

TUGAS AKHIR - CF234824

IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI DAN KONTRAS DENSITAS LERENG TIMUR GUNUNG API LAMONGAN, PROBOLINGGO, JAWA TIMUR MENGGUNAKAN METODE GAYABERAT

JHON CHRIST RIVAND SIJABAT

NRP 5017211024

Dosen Pembimbing

Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si

NIP 19760123 2000031 001

Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng

NIP. 19890208 2018031 001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA

Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

202



TUGAS AKHIR - CF234824

**IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI DAN KONTRAS
DENSITAS LERENG TIMUR GUNUNG API LAMONGAN,
PROBOLINGGO, JAWA TIMUR MENGGUNAKAN METODE
GAYABERAT**

JHON CHRIST RIVAND SIJABAT

NRP 5017211024

Dosen Pembimbing

Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si

NIP 19760123 2000031 001

Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng

NIP. 19890208 2018031 001

DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA

Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



FINAL PROJECT - CF234824

IDENTIFICATION OF GEOLOGICAL STRUCTURES AND DENSITY CONTRAST ON THE EASTERN SLOPE OF MOUNT LAMONGAN VOLCANO, PROBOLINGGO, EAST JAVA USING THE GRAVITY METHOD

JHON CHRIST RIVAND SIJABAT

NRP 5017211024

Advisor

Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si

NIP 19760123 2000031 001

Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng

NIP. 19890208 2018031 001

DEPARTMENT OF GEOPHYSICAL ENGINEERING

Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

LEMBAR PENGESAHAN

IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI DAN KONTRAS DENSITAS LERENG TIMUR GUNUNG API LAMONGAN, PROBOLINGGO, JAWA TIMUR MENGUNAKAN METODE GAYABERAT

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Geofisika
Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **JHON CHRIST RIVAND SIJABAT**

NRP. 5017211024

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- | | | | |
|--|--------------|---|---|
| 1. Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si
NIP. 19760123 200003 1 001 | Pembimbing (|  |) |
| 2. Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng
NIP. 19890208 201803 1 001 | Pembimbing (|  |) |
| 3. Ir. Juan Pandu Gya Nur Rochman, S.Si.,M.T
NIP.19890612 201504 1 003 | Penguji (|  |) |
| 4. Alutsyah Luthfian, S.Si., M.Sc
NPP. 1993 2025 11006 | Penguji (|  |) |

SURABAYA

Juli, 2025

APPROVAL SHEET

IDENTIFICATION OF GEOLOGICAL STRUCTURES AND DENSITY CONTRAST ON THE EASTERN SLOPE OF MOUNT LAMONGAN VOLCANO, PROBOLINGGO, EAST JAVA USING THE GRAVITY METHOD

FINAL PROJECT

Submitted to fulfil one of the requirements

For obtaining a bachelor degree at

Undergraduate Study Program of Geophysical Engineering

Geophysical Engineering Department

Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **JHON CHRIST RIVAND SIJABAT**

NRP. 5017211024

Approved by Final Project Advisor and Examiner Team :

- | | | |
|--|----------|---|
| 1. Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si
NIP. 19760123 200003 1 001 | Advisor | () |
| 2. Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng
NIP. 19890208 201803 1 001 | Advisor | () |
| 3. Ir. Juan Pandu Gya Nur Rochman, S.Si.,M.T
NIP.19890612 201504 1 003 | Examiner | () |
| 4. Alutsyah Luthfian, S.Si., M.Sc
NPP. 1993 2025 11006 | Examiner | () |

SURABAYA

July, 2025

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Jhon Christ Rivand Sijabat/5017211024
Departemen : Teknik Geofisika
Dosen Pembimbing/NIP : Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si / 19760123 2000031 001
Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng/19890208 2018031 001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Identifikasi Struktur Geologi dan Kontras Densitas Lereng Timur Gunung Api Lamongan, Probolinggo, Jawa Timur Menggunakan Metode Gayaberat” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 23 Juli 2025

Mengetahui

Dosen Pembimbing I



Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si
NIP. 19760123 2000031 001

Mahasiswa



Jhon Christ Rivand Sijabat
NRP. 5017211024

Dosen Pembimbing II



Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng
NIP. 19890208 2018031 001

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student/NRP : Jhon Christ Rivand Sijabat/5017211024
Department : Geophysical Engineering
Advisor/NIP : Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si / 19760123 2000031 001
Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng/19890208 2018031 001

Hereby declared that the Final Project with the title of "Identification of Geological Structures and Density Contrast on the Eastern Slope of Mount Lamongan Volcano, Probolinggo, East Java Using the Gravity Method" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with provisions that apply at Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya, 23 July 2025

Acknowledged

Advisor I



Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si
NIP. 19760123 2000031 001

Student



Jhon Christ Rivand Sijabat
NRP. 5017211024

Advisor II



Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng
NIP. 19890208 2018031 001

ABSTRAK

IDENTIFIKASI STRUKTUR GEOLOGI DAN KONTRAS DENSITAS LERENG TIMUR GUNUNG API LAMONGAN, PROBOLINGGO, JAWA TIMUR MENGUNAKAN METODE GAYABERAT

Nama Mahasiswa / NRP : Jhon Christ Rivand Sijabat / 5017211024
Departemen : Teknik Geofisika FTSPK - ITS
Dosen Pembimbing : Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si
Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng

Abstrak

Lereng timur Gunung Lamongan adalah salah satu area yang memiliki potensi panas bumi, dimana dijumpai adanya manifestasi fumarole dan mata air panas dengan suhu antara 35°C hingga 45°C. Sistem panas bumi umumnya memiliki hubungan erat dengan pengaturan tektonik dan aktivitas vulkanik. Struktur geologi di sekitar sistem mata air panas dapat berfungsi sebagai jalur aliran fluida panas dari bawah permukaan. Namun, penelitian terkait identifikasi struktur pada di area ini masih sedikit. Penelitian menggunakan metode gayaberat satelit di area ini dilakukan dengan tujuan mengetahui struktur geologi serta kontras densitas bawah permukaan melalui pemodelan 3 dimensi. Data yang dipakai dalam hal ini meliputi data satelit (data GGMPlus). Pengambilan data difokuskan pada area timur lereng Gunung Lamongan, menggunakan gayaberat satelit GGMPlus dengan spasi grid 200 meter. Dari hasil pengukuran satelit, kemudian dikoreksi meliputi koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi bouguer, dan koreksi medan untuk mendapatkan nilai anomali bouguer lengkap. Penggunaan filter kontinuasi dilakukan untuk mendapatkan anomali residual area penelitian. Anomali residual kemudian digunakan untuk analisa secara kualitatif menggunakan filter deteksi turunan horizontal (*Horizontal Derivative*) dan turunan vertikal kedua (*Second Vertical Derivative*). Proses inversi data gayaberat diperlukan untuk mendapatkan nilai sebaran densitas bawah permukaan serta untuk memvalidasi keberadaan struktur area timur lereng Gunung Lamongan. Analisis gayaberat satelit di timur Gunung Lamongan mengungkap dua struktur sesar bawah permukaan berupa sesar normal di barat laut dan sesar naik di timur area studi, dengan orientasi dominan barat laut–tenggara. Konfirmasi diperoleh dari peta residual, analisis turunan, dan kelurusan. Pemodelan 3D menunjukkan pola anomali konsisten yang mengindikasikan keberadaan tiga jenis batuan bawah permukaan: tuff lapilli, *tuffaceous breccia*, dan intrusi basalt.

Kata kunci: *Densitas, Metode gayaberat, Struktur geologi*

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF GEOLOGICAL STRUCTURES AND DENSITY CONTRAST ON THE EASTERN SLOPE OF MOUNT LAMONGAN VOLCANO, PROBOLINGGO, EAST JAVA USING THE GRAVITY METHOD

Student Name / NRP : Jhon Christ Rivand Sijabat / 5017211024
Department : Geophysical Engineering FTSPK - ITS
Advisor : Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si
Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng

Abstract

The eastern slope of Mount Lamongan is one of the areas with geothermal potential, where fumarole manifestations and hot springs with temperatures ranging from 35°C to 45°C are found. Geothermal systems are generally closely related to tectonic settings and volcanic activity. Geological structures around hot spring systems can act as pathways for the flow of hot fluids from below the surface. However, studies related to the identification of structures in this area are still limited. This research utilizes satellite gravity methods in this area to identify geological structures and subsurface density contrasts through three-dimensional modeling. The data used includes satellite data (GGMPlus data). Data acquisition was focused on the eastern slope of Mount Lamongan, using GGMPlus satellite gravity data with a 200-meter grid spacing. The satellite measurements were corrected by applying latitude correction, free-air correction, Bouguer correction, and terrain correction to obtain complete Bouguer anomaly values. Continuation filtering was applied to extract the residual anomaly in the study area. The residual anomalies were then analyzed qualitatively using horizontal derivative and second vertical derivative filters. Gravity data inversion was conducted to obtain the subsurface density distribution and to validate the existence of geological structures in the eastern slope area of Mount Lamongan. The satellite gravity analysis in the eastern part of Mount Lamongan revealed two subsurface fault structures, including a normal fault in the northwest and a thrust fault in the eastern part of the study area, with a dominant northwest–southeast orientation. These findings were confirmed through residual maps, derivative analyses, and lineament analysis. The 3D modeling shows consistent anomaly patterns that indicate the presence of three types of subsurface rocks: lapilli tuff, tuffaceous breccia, and basaltic intrusion.

Keywords: *Density, Gravity method, Geological structure*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa oleh karena berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Identifikasi Struktur Geologi dan Kontras Densitas Lereng Timur Gunung Api Lamongan, Probolinggo, Jawa Timur Menggunakan Metode Gayaberat”, yang membahas mengenai metode gayaberat untuk mengidentifikasi struktur geologi dan perbedaan densitas bawah permukaan pada area timur lereng Gunung Lamongan. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan rasa terimakasih sebesar-besarnya kepada :

1. Orang tua dan keluarga yang selalu memberi dukungan baik dukungan moral, kasih sayang, serta doa yang tiada henti
2. Bapak Dr.Ir.Dwa Desa Warnana, S.Si.,M.Si dan Bapak Dr.Ir.M.Haris Miftakhul Fajar, S.T.,M.Eng selaku dosen pembimbing yang memberikan arahan, masukan dan saran selama penyusunan tugas akhir ini
3. Bapak Ir. Juan Pandu Gya Nur Rochman, S.Si.,M.T dan Bapak Alutsyah Luthfian, S.Si., M.Sc selaku dosen Penguji yang telah memberikan masukan dan saran untuk penyusunan tugas akhir ini
4. Seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Geofisika atas ilmu dan pelayanan akademik yang diberikan selama ini kepada penulis
5. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Geofisika Angkatan 2021 (TG10) yang membantu dalam pengambilan data gayaberat serta yang memberikan semangat dan dukungan menjalani kuliah

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan yang lebih baik kedepannya. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang Teknik Geofisika serta bermanfaat bagi pihak-pihak yang membutuhkan.

Surabaya, 23 Juli 2025

Jhon Christ Rivand Sijabat

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
APPROVAL SHEET	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	15
1.1 Latar Belakang.....	15
1.2 Rumusan Masalah	16
1.3 Batasan Masalah.....	16
1.4 Tujuan.....	16
1.5 Manfaat.....	16
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	17
2.1 Penelitian Terdahulu.....	17
2.1.1 Kondisi Permukaan	17
2.1.2 Kondisi Bawah Permukaan	19
2.2 Teori Dasar	21
2.2.1 Teori dasar gayaberat.....	21
2.2.2 Densitas batuan.....	22
2.2.3 Geoid dan Elipsoid Referensi	23
2.2.4 Global Gravity Model plus (GGMPlus)	23
2.2.5 Koreksi Data Gayeberat Satelit	24
2.2.6 Analisa Spektrum (<i>Power Spectrum</i>)	26
2.2.7 Pemisahan Anomali.....	27
2.2.8 Analisis Struktural	28
2.2.9 Pemodelan 3 Dimensi.....	30
BAB 3 METODOLOGI	32
3.1 Lokasi dan Data Penelitian	32
3.2 Peralatan Penelitian	32
3.3 Alur Penelitian.....	33

3.4	Diagram Penelitian	35
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1	Hasil Penelitian.....	36
4.1.1	Estimasi Densitas.....	36
4.1.2	Kelurusan (<i>Lineament</i>)	36
4.1.3	Anomali Bouguer	37
4.1.4	Model Bawah Permukaan Hasil Inversi	41
4.2	Pembahasan	43
BAB 5	PENUTUP	49
5.1	Kesimpulan.....	49
5.2	Saran	49
	DAFTAR PUSTAKA.....	50
	LAMPIRAN.....	53
	BIODATA PENULIS.....	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Peta Geologi Lembar Probolinggo (Suharsono & Suwarti, 1992).....	17
Gambar 2. 2 Analisis kelurusan (<i>lineament</i>) dan plot hasil kelurusan pada diagram.....	18
Gambar 2. 3 Analisis kelurusan (<i>lineament</i>) lembah (garis merah) dan punggung bukit (garis kuning) di Kompleks Gunung Lamongan (Nugroho <i>et al.</i> , 2020).....	19
Gambar 2. 4 a) Hasil inversi 3 dimensi anomali gayaberat pada anomali residual gayaberat lapangan b) Sayatan melintang A-A' dan B-B' pada model inversi 3 dimensi ...	20
Gambar 2. 5 Analisis <i>second vertical derivative</i> dan sayatan melintang berpotongan sesar pada data a) magnetik dan b) gayaberat satelit	20
Gambar 2. 6 Model bawah permukaan pada data a) suseptibilitas dan b) densitas hasil <i>cross-gradient sequential joint inversion</i>	21
Gambar 2. 7 <i>Infinite Slab</i> pada koreksi Bouguer Bullard A (Lafer, 1991b).....	25
Gambar 2. 8 <i>Spherical cap</i> pada koreksi Bullard B (Lafer, 1991b)	25
Gambar 2. 9 Ilustrasi <i>upward continuation</i> (Blakely, 1996)	27
Gambar 2. 10 Ilustrasi profil anomali gayaberat (g), <i>First Horizontal Derivative (FHD)</i> , dan <i>Second Vertical Derivative (SVD)</i> pada anomali patahan vertikal (Blakely, 1996)	28
Gambar 2. 11 Analisis struktur menggunakan pada a) peta anomali turunan horizontal, b) peta anomali turunan vertikal kedua dalam bentuk c) kurva 1 dimensi turunan horizontal dan turunan vertikal kedua (Rosid and Siregar, 2017).....	29
Gambar 2. 12 Analisis jenis sesar pada a) peta turunan vertikal kedua dalam bentuk b) kurva 1 dimensi peta turunan vertikal kedua pada sayatan A-B (Fitriani <i>et al.</i> , 2020).30	
Gambar 2. 13 Analisis kondisi bawah permukaan menggunakan a) model 3 dimensi dan b) sayatan melintang utara-selatan berdasarkan model 3 dimensi (Sudrajat <i>et al.</i> , 2024).....	31
Gambar 3. 1 Peta desain akuisisi gayaberat satelit (GGMPlus) pada	32
Gambar 3. 2 Alur pengolahan data gayaberat.....	34
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 4. 1 Estimasi nilai densitas menggunakan metode Parasnis	36
Gambar 4. 2 Penarikan kelurusan dan plot kelurusan pada diagram <i>roset</i>	37
Gambar 4. 3 Peta anomali bouguer lengkap	38
Gambar 4. 4 Analisis Spektrum pada gayaberat Satelit.....	39
Gambar 4. 5 Peta anomali Bouguer regional	40
Gambar 4. 6 Peta anomali bouguer residual satelit.....	41
Gambar 4. 7 Model awal inversi gayaberat satelit a) sayatan tegak lurus sumbu x yang mewakili 25 sayatan b) sayatan tegak lurus sumbu y yang mewakili 25 sayatan c) sayatan tegak lurus sumbu z yang mewakili 5 sayatan d) tampilan 3 dimensi model awal	42
Gambar 4. 8 Hasil komputasi dasar a) data pengukuran b) data perhitungan c) perbedaan data hasil perhitungan dengan data hasil pengukuran dan d) kurva perbandingan.....	43
Gambar 4. 9 Peta turunan horizontal dengan sayatan melintang barat timur AA', BB'	44
Gambar 4. 10 Peta turunan vertikal kedua dengan sayatan melintang barat timur AA', BB'	45
Gambar 4. 11 Kurva sayatan A-A' dan B-B' pada data gayaberat satelit	46

Gambar 4. 12 Model bawah permukaan dari sayatan A-A'	47
Gambar 4. 13 Model bawah permukaan dari sayatan B-B'	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai densitas batuan yang ada di wilayah penelitian (Telford, Geldart and Sheriff, 2004; Deer, Howie and Zussman, 2013).....	23
Tabel 2. 2 Tabel operator Elkins (1945) sebagai filter SVD	29
Tabel 3. 1 Peralatan dalam pengolahan data gayaberat	32

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Area timur lereng Gunung Lamongan adalah salah satu wilayah yang memiliki potensi panas bumi. Wilayah ini memiliki potensi panas bumi dengan luas 299 km², yang ditandai dengan adanya manifestasi fumarole dan mata air panas dengan suhu antara 35°C hingga 45°C (Deon *et al.*, 2015). Sistem panas bumi umumnya memiliki hubungan erat dengan pengaturan tektonik dan aktivitas vulkanik. Struktur geologi di sekitar sistem mata air panas dapat berfungsi sebagai jalur aliran fluida panas dari bawah permukaan (White and Brannock, 1950; Nahli *et al.*, 2016). Manifestasi panas bumi yang ditemukan di area timur lereng Gunung Lamongan dapat dikategorikan sebagai tipe panas bumi yang terkait dengan aktivitas vulkanik (*volcano-hosted type*) (Purnomo and Pichler, 2014). Struktur regional yang terbentuk di area timur lereng Gunung Lamongan diduga menjadi faktor utama yang mempengaruhi distribusi aktivitas vulkanik di kawasan tersebut, namun struktur tektonik di bawah gunung api ini masih belum banyak diketahui secara rinci (Carn, 1999; Puswanto *et al.*, 2022). Berdasarkan Peta Geologi Lembar Probolinggo, terdapat beberapa struktur regional di Kompleks Gunung Lamongan, salah satunya melintas di dekat mata air panas Segaran dengan orientasi barat laut–tenggara, dan diduga mengontrol wilayah panas bumi pada area timur lereng Gunung Lamongan (Siombone, Susilo and Maryanto, 2022).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nugroho *et al.* (2020) menggunakan analisis morfometri pada data model elevasi digital *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, menginterpretasi keberadaan kelurusan punggung dan lembah di Kompleks Gunung Api Lamongan dengan arah dominan barat laut-tenggara dan barat daya-timur laut. Penelitian yang dilakukan oleh Ulumuddin *et al.* (2024) menggunakan metode magnetik, menginterpretasi keberadaan sesar di sekitar Mata Air Panas Segaran yang berorientasi barat laut – tenggara hingga kedalaman 100 meter. Penelitian yang dilakukan oleh Siombone *et al.* (2021) menggunakan analisis turunan vertikal kedua (*second vertical derivative*), mengidentifikasi keberadaan sesar yang melewati tiga lapisan di atas intrusi basalt hingga kedalaman sekitar 150 m. Selain itu menggunakan inversi data gayaberasat lapangan, berhasil memodelkan kondisi bawah permukaan di sekitar Mata Air Panas Segaran. Hasil pemodelan menunjukkan adanya empat lapisan batuan yang diinterpretasikan sebagai tuf lapili, *tuffaceous breccia*, breksi vulkanik, dan intrusi basalt. Struktur geologi yang berhasil diidentifikasi pada area timur Gunung Lamongan, kebanyakan berfokus pada sesar di sekitar Mata Air Panas Segaran, namun terbatas dalam mengidentifikasi sesar lain yang berada di area Timur Gunung Lamongan. Berdasarkan keterbatasan tersebut, dapat dilakukan penelitian lebih lanjut untuk melihat keberadaan struktur geologi lainnya yang berada di area timur Gunung Lamongan.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan adalah metode gayaberasat satelit. Penelitian yang dilakukan oleh Aziz, Hartantyo and Niasari, (2018) menggunakan analisis turunan vertikal kedua pada data gayaberasat satelit GGMPlus, berhasil menginterpretasi adanya sesar normal di sekitar Mata Air Panas Segaran dengan arah dominan barat laut-tenggara. Penelitian menggunakan gayaberasat satelit GGMPlus juga dilakukan oleh Fabio *et al.* (2023) untuk mengidentifikasi sesar menggunakan analisis turunan horizontal (*first horizontal derivative*) dan turunan vertikal kedua untuk menentukan karakteristik sesar. Pemodelan bawah permukaan dapat menggunakan proses inversi. Penelitian yang dilakukan Indrarini and Setiawan, (2015) menggunakan inversi occam untuk memodelkan 3 dimensi struktur bawah permukaan melalui proses optimasi meliputi *base*, *density*, dan *occam*. Penelitian ini dilakukan untuk mendukung penelitian sebelumnya terkait aktivitas panas bumi di Kompleks Gunung Api

Lamongan, dengan mengidentifikasi struktur geologi dan kontras densitas pada area timur lereng Gunung Lamongan. Penelitian ini dilakukan dengan melibatkan analisis *power spectrum*, *upward continuation*, *horizontal derivative*, *second vertical derivative*, dan pemodelan 3 dimensi diharapkan dapat memberikan gambaran terkait keberadaan struktur geologi dan kondisi bawah permukaan di area timur Gunung Lamongan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, permasalahan yang dibahas pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana struktur geologi di area timur lereng Gunung Lamongan menggunakan metode gayaberat satelit (GGMPlus)?
2. Bagaimana kondisi bawah permukaan di area timur lereng Gunung Lamongan berdasarkan hasil pemodelan inversi 3 dimensi data anomali gayaberat satelit (GGMPlus)?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini tidak mencakup pemetaan geologi dan pengambilan sampel batuan secara langsung pada area penelitian
2. Tidak menggunakan metode geofisika lainnya sebagai pembanding metode gayaberat satelit (GGMPlus)
3. Interpretasi model bawah permukaan dilakukan secara kualitatif, sehingga hanya menggambarkan keberadaan anomali dari perbedaan densitas

1.4 Tujuan

Untuk menjawab rumusan masalah, maka tujuan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis struktur geologi di area timur Gunung Lamongan menggunakan metode gayaberat satelit (GGMPlus)
2. Menganalisis kondisi bawah permukaan di area timur lereng Gunung Lamongan berdasarkan hasil pemodelan inversi 3 dimensi data anomali gayaberat satelit (GGMPlus)

1.5 Manfaat

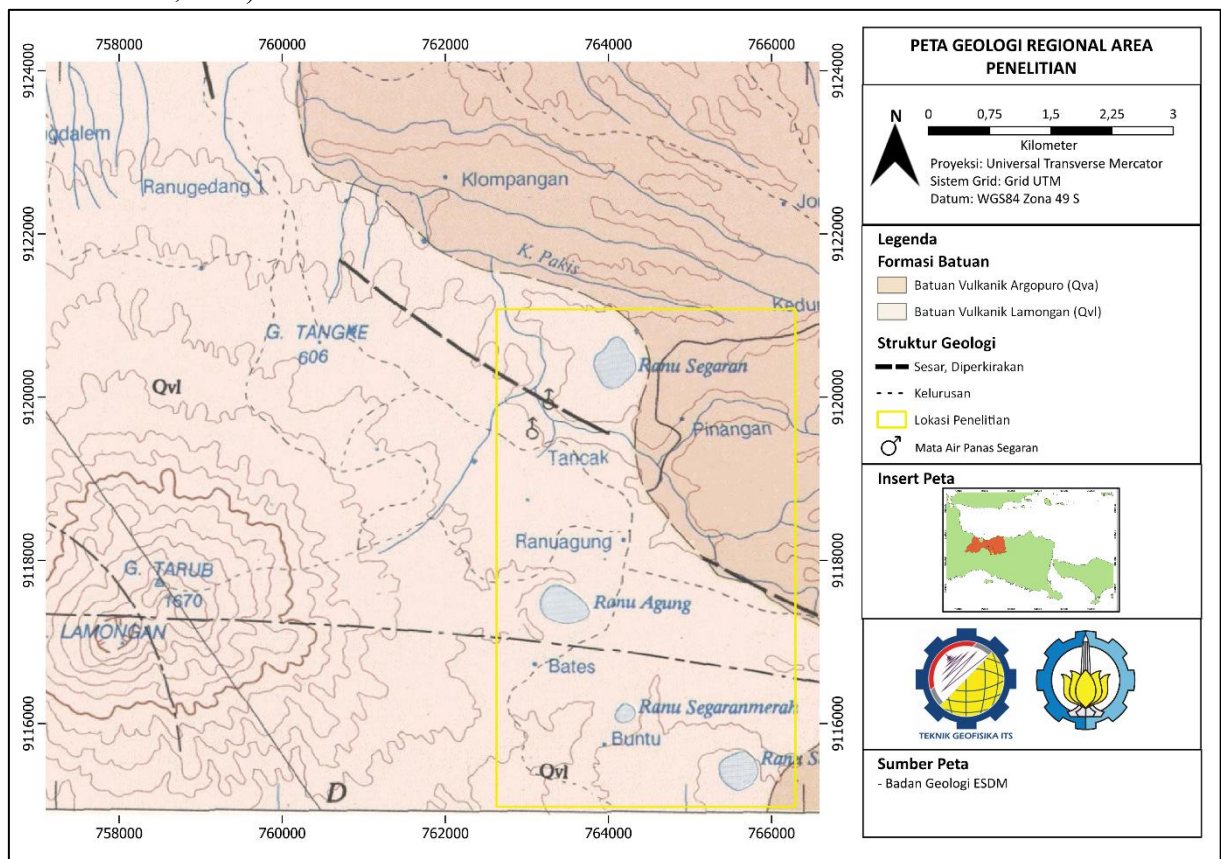
Penelitian tugas akhir ini dapat dimanfaatkan sebagai studi pendahuluan terkait keberadaan struktur geologi dan kondisi bawah permukaan di area timur Gunung Lamongan, sehingga dapat mendukung dalam proses identifikasi potensi sistem panas bumi di Kompleks Gunung Api Lamongan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1 Kondisi Permukaan

Lamongan Volcanic Field (LVF) berada diantara kompleks vulkanik Tengger-Semeru dan Iyang-Argapura yang merupakan hasil dari aktivitas vulkanik yang berlangsung sejak zaman Pleistosen hingga Holosen (Suwarti & Suharsono, 1992). Lamongan merupakan *stratovulkano* basaltik dengan orientasi linear barat laut-tenggara (NW-SE) (Gurusinga et al., 2023). Kelurusan sesar yang memiliki orientasi timur laut terlihat pada endapan yang sangat tererosi dari kompleks Iyang-Argopuro yang berada ditimur Gunung Lamongan (Carn, 1999). Dapur magma pada gunung lamongan berada pada kedalaman dangkal sebesar 4,5 km dari puncak bangunan (Chaussard & Amelung, 2012). Bagian utama dari LVF terdiri dari 3 *vent* : Tarub, Tjupu dan Lamongan yang disebut sebagai LTT. Tarub yang tererosi membentuk bagian tertua disebelah timur LTT, dan terpisah dari *stratocone* oleh sebuah depresi yang sejajar dengan arah barat laut-tenggara (NW-SE) yang kemungkinan terkait dengan sesar (Carn, 1999, 2000). Peta Geologi Lembar Probolinggo dengan skala 1 : 100.000 menunjukkan bahwa area timur gunung lamongan terdapat sesar yang berorientasi barat laut-tenggara (NW-SE) (**Gambar 2.1**) (Suwarti & Suharsono, 1992).

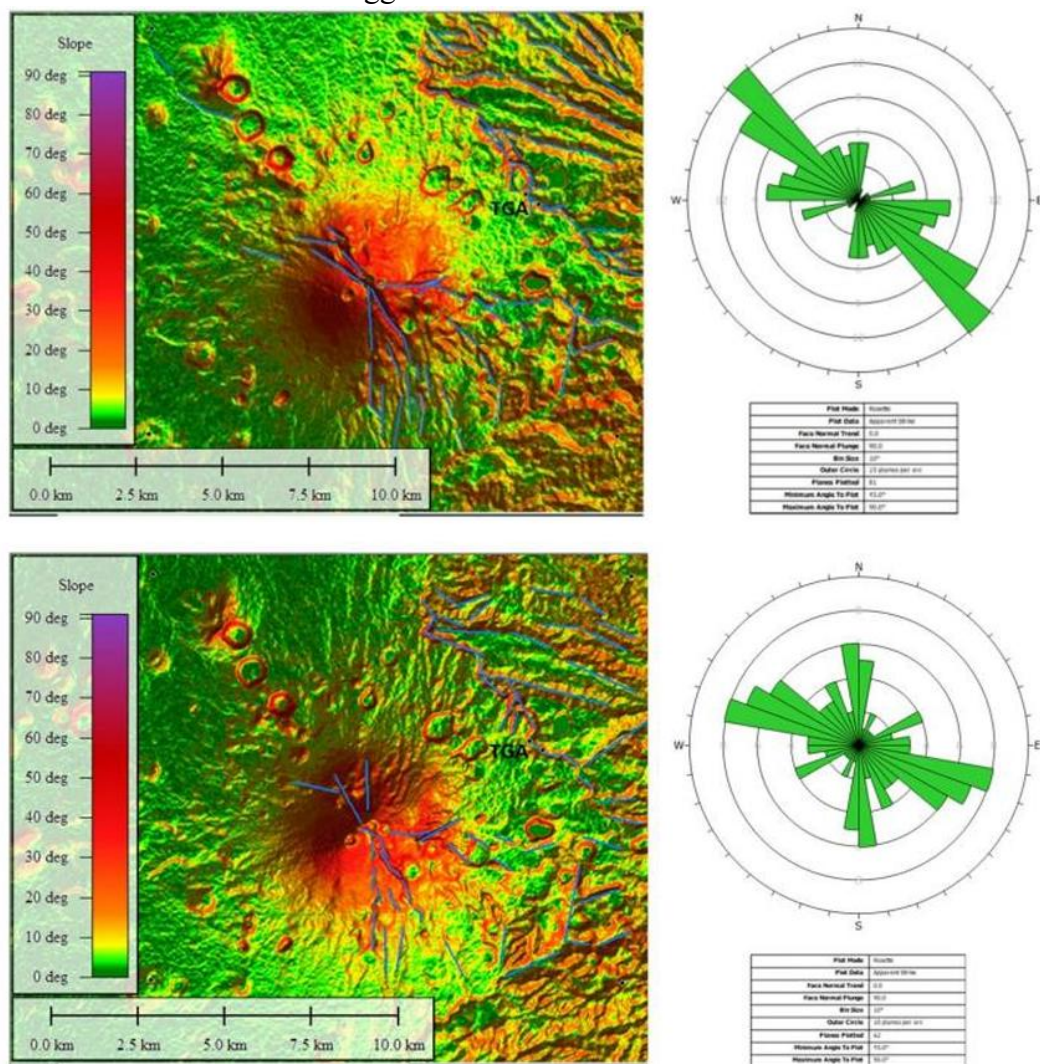


Gambar 2. 1 Peta Geologi Lembar Probolinggo (Suharsono & Suwarti, 1992)

Kendali utama terhadap gaya letusan kemungkinan disebabkan keberadaan substrat berpori berupa endapan piroklastik dari aliran massa dari Kompleks Iyang-Argopuro yang menebal diarah timur LVF (Carn, 2000). Batuan pada area timur Gunung Lamongan hasil uji coba laboratorium pada sampel batuan tergolong dalam basalt yang berasal dari berbagai aktivitas

efusif Gunung Lamongan dan tersusun atas plagioklas disertai dengan sedikit olivine dan piroksen. Litologi batuan pada area timur Gunung Lamongan tersusun atas batuan piroklastik yang berada dibawah lava basaltik. Batuan piroklastik tersebut kemungkinan berasal dari letusan sebelumnya Gunung Argopuro dan basalt yang berada diatasnya merupakan produk aktivitas efusif dari Gunung Lamongan (Deon et al., 2015). Area timur gunung lamongan juga tersusun atas batuan piroklastik berupa tuff halus-lapili yang lebih muda dibandingkan batuan lava andesit-basalt (Suwarti & Suharsono,1992).

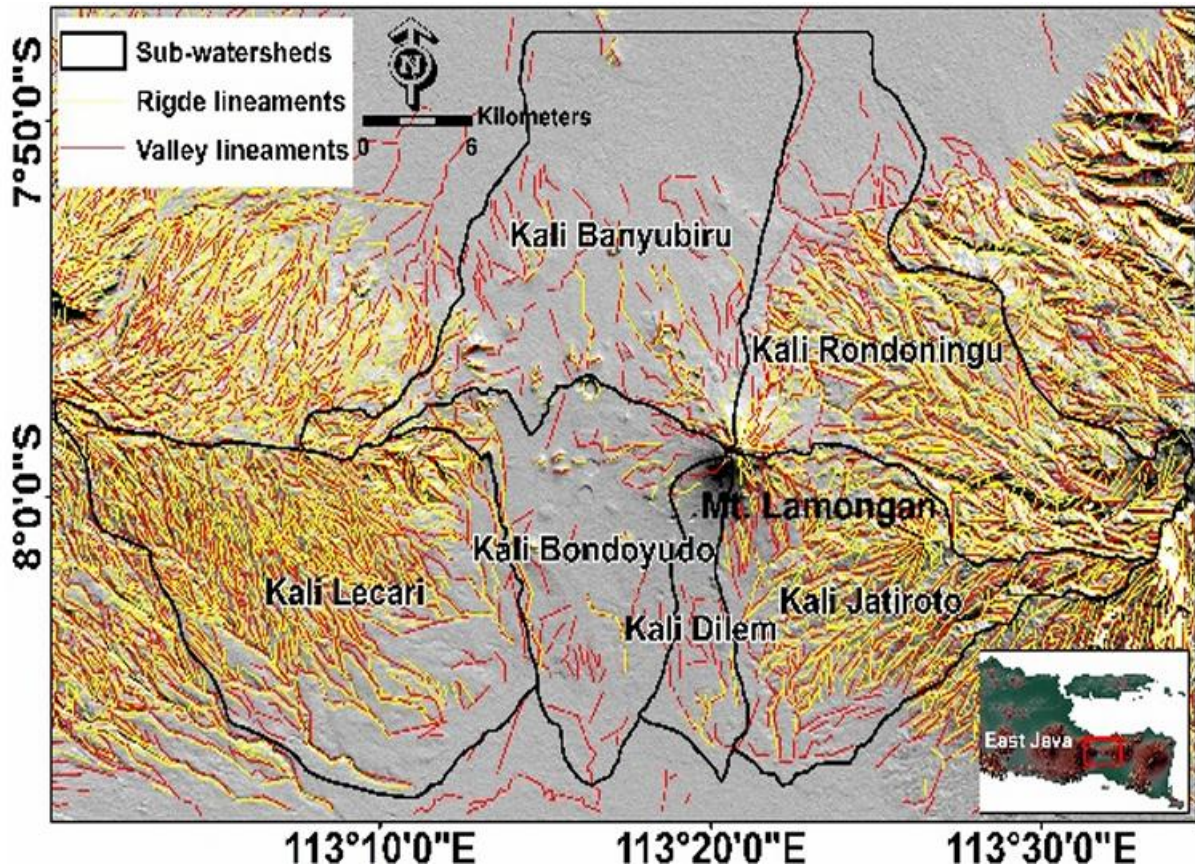
Siombone et al. (2022) melakukan analisis geologi permukaan berupa sesar atau rekahan melalui penarikan kelurusan (*lineament*) pada 2 azimuth berbeda yaitu 45° dan 135°. Penarikan tersebut dilakukan pada peta DEM SRTM yang kemudian dikomperasikan dengan diagram *rosset* (**Gambar 2.2**). Hasil penarikan tersebut menunjukkan bahwa arah kelurusan (*lineament*) didominasi oleh arah barat laut-tenggara.



Gambar 2. 2 Analisis kelurusan (*lineament*) dan plot hasil kelurusan pada diagram *rosset* di Kompleks Gunung Lamongan (Siombone, Susilo & Maryanto, 2022)

Nugroho et al. (2020) menggunakan analisis morfometri pada data *Digital Elevation Model Shuttle Radar Topography Mission (DEM SRTM)* dengan resolusi spasial 30 meter untuk memetakan pola kelurusan (*lineament*) punggung bukit dan lembah pada Kompleks Gunung

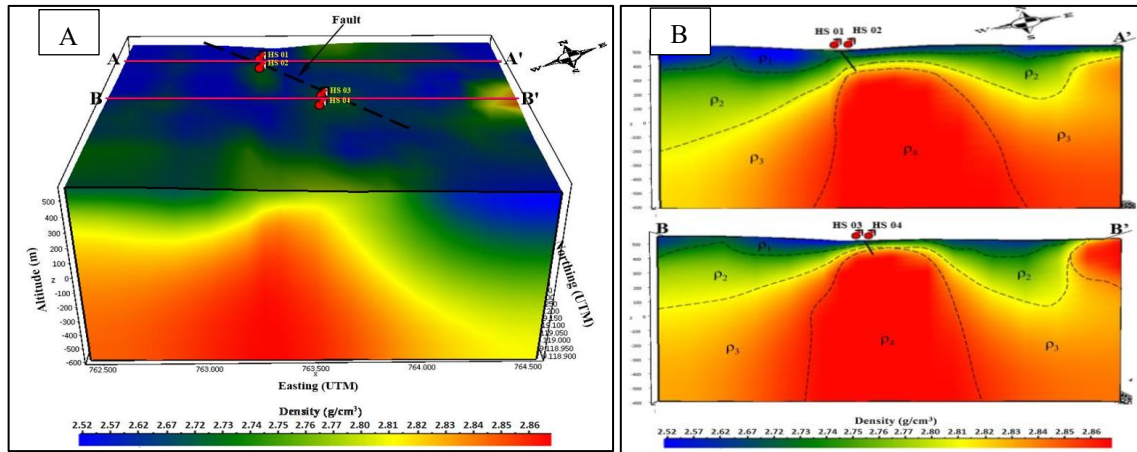
Api Lamongan (**Gambar 2.3**). Hasilnya menunjukkan bahwa arah relatif lineament pada punggung yaitu barat laut-tenggara dan barat daya-timur laut.



Gambar 2. 3 Analisis kelurusan (*lineament*) lembah (garis merah) dan punggung bukit (garis kuning) di Kompleks Gunung Lamongan (Nugroho et al., 2020)

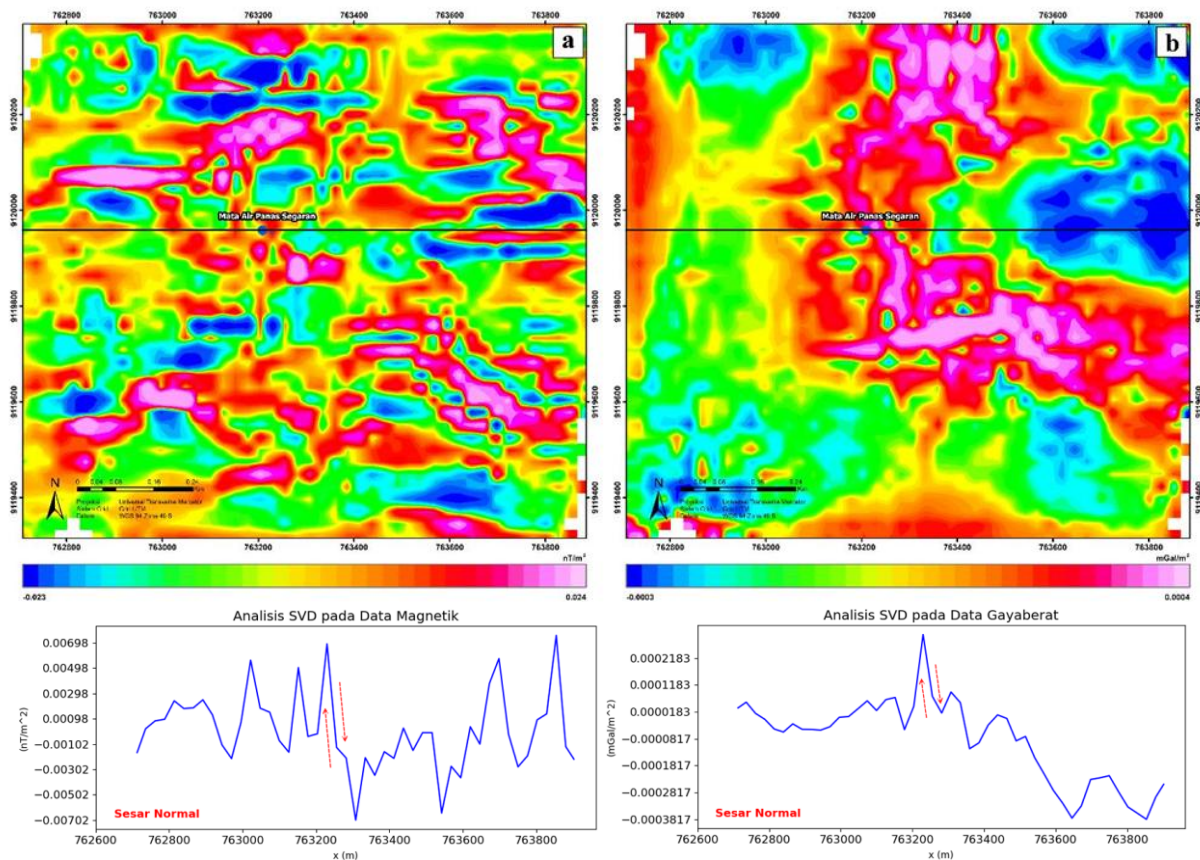
2.1.2 Kondisi Bawah Permukaan

Siombone et al. (2021) melakukan pemodelan inversi untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan menggunakan data gayaberat lapangan. Proses inversi dilakukan pada data anomali residual gayaberat. Anomali regional dan residual gayaberat diperoleh dengan *radially averaged power spectrum* dan *moving average*. Kedalaman masing masing anomali diperoleh sebesar 348 meter dan 42 meter. Hasil model bawah permukaan menunjukkan adanya empat lapisan batuan yang memiliki nilai densitas yang berbeda dan struktur geologi berupa sesar di sekitar mata air panas. Lapisan pertama diduga merupakan lapisan tuf lapili yang merupakan produk letusan Gunung Api Lamongan dengan nilai densitas antara 2,52 – 2,67 gr/cm³. Lapisan kedua diduga merupakan lapisan *tuffaceous breccia* dengan nilai densitas antara 2,72 – 2,77 gr/cm³ yang berada pada kedalaman 50 – 200 meter. Lapisan ketiga diduga merupakan lapisan breksi vulkanik dengan nilai densitas 2,80 – 2,83 gr/cm³. Lapisan keempat diduga sebagai intrusi batuan basalt dengan nilai densitas antara 2,84 – 2,86 gr/cm³ (**Gambar 2.4**).



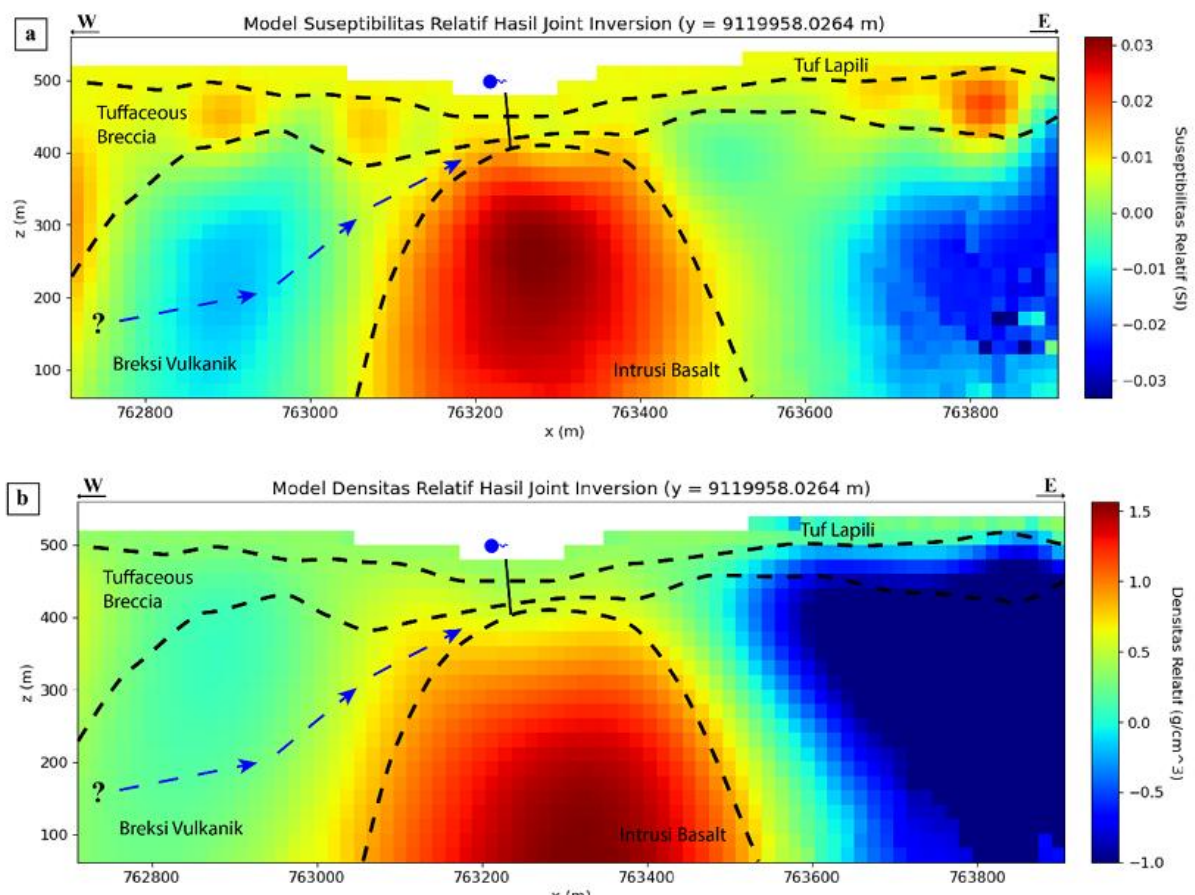
Gambar 2. 4 a) Hasil inversi 3 dimensi anomali gayaberat pada anomali residual gayaberat lapangan b) Sayatan melintang A-A' dan B-B' pada model inversi 3 dimensi

Ulumuddin, F. (2024) melakukan analisis struktur geologi dan kondisi bawah permukaan di sekitar Mata Air Panas Segaran dengan mengintegrasikan data magnetik dan gayaberat satelit melalui *cross-gradient sequential joint inversion*. Anomali regional dan residual gayaberat diperoleh dengan *radially averaged power spectrum*. Kedalaman masing masing anomali diperoleh sebesar 200 meter dan 74 meter. Analisis struktur menggunakan turunan vertikal kedua data magnetik dan gayaberat satelit pada pola persebaran anomali di permukaan hasil inversi cross-gradient sequential joint inversion. Sayatan melintang pada peta turunan vertikal kedua menunjukkan jenis struktur geologi berupa sesar turun (**Gambar 2.5**).



Gambar 2. 5 Analisis *second vertical derivative* dan sayatan melintang berpotongan sesar pada data a) magnetik dan b) gayaberat satelit

Selain itu, pemodelan bawah permukaan dilakukan pada anomali residual untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan dengan kedalaman dangkal. Hasil model bawah permukaan menunjukkan adanya nilai suseptibilitas dan densitas yang berbeda pada model bawah permukaan. Lapisan dengan rentang nilai suseptibilitas relatif $-0,03 - -0,01$ SI dan nilai densitas relatif $-1 - 0$ gr/cm³ diduga sebagai breksi vulkanik. Lapisan di atasnya dengan rentang nilai suseptibilitas relatif $0,015 - 0,025$ SI dan nilai densitas relatif $0,5 - 0,1$ gr/cm³ diduga sebagai *tuffaceous breccia*. Lapisan termuda dengan rentang nilai suseptibilitas relatif $0,005 - 0,01$ SI dan nilai densitas relatif $0,2 - 0,4$ gr/cm³ diduga sebagai tuf lapilli. Terdapat lapisan berupa intrusi batuan basalt dengan nilai suseptibilitas $1,62 \times 10^{-1}$ SI dan nilai densitas 4 gr/cm³ (Gambar 2.6).



Gambar 2. 6 Model bawah permukaan pada data a) suseptibilitas dan b) densitas hasil *cross-gradient sequential joint inversion*

2.2 Teori Dasar

2.2.1 Teori dasar gayaberat

Metode gayaberat didasarkan oleh hukum Newton yang menyatakan bahwa terdapat gaya Tarik (F) antar dua partikel dengan massa m_1 dan m_2 yang dipisahkan oleh jarak ($\vec{r}$). Jika diasumsikan bahwa bumi berbentuk bola, maka gaya yang diberikan oleh bumi pada benda berbentuk bola dengan massa (m) yang terletak dipermukaan bumi dinyatakan dalam persamaan

$$\vec{F}_{12}(\vec{r}) = -G \frac{m_1(\vec{r}_1)m_2(\vec{r}_2)}{|\vec{r}|^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

dimana G adalah konstanta gravitasi sebesar $6.67 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$, M adalah massa bumi, dan R adalah jari-jari bumi. Parameter yang terukur dalam metode gayaberat adalah medan gayaberat atau percepatan gayaberat. Percepatan gayaberat merupakan besaran dari gayaberat dalam hukum II Newton per satuan massa. Jika didefinisikan g sebagai percepatan gayaberat, maka ketika percepatan hanya disebabkan oleh gaya tarik gravitasi bumi, dapat dinyatakan dalam persamaan

$$g(\vec{r}) = \frac{F_{12}(\vec{r})}{m_2(\vec{r}_2)} = -G \frac{m_1(\vec{r}_1)}{|\vec{r}|^2} \hat{r} \quad (2.2)$$

Percepatan gayaberat (g) adalah medan potensial dengan arah vertical yang selalu menuju pusat bumi. Percepatan gayaberat yang disebabkan oleh distribusi benda dengan massa tertentu di bawah permukaan, memiliki arah yang bervariasi terhadap sumbu vertikal. Arah percepatan gayaberat bergantung pada kedudukan atau posisi pengamatan terhadap benda anomali. Di permukaan bumi, perubahan percepatan gayaberat dapat diukur melalui pengukuran percepatan gayaberat. Benda anomali yang terdapat di bawah permukaan menyebabkan adanya perubahan percepatan gayaberat yang biasa disebut sebagai anomali gayaberat (Δg). Nilai anomali gayaberat jauh lebih kecil dari percepatan gravitasi bumi ($\Delta g < g$). Dimensi g adalah L/T^2 , yang dinyatakan dalam m/s^2 (dalam satuan SI) atau cm/s^2 (dalam satuan CGS). Dalam pengukuran geofisika, satuan normal untuk percepatan gravitasi adalah Gal, yang setara dengan $1 cm/s^2$. Karena variasi dalam percepatan gravitasi (g) sangat kecil, sering menggunakan milliGal (mGal) untuk keperluan eksplorasi, dimana $1 mGal = 0.001 Gal$ (Burger et al., 2023).

2.2.2 Densitas batuan

Hubungan antara percepatan gayaberat dengan densitas batuan adalah berbanding lurus (persamaan 2.4). Semakin tinggi nilai densitas suatu batuan, maka nilai percepatan gayaberat diarea tersebut semakin tinggi, dan juga sebaliknya semakin rendah nilai densitas suatu batuan, maka nilai percepatan gayaberat diarea tersebut semakin rendah. Survei gayaberat sensitif terhadap variasi densitas batuan, baik itu batuan yang dipermukaan maupun dibawah permukaan. Densitas batuan bervariasi tergantung pada material penyusunnya dan tingkat konsolidasi. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi densitas batuan diantaranya komposisi, umur, kedalaman, proses tektonik, fluida dalam pori (Reynolds, 1997).

Batuan sedimen umumnya memiliki densitas antara $1,92 g/cm^3$ - $2,5 g/cm^3$. Batuan beku umumnya memiliki densitas antara $2,53 g/cm^3$ - $2,79 g/cm^3$. Batuan metamorf umumnya memiliki densitas $2,6 g/cm^3$ - $2,74 g/cm^3$. Mineral logam umumnya memiliki densitas $2,45 g/cm^3$ - $7,32 g/cm^3$. Mineral sulfida umumnya memiliki densitas $3,75 g/cm^3$ - $8,1 g/cm^3$ dan mineral bukan logam umumnya memiliki densitas $1,19 g/cm^3$ - $4,47 g/cm^3$ (Telford, Geldart & Sheriff, 1990). Nilai densitas batuan menurut Telford yang terdapat di wilayah penelitian disajikan pada **Tabel 2.1**

Tabel 2. 1 Nilai densitas batuan yang ada di wilayah penelitian (Telford, Geldart & Sheriff, 2004; Deer, Howie & Zussman, 2013)

Jenis Batuan/Mineral	Nilai Densitas	
	Rentang (g/cm ³)	Rata-rata (g/cm ³)
Olivin	3,22-3,5	3,4
Bassal	2,70-3,30	2,99
Andesit	2,4- 2,8	2,61
Lava	2,80-3,00	2,90
Amfibol	2,9 -3,04	2,96
Piroklastik	1,2 – 2,6	2,2

2.2.3 Geoid dan Elipsoid Referensi

Setiap tempat dipermukaan bumi memiliki nilai gayaberat yang bervariasi, sehingga permukaan yang memiliki nilai energi potensial yang sama (permukaan akuipotensial) menjadi halus tetapi tidak rata. Salah satu permukaan ekuipotensial yang penting adalah geoid, yaitu permukaan laut yang tidak dipengaruhi arus laut, cuaca dan pasang surut. Bentuk geoid dipengaruhi oleh massa dibawahnya. Bentuk geoid akan menonjol diatas area dengan massa lebih besar (pegunungan) dan cekung di atas area dengan massa lebih kecil (lembah). Setiap titik gayaberat harus tegak lurus terhadap permukaan geoid, sehingga dapat mendefenisikan arah vertikal dan horizontal di setiap titik.

Bentuk geoid berfluktuasi, sehingga tidak praktis untuk representasi geodetik, maka digunakan elipsoid halus yang menjadi *best-fit* untuk geoid. Elipsoid ini dikenal sebagai elipsoid referensi atau *spheroid reference* yang merupakan bentuk geometris ideal yang digunakan sebagai dasar sistem koordinat geografis. Pada tahun 1980, *International Association of Geodesy (IAG)* mengadopsi nilai elipsoid referensi yang mengarah pada medan referensi saat ini yaitu *World Geodetic System 1984 (WGS84)* yang dituliskan dalam persamaan (2.3) (Blakely, 1996) :

$$g_0 = 978032,67714 \left[\frac{1 + 0,00193185138639 \sin^2(\lambda)}{\sqrt{1 - 0,00669437999013 \sin^2(\lambda)}} \right] \quad (2.3)$$

Koreksi lintang (*latitude correction*) menggunakan dihitung dengan menggunakan **persamaan 2.3**, dengan g_0 adalah gravitasi normal atau gravitasi teoritis dan λ adalah sudut lintang geosentris (Blakely, 1996).

2.2.4 Global Gravity Model plus (GGMPlus)

GGMPlus merupakan gambaran gayaberat beresolusi tinggi yang didasarkan pada tiga komponen utama, yaitu gayaberat satelit GOCE/GRACE (yang memiliki skala spasial sekitar ~10.000 hingga ~100 km dan ketinggian orbit adalah 485 km-300 km), EGM2008 (yang memiliki skala spasial sekitar ~100 hingga ~10 km) dan gayaberat topografi yaitu efek gayaberat yang dihasilkan dari model medan permukaan yang telah difilter menggunakan *high pass filter* (yang memiliki skala spasial sekitar ~10 km hingga ~250 m).

Gabungan dari ketiga komponen tersebut menghasilkan model resolusi tinggi yang disebut GGMPlus (Global Gravity Model Plus). Model GGMPlus digitung dengan metode yang

konsisten secara global dan dapat menghasilkan resolusi hingga 200 meter. Namun, model yang dihasilkan tergantung pada ketersediaan data pengukuran gayaberat lapangan disuatu wilayah. Ketersediaan data gayaberat lapangan yang sedikit menyebabkan akurasi model yang menurun sekitar 8 – 23 mGal terutama di wilayah Asia, Afrika dan Amerika Selatan (Hirt et al., 2012).

2.2.5 Koreksi Data Gayaberat Satelit

2.2.5.1 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Koreksi udara bebas adalah koreksi yang secara langsung menghitung penurunan percepatan gayaberat akibat jarak dari pusat bumi tanpa memperhitungkan kepadatan material antara elevasi pengukuran dan ellipsoid (Lowrie, William, & Andreas Fichtner. 2007). Persamaan (2.4) yang digunakan untuk menghitung koreksi udara bebas (Featherstone, 1995).

$$g_{UB}(x, y, z) = \frac{2g_\phi}{a}(1 + f + m - 2f\sin^2\phi)H - \frac{3g_\phi}{a^2}H^2 \quad (2.4)$$

dengan $g_{FA}(x, y, z)$ adalah nilai koreksi udara bebas, f adalah kepepatan ($\frac{a-b}{a}$), m adalah parameter geodetik ($\frac{\omega^2 a^2 b^2}{GM}$), a adalah sumbu semi mayor (6378137,0 m), b adalah sumbu semi minor (6356752,3142 m), ω adalah kecepatan angular bumi ($7292115,0 \times 10^{-11}$ rad/s), GM adalah konstanta gayaberat geosentris ($3986004,418 \text{ m}^3/\text{s}^2$), ϕ adalah sudut lintang geodetik dan H adalah ketinggian diatas bidang geoid (m). Nilai percepatan gayaberat yang terkoreksi udara bebas dinyatakan dalam persamaan (2.5).

$$g_{TUB}(x, y, z) = g_{obs}(x, y, z) - g_\phi(x, y, z) + g_{UB}(x, y, z) \quad (2.5)$$

dengan $g_{TUB}(x, y, z)$ adalah nilai percepatan gayaberat yang terkoreksi udara bebas, $g_{obs}(x, y, z)$ adalah nilai percepatan gayaberat obeservasi, $g_\phi(x, y, z)$ adalah nilai percepatan gayaberat lintang atau gayaberat normal.

2.2.5.2 Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

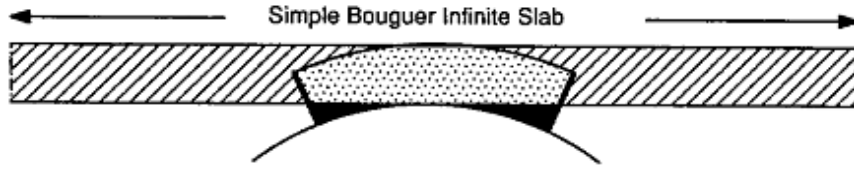
Koreksi Bouguer adalah koreksi yang menghitung percepatan gravitasi dari massa antara lokasi pengamatan dengan tingkat datum survei (Hinze, von Frese & Saad, 2013). Pengukuran bouguer digunakan untuk memperhitungkan semua faktor yang menyebabkan variasi densitas. Massa batuan diasumsikan berbentuk *infinite slab* dengan ketebalan h dan densitas rata-rata ρ (Blakely, 1996). Koreksi dalam bentuk *infinite slab* dikenal juga dengan Bullard A yang dapat dituliskan dalam bentuk persamaan (2.9) (LaFehr, 1991).

$$g_{B(A)}(x, y, z) = 2\pi\rho Gh = 0,04192\rho H \quad (2.6)$$

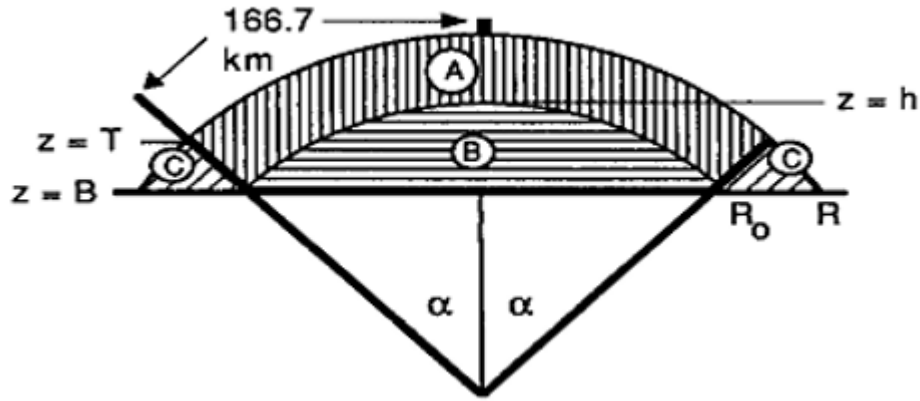
dengan $g_{B(A)}(x, y, z)$ adalah nilai koreksi Bullard A, ρ adalah densitas batuan bouguer (kg/m^3), G adalah konstantas gayaberat ($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2$) dan H adalah ketinggian diatas bidang geoid (m)

Koreksi tambahan diperlukan untuk mengkonversi *infinite slab* (**Gambar 2.7**) pada perhitungan Bullard A kedalam bentuk *spherical cap* (**Gambar 2.8**). Koreksi tersebut disebut Bullard B atau *curvature* yang dituliskan dalam bentuk persamaan (2.7) (LaFehr, 1991).

$$g_{B(B)}(x, y, z) = 2\pi\rho G(\mu h - \lambda R) \quad (2.7)$$



Gambar 2. 7 *Infinite Slab* pada koreksi Bouguer Bullard A (Lafer, 1991b)



Gambar 2. 8 *Spherical cap* pada koreksi Bullard B (Lafer, 1991b)

dimana

$$\begin{aligned} \mu &= \left(\frac{1}{3}\eta^2 - \eta\right); \quad \eta = \frac{h}{R}; \\ \lambda &= \frac{1}{3} \left\{ (d + f\delta + \delta^2) [(f - \delta)^2 + k]^{\frac{1}{2}} + p + m \log_e \frac{n}{f - \delta + [(f - \delta)^2 + k]^{\frac{1}{2}}} \right\}; \\ \delta &= \frac{R_0}{R}; \quad d = 3\cos^2\alpha - 2; \quad f = \cos\alpha; \\ k &= \sin^2\alpha; \quad p = -6\cos^2\alpha \sin \frac{\alpha}{2} + 4\sin^3 \frac{\alpha}{2}; \\ m &= -3\sin^2\alpha \cos\alpha; \quad n = 2\left(\sin \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2}\right) \end{aligned}$$

dimana $g_{B(B)}(x, y, z)$ adalah nilai anomali Bouguer Bullard B, R adalah jari jari satelit ke bumi, h merupakan ketinggian stasiun yang diukur dari jari-jari normal permukaan laut (R_0), μ dan λ merupakan koefisien curvature.

Densitas batuan memiliki pengaruh dalam penentuan nilai koreksi *bouguer*. Penentuan nilai densitas batuan dapat diasumsikan melalui metode Parasnis. Metode Parasnis digunakan untuk menentukan nilai densitas batuan dari suatu himpunan data dengan menganggap anomali Bouguer ($g_{B(A)}(x, y, z)$) sebagai kesalahan acak dengan nilai rata-rata nol. Nilai tersebut dapat ditentukan dengan memplot $g_{TUB}(x, y, z)$ dengan $(2\pi GH + 2\pi G(\mu h - \lambda R) - 2GA^2 \left[\frac{r^2 - r_1 + \sqrt{r_1^2 + z^2} - \sqrt{r^2 + z^2}}{(r^2 - r_1^2)} \right])$, yang dimana $g_T(x, y, z)$ merupakan percepatan gravitasi yang terkoreksi medan.

2.2.5.3 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi Medan adalah gaya tarik gayaberat di titik gayaberat yang dihasilkan oleh semua bukit diatas lapisan *bouguer* dan kekurangan massa di lembah yang ditempati oleh lapisan tersebut. Koreksi ini diperoleh dengan menentukan massa bukit dan defisiensi massa lembah menggunakan informasi topografi serta densitas Bouguer. Koreksi Terrain memperhitungkan massa diatas titik gayaberat yang dimana massa tersebut tidak diperhitungkan dalam koreksi bouguer (Dentith & Mudge, 2014). Perhitungan koreksi terrain dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.8) (Kane, 1962).

$$g_{TC} = 2G\rho A^2 \left[\frac{r_2 - r_1 + \sqrt{r_1^2 + z^2} - \sqrt{r_2^2 + z^2}}{(r_2^2 - r_1^2)} \right] \quad (2.8)$$

Dimana, A merupakan panjang sisi horizontal prisma yang digunakan, r_2 merupakan radius luar (m), r_1 merupakan radius dalam (m), dan z adalah perbedaan ketinggian rata-rata kompartmen dan titik pengukuran.

2.2.6 Analisa Spektrum (*Power Spectrum*)

Analisis spektrum digunakan untuk memahami distribusi frekuensi spasial dari anomali bawah permukaan. Fitur kedalaman sumber atau struktur geologi dapat diidentifikasi dari pola frekuensi yang dihasilkan. Analisis spektrum dilakukan dengan mengubah fungsi data dari domain spasial (bergantung pada posisi x, y) menjadi domain bilangan gelombang (bergantung pada frekuensi) menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) (Blakely, 1996).

Energi spektrum adalah representasi dua dimensi yang menunjukkan besar energi yang terkandung dalam setiap bilangan gelombang. Spektrum daya (*power spectrum*) menggambarkan bagaimana energi spektrum anomali tersebar terhadap frekuensi (f) atau bilangan gelombang (k). Bentuk spektrum daya sumber gayaberat yang tersebar secara acak, mengikuti fungsi eksponensial yang menurun seiring dengan meningkatnya bilangan gelombang. Hal tersebut ditunjukkan melalui persamaan (2.9) (Hinze et al, 2013).

$$PS(k) = Ce^{-4\pi zf} = Ce^{-2zk} \quad (2.9)$$

Energi *Power Spectrum* (PS) akan berkurang secara eksponensial, tergantung pada kedalaman rata-rata (z) dari sumber. Jika sumber anomali semakin dalam, maka penurunan energi terhadap bilangan gelombang (k) akan semakin tajam. Persamaan 2.9, jika menggunakan logaritma natural maka akan berubah bentuk menjadi persamaan garis lurus yang dituliskan dalam persamaan (2.10) (Hinze et al, 2013).

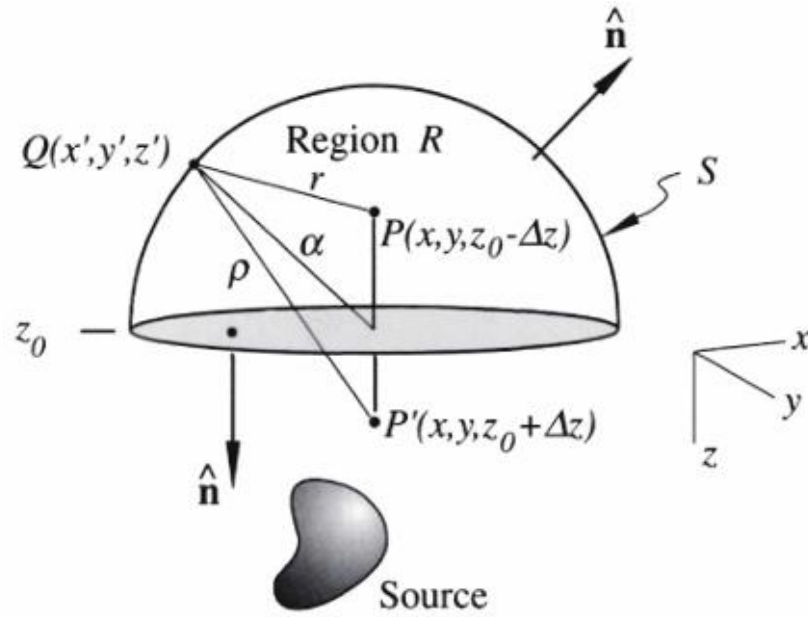
$$\ln[PS(k)] = \ln[C] - 4\pi zf = \ln[C] - 2zk \quad (2.10)$$

dengan f adalah frekuensi yang merupakan hasil dari sepersatuan panjang gelombang ($1/\lambda$) dengan satuan berupa cycle/unit distance, k adalah fungsi bilangan gelombang $k = 2\pi f = 2\pi/\lambda$ dinyatakan dalam radian/unit distance, dengan C adalah konstanta. Kedalaman rata-rata sumber dapat dihitung melalui *slope* grafik terhadap frekuensi yang dituliskan dalam persamaan (2.11) (Hinze et al, 2013).

$$z(f) = |slope|/4\pi \quad (2.11)$$

2.2.7 Pemisahan Anomali

Pada data gayabarat, anomali gayabarat dengan panjang gelombang besar yang disebabkan oleh fitur geologi yang dalam disebut sebagai anomali regional. Anomali dengan panjang gelombang yang lebih pendek yang berasal dari fitur geologi yang lebih dangkal disebut dengan anomali residual (Reynolds, 1997). Metode kontinuasi keatas (*upward continuation*) merupakan metode matematis yang digunakan untuk mengubah percepatan potensial yang diukur pada suatu permukaan menjadi percepatan yang akan diukur pada permukaan lain yang lebih jauh dari semua sumber. Prinsip utama dari *upward continuation* adalah suatu nilai potensial (U) dapat dihitung di sembarang titik (P dan P') dalam suatu permukaan (S) yang mengelilingi wilayah (R) tersebut (**Gambar 2.9**).



Gambar 2. 9 Ilustrasi *upward continuation* (Blakely, 1996)

Persamaan (2.12) digunakan untuk menghitung nilai potensial disuatu titik diatas permukaan datar atau horizontal (Blakely, 1996).

$$U(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x', y', z_0)}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + \Delta z^2]^{3/2}} \partial x' \partial y' \quad (2.12)$$

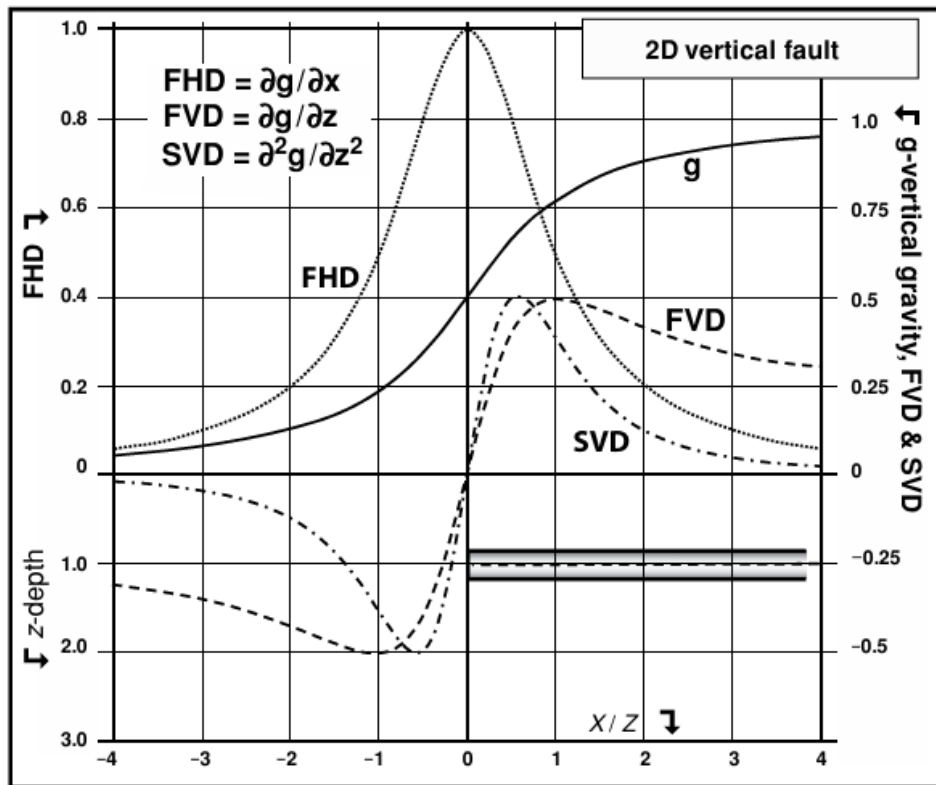
dimana $\Delta z > 0$, dengan $U(x, y, z_0 - \Delta z)$ adalah nilai potensial hasil kontinuasi, $U(x', y', z_0)$ merupakan nilai potensial observasi, dan Δz adalah ketinggian pengangkatan. Penggunaan persamaan dapat disederhanakan dengan menggunakan domain Fourier. Pada domain Fourier, *upward continuation* dilakukan dengan mengalikan spektrum Fourier dari data dengan faktor eksponensial tertentu yang merepresentasikan perubahan ketinggian tanpa perlu melakukan integrasi secara langsung, yang dinyatakan dalam persamaan (2.13) (Blakely, 1996).

$$F[U_U] = F[U] e^{-\Delta z |k|} \quad (2.13)$$

dimana $F[U_U]$ merupakan transformasi Fourier dari *upward continuation* dan k merupakan bilangan gelombang.

2.2.8 Analisis Struktural

Filter turunan digunakan untuk memperkuat nilai anomali gayaberat yang memiliki bilangan gelombang tinggi dan panjang gelombang pendek, dan untuk mengidentifikasi konfigurasi sumber. Filter turunan vertikal digunakan untuk meningkatkan keterlihatan anomali yang berasal dari sumber yang dangkal, sedangkan filter turunan horizontal terutama digunakan untuk menentukan tepi dari sumber anomali yang berskala luas. Karakteristik dari turunan-turunan profil anomali gayaberat yang berasal dari suatu anomali bawah permukaan (**Gambar 2.10**). Kurva turunan horizontal dari suatu anomali kontak vertikal mencapai maksimum, dan kurva turunan vertikal akan menunjukkan kontur nol ketika berasosiasi dengan anomali kontak vertikal (Blakely, 1996).



Gambar 2. 10 Ilustrasi profil anomali gayaberat (g), *First Horizontal Derivative* (FHD), dan *Second Vertical Derivative* (SVD) pada anomali patahan vertikal (Blakely, 1996)

Persamaan (2.14) digunakan untuk menghitung turunan horizontal dari suatu anomali gayaberat.

$$HD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (2.14)$$

dimana $\frac{\partial g}{\partial x}$ dan $\frac{\partial g}{\partial y}$ adalah turunan pertama nilai gayaberat pada masing masing sumbu x dan y.

Persamaan (2.15) digunakan untuk menghitung turunan vertical kedua dari suatu anomali gayaberat.

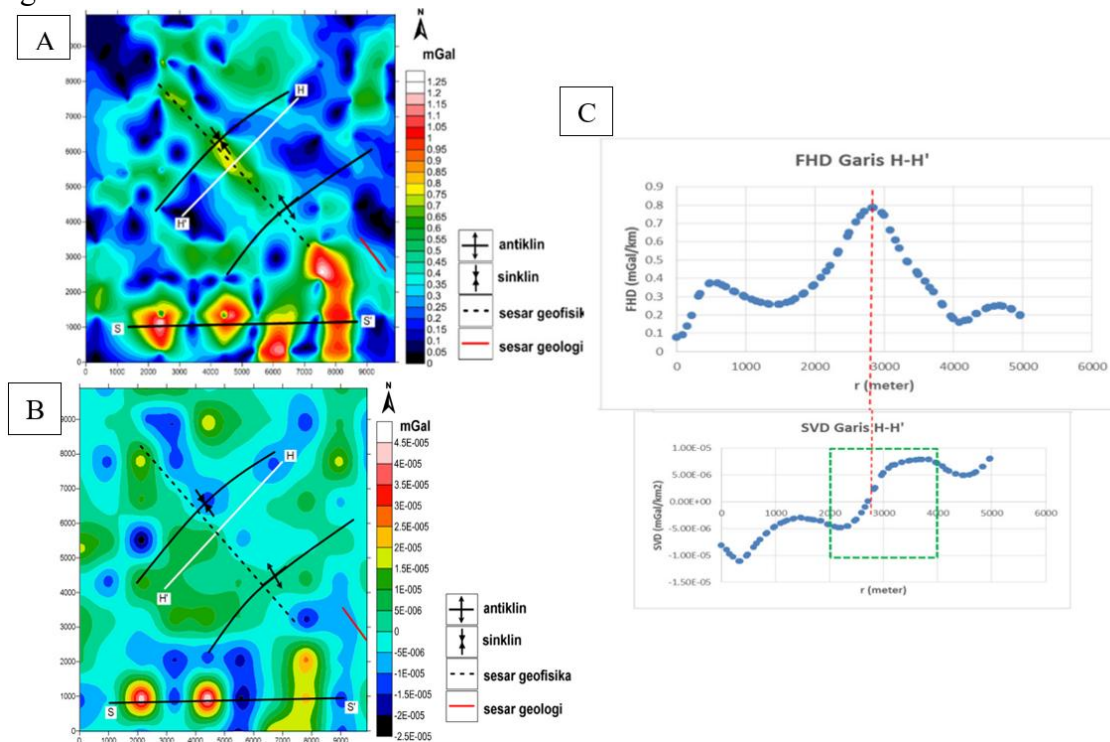
$$SVD = \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}\right) \quad (2.15)$$

dimana $\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 g}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 g}{\partial z^2}$ merupakan turunan kedua nilai gayaberasat pada masing masing sumbu x, y dan z. Pendekatan matematis yang digunakan untuk mengekstrak turunan vertikal kedua dari nilai rata-rata pada berbagai jarak dari titik pengukuran telah banyak dikembangkan seperti Elkins (1951), Rosenbach (1952), dan Henderson dan Zeits (1949). Pada penelitian ini mengaplikasikan pendekatan matematis yang dikembangkan oleh Elkins (1951), dengan menggunakan operator matriks 5 x 5 (Tabel 2.2).

Tabel 2. 2 Tabel operator Elkins (1945) sebagai filter SVD

0	-0.0833	0	-0.0833	0
-0.0833	-0.0667	-0.0334	-0.0667	-0.0833
0	-0.0334	1.0668	-0.0334	0
-0.0833	-0.0667	-0.0334	-0.0667	-0.0833
0	-0.0833	0	-0.0833	0

Rosid & Siregar, (2017) melakukan penelitian terkait analisis struktur menggunakan sayatan pada kurva turunan horizontal dan turunan vertikal kedua (**Gambar 2.11**). Peta kontur turunan horizontal dan turunan vertikal kedua disayat sepanjang arah timur laut – barat daya yang ditunjukkan oleh garis H-H'. Hasilnya menunjukkan kurva turunan horizontal menunjukkan nilai maksimum dan titik nol pada kontur turunan vertikal kedua yang mengindikasikan keberadaan sesar.



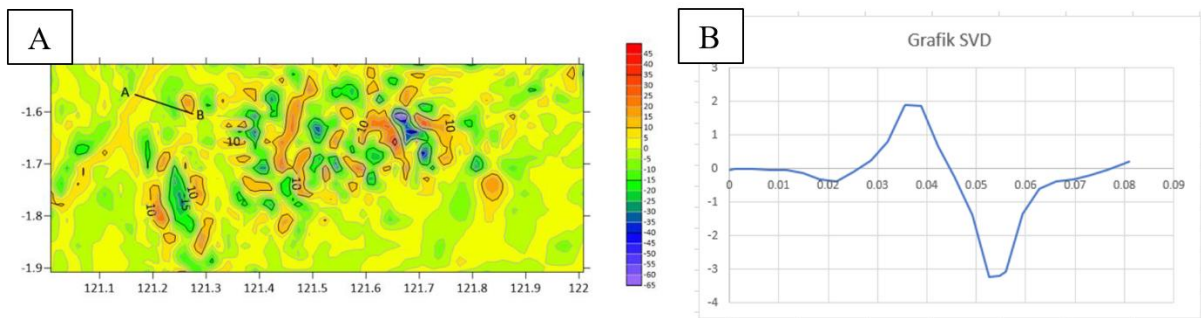
Gambar 2. 11 Analisis struktur menggunakan pada a) peta anomali turunan horizontal, b) peta anomali turunan vertikal kedua dalam bentuk c) kurva 1 dimensi turunan horizontal dan turunan vertikal kedua (Rosid and Siregar, 2017)

Fitriani et al. (2020) melakukan analisis terhadap anomali turunan vertikal kedua untuk menentukan jenis sesar. Sesar normal (*normal fault*) dapat diketahui melalui perbedaan nilai maksimum turunan vertikal kedua, dimana nilai maksimumnya lebih besar dibandingkan nilai

minimumnya. Sedangkan sesar naik (*reverse fault*) dapat diketahui melalui ketika nilai maksimum turunan vertikal kedua lebih kecil dari nilai minimumnya. Hal ini dinyatakan dalam persamaan (2.16).

$$\begin{aligned} \text{Sesar Normal} &= \left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right)_{maks} > \left| \left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right) \right|_{min} \\ \text{Sesar Naik} &= \left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right)_{maks} < \left| \left(\frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right) \right|_{min} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Hasilnya menunjukkan analisis turunan vertikal kedua dengan operator matriks elkins dapat menunjukkan jenis sesar naik, dimana nilai maksimum turunan vertikal kedua lebih kecil dari nilai minimumnya (**Gambar 2.12**).



Gambar 2. 12 Analisis jenis sesar pada a) peta turunan vertikal kedua dalam bentuk b) kurva 1 dimensi peta turunan vertikal kedua pada sayatan A-B (Fitriani et al., 2020)

2.2.9 Pemodelan 3 Dimensi

Model merupakan representatif kondisi geologi yang berada di bawah permukaan oleh benda anomali dengan nilai fisis dan geometri tertentu. Pemodelan adalah proses mengevaluasi model dan parameter model berdasarkan data yang diamati di permukaan bumi. Dalam pemodelan geofisika, dikenal tiga jenis model, yaitu model 2D, model 2.5D dan model 3D. Selain itu, pemodelan juga terbagi menjadi dua, yaitu pemodelan ke depan (*forward modelling*) dan pemodelan inversi (*inverse modelling*). Pemodelan inversi data gravitasi pada penelitian dilakukan secara 3D. Pada model 3D, memiliki sumbu X, Y, dan Z atau dapat dikatakan model yang memiliki komponen ruang atau volume. Secara visual, objek yang ditampilkan pada model 3D dapat dilihat dari arah mana saja.

Singular Value Decomposition merupakan salah satu inversi yang tepat untuk analisis sinyal pada matriks real ataupun matriks kompleks. Penelitian ini menggunakan metode inversi non linier khususnya dengan metode *singular value decomposition* dan inversi Occam. Analisis dengan *singular value decomposition* menghasilkan solusi dari persamaan meskipun matriks koefisien yang terbentuk bukan matriks yang tidak mempunyai invers. Metode *singular value decomposition* mempunyai kelebihan dapat menentukan solusi sistem persamaan linier walaupun sistem persamaan linear tidak mempunyai pemecahan. Solusi sistem persamaan linear yang diperoleh merupakan solusi pendekatan terbaik yang dirumuskan dalam persamaan (2.17).

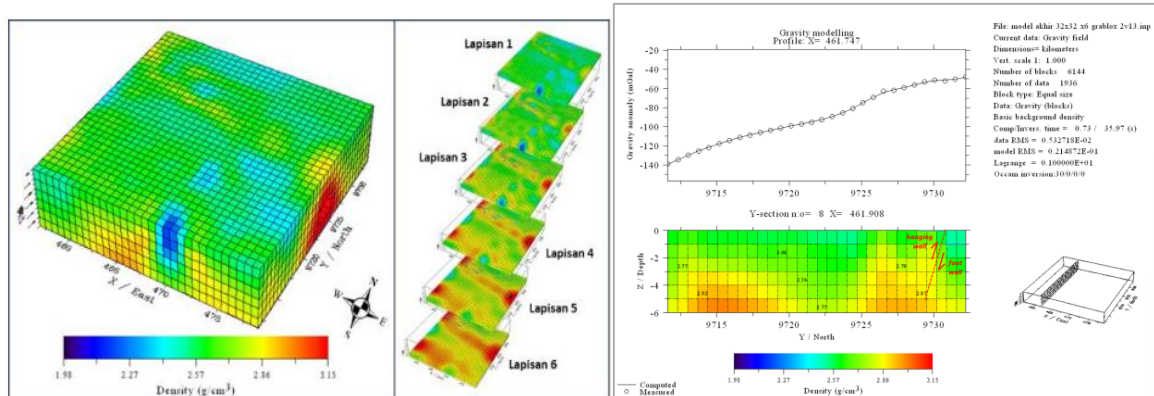
$$A = USV^T \quad (2.17)$$

dimana A merupakan matriks asal, U merupakan matriks singular kiri yang juga singular vector dari matriks A , S merupakan matriks diagonal yang menyimpan singular value, dan V^T merupakan transpose dari matriks singular kanan yang merupakan *singular vector* dari matriks A . Metode inversi occam dilakukan untuk mendapatkan hasil yang maksimal antara data hasil pengukuran dan data hasil perhitungan sehingga dapat memperkecil nilai kesalahan antara hasil pengukuran dan hasil perhitungan yang dirumuskan dalam persamaan (2.18).

$$U = ||\delta m||^2 + \mu^{-1}\{||Wd - WGm||^2 - X^2\} \quad (2.18)$$

dimana $||\delta m||^2$ merupakan merupakan kekasaran (roughness), μ^{-1} merupakan Lagrange multiplier, $||Wd - WGm||^2$ merupakan *misfit* dan X^2 adalah error. Metode inversi Occam bertujuan untuk memperkecil tingkat kekasaran dari model yang telah diproses. Metode inversi Occam dapat memberikan nilai lebih jika dibandingkan dengan menggunakan metode *Singular Value Decomposition*

Sudrajad et al. (2024) melakukan pemodelan 3 dimensi menggunakan inversi Occam untuk mengetahui kondisi bawah permukaan dalam mengidentifikasi struktur geologi. Hasilnya menunjukkan jika model 3 dimensi struktur bawah permukaan menggunakan inversi Occam memiliki kesesuaian dengan kondisi geologi dengan tingkat presisi model yang baik yang ditandai dengan error data sebesar 0,53%. Struktur geologi yang ditemukan diwilayah penelitian merupakan jenis sesar normal dengan orientasi barat-timur (**Gambar 2.13**)

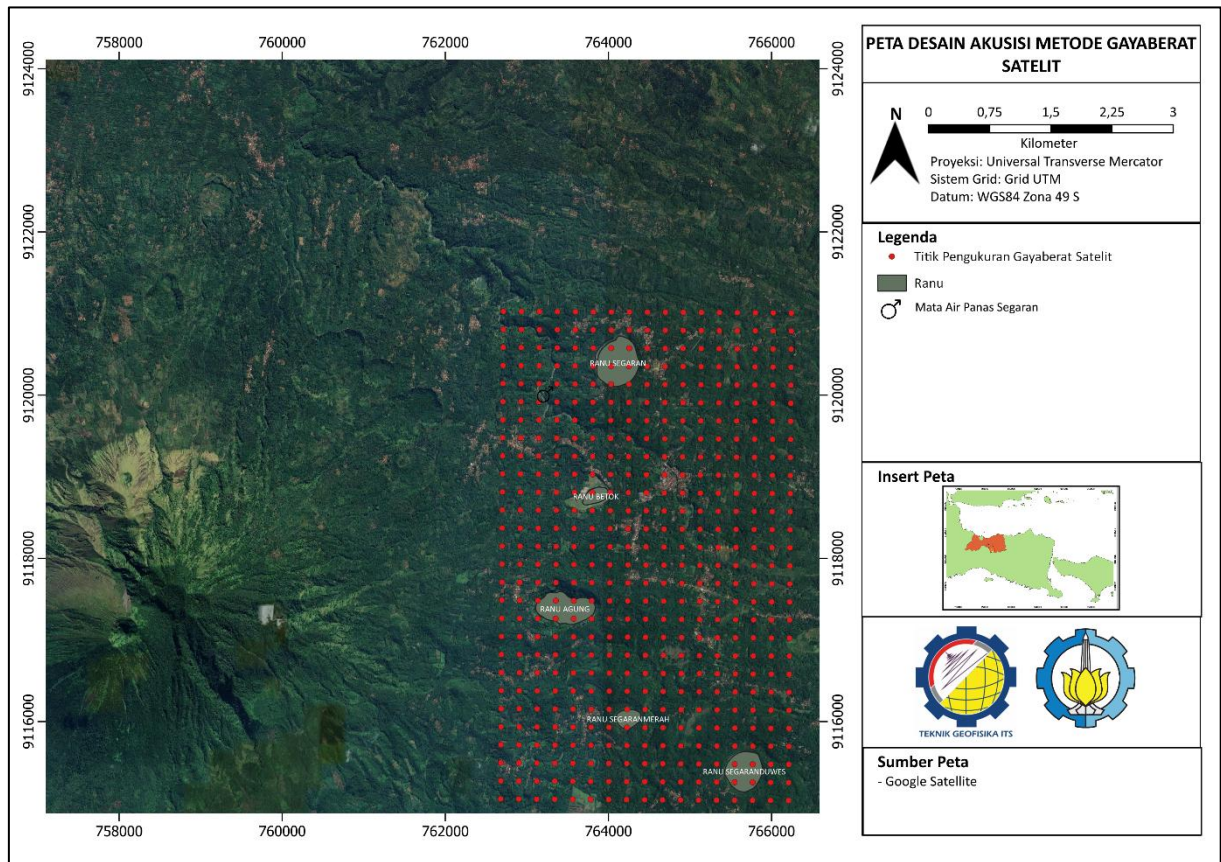


Gambar 2. 13 Analnsis kondisi bawah permukaan menggunakan a) model 3 dimensi dan b) sayatan melintang utara-selatan berdasarkan model 3 dimensi (Sudrajad et al., 2024)

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Lokasi dan Data Penelitian

Secara administratif, lokasi penelitian berada pada Kecamatan Tiris, Kabupaten Probolinggo. Area penelitian mencakup beberapa Desa di Kecamatan Tiris diantaranya : Desa Segaran, Desa Ranugedang, Desa Ranuagung, Desa Tiris, Desa Andungsari, Desa Tlogosari, dan Desa Tlogoargo. Pada lokasi yang sama digunakan juga gayaberat satelit yang memiliki ukuran 3 km x 6 km dengan jarak antar titik pengukuran 200 m pada 477 titik pengukuran. Gayaberat satelit yang digunakan merupakan gayaberat satelit GGMPPlus yang memiliki resolusi hingga 200 meter, dan akurasi model sekitar 8 – 23 mGal.



Gambar 3. 1 Peta desain akuisisi gayaberat satelit (GGMPPlus) pada lokasi penelitian

3.2 Peralatan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan data sekunder gayaberat satelit (GGMPPlus) yang diperoleh dari website <https://ddfe.curtin.edu.au/models/GGMplus/>. Adapun peralatan yang digunakan dalam pengerjaan penelitian ini ditampilkan dalam **Tabel 3.1**.

Tabel 3. 1 Peralatan dalam pengolahan data gayaberat

No	Alat	Keterangan
1	Matlab R2025a	Pengambilan data gayaberat satelit (GGMPPlus)
2	Software gayaberat	Pengolahan data gayaberat satelit

3	<i>Software</i> pemetaan	Pengambilan area radius terrain
4	QGIS 3.28.7	Pengolahan seluruh peta
5	<i>Software</i> interpolasi	Analisis <i>gridding</i> dan variogram
6	<i>Software</i> kelurusan	Pembuatan diagram rose kelurusan (<i>lineament</i>)
7	Grablox 6.4	Pemodelan 3 dimensi
10	Bloxxer 6.4	Visualisasi hasil pemodelan 3 dimensi

3.3 Alur Penelitian

A. Kajian Literatur

Kajian literatur dilakukan dengan tujuan mempelajari terkait kondisi geologi regional lokasi penelitian, dan penerapan eksplorasi gayaberat dalam mengidentifikasi struktur geologi dengan mengumpulkan bahan pustaka berupa buku, jurnal ilmiah, dan karya tulis. Tujuan lain dilakukan kajian literatur agar meminimalisir kurangnya pengetahuan dasar objek penelitian ketika melakukan pengambilan data, pengolahan dan interpretasi.

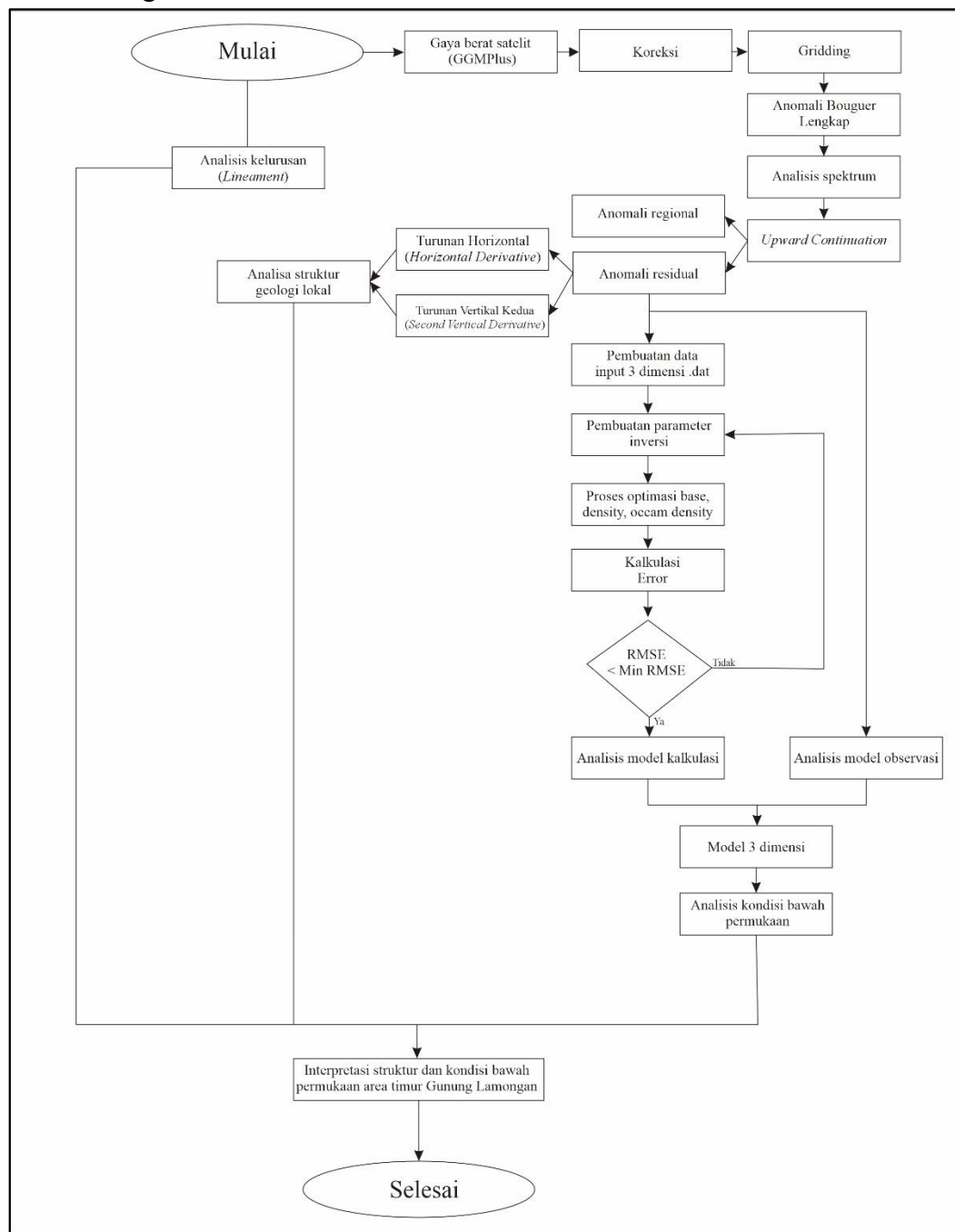
B. Pengolahan Data Gayaberat

Langkah pertama untuk pengolahan data gayaberat satelit adalah mengunduh data dari website <https://ddfe.curtin.edu.au/models/GGMplus/>. Data tersebut terdiri dari koordinat UTM X, koordinat UTM Y, geoid, dan nilai gayaberat satelit. Setelah memperoleh data raw selanjutnya melakukan koreksi data. Output akhir dari koreksi data adalah mendapatkan nilai anomali Bouguer lengkap. Nilai anomali Bouguer lengkap selanjutnya dilakukan proses *gridding* menggunakan *software gridding*. Setelah melalui tahapan *gridding*, dilakukan analisis sinyal untuk mengetahui estimasi kedalaman anomali regional dan anomali residual. Langkah berikutnya adalah pemisahan anomali regional dan residual menggunakan filter kontinuitas keatas (*upward continuation*). Anomali residual yang diperoleh dari proses pemisahan anomali, selanjutnya dianalisis kuantitatif menggunakan turunan horizontal (*horizontal derivative*) dan turunan vertikal kedua (*second vertical derivative*).

Analisis *lineament* dilakukan pada data DEM (*Digital Elevation Model*) yang diperoleh dari situs <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/> pada daerah penelitian dengan resolusi 8 m, kemudian diolah menggunakan perangkat lunak QGIS 3.28.7 secara manual. Penarikan kelurusan dilakukan secara manual dengan menggunakan *azimuth* 0°, 45°, 180°, dan 225°, dengan nilai *altitude* 45 meter. Penarikan dilakukan dengan mengubah data DEM yang berupa elevasi menjadi *hillshade* untuk memudahkan melihat kelurusan dari empat arah. Besar *azimuth* pada setiap kelurusan kemudian diplot pada diagram rose untuk mengidentifikasi tren orientasi *azimuth* pada area Tiris.

Terakhir adalah melakukan pemodelan 3D menggunakan perangkat lunak Grablox 6.4 dan Bloxxer 6.4. Tahapan pertama yang dilakukan adalah membuat data input dari peta anomali Bouguer residual dalam bentuk .dat file. Kemudian, membuat parameter yang digunakan dalam pemodelan 3 dimensi pada perangkat lunak Grablox 6.4. Parameter tersebut mencakup luasan area penelitian (x dan y), kedalaman (z) yang digunakan, ukuran blok model (dx, dy, dz) dan dimensi blok model masing masing sumbu x, y dan z. Langkah selanjutnya adalah melakukan 3 jenis optimasi secara bertahap. Optimasi yang dimaksud mencakup optimasi *base*, optimasi

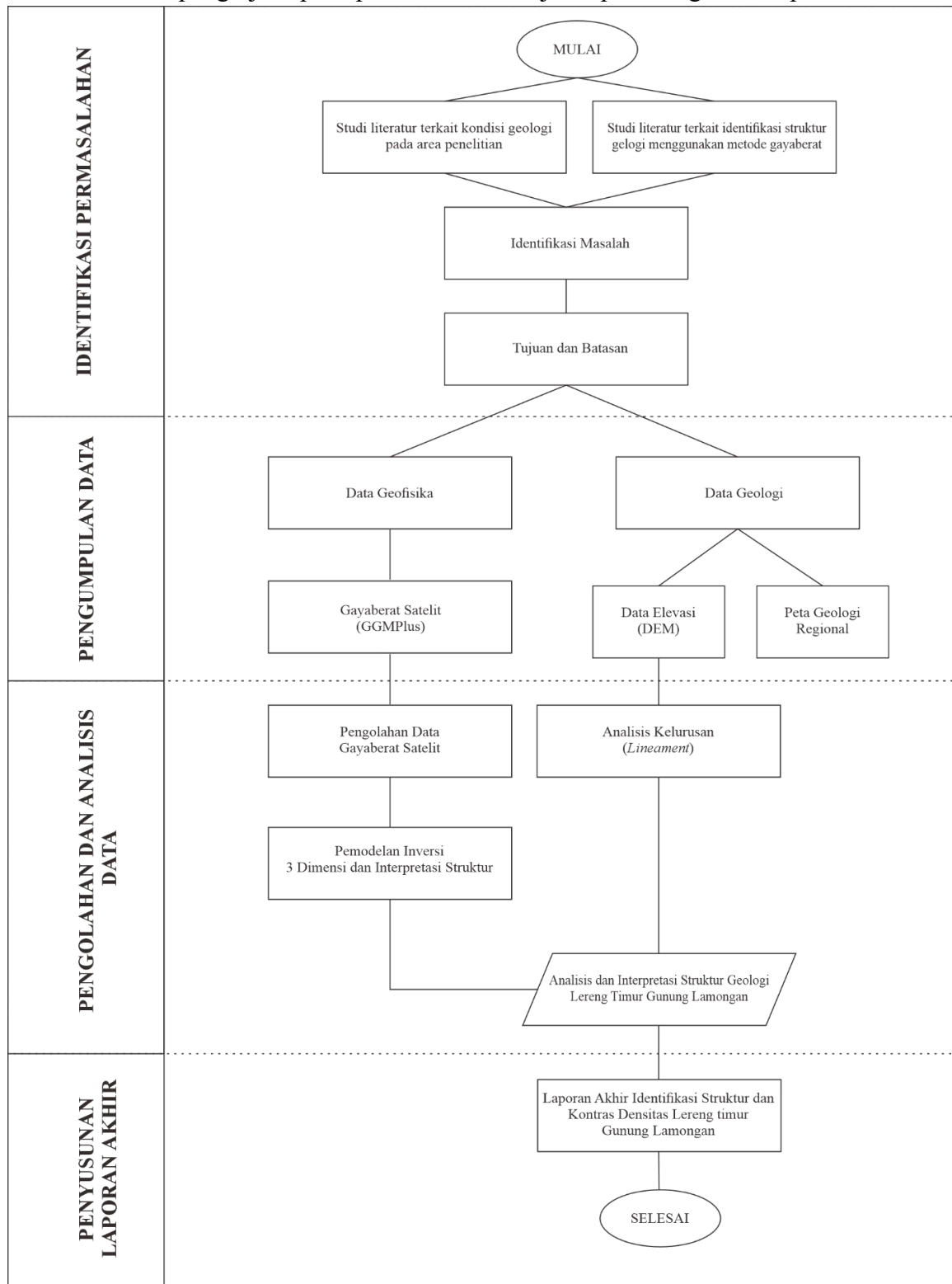
density, dan optimasi *occam density*. Pada tahapan terakhir dari proses optimasi akan menampilkan bentukan model awal sebagai data pengukuran (data input berupa peta anomali residual), model perhitungan, dan model selisih antara data pengukuran dan data perhitungan. Langkah selanjutnya adalah menentukan model yang akan dianalisis dengan melihat nilai RMS (*Root Mean Square*) *error* pada data dan model. Jika *RMS error* memiliki nilai yang kecil, maka data dan model dapat dipercaya dan akan digunakan untuk proses analisis. Jika *RMS error* memiliki nilai yang besar, maka harus dikembalikan ke proses pembuatan parameter gayaberat yang sesuai. Visualisasi model dalam bentuk 3 dimensi dan sayatan melintang sumbu x, y dan z menggunakan perangkat lunak *Bloxer 6.4*. Alur pengolahan disajikan dalam gambar **Gambar 3.2** sebagai berikut.



Gambar 3. 2 Alur pengolahan data gayaberat

3.4 Diagram Penelitian

Secara umum alur pengerjaan pada penelitian ini disajikan pada diagram alir pada **Gambar 3.3**



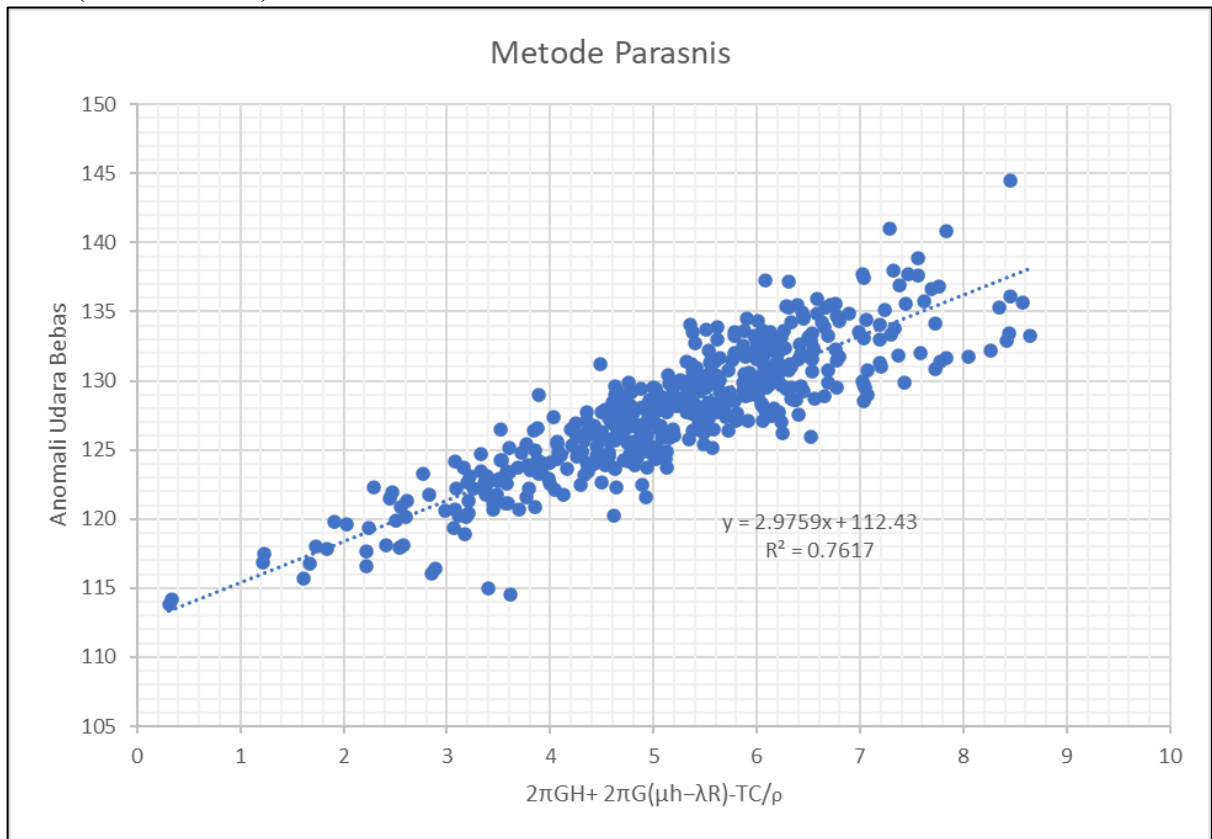
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Estimasi Densitas

Estimasi densitas dilakukan guna memperoleh nilai densitas yang mendekati nilai sebenarnya. Area penelitian didominasi oleh batuan beku yang umumnya memiliki rentang densitas antara 2,0 gr/cm³ hingga 3,1 gr/cm³ (Telford, Geldart & Sheriff, 1990). Rentang ini dijadikan acuan dalam proses estimasi densitas pada area penelitian. Estimasi densitas dilakukan menggunakan metode Parasnis (Parasnis, 1986; Parasnis & Cook, 1951), di mana nilai $(2\pi GH + 2\pi G(\mu h - \lambda R) - \frac{TC}{\rho})$ dibandingkan terhadap nilai anomali udara bebas dan diplot dalam bentuk grafik. Gradien dari grafik tersebut mencerminkan estimasi nilai densitas di area penelitian (Parasnis, 1951). Berdasarkan **Gambar 4.1**, diperoleh nilai gradien sebesar 2,9759 dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7617. Dengan demikian, estimasi densitas area penelitian adalah sebesar 2,9759 gr/cm³, yang masih berada dalam kisaran densitas batuan beku (Telford, 1994).

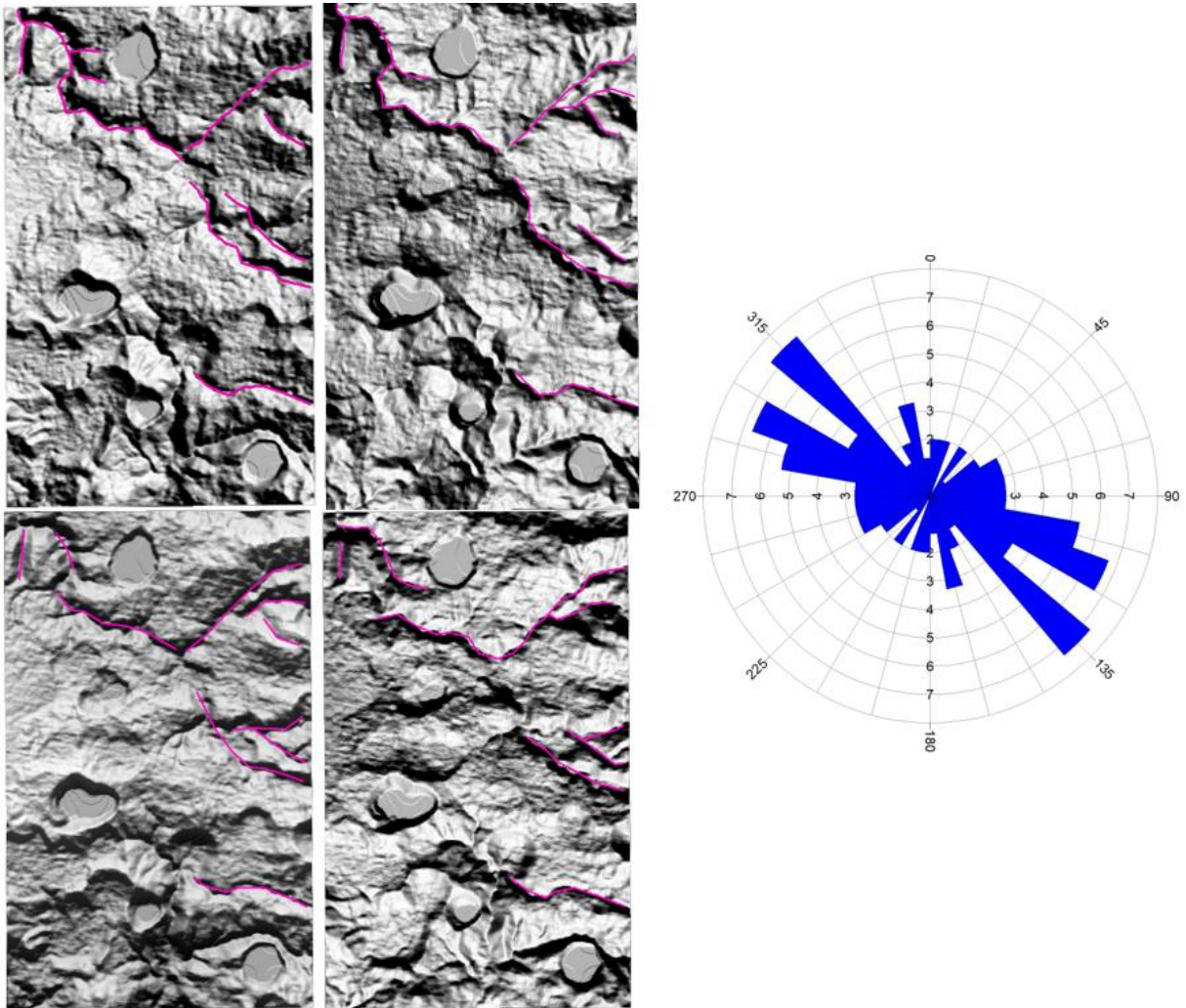


Gambar 4. 1 Estimasi nilai densitas menggunakan metode Parasnis pada Gayaberat Satelit

4.1.2 Kelurusan (*Lineament*)

Penarikan kelurusan menggunakan data *open source* berupa data DEM (*Digital Elevation Model*) atau elevasi dengan resolusi 9 m yang didapat dari DEMNAS BIG. DEMNAS menjadi peta dasar yang digunakan untuk menarik fitur-fitur kelurusan yang teramati di daerah penelitian. Penarikan kelurusan dilakukan secara manual menggunakan Metode Yamaguchi (1985), dimana metode ini didasarkan pada skala gambar (S) dan resolusi (R) yang optimal

untuk mendeteksi kelurusan ($0,1 \text{ mm} = R \times S$). Berdasarkan metode tersebut, maka penarikan dilakukan pada skala 1 : 90.000. Data DEM diproses dalam bentuk peta *hillshade* (**Gambar 4.2**) dengan penyinaran (azimuth) dari empat arah berbeda (0° , 45° , 180° , dan 225°) dan altitude 45 derajat dan faktor z sebesar 5. Hasil penarikan terhadap peta DEM area penelitian, diidentifikasi jumlah kelurusan sebanyak 76 kelurusan. Orientasi kelurusan dapat dilihat melalui diagram rose (**Gambar 4.2**) yang menunjukkan bahwa arah tegasan utama area penelitian memiliki arah dominan 135° SE (*southeast*) atau 315° NW (*northwest*). Arah dominan kelurusan menginterpretasikan pola arah struktur regional yang mengontrol pada daerah tersebut.



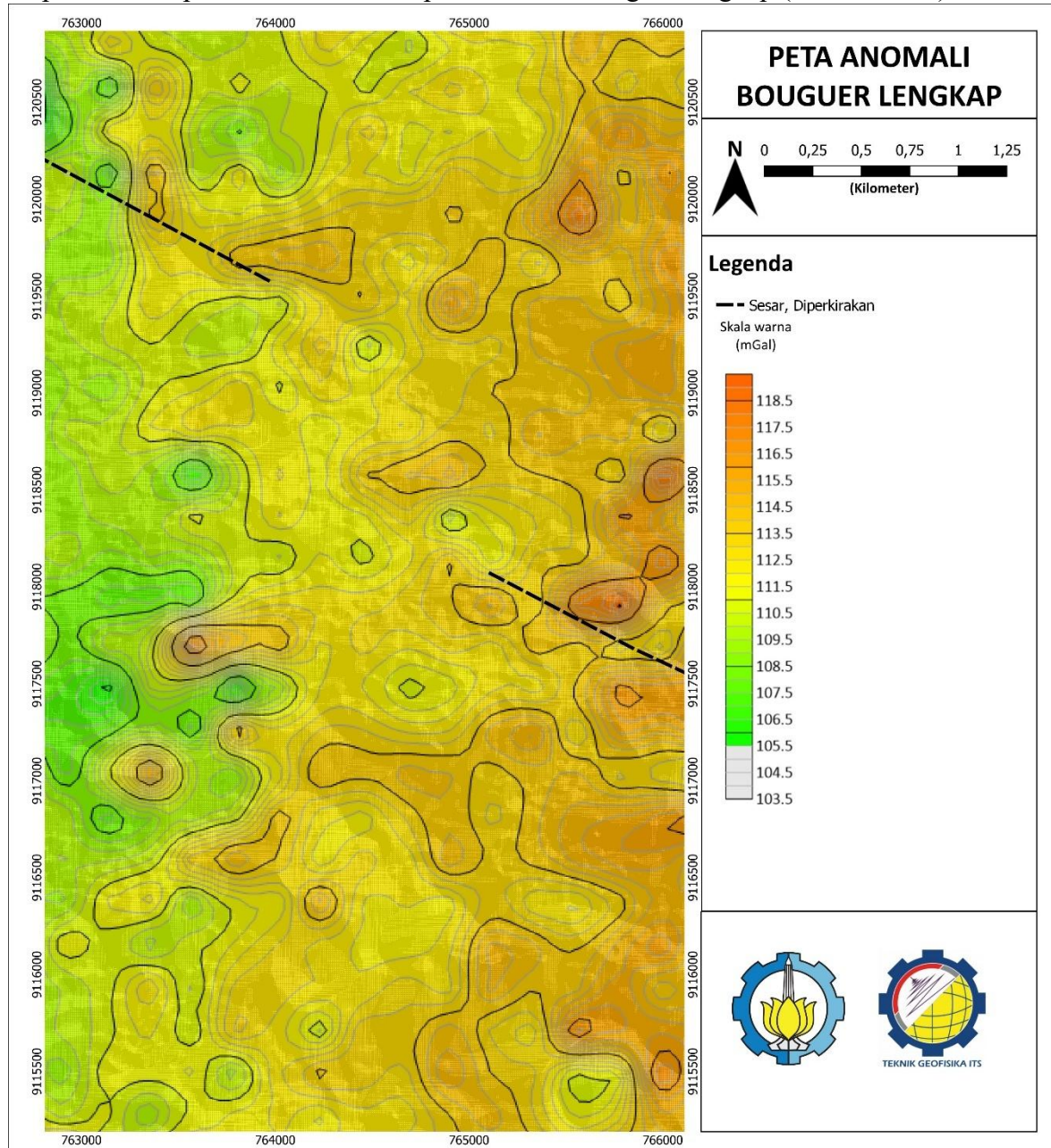
Gambar 4. 2 Penarikan kelurusan dan plot kelurusan pada diagram *roset*

4.1.3 Anomali Bouguer

Peta anomali Bouguer lengkap merupakan hasil dari serangkaian koreksi data yang dilakukan terhadap 477 titik pengukuran. Koreksi yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi: koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi bouguer, dan koreksi medan. Penentuan jarak terjauh (*outer*) dan jarak terdekat (*inner*) yang digunakan dalam koreksi medan didasarkan pada zona berdasarkan tabel koreksi medan yang diusulkan oleh Hammer (1939). Area penelitian memiliki ketinggian elevasi rata-rata sebesar 532 meter, dimana nilai tersebut masuk dalam zona F pada tabel koreksi tersebut dengan rentang nilai ketinggian 390 – 895 meter.

Dengan demikian pada penelitian ini menggunakan nilai jarak terjauh (*outer*) sebesar 895 meter dan jarak terdekat (*inner*) sebesar 390 meter. Anomali bouguer lengkap dihitung dengan $CBA = g_{obs} - g_{\phi} + g_{TUB}(x, y, z) - (g_{B(A)}(x, y, z) + g_{B(B)}(x, y, z)) + terrain\ correction$.

Proses interpolasi data menggunakan metode Krigging. Titik titik pada *grid nodes* dihitung menggunakan *point Krigging*. Proses interpolasi Krigging dianalisis melalui variogram sferikal dengan ukuran *grid cell* pada proses interpolasi sebesar 52 meter. Hasil dari proses interpolasi ditampilkan dalam bentuk peta anomali Bouguer lengkap (**Gambar 4.3**).

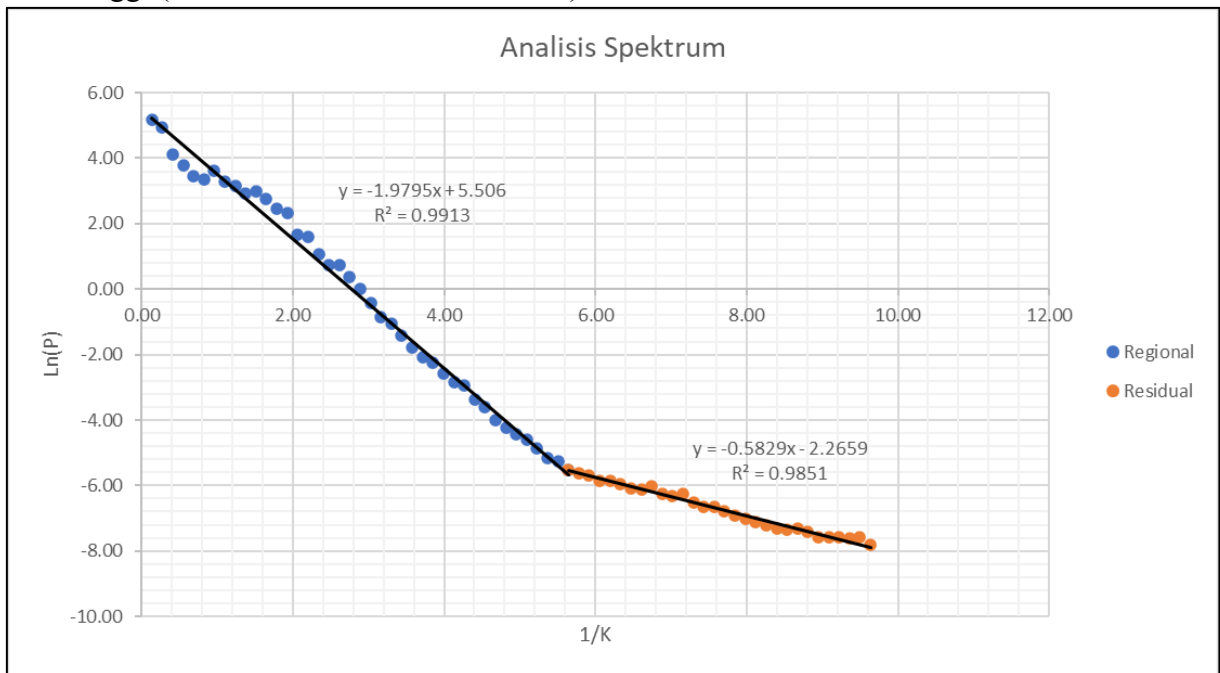


Gambar 4. 3 Peta anomali bouguer lengkap

Peta anomali Bouguer lengkap satelit menunjukkan rentang nilai anomali gayabarat satelit sebesar 103,5 – 118,5 mGal. Anomali gayabarat rendah berada pada sisi barat lokasi penelitian dengan rentang nilai 103,5 – 110,5 mGal. Sementara itu, anomali tinggi berada pada sisi timur

lokasi penelitian dengan rentang nilai 111,5 – 118,5 mGal. Pola anomali tinggi pada sisi timur dan menurun ke sisi barat.

Selanjutnya, data anomali Bouguer lengkap dianalisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi keberadaan anomali regional yang bersifat dalam dan anomali residual yang bersifat dangkal. Pemisahan kedua komponen anomali ini dilakukan menggunakan metode *power spectrum*. Kurva hasil analisis spektrum data anomali Bouguer lengkap ditampilkan pada **Gambar 4.4**. Estimasi kedalaman dilakukan dengan menghitung kemiringan (gradien) dari grafik log power spektral ($\ln(P)$) terhadap frekuensi atau bilangan gelombang (k). Pada grafik spektrum, anomali regional ditunjukkan oleh sinyal dengan frekuensi rendah dan memiliki kemiringan yang curam, anomali residual ditunjukkan oleh sinyal dengan frekuensi lebih tinggi (Hinze, von Frese & Saad, 2013).

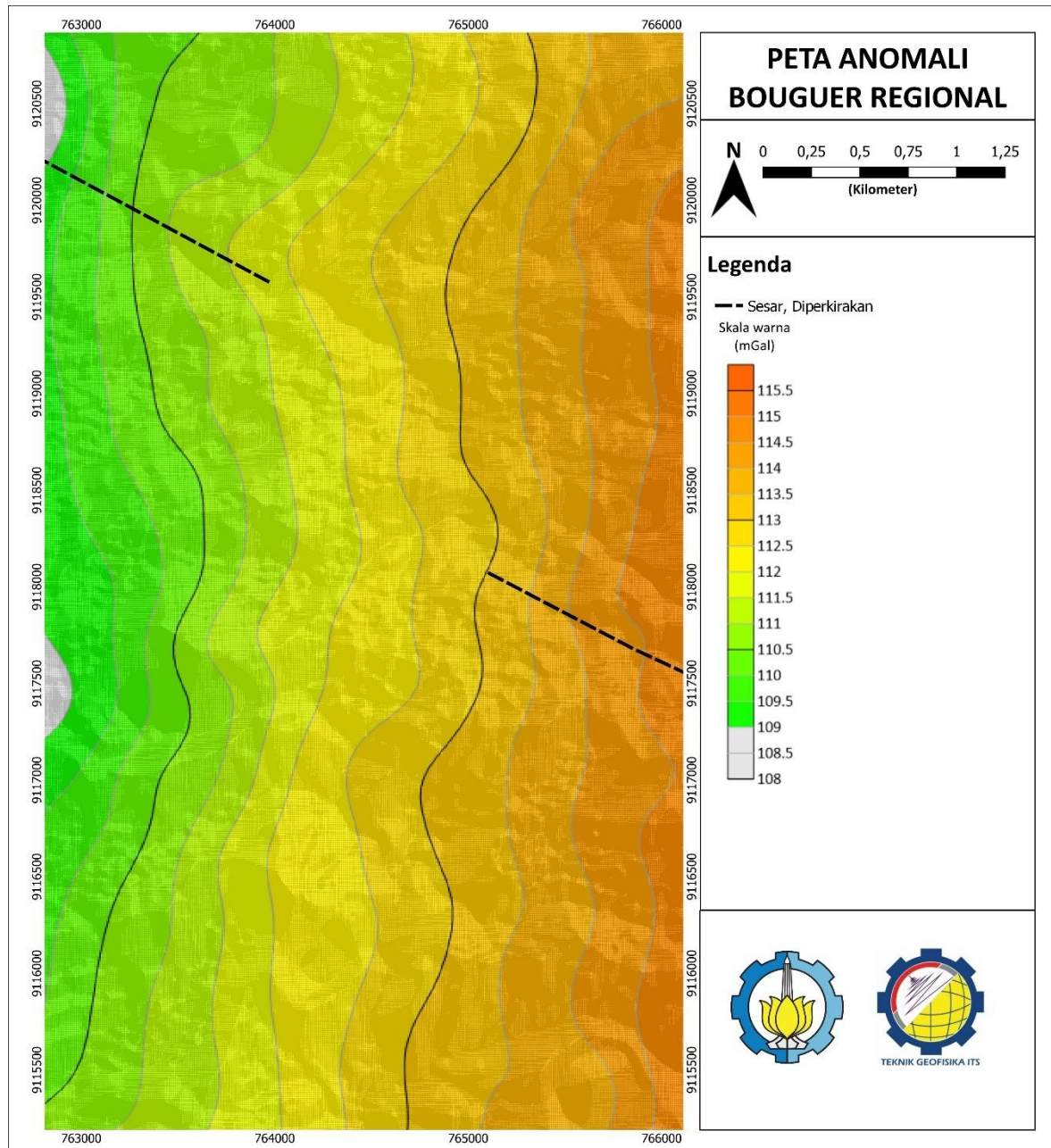


Gambar 4. 4 Analisis Spektrum pada gayaberat Satelit

Hasil analisis spektrum menunjukkan bahwa gradien untuk komponen regional yang ditampilkan dalam kurva berwarna biru adalah sebesar -1,9795, dan gradien untuk komponen residual yang ditunjukkan oleh kurva berwarna jingga sebesar -0,5829. Penentuan estimasi kedalaman anomali dilakukan dengan membagi nilai mutlak gradien dengan 4π (Persamaan 2.11). Estimasi kedalaman pada anomali regional dapat mencapai 0,157 km atau 157 m dan anomali residual dapat mencapai 0.046 km atau 46 m. Nilai kedalaman yang diperoleh sesuai dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Siombone, Maryanto & Wiyono, 2021 dan Ulumuddin et al., 2024 , dimana kedalaman residual kurang dari 100 m.

Pemisahan anomali regional dan residual dilakukan dengan menggunakan filter kontinuasi ke atas (*Upward Continuation*). Filter ini digunakan untuk memuat peta anomali Bouguer regional dengan menghilangkan pengaruh dari sumber dangkal. Level pengangkatan yang dipilih berdasarkan analisis spektrum untuk anomali yang dalam yaitu sebesar 314 m. Besar nilai pengangkatan dalam menggunakan filter ini dilakukan dengan mengalikan dua kali kedalaman regional yang ditentukan dari analisis spektral sebelumnya (Arellano et al., 2021). Peta anomali Bouguer regional (**Gambar 4.5**) mencerminkan sebaran densitas batuan di bawah permukaan bumi, dalam satuan miliGal (mGal). Peta anomali

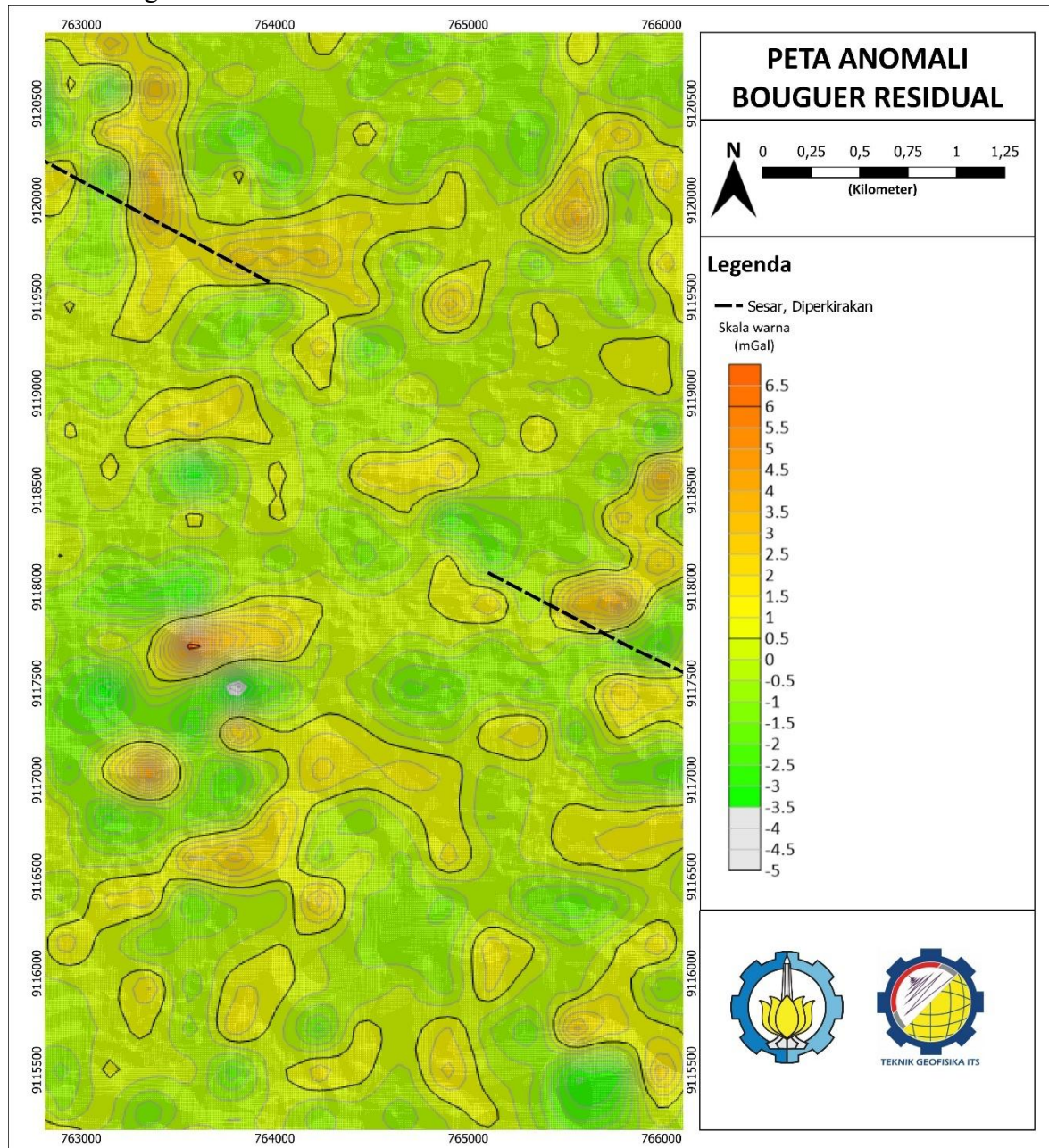
Bouguer regional satelit menunjukkan pola anomali tinggi pada sisi timur dan menurun ke sisi barat yang berada pada rentang nilai sebesar 108 – 115,5 mGal. Anomali gayabarat rendah berada pada sisi barat lokasi penelitian dengan rentang nilai 107,5 – 111,5 mGal. Sementara itu, anomali tinggi berada pada sisi timur lokasi penelitian dengan rentang nilai 112 – 115,5 mGal.



Gambar 4. 5 Peta anomali Bouguer regional

Peta anomali Bouguer residual diperoleh dengan mengurangkan peta anomali Bouguer lengkap dengan peta anomali Bouguer regional guna menekankan pengaruh fitur geologi yang berada pada kedalaman dangkal di bawah permukaan bumi. Peta anomali residual (**Gambar 4.6**) menunjukkan pola anomali yang lebih kompleks dibandingkan anomali regional. Hal ini disebabkan efek dari objek anomali yang terletak pada kedalaman dangkal yang sangat bervariasi (Safira et al., 2024). Anomali residual dapat menentukan keberadaan struktur geologi

dengan melihat kedekatan antara area anomali tinggi dan rendah. Zona tersebut dapat berkaitan dengan sesar atau rekahan.



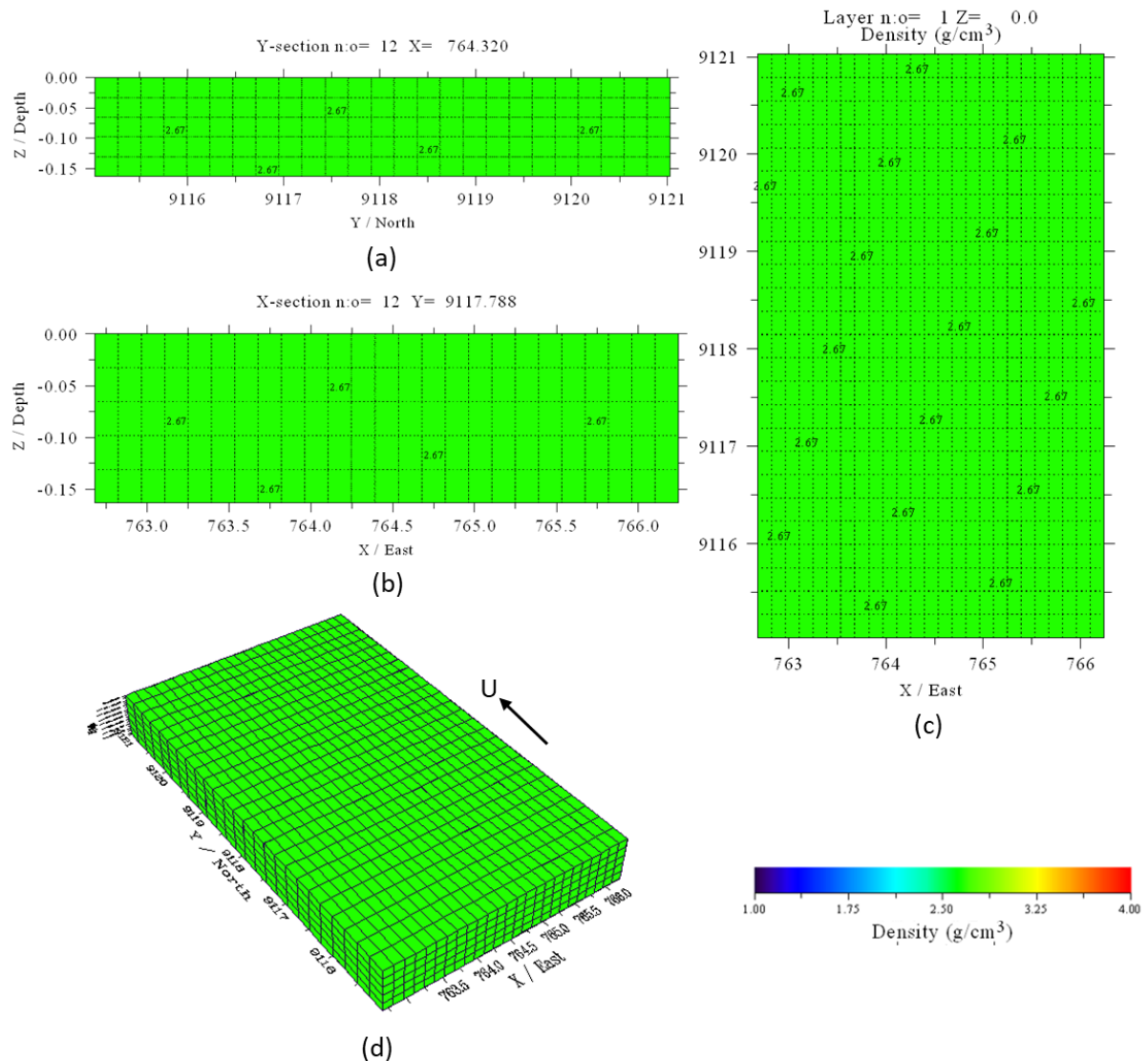
Gambar 4. 6 Peta anomali bouguer residual satelit

Peta anomali Bouguer residual menunjukkan rentang nilai anomali sebesar $-5 - 6,5$ mGal. Anomali gayabarat rendah berada pada rentang $-5 - 0,0$ mGal, sedangkan anomali gayabarat tinggi berada pada rentang $0,5 - 6,5$ mGal.

4.1.4 Model Bawah Permukaan Hasil Inversi

Pemodelan awal menggunakan perangkat lunak Grablox 1.6. Data yang dimodelkan berasal dari data anomali bouguer residual di lokasi penelitian. Model awal (**Gambar 4.7**) yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari 3125 blok kecil yang membentuk satu blok besar yaitu 25 blok pada semua lapisan n_x , 25 blok pada semua lapisan n_y dan 5 blok pada semua lapisan n_z . Jumlah blok kecil tersebut didasarkan atas ukuran spasi geometri yang digunakan yaitu

sebesar 0,052 km. Ukuran model untuk wilayah penelitian yaitu 3 km ke arah timur-barat (sumbu x), dan 6 km ke arah utara-selatan (sumbu y), sementara kedalaman model mencapai 0,15 km ke arah sumbu vertikal (sumbu z). Penentuan kedalaman model berdasarkan estimasi kedalaman anomali residual pada analisis spektrum. Densitas yang digunakan untuk estimasi sebesar $2,9 \text{ g/cm}^3$ yang diperoleh melalui estimasi densitas oleh metode Parasnis. Model awal ini kemudian akan digunakan pada proses inversi.

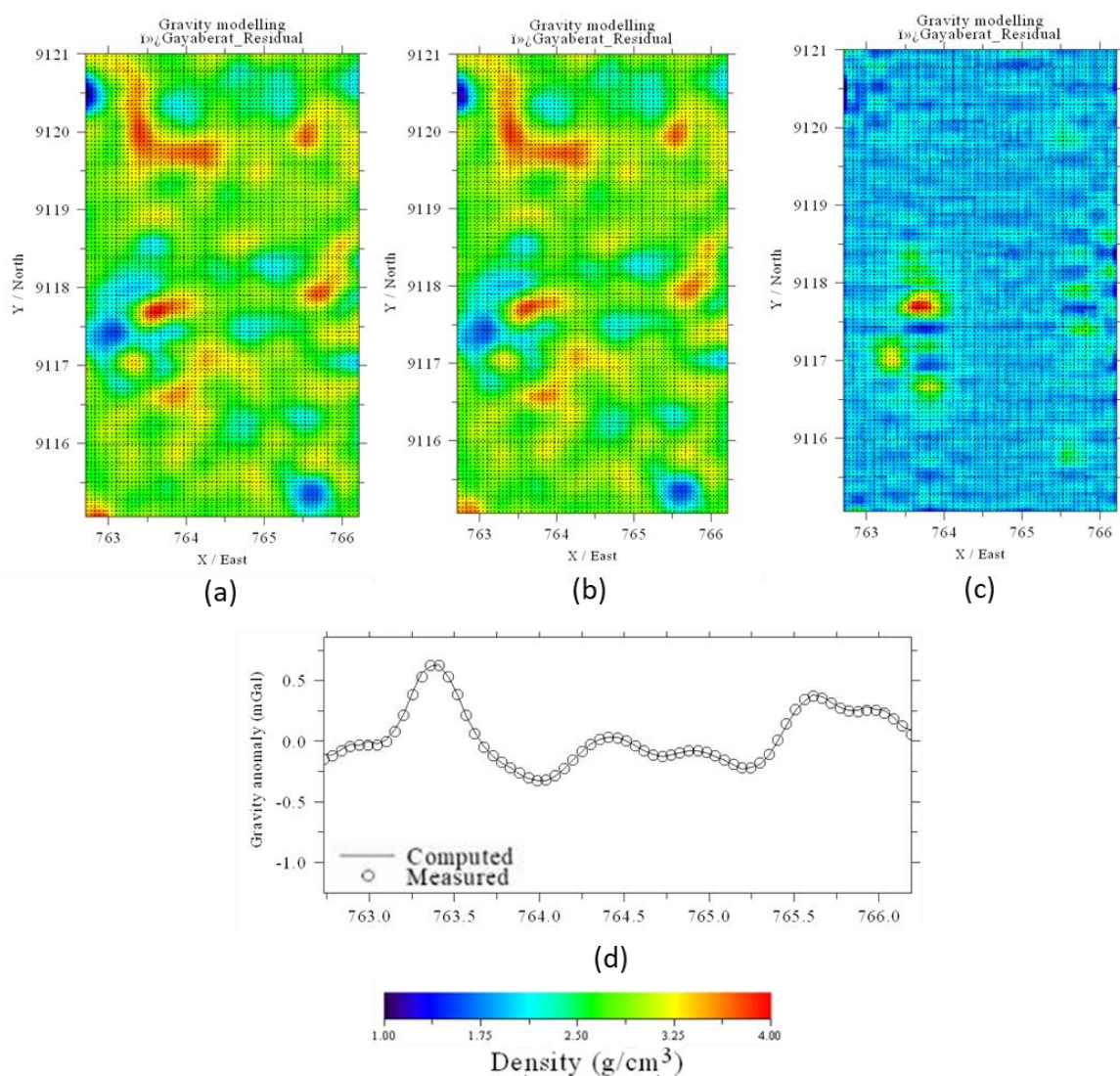


Gambar 4. 7 Model awal inversi gayaberasat satelit a) sayatan tegak lurus sumbu x yang mewakili 25 sayatan b) sayatan tegak lurus sumbu y yang mewakili 25 sayatan c) sayatan tegak lurus sumbu z yang mewakili 5 sayatan d) tampilan 3 dimensi model awal

Model awal yang telah terbentuk, akan dilakukan proses komputasi. Proses komputasi yang dilakukan pada pemodelan inversi yaitu optimasi *base*, *density*, dan *occam density*. Proses optimasi dilakukan menggunakan metode *singular value decomposition* dan optimasi *Occam's* yang dilakukan secara berurutan. Jika hasil optimasi menggunakan metode *singular value decomposition* menunjukkan ketidaksesuaian antara data densitas hasil komputasi dengan data hasil pengukuran, maka dilakukan optimasi lanjutan menggunakan pendekatan *occam's* untuk meminimalkan perbedaan, sehingga diperoleh kecocokan model yang lebih baik. Pada proses

komputasi, nilai error akan dihitung pada setiap tahap optimasi. Proses optimasi secara bertahap akan mengurangi nilai error. Nilai error (RMS error) yang minimum menunjukkan kesesuaian data pengukuran dan hasil perhitungan, sehingga model yang diperoleh dari proses optimasi tersebut dianggap menjadi model yang paling optimum.

Pada pemodelan ini menggunakan 1 iterasi pada setiap proses optimasi. Proses optimasi yang dilakukan secara bertahap, dibutuhkan waktu inversi yang berbeda-beda. Pada optimasi base dibutuhkan waktu selama 0,93 detik, optimasi densitas selama 51,73 menit, dan optimasi *occam* selama 14,55 detik. Dengan demikian, total waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan proses inversi selama 51,73 menit 15,48 detik. Nilai error (RMS error) model yang dihasilkan sebesar 0,0956 atau 9,56%. dan nilai error (RMS error) data sebesar 0,0132 atau 1,32%. Nilai error yang kecil menunjukkan model densitas yang dihasilkan dapat diinterpretasi. Hasil akhir optimasi model ditunjukkan pada **Gambar 4.8**.

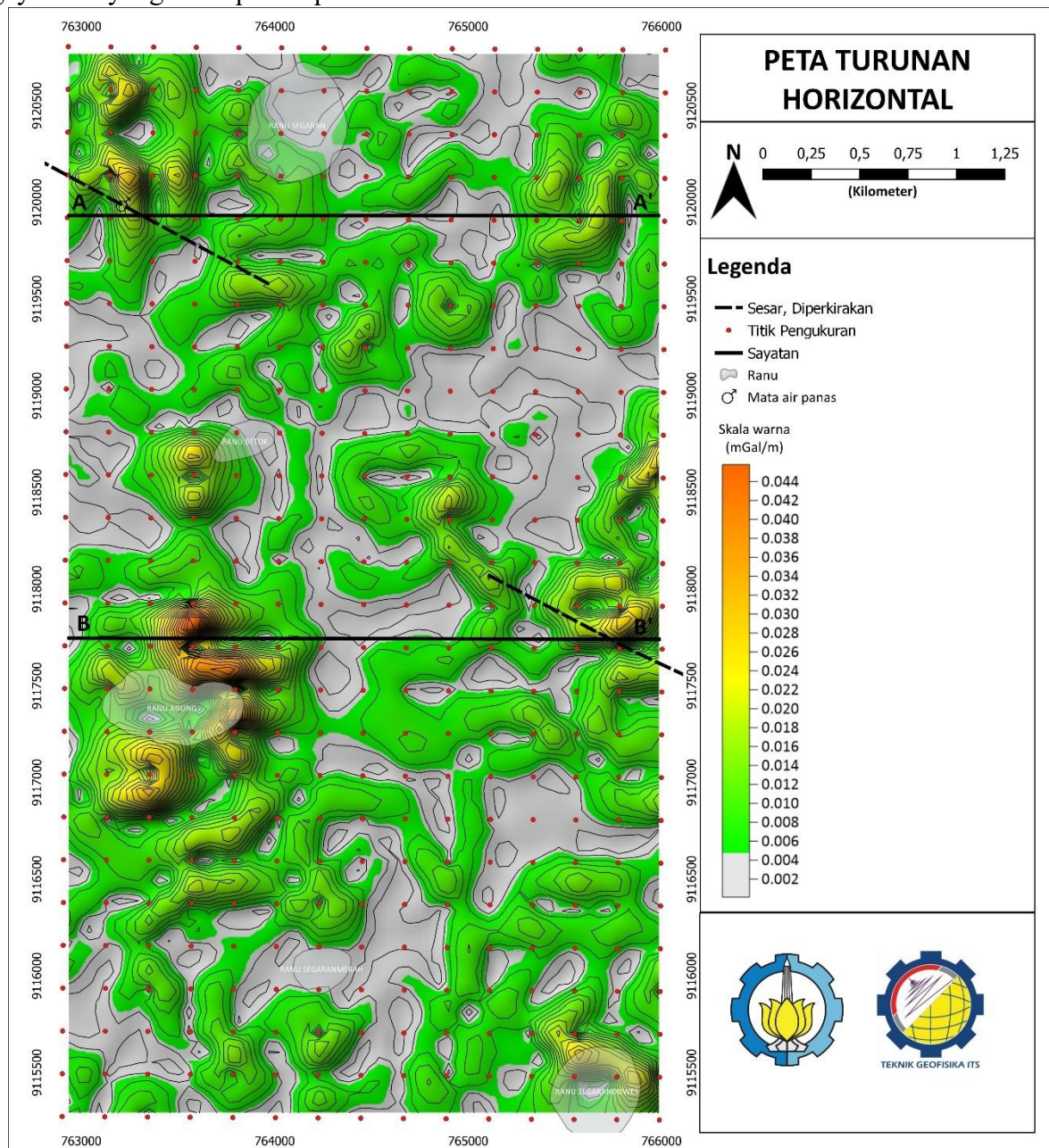


Gambar 4. 8 Hasil komputasi dasar a) data pengukuran b) data perhitungan c) perbedaan data hasil perhitungan dengan data hasil pengukuran dan d) kurva perbandingan

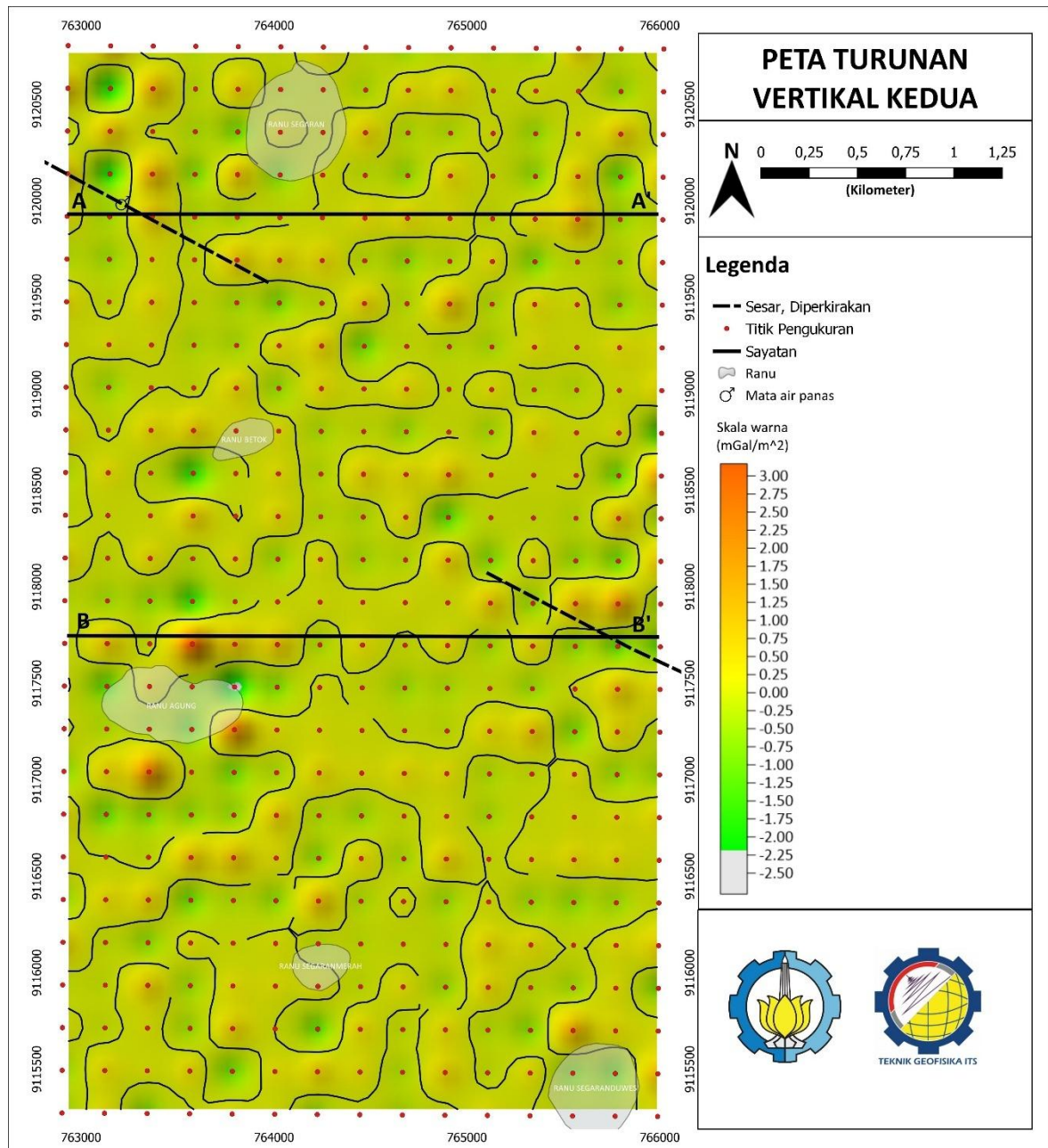
4.2 Pembahasan

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang dapat diterapkan dalam penyelidikan sumber daya di suatu wilayah panas bumi. Metode gayaberat dapat digunakan

untuk memetakan arah, lokasi, dan geometri struktur bawah permukaan (Omollo & Nishijima, 2023). Delineasi sesar dalam penelitian ini dianalisis dengan mengorelasikan peta geologi (**Gambar 2.1**) dengan hasil analisis turunan yang dilakukan terhadap data gayaberat satelit. Analisis turunan yang digunakan dalam mengidentifikasi sumber-sumber dangkal untuk menyoroiti anomali yang berkaitan dengan struktur seperti sesar adalah turunan horizontal dan turunan vertikal kedua. Analisis ini meningkatkan keberadaan zona sesar karena adanya kontras yang mencolok pada nilai anomali (Hofi et al., 2024). Dalam analisis turunan horizontal (**Gambar 4.9**), area yang menunjukkan nilai gayaberat yang tinggi (warna hijau) menandakan zona dengan kontras batuan yang signifikan. Sebaliknya, analisis turunan vertikal kedua (**Gambar 4.10**) digunakan untuk mengidentifikasi struktur sesar berdasarkan variasi anomali gayaberat yang ditampilkan pada kontur nol.



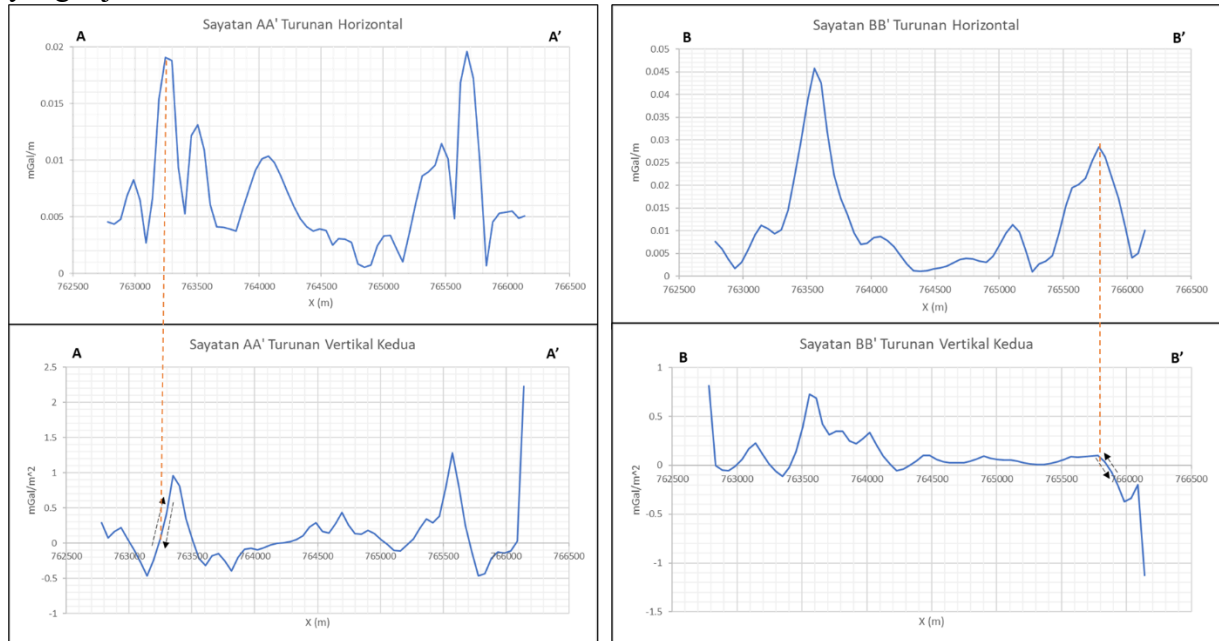
Gambar 4. 9 Peta turunan horizontal dengan sayatan melintang barat timur AA', BB'



Gambar 4. 10 Peta turunan vertikal kedua dengan sayatan melintang barat timur AA', BB'

Interpretasi terhadap anomali residual dilakukan dengan membandingkan nilai puncak pada turunan horizontal dan pola kontras pada turunan vertikal kedua untuk menggambarkan geometri struktur sesar. Pada peta turunan gayaberasat satelit, dua struktur sesar pada peta geologi (**Gambar 2.1**) berhasil diidentifikasi keberadaannya. Kedua sesar memiliki orientasi barat laut-tenggara (Carn, 2000; Carn & Pyle, 2001; Nugroho et al., 2020; Siombone, Susilo & Maryanto, 2022). Arah orientasi kedua sesar sesuai dengan penarikan kelurusan (**Gambar 4.2**) yang dimana diperoleh arah tegasan utama berada pada arah dominan 135° SE (*southeast*) atau 315° NW (*northwest*). Hasil penarikan yang dilakukan pada penelitian ini, sesuai dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh Nugroho et al., 2020; Siombone, Susilo & Maryanto, 2022 yaitu berarah barat laut – tenggara.

Penampang melintang (A-A' dan B-B') dilakukan untuk memperkuat keberadaan kedua sesar. Prosedur penarikan garis batas disesuaikan dengan inversi pada perangkat lunak *grablox 1.6*, yang menghasilkan model densitas yang hanya memiliki perpotongan dua arah saja sehingga arah penampang yang dianalisis mengikuti arah sayatan pada perangkat lunak. Pemetaan garis batas turunan horizontal (**Gambar 4.9**) dan turunan vertikal kedua (**Gambar 4.10**) menghasilkan dua representasi kurva yang mendukung keberadaan struktur sesar tersebut yang dijelaskan dalam **Gambar 4.11**.

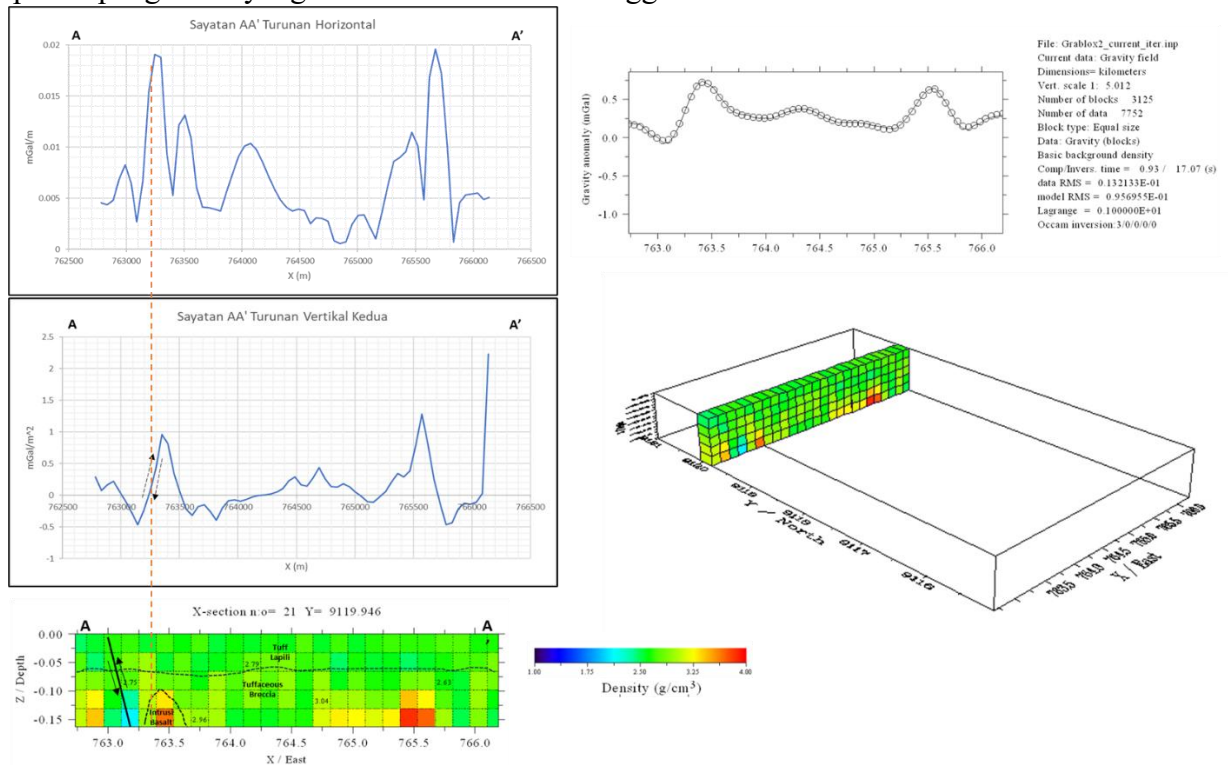


Gambar 4. 11 Kurva sayatan A-A' dan B-B' pada data gayaberat satelit

Kurva hasil sayatan yang memotong kedua sesar (**Gambar 4.11**) menunjukkan bahwa kurva horizontal akan mencapai nilai maksimum, dan kurva turunan vertikal kedua turun hingga nol ketika melintasi batas kontas densitas yang signifikan. Kedua kurva hasil sayatan tersebut berkorelasi dengan keberadaan kedua sesar. Pada sayatan A-A' nilai turunan horizontal tinggi dan turunan vertikal kedua bernilai nol berpotongan dengan sesar yang berada di barat laut area penelitian pada koordinat x dan y (763246,83 ; 9119946). Berdasarkan persamaan 2.16, sesar tersebut merupakan sesar normal, dikarenakan nilai turunan vertikal kedua maksimum nya lebih besar dibandingkan dengan nilai turunan vertikal kedua minimum. Pada sayatan B-B' nilai turunan horizontal tinggi dan turunan vertikal kedua bernilai nol berpotongan dengan sesar yang berada di timur area penelitian pada koordinat x dan y (764951,51 ; 9117788). Jenis sesar tersebut merupakan sesar naik, dikarenakan nilai turunan vertikal kedua maksimum nya lebih kecil dibandingkan dengan nilai turunan vertikal kedua minimum nya. Keberadaan sesar turun pada area barat laut area penelitian dikonfirmasi oleh penelitian sebelumnya (Siombone, Maryanto & Wiyono, 2021; Ulumuddin et al., 2024).

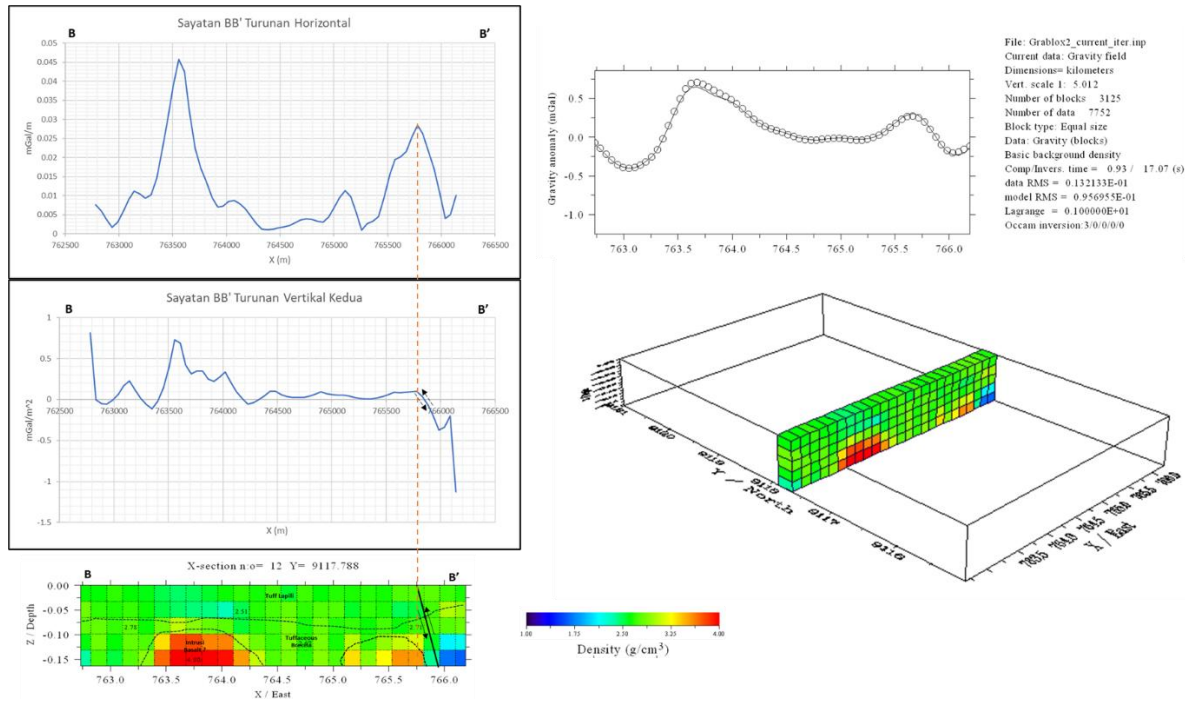
Berdasarkan keberadaan kedua sesar, maka dibuat model 3 dimensi struktur bawah permukaan menggunakan data anomali Bouguer residual. Model 3 dimensi diperoleh melalui hasil inversi, terutama pada area yang menjadi dugaan sesar. Proses inversi pada perangkat lunak *grablox 1.6*, menghasilkan model densitas yang hanya memiliki perpotongan dua arah saja sehingga arah penampang yang dianalisis mengikuti arah sayatan pada perangkat lunak. Model awal yang telah dibuat membagi sumbu x, y dan z masing-masing menjadi 25, 25 dan 5 blok, sehingga model akhir yang dihasilkan memuat penampang sayatan 2 dimensi masing-

masing 25 sayatan sumbu x, 25 sayatan sumbu y dan 5 sayatan sumbu z. Total penampang 2 dimensi yang dihasilkan sebanyak 55 penampang. Akan tetapi, tidak semua penampang diinterpretasi, melainkan hanya beberapa saja yang dianggap dapat mewakili kondisi bawah permukaan daerah penelitian. Penampang 2 dimensi yang diinterpretasi disesuaikan dengan sayatan yang dilakukan sebelumnya pada peta turunan horizontal dan turunan vertikal kedua. Penampang tersebut kemudian dikorelasikan dengan kurva turunan horizontal dan turunan vertikal kedua untuk memperjelas visualisasi target sesar. **Gambar 4.12** merupakan penampang A-A' yang memiliki kedalaman hingga 150 meter.



Gambar 4. 12 Model bawah permukaan dari sayatan A-A'

Interpretasi model yang dihasilkan diduga sebagai batuan tuff lapilli yang memiliki rentang densitas $2,50 - 2,87 \text{ g/cm}^3$, *tuffaceous breccia* yang memiliki rentang densitas $2,90 - 3,25 \text{ g/cm}^3$, dan batuan intrusi basalt berada pada rentang densitas $3,62 - 4,00 \text{ g/cm}^3$. Klasifikasi batuan tersebut disesuaikan dengan penelitian yang dilakukan oleh Siombone, Maryanto and Wiyono, 2021; Ulumuddin et al., 2024 (**Gambar 2.4** dan **Gambar 2.6**). Keberadaan sesar berada pada kontras anomali yang memiliki densitas rendah dan anomali yang memiliki densitas tinggi. Keberadaan sesar tersebut sesuai dengan batas kontak sesar yang ditunjukkan oleh kurva turunan horizontal maksimum dan kurva turunan vertikal kedua. **Gambar 4.13** merupakan penampang B-B' yang memiliki kedalaman hingga 150 meter.



Gambar 4. 13 Model bawah permukaan dari sayatan B-B'

Interpretasi yang sama dilakukan pada penampang B-B' dimana model yang dihasilkan diduga sebagai batuan tuff lapilli yang memiliki rentang densitas $2,50 - 2,87 \text{ g/cm}^3$, *tuffaceous breccia* yang memiliki rentang densitas $2,90 - 3,25 \text{ g/cm}^3$, dan batuan intrusi basalt berada pada rentang densitas $3,62 - 4,00 \text{ g/cm}^3$. Keberadaan sesar berada pada kontras anomali yang memiliki densitas rendah dan anomali yang memiliki densitas tinggi. Keberadaan sesar tersebut sesuai dengan batas kontak sesar yang ditunjukkan oleh kurva turunan horizontal maksimum dan kurva turunan vertikal kedua.

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis metode gayaberat yang dilakukan pada Lereng Timur Gunung Lamongan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Analisis gayaberat satelit menunjukkan keberadaan struktur sesar bawah permukaan di area timur Gunung Lamongan. Kontras antara anomali tinggi dan anomali rendah yang terdapat dalam peta residual menggambarkan keberadaan kedua sesar. Analisis turunan horizontal dan turunan vertikal kedua mengkonfirmasi struktur sesar ini berupa sesar normal yang berada di barat laut area penelitian dan sesar naik yang berada di timur area penelitian. Analisis kelurusan menunjukkan bahwa orientasi kedua sesar didominasi oleh arah barat laut – Tenggara.
2. Pemodelan 3 dimensi menunjukkan pola anomali yang konsisten, dimana diduga adanya 3 jenis batuan bawah permukaan : tuff lapilli, tuffaceous *breccia*, dan intrusi basalt. Penentuan ini didasarkan pada perbandingan dengan penelitian sebelumnya yang pernah dilakukan.

5.2 Saran

Melalui hasil analisis dan interpretasi pada penelitian ini, proses dan hasil dapat dikembangkan lebih komprehensif untuk lebih mendetailkan kondisi aktual lapangan. Oleh karena itu, penulis menyarankan dalam penelitian berikutnya:

1. Melakukan pemetaan geologi secara mendetail pada seluruh area penelitian terutama analisa secara komprehensif terhadap keberadaan struktur, dan melakukan analisa terhadap sampel batuan untuk mengetahui litologi dan densitas batuan.
2. Melakukan pemodelan bawah permukaan pada area struktur dalam mendetailkan kondisi aktualnya dengan metode geofisika dengan penetrasi kedalaman dan resolusi yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aziz, K.N., Hartantyo, E. and Niasari, S.W. (2018) 'The Study of Fault Lineament Pattern of the Lamongan Volcanic Field Using Gravity Data', *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1). Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1011/1/012025>.
- Blakely, R. J. (1996). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge university press.
- Burger, H. R., Sheehan, A. F., & Jones, C. H. (2023). *Introduction to Applied Geophysics: Exploring the Shallow Subsurface*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Carn, S.A. (1999) 'Application of synthetic aperture radar (SAR) imagery to volcano mapping in the humid tropics: A case study in East Java, Indonesia', *Bulletin of Volcanology*, 61(1–2), pp. 92–105. Available at: <https://doi.org/10.1007/s004450050265>.
- Carn, S.A. (2000) 'The Lamongan volcanic field, East Java, Indonesia: Physical volcanology, historic activity and hazards', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 95(1–4), pp. 81–108. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00114-6).
- Carn, S.A. and Pyle, D.M. (2001) 'Petrology and geochemistry of the Lamongan volcanic field, East Java, Indonesia: Primitive Sunda arc magmas in an extensional tectonic setting?', *Journal of Petrology*, 42(9), pp. 1643–1683. Available at: <https://doi.org/10.1093/petrology/42.9.1643>.
- Chaussard, E. and Amelung, F. (2012) 'Precursory inflation of shallow magma reservoirs at west Sunda volcanoes detected by InSAR', *Geophysical Research Letters*, 39(21), pp. 6–11. Available at: <https://doi.org/10.1029/2012GL053817>.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. (2013) *An Introduction to the Rock-Forming Minerals, An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Available at: <https://doi.org/10.1180/dhz>.
- Dentith, M. and Mudge, S. (2014) *Geophysics for the mineral exploration geoscientist, AusIMM Bulletin*. Available at: <https://doi.org/10.1017/cbo9781139024358>.
- Deon, F., Förster, H. J., Brehme, M., Wiegand, B., Scheytt, T., Moeck, & Putriatni, D. J. (2015). Geochemical/hydrochemical evaluation of the geothermal potential of the Lamongan volcanic field (Eastern Java, Indonesia). *Geothermal Energy*, 3(1), 20.
- Fabio, A., Parinus, F., Leni, F., Hadi, A. I., & Zakariya, H. (2023). *Identification of the Manna Segment Sumatran Fault Using GGMplus Gravity Anomaly Data with the Second Vertical Derivative (SVD) Method*. 15(2), 123–136.
- Fitriani, D. S., Nur, S., Putri, A., & Putrajy, I. F. (2020). *Sesar Weluki Dengan Analisis First Horizontal Derivative Dan Second*. IX, 53–60.
- Gurusinga, M. A., Ohba, T., Harijoko, A., & Hoshide, T. (2023). Characteristics of ash particles from the maar complex of Lamongan Volcanic Field (LVF), East Java, Indonesia: How textural features and magma composition control ash morphology. *Volcanica*, 6(2), 415–436. <https://doi.org/10.30909/vol.06.02.415436>

- Hinze, W.J., von Frese, R.R.B. and Saad, A.H. (2013) *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices and Exploration*.
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2012). *New ultra-high resolution picture of Earth 's gravity field. Section 2*. <https://doi.org/10.1002/grl.50838>.
- Hofi, L. N., Maryanto, S., Susilo, A., Andinisari, R., & Wuryani, S. D. (2024). Fault Detection and Subsurface Model Based on Gravity Data in Pronojiwo, Lumajang, Indonesia. *Evergreen*, 11(3), 1666–1675. <https://doi.org/10.5109/7236820>
- Ilham, N., & Niasari, S. W. (2018). Identification the Geothermal System Using 1-D Audio magnetotelluric Inversion in Lamongan Volcano Field, East Java, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1).
- Indrarini, F. and Setiawan, A. (2015) ‘Pemodelan Struktur Bawah Permukaan 3D Purwokerto dan Sekitarnya Berdasarkan Data Anomali Gravitasi Bouguer Lengkap’, 19(57), pp. 6–12.
- Nahli, K., Mulyana, F., Tsani, G. E., Alwan, M. A., Darajat, M. H., & Hendrawan, R. N. (2016). Identifying Non-Volcanic Geothermal Potential in Amohola, Southeast Sulawesi Province, by Applying the Fault and Fracture Density (FFD) Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 42(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/42/1/012015>
- Nugroho, A. R. B., Sukiyah, E., Syafri, I., & Isnaniawardhani, V. (2020). Identification of tectonic deformation using morphometrical analysis of lamongan volcano complex. *International Journal of GEOMATE*, 19(71), 55–60. <https://doi.org/10.21660/2020.71.18490>
- Omollo, P. and Nishijima, J. (2023) ‘Analysis and Interpretation of the gravity data to delineate subsurface structural geometry of the Olkaria geothermal reservoir, Kenya’, *Geothermics*, 110(January). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102663>.
- Parasnis, D.S. (1951) ‘A study of rock density in the English Midlands.’, *Mon. Not. R. Astron. Soc. Geophys. Suppl.*, 6, pp. 252–271.
- Purnomo, B.J. and Pichler, T. (2014) ‘Geothermal systems on the island of Java, Indonesia’, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 285, pp. 47–59. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.004>.
- Puswanto, E., Farisan, A., Wibowo, D. A., Raharjo, P. D., Iqbal, P., Al’afif, M., & Fajar, M. H. M. (2022). Fault Bend Fold Related Thrust Fault Waturanda Formation as Representative of Tectonic Compression as an Asset Geological Heritage of GNKK, Indonesia. *2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology: Understanding the Interaction of Land, Ocean, and Atmosphere: Smart City and Disaster Mitigation for Regional Resilience, AGERS 2022 - Proceeding, December*, 13–16. <https://doi.org/10.1109/AGERS56232.2022.10093295>
- Reynolds, J.M. (1997) *An introduction to applied and environmental geophysics, An introduction to applied and environmental geophysics*. Available at: <https://doi.org/10.1071/pvv2011n155other>.

- Rosid, M.S. and Siregar, H. (2017) 'Determining fault structure using first horizontal derivative (FHD) and horizontal vertical diagonal maxima (HVDM) method: A comparative study', *AIP Conference Proceedings*, 1862. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.4991275>.
- 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.
- Siombone, S.H., Maryanto, S. and Wiyono, . (2021) 'Bouguer Anomaly of Geothermal Reservoir at Tiris Area, Probolinggo, East Java, Indonesia', *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, (January 2021), pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2021/v25i930304>.
- Siombone, S.H., Susilo, A. and Maryanto, S. (2022) 'Integration of Topex Satellite Gravity and DEM SRTM Imagery for Subsurface Structure Identification at Tiris Geothermal Area, Lamongan Volcano Complex, Probolinggo, East Java', *Positron*, 12(2), p. 98. Available at: <https://doi.org/10.26418/positron.v12i2.56880>.
- Sudrajad, B., Sutarman, T., Sinaga, E. S., & Ngaderman, H. (2024). Identifikasi Patahan Seismo-Tektonik Jayapura Berdasarkan Pemodelan Inversi 3D Data Gravitasi. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 10(1), 47-64.
- Suharsono & Suwarti, T. (1992). Peta Geologi Lembar Probolinggo, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) *Applied Geophysics: Second Edition*, Cambridge University Press, Melbourne.
- Ulumuddin, F., Fajar, M. H. M., Warnana, D. D., Rafi, M. E. D., & Rahayu, H. K. (2024). Geological Structure Identification in Geothermal Manifestation of Lamongan Volcano Complex: A Magnetic Data Analysis Approach. *Geoloski Anali Balkanskoga Poluostrva*, 85(2), 65–78. <https://doi.org/10.2298/GABP240321013U>
- White, D.E. and Brannock, W.W. (1950) 'The sources of heat and water supply of thermal springs, with particular reference to Steamboat Springs, Nevada', *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 31(4), pp. 566–574. Available at: <https://doi.org/10.1029/TR031i004p00566>.

LAMPIRAN

Data Anomali Bouguer Lengkap Satelit

Easting (m)	Northing (m)	Elevasi (m)	CBA (mGal)
762678.6021	9115052.224	466	110.6744405
762899.1857	9115050.946	482	114.7222743
763119.7697	9115049.667	470	110.0514024
763340.354	9115048.387	522	111.9716974
763560.9386	9115047.106	541	112.5920926
763781.5235	9115045.823	531	111.0297875
764002.1087	9115044.54	503	112.1812519
764222.6943	9115043.256	453	112.3192999
764443.2801	9115041.97	419	112.7149666
764663.8663	9115040.684	459	113.1747532
764884.4528	9115039.396	475	113.1926033
765105.0396	9115038.107	487	113.4034682
765325.6266	9115036.817	516	114.2663021
765546.2141	9115035.527	531	113.0297892
765766.8018	9115034.235	568	114.7962521
765987.3898	9115032.942	569	113.7204781
766207.9782	9115031.648	578	116.3885071
762679.8834	9115273.512	484	111.5689252
762900.4681	9115272.234	480	110.1019714
763121.0532	9115270.956	490	111.2443516
763341.6386	9115269.676	506	109.32213
763562.2243	9115268.395	526	111.1368011
763782.8102	9115267.113	501	111.7009549
764003.3966	9115265.83	492	112.1528277
764223.9832	9115264.546	452	111.2632317
764444.5701	9115263.261	419	112.3631412
764665.1573	9115261.975	453	112.0274744
764885.7449	9115260.687	499	113.3424849
765106.3327	9115259.399	493	114.3070663
765326.9209	9115258.11	513	113.1117748
765547.5094	9115256.819	501	111.5009566
765768.0982	9115255.527	503	112.2894278
765988.6873	9115254.235	556	114.9237029
766209.2768	9115252.941	541	113.7302716
762681.1644	9115494.8	495	110.1137061
762901.7502	9115493.523	486	109.0655711
763122.3364	9115492.245	479	111.4759024
763342.9228	9115490.965	482	111.2586184
763563.5096	9115489.685	494	111.6694712
763784.0967	9115488.403	510	109.4772402

764004.684	9115487.12	489	112.4182858
764225.2717	9115485.837	468	113.8292677
764445.8597	9115484.552	439	113.4862334
764666.4481	9115483.266	440	112.7204779
764887.0367	9115481.979	464	115.1823063
765107.6256	9115480.691	493	113.4952361
765328.2149	9115479.402	532	113.2603641
765548.8045	9115478.111	502	110.563362
765769.3943	9115476.82	502	110.983362
765989.9845	9115475.528	519	117.3253475
766210.575	9115474.234	502	114.5233637
762682.4451	9115716.089	537	109.5496802
762903.032	9115714.812	513	110.1981063
763123.6192	9115713.534	484	110.7052604
763344.2068	9115712.254	487	111.6079743
763564.7946	9115710.974	483	110.5010239
763785.3827	9115709.693	521	113.2819752
764005.9712	9115708.41	501	112.24729
764226.56	9115707.127	494	110.3276365
764447.1491	9115705.842	458	113.5150213
764667.7385	9115704.557	498	113.0545822
764888.3282	9115703.27	489	114.4164528
765108.9182	9115701.982	471	112.9201556
765329.5085	9115700.694	467	112.0231943
765550.0992	9115699.404	503	117.0157628
765770.6901	9115698.113	495	115.5818748
765991.2814	9115696.821	521	115.5219786
766211.873	9115695.527	536	115.0054547
762683.7255	9115937.377	543	109.4932213
762904.3135	9115936.1	512	110.0320331
763124.9018	9115934.822	498	110.7027414
763345.4904	9115933.543	504	112.6781556
763566.0793	9115932.264	489	110.3146121
763786.6685	9115930.983	514	112.6905027
764007.258	9115929.7	539	112.9163033
764227.8479	9115928.417	494	112.5157974
764448.4381	9115927.133	494	112.0857974
764669.0285	9115925.848	509	112.9093318
764889.6193	9115924.561	506	112.2066292
765110.2104	9115923.274	511	114.6778023
765330.8018	9115921.985	513	113.4662705
765551.3936	9115920.696	522	113.7343704
765771.9856	9115919.405	535	115.3493829
765992.5779	9115918.113	540	113.4405368

766213.1706	9115916.821	557	114.4024272
762685.0056	9116158.665	557	108.9405782
762905.5946	9116157.389	541	111.5729179
763126.184	9116156.111	516	110.6871248
763346.7737	9116154.833	519	109.6298247
763567.3637	9116153.553	512	110.9201912
763787.954	9116152.272	500	111.5793715
764008.5446	9116150.991	530	112.5663817
764229.1355	9116149.708	496	112.262427
764449.7267	9116148.424	501	111.7836073
764670.3183	9116147.139	518	111.7855932
764890.9102	9116145.853	536	112.2517699
765111.5023	9116144.566	523	114.7867593
765332.0948	9116143.277	530	114.2763834
765552.6876	9116141.988	541	113.4229213
765773.2807	9116140.698	541	114.7929213
765993.8742	9116139.406	541	116.122923
766214.4679	9116138.114	535	113.7375409
762686.2853	9116379.953	554	109.5360465
762906.8754	9116378.677	543	109.2895293
763127.4659	9116377.4	547	111.6264466
763348.0566	9116376.122	551	112.2833617
763568.6477	9116374.842	528	109.3060703
763789.2391	9116373.562	514	111.1968111
764009.8308	9116372.281	544	111.3437605
764230.4228	9116370.998	563	114.8940947
764451.0151	9116369.714	528	111.8460703
764671.6077	9116368.43	488	112.1166849
764892.2007	9116367.144	491	111.5893969
765112.7939	9116365.857	525	113.193376
765333.3875	9116364.569	517	112.0095135
765553.9814	9116363.28	515	111.7210465
765774.5756	9116361.99	529	113.0303037
765995.1701	9116360.699	540	114.6368448
766215.7649	9116359.407	553	114.6518234
762687.5647	9116601.241	558	109.7811047
762908.1559	9116599.966	551	110.071509
763128.7475	9116598.689	545	109.8561356
763349.3393	9116597.411	542	110.4034486
763569.9314	9116596.132	551	113.5415107
763790.5239	9116594.852	551	114.7415107
764011.1167	9116593.571	565	113.5006951
764231.7097	9116592.288	536	111.4780674
764452.3031	9116591.005	507	112.9153184

764672.8968	9116589.721	470	112.0085332
764893.4909	9116588.435	477	114.5282107
765114.0852	9116587.149	531	113.3369141
765334.6798	9116585.861	533	113.7453766
765555.2748	9116584.573	535	114.8038384
765775.8701	9116583.283	549	115.4030552
765996.4656	9116581.992	564	115.196472
766217.0615	9116580.7	582	113.3025273
762688.8438	9116822.53	567	109.7772888
762909.4361	9116821.254	561	109.9619293
763130.0287	9116819.978	557	107.46502
763350.6216	9116818.7	555	108.9165663
763571.2149	9116817.421	530	109.480824
763791.8084	9116816.141	521	110.3927347
764012.4022	9116814.861	549	114.0111963
764232.9964	9116813.579	507	112.1234615
764453.5909	9116812.296	510	111.6261653
764674.1856	9116811.012	474	113.0236359
764894.7807	9116809.727	471	113.9909166
765115.3761	9116808.44	530	112.7808257
765335.9719	9116807.153	535	113.8319814
765556.5679	9116805.865	544	114.7900525
765777.1642	9116804.575	561	115.1619327
765997.7609	9116803.285	583	115.9648939
766218.3579	9116801.993	565	117.7088413
762690.1226	9117043.818	611	110.6912381
762910.716	9117042.542	578	107.6019061
763131.3097	9117041.266	593	110.9452583
763351.9036	9117039.989	593	115.80526
763572.4979	9117038.711	563	110.1585231
763793.0926	9117037.431	539	108.8770401
764013.6875	9117036.151	538	111.6628099
764234.2827	9117034.869	531	114.193194
764454.8783	9117033.586	526	113.6520355
764675.4741	9117032.303	524	114.3335728
764896.0703	9117031.018	529	114.1147327
765116.6668	9117029.732	541	113.0155019
765337.2636	9117028.445	538	113.7128116
765557.8607	9117027.157	534	114.1658891
765778.4581	9117025.868	555	112.7747064
765999.0558	9117024.578	574	112.5850118
766219.6539	9117023.287	526	110.7720389
762691.4011	9117265.106	613	107.4678111
762911.9955	9117263.831	599	107.6987238

763132.5903	9117262.555	581	107.922713
763353.1853	9117261.278	526	109.1201697
763573.7807	9117260	526	107.6501697
763794.3764	9117258.721	559	114.559749
764014.9724	9117257.441	563	112.1866571
764235.5687	9117256.159	542	113.1078641
764456.1653	9117254.877	538	113.060944
764676.7623	9117253.594	554	112.4286124
764897.3595	9117252.309	564	112.4808854
765117.9571	9117251.024	566	114.3493383
765338.5549	9117249.737	568	115.3177906
765559.1531	9117248.449	536	112.2224847
765779.7516	9117247.16	567	115.2435645
766000.3504	9117245.871	569	114.3820182
766220.9496	9117244.58	577	116.2358204
762692.6792	9117486.394	607	107.8506207
762913.2748	9117485.119	604	107.527959
763133.8706	9117483.844	573	105.5570448
763354.4667	9117482.567	526	110.1582994
763575.0632	9117481.289	527	109.5425314
763795.6599	9117480.01	525	105.7140673
764016.257	9117478.731	560	109.4621058
764236.8544	9117477.45	543	112.0602234
764457.4521	9117476.168	549	111.9655984
764678.0501	9117474.885	556	110.6551978
764898.6484	9117473.6	562	111.1605615
765119.2471	9117472.315	559	112.4078803
765339.846	9117471.029	557	112.1294254
765560.4453	9117469.741	556	113.6651978
765781.0448	9117468.453	557	116.5794254
766001.6447	9117467.163	547	116.0271441
766222.2449	9117465.873	548	115.651373
762693.9571	9117707.682	611	110.1256259
762914.5537	9117706.408	608	108.2729659
763135.1506	9117705.132	608	110.1729659
763355.7478	9117703.856	577	110.5320715
763576.3453	9117702.579	620	118.2735998
763796.9431	9117701.3	592	114.6354256
764017.5413	9117700.021	572	114.1809462
764238.1398	9117698.74	554	111.8048655
764458.7385	9117697.458	559	112.8060037
764679.3376	9117696.175	562	112.0786866
764899.937	9117694.892	562	112.8686866
765120.5367	9117693.607	553	112.1106391

765341.1367	9117692.321	553	113.9306391
765561.7371	9117691.034	532	113.0118161
765782.3377	9117689.745	517	112.5383321
766002.9387	9117688.456	523	112.1337313
766223.54	9117687.166	552	116.4464126
762695.2346	9117928.97	593	108.3077669
762915.8322	9117927.696	592	108.1435444
763136.4302	9117926.421	584	107.6797596
763357.0285	9117925.145	592	107.6935461
763577.6271	9117923.868	576	107.3659673
763798.226	9117922.59	553	111.3787581
764018.8253	9117921.31	546	112.3491576
764239.4248	9117920.03	557	112.3856695
764460.0246	9117918.749	552	112.3345299
764680.6248	9117917.466	551	112.8703032
764901.2253	9117916.183	554	113.4229879
765121.8261	9117914.898	557	114.8356712
765342.4272	9117913.612	520	112.8391524
765563.0286	9117912.326	537	117.301091
765783.6303	9117911.038	553	119.0087598
766004.2323	9117909.749	538	113.6853231
766224.8347	9117908.459	554	112.4029896
762696.5118	9118150.258	587	109.4205461
762917.1105	9118148.984	582	109.9094281
763137.7096	9118147.71	574	108.7256318
763358.3089	9118146.434	578	109.5625328
763578.9086	9118145.157	563	109.1191486
763799.5086	9118143.879	550	110.9241893
764020.1089	9118142.6	543	110.3245858
764240.7095	9118141.32	550	111.6941893
764461.3104	9118140.039	536	110.7349752
764681.9117	9118138.757	524	111.7741994
764902.5132	9118137.474	536	113.6749769
765123.1151	9118136.19	508	110.9764637
765343.7173	9118134.904	500	113.2725821
765564.3197	9118133.618	512	113.0934011
765784.9225	9118132.33	520	113.8372689
766005.5257	9118131.042	541	117.0861297
766226.1291	9118129.752	561	115.6806983
762697.7886	9118371.546	574	108.9537436
762918.3885	9118370.273	568	109.2483904
763138.9886	9118368.998	575	109.6379686
763359.589	9118367.723	578	109.8006446
763580.1898	9118366.446	579	111.424869

763800.7909	9118365.169	566	110.7799398
764021.3922	9118363.89	568	112.0583921
764241.9939	9118362.611	555	111.0434423
764462.5959	9118361.33	544	111.3169272
764683.1982	9118360.048	533	112.9203964
764903.8008	9118358.765	500	109.9806942
765124.4038	9118357.481	507	111.8603412
765345.007	9118356.196	510	112.5030448
765565.6106	9118354.91	515	113.1142147
765786.2145	9118353.623	538	116.3415497
766006.8187	9118352.334	533	114.6703981
766227.4232	9118351.045	529	111.7234729
762699.0652	9118592.834	565	109.0138192
762919.6661	9118591.561	551	109.0446355
763140.2673	9118590.287	558	110.5442309
763360.8688	9118589.012	559	109.5484582
763581.4706	9118587.736	529	106.4015771
763802.0728	9118586.458	547	110.4177223
764022.6752	9118585.18	556	112.0957775
764243.278	9118583.901	548	111.2919513
764463.8811	9118582.62	552	113.6488655
764684.4845	9118581.339	551	114.1246372
764905.0881	9118580.056	522	114.8819541
765125.6922	9118578.772	537	113.3354269
765346.2965	9118577.488	538	113.4596573
765566.9011	9118576.202	540	113.7081176
765787.5061	9118574.915	548	112.891953
766008.1113	9118573.627	585	118.8983234
766228.7169	9118572.338	541	114.6823492
762700.3414	9118814.122	559	108.4165612
762920.9434	9118812.849	550	110.24851
763141.5457	9118811.576	538	110.157757
763362.1483	9118810.301	539	111.6619872
763582.7512	9118809.025	521	112.4458229
763803.3544	9118807.748	510	111.9392541
764023.9579	9118806.47	526	111.9669848
764244.5618	9118805.191	530	110.9839117
764465.1659	9118803.911	518	111.8931241
764685.7704	9118802.63	505	111.8180806
764906.3751	9118801.347	486	113.1975904
765126.9802	9118800.064	517	112.7888925
765347.5856	9118798.779	525	114.6427544
765568.1913	9118797.494	536	114.0792995
765788.7973	9118796.207	544	114.2731395

766009.4037	9118794.92	543	111.9289117
766230.0103	9118793.631	559	116.4365663
762701.6174	9119035.41	555	108.3977496
762922.2204	9119034.138	547	109.5139223
763142.8238	9119032.864	529	109.0377773
763363.4274	9119031.59	522	110.8081527
763584.0314	9119030.314	522	111.3081544
763804.6357	9119029.038	525	112.5008515
764025.2403	9119027.76	527	110.7293155
764245.8452	9119026.481	525	112.5608515
764466.4504	9119025.201	510	111.9573529
764687.0559	9119023.92	484	112.9872118
764907.6618	9119022.638	489	112.8284021
765128.268	9119021.355	515	113.6285244
765348.8744	9119020.071	521	113.5239234
765569.4812	9119018.786	525	113.6908532
765790.0883	9119017.5	539	114.6800892
766010.6957	9119016.212	552	115.4050705
766231.3034	9119014.924	553	114.3592987
762702.893	9119256.698	551	109.6689313
762923.4971	9119255.426	544	109.8793289
763144.1015	9119254.153	530	110.610103
763364.7062	9119252.879	522	111.016247
763585.3113	9119251.603	520	110.1577832
763805.9167	9119250.327	526	110.0631779
764026.5223	9119249.05	518	111.9893172
764247.1283	9119247.771	523	113.4304812
764467.7346	9119246.492	495	110.1019163
764688.3412	9119245.211	492	112.1092063
764908.9481	9119243.929	510	112.745449
765129.5554	9119242.647	517	112.7150857
765350.1629	9119241.363	531	114.1943378
765570.7708	9119240.078	545	114.4135617
765791.3789	9119238.792	570	115.1892482
766011.9874	9119237.505	586	115.306842
766232.5962	9119236.217	576	113.2446013
762704.1683	9119477.986	539	108.4862699
762924.7734	9119476.714	545	110.301648
763145.3789	9119475.441	535	110.2793482
763365.9848	9119474.168	523	112.0985694
763586.5909	9119472.893	528	111.0897315
763807.1973	9119471.617	515	110.504707
764027.8041	9119470.339	487	110.38611
764248.4111	9119469.061	496	112.5442428

764469.0185	9119467.782	526	113.7212678
764689.6262	9119466.502	532	112.4466572
764910.2341	9119465.22	518	115.6774088
765130.8425	9119463.938	519	113.1516419
765351.4511	9119462.655	532	114.3166589
765572.06	9119461.37	554	114.1197089
765792.6693	9119460.084	569	113.0531121
766013.2788	9119458.798	584	114.7564846
766233.8887	9119457.51	598	117.0656013
762705.4432	9119699.274	537	109.8358947
762926.0495	9119698.002	524	108.9508872
763146.6561	9119696.73	501	109.1235065
763367.2629	9119695.456	489	111.9926689
763587.8701	9119694.182	491	112.1611433
763808.4776	9119692.906	520	114.2439586
764029.0855	9119691.629	527	114.3435851
764249.6936	9119690.351	517	114.6012594
764470.302	9119689.073	527	112.7835851
764690.9108	9119687.793	527	111.5935851
764911.5198	9119686.512	520	113.0139603
765132.1292	9119685.229	499	113.8650385
765352.7389	9119683.946	501	112.2035099
765573.3489	9119682.662	517	114.0012611
765793.9592	9119681.377	530	113.5962817
766014.5699	9119680.09	566	116.0985193
766235.1808	9119678.803	525	114.0251245
762706.7179	9119920.562	526	109.3274325
762927.3252	9119919.291	520	109.932038
763147.9328	9119918.018	498	109.3188803
763368.5408	9119916.745	510	113.9897022
763589.1491	9119915.471	535	111.6655146
763809.7577	9119914.195	541	111.4308978
764030.3665	9119912.919	535	112.1855163
764250.9757	9119911.642	534	113.0012855
764471.5853	9119910.363	530	113.564361
764692.1951	9119909.083	543	113.6693572
764912.8052	9119907.803	535	113.5955163
765133.4157	9119906.521	529	113.2101312
765354.0264	9119905.238	519	114.9478085
765574.6375	9119903.954	537	117.7839791
765795.2489	9119902.669	510	113.6397056
766015.8606	9119901.383	509	114.7754713
766236.4726	9119900.096	544	116.7135901
762707.9922	9120141.85	524	110.4170449

762928.6006	9120140.579	522	110.72858
763149.2093	9120139.307	482	107.1291622
763369.8184	9120138.034	502	114.6639
763590.4277	9120136.76	504	109.9523706
763811.0373	9120135.485	522	111.9985817
764031.6473	9120134.209	514	109.1647166
764252.2576	9120132.932	528	111.7039745
764472.8682	9120131.653	538	111.9462842
764693.4791	9120130.374	552	111.2554936
764914.0903	9120129.094	560	113.4493149
765134.7018	9120127.812	554	112.6339515
765355.3136	9120126.53	549	112.27281
765575.9258	9120125.246	546	116.1101234
765796.5383	9120123.961	540	112.8247462
766017.151	9120122.675	559	116.3250894
766237.7641	9120121.389	564	113.2362255
762709.2662	9120363.137	493	104.3238475
762929.8757	9120361.867	530	108.2705081
763150.4855	9120360.595	517	112.1254876
763371.0956	9120359.323	474	111.8233234
763591.706	9120358.049	522	109.9666522
763812.3167	9120356.774	519	108.2639539
764032.9278	9120355.499	514	110.6327889
764253.5391	9120354.222	515	111.1370225
764474.1508	9120352.944	547	112.8624227
764694.7627	9120351.665	547	111.2524227
764915.375	9120350.385	569	111.4154247
765135.9876	9120349.103	575	112.0307784
765356.6005	9120347.821	582	111.4503493
765577.2137	9120346.538	558	114.1989341
765797.8273	9120345.253	552	116.1535674
766018.4411	9120343.968	538	114.324358
766239.0553	9120342.682	542	115.3712796
762710.5399	9120584.425	497	103.3388612
762931.1505	9120583.155	528	110.0701127
763151.7613	9120581.884	481	106.9810642
763372.3725	9120580.612	487	113.8264924
763592.984	9120579.338	511	110.6481532
763813.5958	9120578.064	520	111.3662546
764034.2079	9120576.788	514	110.3608567
764254.8203	9120575.512	515	110.9750903
764475.433	9120574.234	538	110.792424
764696.0461	9120572.955	546	112.0562613
764916.6594	9120571.676	554	112.8400894

765137.2731	9120570.395	557	111.9127726
765357.8871	9120569.113	579	112.5057444
765578.5014	9120567.83	593	113.4648708
765799.116	9120566.546	592	112.7106484
766019.7309	9120565.261	586	113.2353111
766240.3461	9120563.974	584	111.6868642
762711.8133	9120805.713	467	109.2597752
762932.4249	9120804.443	456	109.8831212
763153.0368	9120803.172	484	112.6318425
763373.6491	9120801.9	517	110.7216188
763594.2616	9120800.627	524	110.1412481
763814.8745	9120799.353	529	110.4524076
764035.4877	9120798.078	541	110.9031773
764256.1012	9120796.802	542	112.307407
764476.715	9120795.524	542	111.157407
764697.3291	9120794.246	551	110.2354681
764917.9435	9120792.966	549	111.4770111
765138.5583	9120791.686	547	111.7085535
765359.1733	9120790.404	553	111.9339263
765579.7887	9120789.122	550	114.6912414
765800.4044	9120787.838	559	113.1992921
766021.0204	9120786.553	571	113.8000082
766241.6367	9120785.267	595	113.361378
762713.0863	9121027.001	464	110.6051124
762933.699	9121025.731	473	109.8832747
763154.312	9121024.461	519	109.748144
763374.9253	9121023.189	519	110.148144
763595.539	9121021.916	521	110.3066096
763816.1529	9121020.643	531	110.4689292
764036.7672	9121019.368	538	111.0785444
764257.3817	9121018.092	531	112.2489309
764477.9966	9121016.815	523	113.0750764
764698.6118	9121015.537	519	111.6281457
764919.2273	9121014.257	517	113.9096794
765139.8431	9121012.977	512	113.9285113
765360.4592	9121011.696	510	113.1800448
765581.0757	9121010.414	538	113.5485478
765801.6924	9121009.13	536	114.410087
766022.3095	9121007.846	552	114.0577568
766242.9269	9121006.56	563	113.8742584

BIODATA PENULIS



Jhon Christ Rivand Sijabat lahir di Pematangsiantar pada 18 Mei 2003. Penulis terakhir menempuh pendidikan di SMA Budi Mulia Pematangsiantar (2018 - 2021). Pada tahun 2021, penulis diterima menjadi mahasiswa Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Selama menempuh perkuliahan, penulis aktif berkontribusi dalam beberapa kegiatan. Pada tahun 2024 penulis menjadi staf ahli Departemen Kesejahteraan Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HMTG). Pada tahun yang sama penulis menjabat sebagai Presiden Himpunan Ahli Geofisika Indonesia

Student Chapter Institut Teknologi Sepuluh Nopember (HAGI SC ITS). Penulis juga secara rutin mengikuti dan berkontribusi dalam berbagai webinar dan seminar yang relevan dengan geofisika dan ilmu kebumihan. Semasa perkuliahan, penulis memiliki pengalaman magang beberapa instansi dan Perusahaan diantaranya CV Safari Alam Teknik, Pusat Survei Geologi dan PT. Aneka Tambang Tbk. Penulis menyambut dengan baik jika terdapat pertanyaan, kritik, dan masukan terkait tugas akhir ini. Apabila terdapat hal-hal yang ingin didiskusikan, dapat menghubungi penulis melalui email : sijabatchrist@gmail.com