

**ANALISIS PERBANDINGAN HASIL PENGOLAHAN DATA
GAYABERAT GGMPLUS DAN DATA ANOMALI BOUGUER LENGKAP
SERTA PEMODELAN 3D DAERAH JAWA TENGAH PADA
KOORDINAT 110°00' BT - 110°30' BT DAN 6°50' LS - 7°30' LS**

(Skripsi)

Oleh:

**Melisa Mayasari
2015051009**



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

**ANALISIS PERBANDINGAN HASIL PENGOLAHAN DATA
GAYABERAT GGMPLUS DAN DATA ANOMALI BOUGUER LENGKAP
SERTA PEMODELAN 3D DAERAH JAWA TENGAH PADA
KOORDINAT 110°00' BT - 110°30' BT DAN 6°50' LS - 7°30' LS**

Oleh

MELISA MAYASARI

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ANALISIS PERBANDINGAN HASIL PENGOLAHAN DATA GAYABERAT GGMPPLUS DAN DATA ANOMALI BOUGUER LENGKAP SERTA PEMODELAN 3D DAERAH JAWA TENGAH PADA KOORDINAT 110°00' BT - 110°30' BT DAN 6°50' LS - 7°30' LS

Oleh

MELISA MAYASARI

Data gayaberat GGMplus merupakan data model gayaberat global (*Global Gravity Model*) dengan resolusi sangat tinggi yang mencakup hampir 80% massa permukaan bumi dan 99,7% area populasi, sehingga dapat digunakan untuk survey geofisika di wilayah Indonesia termasuk di Pulau Jawa. Oleh karena itu, untuk melihat kesesuaian data tersebut dengan daerah penelitian dilakukan perbandingan data GGMPlus dan data Anomali Gayaberat hasil digitasi dari Pusat Survei Geologi (PSG). Metode yang digunakan adalah metode Gayaberat dengan menggunakan analisis spektrum untuk pemisahan anomali regional dan anomali residual dengan *filtering moving average*. Pemodelan 3D densitas bawah permukaan menggunakan *software* Grav3D yang dikorelasikan dengan analisis *Second Vertical Derivative* (SVD). Berdasarkan hasil korelasi data Anomali Bouger Lengkap dengan data Topografi, untuk data Anomali Bouguer Lengkap GGMPlus kurang sesuai dikarenakan data ini memiliki keterbatasan untuk menangkap sumber anomali yang dangkal pada kondisi geologi yang kompleks dan kontur topografi yang kasar. Sedangkan untuk Model 3D data PSG berdasarkan nilai grafik 0 pada SVD terkorelasi dengan baik berdasarkan densitas rendah pada model 3D yang dapat menunjukkan bahwa pada daerah tersebut terdapat sesar atau patahan.

Kata Kunci : GGMPlus, Anomali Bouguer, Gayaberat

ABSTARCT

ANALYSIS OF COMPARISON RESULTS OF GGMPLUS GRAVITY DATA PROCESSING AND FULL BOUGUER ANOMALY DATA AND 3D MODELING OF CENTRAL JAVA REGION ON COORDINATES 110°00' E - 110°30' E AND 6°50' S - 7°30' S

By

MELISA MAYASARI

GGMplus gravity data is global gravity model data (Global Gravity Model) with very high resolution covering almost 80% of the earth's surface mass and 99.7% of the population area, so it can be used for geophysical surveys in Indonesia, including Java. Therefore, to see the suitability of the data for the research area, a comparison was made of the GGMPlus data and the digitized Gravity Anomaly data from the Geological Survey Center (PSG). The method used is the Gravity method using spectrum analysis to separate regional anomalies and residual anomalies with moving average filtering. 3D modeling of subsurface density using Grav3D software which is correlated with Second Vertical Derivative (SVD) analysis. Based on the correlation results of Complete Bouguer Anomaly data with topographic data, GGMPlus Complete Bouguer Anomaly data is not suitable because this data has limitations in capturing shallow anomaly sources in complex geological conditions and rough topographic contours. Meanwhile, for the 3D model, the PSG data based on the graph value 0 on the SVD is well correlated based on the low density in the 3D model which can indicate that in that area there is a fault or fracture.

Keywords: GGMPlus, Bouguer Anomaly, Gravity

Judul Skripsi

**: ANALISIS PERBANDINGAN HASIL
PENGOLAHAN DATA GAYABERAT
GGMPLUS DAN DATA ANOMALI
BOUGUER LENGKAP SERTA
PEMODELAN 3D DAERAH JAWA
TENGAH PADA KOORDINAT 110°00'
BT - 110°30' BT DAN 6°50' LS - 7°30' LS**

Nama Mahasiswa

: Melisa Mayasari

Nomor Pokok Mahasiswa

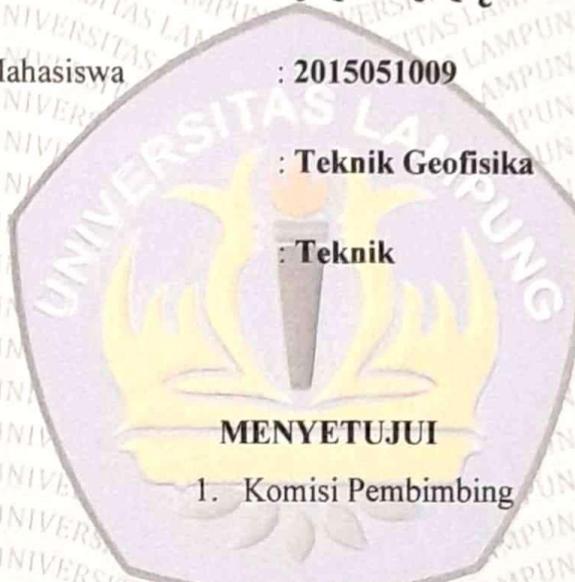
: 2015051009

Program Studi

: Teknik Geofisika

Fakultas

: Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

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

NIP. 197206262000121001

Pembimbing II

Hesty Sampeliling, S.T., M.T.

NIP. 1981106252005022003

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

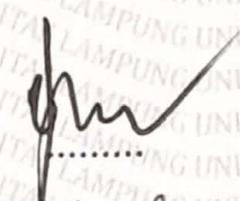
Dr. Karyanto, S.Si., M.T.

NIP. 196912301998021001

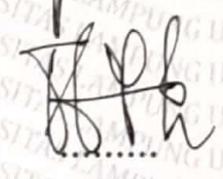
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

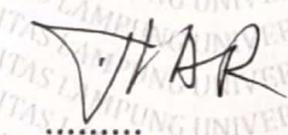
Ketua : **Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si.**



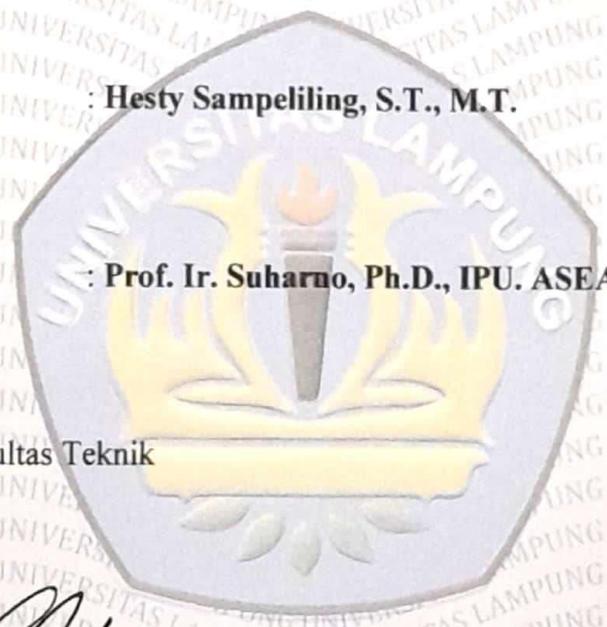
Sekretaris : **Hesty Sampeliling, S.T., M.T.**



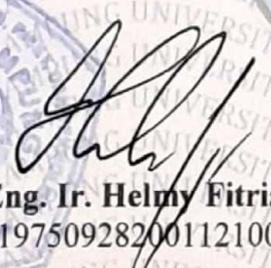
Anggota : **Prof. Ir. Suharno, Ph.D., IPU. ASEAN Eng**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., Msc. }
NIP. 197509282001121002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **12 Juli 2024**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan dalam skripsi dengan judul **“ANALISIS PERBANDINGAN HASIL PENGOLAHAN DATA GAYABERAT GGMPUS DAN DATA ANOMALI BOUGUER LENGKAP SERTA PEMODELAN 3D DAERAH JAWA TENGAH PADA KOORDINAT 110°00’ BT - 110°30’ BT DAN 6°50’ LS - 7°30’ LS”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang diakui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Bandar Lampung, Juli 2024



Melisa Mayasari
NPM. 2015051009

RIWAYAT HIDUP



Melisa Mayasari lahir di Hangkusa pada tanggal 17 Mei 2003 dan beragama Islam, merupakan putri keempat dari 5 bersaudara dari Bapak Nasron dan Ibu Jusniar. Pendidikan yang di tempuh mulai dari Sekolah Dasar di SD Negeri Lengkusa (2008-2014), Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 BPR Ranau Tengah (2014-2017), dan Sekolah Menengah Atas di SMA Al Azhar 3 Bandar Lampung (2017-2020) dan melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Geofisika Unila, penulis telah mengikuti beberapa organisasi yang ada lingkungan kampus, diantaranya Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana sebagai anggota biro kesekretariatan dan rumah tangga, serta anggota SM-IAGI Universitas Lampung divisi wirausaha periode 2022-2023. Pada bulan Januari - Februari 2023 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Biha, Kecamatan Pesisir Selatan, Kabupaten Pesisir Barat. Pada bulan Agustus - September 2023 penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di Pusat Survei Geologi (PSG) dengan judul laporan “**Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan Analisis Derivatif Metode Gayaberat pada Daerah Magelang-Semarang Jawa Tengah**”. Selanjutnya penulis melaksanakan kegiatan Tugas Akhir pada bulan Desember 2023 - Juli 2024 yang dilakukan di Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung dengan judul “**Analisis Perbandingan Hasil Pengolahan Data Gayaberat GGMPlus dan Data Anomali Bouguer Lengkap serta Pemodelan 3D Daerah Jawa Tengah pada Koordinat 110°00’ BT - 110°30’ BT Dan 6°50’ LS - 7°30’ LS**” dan dinyatakan lulus dengan gelar Sarjana Teknik pada 12 Juli 2024.

PERSEMBAHAN

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik. Skripsi ini saya persembahkan untuk :

AYAH DAN IBU KU TERCINTA

Sebagai tanda bakti, hormat dan rasa terima kasih yang tiada terhingga kupersembahkan skripsi ini kepada Ayah (Nasron) dan Ibu (Jusniar) yang telah memberikan kasih sayang, berupa dukungan, ridho, dan cinta kasih yang tiada terhingga diberikan kepada penulis. Berkat dukungan serta do'a tiada hentinya, dan selalu berjuang memberikan yang terbaik kepada anak-anaknya. Semoga Allah SWT selalu memberikan perlindungan kepada ayah dan ibuku serta selalu diiringi oleh rasa kebahagiaan.

KAKAK- KAKAK DAN ADIK KU TERSAYANG

Terimakasih kepada kakak-kakak ku Robert Faizal, Agustian Ahadi, Etya Rosanani serta adikku Ilham Ramadhon yang selalu mendukung dan memberi semangat kepada penulis selama ini. Semoga selalu diberikan kesehatan dan dilimpahkan rezeki oleh Allah SWT.

KELUARGA BESAR

Terimakasih kepada kakak-kakak iparku Defi Nuryandani, Mita Armila, M. Soleh, terimakasih sudah selalu mendukung dan banyak memberi nasehat selama ini semoga semua hal baik selalu datang kepada kita Aamiin. Keponakan-keponakan ku tersayang Masrohatun Rofi Inayah, Meydita Izzatun Fani, Abizar Alkhalifi Ahadi, Marvel Rayyanka Guinandra, dan Ayyas Almortaza Ahadi terimakasih karena sudah hadir memberikan kebahagiaan dan keceriaan dalam kehidupan penulis.

MOTTO

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi (pula) kamu menyukai sesuatu, padahal ia amat buruk bagimu, Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui”

(Q.S Al-Baqarah, 216)

“Kebaikan itu terdapat dalam lima hal; merasa cukup, menahan diri untuk menyakiti, mencari perkara yang halal, takwa, dan yakin kepada Allah.”

~Imam Syafi’i~

“The only way to do great work is to love what you do.”

~Steve Jobs~

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis haturkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, Yang Maha Kuasa karena berkat rahmat dan hidayah serta karunia-Nya penulis dapat menyusun skripsi dengan judul **“ANALISIS PERBANDINGAN HASIL PENGOLAHAN DATA GAYABERAT GGMPLUS DAN DATA ANOMALI BOUGUER LENGKAP SERTA PEMODELAN 3D DAERAH JAWA TENGAH PADA KOORDINAT 110°00' BT - 110°30' BT DAN 6°50' LS - 7°30' LS”**. Terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini. Penulis pun menyadari mungkin masih terdapat kekurangan di dalam skripsi ini, sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga semua yang tertulis di dalam skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada siapapun, baik kalangan umum maupun akademisi untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 31 Juli 2024

Penulis

Melisa Mayasari
NPM. 2015051009

SANWACANA

Puji dan syukur penulis haturkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, karena berkat rahmat, hidayah dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Analisis Perbandingan Hasil Pengolahan Data Gayaberat GGMPPlus dan Data Anomali Bouguer Lengkap serta Pemodelan 3D Daerah Jawa Tengah pada Koordinat 110°00' BT - 110°30' BT Dan 6°50' LS - 7°30' LS”. Tak lupa shalawat serta salam yang selalu tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad Shallallahu 'Alaihi Wasallam yang selalu menjadi suri tauladan bagi kita semua.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, banyak pihak yang terlibat dan pada kesempatan ini penulis ingim mengucapkan rasa terimakasih kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan anugerah-Nya dan memberikan kemudahan dalam hidup penulis.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Nasron dan Ibu Jusniar yang selalu memberikan cinta dan kasih sayangnya serta senantiasa memberikan dukungan dan do'a kepada penulis sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi ini.
3. Kakak-kakak ku tersayang Robert Faizal, Agustian Ahadi, Etya Rosanani dan Adikku tersayang Ilham Ramadhon, yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
4. Kakak-kakak iparku Defi Nuryandani, Mita Armila, M. Soleh, yang selalu memberikan nasehat agar penulis tetap semangat dalam mengerjakan skripsi.
5. Keponakan-keponakan ku tersayang Masrohatun Rofi Inayah, Meydita Izzatun Fani, Abizar Alkhalifi Ahadi, Marvel Rayyanka Guinandra, Ayyas Almortaza Ahadi yang selalu memberikan keceriaan kepada penulis.
6. Bapak Dr. Karyanto, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.

7. Bapak Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si. selaku pembimbing utama penulis, terima kasih atas kesediaannya untuk meluangkan banyak waktu, memberikan ilmu, arahan serta masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
8. Ibu Hesty Sampeliling, S.T., M.T. selaku pembimbing kedua serta pembimbing lapangan selama penulis melakukan Kerja Praktek di Pusat Survei Geologi. Terima kasih atas bimbingan, ilmu, dan masukan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini.
9. Bapak Prof. Ir. Suharno, Ph.D., IPU. ASEAN Eng. selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk memberikan kritik dan saran atas skripsi ini, sehingga menjadikan skripsi ini menjadi lebih baik.
10. Ibu Ir. Akroma Hidayatika, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan kepada penulis selama menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
11. Seluruh Dosen Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu dan pembelajaran kepada penulis.
12. Pusat Survei Geologi (PSG) yang sudah memberikan kesempatan kepada penulis untuk belajar dan mendapatkan pengalaman.
13. Depi dan Debora, yang sudah menjadi sahabat, teman berbagi cerita dan keluh kesah. Terima kasih sudah menemani penulis sejak awal masuk Jurusan Teknik Geofisika.
14. Vina yang menjadi teman perjuangan Kerja Praktek sampai penyusunan Skripsi ini. Terima kasih selalu memberikan semangat, berbagi cerita dan menemani penulis selama pengerjaan skripsi ini.
15. Teman-teman SMA Sasa, Melan, Uli, Arini, Dea, Jahra, dan Ika yang selalu memberikan semangat, dan meluangkan waktu berbagi cerita kepada penulis.
16. Teman-teman SMP Seci dan Yesi yang sudah banyak memberikan dukungan, menjadi tempat berbagi cerita dan tetap berteman baik hingga saat ini.
17. Leo Naldo Dikaprio yang sudah menemani dan menjadi tempat bercerita penulis.
18. Keluarga besar Teknik Geofisika 2020 yang sudah kebersamaian penulis dari maba sampai dengan masa-masa penyelesaian skripsi ini.
19. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
HALAMAN PESRSETUJUAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN	ix
MOTTO	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xxiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xxvii
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	2
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Lokasi Daerah Penelitian	4
2.2. Geologi Regional	4
2.3. Stratigrafi	5
2.4. Penelitian Terdahulu	10
III. TEORI DASAR	
3.1. Metode Gayaberat	12
3.2. Konsep Dasar Gayaberat	13

3.2.1. Hukum Newton I	13
3.2.2. Percepatan Gayaberat	15
3.2.3. Potensial Gayaberat	16
3.2.4. Rapat Massa Batuan (Densitas).....	17
3.3. Koreksi-Koreksi dalam Metode Gayaberat	19
3.3.1. Koreksi Pasang Surut (<i>Tide Correction</i>)	19
3.3.2. Koreksi Apungan (<i>Drift Correction</i>).....	20
3.3.3. Koreksi Lintang (<i>Latitude Correction</i>)	21
3.3.4. Koreksi Udara Bebas (<i>Free-Air Correction</i>).....	21
3.3.5. Koreksi Bouguer (<i>Bouguer Correction</i>).....	22
3.3.6. Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>).....	22
3.3.7. Anomali Bouguer	23
3.4. Analisis Spektrum	24
3.5. <i>Filter Moving Average</i>	28
3.6. Analisis Derivatif	29
3.6.1. Metode <i>First Horizontal Derivative</i> (FHD)	30
3.6.2. Metode <i>Second Vertical Derivative</i> (SVD).....	31
3.7. <i>Forward Modelling</i>	33
3.8. <i>Inverse Modelling</i>	35
IV. METODE PENELITIAN	
4.1. Tempat dan Waktu Penelitian	36
4.2. Alat dan Bahan	36
4.3. Prosedur Penelitian.....	38
4.4. Jadwal Kegiatan	40
4.5. Diagram Alir.....	42
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	
5.1. Data Penelitian	44
5.2. Anomali Bouguer Lengkap.....	44
5.3. Analisis Spektrum.....	51
5.4. <i>Moving Average</i>	67
5.5. Anomali Regional	68
5.5.1. Anomali Regional data PSG.....	68
5.5.2. Anomali Regional data GGMPPlus.....	68
5.5.3. Perbandingan Anomali Regional.....	70

5.6. Anomali Residual.....	74
5.6.1. Anomali Residual data PSG	74
5.6.2. Anomali Residual data GGMPPlus	74
5.6.3. Perbandingan Anomali Residual	76
5.7. Analisis Derivatif	76
5.8. Pemodelan 3D	88
5.8.1. Pemodelan 3D Data PSG.....	88
5.8.2. Pemodelan 3D data GGMPPlus.....	90
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1. Kesimpulan	99
6.2. Saran	100
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai densitas batuan	18
2. Operator Henderson dan Zietz	32
3. Operator Elkins	32
4. Operator Rosenbach	32
5. Data penelitian	36
6. <i>Software</i> yang digunakan dalam penelitian	37
7. Jadwal kegiatan penelitian	41
8. Kedalaman Anomali Regional dan Anomali Residual Lintasan 1 sampai 9 data PSG	65
9. Kedalaman Anomali Regional dan Anomali Residual Lintasan 1 sampai 9 data GGMplus.....	66
10. Hasil perbandingan grafik analisis dervatif	100
11. Perbandingan hasil pemodelan 3D.....	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi penelitian	8
2. Peta geologi regional daerah penelitian	9
3. Massa m dan m_0 mengalami gaya gayaberat timbal balik	13
4. Gaya tarik menarik antara dua buah benda	14
5. Potensial massa 3 dimensi.....	17
6. Spektrum kerapatan energi dari anomali yang disebabkan oleh beberapa benda sederhana.....	26
7. Kurva $\ln A$ terhadap k	28
8. Respon grafik anomali gayaberat pada FHD dan SVD	30
9. Efek benda bentuk poligon gayaberat	34
10. Diagram alir penelitian.....	43
11. Anomali Bouguer Lengkap data PSG	45
12. Anomali Bouguer Lengkap data GGMPlus	45
13. Kontur Topografi data PSG	46
14. Kontur Topografi data GGMplus.....	46
15. Grafik lintasan A-A' perbandingan Anomali Bouguer Lengkap.....	50
16. Grafik lintasan B-B' perbandingan Anomali Bouguer Lengkap	50
17. Grafik lintasan C-C' perbandingan Anomali Bouguer Lengkap	51
18. Lintasan analisis spektrum data digitasi.....	52
19. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 1 data PSG.....	53
20. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 2 data PSG.....	54
21. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 3 data PSG.....	54
22. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 4 data PSG.....	55
23. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 5 data PSG.....	56

24. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 6 data PSG.....	56
25. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 7 data PSG.....	57
26. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 8 data PSG.....	58
27. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 9 data PSG.....	58
28. Lintasan analisis spektrum data GGMPPlus	59
29. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 1 data GGMPPlus.....	60
30. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 2 data GGMPPlus.....	60
31. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 3 data GGMPPlus.....	61
32. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 4 data GGMPPlus.....	61
33. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 5 data GGMPPlus.....	62
34. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 6 data GGMPPlus.....	63
35. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 7 data GGMPPlus.....	63
36. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 8 data GGMPPlus.....	64
37. Grafik $\ln A$ terhadap k lintasan 9 data GGMPPlus.....	64
38. Anomali Regional data PSG	69
39. Anomali Regional data GGMPPlus	69
40. Grafik lintasan D-D' perbandingan Anomali Regional	71
41. Grafik lintasan E-E' perbandingan Anomali Regional	72
42. Grafik lintasan F-F' perbandingan Anomali Regional	73
43. Anomali Residual data PSG.....	75
44. Anomali Residual data GGMPPlus.....	75
45. Kontur <i>first horizontal derivative</i> (FHD) data PSG.....	77
46. Kontur <i>first horizontal derivative</i> (FHD) data GGMPPlus.....	77
47. Kontur <i>second vertical derivative</i> (SVD) data PSG	78
48. Kontur <i>second vertical derivative</i> (SVD) data GGMPPlus	78
49. Grafik FHD & SVD lintasan 1 data PSG.....	80
50. Grafik FHD & SVD lintasan 2 data PSG.....	81
51. Grafik FHD & SVD lintasan 3 data PSG.....	82
52. Grafik FHD & SVD lintasan 1 data GGMPPlus.....	85
53. Grafik FHD & SVD lintasan 2 data GGMPPlus.....	86
54. Grafik FHD & SVD lintasan 3 data GGMPPlus.....	87
55. Model 3D data Residual PSG	88

56. Model 3D Residual PSG lintasan 1.....	89
57. Model 3D Residual PSG lintasan 2.....	89
58. Model 3D Residual PSG lintasan 3.....	89
59. Model 3D data Residual GGMPlus	90
60. Model 3D Residual GGMplus lintasan 1	90
61. Model 3D Residual GGMplus lintasan 2.....	91
62. Model 3D Residual GGMplus lintasan 3.....	91
63. <i>Slicing</i> 3D PSG dan penampang derivatif lintasan 1	92
64. <i>Slicing</i> 3D GGMplus dan penampang derivatif lintasan 1	93
65. <i>Slicing</i> 3D PSG dan penampang derivatif lintasan 2	94
66. <i>Slicing</i> 3D GGMplus dan penampang derivatif lintasan 2	95
67. <i>Slicing</i> 3D PSG dan penampang derivatif lintasan 3	96
68. <i>Slicing</i> 3D GGMplus dan penampang derivatif lintasan 3	97

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan Negara yang berada pada pertemuan tiga lempeng dunia (*Ring of Fire*) yaitu lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia dan lempeng pasifik yang saling menumbuk satu sama lain sehingga membentuk daerah penunjaman seperti lipatan, patahan serta sebaran gunungapi dari Sumatra, Jawa hingga Bali. Lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasi sendiri bertemu di sepanjang Barat Sumatra, Selatan Jawa, Selatan Nusa Tenggara, kemudian berakhir di Laut Banda (Bird, 2003).

Pulau Jawa sendiri berada pada tujaman lempeng Eurasia di utara dan lempeng Indo-Australia di selatan. Lempeng Eurasia bergerak kearah tenggara sedangkan lempeng Indo-Australia yang ada di selatan bergerak kearah utara dan menunjam ke bawah sistem busur kepulauan Sumatra dan Jawa (Trenggoning, 1994). Akibatnya daerah tujaman tersebut membentuk struktur-struktur geologi regional pada wilayah di daratan Jawa. Sesar Banten, Sesar Cimandiri, Sesar Citarik, Sesar Baribis, Sesar Citanduy, Sesar Bumiayu, Sesar Kebumen-Semarang-Jepara, Sesar Lasem, Sesar Rawapening, Sesar Opak, Sesar Pacitan, Sesar Wonogiri, Sesar Pasuruan, dan Sesar Jember adalah beberapa dari struktur yang ditemukan di daratan Jawa bagian barat hingga bagian timur (Soehaimi, 2008).

Dalam eksplorasi sumber daya alam, kebencanaan, pembuatan spheroida referensi, dan vulkanologi, metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang paling umum digunakan. Metode gayaberat efektif digunakan untuk menemukan struktur geologi dengan perbedaan densitas pada arah

lateral baik lokal maupun regional. Data gayaberat sendiri bisa didapatkan dengan cara melakukan pengukuran secara langsung, melakukan digitasi dari peta, maupun dengan melakukan akuisisi data gayaberat melalui satelit seperti yang ada pada website GGMPlus.

Data gayaberat GGMplus 2013 adalah data model gayaberat global (*Global Gravity Model*) dengan resolusi sangat tinggi dan spasi grid antar titik data sekitar 200 meter dari utara ke selatan. Dengan demikian, data gayaberat GGMplus mencakup hampir 80% massa permukaan bumi dan 99,7% area populasi, sehingga dapat digunakan untuk survey geofisika di dwilayah Indonesia termasuk di Pulau Jawa. Sebagai data sekunder dengan resolusi tinggi, GGMplus dapat memberikan gambaran lebih detail tentang kondisi medan gayaberat di suatu tempat. Oleh karena itu, hasil pengolahan anomali gayaberat dari data GGMplus dapat digunakan untuk pemodelan untuk menentukan densitas, kedalaman, dan bentuk geometri dari struktur atau benda yang menyebabkan anomali di bawah permukaan.

Penelitian ini menggunakan data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) daerah Magelang-Semarang Jawa Tengah yang didapatkan dari Pusat Survei Geologi (PSG) dan juga data gayaberat GGMplus 2013 pada daerah yang sama. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan dua data untuk dilakukan perbandingan dari Anomali Bouguer Lengkap, Anomali Regional, serta Anomali Residual pada daerah penelitian. Selain itu dilakukan analisis derivatif dan gambaran struktur bawah permukaan pada kedua data untuk mengidentifikasi zona patahan dan jenis patahan di daerah penelitian. Analisis derivatif yang dilakukan berupa FHD (*First Horizontal Derivative*) dan SVD (*Second Vertical Derivative*) karena dapat menggambarkan anomali lokal dengan struktur yang dangkal sehingga dapat digunakan untuk menentukan jenis patahan yang ada di daerah penelitian, termasuk patahan naik atau patahan turun. Untuk menggambarkan struktur bawah permukaan wilayah penelitian, dilakukan pemodelan inversi (*inverse modelling*) pada data residual daerah penelitian.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Mendapatkan hasil perbandingan Anomali Bouguer Lengkap data digitasi PSG dan hasil koreksi data gayaberat GGMPPlus.
2. Mendapatkan hasil perbandingan anomali residual dari data digitasi PSG dan data gayaberat GGMplus.
3. Mendapatkan hasil pemodelan 3D bawah permukaan dengan *inverse modelling*.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Data yang digunakan merupakan data gayaberat GGMplus dan data Anomali Bouguer Lengkap (ABL) hasil digitasi daerah Magelang-Semarang Jawa Tengah sebanyak 195 data yang didapatkan dari Pusat Survei Geologi (PSG).
2. Pada kedua data dilakukan perbandingan untuk mengetahui pola Anomali Bouguer Lengkap, jenis patahan atau sesar serta bentuk pemodelan 3D bawah permukaan.
3. Penentuan jenis patahan atau sesar menggunakan analisis derivatif berupa FHD (*First Horizontal Derivative*) dan SVD (*Second Vertical Derivative*).
4. Pemodelan 3D digunakan untuk memberikan gambaran bawah permukaan menggunakan *inverse modelling* pada daerah penelitian.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat pada penelitian ini adalah dapat memberikan informasi mengenai hasil perbandingan data gayaberat GGMplus terhadap data anomali Bouguer lengkap hasil digitasi pada daerah Magelang – Semarang Jawa Tengah. Diharapkan penelitian ini dapat dijadikan suatu referensi ataupun acuan pada penelitian selanjutnya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Lokasi Daerah Penelitian

Lokasi daerah penelitian terletak di Provinsi Jawa Tengah yang mencakup 3 kota dan 8 kabupaten yaitu Kota Magelang, Kota Salatiga, Kota Semarang, Kabupaten Magelang, Kabupaten Semarang, Kabupaten Boyolali, Kabupaten Wonosobo, Kabupaten Temanggung, Kabupaten Demak, Kabupaten Kendal, dan Kabupaten Batang. Lokasi ini berada pada koordinat 110°00' BT sampai 110°30' BT dan 6°50' LS sampai 7°30' LS. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada (**Gambar 1**).

2.2. Geologi Regional

Daerah lokasi penelitian berada pada peta geologi Lembar Magelang-Semarang yang dapat dilihat pada (**Gambar 2**). Perkembangan struktur geologi pada daerah Jawa Tengah terdiri dari endapan permukaan, batuan gunungapi, batuan terobosan dan batuan sedimen yang berumur Tersier hingga Kuarter. Aktivitas tektonik yang ada pada lembar Magelang-Semarang dimulai pada umur Tersier Awal yang ditandai dengan adanya intrusi basal dan juga andesit yang selanjutnya diikuti dengan proses pengangkatan dan erosi. Hasil dari erosi kemudian membentuk sedimen turbidit Formasi Kerek yang diikuti oleh pengendapan Formasi Kalibeng pada lingkungan laut dalam serta pengisian cekungan dari Formasi Damar di lingkungan transisi sampai batial (Thanden dkk., 1996).

Selanjutnya aktivitas tektonik Plio-Plitosen mengaktifkan kembali hasil Tersier Awal kemudian melakukan pembentukan lipatan-lipatan yang diikuti dengan sesar naik berarah relatif barat-timur, sesar geser yang berarah

timurlaut-baratdaya dan baratlaut-tenggara serta sesar normal. Rekahan-rekahan yang terjadi merupakan bidang lemah tempat munculnya batuan gunungapi kuarter muda ke permukaan (Thanden dkk., 1996).

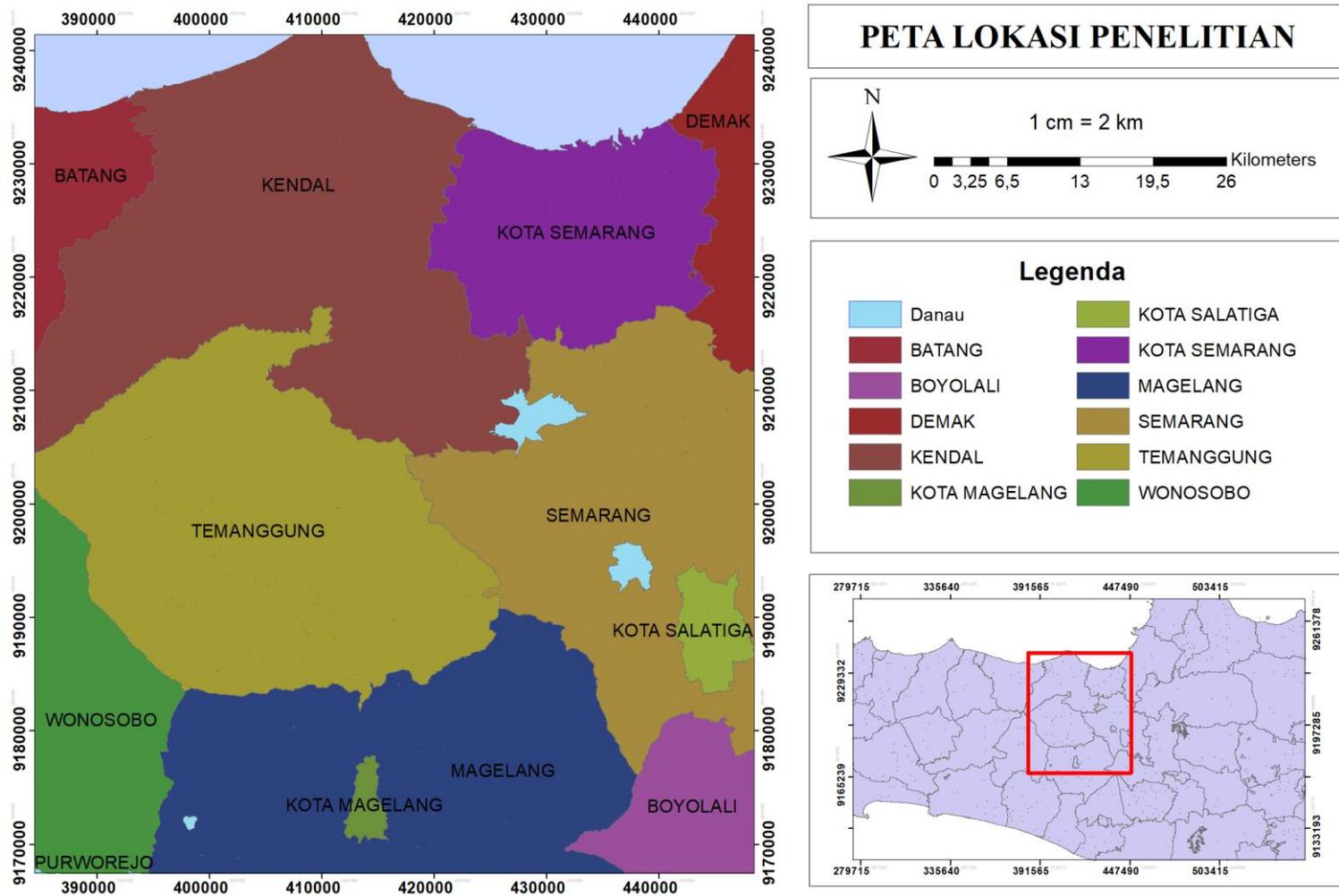
2.3. Stratigrafi

Berdasarkan peta geologi daerah penelitian dikelompokkan menjadi beberapa formasi yang secara umum berupa kelompok batuan sedimen dan kelompok batuan vulkanik. Adapun beberapa kelompok formasi batuan tersebut terbagi kedalam beberapa formasi berikut (Thanden dkk., 1996).

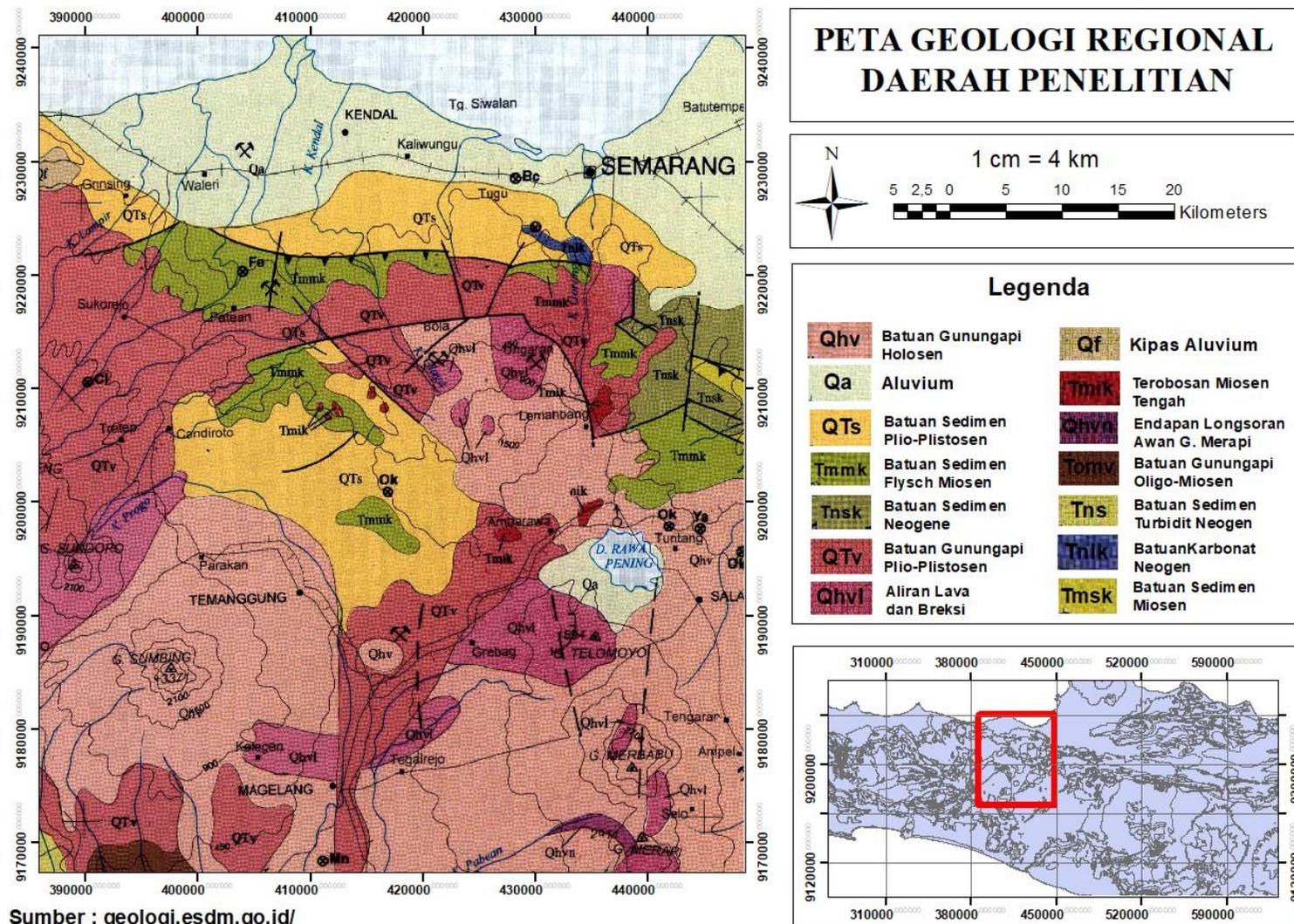
1. Aluvium (Qa) terdiri dari kerikil dengan bongkah-bongkah terkumpul pada dasarnya, ditutupi oleh pasir dan lanau. Bongkahnya kebanyakan batuan volkanik, terutama andesit, berdiameter sampai sebesar 1 m, kebanyakan keras dan tidak lapuk; bongkah-bongkah batugamping dan batupasir jarang. Satuan ini mencakup endapan rawa atau danau dimana sungai terbendung oleh lahar atau longsoran, atau bahkan oleh sesar-sesar.
2. Batuan Gunungapi Holosen (Qhv) terdiri dari berbagai jenis batuan hasil erupsi beberapa gunungapi strato, berupa breksi gunungapi, aglomerat, lahar, lava, tuf, lapilli dan bom. Secara umum bersusunan andesit sampai basal, hasil erupsi gunungapi : Ciremai, Slamet, Sundoro, Sumbing, Jembangan, Merapi, Tidar, Dieng, Merbabu dan Lawu.
3. Batuan Sedimen Plio-Plistosen (QTs) perselingan breksi gunungapi, tuf kasar, konglomerat, tuf halus, dan lempung tufan. Breksi berkomponen andesit, dasit dan basal. Tuf kasar terdiri dari horeblenda, plagioklas, dan kayu tekersikan. Pada beberapa tempat ditemukan juga tuf halus bersisipan batupasir gampingan berfosil moluska serta koral; batulempung berforaminifera kecil, serta lensa-lensa batugamping, setempat berupa endapan lahar. Struktur sedimen yang ditemukan berupa lapisan silang-siur dan bodin. Tebalnya antara 900 dan 1000 m; termasuk kedalam Fm. Ciherang, Fm. Cijulang, Fm. Kalibiuk, fm. Damar, Anggota batupasir fm. Damar, Anggota breksi fm. Ligung, dan Anggota lempung fm. Ligung.

4. Batuan Sedimen Flysch Miosen (Tmmk) pada bagian bawah berupa batuan sedimen tipe flysch, berlapis sangat baik, terdiri dari perselingan batulanau, batulempung, batupasir gampingan serta batugamping pasiran. Mengandung bahan gunungapi; bagian atas napal bersisipan batupasir tufan-gampingan, batulanau tufan serta batupasir kerikilan dengan banyak sekali mengandung bahan gunungapi. Fosil foram yang berada dalam satuan ini menunjukkan umur Miosen Tengah; termasuk Formasi Kerek.
5. Batuan Sedimen Neogene (Tnsk) Napal pejal pada bagian atas, stmpat karbonan; napal bersisipan batupasir tufan dan juga bintal batugamping pada bagian bawah. Ditemukan pula perselingan batupasir tufan, batulanau gampingan serta batupasir berstruktur silang-siur, konvolut serta perarian bersusun. Fosil yang ditemukan menunjukkan umur Miosen Akhir-Pliosen. Satuan terendapkan dalam lingkungan lautt dalam sampai laut dangkal; termasuk Fm. Kalibeng dan Anggota Banyak Fm. Kalibeng.
6. Batuan Gunungapi Plio-Plistosen (QTV) Breksi gunungapi, aliran lava, tuf, breksi aliran, lahar, batupasir tufan, dan batulempung tufan bersisipan tuf halus sampai kasar, umumnya bersusunan andesit sampai basal. Setempat dibagian bawah terdapat batulempung mengandung moluska. Batuan gunungapi yang melapuk berwarna coklat-kemerahan serta sering disertai bongkahan besar. Ketebalan antara 50 dan 200 m. satuan ini merupakan hasil erupsi G. Ciremai Tua, G. Slamet Tua serta G. Jambangan, termasuk Fm. Kaligetas dan Fm. Payung.
7. Aliran Lava dan Breksi (Qhvl) terutama berupa aliran lava dan breksi, lahar dan kubah lava, bersusunan andesit basal. Satuan ini terdiri atas lava berongga (lava G. Slamet), breksi dan lava andesit augit dari G. Merapi, aliran lava dan kubah berkomposisi andesit horenbenda-augit dari G. Sumbing dan G. Unggaran; lava andesit hipersten-augit dan basal olivine augit dari G. Sundoro; kerucut G. Tidar berkomposisi andesit porfir, aliran basal olivine augit G. Kaligetir, Aliran lava berongga andesit porfir dari G. Gilipetung dan G. Telomoyo.

8. Kipas Aluvium (Qf) terutama bahan rombakan batuan gunungapi; telah tersayat.
9. Terobosan Miosen Tengah (Tmik) Batuan terobosan bersusunan basal augit, porfir plagioklas, basal andesitan olivine-augit serta andesit hornblenda-augit. Umur batuan ini adalah Miosen Tengah.
10. Endapan Longsoran Awan Panas G. Merapi (Qhvn) Sebelah utara terbentuk dari awan panas 1954, sedangkan endapan pada lereng sebelah barat terbentuk pada letusan 1969; ketebalan mencapai beberapa meter. Lahar berasal dari longsoran terendapkan secara tidak teratur di sepanjang lereng sejauh beberapa kilometer.
11. Batuan Gunungapi Oligo-Miosen (Tomv) Breksi gunungapi, tuf, lava bersusun andesit-basal serta dasit, berselingan dengan batupasir sela, konglomerat dan setempat batugamping, serta breksi batuapung, tuf dasit dengan retas diorite. Satuan umumnya terubah dan termineralkan serta banyak mengandung urat-urat kuarsa; diterobos oleh batuan bersusun diorite-granodiorit.
12. Batuan Sediemn Turbidit Neogen (Tns) Berupa perselingan napal, kalkarenit, batupasir sela dan konglomerat bersisipan batugamping dan batupasir kerikilan. Struktur sedimen berkembang baik, di antaranya perlapisan bersusun, perarian sejajar, perarian konvolut serta tikas seruling. Satuan ini berdasarkan fosil foramanya berumur Miosen Akhir-Pliosen Awal.
13. Batuan Karbonat Neogen (Tnlk) Batugamping pejal di bagian bawah, perselingan batugamping pasiran dan napal di bagian atas, termasuk Anggota Kapung Fm. Kalibeng dan Fm. Ledok.
14. Batuan Sedimen Miosen (Tmsk) Perselingan batupasir tufan, batulanau gampingan, batupasir, konglomerat dan sisipan batulempung. Batupasir dan konglomerat berkomponen andesit bermasa dasar tuf. Berdasarkan fosil foraam yang dikandungnya menunjukkan umur Miosen Akhir, termasuk Anggota Banyak dan Anggota Damar Fm. Kalibeng.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian



Gambar 2. Peta geologi regional daerah penelitian

2.4. Penelitian Terdahulu

Sudrajad, B. (2023) telah melakukan penelitian mengenai analisis deskriptif perbandingan data gravitasi GGMplus terhadap data gravitasi lapangan panas bumi Gunung Lawu dan data gravitasi stasiun referensi di Pulau Papua. Penelitian dilakukan dengan melakukan koreksi data medan gravitasi, melakukan perbandingan grafik medan gravitasi observasi GGMplus terhadap gravitasi observasi lapangan di Gunung Lawu, serta perbandingan anomali gravitasi GGMplus terhadap anomali gravitasi pengukuran lapangan di Gunung Lawu. Dari hasil perbandingan dapat disimpulkan bahwa pada titik pengukuran di lintasan atau luasan wilayah dengan kontur topografi yang tidak kasar dan kondisi litologi yang tidak terlalu kompleks, data gravitasi GGMplus mampu memberikan nilai anomali gravitasi dengan tingkat kecocokan atau akurasi yang tinggi dengan error yang kecil. Di tempat lain, di lokasi dengan kontur topografi yang kasar dan kondisi litologi yang kompleks, data gravitasi GGMplus memiliki keterbatasan untuk menangkap anomali gravitasi. Jika melakukan penelitian di suatu wilayah dengan data GGMplus, maka harus mempertimbangkan perbedaan nilai medan gravitasi referensi dan gravitasi referensi di wilayah tersebut.

Agustin, N., & Wibawa, A. (2022) telah melakukan penelitian mengenai analisis data gravitasi untuk identifikasi struktur bawah permukaan daerah potensi panas bumi Cipari menggunakan data gravitasi GGMplus. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan pada daerah penelitian menggunakan analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Berdasarkan hasil analisis yang sudah dilakukan, didapatkan nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL) pada daerah sekitar mata air panas Cipari dengan rentang 91.5 mGal sampai 52.3 mGal. Hasil analisis FHD dan SVD menunjukkan batas kontak batuan dan patahan normal. Kontras anomali berasosiasi dengan struktur geologi seperti antiklin, kontak batuan, dan struktur patahan normal. Data menunjukkan bahwa patahan normal di daerah penelitian adalah komponen sistem panas bumi.

Karimah dkk. (2020) telah melakukan penelitian terhadap korelasi data gravitasi satelit pada daerah panas bumi Blawan-Ijen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil korelasi dari 3 lintasan antara data ABL GGMplus – ABL *free air* BGI (*Bureau Gravimetrique International*) serta data ABL GGMplus – data Bouguer BGI (*Bureau Gravimetrique International*). Berdasarkan hasil korelasi yang telah dilakukan didapatkan pada masing-masing 3 lintasan nilai anomali gravitasi ABL GGMplus dan nilai ABL BGI (*Bureau Gravimetrique International*) pada titik yang sama memiliki pola serta nilai anomali yang hampir sama. Nilai korelasi meningkat seiring dengan tingkat perbedaan antara kedua data, dan sebaliknya, nilai korelasi meningkat seiring dengan tingkat perbedaan antara kedua data. Lintasan 1 memiliki nilai korelasi yang lebih tinggi daripada lintasan 2 dan 3, karena lebih banyak data dengan nilai yang hampir sama. Nilai korelasi rata-rata antara data ABL GGMplus dan ABL BGI (*Bureau Gravimetrique International*) adalah 0,940. Adapun kontur ABL GGMplus dan ABL BGI (*Bureau Gravimetrique International*) menunjukkan nilai ABL rendah dengan rentang 70–100 mGal di daerah pegunungan Ijen. Selain itu, ada kontras anomali gravitasi yang menunjukkan keberadaan patahan.

III. TEORI DASAR

3.1. Metode Gayaberat

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk melakukan perhitungan variasi medan gayaberat yang ada pada bumi. Perbedaan nilai gravitasi yang terdapat pada permukaan bumi muncul dikarenakan persebaran nilai rapat massa atau densitas batuan yang ada pada daerah bawah permukaan bumi, terdapat perbedaan jarak antar permukaan bumi menuju pusat bumi serta didapatkan beragam topografi yang menghasilkan perbedaan nilai gayaberat pada bumi (Sarkowi, 2014).

Metode gayaberat merupakan salah satu bagian terpenting dalam berbagai permasalahan yang melibatkan pemetaan pada bawah permukaan bumi serta studi geologi. Metode gayaberat ini didasarkan pada sifat massa, dimana besarnya massa tersebut akan menentukan besarnya gaya tarik-menarik antara benda tersebut (Djujun, 2005).

Metode gayaberat efektif dilakukan untuk pendugaan struktur bawah permukaan yang dimana metode tersebut mampu mendeteksi kontras densitas pada tubuh batuan. Berdasarkan metode gayaberat dapat diketahui perbedaan kontras densitas yang beragam dan mengindikasikan bahwa struktur bawah permukaan yang beragam jenisnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa distribusi densitas yang tidak seragam di bawah permukaan bumi dapat disebabkan oleh struktur geologi yang ada didalamnya (Setiadi dkk., 2010).

Metode gayaberat digunakan untuk menghitung nilai komponen vertikal berdasarkan percepatan gayaberat di lokasi tertentu. Namun, karena bentuk

bumi tidak sepenuhnya bulat, jarak dari kedalaman tertentu ke pusat bumi berbeda. Adanya perbedaan derajat garis lintang, ketinggian (topografi), lokasi bumi dalam tata surya, variasi rapat massa, atau densitas batuan di bawah permukaan bumi adalah beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai percepatan gayaberat bumi (Untung, 2001).

3.2. Konsep Dasar Gayaberat

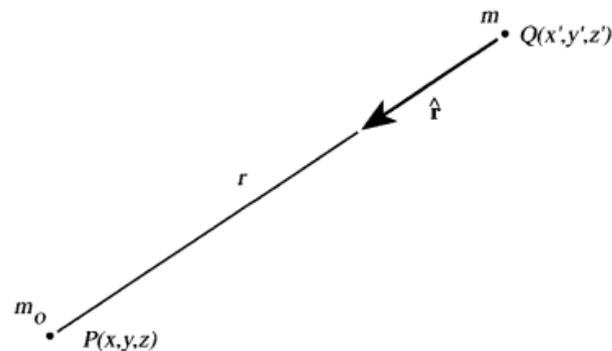
3.2.1. Hukum Newton I

Pada tahun 1687, Newton menerbitkan *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, yang menyatakan hukum tarikan gayaberat Newton: Besarnya gayaberat antara dua massa sebanding dengan masing-masing massa dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. Dalam koordinat kartesian (Gambar. 3), gaya timbal balik antara partikel bermassa m yang berpusat di titik $Q = (x', y', z')$ dan sebuah partikel bermassa m_0 pada $P = (x, y, z)$ dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$F = \gamma \frac{m m_0}{r^2} \quad (1)$$

Dimana

$$r = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{\frac{1}{2}}$$



Gambar 3. Massa m dan m_0 mengalami gayaberat timbal balik yang sebanding dengan m , m_0 , dan r^{-2} . Berdasarkan konvensi, vektor satuan \hat{r} diarahkan dari sumber gayaberat ke titik pengamatan, yang dalam hal ini terletak pada massa uji m_0 (Blakely, 1996).

Jika partikel uji memiliki massa dalam satuan m_0 , maka gaya gayaberat dibagi dengan m_0 menghasilkan gaya tarik gayaberat yang dihasilkan oleh massa m di lokasi partikel uji:

$$\mathbf{g}(P) = -\gamma \frac{m}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (2)$$

Dimana $\hat{\mathbf{r}}$ merupakan vektor satuan yang diarahkan dari massa m ke pengamatan titik P , yaitu dalam koordinat kartesian,

$$\hat{\mathbf{r}} = \frac{1}{r} [(x - x')\hat{\mathbf{i}} + (y - y')\hat{\mathbf{j}} + (z - z')\hat{\mathbf{k}}]$$

Tanda minus pada persamaan (2) menyatakan bahwa $\hat{\mathbf{r}}$ diarahkan dari sumber ke titik pengamatan, berlawanan dengan gaya tarik gayaberat. Karena \mathbf{g} adalah gaya dibagi massa, maka \mathbf{g} memiliki satuan percepatan gayaberat. Gaya tarik gayaberat pada persamaan (2), merupakan medan irrotasional karena:

$$\nabla \times \mathbf{g} = 0 \quad (3)$$

Oleh karena itu, dari teorema Helmholtz, percepatan gayaberat adalah medan konservatif dan dapat direpresentasikan sebagai gradien dari sebuah potensial skalar

$$\mathbf{g}(P) = \nabla U(P) \quad (4)$$

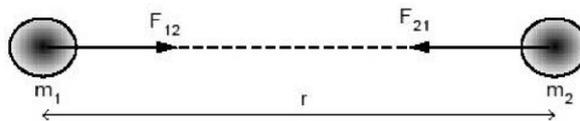
Dimana

$$U(P) = \gamma \frac{m}{r} \quad (5)$$

Dengan:

U : potensial gayaberat

\mathbf{g} : medan potensial



Gambar 4. Gaya tarik menarik antara dua buah benda (Grandis, 2009).

3.2.2. Percepatan Gayaberat

Newton juga menyatakan hubungan antara percepatan dan gaya dalam Hukum Newton II. Menurut Hukum II tentang gerak, gaya sebanding dengan massa benda dikalikan dengan percepatan gayaberat bumi.

$$\vec{F} = m \vec{g} \quad (6)$$

Percepatan suatu benda bermassa m_2 yang disebabkan oleh adanya tarikan benda bermassa m_1 pada jarak r secara sederhana dapat dinyatakan dengan persamaan (7) berikut.

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (7)$$

Jika ditetapkan pada percepatan gaya tarik bumi maka persamaan (7) menjadi persamaan (8) sebagai berikut.

$$\vec{g} = \gamma \frac{M}{r^2} \hat{r} \quad (8)$$

Dengan:

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

M : Massa bumi (kg)

m : Massa benda (kg)

\vec{F} : Gayaberat (N)

r : Jari-jari bumi (km)

Pengukuran percepatan gayaberat pertama kalinya dilakukan oleh Galileo, sehingga untuk menghormati Galileo, kemudian didefinisikan sebagai berikut.

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

Satuan anomali gayaberat dalam kegiatan eksplorasi diberikan dalam orde miligal (mGall):

$$1 \text{ mGall} = 10^{-3} \text{ Gall}$$

$$1 \mu\text{Gall} = 10^{-3} \text{ mGall} = 10^{-6} \text{ Gall} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ mGall} = 10 \text{ g.u.} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$$

Dalam satuan m.k.s, gayaberat diukur dalam g.u. (*gravity unit*) atau $\mu\text{m/s}^2$ (Otonovrilna dkk., 2009).

3.2.3. Potensial Gayaberat

Energi yang diperlukan untuk memindahkan suatu massa dari satu tempat ke tempat lain dikenal sebagai potensial gayaberat. Suatu benda yang dapat membuat medan potensial di sekitarnya karena massanya pada sistem ruang tertentu. Usaha yang diperoleh pada medan gayaberat yang tidak bergantung pada lintasan yang dilewatinya, sebaliknya bergantung pada posisi awal dan akhir (Rosid, 2005). Dalam medan gayaberat bumi, kapasitas untuk memindahkan satu massa (m) dari jarak tak terhingga ke titik tertentu dalam medan gayaberat bumi yang bermassa m adalah potensial. Medan potensial sebagai gradien atau potensial skalar yaitu sebagai berikut (Blakely, 1996).

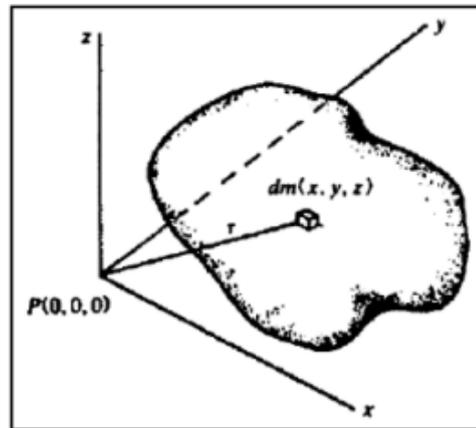
$$\mathbf{g} = -\nabla U(r) \quad (9)$$

Dengan fungsi U merupakan potensial gayaberat, dan percepatan gayaberat \mathbf{g} merupakan medan potensialnya. Tanda negatif pada persamaan (9) menunjukkan bahwa arah gayaberat menuju ke titik yang dituju. Jika bumi dengan massa M diasumsikan berifat homogen serta bentuk bola dengan jari-jari R , maka potensial gayaberat dapat ditulis sebagai berikut:

$$\nabla U(\hat{r}) = -\frac{F(\hat{r})}{m_2} = -g(\hat{r}) \quad (10)$$

$$U(\hat{r}) = \int_{\infty}^r (\nabla U) \cdot dr = \int_{\infty}^r g \cdot dr \quad (11)$$

$$U(\hat{r}) = -\gamma \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = \gamma \frac{m}{r} \quad (12)$$



Gambar 5. Potensial massa 3 dimensi (Telford, 1990).

Berdasarkan persamaan (12) potensial yang disebabkan oleh elemen massa dm pada titik (x, y, z) dengan jarak r dari $P(0, 0, 0)$ adalah:

$$dU = \gamma \frac{dm}{r} = \gamma \rho \frac{dx dy dz}{r} \quad (13)$$

Dimana $\rho(x, y, z)$ merupakan densitas dan $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Sedangkan potensial total dari massa yaitu:

$$U = \gamma \int_x \int_y \int_z \left(\frac{\rho}{r} \right) dx dy dz \quad (14)$$

Dengan g merupakan percepatan gayaberat pada sumbu z arah vertikal serta dengan asumsi bahwa nilai ρ konstan, maka nilai g menjadi:

$$g = - \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right) = \gamma \rho \int_x \int_y \int_z \left(\frac{z}{r^3} \right) dx dy dz \quad (15)$$

Medan gayaberat bumi disebabkan oleh adanya pengaruh distribusi massa pada bawah permukaan yang digambarkan dengan fungsi densitas (ρ). Sedangkan bentuk dari permukaan bumi yang sesungguhnya digambarkan dengan batas integral (Sarkowi, 2007).

3.2.4. Rapat Massa Batuan (Densitas)

Untuk menghitung percepatan gayaberat, besaran utama yang digunakan adalah rapat massa batuan, atau densitas (ρ). Faktor-faktor seperti porositas, kandungan fluida yang mengisi ruang pori batuan,

rapat massa butir pembentuk, dan pemadatan yang disebabkan oleh tekanan dan pelapukan memengaruhi densitas batuan yang ada pada permukaan bumi.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (16)$$

Dimana m merupakan massa yang dimiliki oleh suatu benda, v merupakan *volume* dari suatu benda. Anomali gayaberat terjadi karena adanya perbedaan densitas pada batuan. Perbedaan densitas pada batuan dapat disebabkan oleh perubahan material yang mengisi volume pori – pori batuan.

Seperti yang ditunjukkan pada (**Tabel 1**) nilai densitas setiap batuan memiliki nilai yang berbeda. Variasi nilai rapat massa yang ada di batuan sedimen disebabkan oleh gaya tektonik (Kirbani, 2001).

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

Jenis Batuan	Batas (gr/cc)	Rata-rata (gr/cc)
Batuan Sedimen		
<i>Alluvium</i>	1,96 – 2,00	1,98
<i>Clay</i>	1,63 – 2,60	2,21
<i>Gravel</i>	1,70 – 2,40	2,00
<i>Loess</i>	1,40 – 1,93	1,64
<i>Silt</i>	1,80 – 2,20	1,93
<i>Soil</i>	1,20 – 2,40	1,92
<i>Sand</i>	1,70 – 2,30	2,00
<i>Sandstone</i>	1,61 – 2,76	2,35
<i>Shale</i>	1,77 – 3,20	2,40
<i>Limestone</i>	1,93 – 2,90	2,55
<i>Dolomit</i>	2,28 – 2,90	2,70
<i>Chalk</i>	1,53 – 2,60	2,01
<i>Halite</i>	2,10 – 2,60	2,22
<i>Glacier Ice</i>	0,88 – 0,92	0,90

Jenis Batuan	Batas (gr/cc)	Rata-rata (gr/cc)
<i>Rhyolit</i>	2,35 – 2,70	2,52
<i>Andesit</i>	2,50 – 2,81	2,64
<i>Granit</i>	2,40 – 2,80	2,61
<i>Syenite</i>	2,60 – 2,95	2,77
<i>Basalt</i>	2,70 – 3,30	2,99
<i>Gabro</i>	2,70 – 3,50	3,03
Batuan Metamorf		
<i>Gneiss</i>	2,59 – 3,00	2,80
<i>Schist</i>	2,39 – 2,90	2,64
<i>Phylite</i>	2,68 – 2,80	2,74
<i>Slate</i>	2,70 – 2,90	2,79
<i>Granulite</i>	2,52 – 2,73	2,65
<i>Amphibolite</i>	2,90 – 3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,20 – 3,54	3,37

3.3. Koreksi-Koreksi dalam Metode Gayaberat

Dalam metode gayaberat terdapat beberapa koreksi-koreksi yang harus dilakukan untuk mendapatkan anomali gayaberat, adapun koreksi-koreksi yang digunakan tersebut antara lain:

3.3.1. Koreksi Pasang Surut (*Tide Correction*)

Pasang surut bumi yang disebabkan oleh matahari dan bulan memiliki amplitudo yang cukup untuk untuk dideteksi oleh pengukur gayaberat sebagai gayaberat yang bervariasi terhadap waktu. Efek pasang surut tidak pernah melebihi $3 \times 10^{-6} \text{ m.detik}^{-2}$ (0,3 mGal), jumlah yang kecil dibandingkan dengan koreksi-koreksi lain terhadap gayaberat yang teramati. Akan tetapi, efek pasang surut harus diperhitungkan dalam survei presisi tinggi (Longman, 1959).

Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan efek gaya tarik dari benda yang ada di luar bumi seperti bulan dan matahari. Yaitu dengan melakukan pengukuran nilai gayaberat pada stasiun yang sama dan

pada interval waktu tertentu, kemudian bacaan gravitometer tersebut di plot terhadap fungsi waktu sehingga didapat suatu persamaan yang dipakai dalam menghitung koreksi pasang surut. Harga koreksi pasang surut ini selalu ditambahkan pada pembacaan gayaberat.

3.3.2. Koreksi Apungan (*Drift Correction*)

Koreksi ini dilakukan karena adanya perbedaan pembacaan gayaberat pada titik pengukuran yang sama dalam waktu yang berbeda, yang disebabkan karena adanya guncangan atau pergeseran pegas pada alat gravitometer. Menghilangkan efek ini dilakukan dengan melakukan akuisisi data gayaberat didesain dalam suatu rangkaian tertutup (*loop*), sehingga besar penyimpangan tersebut dapat diketahui serta diasumsikan linier pada selang waktu tertentu. Harga koreksi *drift* pada masing-masing titik stasiun adalah sebagai berikut (Koesuma, 2001):

$$Drift_{(sn)} = \frac{(t_{sn} - t_b)}{(t_{b'} - t_b)} (G_{b'} - G_b) \quad (17)$$

Dengan:

$Drift_{(sn)}$: koreksi *drift* stasiun-n

t_{sn} : waktu pembacaan stasiun-n

t_b : waktu pembacaan stasiun *base* pada awal *loop*

$t_{b'}$: waktu pembacaan stasiun *base* pada akhir *loop*

G_b : nilai pembacaan stasiun *base* pada awal *loop*

$G_{b'}$: nilai pembacaan stasiun *base* pada akhir *loop*

Koreksi *drift* selalu dikurangkan terhadap pembacaan gravitometer.

$$G_{td} = G_t - Drift \quad (18)$$

Dengan :

G_{td} : gayaberat terkoreksi pasang surut dan *drift*

G_t : gayaberat terkoreksi pasang surut

3.3.3. Koreksi Lintang (*Latitude Correction*)

Bentuk bumi seperti yang diketahui adalah mendekati *spheroidal*. Untuk pendekatan bentuk bumi tersebut digunakan *spheroid* referensi. *Spheroid* referensi ini merupakan suatu *ellipsoid* yang dipakai dalam pendekatan untuk muka laut rata-rata (geoid) dengan mengabaikan efek dari benda yang ada di atasnya. Sesuai dengan Blakely (1995), secara teoritis *spheroid* referensi (G lintang) diberikan oleh persamaan GRS (*Geodetic Reference System*) 1980 gayaberat normal pada persamaan berikut.

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

3.3.4. Koreksi Udara Bebas (*Free-Air Correction*)

Pengukuran gayaberat dilakukan pada ketinggian h dari *mean sea level* akan menyebabkan nilai g semakin kecil, sehingga harus dilakukan koreksi pembacaan alat. Koreksi udara bebas digunakan dalam memperoleh nilai pembacaan gayaberat absolut pada titik observasi (Syamsuriadi, 2013). Menurut Kirbani (2001) persamaan yang digunakan dalam koreksi udara bebas yaitu pada persamaan (19).

$$FAC = 0,3086 \times h \quad (19)$$

Dengan:

FAC : *Free Air Correction*

h : ketinggian (m)

Untuk memperoleh nilai *Free Air Correction* (FAA) atau anomali udara bebas, dapat menggunakan persamaan (20).

$$FAA = g_{obs} - g_{\varphi} + 0,3086 h \quad (20)$$

Dengan:

FAA : *Free Air Correction*

g_{obs} : Gayaberat Observasi

3.3.5. Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Koreksi Bouguer disebabkan oleh adanya pengaruh tarikan massa yang terletak antara datum dan juga titik ukur yang belum diperhitungkan pada saat koreksi udara bebas. Sehingga nilai yang terukur harus dikurangi dengan besarnya gaya tarikan tersebut. Koreksi Bouguer diberikan oleh persamaan (21) sebagai berikut.

$$BC(mgal) = 0,04192 \times \rho \times h \quad (21)$$

Dengan ρ merupakan densitas rata-rata permukaan (gr/cm^3), dan h (dalam meter) merupakan ketebalan slab (jarak datum dan titik ukur) (Telford, 1990).

3.3.6. Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi medan dilakukan untuk meninjau kembali adanya penyebaran massa yang tidak teratur pada sekitar titik pengukuran. Pada koreksi Bouguer menggambarkan titik akuisisi pengukuran pada lapangan yang terletak pada suatu bidang datar yang sangat luas. Sedangkan kondisi lapangan terdapat topografi atau ketinggian yang tidak datar akan tetapi ada kumpulan gunung atau perbukitan. Jika hanya menggunakan koreksi Bouguer saja akan menghasilkan data yang kurang baik. Dari kenyataan diatas, pengaruh material yang ada di sekitar baik material yang ada berada di atas maupun dibawah titik pengukuran turut memberi tambahan terhadap hasil pengukuran di titik pengukuran tersebut sehingga harus dilakukan koreksi topografi terlebih jika di medan pengukuran memiliki topografi yang tidak beraturan seperti rangkaian pegunungan ataupun bukit (Susilawati, 2005). Adapun persamaan untuk koreksi medan yaitu pada persamaan (18).

$$g = \frac{0,04193}{n} \rho \{r_2 - r_1\} + \sqrt{r_2^2 + L^2} - \sqrt{r_1^2 + L^2} \quad (22)$$

Dengan:

g : Respon gayaberat (mGal)

n : jumlah kompartemen tiap zona

ρ : Densitas (g/cc)

r_1 : jari-jari radius dalam (m)

r_2 : jari-jari radius luar (m)

L : selisih ketinggian dari titik pengukuran (m)

Untuk menghitung pengaruh medan atau koreksi medan dapat menggunakan plat transparan yang disebut *Hammer Chart* yang ditempatkan di atas peta topografi. *Hammer chart* akan membagi daerah pada sekitar titik pengukuran pada beberapa zona yang merupakan bagian dari silinder konsentris.

3.3.7. Anomali Bouguer

Anomali Bouguer adalah perbedaan antara nilai gayaberat observasi (g_{obs}) dan jumlah secara aljabar dari koreksi *drift*, koreksi pasang surut, koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi Bouguer, dan koreksi *Terrain*. Misalnya, benda dengan densitas tinggi berada di dalam medium dengan densitas rendah akan memiliki nilai Bouguer anomali positif. Sebaliknya, benda dengan densitas rendah akan memiliki nilai Bouguer anomali negatif (Reynolds, 1997).

Menurut Hinze dalam Parapat (2017), anomali Bouguer adalah selisih antara harga gayaberat pengamatan dengan harga gayaberat teoritis yang didefinisikan pada titik pengamatan tertentu. Perbedaan akan menggambarkan perbedaan densitas atau rapat massa pada suatu daerah dengan daerah sekelilingnya baik ke arah vertikal ataupun lateral. Sebagai contoh karena keterdapatannya suatu material tertentu seperti batuan sumber panas di dalam kulit bumi. Target akhir yang ingin didapatkan dari metoda gayaberat pada eksplorasi sumber daya alam maupun studi keilmuan adalah mendapatkan gambaran bawah permukaan berdasarkan variasi persebaran densitas.

Untuk menggambarkan kondisi bawah permukaan berdasarkan kontras rapat massa batuan, anomali Bouguer menggambarkan

persebaran gayaberat. Oleh karena itu, nilai anomali Bouguer dapat dihitung menggunakan persamaan persamaan (22) (Kirbani, 2001):

$$BA = g_{obs} - g_{\varphi} + FAC - BC + TC \quad (22)$$

Dengan:

g_{obs} : Harga gayaberat pengukuran di titik tersebut

FAC : *Free Air Correction*/ koreksi udara bebas

BC : *Bouger Correction*/ koreksi Bouguer

TC : *Terrain Correction*/ koreksi medan

Nilai anomali yang diperoleh adalah nilai anomali pada ketinggian titik amat.

3.4. Analisis Spektrum

Tujuan dilakukan analisis spektrum adalah untuk menghitung kedalaman anomali gayaberat yang ditemukan pada bawah permukaan. Metode ini menggunakan *transformasi Fourier* untuk mengubah fungsi waktu dan jarak menjadi fungsi frekuensi atau bilangan gelombang (Blakely, 1995).

Analisis spektrum digunakan untuk menentukan batas anomali regional dan residual penelitian. Selanjutnya, hasil analisis spektral ini digunakan untuk menghitung nilai lebar jendela atau lebar spektrum yang diperlukan untuk menghilangkan anomali gayaberat. Pada dasarnya, *transformasi fourier* adalah proses menyusun kembali atau mengurai suatu gelombang sembarang ke dalam gelombang sinus dengan frekuensi yang berbeda. Bentuk gelombang sebenarnya dihasilkan dari penjumlahan gelombang sinus tersebut (Blakely, 1996).

Transformasi *Fourier* dari potensial gayaberat yang diamati pada bidang horizontal pada $z = z_0$ dan disebabkan oleh massa titik yang terletak di bawah bidang. Potensial gayaberat dari sebuah massa titik μ diberikan oleh

$U = \gamma\mu/r$, di mana γ adalah konstanta gayaberat; transformasi *Fourier* dari potensial yang teramati pada bidang horisontal adalah

$$F|U| = \gamma\mu F \frac{1}{r} = 2\pi\gamma\mu \frac{e^{|k|(z_0-z')}}{|k|}, \quad z' > z_0 \quad (23)$$

Dengan:

U : potensial gayaberat

μ : anomali rapat massa

γ : konstanta gayaberat

r : jarak

Percepatan gayaberat \mathbf{g} berhubungan dengan potensial dengan persamaan $\mathbf{g} = \nabla_p U$, sehingga setiap komponen \mathbf{g} hanyalah turunan terarah dari U . Secara khusus, tarikan gayaberat vertikal yang disebabkan oleh massa titik adalah turunan vertikal dari $\gamma\mu/r$, yaitu:

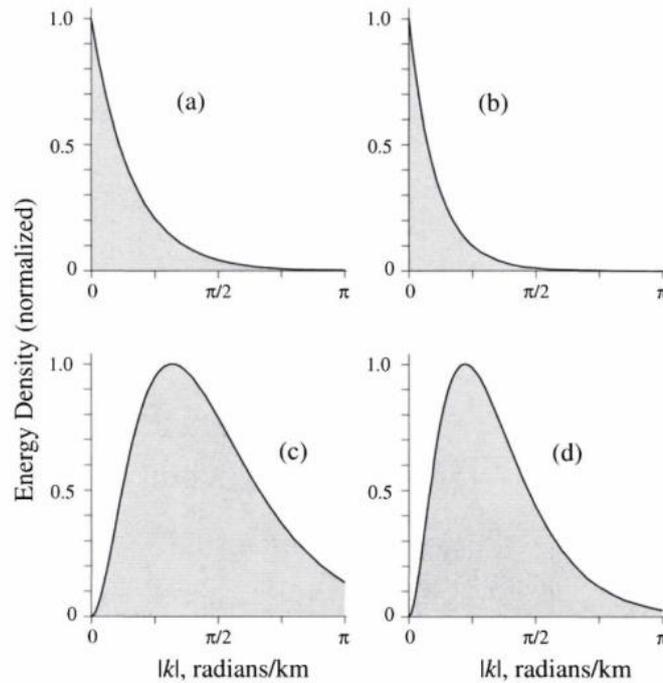
$$g_z = \gamma\mu \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \quad (24)$$

$$F[g_z] = \gamma\mu F \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \quad (25)$$

$$F[g_z] = \gamma\mu \frac{\partial}{\partial z} F \frac{1}{r} \quad (26)$$

Sejumlah karakteristik penting dari anomali gayaberat dapat dilihat dari persamaan (26) dan diilustrasikan oleh Gambar 6(a). Energi maksimum medan gayaberat terjadi pada $|k| = 0$, dan nilai spektrum kerapatan energi pada $|k| = 0$ sebanding dengan massa total. Energi berkurang secara eksponensial dengan bertambahnya panjang gelombang; yaitu, energi pada setiap panjang gelombang mendominasi energi pada semua panjang gelombang yang lebih pendek. Selain itu, laju penurunan energi terhadap bilangan gelombang bergantung pada kedalaman massa; semakin dalam

massa, semakin tidak signifikan panjang gelombang pendek dibandingkan dengan panjang gelombang yang lebih panjang dari anomali. Dengan kata lain, persamaan (26) dan Gambar 6 menunjukkan bahwa anomali gayaberat memiliki *band* yang terbatas; meskipun semua bilangan gelombang berkontribusi pada anomali, bilangan gelombang yang paling besar relatif tidak signifikan.



Gambar 6. Spektrum kerapatan energi dari anomali yang disebabkan oleh beberapa benda sederhana. (a) Monopole pada kedalaman 1 km; (b) garis vertikal massa dengan bagian atas pada 1 km dan bawah pada 2 km; (c) dipol pada kedalaman 1 km; (d) garis vertikal dipol dengan bagian atas atas pada 1 km dan bawah pada 2 km. Sumbu vertikal dinormalisasi menjadi satu.

Transformasi Fourier pada lintasan yang diinginkan adalah:

$$F(g_z) = 2\pi\gamma\mu e^{|k|(z^0-z^1)}, \quad z' > z_0 \quad (27)$$

Jika distribusi rapat massa bersifat random dan tidak ada korelasi antara masing-masing nilai gayaberat, maka $m=1$, sehingga hasil *transformasi Fourier* anomali gayaberat menjadi:

$$A = C e^{|k|(z^0 - z^1)} \quad (28)$$

Dengan:

A : amplitudo

C : konstanta

Untuk memperoleh hubungan antara amplitudo (A) dengan bilangan gelombang (k) dan kedalaman ($z_0 - z_1$) dilakukan dengan melogaritmakan persamaan $A = C e^{|k|(z^0 - z^1)}$, sehingga bilangan gelombang k berbanding lurus dengan *spectral amplitude*.

$$\ln A = \ln 2\pi\gamma\mu e^{|k|(z^0 - z^1)} \quad (29)$$

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (30)$$

Persamaan di atas dapat dianalogikan dalam persamaan garis lurus:

$$y = mx + c \quad (31)$$

Dengan $\ln A$ sebagai sumbu y , $|k|$ sebagai sumbu x , dan $(z_0 - z_1)$ sebagai kemiringan garis (gradien). Oleh sebab itu, kemiringan garisnya merupakan kedalaman bidang dalam dan dangkal $|k|$ sebagai sumbu x didefinisikan dengan bilangan gelombang yang besarnya $\frac{2\pi}{\lambda}$ dan satuannya *cycle/meter*, dengan λ merupakan panjang gelombang.

Hubungan λ dengan Δx diperoleh dari persamaan (32) berikut.

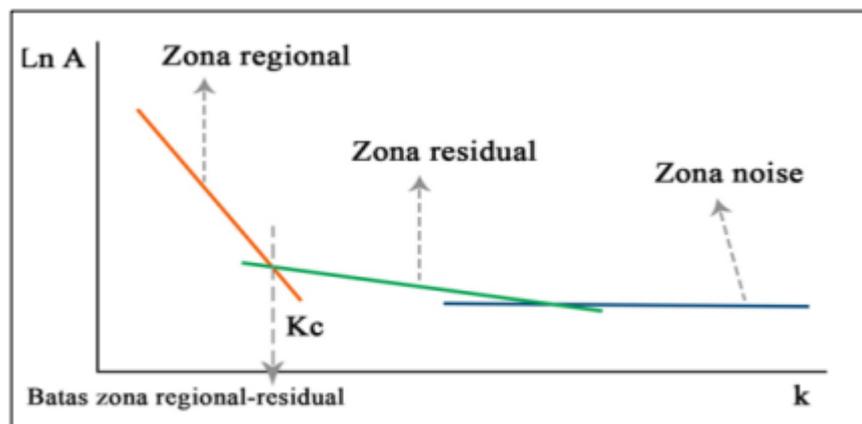
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (32)$$

Nilai λ sama dengan Δx , ada faktor lain pada Δx yang disebut konstanta pengali sehingga $\lambda = N \cdot \Delta x$, konstanta N didefinisikan sebagai lebar jendela, jadi lebar jendela dapat dirumuskan sebagai persamaan (33).

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (33)$$

Dengan Δx merupakan domain spasi yang akan digunakan pada *Fast Fourier Transform* (FFT), dan k_c merupakan bilangan gelombang *cutoff*. Semakin

besar nilai k , maka nilai frekuensi akan tinggi. Hubungan bilangan gelombang k dengan frekuensi f adalah $k = 2\pi f$, frekuensi rendah muncul dari sumber anomali regional dan frekuensi tinggi muncul dari sumber anomali residual.



Gambar 7. Kurva $\ln A$ terhadap K (Blakely, 1996)

Berdasarkan hasil dari analisis spektrum dapat diperkirakan nilai estimasi kedalaman anomali regional dan anomali residual. Anomali regional sendiri dinyatakan bahwa anomali yang bersifat dalam dengan frekuensi yang rendah serta memiliki panjang gelombang yang panjang. Sedangkan untuk anomali residual dinyatakan dengan anomali yang bersifat dangkal dengan frekuensi yang tinggi serta panjang gelombang yang pendek (Supriyadi dkk., 2019).

3.5. *Filter Moving Average*

Salah satu metode penapisan *low pass filter* adalah filter *moving average*, yang menghilangkan frekuensi tinggi dan meloloskan frekuensi rendah. Metode ini digunakan untuk menapis data Anomali Bouguer Lengkap, di mana lebar jendela adalah rata-rata dari setiap Lintasan yang telah melalui analisis spektrum. Sementara anomali regional adalah hasil yang dihasilkan, anomali residual diperoleh dengan mengurangi anomali Bouguer bersama dengan anomali regional. Pada dasarnya, semakin besar lebar jendela yang digunakan, semakin dekat nilai anomali residual dengan anomali Bouguer (Diyanti, 2014).

$$\Delta g_{reg}(i) = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (34)$$

Dengan:

i : nomor stasiun

N : lebar jendela

Δg_{reg} : besarnya anomali regional

$$n = \frac{N-1}{2} \quad (35)$$

Sedangkan untuk penerapan *moving average* dalam peta dua dimensi, harga pada suatu titik dapat dihitung dengan merata-ratakan keseluruhan nilai dalam sebuah kotak persegi dengan titik pusat merupakan titik yang akan dihitung harganya. Misalnya *moving average* dengan lebar jendela 3, maka:

$$\Delta g_{reg} = \frac{1}{9} \sum_{N=1}^9 \Delta g(n) \quad (36)$$

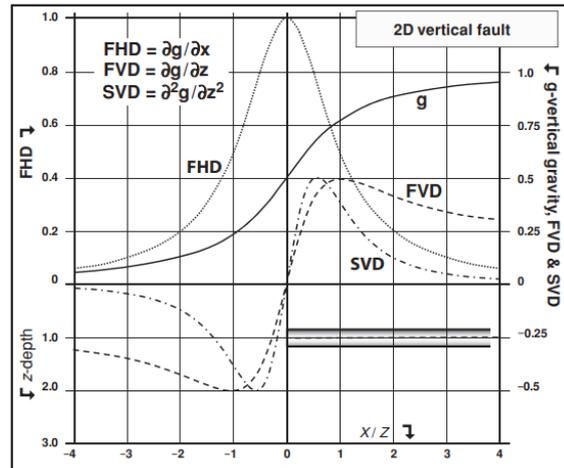
Nilai anomali residual Δg_{res} dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{reg} \quad (37)$$

Dimana Δg merupakan anomali Bouguer total.

3.6. Analisis Derivatif

Analisis derivatif atau analisis turunan digunakan dalam menentukan batasan serta menentukan jenis sesar atau patahan. Dalam melakukan analisis derivatif digunakan metode *First Horizontal Derivative* (FHD) dan metode *Second Vertical Derivative* (SVD). Dalam mengidentifikasi patahan dilakukan korelasi antara grafik FHD dan grafik SVD. Berdasarkan Gambar 7 menunjukkan bahwa sumber anomali berhubungan dengan nilai maksimum FHD dan nilai nol pada SVD menandakan keberadaan suatu patahan (Hinze dkk., 2013).



Gambar 8. Respon grafik anomali gayaberat pada FHD dan SVD

3.6.1. Metode *First Horizontal Derivative* (FHD)

Dalam anomali gayaberat, perubahan nilai anomali terjadi pada jarak tertentu dikenal sebagai *Horizontal Derivative*. *Horizontal Derivative* dapat terjadi karena suatu *body* cenderung menunjukkan terhadap tepian *body*-nya. Oleh karena itu, berdasarkan data gayaberat, kita dapat menggunakan teknik *Horizontal Derivative* untuk menentukan daerah batas kontak densitas horizontal yang ada (Cordell, 1979).

Metode ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan yang dianggap dangkal atau dalam. Dari persamaan (38) dapat diperoleh nilai FHD (Blakely, 1996).

$$FHD = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2} \quad (38)$$

Dengan $\frac{\partial g}{\partial x}$ dan $\frac{\partial g}{\partial y}$ merupakan turunan pertama perubahan nilai gayaberat pada arah x dan y .

FHD dilakukan dengan menggunakan komponen vertikal medan gayaberat pada masing-masing sumbu x dan y kuadrat total dari turunan komponen tersebut diakarkan untuk menghasilkan turunan horizontal pertama (Telford dkk., 1990).

$$\frac{\delta g}{\delta x} = (x_n, y_n) = \sqrt{\left(\frac{\delta g}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta g}{\delta y}\right)^2} \quad (39)$$

3.6.2. Metode *Second Vertical Derivative* (SVD)

Untuk menunjukkan efek dangkal dari pengaruh regionalnya, kita dapat menggunakan *Second Vertical Derivative* (SVD). Ini memungkinkan kita untuk menentukan batas struktur di wilayah penelitian. Dalam kasus di mana metode *moving average* digunakan untuk memisahkan anomali residual yang tidak dapat dipisahkan, metode *Second Vertical Derivative* (SVD) menunjukkan anomali residual, yang menunjukkan bentuk struktur anomali dangkal. Dengan demikian, metode ini menghasilkan hasil yang hampir sama dengan metode *moving average* untuk anomali residual. Secara teoritis, pendekatan ini berasal dari persamaan *laplace*:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (40)$$

Untuk metode gayabarat:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (41)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (42)$$

Untuk SVD, persamaan (42) menjadi:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad (43)$$

Menurut Sarkowi (2010) dalam SVD untuk menentukan patahan normal, patahan naik, patahan turun dapat dilihat dari nilai SVDmax dan SVDmin untuk menentukan patahan:

$|SVD|_{\min} < |SVD|_{\max} =$ Patahan Turun

$|SVD|_{\min} > |SVD|_{\max} =$ Patahan Naik

$|SVD|_{\max} = |SVD|_{\min} =$ Patahan Mendatar.

Terdapat beberapa filter SVD yang dapat digunakan, yaitu filter Henderson dan Zietz (1949), Elkins (1951), dan filter Rosenbach (1953) sebagai berikut.

Tabel 2. Operator Henderson *and* Zietz (1949)

Operator Filter SVD menurut Henderson dan Zietz (1949)				
0,0000	0,0000	-0,0838	0,0000	0,0000
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
-0,0838	-2,6667	17,0000	-2,6667	-0,0838
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000
0,0000	1,0000	-2,6667	1,0000	0,0000

Tabel 3. Operator Elkins (1951)

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

Tabel 4. Operator Rosenbach (1953)

Operator Filter SVD menurut Elkins (1951)				
0,0000	-0,0416	0,0000	-0,0416	0,0000
-0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	-0,0416
0,0000	-0,7500	4,0000	-0,7500	0,0000
-0,0416	-0,3332	-0,7500	-0,3332	-0,0416
0,0000	-0,0416	0,0000	-0,0416	0,0000

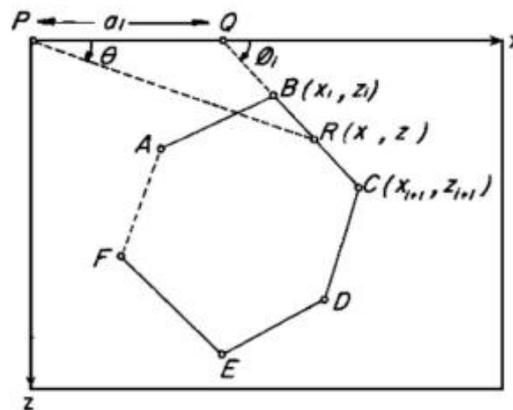
3.7. *Forward Modelling*

Forward Modelling juga dikenal sebagai pemodelan kedepan, adalah proses untuk menghitung nilai anomali dan menginterpretasikan data dari hasil teori yang teramati di permukaan bumi, jika parameter model diketahui untuk memperkirakan densitas bawah permukaan (Talwani (1959) dan Grandis (2009)). Pemodelan ke depan digunakan untuk menghitung efek gayaberat model benda bawah permukaan dengan penampang berbentuk sembarang yang dapat diwakili oleh suatu poligon berisi n , di mana n adalah jumlah yang dinyatakan sebagai integral garis yang membentang di sepanjang sisi poligon. Pada saat interpretasi dicari model yang sesuai dengan data pengamatan atau lapangan. Dengan demikian, diharapkan bahwa kondisi model tersebut dapat mencerminkan atau hampir mencerminkan keadaan sebenarnya. Untuk proses *trial and error* istilah *forward modelling* sering digunakan.

Pada Gambar 9 misalkan ABCDEF merupakan suatu poligon tertentu dengan n merupakan sisi sedangkan P merupakan titik di mana gaya tarik-menarik poligon tersebut harus ditentukan. Jika P sebagai titik asal sistem koordinat xz , yang poligonnya juga terletak pada bidang xz . misalkan z didefinisikan positif ke bawah (vertikal) dan misalkan θ diukur dari sumbu x positif menuju sumbu z positif. (Hubert, 1948) telah menunjukkan bahwa komponen vertikal tarikan gayaberat yang disebabkan oleh benda dua dimensi, pada titik asal sama dengan integral garis yang diambil sepanjang pinggirannya,

$$2G\rho \oint zd\theta$$

Dimana G adalah konstanta universal gayaberat dan ρ adalah kepadatan volume benda. Penggunaan $\oint zd\theta$ pada sisi BC poligon dapat dihitung terlebih dahulu yang kemudian sisi CB bertemu sumbu x di Q dengan sudut ϕ_i .



Gambar 9. Efek benda bentuk poligon gayaberat (Talwani dkk., 1959).

Apabila diasumsikan bahwa $PQ = a_i$, maka

$$z = x \tan \theta \quad (44)$$

Pada titik sepanjang garis BC (R) sehingga

$$z = (x - a_i) \tan \phi_i \quad (45)$$

Dari dua persamaan diatas dapat dibuat persamaan

$$z = \frac{a_i \tan \theta \tan \phi_i}{\tan \phi_i - \tan \theta} \quad (46)$$

Atau

$$\int_{BC} z d\theta = \int_B^C \frac{a_i \tan \theta \tan \phi_i}{\tan \phi_i - \tan \theta} d\theta \equiv Z_i \quad (47)$$

Untuk Z, dapat dibentuk serupa pada

$$\int_{BC} x d\theta = \int_B^C \frac{a_i \tan \phi_i}{\tan \phi_i - \tan \theta} d\theta \equiv X_i \quad (48)$$

Sehingga persamaan gaya tarik vertikal V dan horizontal H pada seluruh poligon ditunjukkan sebagai berikut:

$$V = 2G\rho \sum_{i=1}^n Z_i \quad (49)$$

$$H = 2G\rho \sum_{i=1}^n X_i \quad (50)$$

Dengan sumasi sisi n pada polyigon, maka persamaan Z_i dan X_i adalah sebagai berikut:

$$Z_i = a_i \sin \phi_i \cos \phi_i \left[\theta_i - \phi_{i+1} + \tan \phi_i \log_e \frac{\cos \theta_i (\tan \theta_i - \tan \phi_i)}{\cos \theta_{i+1} (\tan \theta_{i+1} - \tan \phi_i)} \right] \quad (51)$$

$$X_i = a_i \sin \phi_i \cos \phi_i \left[\tan \phi_{i+1} (\theta_i - \phi_i) \log_e \frac{\cos \theta_i (\tan \theta_i - \tan \phi_i)}{\cos \theta_{i+1} (\tan \theta_{i+1} - \tan \phi_i)} \right] \quad (52)$$

Dimana

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{Z_i}{X_i} \quad (53)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{Z_{i+1} - Z_i}{X_{i+1} - X_i} \quad (54)$$

$$\theta_{i+1} = \tan^{-1} \frac{Z_{i+1}}{X_{i+1}} \quad (55)$$

$$a_i = X_{i+1} + Z_{i+1} \frac{X_{i+1} - X_i}{Z_{i+1} - Z_i} \quad (56)$$

Untuk pemodelan 2D pada suatu poligon (Talwani, 1959).

3.8. *Inverse Modelling*

Inverse modelling merupakan suatu metode interpretasi dimana mekanisme model untuk memperoleh kecocokan data perhitungan serta data pengamatan dilakukan secara otomatis. Pada pemodelan inversi, satu atau lebih parameter model dapat dihitung secara otomatis menggunakan data pengamatan sehingga menghasilkan respon yang sesuai. Pemodelan inversi sering disebut data *fitting* atau pencocokan data karena tahapannya melakukan pencarian parameter model yang menghasilkan respon yang cocok dengan data pengamatan (Grandis, 2009).

IV. METODE PENELITIAN

4.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian Tugas Akhir ini dilakukan di:

Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika, Teknik Geofisika, Universitas Lampung

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

Tanggal : Desember 2023 – Juni 2024

4.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdapat pada **Tabel 5** dan **Tabel 6** sebagai berikut:

Tabel 5. Data penelitian

No.	Data	Sumber Data
1	Data Gayaberat GGMPPlus	Data ini merupakan data sekunder yang didapatkan dari data satelit GGMPPlus 2013. Data sekunder tersebut merupakan data hasil pengukuran satelit tanpa pengukuran langsung ke lapangan. Pada penelitian ini menggunakan data gayaberat berupa <i>digital elevation model</i> (DEM) dan data ga (Percepatan Gayaberat). Adapun data tersebut dapat diakses melalui situs web: http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/

2	Data Gayaberat Hasil Digitasi	Data ini berupa data Anomali Bouguer Lengkap, <i>longitude</i> , dan <i>latitude</i> sebanyak 195 data yang diperoleh dari Pusat Survei Geologi (PSG)
3	Peta Lembar Geologi	Peta geologi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu peta lembar geologi Magelang – Semarang yang diperoleh dari arsip Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM)

Tabel 6. *Software* yang digunakan dalam penelitian

No	<i>Software</i>	Fungsi
1	Laptop	Digunakan dalam pengolahan data penelitian
2	ArcGIS	Digunakan untuk membuat peta geologi regional, peta lokasi penelitian, dan analisis SIG lainnya.
3	Numeri	Digunakan untuk mencari nilai amplitude (A), $\ln A$, frekuensi serta nilai bilangan gelombang k dari lintasan yang sudah dibuat pada <i>software Surfer</i> .
4	Surfer 13	Digunakan untuk membuat kontur anomali Bouguer Lengkap, membuat lintasan analisis spektrum, melakukan pemisahan anomali regional dan anomali residual.
5	Microsoft Excel	Digunakan untuk membuat grafik hubungan <i>amplitude</i> sumbu x terhadap bilangan gelombang (k) yang dipakai untuk menentukan nilai regional, residual dan <i>noise</i> .
6	Oasis Montaj	Digunakan untuk menghitung nilai koreksi medan, membuat filter SVD dan FHD dari anomali residual daerah penelitian.
7	Matlab R2013a	Digunakan untuk mengekstraksi data gayaberat GGMplus.
8	Global Mapper	Digunakan untuk menentukan batas zona regional dan lokal untuk koreksi medan.
9	Grav3D	

Digunakan untuk membuat model distribusi densitas bawah permukaan dengan model inversi 3D

4.3. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

4.3.1. Studi Literatur

Langkah pertama yang harus dilakukan dalam sebuah penelitian setelah menetapkan sebuah topik yaitu studi literatur. Studi literatur dilakukan untuk mempelajari ilmu dasar yang digunakan dalam sebuah penelitian. Studi literatur yang dilakukan pada penelitian ini yaitu mencari referensi seperti buku, jurnal, skripsi, maupun penelitian lain yang berkaitan dengan identifikasi perbandingan data serta pemodelan 3D untuk analisis bawah permukaan.

4.3.2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data gayaberat GGMplus 2013, data digitasi CBA daerah Magelang-Semarang, data topografi (DEM SRTM) dan peta geologi lembar Magelang-Semarang. Proses pertama yaitu mengunduh data DEM dan data ga pada *website* <http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>. Data yang diunduh disesuaikan dengan kode wilayah pada daerah penelitian. Daerah penelitian terletak pada koordinat $6^{\circ}50' \text{ LS} - 7^{\circ}30' \text{ LS}$ dan $110^{\circ}00' \text{ BT} - 110^{\circ}30' \text{ BT}$, maka memiliki kode wilayah S10E110. Data gayaberat yang telah diunduh kemudian disimpan sesuai dengan format yang telah ditentukan. Data kemudian diekstrak menggunakan *software* Matlab dengan menginputkan batas-batas wilayah yang akan diteliti sehingga didapatkan data gayaberat dalam bentuk *gravity disturbance*. Adapun *script* yang digunakan dalam mengekstrak yaitu sesuai dengan *script* pada *website* GGMplus. Data topografi DEM SRTM yang didapatkan kemudian diolah

menggunakan *software Global Mapper* untuk mendapatkan nilai topografi daerah penelitian. Data *gravity* yang sudah diekstrak kemudian dilakukan beberapa koreksi hingga mendapatkan data gayaberat dalam bentuk ABL.

4.3.3. Analisis Spektrum

Pada tahapan analisis spektrum ini dilakukan analisis *Transformasi Fourier* menggunakan data Anomali Bouguer Lengkap untuk merubah domain data dari spasial jarak ke spasial frekuensi. *Software* yang digunakan yaitu *software* Numeri. Hasil dari proses FFT berupa nilai *real* dan *imaginer* dari setiap lintasan yang kemudian diproses dengan menggunakan *software Microsoft Excel* untuk mendapatkan nilai amplitudo (A), $\ln A$, frekuensi serta nilai bilangan gelombang k . Nilai amplitudo (A) diperoleh dengan menghitung akar kuadrat dari nilai *real* dan *imaginer*. Kemudian, nilai $\ln A$ diperoleh dengan melogaritmakannya. Perhitungan nilai frekuensi bergantung pada domain spasial yang telah ditentukan sebelumnya; setelah mengetahui besarnya nilai k , *plotting* pada nilai k dan nilai $\ln A$ untuk mendapatkan nilai *cut off* pada area yang akan digunakan untuk menghitung besarnya lebar jendela.

4.3.4. Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Anomali Bouguer yang ditemukan dengan metode gayaberat disebabkan oleh perbedaan densitas batuan di daerah dekat dan jauh dari permukaan bumi. Karena anomali ini ditemukan di daerah dangkal dan daerah dalam penelitian, anomali Bouguer regional dan residual harus dipisahkan.

Pada penelitian ini digunakan pemisahan dengan metode *moving average*. *Moving average* merupakan tahapan nilai anomali dari data anomali gayaberat, hasil dari metode yaitu anomali regional, dan untuk mendapatkan anomali residual dihasilkan dari selisih hasil

pengurangan antara anomali Bouguer dengan anomali regional. Perangkat lunak yang dipakai yaitu perangkat lunak *Surfer*, proses pemisahan anomali dimulai dengan menginputkan data anomali Bouguer ke dalam perangkat lunak *Surfer* lalu nilai lebar jendela optimal yang didapatkan pada proses analisis spektrum dimasukkan sebagai nilai *input* pemisahan.

4.3.5. Analisis Derivatif

Analisis derivatif yang digunakan adalah *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Proses *filtering* FHD dan SVD dilakukan dengan menggunakan *software Surfer* terhadap anomali residual yang sudah diperoleh sebelumnya. Penulis melakukan tahapan analisis derivatif untuk mengetahui sebaran patahan di daerah penelitian karena kontras anomali tinggi dan rendah menunjukkan adanya daerah patahan atau kontras litologi.

4.3.6. Pemodelan Bawah Permukaan

Tahapan pemodelan bawah permukaan pada penelitian ini menggunakan metode *inverse modelling* (3D) dengan *software Grav3D*. Tahapan *inverse modelling* 3D dilakukan dengan melakukan *input* data mesh serta anomali residual data digitasi PSG hasil *filtering* untuk membuat suatu model 3D daerah penelitian

4.4. Jadwal Kegiatan

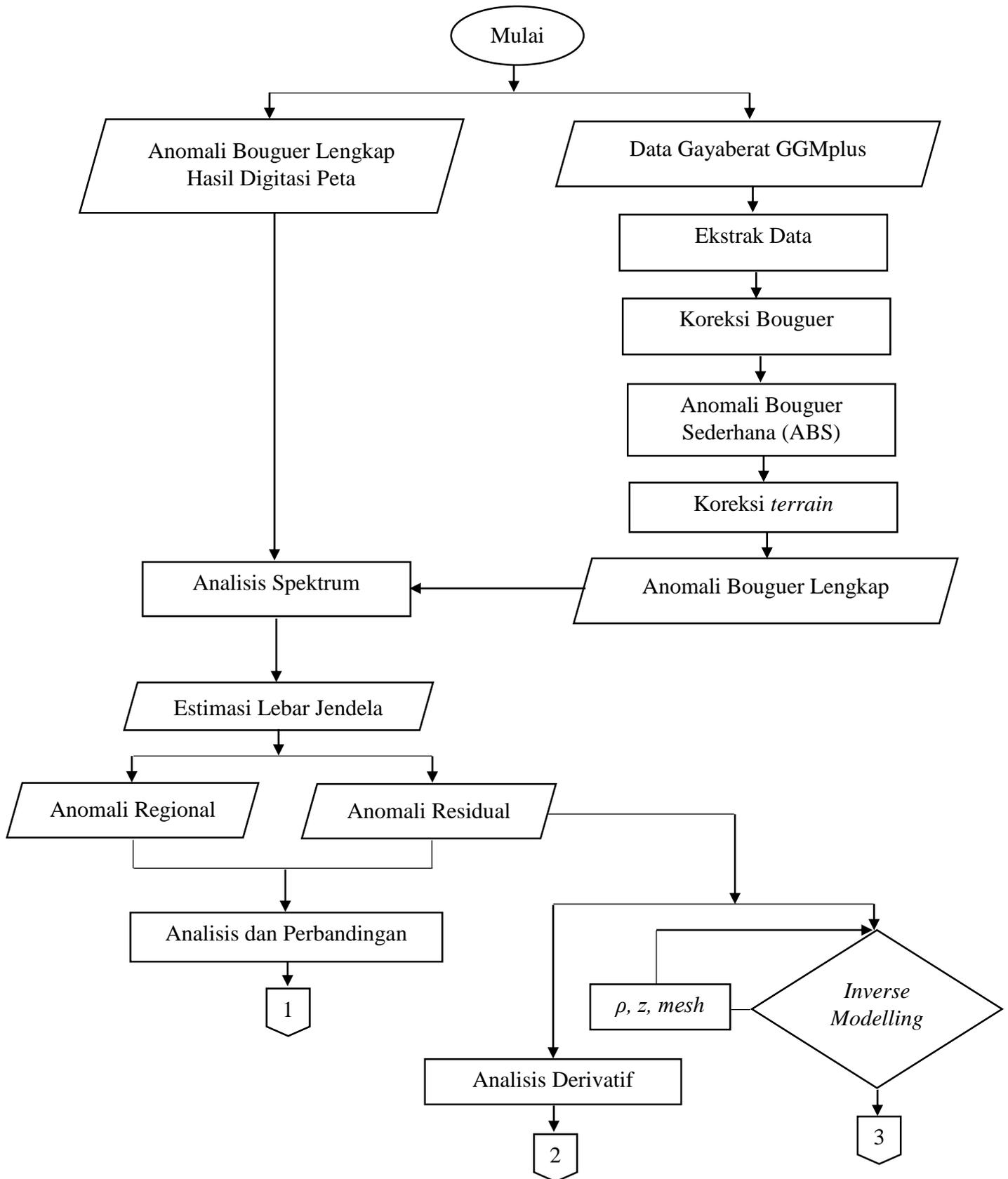
Adapun jadwal kegiatan pada penelitian Tugas Akhir ini terdapat pada **Tabel 7** sebagai berikut.

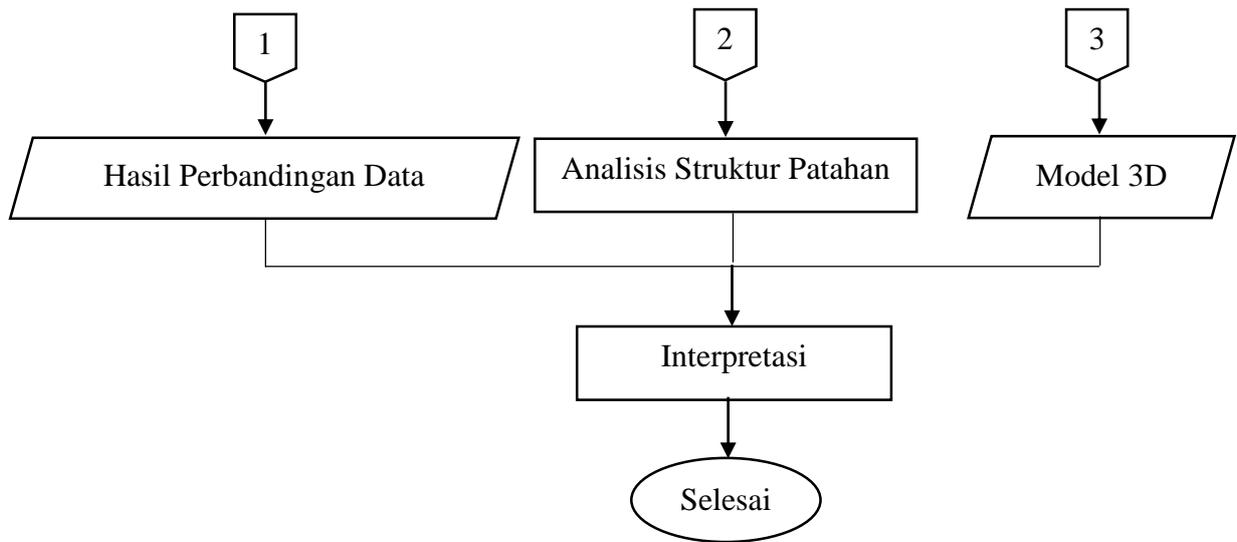
Tabel 7. Jadwal kegiatan penelitian

Kegiatan	Desember				Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1
Studi Literatur																													
Pengolahan Data																													
Penyusunan Proposal Usul dan Bimbingan Usul																													
Seminar Usul																													
Bimbingan Hasil																													
Seminar Hasil																													
Revisi dan Persiapan Sidang Komprehensif																													
Sidang Komprehensif																													

4.5. Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian Tugas Akhir ini yaitu pada **Gambar 10** sebagai berikut:





Gambar 10. Diagram alir penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil korelasi data Anomali Bouguer Lengkap data PSG dan Anomali Bouguer Lengkap data GGMPPlus dengan data Topografi, untuk data GGMPPlus kurang sesuai dikarenakan pada daerah penelitian memiliki kondisi geologi yang kompleks dan kontur topografi yang dihasilkan dari data GGMPPlus memiliki kontur yang kasar. Dimana data ini memiliki keterbatasan untuk menangkap sumber anomali yang dangkal pada kondisi geologi yang kompleks dan kontur topografi yang kasar.
2. Berdasarkan anomali residual dari data PSG dan data GGMPPlus memiliki pola anomali rendahan dan tinggian yang hampir sama, namun untuk anomali residual dari GGMPPlus kontur anomali lebih rapat dibandingkan dengan anomali residual data PSG, sehingga untuk pola kontur anomali residual data PSG lebih terlihat jelas pola kontur rendahan dan tinggiannya.
3. Berdasarkan hasil korelasi grafik analisis derivaif dengan model 3D, data PSG lebih sesuai dengan kondisi geologi bawah permukaan daerah penelitian dibandingkan dengan data GGMPPlus, dimana nilai grafik 0 pada SVD terkorelasi dengan densitas yang rendah pada model 3D yang dapat menunjukkan bahwa pada daerah tersebut terdapat sesar atau patahan.

6.2. Saran

Adapun saran dalam penelitian ini yaitu dilakukan pemodelan 3D yang dikorelasikan dengan grafik *First Horizontal Derivative* (FHD) dan grafik *Second Vertical Derivative* (SVD) untuk melihat struktur patah yang lebih kompleks berdasarkan peta geologi regional pada daerah penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustin, N., dan Wibawa, A. (2022). Analisis Data Gravitasi Untuk Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Potensi Panas Bumi Cipari. *Jambura Geoscience Review*, 4(1), 22-32.
- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(3).
- Blakely, R.J. (1996). *Potensial Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Brotopuspito, KS. (2001). *Teori dan Aplikasi Metode Gravitasi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada (UGM).
- Cordell, L. (1979). Gravimetric Expression of Graben Faulting in Santa Fe Country and Espanola Basin, New Mexico. *New Mexico Geological Society*. 59-64.
- Diyanti, A. (2014). Interpretasi Struktur Geologi Bawah Permukaan Daerah Leuwidamar Berdasarkan Analisis Spektral Data Gayaberat. *Skripsi*. Universitas Pendidikan Indonesia.
- Djudjun, A. (2005). Penyelidikan Gaya Berat Daerah Panas Bumi Sipoholon Tarutung Kabupaten Tapanuli Utara Provinsi Sumatera Utara. Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi. Pusat Sumber Daya Geologi.
- Elkins, T.A. (1951). The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. *Geophysics*, Vol. 23, Hal. 97-127.
- Grandis, H. (2009). Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Henderson, R. G., and Zietz, I. (1949). The Computation of Second Vertical Derivative of Geomagnetic Fields. *Geophysics*, 14(4), 508-516.

- Hinze, J. W., Frese, V. R. R. B., and Saad, A. H. (2012). *Gravity and Magnetic Exploration*. Cambridge University. New York.
- Hinze, J. W. (2013). *Gravity and Magnetic Exploration Principles, Practices, and Applications, 1 Ed.* Cambridge University Press.
- Hubbert, and M. King, A. (1948). A line-integral method of computing the gravimetric effects of two-dimensional masses, *Gephysics*, 13, 215-225.
- Karimah, N. A., Supriyadi, S., & Suprianto, A. (2020). Korelasi Data Gravitasi Satelit pada Daerah Panas Bumi Blawan-Ijen. *Jurnal Sains Dasar*, 9(1), 11-15.
- Koesuma, S. (2001). Analisis struktur bawah permukaan Gunung Kelut menggunakan metode gravitasi. *Doctoral Dissertation*. Universitas Gadjah Mada.
- Longman, I. M. (1959). Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun. *Journal of Geophysical Research*, 64, 2315-5.
- Maulana, I. (2012). Analisis 4D Mikrogravity dan Gradien Vertikal 4D Mikrogravity (Studi Kasus Amblesan Semarang). *Tesis*. Universitas Indonesia.
- Octonovrilna, L. dan Pudja, I.P. (2009). Analisa Perbandingan Anomali Gravitasi dengan persebaran intrusi air asin (Studi kasus Jakarta 2006-2007). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 10(1).
- Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- Rosenbach, O. (1953). A Contribution to the Computation of the " Second Derivative" from Gravity Data. *Geophysics*, 18(4), 894-907.
- Rosid, S. (2005). *Gravity Method in Exploration Geophysics*. Department of Physics, University of Indonesia.
- Sarkowi, M. (2007). Gaya berat mikro antar waktu untuk analisa perubahan kedalaman muka air tanah (Studi Kasus Dataran Aluvial Semarang). *Disertasi*. ITB Bandung.

- Sarkowi, M. (2010). Identifikasi Struktur Daerah Panas bumi Ulubelu Berdasarkan Analisa Data SVD Anomali Bouguer. *Jurnal Sains MIPA*. 16(2): 111-118.
- Sarkowi, M. (2014). *Eksplorasi Gaya Berat*. Graha Ilmu.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). Fisika untuk sains dan teknik. *Jakarta: Salemba Teknika*.
- Setiadi, I., Setyanta, B., & Widijono, B. S. (2010). Delineasi cekungan sedimen Sumatra Selatan berdasarkan analisis data gaya berat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 20(2), 93-106.
- Soehaimi, A. (2008). Seismotektonik dan potensi kegempaan wilayah Jawa. *Indonesian Journal on Geoscience*, 3(4), 227-240.
- Sudrajad, B. (2018). Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Wilayah Kabupaten Nabire di Bagian Utara Leher Burung Pulau Papua Menggunakan Pemodelan Inversi Tiga Dimensi (3D) dan Analisis Horisontal Derivatif Berdasarkan Data Anomali Gravitasi GGMplus. *Tesis*. Universitas Gadjah Mada.
- Sudrajad, B. (2023). Analisis Deskriptif Perbandingan Data Sekunder Gravitasi GGMplus Terhadap Data Gravitasi Lapangan Panas Bumi Gunung Lawu dan Data Gravitasi Stasiun Referensi (gravity base station) di Pulau Papua. *Jurnal Fisika Papua e-ISSN*, 2963, 3702.
- Supriyadi, S., Khumaedi, K., Sugiyanto, S., & Setiaswan, F. (2019). Pemisahan Anomali Regional dan Residual Data Gayaberat Studi Kasus di Kota Lama Semarang. *Physics Education Research Journal*, 1(1), 29-36.
- Susilawati. (2005). *Pemodelan Metode Gayaberat*. Depok: Departement Fisika FMIPA Universitas Indonesia.
- Syamsuriadi, S. (2013). Penentuan Struktur Permukaan Kota Makassar dengan Menggunakan Metode Gayaberat (Gravity). *Skripsi*. Makassar: Universitas Hasanudin.
- Talwani, M., Worzel, J. L., & Landisman, M. (1959). Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of geophysical research*, 64(1), 49-59.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge university press.

Thanden, R. E., Sumadirdja, H., Richards, P. W., Sutisna, K., dan Amin, T. C. (1996). Peta Geologi Lembar Magelang dan Semarang. *Jawa skala, 1*(100.000).

Tregoning, P., Brunner, F. K., Bock, Y., Puntodewo, S. S. O., Mccaffrey, R., Genrich, J. F., and Subarya, C. (1994). First geodetic measurement of convergence across the Java Trench. *Geophysical Research Letters*, *21*(19), 2135-2138.

Untung, M. (2001). Dasar-Dasar Magnet Dan Gaya Berat Serta Beberapa Penerapannya. *Himpunan Ahli geofisika Indonesia (HAGI)*. Jakarta.

LAMPIRAN