Sons Inc.

- Riastika, M. (2012). Pengelolaan Air Tanah Berbasis Konservasi di Recharge Area Boyolali (Studi Kasus Recharge Area Cepogo, Boyolali, Jawa Tengah). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 9(2), 86. <https://doi.org/10.14710/jil.9.2.86-97>
- Ridha, M., & Darminto, D. (2016). Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi menggunakan Metode Archimedes dan Software Image-J. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 12(3), [124–130](http://rsb.info.nih.gov/ij/). <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.
- Rihda, A., Hutabarat, J., Haryanto, A. D., Simarmata, R. S. L., & Asoka, W. (2018). Cap Rock Sistem Panas bumi Rimbo Panti. *Padjadjaran Geosience Journal*, 2(3), 201–210.
- Rosid, M. S., & Siregar, H. (2017). Determining fault structure using first horizontal derivative (FHD) and horizontal Vertical Diagonal Maximal (HVDM) method: A Comparative Study. In *AIP Conference Proceedings*, 1862(1).
- Rusmilawati, D., Djayus, D., Lepong, P., & Hendrawanto, B. (2019). Studi Mekanisme Sumber Gempabumi di Wilayah Kalimantan Berdasarkan Gerak Awal Gelombang P. *Jurnal Geosains Kutai Basin* 2(2), 1-9.
- Safira, A., Andita, Z. A., & Karyanto, K. (2024). Identifikasi Struktur Geologi Daerah Panas Bumi Way Panas Kecamatan Wonosobo Menggunakan Analisis First Horizontal Derivative dan Second Vertical Derivative Berdasarkan data Gaya Berat GGMPLUS. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 5(1), 28-35.
- Saptadji, N. M. (2001). *Teknik Panas Bumi*. Bandung: ITB Press.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gaya Berat*. Yogyakarta: Graha ilmu..
- Serway, R., & Jewett, J. 2009. *Physics for scientists and engineers*. USA: Brooks.
- Setiadi, I., Setyanta, B., & Widijono, B. (2010). Delinasi Cekungan Sedimen Sumatera Selatan Beralaskan Analisa Data Gayaberat. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, 20(2), 93–106.
- Singarimbun, A., Said, U., Andriani, D., Astro, R. B., Bakrun, B., Djaja, I. G. P. F. S., ... & Strigutomo, W. (2022). Curie point depth analysis of lesugolo area, East Nusa Tenggara, Indonesia based on ground magnetic data. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(1), 220111.

- Sugita, M. I., Janah, A. F., & Rahmawati, D. (2020). Analisis Data Gaya Berat Di Daerah Benda Duwur Semarang. *Journal of Research and Technology* 6(1). 81-90.
- Suharno. (2013). *Eksplorasi Geothermal*. Bandar Lampung: Lembaga Penelitian Universitas Lampung.
- Suhadiyatno. (2008). Pemodelan Metode Gravitasi Tiga Dimensi dengan Menggunakan Matlab. *Skripsi*. Universitas Indonesia.
- Supriyadi, S., Khumaedi, K., Sugiyanto, S., & Setiawan, F (2019). Prosedur Survei Gaya Berat Mikro Antar Waktu Studi Kasus di Kawasan Kota Lama Semarang. *Prosiding Seminar Nasional Lontar Physics Forum*, 12-16. <http://conference.upgris.ac.id/index.php/lpf/article/download/552/246>
- Susanti, D. A., Pujiastuti, D., & Handayani, L. (2022). Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Formasi Jatibarang Berdasarkan Metode Gayaberat. *Jurnal Fisika Unand*, 11(1), 131-138.
- Syamsuriadi. (2013). Penentuan Struktur Bawah Permukaan Kota Makassar dengan Menggunakan Metode Gaya Berat (Gravity). *Skripsi*. Universitas Hasanudin: Makassar.
- Tamboto, N., Bujung, C. A. N., & Rende, J. C. (2023). Distribusi Suhu Permukaan Tanah dan Hubungannya Indeks Vegetasi di Hutan Pinus Lahendong. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, 4(2), 53–60. <https://doi.org/10.53682/fista.v4i2.287>
- Telford, W., Geldart, L., Sherrif, R. , & Keys, D. (1976). *Applied Geophysics*. London: Cambridge University Press .
- Telford, W., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics 2nd Edition*. London: Cambridge University Press.
- Yufajjiru, L., Dhiwaurrais, M., Firdaus, A., Anisah, D., Rizqi, S., & Amanda, L. T. (2020). Studi Pemisahan Anomali Regional dan Residual Gravitasi Menggunakan Moving Average dan Chebyshev Tipe 1 Lowpass Filter. *Prosiding Seminar Nasional Geofisika 2019: Peran Geofisika Dalam Mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) Di Era 4.0*, May, 64. <https://www.researchgate.net/publication/342623755>

Zaenudin, A., & Yulistina, S. (2018). Studi Identifikasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Untuk Mengetahui Sistem Sesar Berdasarkan Analisis First Horizontal Derivative (FHD), Second Vertical Derivative (SVD), Dan 2, 5D Forward Modeling di Daerah Manokwari Papua Barat. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 4(2), 173-186. <https://doi.org/10.23960/jge.v4i2.15>