

**DELINEASI SUB-CEKUNGAN DAN KONFIGURASI *BASEMENT*
MENGUNAKAN DATA GRAVITASI GGMPLUS DAN DATA
GRAVITASI LAPANGAN BERDASARKAN PEMODELAN 2D DAN 3D
PADA SUB-CEKUNGAN MALANG SELATAN**

(Skripsi)

Oleh

**Jeremia Kelvin Sihotang
2015051002**



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

**DELINEASI SUB-CEKUNGAN DAN KONFIGURASI BASEMENT
MENGUNAKAN DATA GRAVITASI GGMPLUS DAN DATA
GRAVITASI LAPANGAN BERDASARKAN PEMODELAN 2D DAN 3D
PADA SUB-CEKUNGAN MALANG SELATAN**

Oleh

JEREMIA KELVIN SIHOTANG

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

DELINEASI SUB-CEKUNGAN DAN KONFIGURASI *BASEMENT* MENGUNAKAN DATA GRAVITASI GGMPLUS DAN DATA GRAVITASI LAPANGAN BERDASARKAN PEMODELAN 2D DAN 3D PADA SUB-CEKUNGAN MALANG SELATAN

Oleh

JEREMIA KELVIN SIHOTANG

Penelitian metode gravitasi dilakukan di Sub-Cekungan Malang Selatan, secara geografis terletak di 112°30'1.5" BT sampai 113°0'2.19" BT dan 7°59'54.19" LS sampai 8°30'4.96" LS. Digunakan data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan untuk memberikan informasi bawah permukaan secara spesifik mengidentifikasi struktur geologi, batas sub-cekungan, dan konfigurasi *basement*. Adapun beberapa metode yang dilakukan yaitu analisis spektrum sebagai pemisahan anomali residual dan anomali regional, diikuti oleh pemodelan 2D dan 3D yang diintegrasikan dengan analisis derivatif. Delineasi sub-cekungan integrasi data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan mengungkapkan adanya 3 sub-cekungan dengan kedalaman sub-cekungan rata-rata 1,8 km sampai 2,5 km dan terdapatnya 13 zona patahan dengan arah relatif Barat Laut - Tenggara dan Timur Laut - Barat Daya. 3 sub-cekungan ini potensial untuk keberadaan hidrokarbon di Malang Selatan dengan formasi dominan Formasi Wonosari dan Formasi Nampol dengan densitas 2,3 gr/cc sampai 2,4 gr/cc pada kedalaman deposenter sub-cekungan mencapai 2 km hingga 2,5 km di wilayah Kecamatan Ngajum, Kecamatan Tajinan dan Kecamatan Pagelaran.

Kata Kunci : Sub-Cekungan, Metode Gravitasi, Pemodelan 2D, Pemodelan 3D.

ABSTRACT

DELINEATION OF SUB-BASINS AND BASEMENT CONFIGURATION USING GGMPLUS GRAVITY DATA AND FIELD GRAVITY DATA BASED ON 2D AND 3D MODELLING IN THE SOUTH MALANG SUB- BASIN

By

JEREMIA KELVIN SIHOTANG

Gravity method research was conducted in South Malang Sub-Basin, geographically located at 112°30'1.5" East to 113°0'2.19" East and 7°59'54.19" N to 8°30'4.96" N.E. GGMPlus gravity data and field gravity data were used to provide subsurface information to specifically identify geological structures, sub-basin boundaries, and basement configurations. The methods include spectrum analysis as a separation of residual anomalies and regional anomalies, followed by 2D and 3D modeling integrated with derivative analysis. Sub-basin delineation integrating GGMPlus gravity data and field gravity data revealed the existence of 3 sub-basins with an average sub-basin depositional depth of 1.8 km to 2.5 km and the presence of 13 fault zones with relative directions of Northwest - Southeast and Northeast - Southwest. These 3 sub-basins are potential for the presence of hydrocarbons in South Malang with dominant formations of Wonosari Formation and Nampol Formation with densities of 2.3 gr/cc to 2.4 gr/cc at sub-basin depositional depths reaching 2 km to 2.5 km in the areas of Ngajum Sub-district, Tajinan Sub-district and Pagelaran Sub-district.

Keywords : Sub-Basin, Gravity Method, 2D Modelling, 3D Modelling.

Judul Skripsi

: **DELINEASI SUB-CEKUNGAN
DAN KONFIGURASI BASEMENT
MENGUNAKAN DATA
GRAVITASI GGMPLUS DAN
DATA GRAVITASI LAPANGAN
BERDASARKAN PEMODELAN
2D DAN 3D PADA SUB-
CEKUNGAN MALANG
SELATAN**

Nama Mahasiwa

: **Jeremia Kelvin Sihotang**

Nomor Pokok Mahasiwa

: **2015051002**

Program Studi

: **Teknik Geofisika**

Fakultas

: **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1

Pembimbing 2

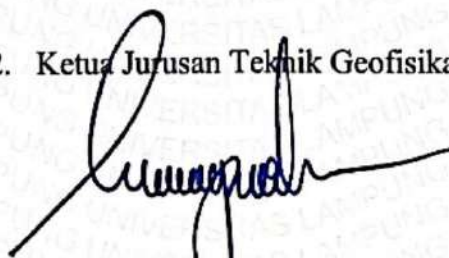


Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.
NIP. 196207171987031002



Ir. Akroma Hidayatika, S.T., M.Eng.
NIP. 199008052019032014

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika



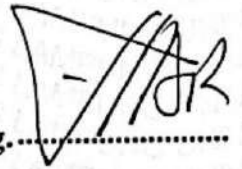
Dr. Karyanto, S.Si., M.T.
NIP. 196912391998021001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

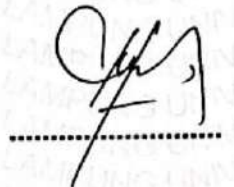
Ketua

: Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.



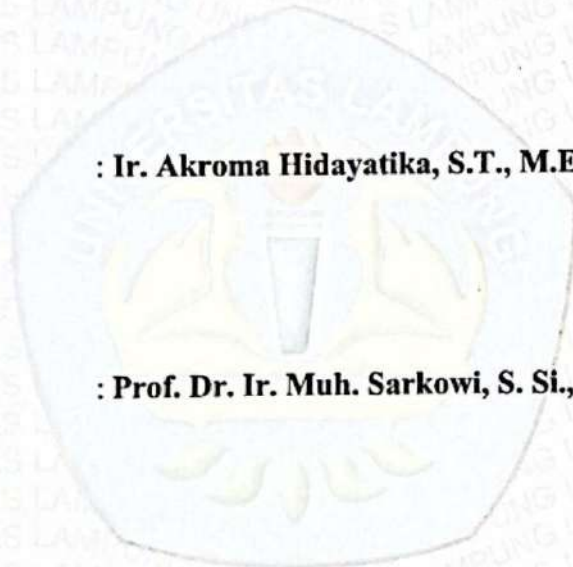
Sekretaris

: Ir. Akroma Hidayatika, S.T., M.Eng.

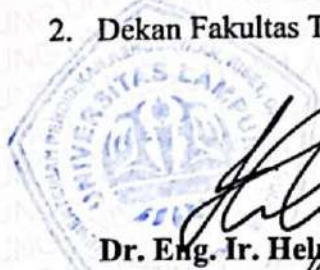


Anggota

: Prof. Dr. Ir. Muh. Sarkowi, S. Si., M.Si., IPU.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP. 19750928/200112 1002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 17 Juli 2024

PERNYATAAN

Dengan ini, saya menyatakan bahwa seluruh isi dari skripsi yang berjudul **“Delineasi Sub-Cekungan dan Konfigurasi *Basement* Menggunakan Data Gravitasi GGMPlus dan Data Gravitasi Lapangan Berdasarkan Pemodelan 2D dan 3D pada Sub-Cekungan Malang Selatan”** adalah hasil karya ilmiah saya sendiri, yang didasarkan pada pengetahuan serta data yang telah saya peroleh, dan tidak melibatkan karya pihak lain.

Jika di kemudian hari ditemukan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya siap menerima sanksi sesuai dengan ketentuan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 01 Agustus 2024

Penulis



Jeremia Kelvin Sihotang

NPM. 2015051002

RIWAYAT HIDUP



Penulis yaitu Jeremia Kelvin Sihotang, dilahirkan di Porsea, Kabupaten Toba, Provinsi Sumatera Utara pada tanggal 29 September 2002. Anak ketiga dari empat bersaudara dari pasangan Ayahanda Tangu Sihotang dan Ibunda Magdalena. Pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SD Negeri 070978 Gunungsitoli diselesaikan pada Tahun 2014, Pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP -

Negeri 4 Tarutung diselesaikan pada Tahun 2017, Pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Tarutung diselesaikan pada Tahun 2020, dan melanjutkan pendidikan menjadi mahasiswa aktif Program S1 Reguler Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis cukup aktif dalam mengikuti kegiatan organisasi di lingkungan geofisika, yaitu *Society of Exploration Geophysicists Student Chapter* Universitas Lampung (SEG SC UNILA) dalam devisi *Publication and Documentation* (SBM) pada periode (2022-2023).

Dalam bidang keilmuan dan akademik penulis pernah mengikuti Program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) di Startup Campus dalam bidang *data science* dan penulis pernah menjadi koordinator asisten praktikum pada mata kuliah praktikum eksplorasi geothermal. Pada Januari Tahun 2023, penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Kelurahan Kuta Baru, Kecamatan Pasar Kemis Kabupaten Tangerang.

Dalam penerapan bidang keahlian, Pada Bulan November 2023 penulis melakukan kegiatan Kerja Praktik (KP) di Pusat Survei Geologi, yang merupakan instansi dibawah naungan kemeterian Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) Bandung dengan judul **“Aplikasi Metode Gayaberat Untuk Estimasi Awal Volume Penyimpanan CO₂ Sub-Cekungan Jawa Timur Bagian Selatan”** Selanjutnya penulis melaksanakan kegiatan Tugas Akhir pada bulan Januari 2023 hingga Juli 2024 yang dilakukan di Laboratorium Geothermal, Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung dengan judul **“Delineasi Sub-Cekungan Dan Konfigurasi Basement Menggunakan Data Gravitasi GGMPlus Dan Data Gravitasi Lapangan Berdasarkan Pemodelan 2D Dan 3D Pada Sub-Cekungan Malang Selatan”**.

PERSEMBAHAN

Puji syukur Penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, atas segala Rahmat dan pertolongan Nya telah terselesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini saya persembahkan kepada

AYAH DAN IBU TANGGU SIHOTANG MAGDALENA

Yang telah membesarkan, membimbing, dan selalu berdoa demi keberhasilanku

SAUDARA KANDUNGKU

Yang selalu mendukung dan memberi arahan serta bantuan keuangan sehingga membuat saya bisa menyelesaikan pendidikan ini

SAUDARA SEPERJUANGAN

Yang menjadi teman sekontrakan berbagi ilmu dan telah bersama-sama menyelesaikan pendidikan dalam keadaan suka maupun duka.

MOTTO

Setiap eksplorasi adalah awal dari penemuan baru. Dengan melangkah ke wilayah yang belum terpetakan, kita membuka pintu menuju wawasan dan pengetahuan yang lebih dalam, membawa kita lebih dekat pada pemahaman sejati tentang dunia di sekitar kita.

Dalam setiap langkah yang diambil, terdapat peluang untuk menemukan sesuatu yang belum diketahui, menantang batasan-batasan yang ada, dan menjawab pertanyaan-pertanyaan yang belum terjawab. Oleh karena itu, semangat eksplorasi dan inovasi harus terus hidup dalam diri setiap ilmuwan dan peneliti, karena dari sinilah kemajuan dan perubahan bermula.

Dengan keyakinan dan ketekunan, kita dapat menaklukkan tantangan dan mengubah setiap data dan informasi menjadi penemuan yang berharga. Inilah yang menjadikan ilmu pengetahuan begitu dinamis dan tak terbatas, selalu berkembang dengan setiap penemuan baru yang kita buat. Dan dalam perjalanan ini, kita tidak hanya belajar tentang dunia, tetapi juga tentang kemampuan kita sendiri untuk terus tumbuh dan beradaptasi dalam pencarian akan pengetahuan.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Delineasi Sub-Cekungan Dan Konfigurasi *Basement* Menggunakan Data Gravitasi GGMPlus Dan Data Gravitasi Lapangan Berdasarkan Pemodelan 2D Dan 3D Pada Sub-Cekungan Malang Selatan”** Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Geofisika. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyusunan skripsi ini. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk penyempurnaan di masa yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang geofisika, serta berguna bagi pembaca yang membutuhkan.

Bandar Lampung, 01 Agustus 2024

Penulis



Jeremia Kelvin Sihotang

NPM. 2015051002

SANWACANA

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, karena berkat kasih dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul "**Delineasi Sub-Cekungan Dan Konfigurasi Basement Menggunakan Data Gravitasi GGMPlus Dan Data Gravitasi Lapangan Berdasarkan Pemodelan 2D Dan 3D Pada Sub-Cekungan Malang Selatan**". Kami tidak lupa menyampaikan salam hormat kepada Yesus Kristus, yang menjadi sumber inspirasi dan kekuatan dalam menjalani kehidupan ini. Dalam menyusun skripsi ini, penulis tidak dapat bekerja maksimal tanpa dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng., selaku pembimbing utama, atas bimbingan, arahan, dan koreksi yang sangat membantu.
2. Ibu Ir. Akroma Hidayatika, S.T., M.Eng., selaku pembimbing kedua, yang juga memberikan banyak masukan dan dukungan.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Muh. Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU., selaku penguji yang telah meluangkan waktu dalam memberikan kritik dan saran, sehingga menjadikan skripsi ini menjadi lebih baik.
4. Bapak Dr. Karyanto, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
5. Dosen - dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati. Terima kasih atas segala ilmu yang telah diberikan selama masa perkuliahan.

6. Kepada Bapak Dr. Andy Setyo Wibowo, S.T., M.T., dan Pusat Survei Geologi (PSG) karena telah memberikan banyak ilmu pengetahuan kepada penulis.
7. Kepada kedua orang tua tercinta, yang telah memberikan dukungan dan kasih sayang yang tidak pernah putus. Terima kasih atas doa, motivasi, dan pengorbanan yang telah diberikan sepanjang perjalanan pendidikan ini.
8. Kepada ketiga saudara kandung saya yang memberikan semangat dan tambahan uang saku saya di perantauan.
9. Faridz dan Rahmad teman Kerja Praktik hingga penyusunan skripsi dan berbagi ilmu.
10. Kepada Rido, Bowo, Raya, Erik dan Astri yang telah menemani dan membantu saya dalam persiapan seminar.
11. Kepada Theressia yang telah ikut membantu dalam mengoreksi kata yang tidak tepat dalam penulisan skripsi ini.
12. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah ikut serta dalam penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata, penulis menyadari mungkin masih terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini dan masih jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam lingkup geofisika.

Penulis



Jeremia Kelvin Sihotang

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PERSETUJUAN.....	v
PENGESAHAN	vi
PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	x
MOTTO	xi
KATA PENGANTAR.....	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
I. PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang.....	1
1. 2 Tujuan Penelitian.....	4
1. 3 Batasan Masalah	4
1. 4 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Lokasi Daerah Penelitian.....	6
2.2 Struktur Geologi Regional.....	7
2.3 Geologi Regional.....	9
2.4 Petroleum Sistem	17
2.4.1 Batuan Induk (<i>Source Rock</i>).....	16

2.4.2	Reservoir.....	16
2.4.3	Batuan Penudung.....	16
2.4.4	Perangkap	17
2.5	Penelitian Terdahulu.....	17
III.	LANDASAN TEORI.....	20
3.1	<i>Global Model Plus 2013 (GGMPlus)</i>	20
3.2	Konsep Dasar Metode Gravitasi.....	22
3.3	Potensial Gravitasi.....	24
3.4	Densitas Batuan	25
3.5	Koreksi Pengukuran Gravitasi.....	27
3.5.1	Koreksi Pasang Surut.....	27
3.5.2	Koreksi Udara Bebas (<i>Free Air Correction</i>)	28
3.5.3	Koreksi Bouguer (<i>Bouguer Correction</i>).....	29
3.5.4	Koreksi Medan (<i>Terrain Correction</i>)	29
3.6	Anomali Bouguer Lengkap (<i>Complete Bouguer Anomaly</i>)	30
3.7	Tranformasi Fourier.....	31
3.8	Analisis Spektrum	32
3.9	Pemisahan Anomali Regional dan Residual.....	35
3.10	Metode <i>Moving Average</i>	36
3.11	Analisis Derivatif.....	37
3.12	<i>Forward modelling</i>	40
3.13	<i>Inverse Modelling</i>	41
IV.	METODOLOGI PENELITIAN.....	42
4.1	Tempat dan Waktu Penelitian	42
4.2	Alat dan Bahan	42
4.3	Prosedur Penelitian	45
4.3.1	Studi Literatur.....	45
4.3.2	Pengambilan Data.....	46
4.3.3	Analisis Spektrum.....	46
4.3.4	Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual.....	47
4.3.5	Analisis Derivatif.....	47
4.3.6	Pemodelan 2D dan Pemodelan 3D	48

4.4	Jadwal Kegiatan.....	49
4.5	Diagram Alir.....	50
V.	PEMBAHASAN.....	52
5.1	Anomali Bouguer Lengkap	52
5.2	Analisis Spektrum	57
5.2.1	Analisis Spektrum Penampang Data Gravitasi GGMPlus.....	59
5.2.2	Analisis Spektrum Penampang Data Gravitasi Lapangan	63
5.3	<i>Moving Average</i>	67
5.4	Anomali Regional.....	68
5.5	Anomali Residual	70
5.6	Analisis Derivatif (FHD dan SVD)	77
5.7	Pemodelan 2D	82
5.7.1	Model 2D (<i>Forward</i>) Lintasan A-A'	87
5.7.2	Model 2D (<i>Forward</i>) Lintasan B-B'	89
5.7.3	Model 2D (<i>Forward</i>) Lintasan C-C'	89
5.8	Pemodelan 3D	92
5.8.1	Model 3D (<i>Inverse</i>) Lintasan A-A'	99
5.8.2	Model 3D (<i>Inverse</i>) Lintasan B-B'	101
5.8.3	Model 3D (<i>Inverse</i>) Lintasan C-C'	103
5.9	<i>Slice</i> Horizontal dan Vertikal Sub-Cekungan Potensial	107
5.10	Perbandingan Deskriptif dan Korelasi Data	107
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	108
6.1	Kesimpulan.....	108
6.2	Saran	109
	DAFTAR PUSTAKA	110

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Nilai Densitas Batuan	26
2. Operator Henderson dan Zietz	39
3. Operator Elkins	39
4. Operator Rosenbach	40
5. Alat dan Bahan Penelitian	44
6. Pelaksanaan Kegiatan Penelitian	49
7. Kedalaman Anomali Regional dan Residual Data Gravitasi GGMPlus	62
8. Kedalaman Anomali Regional dan Residual Data Gravitasi Lapangan	66
9. Panjang Gelombang dan Lebar Jendela Data Gravitasi GGMPlus	67
10. Panjang Gelombang dan Lebar Jendela Data Gravitasi Lapangan	67
11. Hasil Analisis Grafik FHD dan SVD Lintasan A-A'	87
12. Hasil Analisis Grafik FHD dan SVD Lintasan B-B'	89
13. Hasil Analisis Grafik FHD dan SVD Lintasan C-C'	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta administasi daerah penelitian	6
2. Pola struktur utama Pulau Jawa	7
3. Zonasi fisiografi sebagian Pulau Jawa dan Madura	9
4. Peta Geologi Lembar Turen	12
5. Stratigrafi Geologi Malang Selatan dalam peta Geologi Lembar Turen	15
6. Model geologi regional utara-selatan Cekungan Jawa Timur	17
7. Ilustrasi cara kerja Satelit GRACE	21
8. Ilustrasi cara kerja Satelit GOCE	22
9. Gaya tarik menarik antara dua benda.....	24
10. Kurva $\ln A$ terhadap k	35
11. Teknik pemodelan (<i>trial and error</i>) dan modifikasi parameter model.....	41
12. Diagram alir pengolahan data	50
13. Grafik ABL Lintasan Barat-Timur kedua data gravitasi	52
14. Grafik ABL Lintasan Selatan-Utara kedua data gravitasi	54
15. Peta Anomali Bouguer Lengkap data gravitasi GGMPlus	56
16. Peta Anomali Bouguer Lengkap data gravitasi lapangan	56
17. Penampang analisis spektrum pada data gravitasi GGMPlus.....	58
18. Penampang analisis spektrum pada data gravitasi lapangan.....	58
19. Grafik $\ln A$ dan k lintasan A-A' data gravitasi GGMPlus.....	59
20. Grafik $\ln A$ dan k lintasan B-B' data gravitasi GGMPlus	60
21. Grafik $\ln A$ dan k lintasan C-C' data gravitasi GGMPlus	60
22. Grafik $\ln A$ dan k lintasan D-D' data gravitasi GGMPlus.....	61
23. Grafik $\ln A$ dan k lintasan E-E' data gravitasi GGMPlus	62
24. Grafik $\ln A$ dan k lintasan A-A' data gravitasi lapangan	63

25. Grafik Ln A dan k lintasan B-B' data gravitasi lapangan.....	64
26. Grafik Ln A dan k lintasan C-C' data gravitasi lapangan.....	64
27. Grafik Ln A dan k lintasan D-D' data gravitasi lapangan	65
28. Grafik Ln A dan k lintasan E-E' data gravitasi lapangan	66
29. Anomali regional data gravitasi GGMPlus.....	68
30. Anomali regional data gravitasi lapangan.....	69
31. Peta anomali residual data gravitasi GGMPlus.....	71
32. Peta anomali residual data gravitasi lapangan	71
33. Peta sub-cekungan data gravitasi GGMPlus.....	74
34. Peta sub-cekungan data gravitasi lapangan.....	74
35. Pola tinggi <i>basement</i> data gravitasi GGMPlus	76
36. Pola tinggi <i>basement</i> data gravitasi lapangan	76
37. Peta FHD anomali residual data gravitasi GGMPlus	78
38. Peta FHD anomali residual data gravitasi lapangan	78
39. Peta SVD anomali residual data gravitasi GGMPlus	79
40. Peta SVD anomali residual data gravitasi lapangan	80
41. Peta <i>overlay</i> SVD gravitasi GGMPlus pada geologi struktur.....	81
42. Peta <i>overlay</i> SVD gravitasi lapangan pada geologi struktur.....	81
43. Peta lintasan pemodelan 2D dan analisis derivatif.....	83
44. Model 2D (<i>forward</i>) lintasan A-A' data gravitasi GGMPlus	85
45. Model 2D (<i>forward</i>) lintasan A-A' data gravitasi lapangan	86
46. Model 2D (<i>forward</i>) lintasan B-B' data gravitasi GGMPlus.....	88
47. Model 2D (<i>forward</i>) lintasan B-B' data gravitasi lapangan	88
48. Model 2D (<i>forward</i>) lintasan C-C' data gravitasi GGMPlus.....	90
49. Model 2D (<i>forward</i>) lintasan C-C' data gravitasi lapangan	91
50. Model 3D (<i>inverse</i>) Malang Selatan (data gravitasi GGMPlus).....	93
51. Model 3D (<i>inverse</i>) Malang Selatan (data gravitasi lapangan).....	94
52. Model 3D (<i>inverse</i>) data gravitasi GGMPlus di setiap kedalaman.....	95
53. Model 3D (<i>inverse</i>) data gravitasi lapangan di setiap kedalaman	95
54. Penampang 3D data gravitasi GGMPlus berdasarkan lintasan.....	97
55. Penampang 3D data gravitasi lapangan berdasarkan lintasan	97
56. Model 3D (<i>inverse</i>) lintasan A-A' data gravitasi GGMPlus.....	99

57. Model 3D (<i>inverse</i>) lintasan A-A' data gravitasi lapangan	99
58. Model 3D (<i>inverse</i>) lintasan B-B' data gravitasi GGMPlus	101
59. Model 3D (<i>inverse</i>) lintasan B-B' data gravitasi lapangan.....	101
60. Model 3D (<i>inverse</i>) lintasan C-C' data gravitasi GGMPlus	103
61. Model 3D (<i>inverse</i>) lintasan C-C' data gravitasi lapangan.....	103
62. <i>Slicing</i> Sub-Cekungan A arah vertikal dan horizontal.....	105
63. <i>Slicing</i> Sub-Cekungan B arah vertikal dan horizontal	106
64. <i>Slicing</i> Sub-Cekungan C arah vertikal dan horizontal	106

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aktivitas subduksi dari lempeng Indo-Australia mengakibatkan pengaruh yang cukup signifikan pada geologi bagian Selatan Pulau Jawa. Dampak dari aktivitas subduksi ini adalah terbentuknya struktur geologi yang memiliki implikasi pada potensi sumber daya alam dan bencana di wilayah tersebut. Di wilayah Pegunungan Jawa Selatan memiliki potensi adanya hidrokarbon tepatnya di wilayah cekungan busur vulkanik pada Malang Selatan melalui pengujian di laboratorium berdasarkan singkapan dipermukaan diungkapkan bahwa Formasi Nampol berpotensi menghasilkan *source rock* yang mengandung gas, dengan tipe kerogen iii, tercatat kandungan total memiliki rentang 3,48 - 26,18 wt%, berpotensi menghasilkan hidrokarbon baik sampai sangat baik dan indeks hidrogen memiliki rentang 43 sampai 86 mgHC/g TOC (Prasetyadi dkk., 2021). Sub-cekungan di daerah Malang Selatan yang berada pada zona Pegunungan Selatan Jawa Timur (Van Bemmelen, 1949), tersusun atas endapan silisiklastik, vulkaniklastik, batuan karbonat dan vulkanik dengan kemiringan lapisan yang seragam ke arah Selatan (Smyth dkk., 2005). Daerah ini umumnya memiliki topografi yang terbentuk oleh batugamping dan vulkanik, serta sering dijumpai segala *karst* sehingga akuisisi metode konvensional seismik cukup sulit dilakukan pada wilayah ini dimana metode seismik tidak dapat menembus lapisan batuan secara optimal pada wilayah dengan densitas tinggi serta keadaan lapangan yang ekstrem di daerah Malang Selatan. Sebagai alternatif, untuk mendapatkan informasi tentang keadaan bawah permukaan di wilayah Malang Selatan, digunakan

metode geofisika, salah satunya adalah metode gravitasi. Akuisisi data gravitasi dapat dilakukan melalui berbagai metode, seperti survei lapangan, survei udara menggunakan *drone*, dan penggunaan data satelit. Saat ini, terdapat berbagai data sekunder gravitasi yang tersedia secara terbuka, seperti data gravitasi satelit TOPEX, GGMPlus 2013, BGI, EGM2008, serta data gravitasi SRTM2 2018. Oleh karena itu, penelitian pada daerah Malang Selatan yang memiliki kondisi ekstrem dapat sangat terbantu dengan penggunaan data sekunder untuk memberikan informasi bawah permukaan tentang batas cekungan, tren struktur geologi, dan konfigurasi *basement* di cekungan busur depan yang diperlukan untuk informasi awal dalam melakukan eksplorasi hidrokarbon.

Data sekunder gravitasi GGMPlus 2013 merupakan data model gravitasi (*Global Gravity Model Plus*) dengan spasi jarak antar grid data 200 Meter dan tersedia di daratan dan area dekat pantai dengan mencakup data yang hampir global di dalam suatu garis lintang. Data sekunder gravitasi GGMPlus ini sudah dilengkapi dengan penggambaran *forward modelling* dari sebuah gravitasi topografi yang dimana data ini juga diperoleh dari sebuah satelit pada suatu bidang geopotensial berdasarkan ekspansi harmonik bola (*spherical harmonic expansion*) yang bertujuan meningkatkan resolusi data (Hirt dkk., 2013). Data GGMPlus ini memiliki resolusi yang sangat baik dengan teknik komputasi parallel yang dapat menghasilkan resolusi spasial 7,2 detik busur (~200 m dalam arah Utara ke Selatan) (Hirt, 2012).

Namun berdasarkan penelitian Sudrajad (2023), mengungkapkan kekuarangan model dari data GGMPlus dan memperlihatkan grafik perbandingan data lapangan dengan GGMPlus, pada data GGMPlus sedikit kekurangan pada daerah dengan topografi berskala kecil seperti puncak gunung dan daerah lembah dan diungkapkan bahwa kekurangan dari data sekunder GGMPlus ini juga terletak pada nilai elevasi yang berasal dari

satelit. Oleh karena itu, penggunaan data ini diperlukan korelasi dengan data lapangan untuk menghasilkan model bawah permukaan yang akurat.

Metode gravitasi dapat mengidentifikasi kontras densitas secara lateral memiliki sensitivitas terhadap perubahan vertikal, baik yang bersifat lokal maupun regional (Broto, 2011). Karena itu, metode ini sering digunakan untuk mempelajari berbagai fenomena geologi, seperti struktur geologi, batuan dasar, intrusi batuan, cekungan sedimen, endapan sungai purba, dan lain-lain (Sarkowi, 2014). Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup analisis spektrum untuk memperkirakan sumber anomali, terutama kedalaman cekungan serta teknik pemisahan anomali regional dan residual dengan menggunakan metode *moving average*. Penelitian sebelumnya telah dilakukan di wilayah Malang Selatan menggunakan metode gravitasi, di mana geologi bawah permukaan diinterpretasikan melalui pemodelan 3D (*inverse*) gravitasi (Setiadi dan Nainggolan, 2021).

Oleh karena itu, penelitian ini akan melanjutkan penelitian sebelumnya dengan melakukan pemodelan data gravitasi satelit GGMPlus dan data gravitasi lapangan di wilayah Malang Selatan yang saling terintegrasi, untuk menganalisis struktur patahan bawah permukaan menggunakan analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertikal Derivative* (SVD), menunjukkan batas sub-cekungan sedimen dan konfigurasi *basement* secara akurat melalui pemodelan 2D (*forward*) dan pemodelan teknik pemodelan 3D (*inverse*) saling diintegrasikan berguna pada eksplorasi hidrokarbon lebih lanjut.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan zona kedalaman anomali regional dan anomali residual pada Malang Selatan.
2. Mendapatkan batas sub-cekungan berdasarkan anomali residual dan pola tinggian melalui analisis *Second Vertikal Derivative* (SVD).
3. Menganalisis struktur patahan menggunakan data anomali residual, analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertikal Derivative* (SVD).
4. Mendapatkan batas antara sedimen dan tinggi *basement* pada wilayah sub-cekungan dengan pemodelan 2D (*forward*) dan 3D (*inverse*).

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data yang digunakan merupakan data sekunder anomali Bouguer lengkap diperoleh dari website resmi GGMPlus dan data pengukuran lapangan sebanyak 257 titik akuisisi Pusat Survei Geologi.
2. Penentuan batas kedalaman anomali Bouguer regional dan residual menggunakan analisis spektrum.
3. Pemisahan anomali regional dan residual menggunakan *filter moving average*.
4. Struktur bawah permukaan diidentifikasi dengan analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertikal Derivative* (SVD).
5. Model bawah permukaan didapatkan melalui pemodelan 2D (*forward*) dan pemodelan 3D (*inverse*) yang dikorelasikan dengan analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertikal Derivative* (SVD).

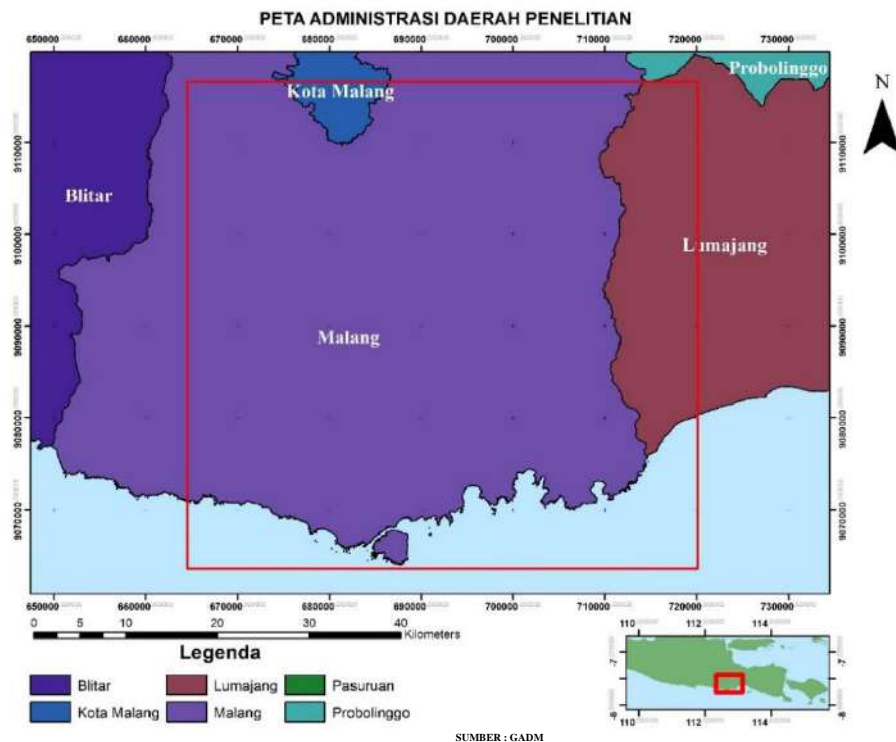
1. 4 Manfaat Penelitian

Adapun dalam pelaksanaan penelitian ini adalah memberikan informasi mengenai struktur bawah permukaan, batas sub-cekungan dan konfigurasi *basement* melalui pemodelan 2D (*forward*) yang dikorelasikan dengan analisis *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertikal Derivative* (SVD). Pemodelan 3D (*inverse*) juga dilakukan pada kedua data gravitasi untuk melakukan perbandingan serta intergrasi untuk menggambarkan bawah permukaan. Sehingga manfaat penelitian ini akan memberikan informasi awal mengenai sub-cekungan di wilayah Malang Selatan dan sekitarnya yang dapat berguna untuk eksplorasi hidrokarbon lebih lanjut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Daerah Penelitian

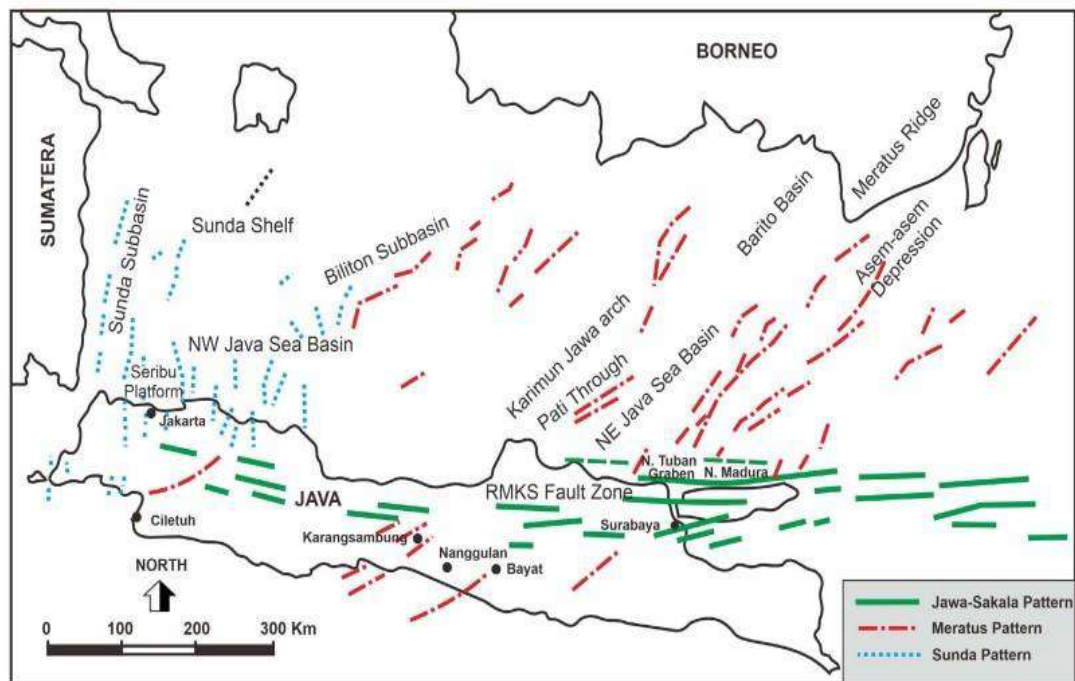
Daerah penelitian ini berada di Wilayah Jawa Timur bagian Selatan yang didominasi pada wilayah Kabupaten Malang, Kabupaten ini berbatasan dengan Kabupaten Blitar di sisi Barat, Kabupaten Batu sisi sebelah Utara dan Kabupaten Lumajang ada di sebelah Timur, dan Samudra Hindia sisi sebelah Selatan Berdasarkan letak geologinya Kabupaten Malang merupakan *fore arc basin* atau cekungan depan busur vulkanik. Secara geografis keseluruhan daerah penelitian terletak di $112^{\circ}30'1.5''$ BT sampai $113^{\circ}0'2.19''$ BT dan $7^{\circ}59'54.19''$ LS sampai $8^{\circ}30'4.96''$ LS dengan luasan 55 x 55 km yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta administasi daerah penelitian

2.2 Struktur Geologi Regional

Di wilayah Jawa, tiga pola struktur geologis mendominasi. Pertama, terdapat pola struktur yang membentang dari Timur Laut ke Barat Daya, yang juga dikenal sebagai arah Meratus. Pola ini terbentuk selama periode Kapur Akhir sampai awal periode Eosen. Kedua, terdapat pola struktur dengan orientasi Utara-Selatan, yang dikenal sebagai arah Sunda, yang terbentuk mulai dari awal periode Oligosen dan Miosen Awal. Ketiga, pola struktur dengan arah Barat ke Timur, atau arah Jawa Sakala, terbentuk pada periode Periode Tengah - Miosen Akhir sebagai akibat dari tekanan kompresif yang berasal dari arah Selatan Pulau Jawa.



Gambar 2. Pola struktur utama Pulau Jawa (Prasetyadi dkk., 2021)

Menurut Prasetyadi dkk (2021) bagian Timur Jawa terdiri dari perpotongan dua pola struktur utama diantaranya struktur Meratus yang berarah Timur Laut ke Barat Daya dominan berada di wilayah lepas pantai Cekungan Jawa Timur dan struktur Sakala yang berarah Timur ke Barat dominan berada di bagian Timur daratan Jawa.

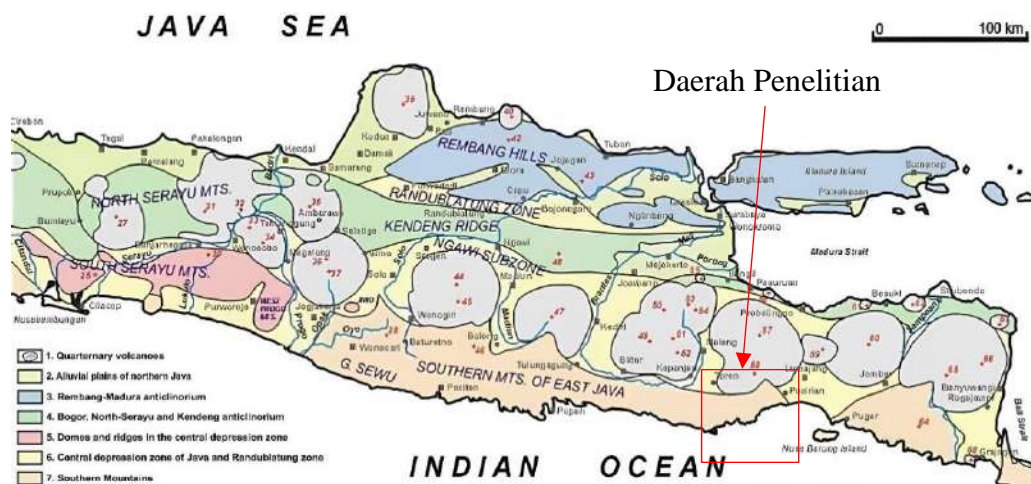
Sejarah tektonik Jawa Timur dibagi menjadi tiga periode. Periode Kapur Ahir - Awal Eosen (70 - 35 ma): Lempeng Australia bergerak ke Utara, menyebabkan subduksi di bawah *microplate* Sunda sepanjang sabuk Jawa-Meratus. Ini menyebabkan aktivitas magmatik yang menyebar dari Sumatera Timur Laut ke Jawa dan Kalimantan Tenggara. Proses ini juga menyebabkan pembentukan cekungan busur depan di Selatan Jawa Barat dan pegunungan Serayu Selatan di Jawa Tengah. Selain itu, ada kemungkinan bahwa sebagian dari benua terlepas dari Gondwana ke arah Selatan sebelum bergerak ke arah Timur Laut menuju zona subduksi.

Di antara periode Oligosen dan Miosen Awal (35 - 20 ma), terjadi pengurangan pergerakan lempeng. Ini menyebabkan sudut kemiringan subduksi dan uplift lebih besar di bagian Tenggara *Sundaland*. Dengan konvergensi lempeng India ke Utara, busur depan Sumatera dan Jawa mengalami gaya kompresi. Selain itu, cekungan busur belakang mengalami *inverse*. Hasilnya adalah sesar geser *strike-slip* yang bergerak dari Utara ke Selatan.

Periode Tengah - Miosen Akhir (20 - 5 Ma), terjadi pergeseran pada batas lempeng Indian - Australian, diikuti oleh aktivitas magmatik yang merata di seluruh Pulau Jawa. Struktur sesar berubah dari Utara ke Selatan, dengan orientasi Utara ke Selatan di bagian Utara Jawa Barat, dan Timur Laut ke Barat Daya dan Barat Laut ke Tenggara di bagian Barat Daya dan tengah Jawa. Akibat tekanan kompresi dari Utara, terbentuk sesar geser *strike-slip*, yang mengubah geometri cekungan menjadi orientasi sesar geser *strike-slip*. Distribusi formasi di atas batuan dasar dikontrol oleh struktur berarah Timur Laut ke Barat Daya dan Timur ke Barat.

2.3 Geologi Regional

Secara umum, Jawa Timur dibagi menjadi empat zona untuk jalur fisiografi. Mereka adalah Zona Rembang di bagian Utara, Zona Kendeng di bagian Selatan, Zona Solo di bagian Selatan, dan Zona Pegunungan Selatan di bagian paling Selatan (Van Bemmelen, 1949). Berdasarkan zonasi fisiografi Van Bemmelen (1949), lokasi penelitian utama berada di Zona Pegunungan Selatan di Jawa Tengah. Daerah Pegunungan Selatan memanjang dari Yogyakarta ke arah Timur, melalui Wonosari, Wonogiri, Pacitan, dan terus ke Malang Selatan, kemudian ke daerah Blambangan.



Gambar 3. Zonasi fisiografi sebagian Pulau Jawa dan Madura (modifikasi dari Van Bemmelen, 1949)

Rangkaian pegunungan di bagian Selatan Pulau Jawa bagian Timur dikenal sebagai Zona Pegunungan Selatan Jawa Timur. Ini membentang dari Timur-Tenggara ke Barat-Baratlaut, mulai dari Parangtritis sampai Ujung Purwo, dan memiliki lebar yang berbeda. Van Bemmelen (1949) membagi Pegunungan Selatan Jawa Timur menjadi dua wilayah.

Secara topografi, Pegunungan Selatan terbagi menjadi dua bagian. Bagian Selatan terdiri dari dataran tinggi kapur dengan topografi *karst* Gunung Sewu, yang sering disebut sebagai "Pegunungan Seribu". Bagian Utara terdiri dari jajaran pegunungan seperti Gunung Kidul, Baturagung, Panggung Massif, Pegunungan Plopoh, dan Pegunungan Kambengan.

Cekungan antara pegunungan dan Baturetno memisahkan bagian Selatan dan Utara Pegunungan Selatan.

Menurut Husein dan Srijono (2007), Lajur Kambengan dan Plopoh, yang berada di bagian paling Timur, membentang dengan arah BL-Tg. Di bagian Selatan Wonogiri, lembah aliran Sungai Bengawan Solo, yang mengalir dari Utara ke Selatan, memisahkan kedua lajur ini. Dataran rendah Cawas, yang memiliki orientasi BL-Tg, memisahkan Lajur Plopoh dari Rangkaian Baturagung di sebelah Baratnya. Kesamaan orientasi antara dataran rendah Cawas dan Lajur Plopoh menunjukkan bahwa ada depresi topografi paralel yang dibentuk oleh aktivitas tektonik. Pola lajur Baturagung sangat kompleks. Lajur Baturagung sebelah Utara memiliki orientasi Timur-Barat, sementara bagian Selatannya memiliki orientasi TTL-BBD di sebelah Timur, yang kemudian berubah menjadi TTg-BBL di sebelah Barat. Ini terjadi di sepanjang Sungai Ngalang.

Batuan karbonat dari Formasi Wonosari, yang terbentuk pada periode Mio-Pliosen, menjadi dominan di bagian Selatan Pegunungan Selatan, membentuk topografi *karst* yang terkenal dengan sebutan Gunung Sewu. Secara umum, perbukitan kars Gunung Sewu memiliki orientasi yang melampar dengan arah TTg-BBL. Orientasi perbukitan dan lembah-lembah kars di Gunung Sewu bervariasi secara geografis. Bagian Utara cenderung didominasi oleh kelurusan dengan arah BL-Tg, sementara bagian Selatan didominasi oleh kelurusan berarah TTg-BBL yang sejajar dengan garis pantai saat ini. Bagian Selatan Gunung Sewu merupakan wilayah pesisir yang langsung berbatasan dengan Samudera Hindia, ditandai dengan adanya gawir-gawir erosi (Husein dan Srijono, 2007).

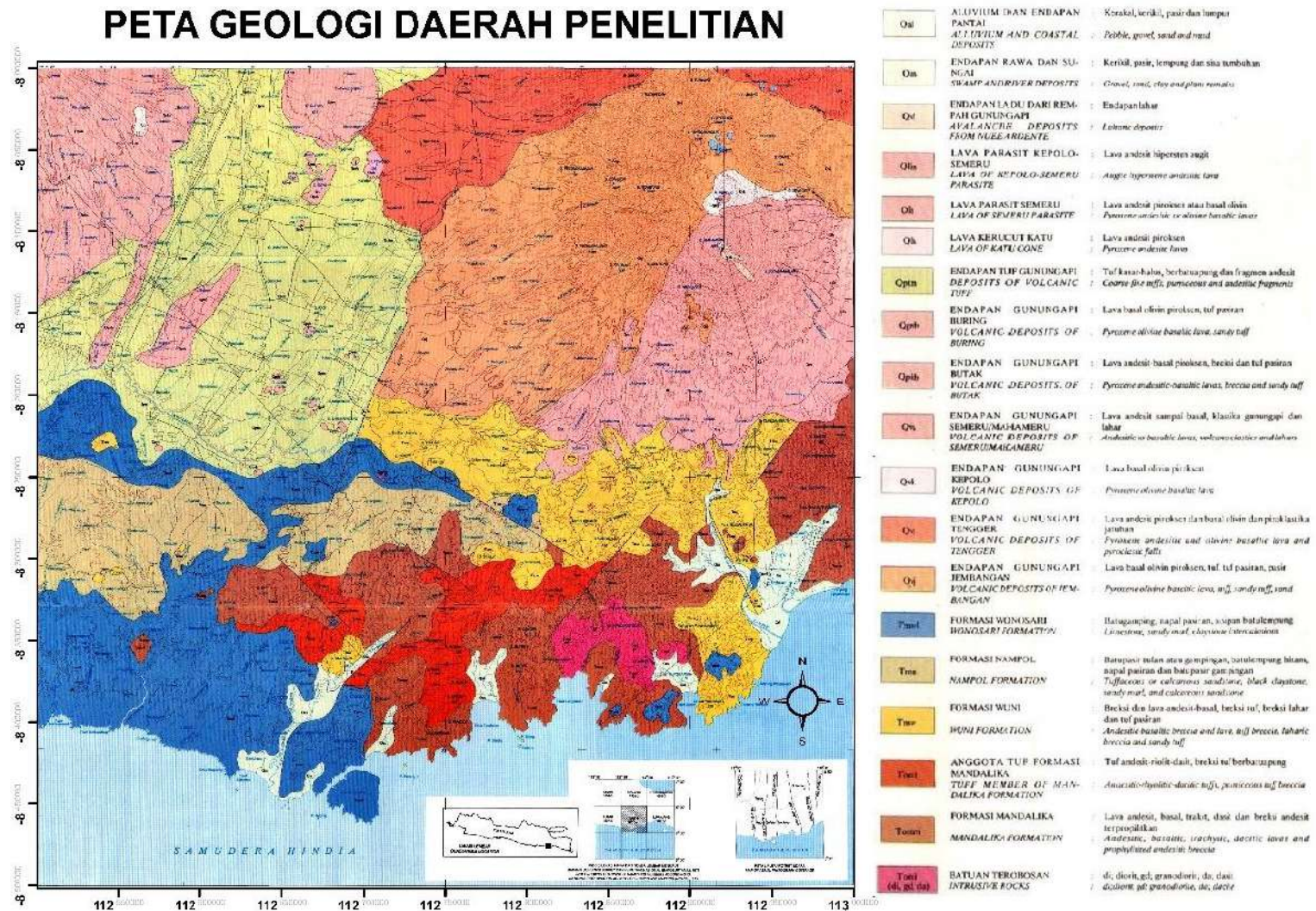
Zona Solo, sebuah depresi yang membentang di bagian tengah Pulau Jawa dari Solo sampai Banyuwangi, terbagi menjadi tiga subzona: Subzona Ngawi di antara Perbukitan Kendeng dan gunungapi saat ini, Subzona Solo di antara gunung-gunung api saat ini, dan Subzona Blitar di antara

gunungapi saat ini sampai Pegunungan Selatan. Sebagai cekungan sedimenter aktif, Zona Solo menerima pasokan sedimen dari busur gunungapi, Pegunungan Selatan, dan Perbukitan Kendeng, dengan sungai-sungai utama seperti Sungai Bengawan Solo, Sungai Bengawan Madiun, dan Sungai Brantas mengalir dan mengendapkan sedimen di sini, membentuk delta-delta besar di pesisir Surabaya dan Gresik.

Secara dominan daerah penelitian berada pada zona Pegunungan Selatan Jawa yang umumnya tersusun dari batuan berumur Neogen sampai Kuartar (Prasetyadi dkk., 2021). Sujanto dkk (1992) menjelaskan bahwa stratigrafi regional daerah tersebut terdiri dari letusan gunungapi, batuan beku intrusif dan batuan sedimen gamping.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Turen oleh Sujanto dkk (1992), formasi-formasi yang menyusun zona pegunungan Selatan di daerah Selatan Kabupaten Malang diselaraskan terhadap beberapa formasi yang berbeda, diantaranya termasuk Formasi Mandalika (Tomm) dan Mandalika Tuf (Tomt). Formasi ini terdiri dari material tuf Andesit-riolitik-dasitik, breksi batu apung, andesit, basalt, lava trakhit, dan dasit, serta breksi andesit yang telah mengalami alterasi propilitik. Formasi Wuni (Tmw) terdiri dari berbagai endapan vulkanik tersier, seperti breksi andesit-basaltik dan lava, breksi tufa, breksi laharik, dan tuf berpasir. Selain itu, terdapat beberapa intrusi beku tersier (Tomi) yang terdiri dari granodiorit, dasit, dan diorit. Sementara Formasi Wonosari (Tmwl) dan Formasi Nampol (Tmw) menunjukkan aktivitas sedimen tersier yang terutama terdiri dari fasies karbonat dan batuan siliklastik yang berumur Miosen Tengah sampai Miosen Akhir selanjutnya secara tidak selaras diatasnya diendapkan formasi Endapan Tuf Gunung Api yang berumur Kuartar (**Gambar 4**).

PETA GEOLOGI DAERAH PENELITIAN



Gambar 4. Peta Geologi Lembar Turen (Sujanto dkk., 1992)

Urutan stratigrafi berdasarkan dari yang tertua ke yang termuda adalah sebagai berikut:

1) Batuan Terobosan (Tomi)

Batuan terobosan tersusun dari batuan-batuan terintrusi meliputi formasi di atasnya dengan ciri litologi berupa dasit, andesit, basal dan diorit. Batuan intrusi ini berupa stok, rekahan dan penampang lokal leher gunungapi sehingga mempengaruhi batuan yang terintrusi dengan umur Oligosen Akhir sampai akhir Miosen Awal, seperti Formasi Mandalika.

2) Formasi Mandalika (Tomm)

Formasi Mandalika tersusun dari batuan vulkanik dengan sisipan klastik (vulkanik) pada lingkungan laut dangkal. Bagian bawah formasi ini terdiri dari breksi vulkanik berulang, lava andesit, basal, trakit, dasit dan breksi andesit terpropilitkan. Pada bagian tengah formasi tersusun atas breksi vulkanik berulang, lava dan endapan klastik yang semakin berkurang. Pada bagian atasnya terdiri dari lava bantal, tuf andesit - riolit - dasit dengan sisipan breksi batuapung. Formasi Mandalika berumur Oligosen Akhir sampai Miosen Awal.

3) Formasi Wuni (Tmw)

Formasi Wuni terdiri dari breksi dan lava bersusunan andesit - basal, breksi tuf, breksi lahar dan tuf pasiran. Breksi berkomponen andesit dan basal, mengandung kepingan - kepingan kalsedon. Lava andesit - basal terdiri dari andesit piroksen sampai basal berwarna abu - abu kehitaman pejal dan porfiri. Satuan ini menindih secara takselaras dengan batuan berumur oligosen akhir - awal Miosen tengah dan secara tidak selaras ditindi oleh Formasi Nampol.

4) Formasi Nampol (Tmn)

Satuan ini merupakan batupasir tufan atau gampingan, batulempung hitam, napal pasiran dan batupasir gampingan. Menurut Prasetyadi dkk (2021) bagian bawah satuan ini tersusun atas batupasir tufaan selang-seling batulempung, dengan sisipan breksi vulkanik, batupasir konglomerat dan lignit. Bagian atas lebih berkapur, terdiri dari batupasir

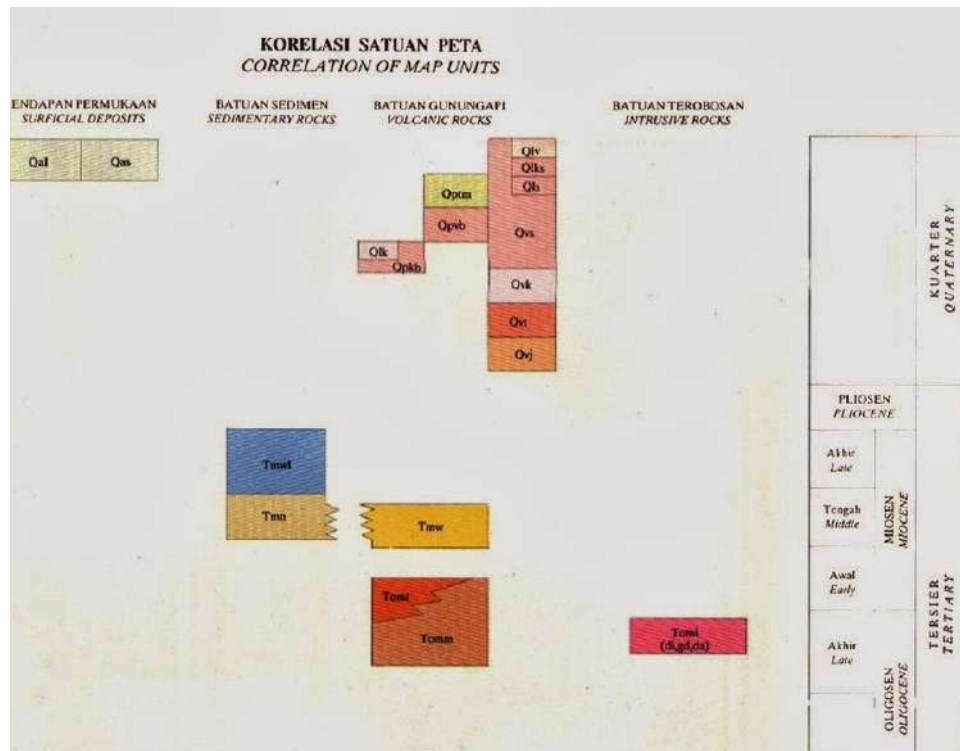
selang seling batulempung, dengan sisipan tufa dan lignit. Formasi Nampol terbentuk pada lingkungan laut dangkal yang berdekatan dengan daerah lingkaran dengan ketebalan formasi sekitar 100m. Formasi Nampol berumur Miosen Tengah dan ditindih secara selaras di atas Formasi Wuni.

5) Formasi Wonosari (Tmwl)

Satuan ini merupakan endapan batugamping, napal pasiran dan sisipan batulempung yang berumur Miosen Tengah sampai Akhir dan terbentuk di lingkungan laut dangkal. Bagian bawah dari Satuan ini lebih bersifat klastik; terdiri dari batugamping berpasir (kalsarenit) dengan batupasir berkapur. Bagian atas terdiri dari batugamping terumbu, diselingi dengan batugamping kalsarenit, napal dan batugamping konglomerat. Formasi ini kaya akan *foraminifera planktonic* berukuran kecil yang berdasarkan kumpulan yang dikandung memiliki umur Miosen Tengah sampai awal Miosen Akhir.

6) Endapan Gunungapi Buring (Qpvb) terdiri dari dua jenis material utama, yaitu lava basal dan tuf pasiran. Lava memiliki warna abu-abu kehitaman dan memiliki struktur yang bervariasi, mulai dari kasat mata sampai tak terlihat dengan mudah. Sementara tuf pasiran memiliki warna putih coklat kelabu dan keruh, terdiri dari berbagai komponen seperti felspar, kaca, batu apung, mineral hitam, dan pecahan batuan berbutir pasir-lapili.

7) Endapan Tuf Gunungapi terutama terdiri dari tuf kasar yang mengandung batu apung. Tuf ini memiliki warna coklat muda sampai merah, dengan butiran kasar (lapili) sampai halus. Van Bemmelen (1949) mengemukakan bahwa endapan gunungapi ini terbentuk oleh sejumlah gunungapi Kuartir Muda, termasuk G. Tengger, G. Jembangan, G. Semeru, G. Butak, dan G. Buring. Endapan Tuf ini dianggap setara dengan Tuf Malang.



Gambar 5. Stratigrafi Geologi Malang Selatan dalam peta Geologi
Lembar Turen (Sujanto dkk., 1992)

2.4 Petroleum Sistem Jawa Timur Selatan

Produksi hidrokarbon melibatkan serangkaian komponen dan proses geologi yang dikenal sebagai Sistem Minyak Bumi, yang mencakup tahap awal pengembangan hingga akumulasi hidrokarbon. Cekungan busur vulkanik di Jawa Timur Selatan berkaitan dengan subduksi antara lempeng samudera dan lempeng benua. Proses subduksi ini mengakibatkan aktivitas vulkanik selama Tersier yang menghasilkan sedimen untuk pengisian hampir setengah dari Cekungan Jawa Timur Selatan. Secara struktur dan stratigrafi, Cekungan Jawa Timur Selatan merupakan cekungan vulkanik yang cukup kompleks dengan batuan yang berumur Oligosen hingga Kuartar di Malang Selatan. Sistem Minyak Bumi adalah konsep yang menyatukan berbagai elemen dan proses geologi terkait dengan minyak bumi. Aplikasi praktis dari sistem ini dapat digunakan untuk eksplorasi, evaluasi sumber daya, dan penelitian. Dalam sistem minyak bumi, terdapat elemen-elemen penting diantaranya sebagai berikut.

2.4.1 Batuan Induk (*Source Rock*)

Batuan induk adalah jenis batuan yang memiliki potensi besar untuk menghasilkan atau telah menghasilkan jumlah hidrokarbon yang signifikan, yang dapat bergerak dan mengalir menuju batuan reservoir, tempat di mana hidrokarbon terakumulasi (Sumotarto, 2016). Pada Malang Selatan terdapat potensi hidrokarbon pada Formasi Nampol yang berperan sebagai batuan induk dengan *Total Organic Content* berkisar 3.48 - 26.18 wt% dan memiliki potensi untuk menghasilkan hidrokarbon dengan kualitas baik hingga sangat baik serta indeks hidrogen berkisar antara 43 hingga 86 mgHC/g TOC pada batuan serpih hitam dan batubara (Prasetyadi dkk., 2021).

2.4.2 Reservoir

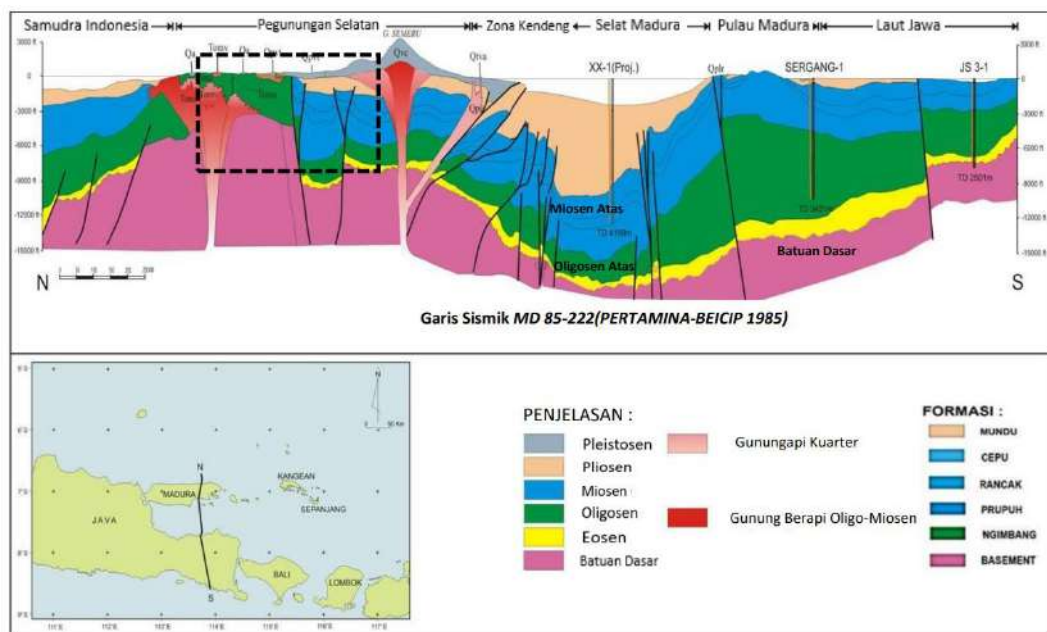
Batuan sedimen merupakan batuan yang baik dalam menampung hidrokarbon dengan kriteria memiliki porositas dan permeabilitas tinggi menjadikan sebuah batuan ideal untuk menjadi reservoir. Pada Malang Selatan terdapat dua formasi yang memiliki potensi untuk menjadi reservoir yaitu Formasi Wonosari dan Formasi Nampol dengan litologi yang dominan keberadaan batupasir pada kedua formasi.

2.4.3 Batuan Penudung

Batuan penudung atau penutup merujuk pada lapisan batuan yang memiliki sifat *impermeable* atau tidak dapat dilalui oleh fluida seperti minyak bumi, sehingga berfungsi untuk menahan dan mencegah pergerakan hidrokarbon keluar dari reservoir, berdasarkan sebaran formasinya, Formasi Vulkanik Kuartar merupakan formasi yang cukup dominan di wilayah Malang Selatan yang dapat berfungsi dalam batuan penutup pada sistem petroleum di Malang Selatan dan juga jenis batulempung yang terdapat pada Formasi Wonosari juga dapat berperan sebagai batuan penutup yang berada tepat diatas Formasi Nampol.

2.4.4 Perangkap

Di cekungan Jawa Timur, jebakan struktural dan stratigrafi berkembang dengan baik. Salah satu contoh yang jelas dari perangkap stratigrafi terlihat pada akumulasi karbonat dari Oligosen-Miosen. Blok-blok sesar miring dari zaman Eosen dan struktur kompresi dari Miosen Akhir berhubungan langsung dengan pembentukan perangkap ini. Sesar-sesar merupakan jenis perangkap yang umum terkait dengan proses *rifting* dan *graben* pada formasi yang membentuk cekungan ini. Pembentukan struktur hidrokarbon terjadi pada fase awal patahan aktif dari Eosen Tengah hingga Oligosen Awal.



Gambar 6. Model geologi regional utara-selatan Cekungan Jawa Timur
(Modifikasi dari Ningsih, 2023)

2.5 Penelitian Terdahulu

Penelitian saat ini mengacu pada beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang menjadi acuan adalah mengenai metode gravitasi yang digunakan pada daerah penelitian di sekitar daerah penelitian dan penelitian dengan metode lain untuk kebutuhan lainnya. Dari beberapa penelitian dibawah menunjukan bagaimana metode gravitasi dapat mengidentifikasi struktur bawah permukaan.

Setiadi dan Nainggolan (2021), telah melakukan penelitian mengenai analisis data gravitasi melalui filter *upward continuation* pada daerah Malang Selatan dan dilakukan pemodelan 3D (*inverse*) untuk memodelkan bawah permukaan. Dari hasil identifikasi didapatkan 5 sub-cekungan sedimen berdasarkan anomali gravitasi residual dan hasil pemodelan 3D (*inverse*) melalui dua model penampang menunjukkan kepadatan batuan variasi berkisar antara (2,4 sampai 3,1) gr/cc yang mewakili keseluruhan kepadatan permukaan Malang dan sekitarnya. Sebaran batuan sedimen berdasarkan hasil pemodelan 3D (*inverse*) nilai kepadatan antara (2,4 sampai 2,55) gr/cc.

Boimau (2018) telah melakukan penelitian mengenai identifikasi sungai bawah tanah pada kawasan karst berdasarkan data geolistrik self-potential dan resistivitas di desa sumber bening, Kecamatan bantur, Malang Selatan. Studi ini bertujuan untuk menentukan pola arah aliran dan kedalaman sungai bawah tanah di area penelitian. Akuisisi data self-potential dilakukan dengan menggunakan 176 titik, sementara data resistivitas diperoleh dengan menggunakan konfigurasi dipole-dipole dari 6 jalur. Berdasarkan hasil pengolahan data self-potensial, diperoleh rentang nilai potensial antara 0-15 mV, berdasarkan hasil pemodelan berdasarkan lintasan geolistrik didapatkan aliran sungai bawah tanah yang terdapat pada lapisan napal pasir dengan ketebalan yang berkisar 9-20 meter.

Prasetyadi dkk (2021) telah melakukan penelitian mengenai potensi sistem perminyakan batuan subvulkanik di wilayah Malang Selatan dimana dilakukan evaluasi pada sampel batuan sumber dari singkapan permukaan terhadap kandungan material organik, jenis kematangan termal kerogen dan potensi menghasilkan hidrokarbon melalui analisis TOC dan pirolisis *Rock-eval* dimana didapatkan hasil bahwa serpih hitam dan batubara pada Formasi Nampol merupakan batuan sumber yang belum matang namun berpotensi menghasilkan hidrokarbon. Hasil analisis kualitatif dan kuantitatif terhadap porositas dan permeabilitasnya disimpulkan bahwa

batupasir pada Formasi Nampol lebih berpotensi sebagai reservoir dibandingkan dengan satuan batugamping klastik.

Setiadi dan Marjiyono (2018) telah melakukan penelitian mengenai Delineasi sub-cekungan dan konfigurasi *basement* pada Sub-Cekungan Banyumas dimana dilakukan analisis spektrum untuk mengetahui sebaran sub-cekungan pada daerah Banyumas yang kemudian didapatkan pula ketebalan dari *basement* sebesar 21 km dan ketebalan dari sub-cekungan sebesar 2,9 km berdasarkan hasil ini dilakukan pemodelan 2D untuk menghasilkan model bawah permukaan serta Delineasi antara sub-cekungan dengan *basement* dari penampang dan dari hasil analisis pemodelan 2D mengungkapkan tiga sub-cekungan potensial untuk kemungkinan adanya hidrokarbon, yaitu subcawangan Purbalingga, Karangobar, dan Wonosobo, dengan kedalaman depo pusat berkisar antara 4 km sampai 5 km.

III. LANDASAN TEORI

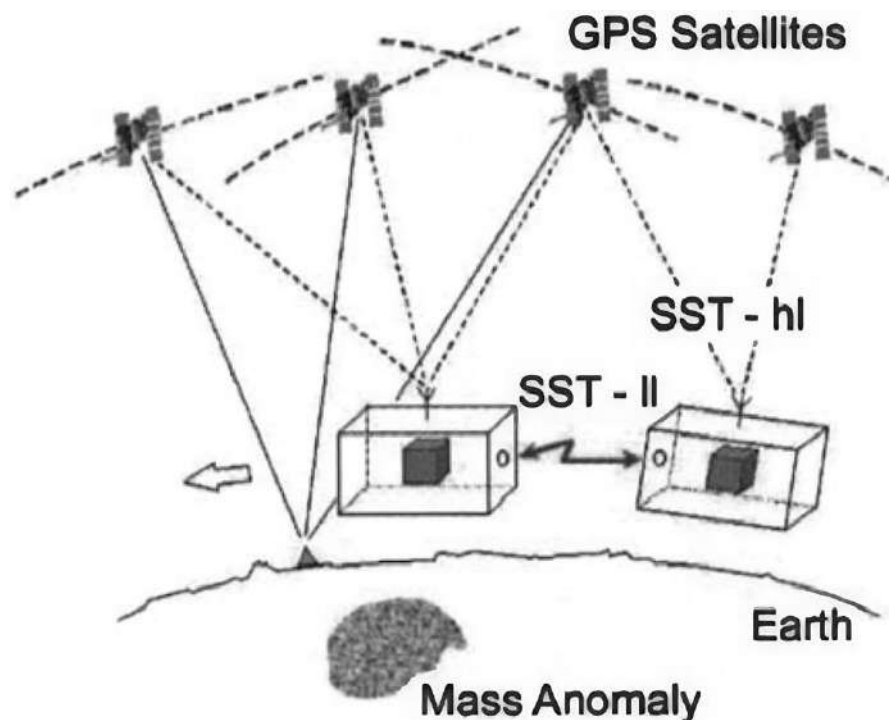
3.1 *Global Model Plus 2013 (GGMPlus)*

Kumpulan data gravitasi satelit GGMPlus 2013 berasal dari penggabungan model gravitasi yang telah ada sebelumnya. Model-model ini termasuk data dari pelacakan satelit ruang angkasa seperti GRACE, GOCE, dan EGM2008, serta data terestrial yang diperoleh dari informasi gravitasi topografi resolusi tinggi dari data topografi SRTM. Penelitian untuk mengembangkan data GGMPlus melibatkan kerja sama antara Universitas Curtin dan Universitas Teknik Munich (Suprianto dkk., 2021). Gangguan gravitasi, percepatan gravitasi, defleksi vertikal Utara-Selatan dan Barat-Timur, dan tinggi *quasigeoid* adalah lima jenis data yang terdiri dari GGMPlus 2013. Resolusi spasial GGMPlus lebih tinggi, dengan jarak antar titik sekitar 220 meter, dibandingkan dengan data gravitasi satelit lain seperti TOPEX atau BGI (Hirt dkk., 2013).

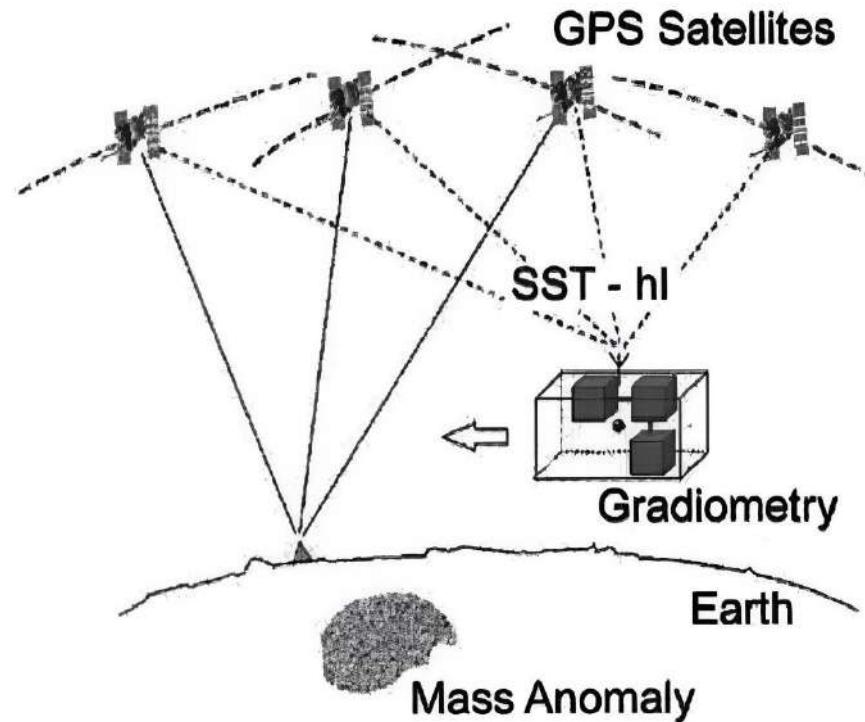
Pengukuran data gravitasi GGMPlus mengadopsi pendekatan menggunakan dua satelit, yaitu GRACE dan GOCE. Metode pengukuran yang digunakan adalah pasif, dimana kedua satelit ini memanfaatkan respons alami dari sumber anomali menggunakan mode *satellite-to-satellite tracking* (SST) relatif terhadap bumi (Hinze dkk., 2012). Dalam pengukuran, satelit GRACE dipasang dengan dua satelit identik yang terkoneksi dan mengikuti orbit yang sama dengan jarak antara keduanya sekitar 200 m. Prinsip dasarnya adalah untuk mendeteksi perubahan medan gravitasi bumi dengan memantau perubahan jarak antara kedua satelit GRACE (**Gambar 6**). Jika satelit GRACE depan mendekati bagian sumber

anomali lebih dulu daripada satelit GRACE belakang, maka satelit GRACE depan akan merasakan gaya tarik gravitasi yang lebih besar, sehingga menyebabkan jarak antara keduanya merenggang (Save dkk., 2016).

Satelit GOCE, berbeda dengan GRACE, menggunakan gradiometer untuk mengukur percepatan gravitasi bumi (**Gambar 7**). Gradiometer ini terdiri dari tiga pasang akselerometer identik yang dipasang pada tiga lengan yang ortogonal. Dengan konfigurasi ini, gradiometer mampu melakukan pengukuran secara simultan terhadap enam komponen medan gravitasi yang independen namun saling melengkapi. Sinyal yang terukur pada satelit merupakan perbedaan percepatan gravitasi di dalam pesawat ruang angkasa. Sinyal gravitasi yang terdeteksi merupakan variasi gaya tarik medan gravitasi yang dihasilkan oleh faktor-faktor seperti pegunungan, lembah, zona subduksi, in-homogenitas mantel, dan fenomena geologi lainnya (Drinkwater dkk., 2003).



Gambar 7. Ilustrasi cara kerja Satelit GRACE (Johannessen dkk., 2003)



Gambar 8. Ilustrasi cara kerja Satelit GOCE (Johannessen dkk., 2003)

3.2 Konsep Dasar Metode Gravitasi

Metode gravitasi merupakan salah satu metode geofisika yang pada prinsipnya metode gravitasi ini menggunakan konsep Bouguer anomali yaitu menghitung perbedaan nilai gravitasi terukur dengan nilai gravitasi acuan yang merupakan nilai gravitasi teoritis untuk suatu model teoritis Bumi (*Geoid*) (Sarkowi, 2014). Andari dkk (2019) menjelaskan bahwa ketidakseragaman stuktur geologi pada bawah permukaan inilah yang mengakibatkan perbedaan densitas dan metode gravitasi ini baik dalam memahami pola dan batas cekungan, struktur dan pola tinggi dasar, serta struktur bawah permukaan di suatu daerah eksplorasi. Hukum yang mendasari konsep dari metode gravitasi adalah hukum Newton. Hukum Newton menjelaskan bahwa gaya tarik-menarik antara dua partikel besarnya akan sebanding dengan hasil kali kedua massa partikel dan berbanding terbalik terhadap kuadrat jarak kedua partikel (Telford dkk., 1990). Pernyataan tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$F = \gamma \left(\frac{m_1 m_2}{R^2} \right) r_1 \quad (1)$$

Dimana:

F = Gaya yang bekerja pada m_2 (N)

γ = Konstanta gravitasi ($6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)

R^2 = Jarak antar dua benda

r_1 = Arah vektor Satuan

$m_1 m_2$ = Massa benda 1 dan 2 (kg)

Karena nilai yang terukur pada metode gravitasi bukanlah nilai gaya gravitasi (F) melainkan nilai percepatan gravitasi (g).

Hukum II Newton secara spesifik menjelaskan tentang gerak dimana gaya sebanding dengan massa benda dikalikan dengan percepatan gravitasi bumi yang dialami benda tersebut:

$$\vec{F} = m_2 \vec{g} \quad (2)$$

menjelaskan hubungan keduanya dalam persamaan berikut:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m_2} \quad (3)$$

Dimana F merupakan gaya yang bekerja pada m_2 , \vec{g} merupakan percepatan gravitasi dan m_2 merupakan massa partikel 2. Jika persamaan (3) di substitusikan ke persamaan (1), maka dapat dimodifikasi sebagai berikut:

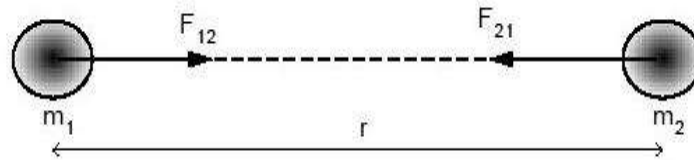
$$\vec{g} = \gamma \frac{m_1}{r^2} \quad (4)$$

γ merupakan konstanta gravitasi dan r merupakan jarak antar massa partikel. Jika kita asumsikan m_2 sebagai massa bumi dan m_1 merupakan massa dari alat atau pegas, maka persamaan dari percepatan gravitasi dapat dimodifikasi menjadi persamaan berikut:

$$\vec{g} = (\gamma \frac{m_1}{r^2})\vec{r}_1 = (\gamma \frac{\rho v}{r^2})\vec{r}_1 \quad (5)$$

Berdasarkan persamaan (5) dapat diketahui bahwa percepatan gravitasi bumi bervariasi tergantung dari jarak jari-jari bumi (r^2) dan adanya ketidak homogenan massa (ρv) di bawah permukaan bumi serta topografi di permukaan bumi.

Berikut merupakan ilustrasi dari gaya tarik menarik yang ada pada hukum Newton.



Gambar 9. Gaya tarik menarik antara dua benda (Grandis, 2009)

3.3 Potensial Gravitasi

Potensial gravitasi adalah bentuk energi yang terlibat dalam perpindahan suatu massa dari satu titik ke titik lainnya. Keberadaan massa dalam suatu sistem ruang akan menciptakan medan potensial di sekitarnya. Rosid (2005) menjelaskan bahwa medan potensial ini memiliki sifat konservatif, yang berarti usaha yang diperlukan dalam medan gaya gravitasi tidak bergantung pada jalur yang ditempuh oleh massa tersebut, melainkan hanya bergantung pada posisi awal dan akhirnya.

Suatu massa pada 3 dimensi yang berbentuk sembarang akan terdistribusi secara kontinu dengan rapat massa $\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)$, maka potensial gravitasi di titik P (x, y, z) diberikan oleh:

$$U(x, y, z) = G \iiint \frac{\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)}{[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2 + (z-\gamma)^2]^{1/2}} d\alpha. d\beta. d\gamma \quad (6)$$

Untuk memperoleh medan gravitasi akibat distribusi rapat massa, dilakukan diferensial persamaan (6) terhadap koordinat x , y , dan z . Hasilnya akan

menghasilkan komponen-komponen dari medan gravitasi di setiap arah koordinat.

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

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

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

Dari persamaan (9), mendapatkan nilai medan gravitasi Δg pada permukaan bumi yang beragam. Medan gravitasi bumi disebabkan oleh pengaruh distribusi massa di bawah permukaan, yang dijelaskan oleh fungsi densitas (ρ). Sementara itu, bentuk sebenarnya dari permukaan bumi diwakili oleh batas integral (Telford dkk., 1990).

3.4 Densitas Batuan

Densitas atau rapat massa batuan merupakan besaran fisik yang sangat penting dalam aplikasi metode gravitasi. Hal tersebut dikarenakan penyebab utama bervariasinya anomali gravitasi di permukaan bumi yaitu adanya inhomogenitas kerapatan di bawah permukaan bumi. Harga dari densitas batuan akan berbanding lurus terhadap anomali gravitasi. Densitas batuan dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara massa dari benda yang dalam terhadap volume benda tersebut. Dalam pengukuran metode gravitasi, perhitungan anomali Bouguer memerlukan nilai densitas rata-rata di daerah survei. Gaya tektonik dapat menyebabkan variasi densitas pada batuan sedimen. Faktor-faktor seperti jenis, densitas butir pembentuk batuan, kandungan fluida di dalam pori-porinya, porositas, pemadatan akibat tekanan dan pelapukan akan mempengaruhi nilai densitas batuan (Ridha dan Darminto, 2016). Berdasarkan Telford dkk (1990) terdapat variasi nilai densitas batuan. Berikut merupakan tabel densitas batuan yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Nilai Densitas Batuan (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang (g/cc)	Rata-rata (g/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
Batuan Beku		
<i>Rhyolit</i>	2,35 – 2,70	2,52
<i>Granit</i>	2,50 – 2,81	2,64
<i>Andesit</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
Baruan Metamorf		
<i>Gneiss</i>	2,59 – 3,00	2,80
<i>Schist</i>	2,39 – 2,90	2,64
<i>Phyllite</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

3.5 Koreksi Pengukuran Gravitasi

Nilai gravitasi yang terukur dipermukaan bumi merupakan nilai keseluruhan gravitasi yang terukur pada satu titik yang dipengaruhi oleh banyak sumber. Beberapa sumber yang mempengaruhi hasil pengukuran gravitasi diantaranya (Sarkowi, 2014):

1. Posisi Bumi pada pergerakan di tata surya (efek tidal)
2. Perbedaan gravitasi akibat perbedaan derajat lintang di bumi
3. Perubahan akibat perbedaan ketinggian permukaan (elevasi)
4. Efek dari topografi sekelilingnya
5. Perubahan daerah sekeliling berupa gedung, banjir, hujan dan lain lain
6. Variasi perubahan rapat massa di setiap tempat baik vertikal maupun horizontal

Oleh karena itu perlu dilakukan koreksi untuk menghindari efek gravitasi dari komponen yang tidak diinginkan sehingga nilai anomali yang didapatkan akan berupa nilai dari anomali yang berasal dari bawah permukaan.

3.5.1 Koreksi Pasang Surut

Dikarenakan rotasi dan bentuk elipsoid bumi, jari-jari bumi bervariasi bergantung pada lintangnya. Perbedaan ini juga menghasilkan variasi dalam nilai gravitasi atau gravitasi di daerah-daerah yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan koreksi lintang untuk mengatasi perbedaan ini. Persamaan yang digunakan untuk koreksi lintang ($g(\phi)$) dapat ditemukan dalam penelitian oleh Blakely (1996).

$$g(\phi) = 978.032,7(1 + 0,0053024 \sin^2 \phi - 0,0000058 \sin^2 2\phi) \quad (10)$$

Dimana:

$g(\phi)$ = Gravitasi normal yang terkoreksi lintang (= sudut dalam radian).

Berdasarkan persamaan (10), dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi letak lintang suatu lokasi, percepatan gravitasi di tempat tersebut cenderung meningkat. Akibatnya, medan gravitasi akan cenderung meningkat ke arah kutub (Sarkowi, 2014).

3.5.2 Koreksi Udara Bebas (*Free Air Correction*)

Pengukuran gravitasi pada ketinggian (h) dari *mean sea level* akan menghasilkan nilai (g) yang semakin kecil. Oleh karena itu, diperlukan koreksi pada pembacaan alat untuk memperoleh nilai gravitasi absolut pada titik observasi. Koreksi udara bebas digunakan untuk tujuan ini, yang memungkinkan perolehan nilai gravitasi absolut pada titik observasi (Syamsuriadi dkk., 2013). Sehingga koreksi udara bebas di permukaan bumi menggunakan persamaan berikut:

$$FAC = 0,3086 \times h \quad (11)$$

Dimana:

FAC = *Free Air Correction* (Koreksi Udara Bebas)

h = Ketinggian (elevasi) dalam meter

Setelah memperoleh nilai dari koreksi bebas didapatkan nilai dari *Free Air Anomaly* (FAA), melalui persamaan.

$$FAA = g_{obs} - g(\phi) + (FAC) \quad (12)$$

Dimana:

g_{obs} = Nilai gravitasi observasi (mGal)

$g(\phi)$ = Gravitasi normal yang terkoreksi lintang (ϕ = sudut dalam radian)

FAC = *Free Air Correction* (Koreksi Udara Bebas)

3.5.3 Koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*)

Koreksi Bouguer dilakukan dengan menghitung selisih ketinggian titik amat dengan datum tanpa memperhitungkan adanya massa yang mempengaruhi pada titik pengukuran. Melalui koreksi Bouguer dapat dipastikan bahwa anomali yang ditimbulkan dari pengukuran hanya disebabkan oleh adanya perubahan rapat massa di bawah permukaan di atas *mean sea level* dengan mengkompensasi pengaruh massa batuan yang terletak di antara titik pengukuran dan bidang acuan. Besar koreksi ini dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$BC = 2\pi G \rho h \rightarrow = 0,04191 \rho h \quad (13)$$

Dimana:

BC = Bouguer *Correction* (Koreksi Bouguer)

ρ = Rapat massa batuan rata-rata (gr/cc)

h = Ketinggian (elevasi) dalam meter

3.5.4 Koreksi Medan (*Terrain Correction*)

Koreksi medan dilakukan karena wilayah pengukuran memiliki kontur permukaan atau topografi yang berbeda-beda dan berpengaruh pada nilai percepatan gravitas. Topografi di sekitar titik pengamatan sering tidak teratur, misalnya dengan adanya lembah atau bukit, yang dapat memengaruhi nilai gayaberasat di titik pengamatan. Bukit memiliki efek untuk mengurangi percepatan gayaberasat. Oleh karena itu, koreksi medan untuk bukit harus ditambahkan, yang pada dasarnya menyiratkan bahwa lembah di sekitar titik pengamatan dianggap memiliki massa batuan. Koreksi medan dapat dilakukan menggunakan metode *Hammer Chart*. Untuk menghitung koreksi *terrain* dengan Metode *Hammer Chart* persamaan yang digunakan adalah:

$$TC = \gamma \rho \left[(r_2 - r_1) + \sqrt{(r_1^2 + H^2)} - \sqrt{(r_2^2 + H^2)} \right] \quad (14)$$

Dimana:

TC = *Terrain Correction* (Koreksi Medan)

γ = Konstanta gravitasi ($6.672 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$)

ρ = Densitas

\emptyset = Sudut sektor (radian)

r_1 = Jari-jari radius dalam

r_2 = Jari-jari radius luar

H = Beda tinggi titik amat dengan tinggi rata-rata sector

Pada data pengukuran lapangan dan pengukuran gravitasi satelit dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti *Global Mapper* dan *Oasis Montaj*.

3.6 Anomali Bouguer Lengkap (*Complete Bouguer Anomaly*)

Anomali Bouguer Lengkap merupakan respon gravitasi yang diperoleh setelah dilakukan koreksi *drift*, koreksi pasang surut, koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi Bouguer dan koreksi *terrain*. Anomali Bouguer muncul akibat perbedaan densitas batuan atau hal lain di wilayah permukaan dangkal dan di bawah permukaan bumi. Anomali Bouguer berfungsi memberi gambaran distribusi gravitasi untuk memperkirakan kondisi bawah permukaan berdasarkan variasi densitas batuan (Reynolds, 1997). Untuk menghitung nilai Anomali Bouguer setiap titik stasiun dengan menerapkan koreksi-koreksi yang telah disebutkan sebelumnya.

$$CBA = g_{obs} - (g_{\emptyset} + FAC - BC + TC) \quad (15)$$

Dimana:

CBA = Anomali Bouguer Lengkap

g_{obs} = Nilai gravitasi observasi (mGal)

$g(\emptyset)$ = Nilai gravitasi koreksi lintang (mGal)

FAC = *Free Air Correction* (Koreksi Udara Bebas)

BC = *Bouguer Correction* (Koreksi Bouguer)

$TC = \text{Terrain Correction}$ (Koreksi Medan)

3.7 Transformasi Fourier

Proses pemisahan anomali regional dan residual pada umumnya dilakukan dalam domain frekuensi karena benda-benda yang ada pada anomali residual berasosiasi dengan frekuensi yang tinggi sedangkan anomali regional berasosiasi pada frekuensi yang rendah. Maka dari itu, data gravitasi yang merupakan data dalam domain spasial harus terlebih dahulu dilakukan transformasi menjadi domain frekuensi. Transformasi Fourier merupakan persamaan matematis yang digunakan untuk mengkonversi data dalam domain waktu atau spasial menjadi domain frekuensi atau bilangan gelombang.

Transformasi Fourier yang diturunkan oleh Blakely (1996) untuk kasus dua dimensi atau terdiri dari dua variabel dapat dirumuskan secara sederhana seperti persamaan berikut:

$$G(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (16)$$

Dimana (k_x, k_y) merupakan bilangan gelombang (frekuensi) yang berasosiasi dengan koordinat (x, y) berturut-turut yaitu:

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda_x} \text{ dan } k_y = \frac{2\pi}{\lambda_y} \quad (17)$$

Dikarenakan data anomali gravitasi yang dalam hal ini $f(x, y)$ diketahui pada diskrit poin maka digunakan transformasi Fourier diskrit atau *discrete fourier transform* seperti dalam persamaan berikut:

$$G(k, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n) e^{-2\pi i \left(\frac{km}{M} + \frac{ln}{N} \right)} \quad (18)$$

Dimana:

- (m, n) = Bilangan bulat (*integer*) yang menyatakan *grid point* dalam domain spasial
 (k, l) = Bilangan bulat (*integer*) yang menyatakan *grid point* dalam domain frekuensi
 (M, N) = Bilangan bulat (*integer*) yang menyatakan jumlah kolom dan baris data

3.8 Analisis Spektrum

Data Anomali Bouguer yang telah diperoleh merupakan hasil superposisi dari komponen anomali regional dan residual. Sehingga sebelum melakukan *flitering* perlu dilakukan analisis spektrum untuk mengetahui estimasi kedalaman anomali regional dan residual dari data Anomali Bouguer serta menentukan lebar jendela (*window filter*) yang dianggap paling baik untuk digunakan dalam pemisahan anomali regional dan residual daerah penelitian. Dalam analisis spektrum dilakukan proses transformasi Fourier (transformasi dari domain waktu ke dalam domain spasial) untuk mengubah sinyal menjadi penjumlahan beberapa sinyal sinusoidal dengan berbagai frekuensi (Blakely, 1996). Transformasi Fourier merupakan proses mengurai gelombang menjadi gelombang sinus dengan frekuensi berbeda, sehingga membentuk kembali gelombang aslinya.

Hasil dari transformasi ini akan berupa spektrum *amplitude* dan spektrum *phase*, melalui transformasi Fourier nilai gravitasi ini kita mampu memperkirakan kedalaman regional dan residual dengan mengestimasi nilai bilangan gelombang (k) dan *amplitude* (A) yang dapat digunakan dalam mengitung lebar jendela yang selanjutnya akan digunakan sebagai *input* dalam melakukan *filtering*. Pada penelitian ini transformasi Fourier dilakukan dengan menggunakan *Software DOSBox 0.74*.

Blakely (1996) menurunkan spektrum dari potensial yang diamati pada suatu bidang datar horizontal adalah sebagai berikut:

$$F(U) = \gamma\mu \left(\frac{1}{r}\right) \text{ dan } F\left(\frac{1}{r}\right) = 2\pi \frac{e^{|k|(z_0-z_1)}}{|k|} \quad (19)$$

Berdasarkan kedua persamaan diatas maka diperoleh:

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

Sehingga transformasi Fourier anomali gayberat pada hasil *slice* yang telah dilakukan adalah:

$$F(g_z) = \gamma\mu F\left(\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r}\right) = \gamma\mu \frac{\partial}{\partial z} F\left(\frac{1}{r}\right) \rightarrow F(g_z) = 2\pi\gamma\mu e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (21)$$

Dimana:

- g_z = Anomali gravitasi
- γ = Densitas objek sumber
- μ = Tingkat anomali gravitasi
- k = Bilangan gelombang
- Z_0 = Ketinggian titik amat pada bidang
- Z_1 = Kedalaman benda anomali terhadap bidang

Bila distribusi densitas bersifat acak dan tidak terdapat hubungan antar masing masing nilai gravitasi maka $\mu = 1$. Hasil tranformasi Fourier akan menjadi:

$$A = C e^{|k|(z_0-z_1)} \quad (22)$$

Dimana:

- A = Amplitudo
- C = Konstanta

Selanjutnya logaritma dari hasil transformasi Fourier tersebut akan diperoleh hubungan antara amplitudo (A) dan bilangan gelombang (k) dan

kedalaman $(z_0 - z_1)$, sehingga bilangan gelombang k berbanding lurus dengan *spectral amplitude*.

$$\ln A = (z_0 - z_1)|k| + \ln C \quad (23)$$

Persamaan di atas dapat dianalogikan dalam persamaan garis lurus.

$$y = mx + c \quad (24)$$

Dalam konteks ini, $\ln A$ mewakili amplitudo sumbu y, $|k|$ adalah bilangan gelombang sumbu x, dan $(z_0 - z_1)$ adalah kemiringan garis yang menunjukkan gradien kedalaman bidang. Bilangan gelombang $|k|$ diukur dalam cycle/meter atau $\frac{2\pi}{\lambda}$, di mana λ adalah panjang gelombang. Hubungan antara panjang gelombang λ dan Δx adalah:

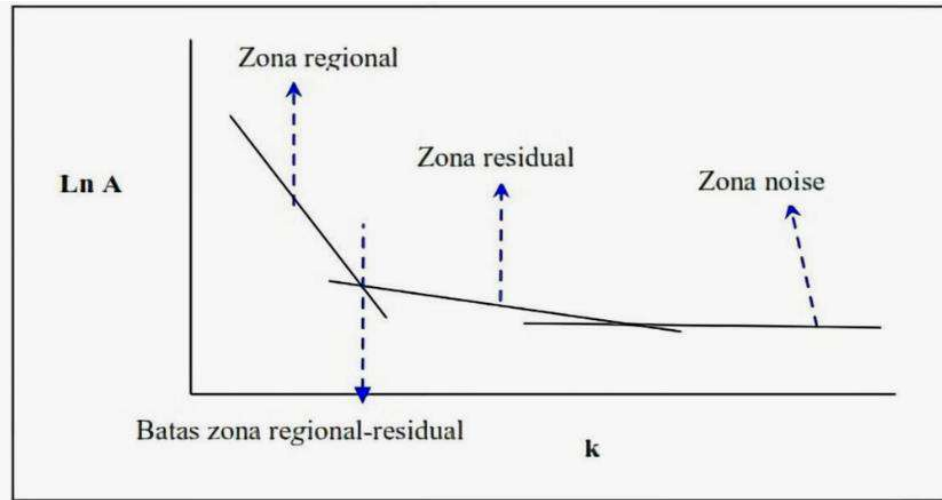
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (25)$$

Nilai λ (panjang gelombang) sama dengan Δx , dengan faktor lain pada Δx yang disebut konstanta pengali, di mana $\lambda = N \cdot \Delta x$. Konstanta N didefinisikan sebagai lebar jendela. Jadi, lebar jendela dapat dirumuskan sebagai.

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (26)$$

Dalam konteks ini, Δx adalah domain spasi yang digunakan dalam *Fast Fourier Transform* (FFT), dan k_c adalah bilangan gelombang *cut-off*. Semakin besar nilai k , maka nilai frekuensinya akan tinggi. Hubungan antara bilangan gelombang k dengan frekuensi f adalah $k = 2\pi f$, dari hubungan itu kita dapat menggunakan metode *least square* akan menghasilkan gradien yang dapat mengestimasi kedalaman suatu

anomali baik itu anomali regional dan anomali residual seperti pada **Gambar 9**.



Gambar 10. Kurva $\ln A$ terhadap k (Blakely, 1996)

3.9 Pemisahan Anomali Regional dan Residual

Dari pengukuran metode gravitasi, diperoleh hasil Anomali Bouguer yang merupakan superposisi dari gabungan dari anomali regional dan anomali residual (Blakely, 1996). Anomali Bouguer merupakan total dari anomali regional dan residual, dimana secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$g_{bouguer} = g_{reg} + g_{res} \quad (27)$$

Dimana:

$$\begin{aligned} g_{bouguer} &= \text{Anomali Bouguer} \\ g_{reg} &= \text{Anomali regional} \\ g_{res} &= \text{Anomali residual} \end{aligned}$$

Anomali regional adalah hasil dari anomali gravitasi yang berasal dari sumber anomali pada kedalaman yang dalam dan memiliki dimensi yang besar (Nishijima dan Naritomi, 2017). Anomali residual berkaitan dengan komponen frekuensi tinggi, sedangkan anomali regional terkait dengan

frekuensi rendah. Tujuan dilakukannya proses pemisahan anomali yaitu untuk memperoleh nilai anomali regional dan anomali residual yang dapat memberikan keadaan bawah permukaan yang sebenarnya (Sari, 2012).

3.10 Metode *Moving Average*

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk memisahkan anomali regional dan residual adalah metode *moving average*. Metode ini dilakukan dengan melakukan perataan nilai anomali dan akan menghasilkan anomali regional. Secara matematis persamaan *moving average* untuk satu dimensi adalah sebagai berikut:

$$\Delta g_r(i) = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (28)$$

Dimana:

i = Stasiun

N = Lebar jendela

Metode *moving average* bersifat *low pass filter* yaitu menapis anomali gelombang frekuensi tinggi tadi. Semakin lebar jendela yang digunakan dalam perhitungan maka nilai anomali residualnya akan semakin mendekati nilai Anomali Bouguer (Blakely, 1996).

Filter moving average merupakan metode penapisan yang bersifat *low pass filter*, dimana metode ini menghilangkan frekuensi tinggi dan meloloskan frekuensi rendah. Data Anomali Bouguer lengkap ditapis menggunakan metode ini dengan lebar jendela merupakan rata-rata dari setiap lintasan yang telah melalui analisis spektrum. Hasil yang didapatkan disebut dengan anomali regional. Sedangkan anomali residual diperoleh dengan cara melakukan proses pengurangan pada Anomali Bouguer lengkap dengan anomali regional. Pada prinsipnya nilai lebar jendela yang digunakan semakin besar maka nilai anomali residual yang diperoleh akan semakin mendekati nilai Anomali Bouguer (Setiadi dkk., 2010).

$$\Delta g_{reg}(i) = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (29)$$

Keterangan :

Δg_{reg} = Besarnya anomali regional

i = Nomor stasiun

N = Lebar jendela

Nilai anomali residual atau Δg_{res} dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{reg} \quad (30)$$

3.11 Analisis Derivatif

Analisis derivatif digunakan untuk menentukan zona patahan dan jenis patahan dalam suatu daerah penelitian. *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD) adalah metode yang umum digunakan. FHD dan SVD berfungsi sebagai filter yang meloloskan anomali tinggi yang menghasilkan anomali lokal yang terkait dengan struktur dangkal. Untuk zona patahan, batas litologi, dan jenis patahan yang ada di wilayah penelitian dapat diidentifikasi dengan menggunakan nilai-nilai yang dihasilkan dari analisis ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona patahan, batas litologi, serta jenis patahan yang ada dalam daerah penelitian tersebut.

First Horizontal Derivative (FHD) dari anomali gayabarat menggambarkan perubahan nilai anomali gayabarat dari satu titik ke titik di permukaan bumi. *First Horizontal Derivative* (FHD) ini memiliki karakteristik tajam, yang tercermin dalam nilai maksimum atau minimum, di sepanjang kontak anomali benda. Karena karakteristik ini, *First Horizontal Derivative* (FHD) dapat digunakan untuk mengidentifikasi batas-batas struktur geologi berdasarkan anomali gayabarat.

First Horizontal Derivative (FHD) dari anomali gayaberat adalah perubahan nilai anomali gayaberat dari satu titik ke titik lainnya, yang memiliki karakteristik tajam seperti nilai maksimum atau minimum di sepanjang kontak anomali benda. Hal ini memungkinkan penggunaan *First Horizontal Derivative* (FHD) untuk menandai batas-batas struktur geologi berdasarkan anomali gayaberat. Persamaan untuk turunan horizontal pertama dari $g(x,y)$ pada titik (i,j) adalah sebagai berikut:

$$\frac{dg(x,y)}{dx} \approx \frac{g_{i+1,j} - g_{i-1,j}}{2\Delta x} \quad (31)$$

Untuk menunjukkan pengaruh dangkal dari anomali regional, *Second Vertical Derivative* (SVD) dirancang untuk menunjukkan anomali yang disebabkan oleh struktur bawah permukaan, terutama adanya patahan di suatu wilayah survei (Sarkowi, 2014). Metode ini berasal dari persamaan *Laplace* untuk anomali gayaberat di permukaan, yang dapat diterapkan secara teoritis dengan persamaan berikut:

$$\nabla^2 \Delta g = 0 \quad (32)$$

atau

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (33)$$

sehingga *Second Vertical Derivative*-nya diberikan oleh:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (34)$$

Pada data 1-D (data penampang) persamaannya yaitu sebagai berikut:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \quad (35)$$

Persamaan SVD dalam data 1D mengindikasikan bahwa *Second Vertical Derivative* (SVD) dari anomali gayabarat permukaan sama dengan nilai negatif dari turunan satu kali terhadap *First Horizontal Derivative* (FHD). Hal ini menyiratkan bahwa anomali *Second Vertical Derivative* (SVD) dapat diperoleh melalui penerapan turunan horizontal, yang lebih praktis untuk dilakukan. Ketika turunan kedua dari anomali Bouguer memiliki nilai nol, hal tersebut dapat diinterpretasikan sebagai kontak antara dua lapisan batuan dengan kontras densitas yang berbeda, dimana kontak tersebut dapat dikatakan sebagai struktur patahan ataupun intrusi (Sarkowi, 2010). Untuk menghitung nilai *Second Vertical Derivative* (SVD), beberapa operator filter 2D dapat digunakan, seperti yang tercantum dalam **Tabel 2**, **Tabel 3**, dan **Tabel 4**.

Tabel 2. Operator Henderson dan 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	0,0000	-0,0838	0,0000	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

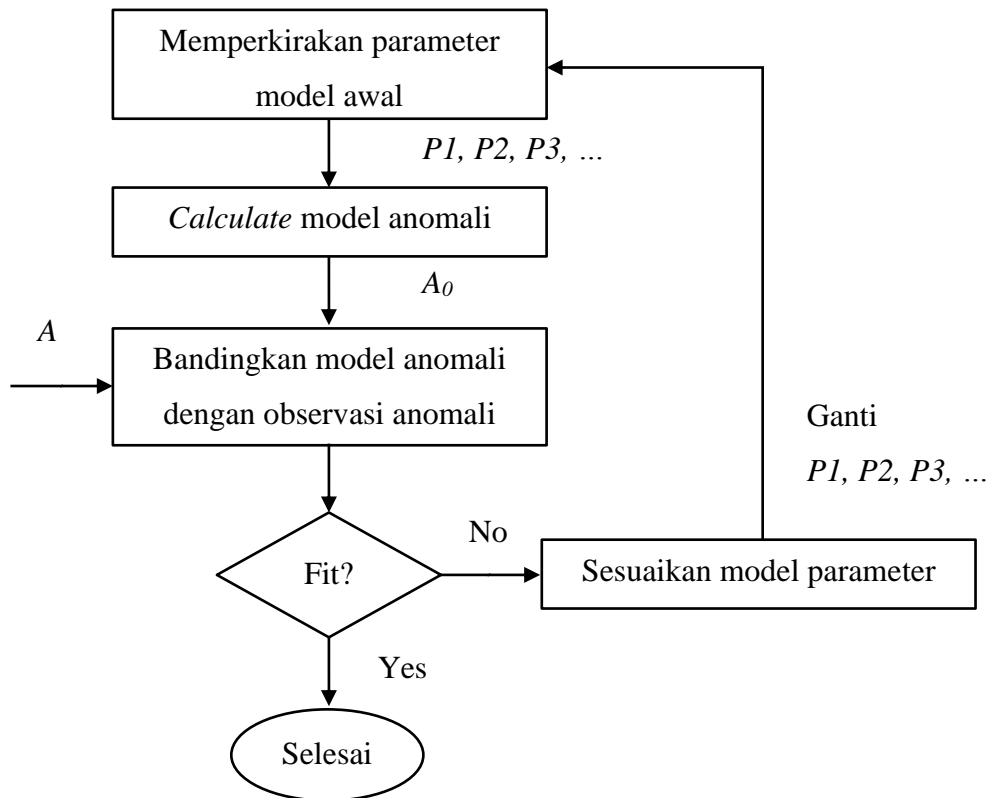
Tabel 4. Operator Rosenbach (1953)

Operator Filter SVD menurut Rosenbach (1953)				
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

3.12 *Forward modelling*

Forward modelling, atau pemodelan ke depan, merupakan metode interpretasi yang digunakan untuk memperkirakan nilai densitas di bawah permukaan dengan membuat representasi awal dari benda geologi yang tersembunyi di bawah permukaan. Dalam *forward modelling*, model awal dibangun berdasarkan estimasi dari data geologi dan geofisika yang tersedia. Selanjutnya, anomali model dihitung dan dibandingkan dengan anomali yang diamati, sementara parameter model disesuaikan untuk meningkatkan kesesuaian antara kedua anomali tersebut. Proses penyesuaian model, perhitungan anomali, dan perbandingan anomali ini diulang secara iteratif hingga anomali yang dihasilkan dianggap mirip dengan anomali yang diamati (Blakely, 1996).

Untuk mencocokkan data teoritis (respons model) dengan data lapangan, seringkali diperlukan proses percobaan berulang (*trial and error*) dengan mengubah nilai parameter model seperti yang terlihat pada **Gambar 11**. Terkadang, istilah pemodelan ke depan atau *forward modelling* digunakan untuk merujuk pada proses percobaan manual dalam memodelkan data geofisika. Artinya, pemodelan ke depan tidak hanya mencakup perhitungan respons model, tetapi juga melibatkan proses percobaan manual untuk mencapai model yang sejajar dengan data lapangan (Sarkowi, 2014).



Gambar 11. Teknik pemodelan (*trial and error*) dan modifikasi parameter model (dimodifikasi dari Blakely, 1996)

3.13 *Inverse Modelling*

Inverse modelling merupakan metode interpretasi di mana proses pencocokan data perhitungan dengan data pengamatan dilakukan secara otomatis melalui proses komputasi. Dalam pemodelan *inverse*, satu atau lebih parameter model dihitung secara otomatis dari data pengamatan sehingga menghasilkan respons yang sesuai. Metode ini sering dikenal sebagai pencocokan data atau *fitting* data karena fokus pada pencarian parameter model yang dapat menghasilkan respons yang sesuai dengan data pengamatan yang ada (Grandis, 2009).

Menke (1984) menguraikan bahwa teori *inverse* merupakan penggabungan teknik antara matematika dan statistika yang bertujuan untuk mendapatkan informasi yang relevan berdasarkan observasi terhadap suatu sistem. Dalam proses *inverse*, pemodelan dilakukan untuk memodifikasi parameter-parameter dalam model sehingga terjadi kesesuaian antara data perhitungan

dan data pengamatan secara otomatis. Kesesuaian ini sering diekspresikan melalui sebuah fungsi objektif yang harus diminimumkan. Dalam kalkulus, nilai minimum dari fungsi tersebut dapat dicapai ketika turunan terhadap parameter atau variabel yang tidak diketahui sama dengan nol. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi dan memperkirakan parameter-parameter model (Manrulu dan Wahyudi, 2014).

Persamaan dasar dalam pemodelan 3D (*inverse*) gravitasi dalam menghitung respon anomali gravitasi dipermukaan adalah sebagai berikut:

$$\Delta g(x, y, z) = G \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho z dx dy dz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (36)$$

Dimana $\Delta g(x, y, z)$ adalah tarikan vertikal gravitasi di titik dari benda yang homogen, G merupakan konstanta gravitasi dan ρ merupakan densitas dari batuan (Wulandari dan Setiawan, 2015).

Data gravitasi anomali residual diinversikan menggunakan perangkat lunak *Grablox 1.6*, sehingga menghasilkan model penampang densitas berbentuk 3D. *Inverse Singular Value Decomposition* adalah suatu teknik pemfaktoran matriks dengan menguraikan suatu matriks ke dalam dua matriks (Zhao dan Chen, 2011), sebagai contoh dari matriks A menjadi matriks U dan V . Secara matematis persamaannya, dapat ditulis sebagai berikut:

$$A = U S V^T \quad (37)$$

Dimana U merupakan matriks ortogonal sebelah kiri, S adalah suatu matriks diagonal dan V merupakan matriks ortogonal sebelah kanan. Perhitungan *inverse* matriks menggunakan teknik SVD relatif lebih stabil. Dalam penerapannya, nilai singular yang lebih kecil dari harga tertentu dapat diabaikan atau dianggap sama dengan nol sehingga tidak diikutsertakan pada proses perhitungan solusi. Penerapan teknik SVD pada pemodelan

inverse khususnya pada perhitungan matriks umumnya dapat menghasilkan solusi *inverse* yang cukup baik (Grandis, 2009).

Inverse Occam merupakan metode *inverse* yang memanfaatkan tingkat kekasaran (*roughness*) pada suatu model (Constable dkk., 1987) yang secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$U = \|\hat{\delta}m\|^2 + \mu^{-1}\{\|Wd - WGm\|^2 - X^2\} \quad (38)$$

Dimana $\|\hat{\delta}m\|^2$ merupakan kekasaran (*roughness*), μ^{-1} merupakan *lagrange multiplier*, $\|Wd - WGm\|^2$ merupakan *missfit* dan X^2 merupakan *error*.

IV. METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun waktu dan tempat pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

Waktu : Februari - Mei 2024.

Tempat : Laboratorium Geofisika Geothermal, Teknik Geofisika,
Universitas Lampung.

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

4.2 Alat dan Bahan

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

Tabel 5. Alat dan Bahan Penelitian

No.	Alat dan Bahan	Fungsi
1.	Data GGMPlus dan Data Pengukuran Lapangan	Data yang digunakan dalam pengolahan menggunakan dua data gravitasi yang berasal dari GGMPlus dan Pengukuran lapangan Pusat Survei Geologi pada wilayah yang sama
2.	Peta Lembar Geologi	Referensi Geologi Daerah Penelitian dan Korelasi terhadap SVD

3.	Data SRTM USGS	Referensi batas regional dan batas lokal pada koreksi <i>terrain</i>
4.	Laptop	<i>Hardware</i> Pengolahan Data
5.	<i>Software</i> ArcGIS 10.8	<i>Software</i> untuk membuat Peta Lokasi
7.	<i>Software</i> Global Mapper	Menentukan batas regional dan lokal dalam daerah penelitian dilakukan dengan menggunakan <i>output file</i> dari <i>Surfer 13</i> atau <i>Geosoft Grid</i> , yang kemudian diimpor ke dalam perangkat lunak <i>Oasis Montaj</i> bersama dengan file Excel yang berisi koordinat, elevasi, dan <i>Free Air Anomaly</i> (FAA) untuk menghitung koreksi <i>terrain</i>
8.	<i>Software</i> Surfer 13	<i>Software</i> untuk melakukan pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual
9.	<i>Software</i> Oasis Montaj 6.4.2	<i>Software</i> untuk mendapatkan nilai Koreksi Medan, Peta Kontur Anomali, dan SVD
10.	<i>Software</i> Matlab R2013a	<i>Software</i> untuk melakukan interpolasi spasi jarak dalam penampang

4.3 Prosedur Penelitian

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

4.3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk menggali dan mengumpulkan informasi terkait potensi hidrokarbon, karakteristik daerah penelitian dari jurnal-jurnal terkait, jenis batuan yang menyusun daerah tersebut, kondisi geologi

regional, serta penelitian sebelumnya yang telah dilakukan di daerah penelitian. Langkah ini penting sebagai faktor pendukung dalam mendukung pemahaman menyeluruh tentang kondisi dan potensi sumber daya hidrokarbon di daerah penelitian.

4.3.2 Pengambilan Data

Data gayabarat yang digunakan yaitu data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan dari Pusat Survei Geologi. Pada data gravitasi GGMPlus ini diperoleh dari sumber yang sudah ada yaitu citra satelit yang hasilnya berupa nilai FAA sedangkan untuk data gravitasi lapangan didapatkan dari Pusat Survei Geologi dimana data yang diperoleh berupa Bouguer anomali. Pada kedua data ini kemudian dilakukan pencarian nilai topografi dengan referensi SRTM dari USGS yang kemudian diperoleh elevasi dan pencarian nilai *terrain correction* sehingga menghasilkan CBA pada masing masing data gravitasi. Dari data ini kemudian dilakukan *gridding* untuk mendapatkan kontur Anomali Bouguer Lengkap menggunakan *Software Surfer 13*.

4.3.3 Analisis Spektrum

Setelah mendapatkan peta Anomali Bouguer Lengkap (ABL), langkah selanjutnya adalah melakukan analisis spektrum. Metode analisis ini menggunakan transformasi Fourier untuk mengubah domain data dari domain jarak menjadi domain frekuensi. Melalui analisis spektrum, kita dapat mengetahui kandungan frekuensi dari data yang diperoleh, sehingga dapat memperkirakan kedalaman suatu benda anomali gravitasi di bawah permukaan. Frekuensi rendah, yang berasosiasi dengan panjang gelombang yang panjang, menunjukkan daerah regional yang mencakup struktur dalam dan luas. Sebaliknya, frekuensi tinggi, yang berasosiasi dengan panjang gelombang yang pendek, menunjukkan daerah residual yang mencakup struktur dangkal. Sedangkan frekuensi sangat tinggi menunjukkan adanya *noise* yang disebabkan oleh berbagai faktor. Dalam penelitian ini, analisis spektrum dilakukan pada 6 lintasan yang mewakili daerah yang diteliti.

Kemudian, dilakukan transformasi *Fourier* pada keenam lintasan tersebut menggunakan perangkat lunak *Numeri*. Seluruh data yang diperoleh dari lintasan tersebut kemudian diolah menggunakan Microsoft Excel untuk mencari nilai $\ln A$ dan nilai bilangan gelombang K , yang akan digunakan untuk menentukan estimasi kedalaman.

4.3.4 Pemisahan Anomali Regional dan Anomali Residual

Anomali Bouguer dalam metode gayaberat disebabkan oleh perbedaan densitas batuan, baik yang dekat dengan permukaan bumi maupun yang jauh. Efek yang berasal dari batuan di daerah dangkal disebut anomali residual, sementara efek yang berasal dari batuan yang lebih dalam disebut anomali regional. Dalam penelitian ini, pemisahan antara anomali regional dan anomali residual dilakukan menggunakan metode *moving average*. *Moving average* adalah rerata dari data anomali gayaberat, di mana hasil dari metode ini adalah anomali regional. Anomali residual kemudian diperoleh dari selisih antara Anomali Bouguer dengan anomali regional. Proses ini menggunakan perangkat lunak *Surfer*, di mana data anomali Bouguer dimasukkan ke dalam perangkat lunak tersebut. Nilai optimal lebar jendela yang diperoleh dari proses analisis spektrum kemudian digunakan sebagai *input* untuk proses pemisahan anomali.

4.3.5 Analisis Derivatif

Analisis derivatif yang diterapkan dalam pemrosesan data meliputi *First Horizontal Derivative* (FHD) dan *Second Vertical Derivative* (SVD). Filter *Second Vertical Derivative* (SVD) digunakan pada peta anomali residual untuk menentukan batas-batas struktur yang hadir dalam daerah penelitian. Hasil dari pengolahan analisis derivatif ini akan berfungsi sebagai data pendukung dalam analisis struktur bawah permukaan, yang membantu dalam memahami sebaran struktur geologi yang ada di daerah penelitian.

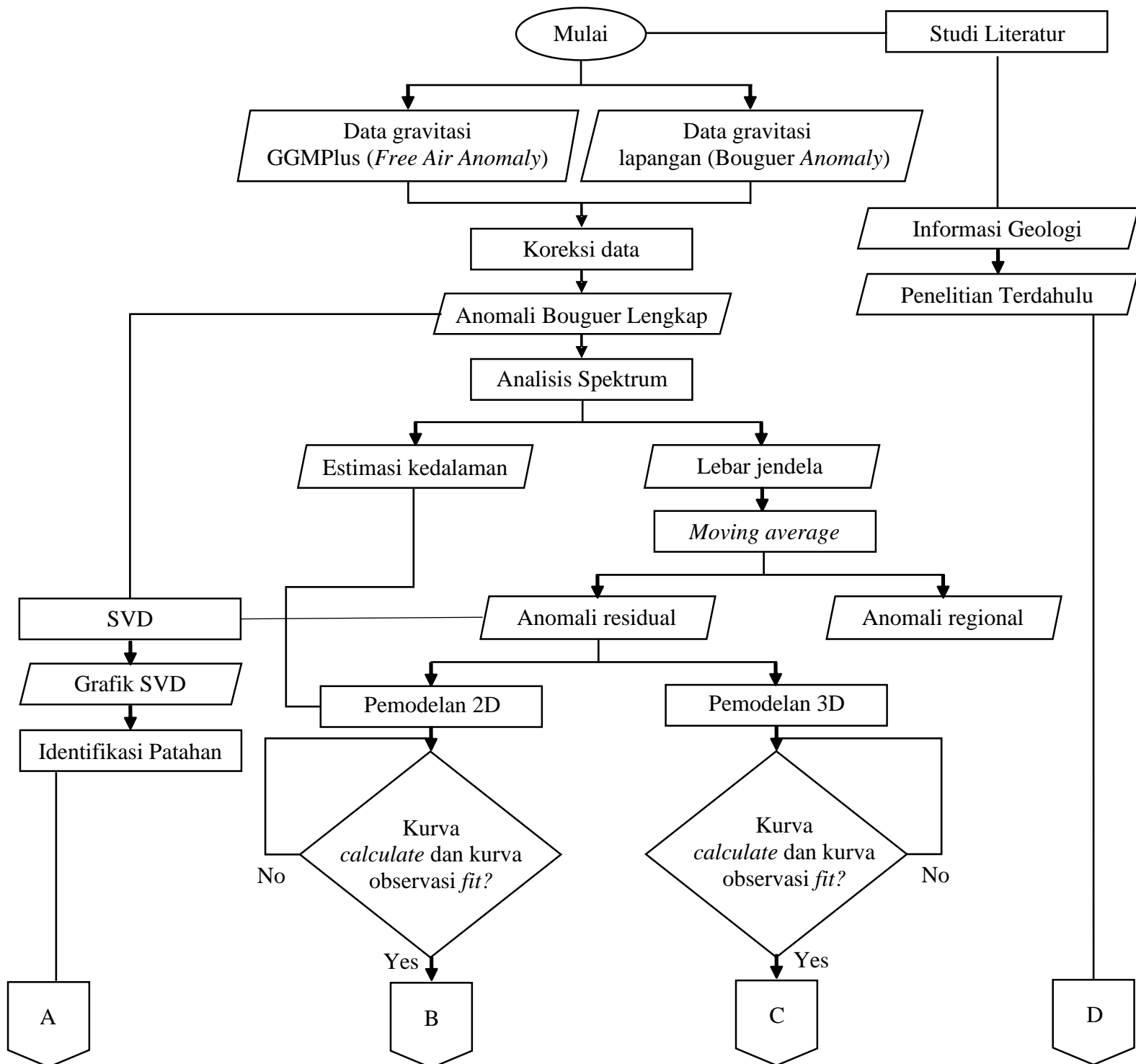
4.3.6 Pemodelan 2D dan Pemodelan 3D

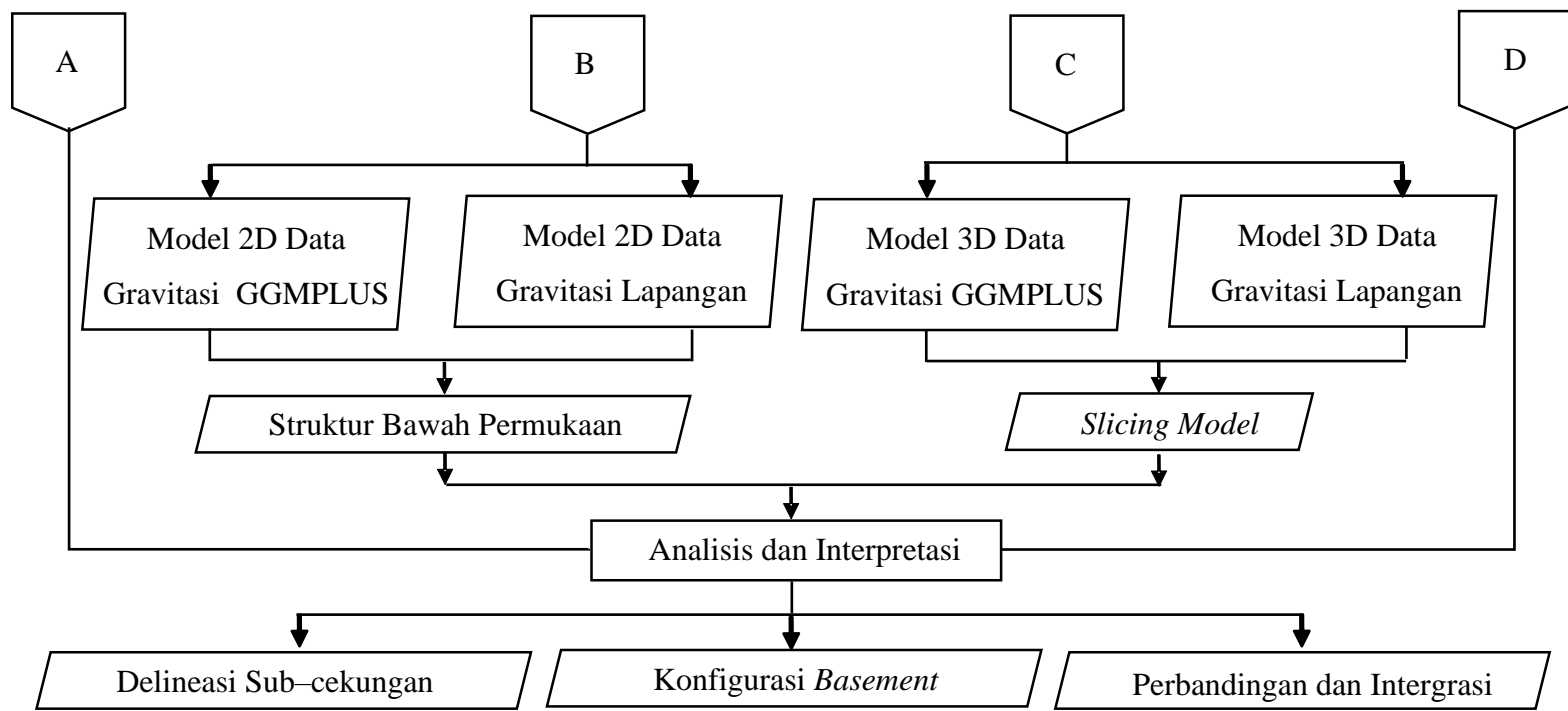
Pemodelan bawah permukaan dalam penelitian ini menggunakan metode *forward modelling* (pemodelan ke depan) 2D dan *inverse modelling* (pemodelan ke belakang) 3D dengan bantuan *Software Geosoft Oasis Montaj* dan *Grablox 16*. Tahap awal pemodelan 2D (*forward*) melibatkan input data jarak dan data anomali residual berdasarkan slice atau lintasan yang sudah ditentukan sebelumnya. Penentuan lintasan dilakukan dengan menarik lintasan yang melintasi anomali tinggi dan anomali rendah yang mengindikasikan daerah patahan.

Tahap pemodelan 3D (*inverse*) dilakukan dengan memasukkan data *mesh* dan data anomali residual data diinput ke dalam *Grablox 16* setelah diubah jaraknya dari meter menjadi kilometer. Hasil dari model 3D (*inverse*) disimpan dalam format file (.blx), yang berisi parameter untuk perangkat lunak *Voxler*, seperti parameter x, y, z, dan densitas. Pada parameter z, nilai yang dihasilkan perlu dikalikan dengan minus satu (-1) agar nilai tersebut menjadi negatif, menandakan bahwa data berada di bawah permukaan bumi. Parameter-parameter ini kemudian digunakan dalam perangkat lunak *Voxler 4* untuk menghasilkan visualisasi dan pemodelan bawah permukaan dengan penampang yang sama pada model 2D (*forward*) untuk melihat hasil bawah permukaan dari data gravitasi GGMPLus dan data gravitasi lapangan yang kemudian dibandingkan serta diintegrasikan.

4.5 Diagram Alir

Adapun diagram alir kerja praktik dan pengolahan data sebagai berikut.



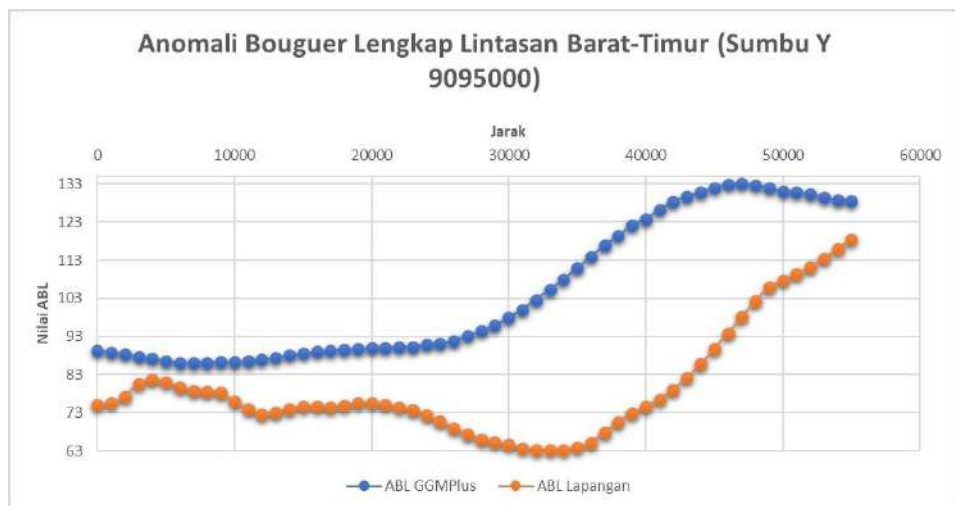


Gambar 12. Diagram alir pengolahan data

V. PEMBAHASAN

5.1 Anomali Bouguer Lengkap

Setelah proses pengolahan data satelit dan data gravitasi lapangan selesai, diperoleh nilai anomali Bouguer lengkap yang kemudian dimanfaatkan dalam langkah-langkah pemrosesan data selanjutnya. Anomali Bouguer terdiri dari kombinasi anomali regional dan anomali residual atau lokal (Setiadi dkk., 2014).

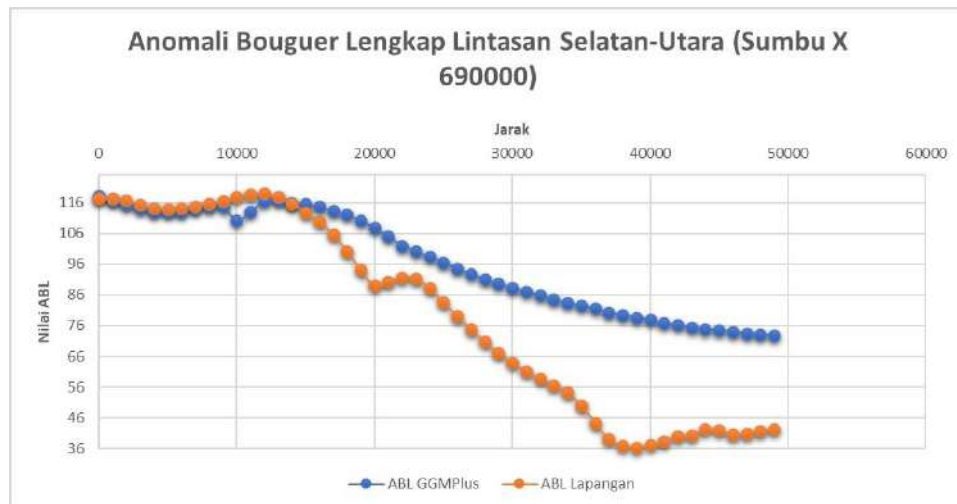


Gambar 13. Grafik ABL Lintasan Barat-Timur kedua data gravitasi

Grafik anomali gravitasi lintasan Barat - Timur daerah penelitian, dimana pada lintasan Barat - Timur terlihat bahwa nilai anomali pada lintasan tersebut berkisar antara 86 mGal sampai 133 mGal untuk data gravitasi GGMPPlus dan berkisar 63 mGal sampai 119 untuk data lapangan. Dari grafik tersebut secara umum data gravitasi GGMPPlus dan data gravitasi lapangan saling mendukung dimana persebaran batuan cenderung

berdensitas tinggi ke arah Timur. Pada data gravitasi lapangan anomali Bouguer lengkap cenderung lebih bervariasi dibandingkan dengan data gravitasi GGMPlus, dimana ini membuktikan bahwa data lapangan cenderung lebih baik dalam kondisi kontur topografi yang kasar dan kondisi litologi yang kompleks, data gravitasi GGMPlus memiliki keterbatasan untuk menangkap anomali yang dangkal atau dari struktur yang terlalu dangkal.

Nilai anomali tinggi dengan warna jingga sampai merah muda tersebut dapat diperkirakan akibat efek dari batuan yang mempunyai nilai densitas lebih tinggi dibandingkan daerah sekitarnya. Berdasarkan peta geologi (Sujanto dkk., 1992) daerah dengan anomali tinggi merupakan batuan gunung api tepatnya pada Endapan Gunungapi Jembangan, Endapan Gunungapi Semeru dan Formasi Wuni yang merupakan susunan batuan gunungapi seperti breksi dan lava-andesit-basal. Hal tersebut juga dapat diinterpretasikan akibat letak batuan dasar (*basement*) dimana pada daerah tersebut semakin ke arah Timur batuan dasarnya semakin mendekati permukaan. Sedangkan anomali rendah pada grafik anomali Bouguer lengkap dominan berada di ujung Barat. Nilai anomali rendah dengan warna biru sampai hijau tersebut dapat diperkirakan akibat efek dari keberadaan batuan yang mempunyai densitas rendah. Berdasarkan peta geologi (Sujanto dkk., 1992) daerah dengan anomali rendah merupakan endapan permukaan seperti alluvial dan terdapatnya Formasi Wonosari yang berdensitas rendah dominan berada di bagian Barat daerah penelitian. Hal tersebut juga dapat diinterpretasikan akibat letak batuan dasar (*basement*) jauh dari permukaan ini juga dapat disimpulkan bahwa terdapat akumulasi sedimen yang tebal pada daerah tersebut.



Gambar 14. Grafik ABL Lintasan Selatan-Utara kedua data gravitasi

Grafik anomali gravitasi lintasan Selatan - Utara daerah penelitian, dimana pada lintasan Selatan - Utara terlihat bahwa nilai anomali pada lintasan tersebut berkisar antara 72,82 mGal - 118,2 mGal untuk data gravitasi GGMPlus dan berkisar 36 mGal - 119 mGal untuk data gravitasi lapangan. Dari grafik tersebut dikelompokkan menjadi 2 kelompok daerah anomali. Anomali tinggi pada daerah penelitian memiliki berwarna jingga sampai merah muda yang berada di ujung Selatan.

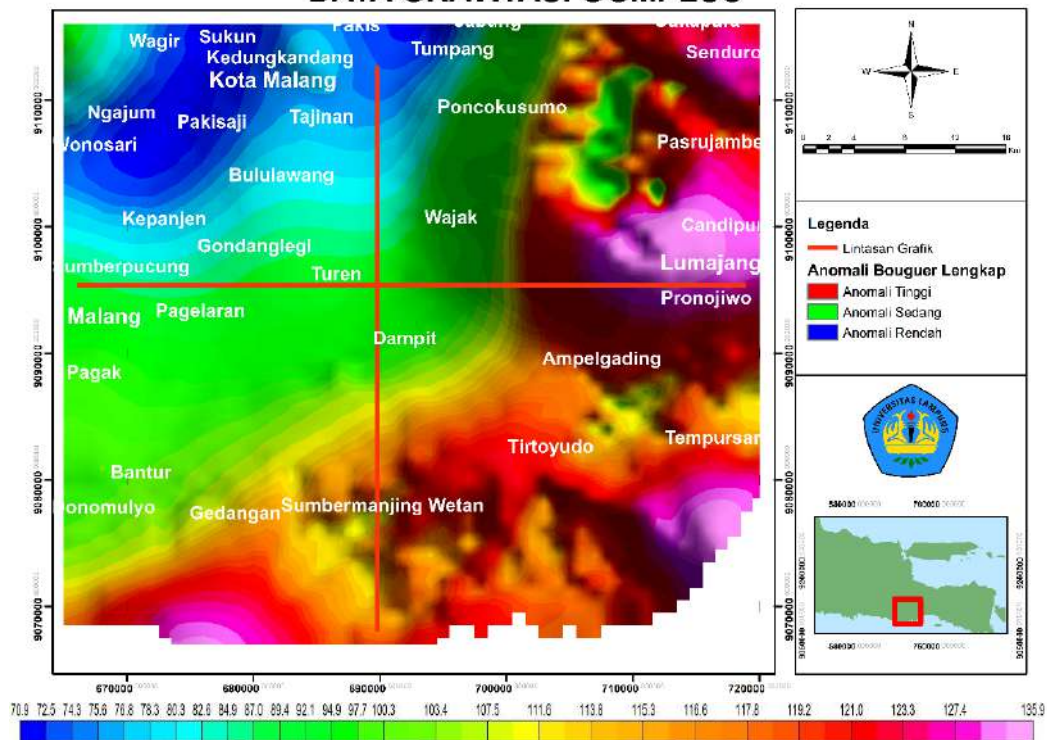
Nilai anomali tinggi tersebut dapat diperkirakan akibat efek dari batuan yang mempunyai nilai densitas lebih tinggi dibandingkan daerah sekitarnya. Berdasarkan peta geologi (Sujanto dkk., 1992) daerah di bagian Selatan memiliki geologi yang cukup kompleks dimana pada daerah ini keberadaan batuan sedimen dan batuan gunungapi saling mengisi satu sama lain namun keberadaan Formasi Mandalika dan Anggota Tuf Mandalika berada cukup dominan di bagian Selatan yang mengakibatkan nilai densitas yang tinggi pada daerah tersebut. Hal tersebut juga dapat diinterpretasikan akibat letak batuan dasar (*basement*) dimana pada daerah tersebut semakin ke arah Selatan batuan dasarnya semakin mendekati permukaan. Sedangkan anomali rendah pada daerah penelitian yang berwarna biru sampai hijau berada di ujung Utara. Nilai anomali rendah tersebut dapat diperkirakan akibat efek dari keberadaan batuan yang mempunyai densitas rendah.

Berdasarkan peta geologi (Sujanto dkk., 1992) daerah dengan anomali rendah merupakan endapan permukaan seperti alluvial yang berdensitas rendah ataupun keberadaan sub-cekungan yang dominan berada di bagian Utara hingga Barat Laut daerah penelitian. Hal tersebut juga dapat diinterpretasikan akibat letak batuan dasar (*basement*) jauh dari permukaan ini juga dapat disimpulkan bahwa terdapat akumulasi sedimen ataupun endapan permukaan yang tebal pada daerah tersebut.

Berdasarkan sebaran data gravitasi dilakukan pengolahan data pada *Software Oasis Montaj 6.4.2* dengan melakukan *gridding minimum curvature* dengan jumlah *grid cell size* 1000 dimana jumlah *grid* ini menyesuaikan dengan sebaran data yang memiliki jarak antar titik pengukuran 1 km hingga 1,5 km pada data lapangan agar hasil dari data GGMPlus dapat dibandingkan dengan parameter yang sudah mirip dengan data lapangan.

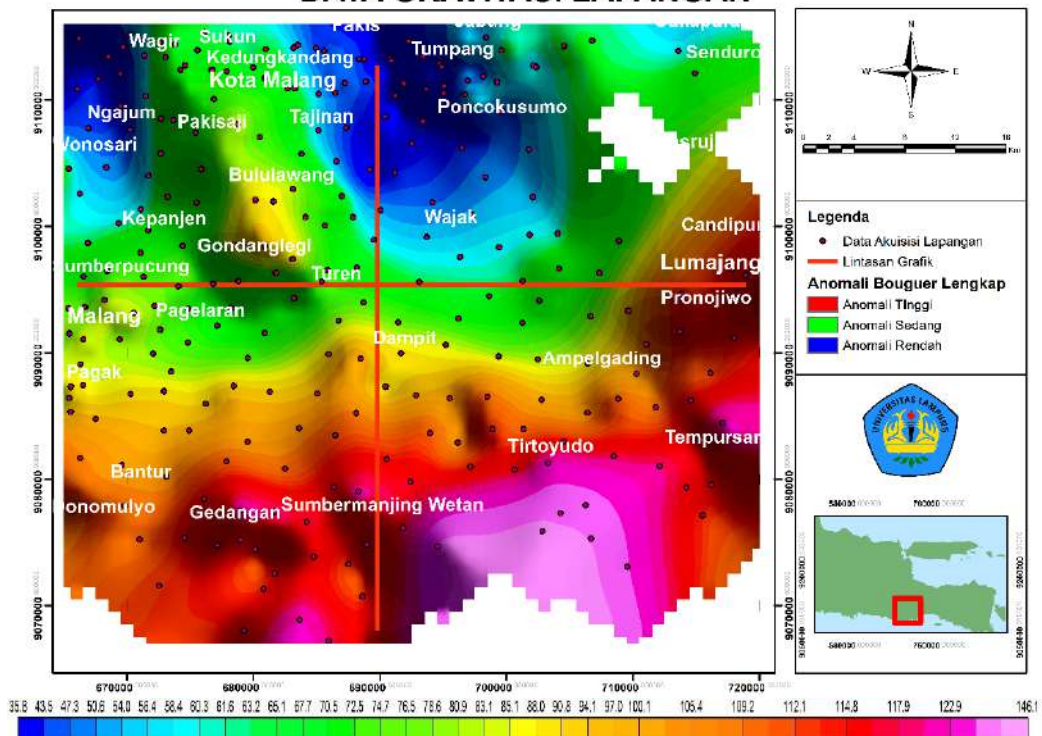
Anomali tinggi relatif berada di bagian Selatan mulai dari Malang bagian Selatan, kemudian berada pada Timur Lumajang, yang kemungkinan masih berhubungan oleh pengaruh pegunungan Jawa Selatan cenderung tersebar batuan dasar andesit campuran dari kerak samudra dan kerak benua pada berbagai tempat sehingga menunjukkan adanya kontras batuan yang memiliki rapat massa tinggi sedangkan anomali sedang relatif berada di bagian tengah ke arah Barat daerah penelitian kemungkinan berhubungan dengan batas wilayah batas cekungan pada daerah penelitian sedangkan untuk anomali rendah relatif berada di bagian paling Utara ke arah Barat Laut yang membentang dari yang mana pada area tersebut terdapat cekungan.

PETA ANOMALI BOUGUER LENGKAP DATA GRAVITASI GGMPUS



Gambar 15. Peta Anomali bouguer lengkap data gravitasi GGMPus

PETA ANOMALI BOUGUER LENGKAP DATA GRAVITASI LAPANGAN



Gambar 16. Peta Anomali Bouguer Lengkap data gravitasi lapangan

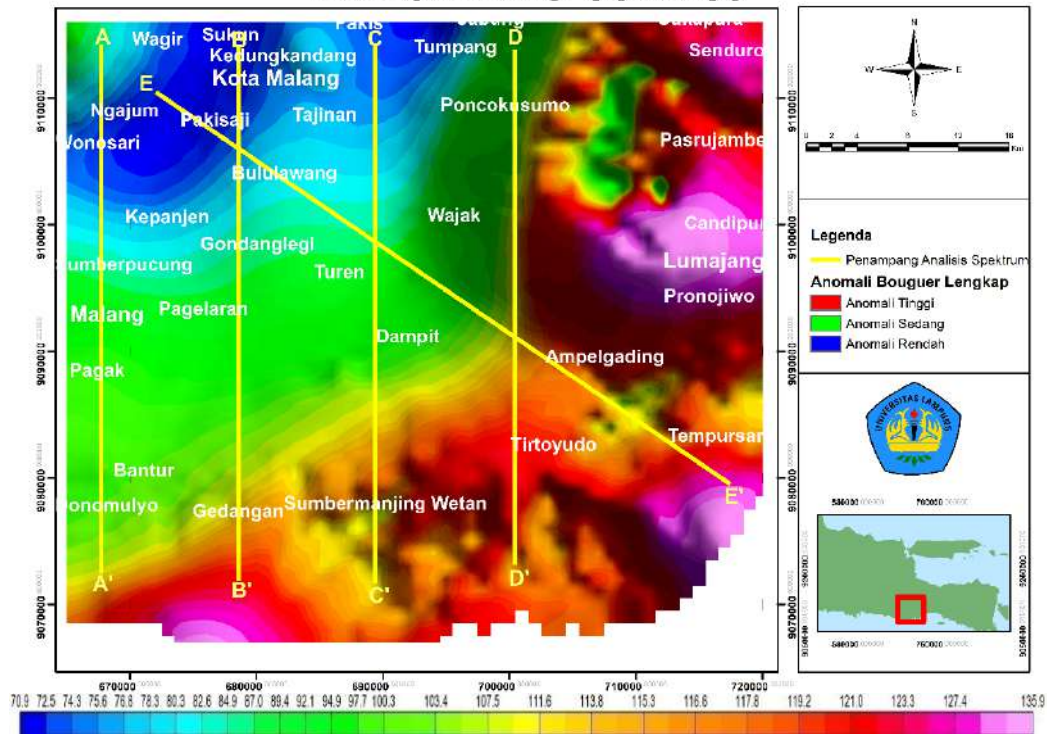
Secara kualitatif anomali Bouguer lengkap pada wilayah Malang dengan menggunakan data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan memperlihatkan sebaran anomali yang serupa dimana anomali tinggi dominan berada pada bagian Selatan daerah penelitian dan sedikit perbedaan di bagian Timur Laut dimana anomali data lapangan memperlihatkan hasil anomali rendah sedangkan data gravitasi GGMPlus memiliki pola anomali tinggi yang menunjukkan keunggulan dari data gravitasi GGMPlus dimana area tercakup dengan baik sedangkan data gravitasi lapangan yang tidak dilakukan akuisisi pada daerah tersebut dimana area ini merupakan area dengan topografi tinggi dan kondisi yang curam pada kawah Gunung Mahameru dan Kepolo.

5.2 Analisis Spektrum

Anomali Bouguer lengkap merupakan penjumlahan dari berbagai macam sumber dan kedalaman anomali bawah permukaan atau merupakan hasil kombinasi dari anomali yang disebabkan oleh batuan dangkal (residual) dan batuan dalam (regional) Bouguer sehingga perlu dilakukan pemisahan antara anomali regional dan residual untuk mendapatkan anomali target. Pada penelitian ini dilakukan analisis spektrum hingga *filter moving average* untuk menghasilkan regional terbaik pada pola anomali yang kemudian akan menghasilkan pola cekungan yang lebih jelas dari data gravitasi ini atau merupakan peta anomali residual.

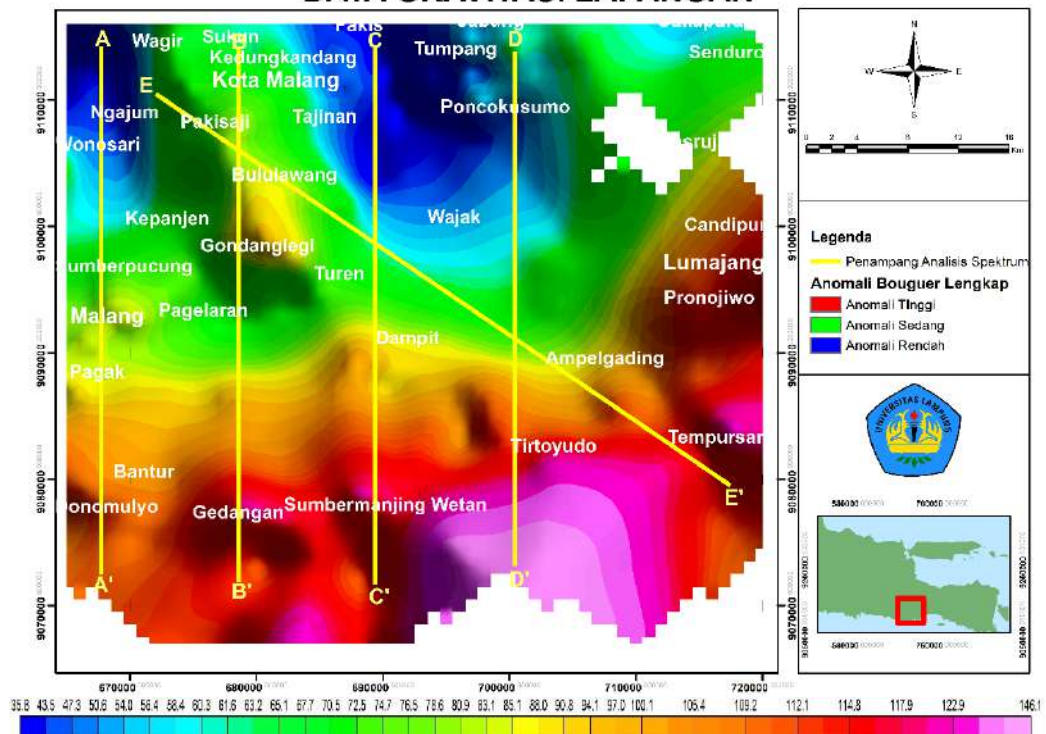
Analisis spektrum dilakukan untuk mendapatkan nilai kedalaman dari benda anomali gravitasi yang berada di bawah permukaan, pada analisis spektrum, dapat dinyatakan frekuensi rendah berasal dari sumber dalam dan frekuensi tinggi berasal dari sumber dangkal. Analisis spektrum memanfaatkan transformasi Fourier guna mengubah suatu fungsi waktu dan jarak menjadi suatu fungsi frekuensi atau bilangan gelombang (Blakely, 1995).

PETA ANOMALI BOUGUER LENGKAP DATA GRAVITASI GGMPPLUS



Gambar 17. Penampang analisis spektrum pada data gravitasi GGMPPlus

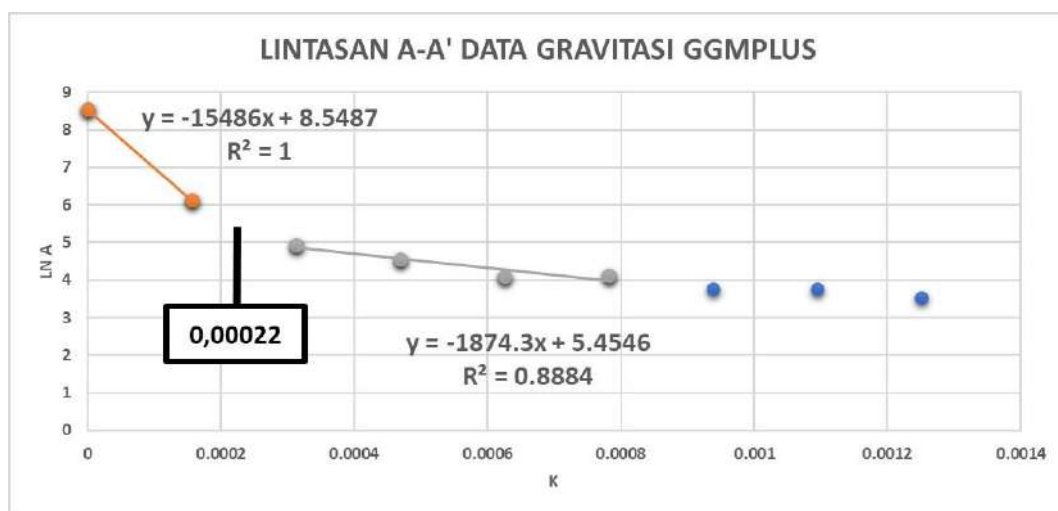
PETA ANOMALI BOUGUER LENGKAP DATA GRAVITASI LAPANGAN



Gambar 18. Penampang analisis spektrum pada data gravitasi lapangan

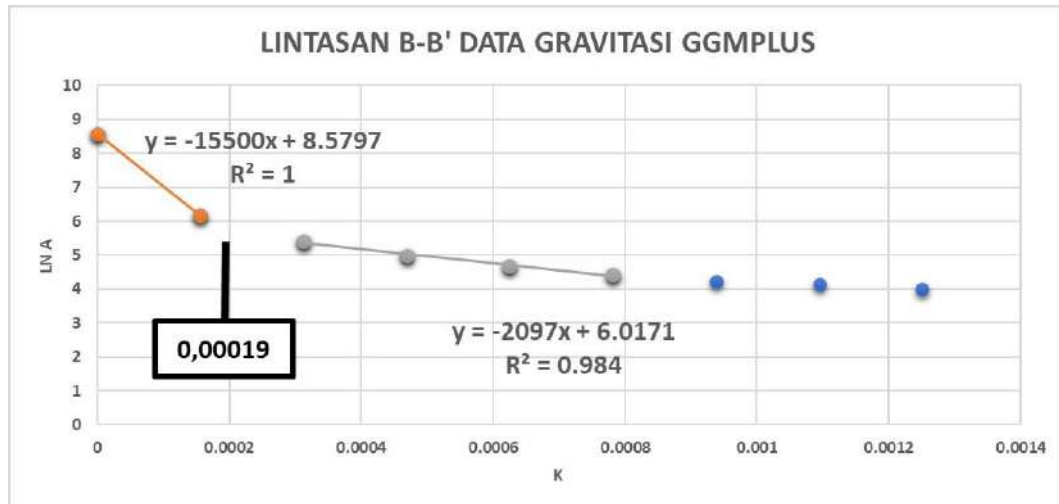
5.2.1 Analisis Spektrum Penampang Data Gravitasi GGMPlus

Pada **Gambar 19** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan A-A' data GGMPlus yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 15,48 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 1,87 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00022. Nilai bilangan gelombang *cut-off* ini dibutuhkan sebagai dasar untuk penentuan lebar jendela.



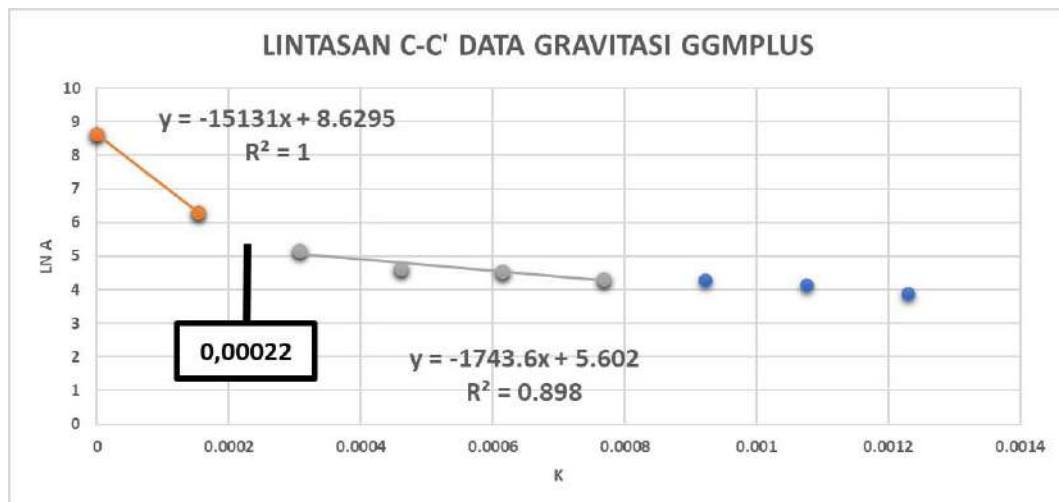
Gambar 19. Grafik Ln A dan k lintasan A-A' data gravitasi GGMPlus

Pada **Gambar 20** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan B-B' data GGMPlus yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 15,50 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 2,09 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00019.



Gambar 20. Grafik Ln A dan k lintasan B-B' data gravitasi GGMPPlus

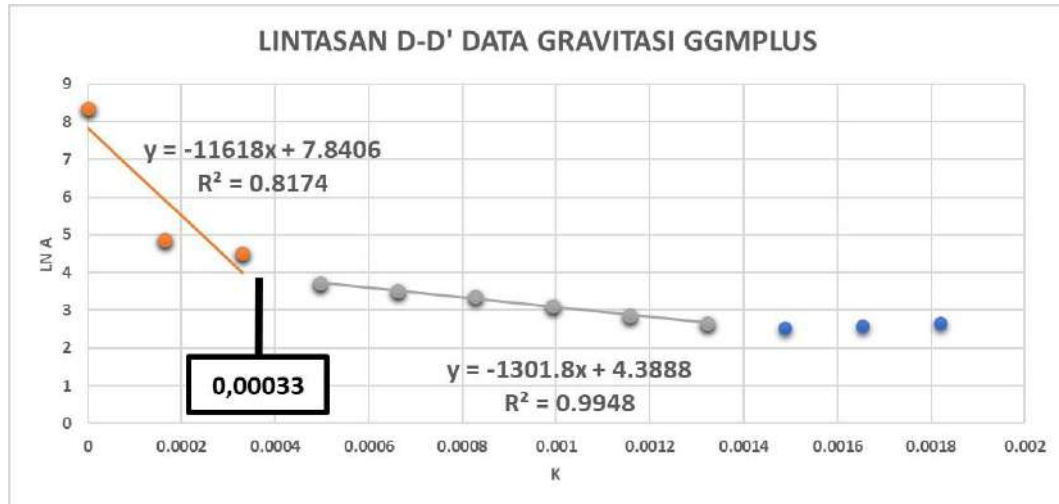
Pada **Gambar 21** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan C-C' data GGMPPlus yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 15,13 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 1,74 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00022.



Gambar 21. Grafik Ln A dan k lintasan C-C' data gravitasi GGMPPlus

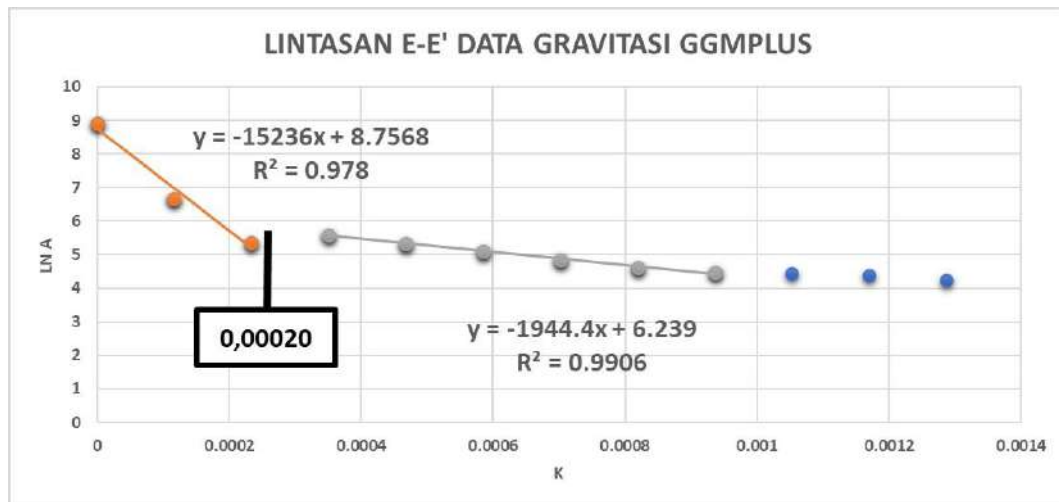
Pada **Gambar 22** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan D-D' data GGMPPlus yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 11,61 kilometer.

kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 1,30 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00033.



Gambar 22. Grafik Ln A dan k lintasan D-D' data gravitasi GGMPlus

Pada **Gambar 23** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan E-E' data GGMPlus yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 15,23 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 1,94 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00020.



Gambar 23. Grafik Ln A dan k lintasan E-E' data gravitasi GGMPPlus

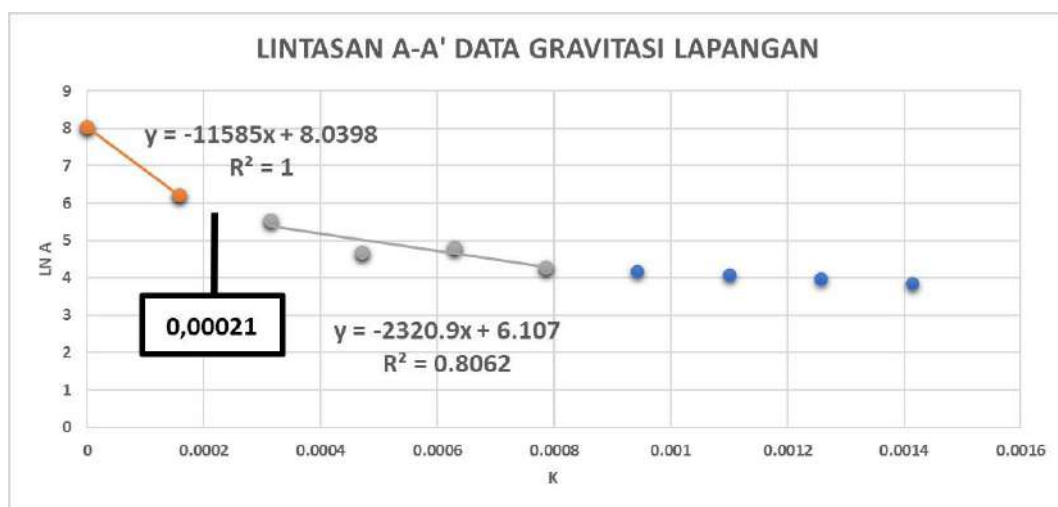
Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada 5 lintasan penampang menunjukkan bahwa nilai rata-rata kedalaman bidang anomali dalam (regional) adalah 15,93 km yang diinterpretasikan sebagai rata-rata kedalaman regional, sedangkan rata-rata kedalaman bidang anomali dangkal (residual) adalah 1,88 km terlihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Kedalaman Anomali Regional dan Residual Data Gravitasi GGMPPlus

<i>Slice</i>	Kedalaman Regional (km)	Kedalaman Residual (km)
A-A'	15,48	1,87
B-B'	15,50	2,09
C-C'	15,13	1,74
D-D'	11,61	1,30
E-E'	15,23	1,94
Rata-rata	14,59	1,79

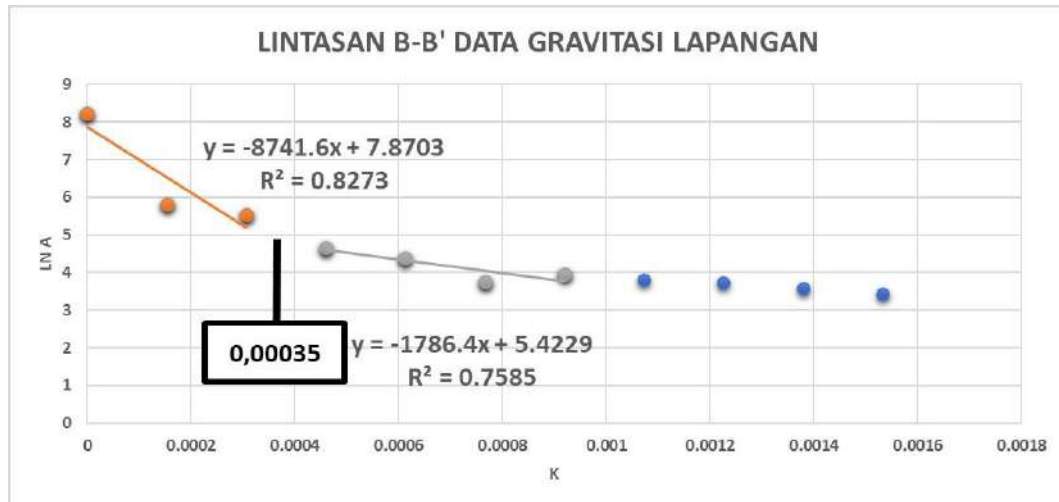
5.2.2 Analisis Spektrum Penampang Data Gravitasi Lapangan

Pada **Gambar 24** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan A-A' data gravitasi lapangan yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 11,58 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 2,32 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00021. Nilai bilangan gelombang *cut-off* ini dibutuhkan sebagai dasar untuk penentuan lebar jendela.



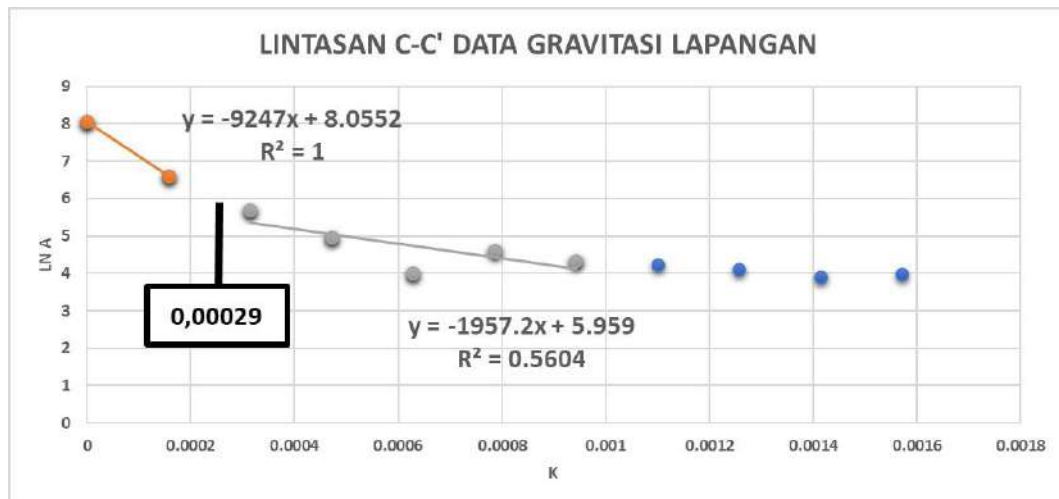
Gambar 24. Grafik Ln A dan k lintasan A-A' data gravitasi lapangan

Pada **Gambar 25** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan B-B' data gravitasi lapangan yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 8,74 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 1,78 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00035.



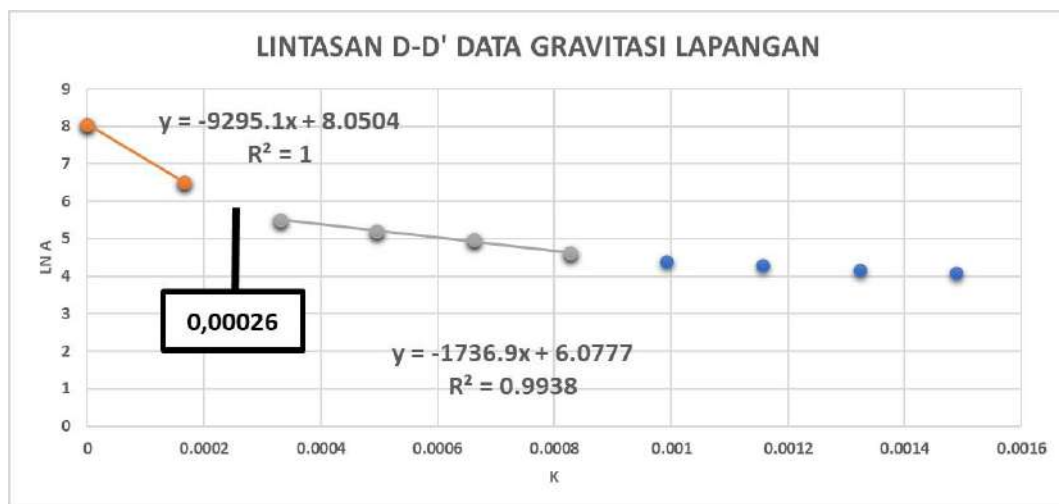
Gambar 25. Grafik Ln A dan k lintasan B-B' data gravitasi lapangan

Pada **Gambar 26** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan C-C' data gravitasi lapangan yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 9,24 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 1,95 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (k_c) yang memiliki nilai sebesar 0,00029.



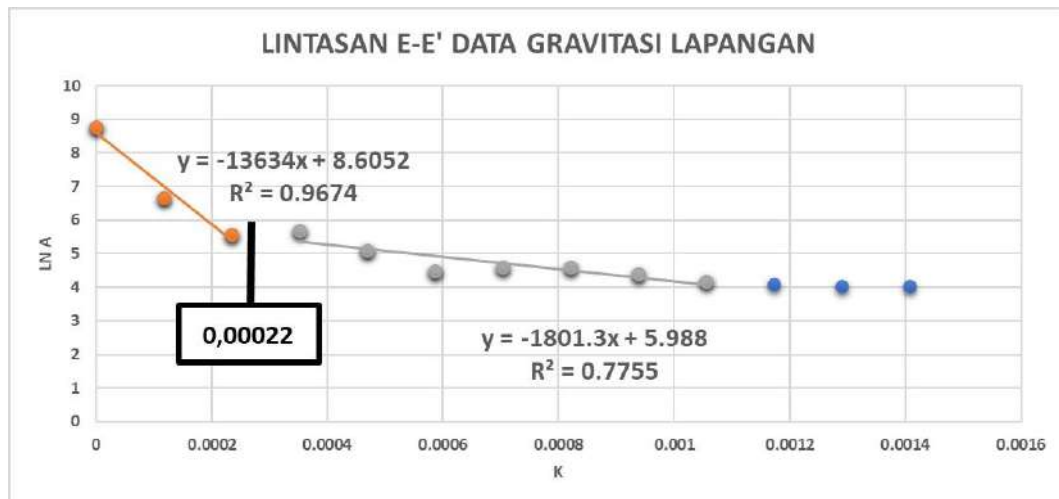
Gambar 26. Grafik Ln A dan k lintasan C-C' data gravitasi lapangan

Pada **Gambar 27** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan D-D' data gravitasi lapangan yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 9,29 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 1,73 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00026.



Gambar 27. Grafik Ln A dan k lintasan D-D' data gravitasi lapangan

Pada **Gambar 28** menunjukkan hasil analisis spektrum pada lintasan E-E' data gravitasi lapangan yaitu dengan kedalaman anomali regional sebesar 13,63 kilometer. Sedangkan kedalaman anomali residual memiliki nilai sebesar 1,80 kilometer, bidang ini dapat diasumsikan sebagai batas antara batuan dasar (*basement*) dengan batuan sedimen. Perpotongan antara gradien pertama dan gradien kedua menunjukkan bilangan gelombang *cut-off* (kc) yang memiliki nilai sebesar 0,00022.



Gambar 28. Grafik Ln A dan k lintasan E-E' data gravitasi lapangan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada 5 lintasan penampang menunjukkan bahwa nilai rata-rata kedalaman bidang anomali dalam (regional) adalah 10,50 km yang diinterpretasikan sebagai rata-rata kedalaman regional, sedangkan rata-rata kedalaman bidang anomali dangkal (residual) adalah 1,92 km terlihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Kedalaman Anomali Regional dan Residual Data Gravitasi Lapangan

<i>Slice</i>	Kedalaman Regional (km)	Kedalaman Residual (km)
A-A'	11,58	2,32
B-B'	8,78	1,78
C-C'	9,24	1,95
D-D'	9,29	1,73
E-E'	13,63	1,80
Rata-rata	11,05	1,92

5.3 *Moving Average*

Nilai bilangan gelombang *cut-off* yang diperoleh pada tiap lintasan kemudian akan dihitung lebar jendela dengan membagi nilai lambda dengan spasi tiap lintasan yang digunakan seperti pada **Tabel 9** dan **Tabel 10**. Nilai lebar jendela yang diperoleh kemudian digunakan sebagai nilai untuk merata-ratakan anomali Bouguer dengan menerapkan *filter moving average* yang kemudian akan menghasilkan anomali regional. Sedangkan untuk memperoleh anomali residual dilakukan pengurangan nilai anomali Bouguer lengkap dengan nilai anomali regional (Purnomo dkk., 2013).

Tabel 9. Panjang Gelombang dan Lebar Jendela Data Gravitasi GGMPlus

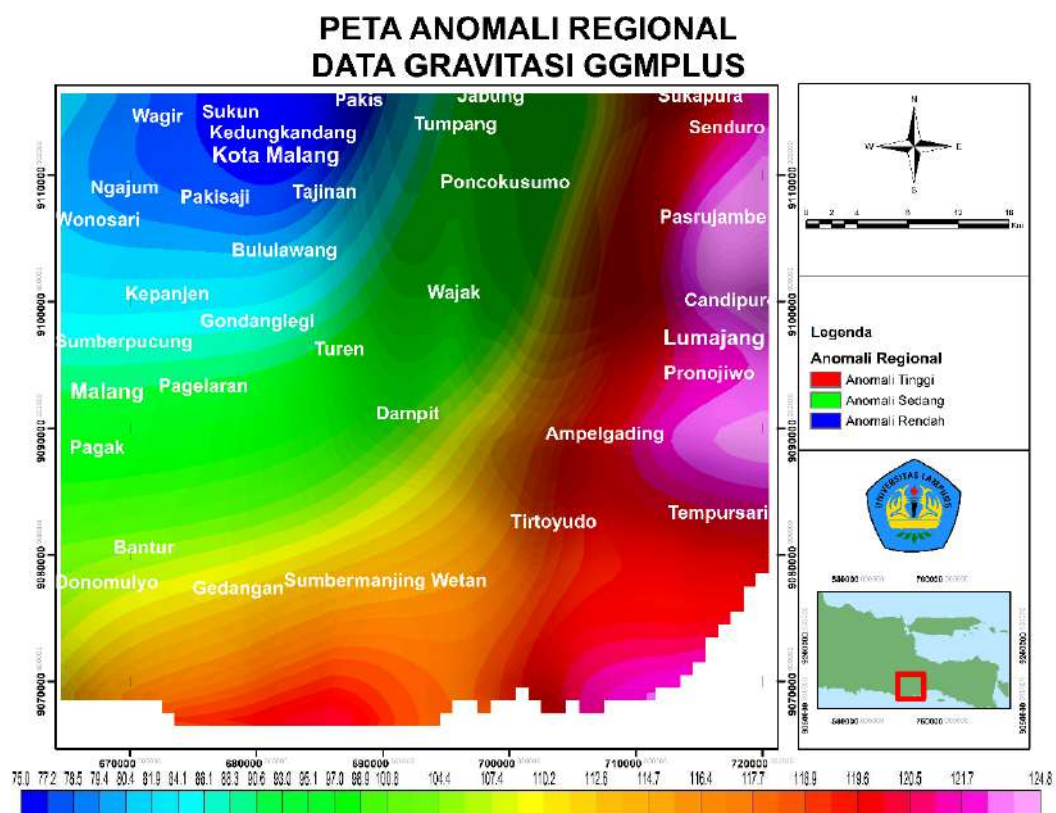
<i>Slice</i>	Panjang Gelombang (Kc)	Lebar Jendela (N)
A-A'	0,000227	27,6
B-B'	0,000191	32,9
C-C'	0,000226	27,8
D-D'	0,000335	18,8
E-E'	0,000206	20,3
Rata-rata	0,000237	25,5

Tabel 10. Panjang Gelombang dan Lebar Jendela Data Gravitasi Lapangan

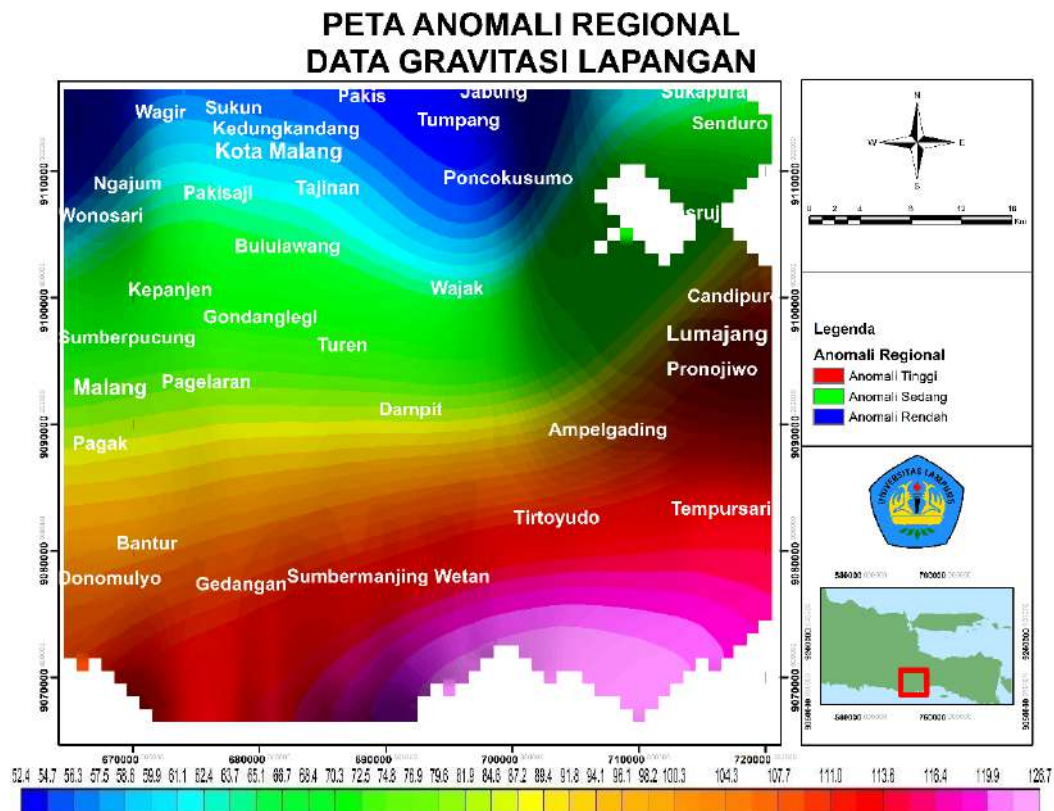
<i>Slice</i>	Panjang Gelombang (Kc)	Lebar Jendela (N)
A-A'	0,000209	30,1
B-B'	0,000352	17,9
C-C'	0,000288	21,9
D-D'	0,000261	24,1
E-E'	0,000221	28,4
Rata-rata	0,000266	24,5

5.4 Anomali Regional

Anomali regional merupakan anomali gravitasi yang memiliki frekuensi yang rendah dan amplitudo yang tinggi (Telford dkk., 1990). Berdasarkan **Tabel 9** dan **Tabel 10** dilakukan filter *moving average* dengan lebar *windows* $N = 25$. Pola anomali regional cenderung memiliki pola anomali yang teratur serta panjang gelombang pada anomali regional yang relatif lebih panjang dari Anomali Bouguer Lengkap hal ini dikarenakan respon anomali regional berasal dari batuan dengan nilai densitas tinggi dan berada pada kedalaman yang jauh dari permukaan.



Gambar 29. Anomali regional data gravitasi GGMPlus



Gambar 30. Anomali regional data gravitasi lapangan

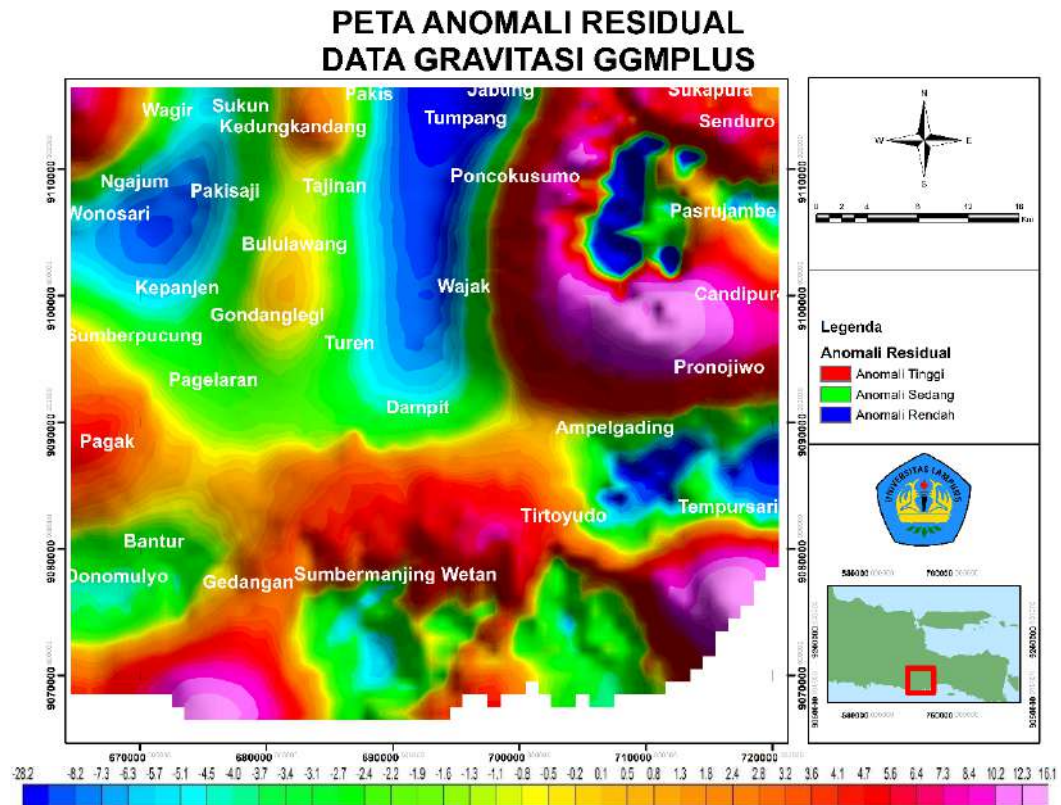
Pola anomali regional berdasarkan data gravitasi GGMPPlus ditunjukkan oleh (**Gambar 29**) dan pola anomali regional berdasarkan data gravitasi lapangan ditunjukkan oleh (**Gambar 30**). Berdasarkan pola anomali regional data gravitasi GGMPPlus memiliki rentang warna biru sampai merah muda dengan nilai anomali terendah yaitu 75 mGal dan tertinggi adalah 124,8 mGal berdasarkan hasil anomali regional tersebut dapat dikelompokkan menjadi 3 pola anomali yaitu anomali rendah dengan rentang nilai 75 mGal sampai 95,1 mGal kontras warna dari biru ke hijau muda dan anomali sedang berada di rentang nilai 95,2 mGal sampai 114,7 mGal dengan warna hijau tua ke warna jingga dan anomali tinggi berada di rentang nilai 114,8 mGal sampai 124,8 mGal dengan warna merah tua hingga merah muda. Berbeda dengan rentang anomali berdasarkan data gravitasi lapangan dengan nilai anomali terendah yaitu 52,4 mGal dan tertinggi adalah 126,7 mGal nilai anomali rendah dengan rentang nilai 52,4 mGal sampai 68,4 mGal kontras warna dari biru ke hijau muda dan anomali

sedang berada di rentang nilai 68,4 mGal sampai 96,1 mGal dengan warna hijau tua ke warna jingga dan anomali tinggi berada di rentang nilai 96,2 mGal sampai 126,7 mGal dengan warna merah tua sampai merah muda terlihat pada peta adanya gradasi pola sebaran anomali gravitasi dari tinggi ke rendah yaitu anomali dari Selatan menuju ke Utara. Kedua pola anomali regional masih memiliki pola yang mirip dengan kecenderungan semakin rendah ke arah Utara namun sedikit berpusat pada arah Barat Laut pada pola anomali regional data gravitasi GGMPlus yang menandakan pada bagian Selatan masih dipengaruhi oleh pegunungan Jawa Timur bagian Selatan atau hasil kerak Samudra dan kerak benua pada berbagai wilayah pegunungan Jawa Selatan.

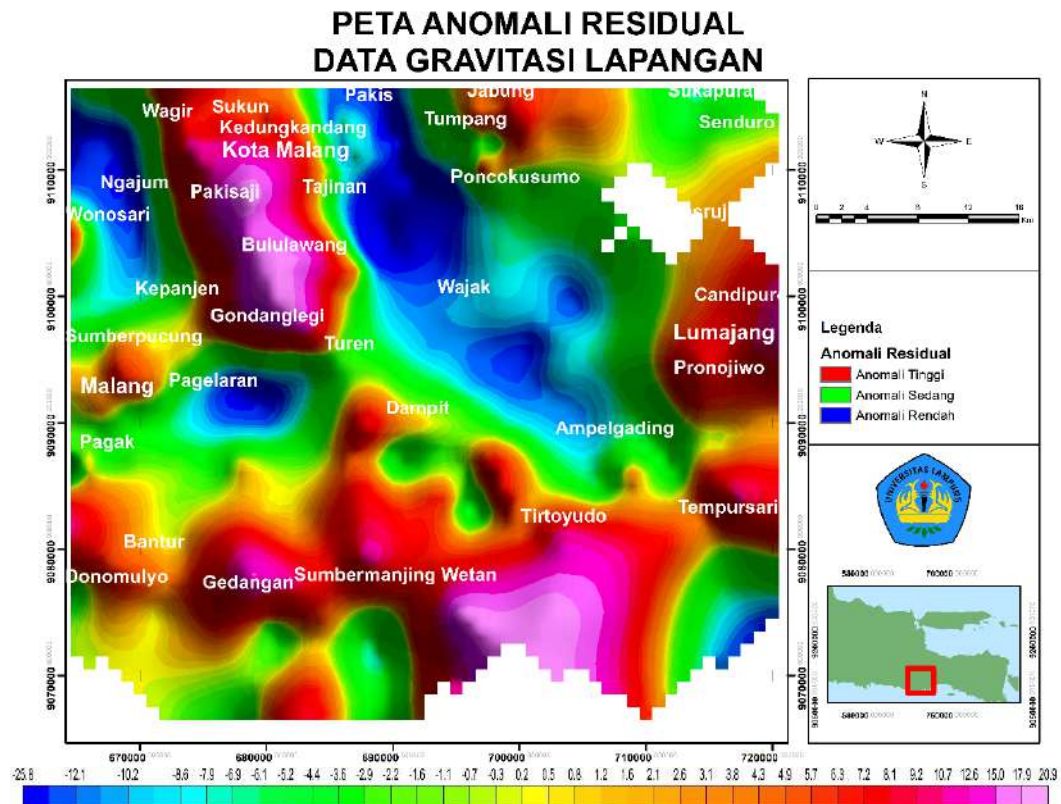
5.5 Anomali Residual

Anomali residual adalah anomali gravitasi dengan amplitudo gelombang yang pendek tetapi frekuensi tinggi (Telford dkk., 1990). Polanya lebih kompleks karena menggambarkan pola dengan panjang gelombang yang lebih pendek yang menunjukkan pengaruh benda anomali yang lebih dangkal.

Pada peta residual yang dihasilkan oleh data gravitasi GGMPlus dapat diklasifikasikan anomali rendah memiliki rentang nilai -28 mGal sampai -3,1 mGal dengan kontras warna dari biru ke hijau muda, anomali sedang berada pada rentang nilai -3,2 sampai 1,8 mGal ditandai dengan warna hijau tua ke warna jingga dan anomali tinggi berada pada rentang nilai 1,9 sampai 16,1 mGal ditandai dengan warna merah tua sampai merah muda (**Gambar 31**). Sedangkan, pada peta residual yang dihasilkan oleh data gravitasi lapangan dapat diklasifikasikan dengan anomali rendah memiliki rentang nilai -25,8 sampai -3,6 mGal dengan kontras warna dari biru ke hijau muda, anomali sedang berada pada rentang nilai -3,7 mGal sampai 4,3 mGal ditandai dengan warna hijau tua ke warna jingga dan anomali tinggi berada pada rentang nilai 4,4 mGal sampai 20,9 mGal ditandai dengan warna merah tua sampai merah muda (**Gambar 32**).



Gambar 31. Peta anomali residual data gravitasi GGMPlus



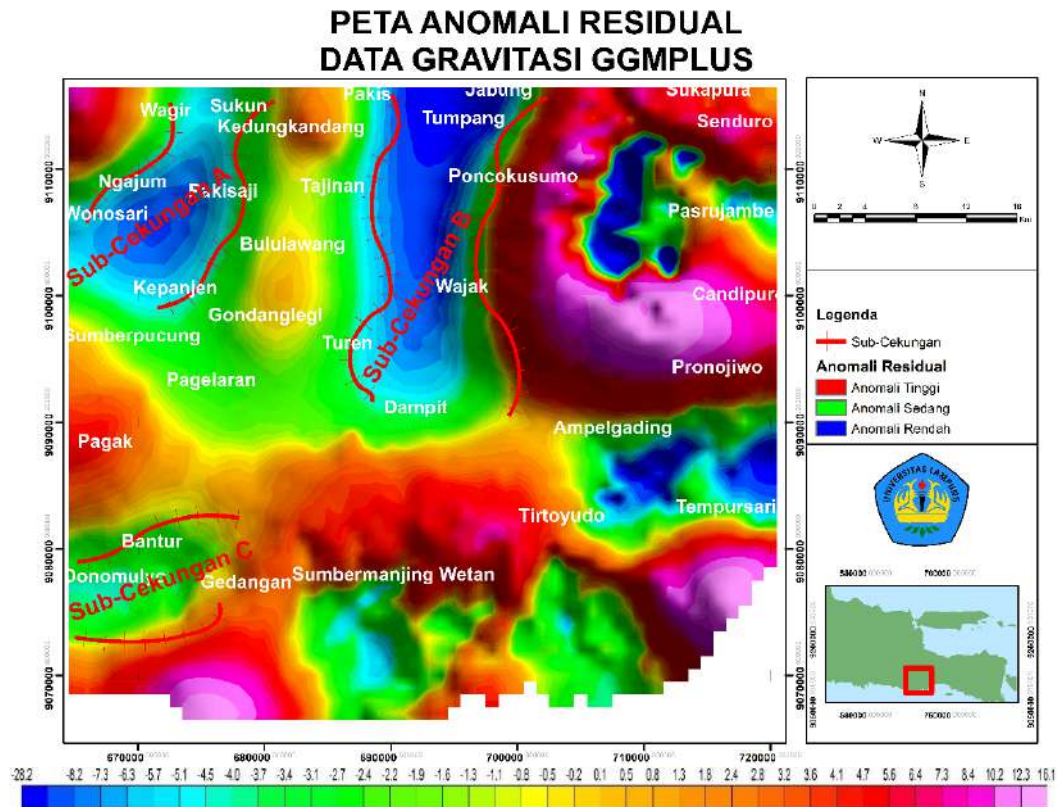
Gambar 32. Peta anomali residual data gravitasi lapangan

Berdasarkan hasil dari anomali residual yang berasal dari data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan memperlihatkan pola anomali rendah yang cukup mirip atau terkorelasi di bagian Barat berdasarkan geologi penyusunnya area di bagian Barat ini disusun oleh formasi-formasi sedimen diantaranya Formasi Wonosari dan Formasi Nampol dengan pola topografi yang tidak terlalu detail sedangkan pada bagian Timur dan Selatan sedikit berbeda yang diasumsikan terdapatnya kekurangan pengambilan nilai pada data gravitasi GGMPlus pada topografi detail.

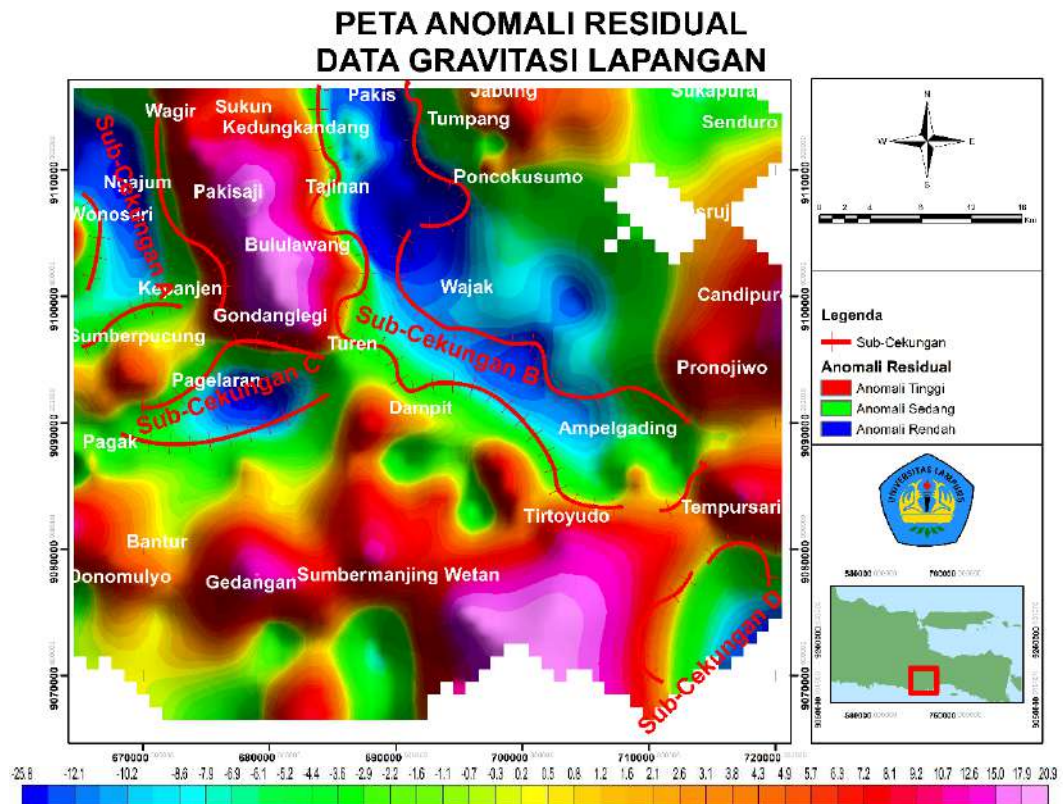
Sedangkan pada bagian Timur berdasarkan data gravitasi GGMPlus cenderung memperlihatkan nilai anomali rendah pada wilayah-wilayah Gunung Api yaitu Gunung Masigit, Gunung Seriti dan Gunung Kukusanseriti sehingga data mengalami kekurangan pada pengambilan data pada topografi yang detail atau seperti daerah Pegunungan begitu juga pada bagian Selatan yang mana memperlihatkan daerah Gunung api dan didominasi oleh Formasi Mandalika dengan litologi batuan masih tergolong batuan beku seperti breksi dan andesit yang dominan dengan topografi yang detail nilai anomali berdasarkan data gravitasi GGMPlus menghasilkan nilai yang kecil. Pada bagian Timur Laut merupakan letak dari topografi yang tinggi dimana wilayah ini merupakan area Gunung Semeru dengan puncak gunung Mahameru di ketinggian 3676 mdpl sehingga terdapat kekurangan pengambilan data pada gravitasi lapangan yang mengakibatkan hasil interpolasi kurang baik di area ini namun pada data gravitasi GGMPlus juga memperlihatkan kekurangannya yaitu pada kawasan ini data percepatan yang terukur menghasilkan anomali rendah yang pada dasarnya akuisisi hasil satelit GGMPlus mengalami kekurangan pada pengambilan data pada topografi yang detail atau seperti daerah Pegunungan pada area Gunung Semeru dan berdasarkan geologi regionalnya pada wilayah tersebut didominasi oleh endapan gunung api yang terdiri dari tuf, tuf pasir dan pasir sehingga nilai yang terukur pada GGMPlus merupakan nilai densitas berasosiasi dengan nilai kandungan pasir atau berdensitas rendah ini juga dapat disebabkan oleh teori sintesis data gravitasi GGMPlus, yang

melibatkan penggabungan data gravitasi dari satelit GRACE-GOCE dan EGM2008, serta pemodelan maju gravitasi topografi lokal. Kesalahan dari nilai elevasi SRTM V.4.1 dapat mencapai 10 meter yang sebanding dengan kesalahan ± 3 mGal (Hirt, 2013).

Sebaran anomali pada residual secara umum memperlihatkan bahwa terdapatnya nilai densitas rendah yang berada pada medium berdensitas tinggi yang akan menghasilkan nilai cenderung negatif sebaliknya densitas tinggi pada anomali rendah akan bernilai positif. Anomali residual tinggi (warna merah) pada peta anomali residual dapat disebabkan oleh batuan densitas tinggi atau batuan dasar (*basement*) dekat permukaan sedangkan Anomali residual rendah (warna biru) disebabkan oleh batuan sedimen yang tebal dan batuan dasar (*basement*) yang dalam (Setiadi dkk., 2010). Berdasarkan analisis anomali residual yang memiliki anomali rendah ini kemudian dikorelasikan dengan pola tinggian dengan menggunakan filter SVD serta memperhatikan sebaran formasi pada peta lembar geologi Turen untuk memperlihatkan batas antar dua lapisan yang memiliki kontras yang berbeda antara densitas tinggi dan rendah sehingga akan memperlihatkan pola tinggian dan lembah di daerah penelitian pada data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan, terdapat 3 sub-cekungan yang muncul pada data gravitasi GGMPlus dan 4 sub-cekungan yang muncul pada data gravitasi lapangan seperti pada (**Gambar 33** dan **Gambar 34**). Berdasarkan korelasi antar kedua data gravitasi disimpulkan terdapat 3 sub-cekungan yang berpotensi memiliki lapisan yang tebal seperti pada hasil delineasi sub-cekungan yang terdapat pada data gravitasi lapangan tepatnya di Kecamatan Ngajum, Kecamatan Tajinan, Kecamatan Pagelaran, sedangkan pada data gravitasi GGMPlus didapatkan validasi keberadaan Sub-Cekungan A dan Sub-Cekungan B namun tidak pada Sub-Cekungan C data gravitasi lapangan yang tidak memperlihatkan keberadaan sub-cekungan di Kecamatan Pagelaran.



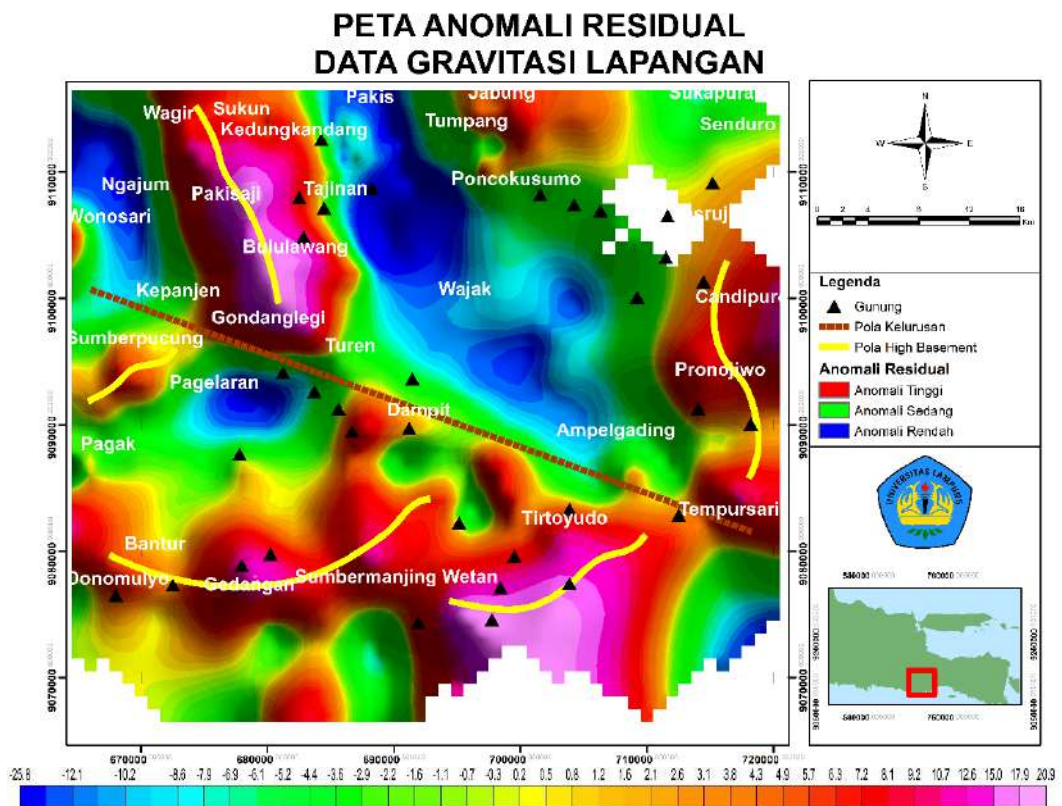
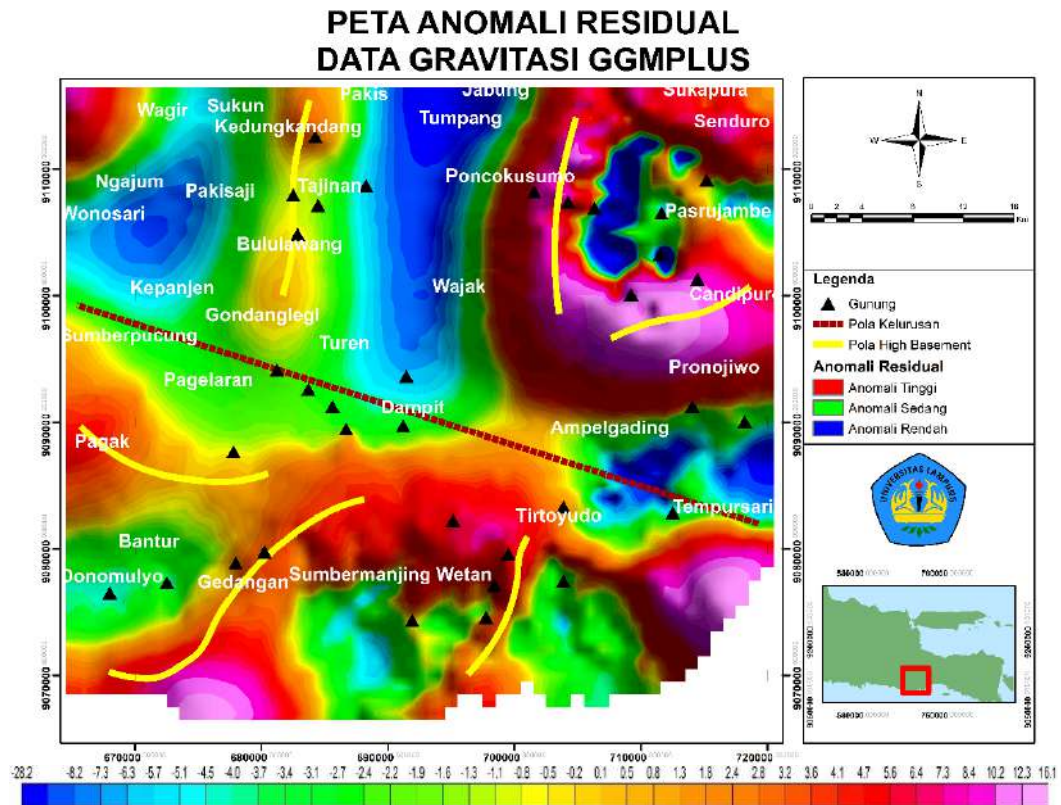
Gambar 33. Peta sub-cekungan data gravitasi GGMPPlus



Gambar 34. Peta sub-cekungan data gravitasi lapangan

Interpretasi kualitatif digunakan untuk menentukan pola struktur geologi, keselarasan, dan penggambaran sub-cekungan. Secara umum, penyelarasan pola geologi struktural memiliki arah Tenggara ke Barat Laut dan Barat Daya ke Timur Laut oleh kedua data. Pola ini mengikuti pola regional, yaitu tren Meratus yang mungkin disebabkan oleh pengaruh aktivitas subduksi di daerah ini seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 35** dan **Gambar 36**.

Berdasarkan sebaran data gunung api yang dimunculkan pada anomali residual mempertegas bahwa pola tinggian yang terdapat pada anomali residual memiliki hubungan yang signifikan terhadap sebaran gunung api di daerah Malang Selatan dan batas antara sub-cekungan yang sebelumnya sudah diperlihatkan dibatasi oleh pola tinggian yang berkorelasi dengan keberadaan gunung api area ini bisa juga diasumsikan terdapat keberadaan sumber panas yang dapat berfungsi memanaskan hidrokarbon yang berada di bagian Barat Laut dominan terdapat sub-cekungan sehingga penting untuk diselidiki lebih lanjut mengenai model bawah permukaan. Dalam kasus ini Formasi Nampol memiliki kapasitas untuk menghasilkan hidrokarbon yang baik sampai sangat baik (Prasetyadi dkk., 2021). Keberadaan Formasi Nampol ini diperkirakan berada pada anomali rendah dan berdasarkan peta lembar geologi berada dominan di Kecamatan Pagelaran menerus ke bagian Barat dengan demikian sub-cekungan atau keberadaan batuan sedimen yang tebal di bagian Barat Laut seperti Sub-Cekungan A, Sub-Cekungan B dan Sub-cekungan C pada data gravitasi lapangan dengan keberadaan Formasi Nampol dominan menjadi subjek utama penelitian. Untuk mengevaluasi hasil dan membandingkannya, pemodelan geologi bawah permukaan dilakukan dengan memperhitungkan dimensi, jenis batuan, dan parameter fisik (densitas), bentuk, dan ukuran batuan. Hasil pemodelan akan menunjukkan kedalaman batuan dasar dan komposisi batuan sedimen di atasnya. Oleh karena itu, pemodelan 2D dan analisis struktur 3D dilakukan berdasarkan data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan serta melihat korelasi dan perbandingannya.



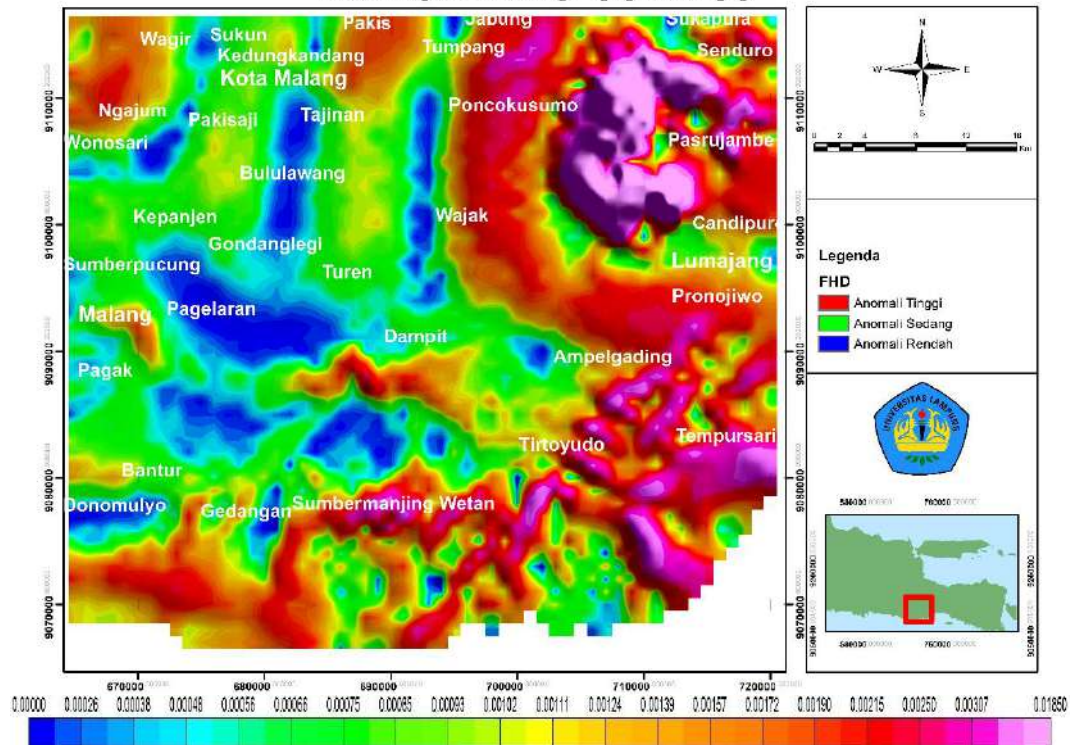
5.6 Analisis Derivatif (FHD dan SVD)

Analisis derivatif dilakukan setelah anomali residual ditemukan. Dalam studi geofisika, analisis derivatif digunakan untuk menentukan batas dan jenis patahan. Untuk mencapai tujuan ini, derivatif horizontal pertama (*First Horizontal Derivative*, atau FHD) dan derivatif vertikal kedua (*Second Vertical Derivative*, atau SVD) dilakukan dari peta anomali residual.

Pada dasarnya, karena filter derivatif ini bersifat *high-pass*, mereka memungkinkan anomali frekuensi tinggi untuk lolos. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan analisis spektrum atau pemisahan anomali regional dan residual sebanyak mungkin untuk memastikan bahwa hasilnya tidak akan menambah *noise*.

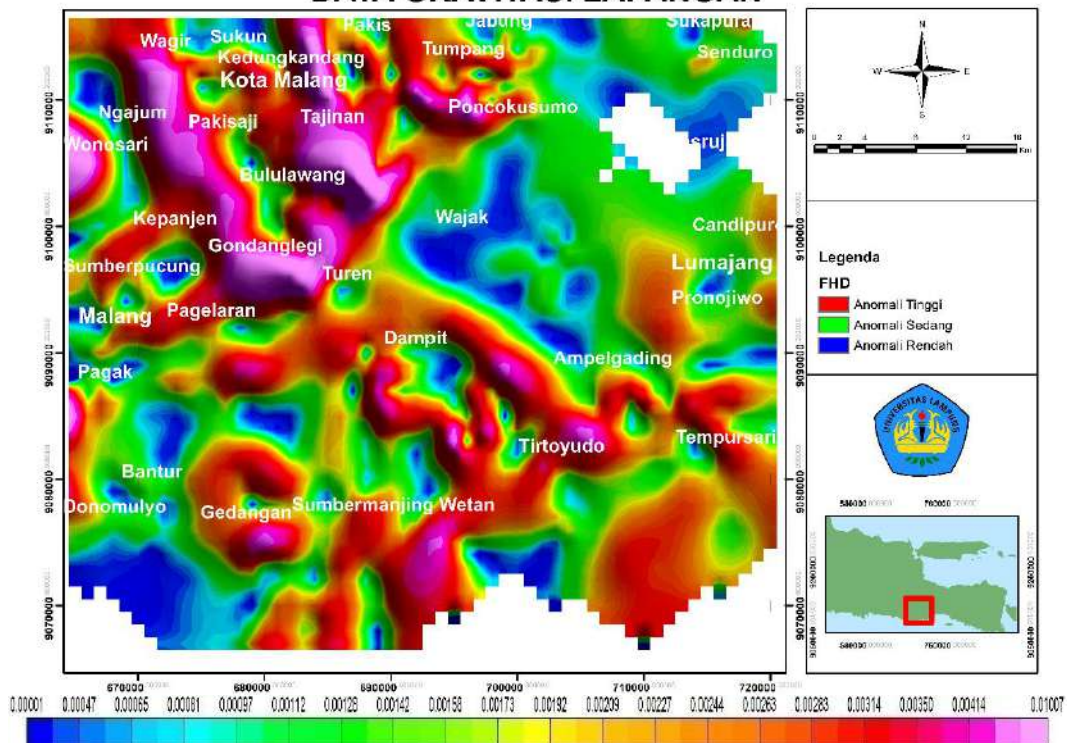
Pada tahap pertama, setiap hasil anomali residual antara data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan dilakukan penurunan horizontal pertama, juga dikenal sebagai penurunan horizontal pertama, menggunakan *Software Oasis*. Pada hasil peta FHD data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan menunjukkan keberadaan nilai maksimum dan minimum berorientasi arah Tenggara ke Barat Laut dan Barat Daya ke Timur Laut sehingga sesuai dengan keberadaan patahan ataupun sesar dengan pola Meratus, yang dominan berada di bagian Selatan berdasarkan geologi area di bagian Selatan ini terdapat formasi-formasi yang paling tua ataupun batuan terobosan yang mencapai permukaan sehingga area ini penting dilakukan analisis untuk melihat tinggi basement yang dominan mencapai permukaan dan bisa diasumsikan daerah terdapat keberadaan *heat source* yang berperan memanaskan hidrokarbon sehingga menjadi suatu fluida baik gas maupun minyak, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 37** dan **Gambar 38**.

PETA FHD ANOMALI RESIDUAL DATA GRAVITASI GGMPPLUS



Gambar 37. Peta FHD anomali residual data gravitasi GGMPPlus

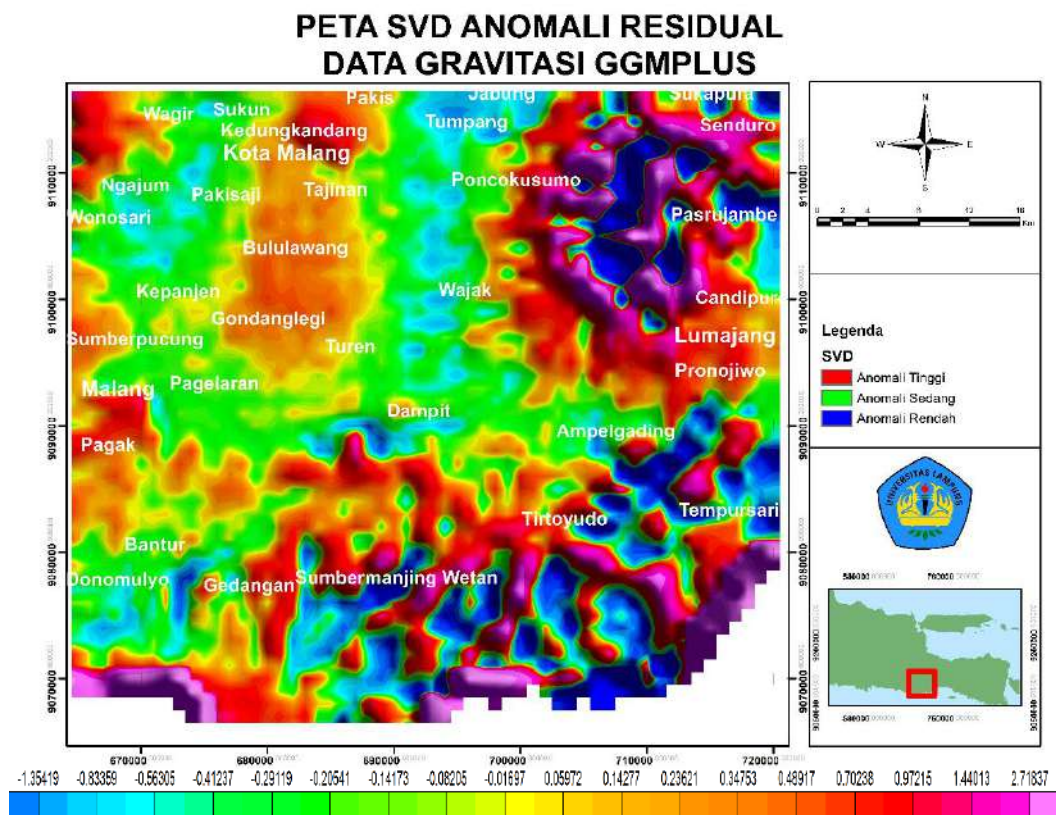
PETA FHD ANOMALI RESIDUAL DATA GRAVITASI LAPANGAN



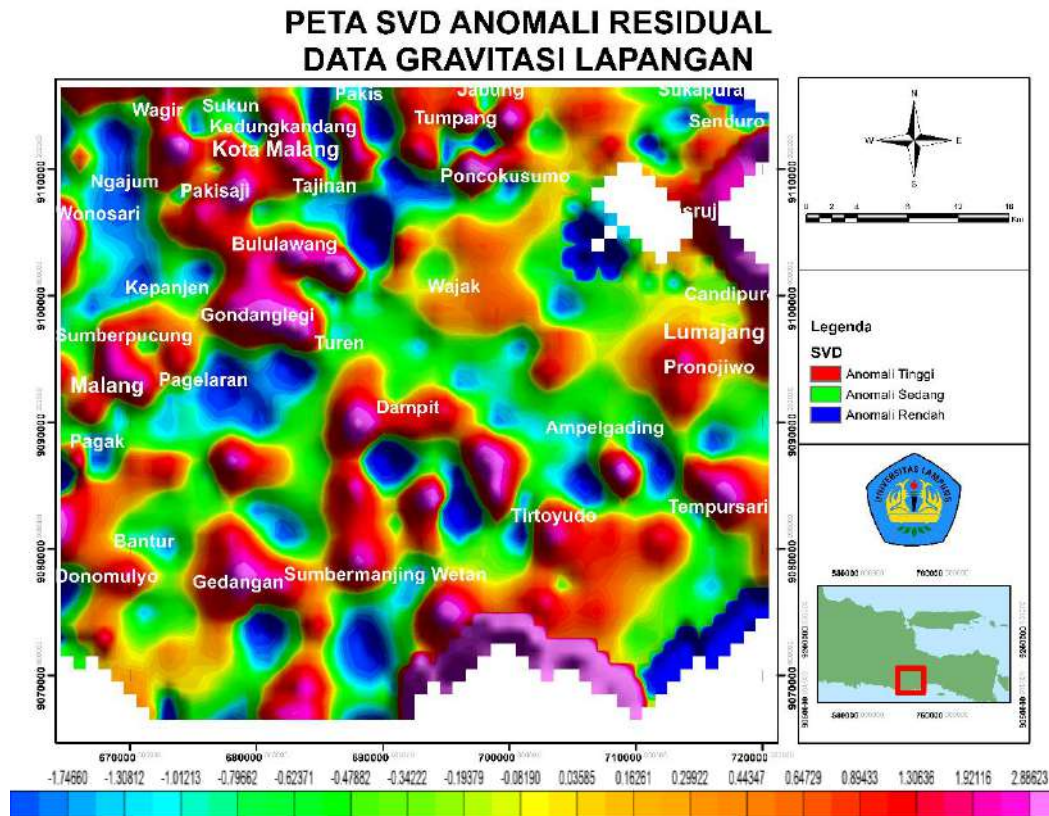
Gambar 38. Peta FHD anomali residual data gravitasi lapangan

Berdasarkan prinsipnya anomali FHD adalah anomali gayabarat yang ditandai dengan perubahan nilai yang tajam, menampilkan puncak maksimum dan lembah minimum. Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai yang tinggi pada peta FHD memperlihatkan punggung dari suatu anomali atau batas dari suatu anomali yang berada di bawah permukaan yang tergambar pada peta FHD.

Dari peta FHD diatas menunjukan bahwa anomali tinggi dan rendah cenderung memiliki arah Tenggara ke Barat Laut dan Barat Daya ke Timur Laut arah tersebut dapat disimpulkan menjadi arah dari sesar yang keduanya saling memperlihatkan kesamaan. Untuk memperkuat keberadaan sesar pada daerah penelitian dilakukan SVD. Anomali *second vertical derivative* (SVD) dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis patahan seperti patahan turun, patahan naik, atau patahan mendatar. Jenis sesar dapat diketahui dari puncak kurva SVD, dengan membandingkan harga mutlak SVD maksimum dan minimum (**Gambar 39**) dan (**Gambar 40**).



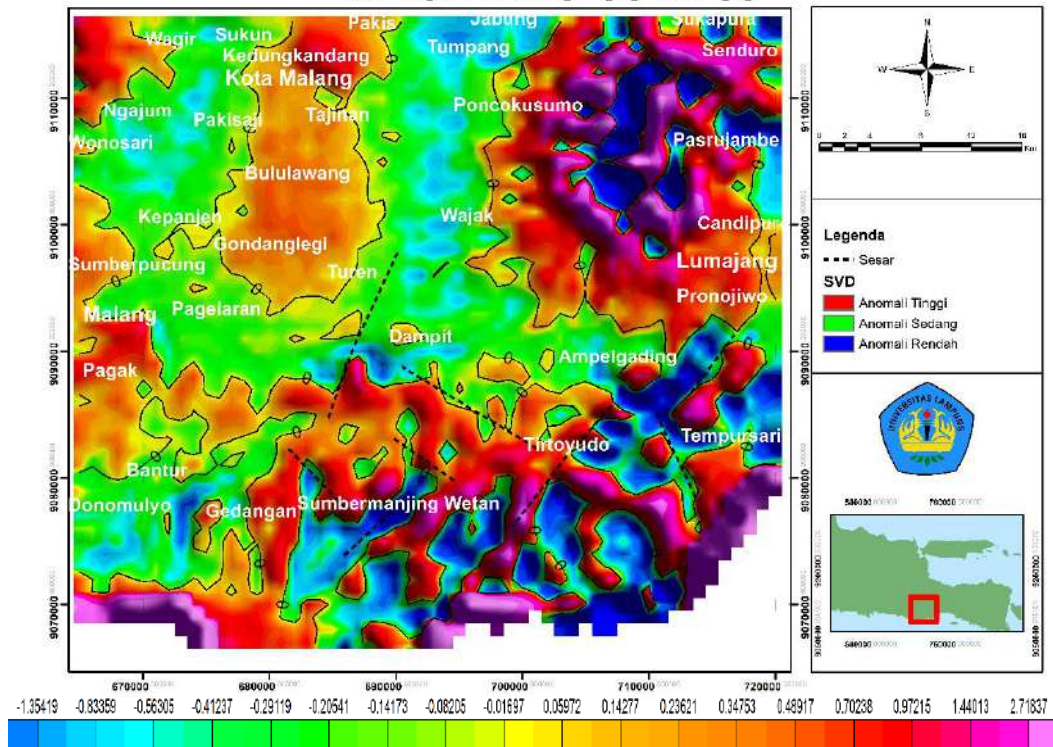
Gambar 39. Peta SVD anomali residual data gravitasi GGMPlus



Gambar 40. Peta SVD anomali residual data gravitasi lapangan

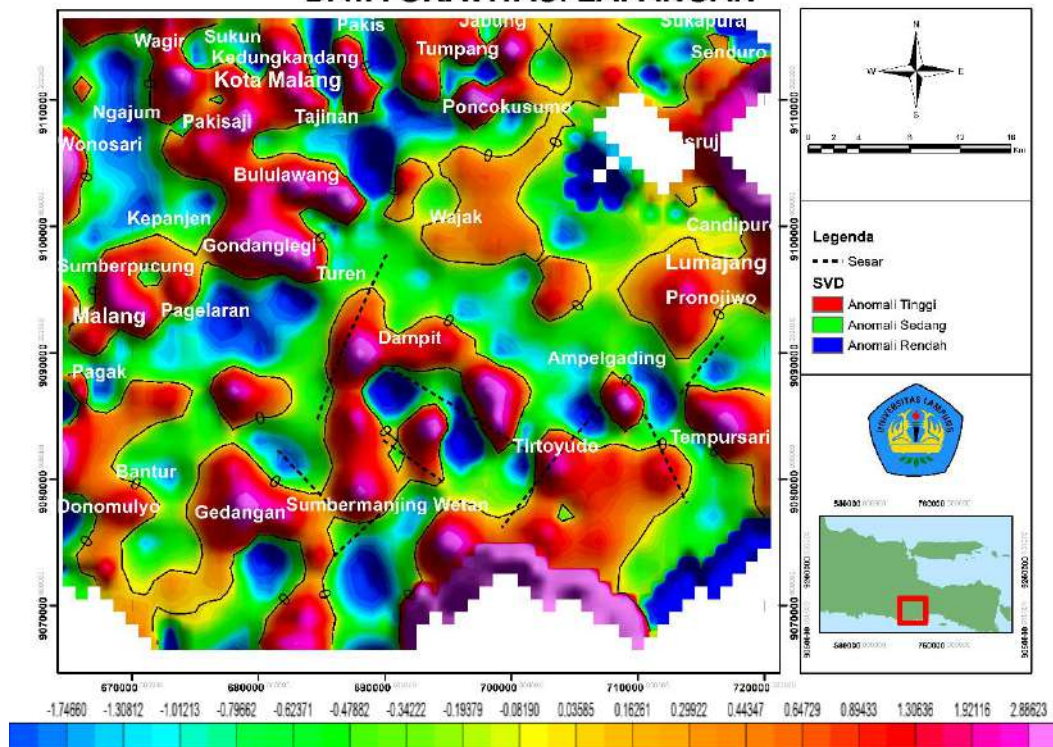
Peta SVD dihasilkan melalui proses filter anomali menggunakan operator Elkins, dimana matriks Elkins menghasilkan ketepatan letak patahan yang paling mendekati geologi struktur berdasarkan peta geologi lembar Turen (Sujanto dkk., 1992). Analisis prediksi adanya suatu patahan pada grafik FHD ditentukan dari nilai puncak maksimum dan minimum yang dibatasi oleh kurva SVD yang bernilai 0 (**Gambar 41**) dan (**Gambar 42**).

PETA SVD ANOMALI RESIDUAL DATA GRAVITASI GGMPPLUS



Gambar 41. Peta overlay SVD gravitasi GGMPplus pada geologi struktur

PETA SVD ANOMALI RESIDUAL DATA GRAVITASI LAPANGAN



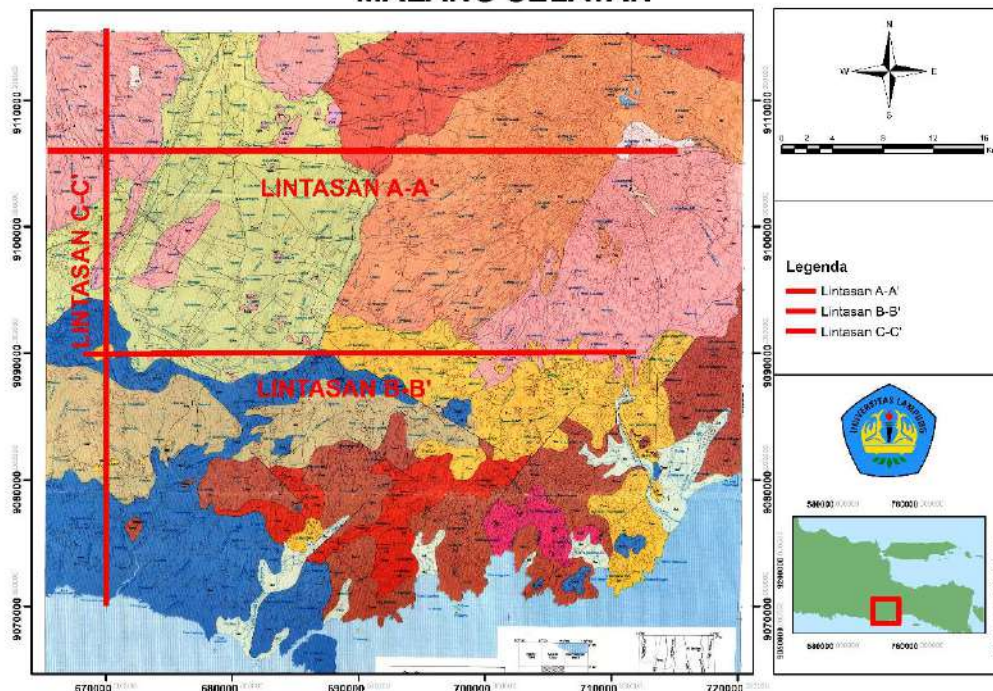
Gambar 42. Peta overlay SVD gravitasi lapangan pada geologi struktur

Berdasarkan hasil *overlay* pada kedua data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan hasil peta *Second Vertical Derivative* (SVD) memperlihatkan kedua data cukup baik dalam memperlihatkan struktur yang terdapat pada peta geologi lembar Turen (Sujanto dkk., 1992) dimana terdapat struktur yang ditunjukkan oleh garis putus-putus sehingga sesar ini masih dugaan sesar namun dikonfirmasi dengan jelas oleh hasil derivative kedua data gravitasi. Dan untuk struktur minor yang berada pada daerah penelitian akan dilanjutkan dengan melakukan analisis derivatif yang dilanjutkan dengan pemodelan 2D.

5.7 Pemodelan 2D

Pemodelan 2D adalah tahap maju pemodelan, di mana keadaan di bawah permukaan bumi dimodelkan dan memberikan tanggapan yang sesuai dengan data gravitasi yang ada pada GGMPlus dan data gravitasi lapangan. Dengan mempertimbangkan batuan penyusun dan geologi di daerah penelitian, model yang dibuat dianggap mewakili kondisi bawah permukaan di daerah penelitian. *Software Oasis* digunakan untuk membuat pemodelan pada menu *gm-sys* dalam penelitian ini. Tiga acuan digunakan untuk membuat pemodelan 2D diantaranya; titik observasi, grafik yang dihitung, dan grafik kesalahan. Pemodelan 2D ini menggunakan data anomali residual karena anomali dangkal yang dimodelkan menggunakan analisis derivatif untuk mempertimbangkan keberadaan struktur bawah permukaan, sehingga nilai *error* yang lebih kecil menunjukkan bahwa hasil pemodelan menunjukkan struktur bawah permukaan dengan baik. Pemodelan dilakukan pada 3 lintasan di wilayah yang menjadi fokus penelitian searah vertikal dan horizontal batas sub-cekungan pada kedua data memperlihatkan nilai anomali rendah yang cukup luas sehingga penelitian akan memperlihatkan keberadaan struktur bawah permukaan, dan Delineasi sub-cekungan serta konfigurasi *basement* wilayah yang potensial sebagai penghasil hidrokarbon pada Formasi Nampol di wilayah Malang Selatan (Prasetyadi dkk, 2021) (**Gambar 43**).

PETA LINTASAN PEMODELAN 2D DAN ANALISIS DERIVATIF MALANG SELATAN



Gambar 43. Peta lintasan pemodelan 2D dan analisis derivatif

Pemodelan 2D pada tiap lintasan dilakukan berdasarkan formasi dominan pada geologi regional daerah lintasan yang terdiri atas 6 lapisan formasi batuan. Lapisan pertama diisi oleh endapan vulkanik kuarter yang terdiri dari Formasi Aluvium (Qal) tersusun atas kerakal, kerikil, pasir dan lumpur, terdapat juga Endapan Gunungapi lainnya yang tersebar cukup dominan berumur kuarter atau paling muda diantara formasi lainnya sehingga nilai densitas rata-rata yaitu 2,0 gr/cc. Lapisan kedua akan diisi oleh Formasi Wonosari (Tmwl) yang berumur Miosen Akhir dan tergolong kepada batuan sedimen dimana formasi ini terdiri dari batugamping, napal pasir dan sisipan batulempung sehingga nilai densitas rata-rata yaitu 2,3 gr/cc. Lapisan ketiga diisi oleh Formasi Nampol (Tmn) yang berumur Miosen Tengah dan tergolong batuan sedimen yang terdiri dari batupasir tufan atau gampingan, batulempung hitam, napal pasir dan batupasir gampingan sehingga nilai densitas rata-rata yaitu 2,4 gr/cc. Lapisan keempat akan diisi oleh Anggota Tuf Formasi Mandalika (Tomt) yang terdiri dari tuf andesit-riolit-dasit, breksi tuf berbatuapung, berdasarkan geologi regional formasi

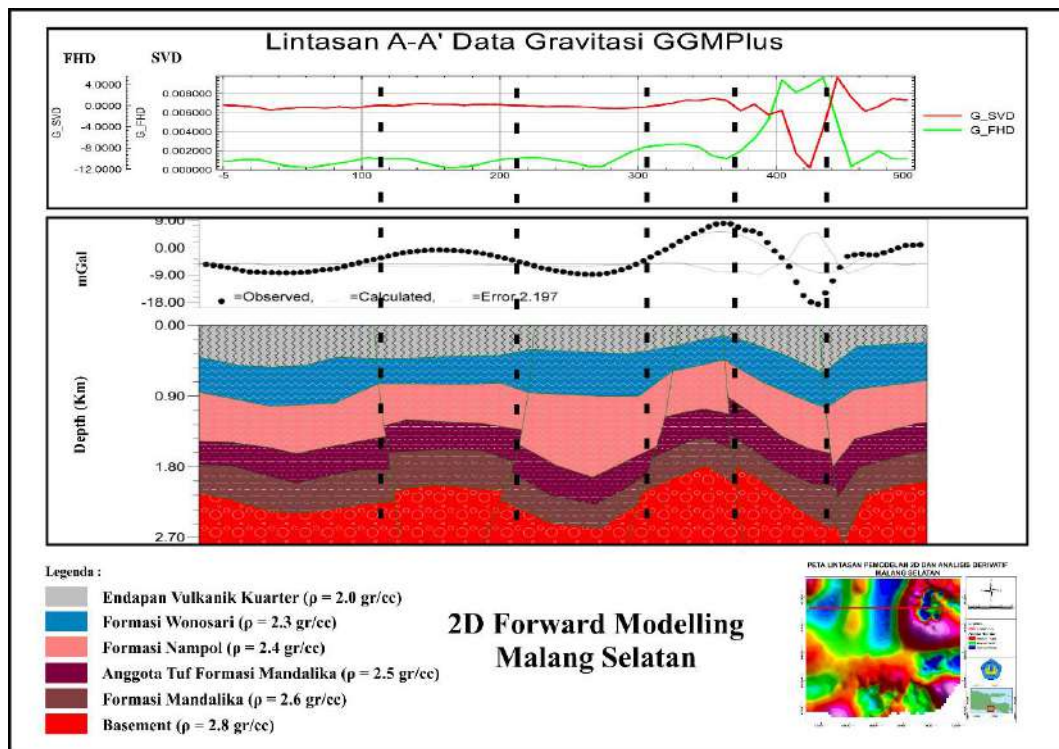
ini bersisipan dengan Formasi Mandalika sehingga nilai densitas rata-rata yaitu 2,5 gr/cc sedangkan pada Formasi Mandalika yang berada pada lapisan kelima terdiri dari batuan beku seperti lava andesit, basal, trakit, dasit dan breksi andesit dengan nilai densitas rata-rata yaitu 2,6 gr/cc dan untuk lapisan terakhir atau keenam adalah lapisan *basement* pembentuk yang memiliki nilai densitas rata-rata yaitu 2,8 gr/cc.

5.7.1 Model 2D (*Forward*) Lintasan A-A'

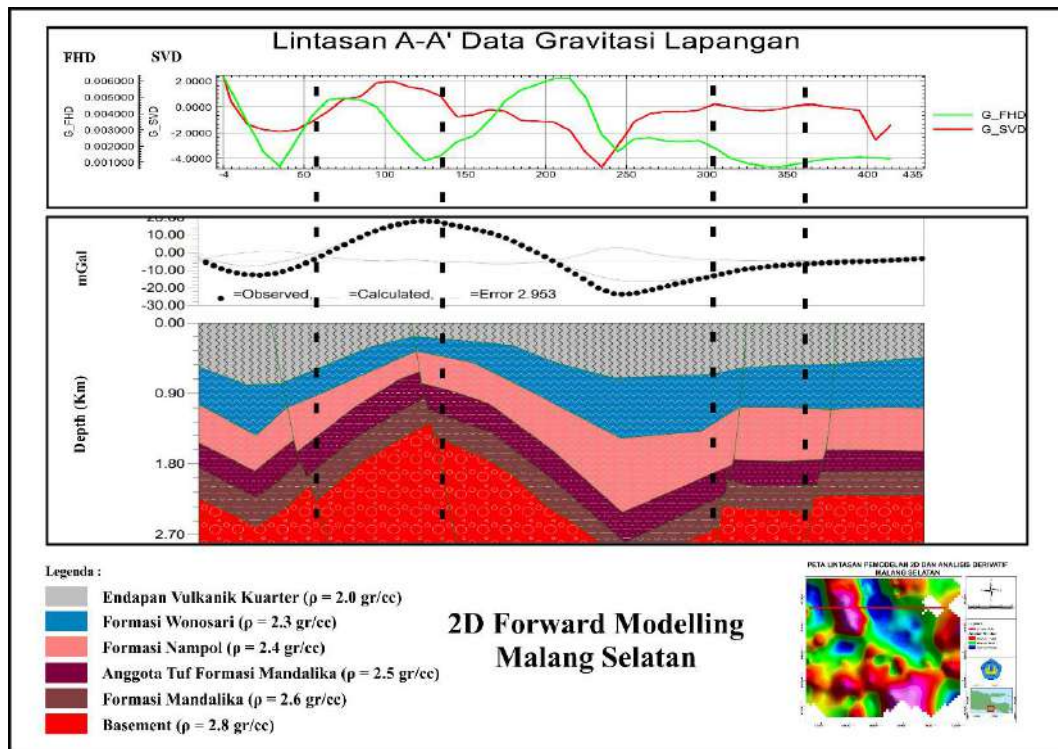
Lintasan A-A' adalah lintasan yang memotong wilayah sub-cekungan A dan sub-cekungan B di wilayah Kecamatan Ngajum ke Pasrujambe dengan panjang lintasan 50 km. Dalam pemodelan 2 dimensi lintasan A-A' pada data gravitasi lapangan memiliki jarak lintasan yang lebih pendek dibandingkan dengan data gravitasi GGMPlus diakibatkan oleh sebaran akuisisi data lapangan yang tidak terakuisisi pada arah Timur Laut atau daerah Kecamatan Pasrujambe sehingga pada lintasan ini diasumsikan data gravitasi GGMPlus akan melengkapi kekurangan data pada gravitasi lapangan di daerah tersebut untuk menggambarkan detail bawah permukaan.

Hasil pemodelan 2D berdasarkan data gravitasi GGMPlus diperoleh rata-rata ketebalan sedimen berkisar 1,8 km yang terdapat dari arah Barat ke Timur Malang Selatan sehingga dapat diasumsikan terdapat pula keberadaan sedimen yang cukup tebal yang didapatkan pada lintasan ini. Ketebalan sedimen atau terdapatnya nilai anomali rendah yang cukup tebal di wilayah ini juga dikonfirmasi oleh hasil pemodelan 2D pada data gravitasi lapangan memperlihatkan sedimen dengan rata-rata ketebalan sedimen yang lebih tebal berkisar 2 km di bagian Barat wilayah Kecamatan Ngajum sampai ke wilayah Poncokusumo persis dengan pemodelan 2D data gravitasi GGMPlus, ketebalan sedimen yang signifikan memiliki lapisan paling tebal berada di sub-cekungan B yang memiliki ketebalan sampai 2,5 km tepatnya di wilayah Kecamatan Tajinan. Sedangkan wilayah yang terdapat kekurangan pengambilan data gravitasi lapangan di wilayah

Pasrujambe data gravitasi GGMPPlus memperlihatkan terdapat anomali rendah tepatnya dikawasan Gunung Semeru puncak Mahameru yang diasumsikan terdapat sedimen yang tebal di wilayah tersebut atau terdapatnya kandungan batu pasir yang dominan pada kawah Gunung Api yang terdapat didaerah tersebut. Berdasarkan pola tinggian *basement* pada kedua data saling terintegrasi dimana tinggian *basement* yang dekat dari permukaan di kedalaman 2 km sampai 2,5 km. Pola *basement* yang paling signifikan berada dekat dengan permukaan pada pemodelan 2D data gravitasi lapangan pada jarak 10 km hingga 15 km yang berada pada kedalaman 1, 8 km tepatnya di wilayah Pakisaji (**Gambar 44**) dan (**Gambar 45**).



Gambar 44. Model 2D (*forward*) lintasan A-A' data gravitasi GGMPPlus



Gambar 45. Model 2D (*forward*) lintasan A-A' data gravitasi lapangan

Berdasarkan pemodelan 2D yang dilakukan di setiap anomali residual data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan memperlihatkan hasil analisis derivatif yang masih berkorelasi antar kedua data. Berdasarkan Peta geologi lembar Turen (Sujanto dkk., 1992) pada lintasan A-A' terdapat endapan vulkanik kuarater yang cukup dominan di wilayah Ngajum sampai Pasrujambe belum teridentifikasi terdapatnya keberadaan patahan pada Peta geologi lembar Turen (Sujanto dkk., 1992) sehingga akan menghasilkan informasi patahan baru di wilayah Malang Selatan. Pada data gravitasi GGMPlus menunjukkan terdapatnya 5 zona patahan pada lintasan A-A' sedangkan pada data gravitasi lapangan menunjukkan terdapatnya 4 zona patahan (**Tabel 11**).

Tabel 11. Hasil Analisis Grafik FHD dan SVD Lintasan A-A'

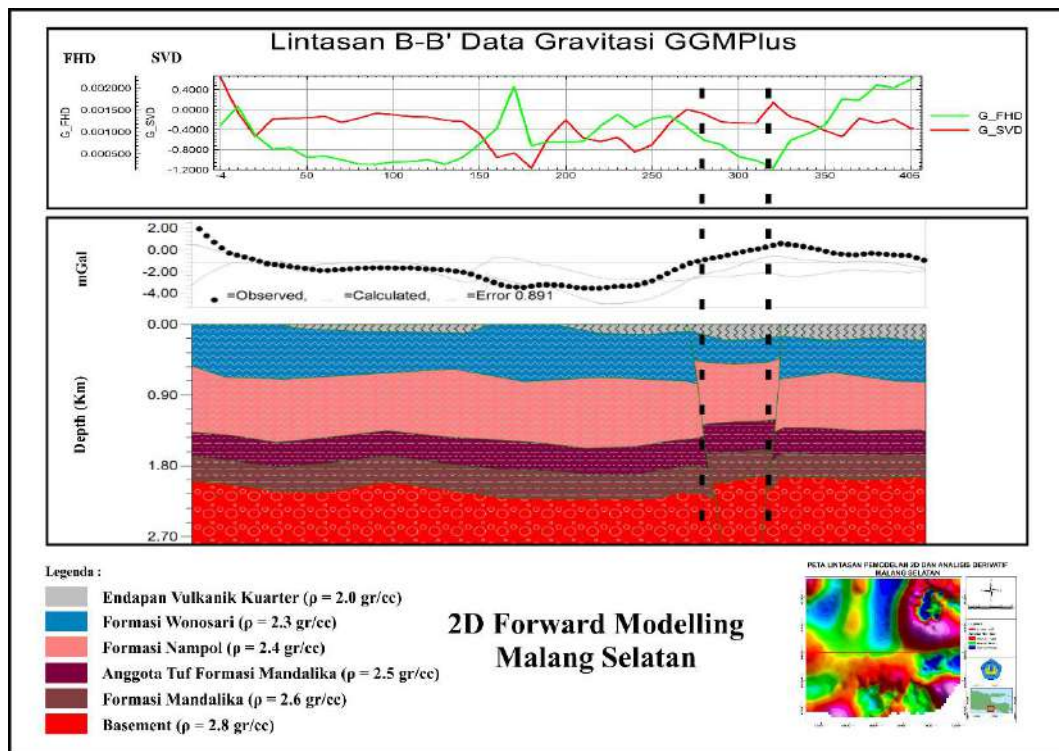
Lintasan A-A' data gravitasi GGMPPlus					
No.	Korelasi Analisis	FHD (mGal/m ²)	SVD mak (mGal/m ²)	SVD min (mGal/m ²)	Jenis Patahan
1	Terkorelasi	0,0011	0,29	-0,01	Turun
2	Terkorelasi	0,0012	0,18	-0,15	Turun
3	Terkorelasi	0,0023	0,94	-0,50	Turun
4	Terkorelasi	0,0011	0,95	-0,89	Turun
5	Tidak terkorelasi	0,00018	4,86	-11,7	Naik
Lintasan A-A' data gravitasi lapangan					
No.	Korelasi Analisis	FHD (mGal/m ²)	SVD mak (mGal/m ²)	SVD min (mGal/m ²)	Jenis Patahan
1	Tidak terkorelasi	0,0049	0,71	-1,74	Naik
2	Terkorelasi	0,0012	0,18	-0,11	Turun
3	Terkorelasi	0,0022	0,18	-0,13	Turun
4	Terkorelasi	0,0007	0,20	-0,07	Turun

5.7.2 Model 2D (*Forward*) Lintasan B-B'

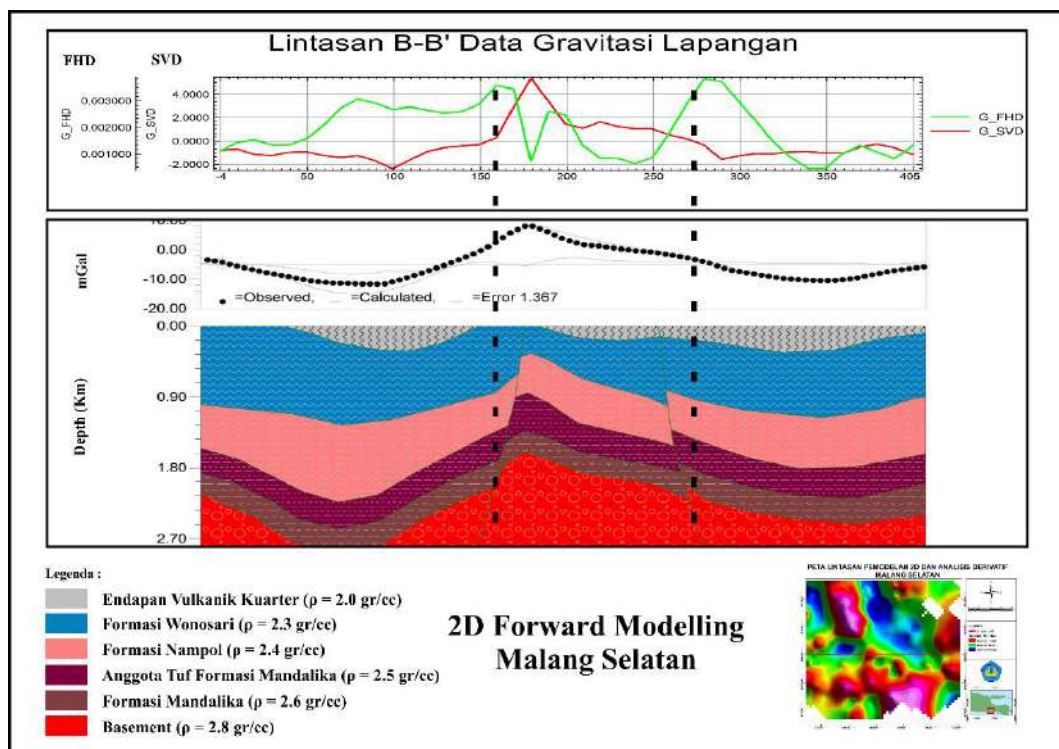
Lintasan B-B' adalah lintasan yang memotong wilayah sub-cekungan C di wilayah Kecamatan Pagelaran ke Pronojiwo dengan panjang lintasan 40 km, dalam pemodelan 2D lintasan B-B' yang menggambarkan bentuk dari bawah permukaan ini menunjukkan respon yang berbeda dengan analisa patahan pada Lintasan B-B' di setiap FHD dan SVD data gravitasi GGMPPlus dan lapangan.

Hasil pemodelan 2D yang dilakukan memperlihatkan sedimen untuk pemodelan 2D pada data gravitasi GGMPPlus memiliki ketebalan 1,6 km ini sesuai dengan hasil yang didapatkan pada hasil analisis spektrum dengan rata-rata ketebalan sedimen 1,8 km di bagian Barat dan Timur hampir tidak terlihat bentuk sub-cekungan sehingga cukup berbeda dengan hasil dari data gravitasi lapangan seperti pada bagian Barat memperlihatkan sedimen yang cukup tebal di jarak hingga 15 km lintasan B-B' dengan ketebalan sedimen mencapai 2,5 km tepatnya di Kecamatan Pagelaran hasil pemodelan 2D dapat diidentifikasi bahwa terdapat sebuah sub-cekungan yang terpisah oleh tinggian. Pola *basement* yang paling signifikan berada dekat dengan permukaan pada pemodelan 2D data gravitasi lapangan pada jarak 15 km

hingga 20 km di lintasan B-B yang berada pada kedalaman 1, 8 km tepatnya di wilayah Dampit.



Gambar 46. Model 2D (*forward*) lintasan B-B' data gravitasi GGMPlus



Gambar 47. Model 2D (*forward*) lintasan B-B' data gravitasi lapangan

Berdasarkan pemodelan 2D yang dilakukan di setiap anomali residual data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan memperlihatkan keberadaan struktur yang cukup berbeda kedua data memperlihatkan terdapat 2 zona patahan. Lintasan B-B' merupakan lintasan pada daerah penelitian dari arah Barat ke Timur tegak lurus dari arah UTM Y = 9089907 meter dengan panjang 40 km. Berdasarkan Peta geologi lembar Turen (Sujanto dkk., 1992) pada lintasan akan memperlihatkan sesar turun pada jarak ± 15 km ke 18 km yang terlihat pada hasil analisis derivatif sehingga dapat disimpulkan hasil analisis derivatif yang memperlihatkan sesar dugaan berdasarkan peta geologi lembar Turen adalah data gravitasi lapangan sedangkan untuk jarak 27,5 km dari lintasan memperlihatkan zona patahan yang tidak teridentifikasi pada Peta geologi lembar Turen (Sujanto dkk., 1992) sedangkan zona patahan dikonfirmasi oleh kedua data baik data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan (**Tabel 12**).

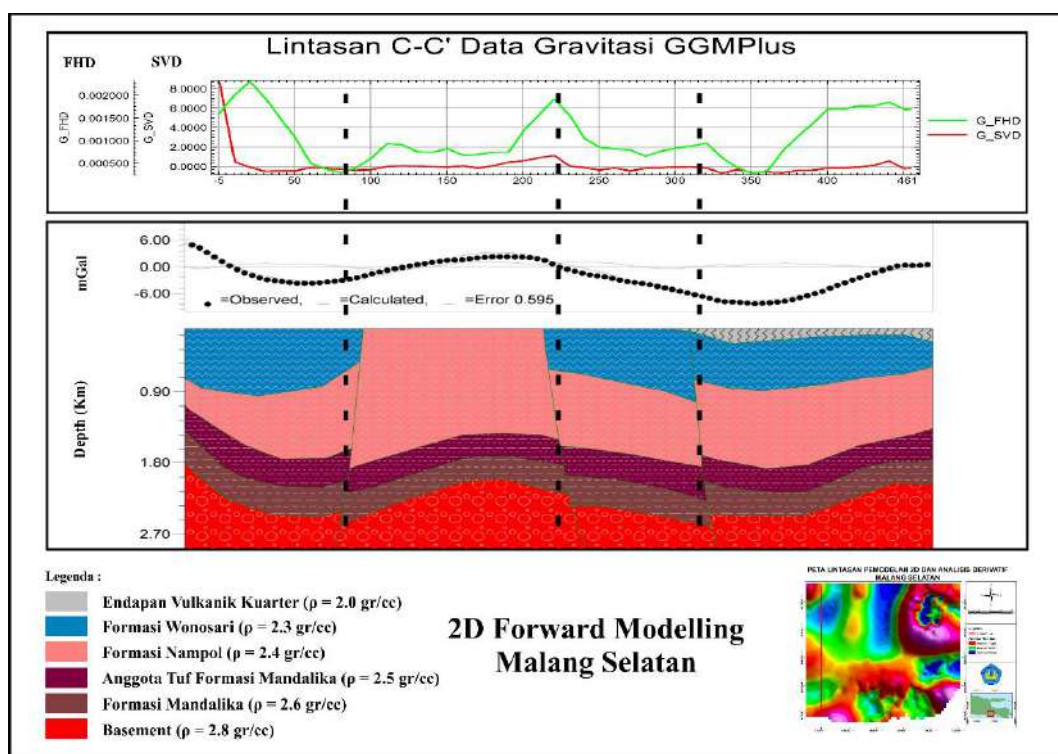
Tabel 12. Hasil Analisis Grafik FHD dan SVD Lintasan B-B'

Lintasan B-B' data gravitasi GGMPlus					
No.	Korelasi Analisis	FHD (mGal/m ²)	SVD mak (mGal/m ²)	SVD min (mGal/m ²)	Jenis Patahan
1	Terkorelasi	0,00076	0,0025	-0,25	Naik
2	Tidak terkorelasi	0,00018	0,13	-0,27	Naik
Lintasan B-B' data gravitasi lapangan					
No.	Korelasi Analisis	FHD (mGal/m ²)	SVD mak (mGal/m ²)	SVD min (mGal/m ²)	Jenis Patahan
1	Tidak terkorelasi	0,0035	5,12	-2,3	Turun
2	Terkorelasi	0,0036	0,97	-1,57	Naik

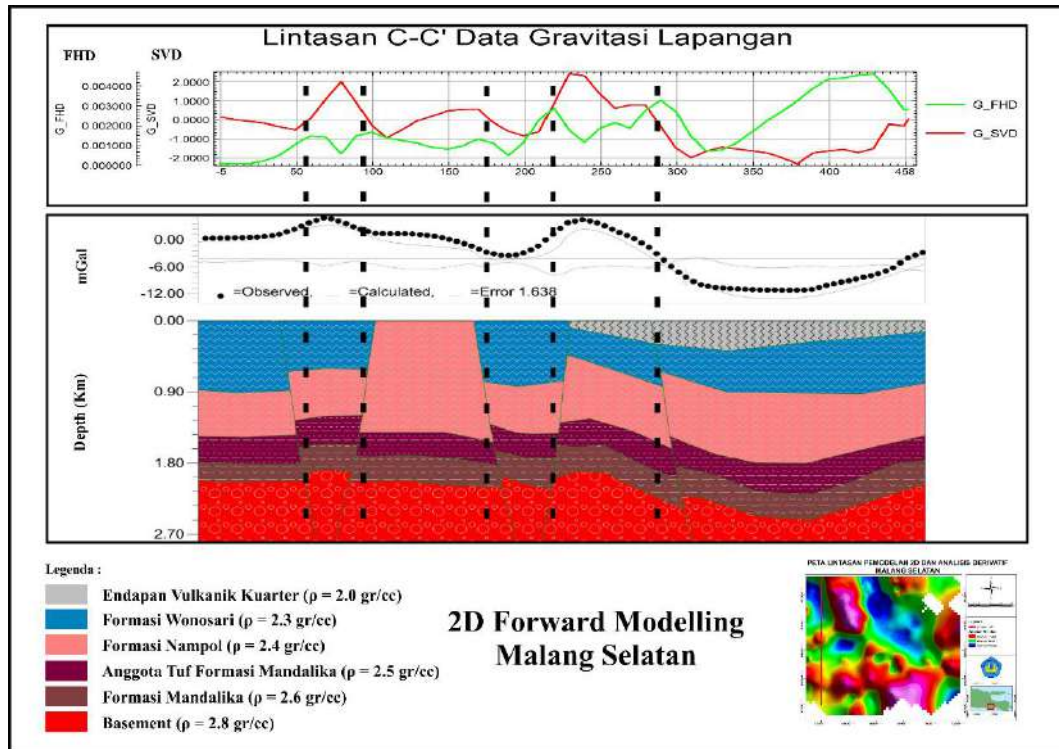
5.7.3 Model 2D (*Forward*) Lintasan C-C'

Lintasan C-C' adalah lintasan yang memotong wilayah sub-cekungan A di wilayah Kecamatan Ngajum ke Donomulyo dengan panjang lintasan 45 km, dalam pemodelan 2D lintasan C-C' yang menggambarkan bentuk dari bawah permukaan ini menunjukkan respon yang berbeda dengan analisa patahan pada Lintasan C-C' di setiap FHD dan SVD data gravitasi GGMPlus dan lapangan.

Hasil Pemodelan 2D berdasarkan data gravitasi GGMPlus dengan rata-rata ketebalan sedimen dengan rata-rata ketebalan sedimen 1,8 km di bagian Barat Laut terdapat sebuah sub cekungan yang terpisah oleh tinggian sedangkan di bagian Selatan terdapat pula keberadaan sedimen yang cukup tebal dengan ketebalan 1,6 km sedangkan untuk pemodelan 2D pada data gravitasi lapangan memperlihatkan sedimen yang lebih tebal dengan ketebalan 2 km dominan di bagian Barat Laut di Kecamatan Ngajum dan diperkuat oleh hasil pada lintasan A yang berasosiasi dengan model bawah permukaan sub-cekungan A yang terdapat sebuah cub-cekungan dengan Formasi Nampol yang dominan atau memiliki sedimen cukup tebal sehingga berpotensi terdapat keberadaan hidrokarbon. Pemodelan 2D memperlihatkan ambang batas antara *basement* dan sub-cekungan dengan baik pada data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan pada kedalaman ± 2 km sampai 2,5 km (**Gambar 48**) dan (**Gambar 49**).



Gambar 48. Model 2D (*forward*) lintasan C-C' data gravitasi GGMPlus



Gambar 49. Model 2D (*forward*) lintasan C-C' data gravitasi lapangan

Berdasarkan pemodelan 2D yang dilakukan di setiap anomali residual data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan memperlihatkan keberadaan struktur yang cukup berbeda, data yang diolah berdasarkan data gravitasi GGMPlus memperlihatkan 3 zona patahan sedangkan untuk pengolahan data gravitasi lapangan memperlihatkan 5 zona patahan. Lintasan B-B' merupakan lintasan pada daerah penelitian dari arah Utara ke Selatan tegak lurus dari arah UTM X = 669907 meter dengan panjang 40 km. Berdasarkan peta lembar geologi Turen bahwa pada lintasan tidak teridentifikasi suatu zona patahan sehingga ini akan memberikan informasi baru dengan terdapat 3 zona patahan yang teridentifikasi oleh kedua data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan dengan zona patahan pertama dan kedua memiliki jenis patahan yang sama sedangkan pada zona patahan ketiga memiliki perbedaan pada arah dan jenis sesar yang teridentifikasi melalui analisis derivatif grafik FHD dan SVD seperti yang terlihat pada (Tabel 13).

Tabel 13. Hasil Analisis Grafik FHD dan SVD Lintasan C-C'

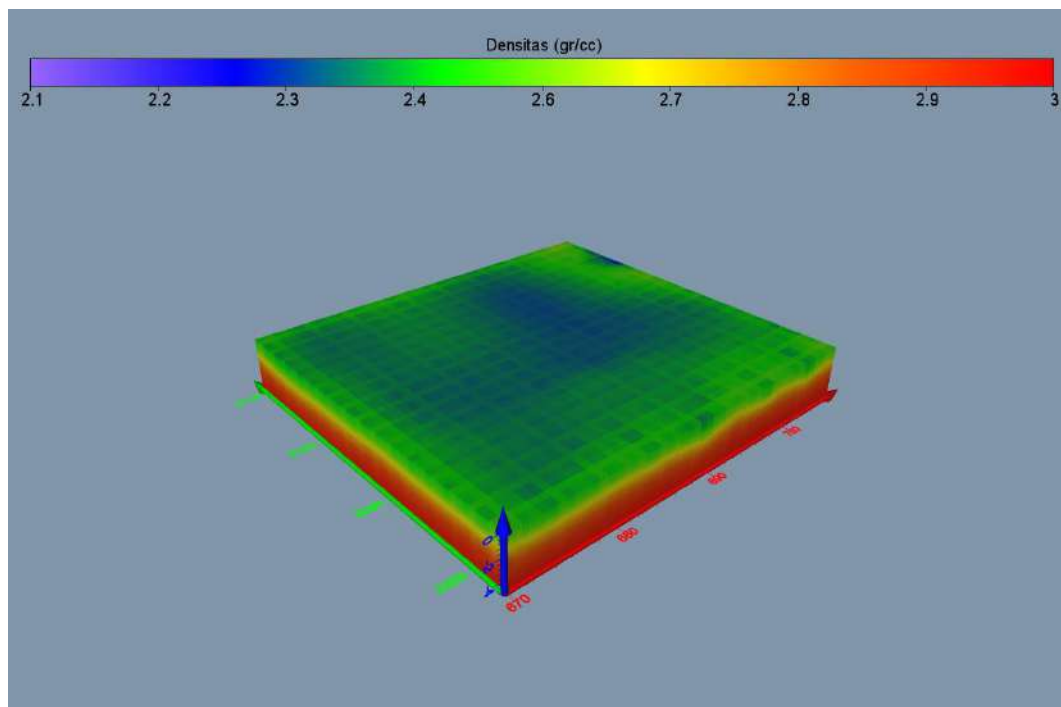
Lintasan C-C' data gravitasi GGMPlus					
No.	Korelasi Analisis	FHD (mGal/m ²)	SVD mak (mGal/m ²)	SVD min (mGal/m ²)	Jenis Patahan
1	Terkorelasi	0,017	0,065	-0,34	Naik
2	Terkorelasi	0,0007	1,26	-0,14	Turun
3	Terkorelasi	0,0009	0,040	-0,37	Naik
Lintasan C-C' data gravitasi lapangan					
No.	Korelasi Analisis	FHD (mGal/m ²)	SVD mak (mGal/m ²)	SVD min (mGal/m ²)	Jenis Patahan
1	Terkorelasi	0,0032	0,79	-1,90	Naik
2	Terkorelasi	0,0028	2,37	-0,69	Turun
3	Tidak terkorelasi	0,0009	0,78	-0,89	Naik
4	Terkorelasi	0,0016	1,95	-0,89	Turun
5	Tidak terkorelasi	0,0013	1,95	-0,46	Turun

5.8 Pemodelan 3D

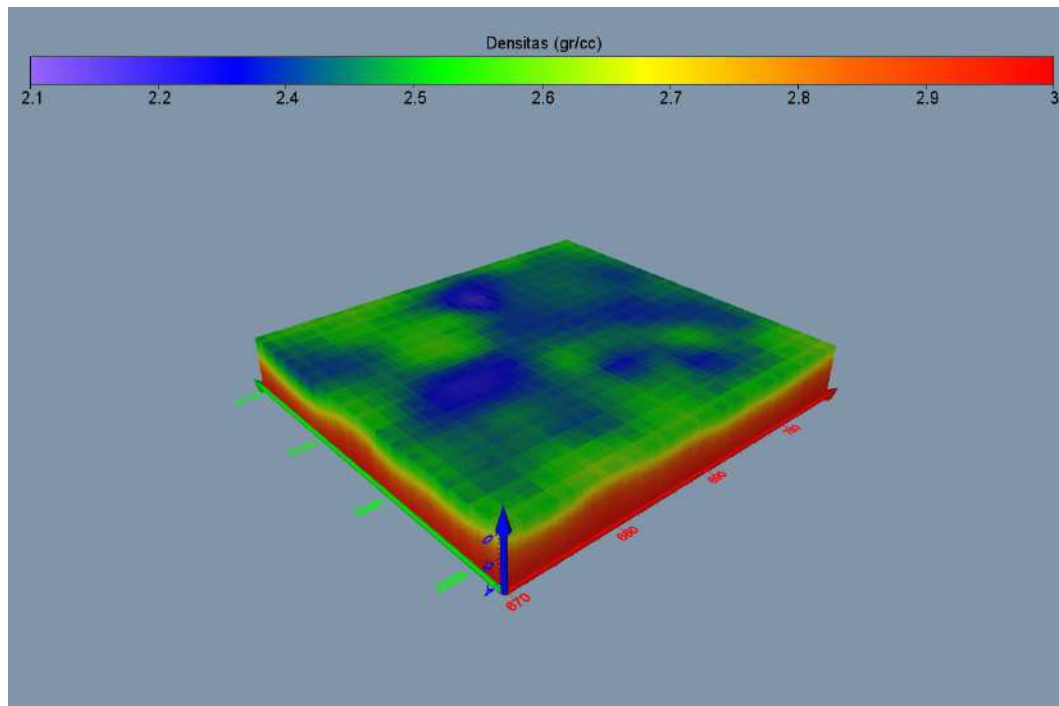
Pemodelan struktur bawah permukaan dilakukan untuk memahami kondisi geologi bawah permukaan di area penelitian. Dalam studi ini, digunakan tiga lintasan, yaitu 1 lintasan Barat-Timur dan 2 lintasan Utara-Selatan. Pemodelan 3D dilakukan menggunakan metode *inverse*, di mana parameter model diperoleh langsung dari data pengamatan (Grandis, 2009). Metode *inverse* juga dikenal sebagai pencocokan data (*fitting*) karena prosesnya bertujuan untuk menemukan parameter model yang menghasilkan respons sesuai dengan data pengamatan. Tujuan utama adalah agar respons model dan data pengamatan memiliki kesesuaian yang tinggi, menghasilkan model yang optimal (Supriyanto, 2007). Dalam pembuatan model 3D ini, penulis menggunakan perangkat lunak *Grablog* 1.6 dan *Bloxer* 1.6.

Kedalaman diestimasi dari analisis spektrum, dan interpretasi struktur bawah permukaan dilakukan dengan mengorelasikan hasil anomali dengan peta geologi regional daerah penelitian. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan model struktur bawah permukaan yang akurat sesuai dengan kondisi lapangan.

Pemodelan 3D pada penelitian kali ini akan melihat hasil bawah permukaan berdasarkan hasil *inverse modelling* berdasarkan anomali lokal dengan sekaligus melakukan deskriptif perbandingan hasil pemodelan 3D (*inverse*) antara data gravitasi anomali lokal GGMPPlus dan data gravitasi lokal lapangan dan membandingkan hasil pemodelan 2D (*forward*) yang telah dilakukan terhadap hasil pemodelan 3D (*inverse*). Berdasarkan sebaran densitas dari rentang 2,1 gr/cc - 3,0 gr/cc. Rentang ini digunakan untuk menginterpretasi sebaran densitas bawah permukaan melihat batas antara sub-cekungan dan konfigurasi *basement* pada Malang Selatan (**Gambar 50**) dan (**Gambar 51**).

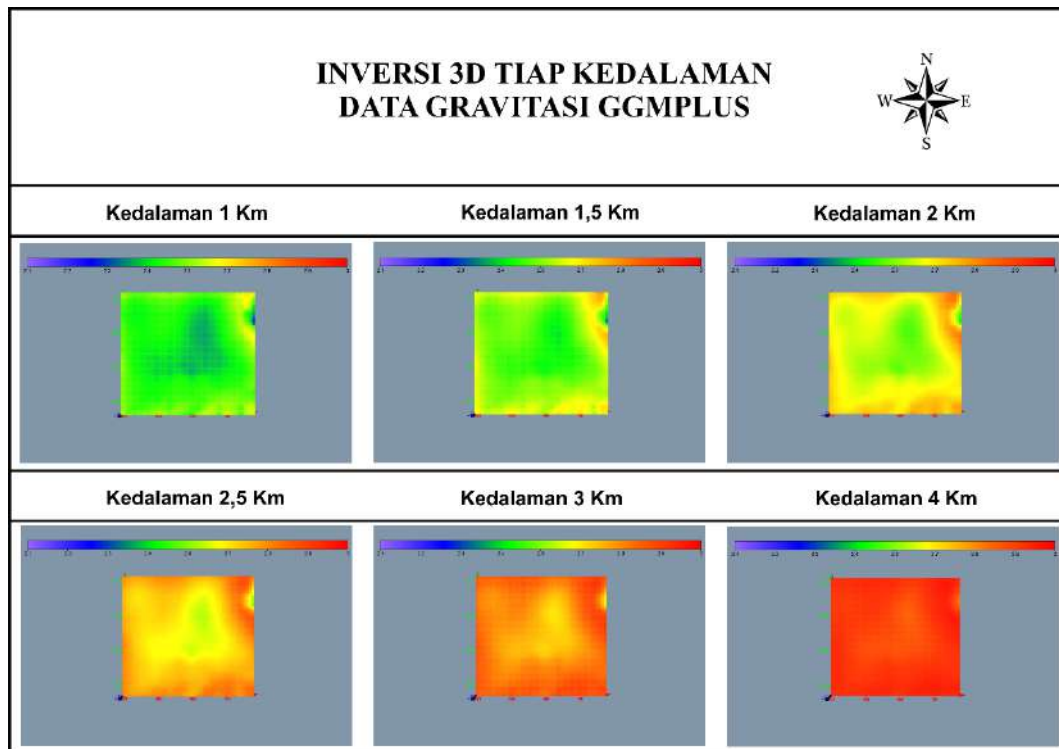


Gambar 50. Model 3D (*inverse*) Malang Selatan (data gravitasi GGMPPlus)

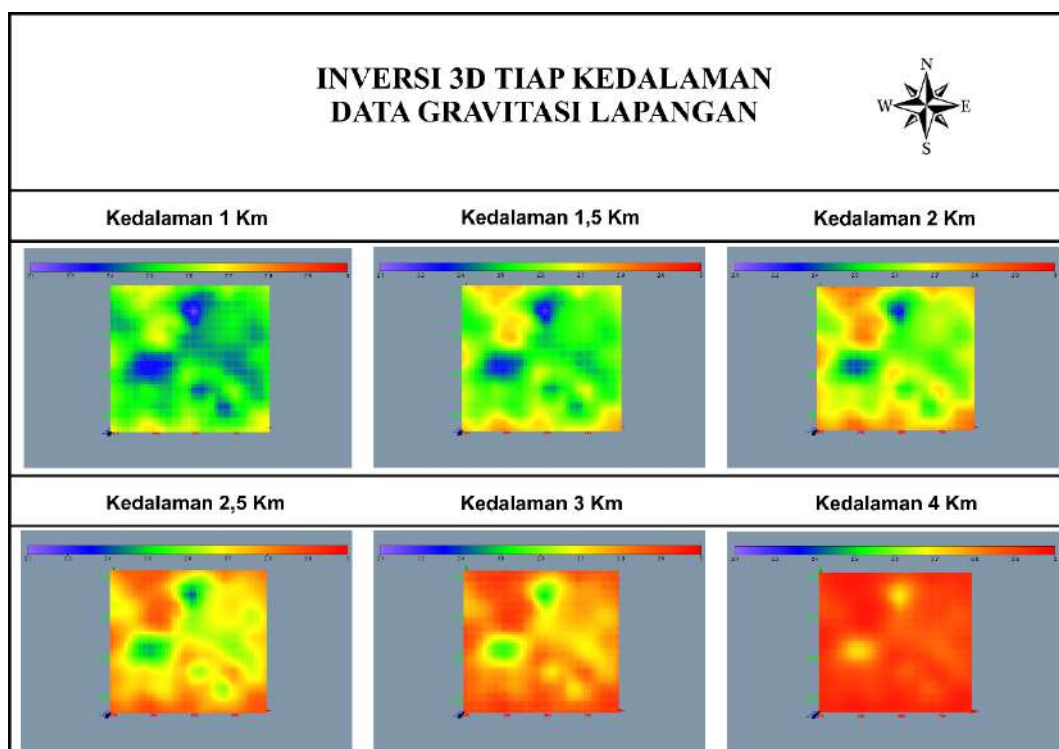


Gambar 51. Model 3D (*inverse*) Malang Selatan (data gravitasi lapangan)

Hasil *inverse* pada data gravitasi lapangan yang diperoleh memiliki data RMS sebesar 0,060 dan model RMS sebesar 0,010 serta *Lagrange* sebesar 1, sedangkan hasil *inverse* pada data gravitasi lapangan yang diperoleh memiliki data RMS sebesar 0,072 dan model RMS sebesar 0,009 serta *Lagrange* sebesar 1. Setelah didapatkan model 3D (*inverse*) yang sudah cukup optimal maka selanjutnya dilakukan analisis berdasarkan sebaran densitas tiap kedalaman (**Gambar 52**) dan (**Gambar 53**) dan berdasarkan lintasan A-A', lintasan B-B' dan lintasan C-C' (**Gambar 54**) dan (**Gambar 55**) untuk melakukan analisis deskriptif hasil model yang didapatkan oleh pemodelan 3D (*inverse*) anomali residual berdasarkan data gravitasi GGMPPlus dan data gravitasi lapangan dan pencocokan terhadap pemodelan 2D (*forward*) kemudian dilakukan interpretasi informasi terkait bawah permukaan seperti batas sub-cekungan dan konfigurasi *basement* di Malang Selatan.



Gambar 52. Model 3D (*inverse*) data gravitasi GGMPlus di setiap kedalaman

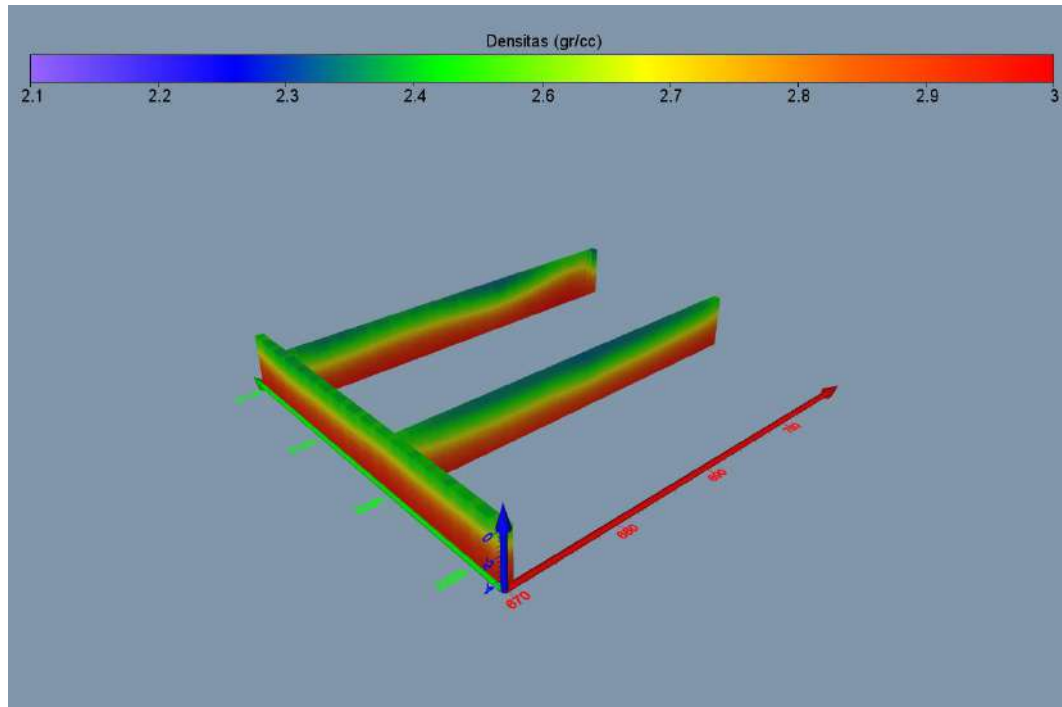


Gambar 53. Model 3D (*inverse*) data gravitasi lapangan di setiap kedalaman

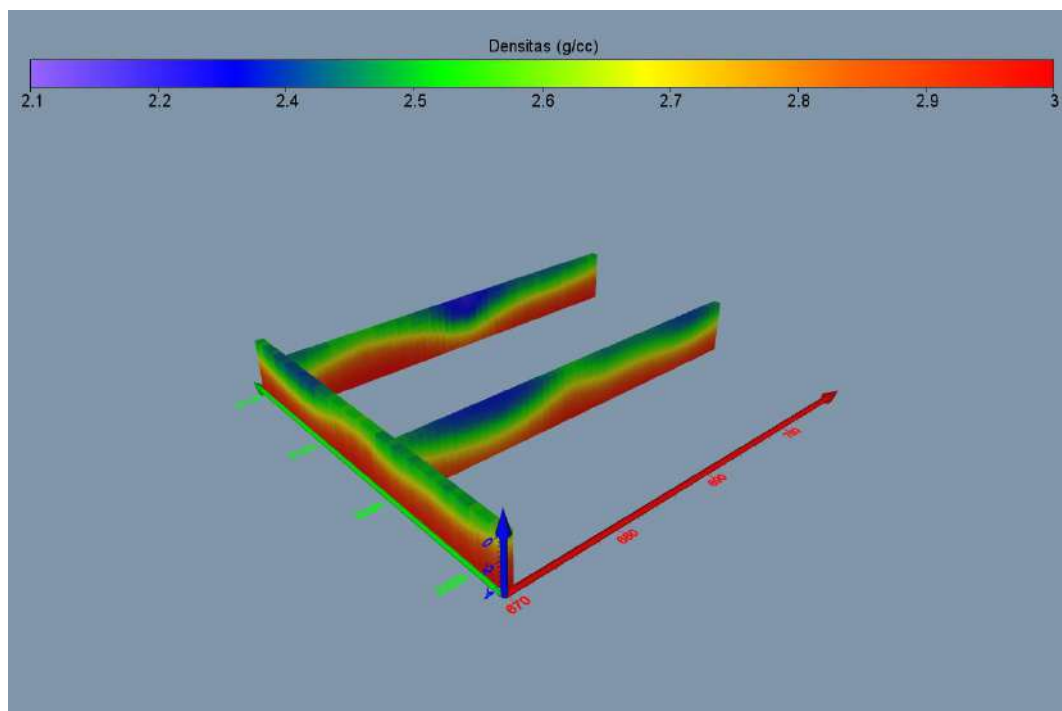
Pada hasil pemodelan 3D (*inverse*) di setiap kedalaman pada data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan secara umum memiliki perbedaan model yang dihasilkan, data gravitasi GGMPlus menggambarkan anomali lokal yang tidak terlalu detail atau masih bersifat regional dengan pola anomali yang cenderung memiliki kontras densitas yang mirip namun dapat dikorelasikan sebaran data berdensitas rendah atau batuan sedimen berada di wilayah yang mirip seperti pada Sub-Cekungan A, Sub-Cekungan B dan Sub-Cekungan C.

Densitas rendah diinterpretasikan berada di rentang 2,3 gr/cc sampai 2,49 gr/cc yang merupakan batuan sedimen diantaranya terdiri dari Formasi Wonosari dan Formasi Nampol terlihat berada pada kedalaman rata-rata 2 km. Hasil pemodelan 3D (*inverse*) data gravitasi lapangan cenderung memperlihatkan keberadaan lapisan sedimen yang cukup tebal dibandingkan dengan data gravitasi GGMPlus.

Keberadaan sedimen yang cukup tebal diperlihatkan pada Sub-Cekungan C dan Sub-Cekungan B data gravitasi lapangan dengan kedalaman deposenter mencapai 2,5 km tepatnya di wilayah Kecamatan Ngajum, Kecamatan Pagelaran dan Kecamatan Tajinan. Lapisan *basement* pada hasil pemodelan 3D (*inverse*) berada di rentang 2,8 gr/cc sampai 3,0 gr/cc, hasil pemodelan 3D (*inverse*) data gravitasi GGMPlus memperlihatkan pola tinggian *basement* berada di kedalaman rata-rata 2,5 km sedangkan data gravitasi lapangan memperlihatkan pola tinggian *basement* yang cenderung lebih dalam dengan kedalaman rata-rata 3 km, dengan pola tinggian *basement* yang cenderung dekat dengan permukaan berada di wilayah Kecamatan Pakisaji dan dominan di arah Selatan dan Timur yang mungkin masih berasosiasi dengan keberadaan gunung api yang dominan atau hasil kerak samudra dan kerak benua pada berbagai wilayah Pegunungan Jawa Selatan.



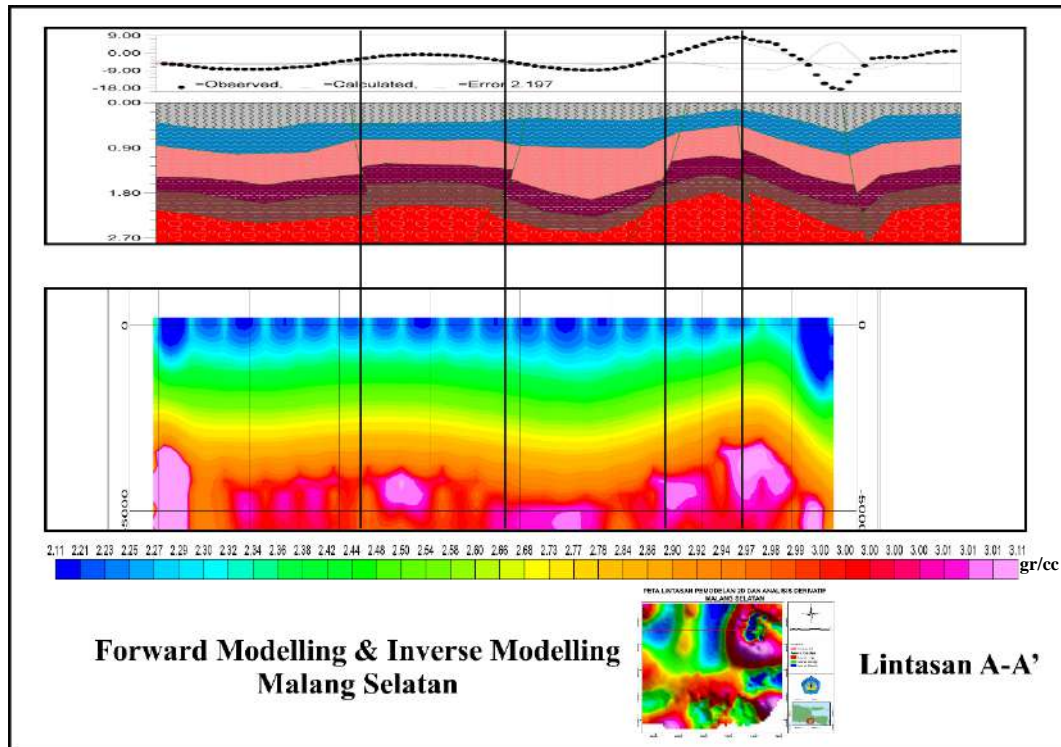
Gambar 54. Penampang 3D data gravitasi GGMPlus berdasarkan lintasan



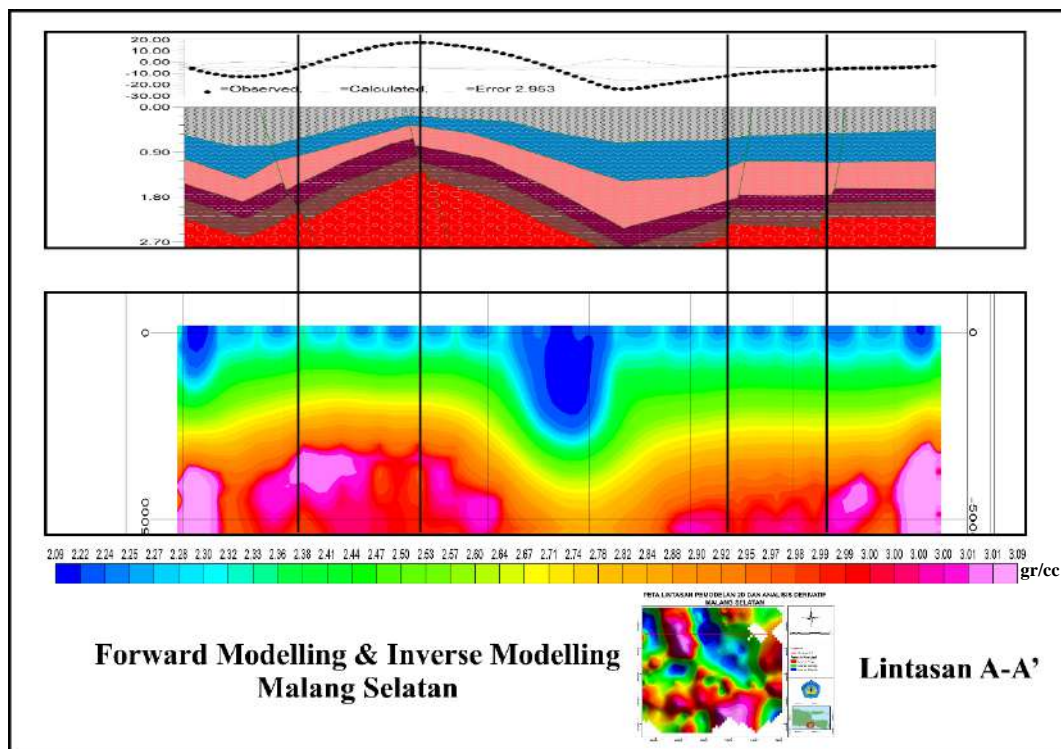
Gambar 55. Penampang 3D data gravitasi lapangan berdasarkan lintasan

Dalam pemodelan 3D (*inverse*) lintasan A-A', lintasan B-B' dan lintasan C-C' yang menggambarkan bentuk yang sudah cocok dengan hasil pemodelan 2D (*forward*) yang telah dilakukan sebelumnya sehingga dapat diinterpretasikan pada batas endapan permukaan berada pada rentang 2,1 gr/cc sampai 2,29 kemudian Formasi Wonosari dengan jenis batuan sedimen terdiri dari batugamping napal pasiran dan sisipan batulempung berada pada rentang 2,3 gr/cc sampai 2,39 gr/cc. Lapisan ketiga diisi oleh Formasi Nampol (Tmn) yang berumur Miosen Tengah dan tergolong batuan sedimen yang terdiri dari batupasir tufan atau gampingan, batulempung hitam, napal pasiran dan batupasir gampingan berada pada rentang 2,4 gr/cc sampai 2,49 gr/cc. Lapisan keempat akan diisi oleh Anggota Tuf Formasi Mandalika (Tomt) yang terdiri dari tuf andesit-riolit-dasit, breksi tuf berbatuapung, berada pada rentang 2,5 gr/cc sampai 2,59 gr/cc sedangkan pada Formasi Mandalika yang berada pada lapisan kelima terdiri dari batuan beku seperti lava andesit, basal, trakit, dasit dan breksi andesit berada pada rentang 2,6 gr/cc sampai 2,79 gr/cc dan untuk lapisan terakhir atau keenam adalah lapisan *basement* pembentuk berada pada rentang 2,8 gr/cc sampai 3,1 gr/cc.

5.8.1 Model 3D (*Inverse*) Lintasan A-A'



Gambar 56. Model 3D (*inverse*) lintasan A-A' data gravitasi GGMPPlus

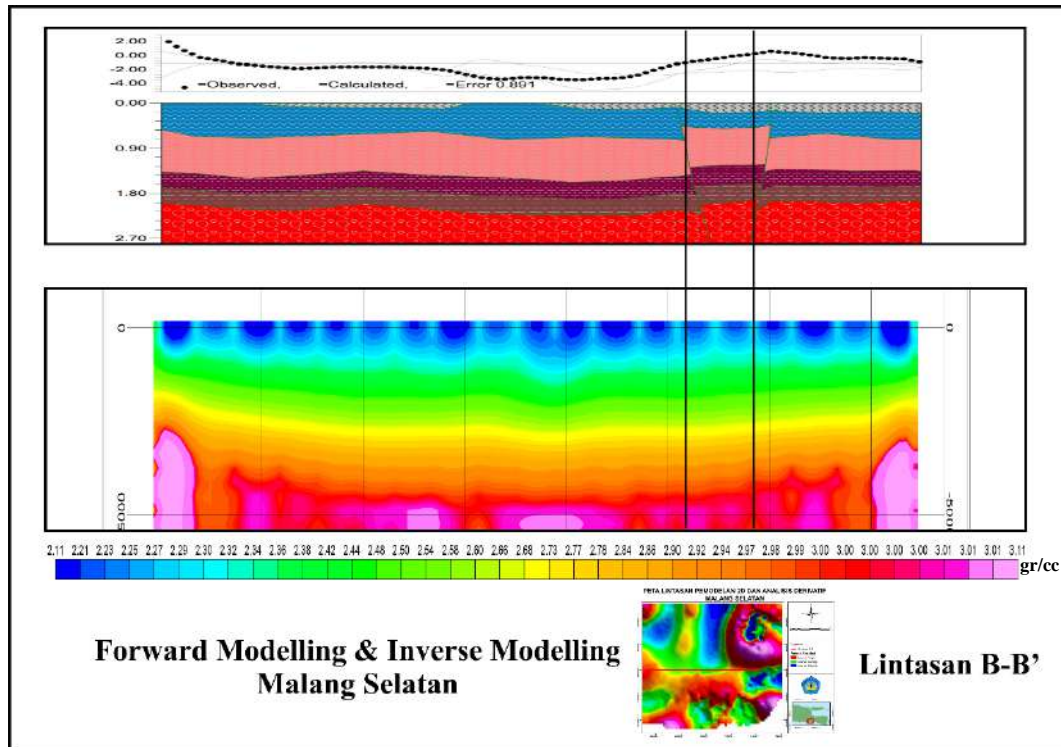


Gambar 57. Model 3D (*inverse*) lintasan A-A' data gravitasi lapangan

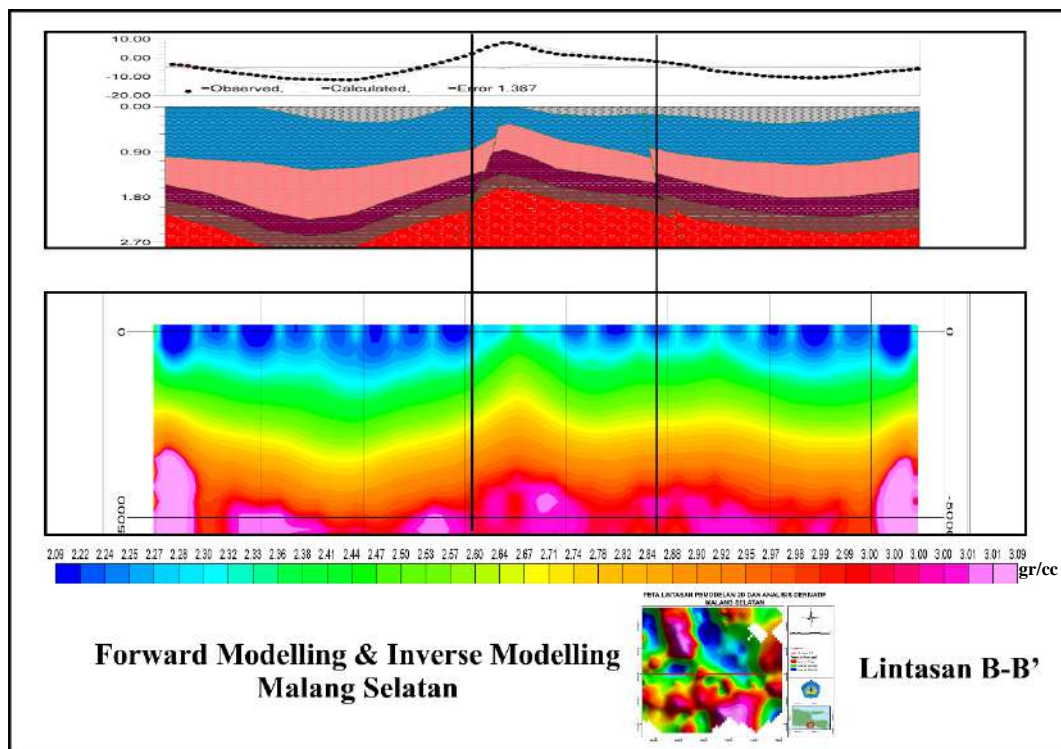
Berdasarkan data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan di lintasan A-A' menunjukkan hasil sudah sesuai antara pemodelan 2D (*forward*) dan pemodelan 3D (*inverse*) yang sudah dilakukan, kecenderungan pola sedimen dan tinggian *basement* yang dihasilkan oleh pemodelan 3D *inverse* di lintasan A-A' memperlihatkan kemiripan pada model 2D (*forward*) yang sudah dilakukan.

Hasil model 3D data gravitasi GGMPlus menunjukkan pola sedimen yang sedikit lebih tipis dibandingkan dengan data gravitasi lapangan sehingga sesuai dengan pemodelan 2D yang sudah dilakukan sebelumnya yang mendapatkan rata-rata ketebalan sedimen pada data gravitasi GGMPlus sebesar 1,8 km dan rata-rata ketebalan sedimen pada data gravitasi lapangan sebesar 2 km. Ketebalan sedimen yang cukup tebal berada di wilayah Sub-Cekungan B tepatnya di wilayah Kecamatan Tajinan dengan kedalaman sedimen mencapai deposenter 2,5 km. Pola tinggian secara umum berada di kisaran 2,5 km oleh masing-masing data dengan pola tinggian yang signifikan berada dekat permukaan di wilayah Kecamatan Pakisaji yang memisahkan Sub-Cekungan A dan Sub-Cekungan B.

5.8.2 Model 3D (*Inverse*) Lintasan B-B'



Gambar 58. Model 3D (*inverse*) lintasan B-B' data gravitasi GGMPPlus

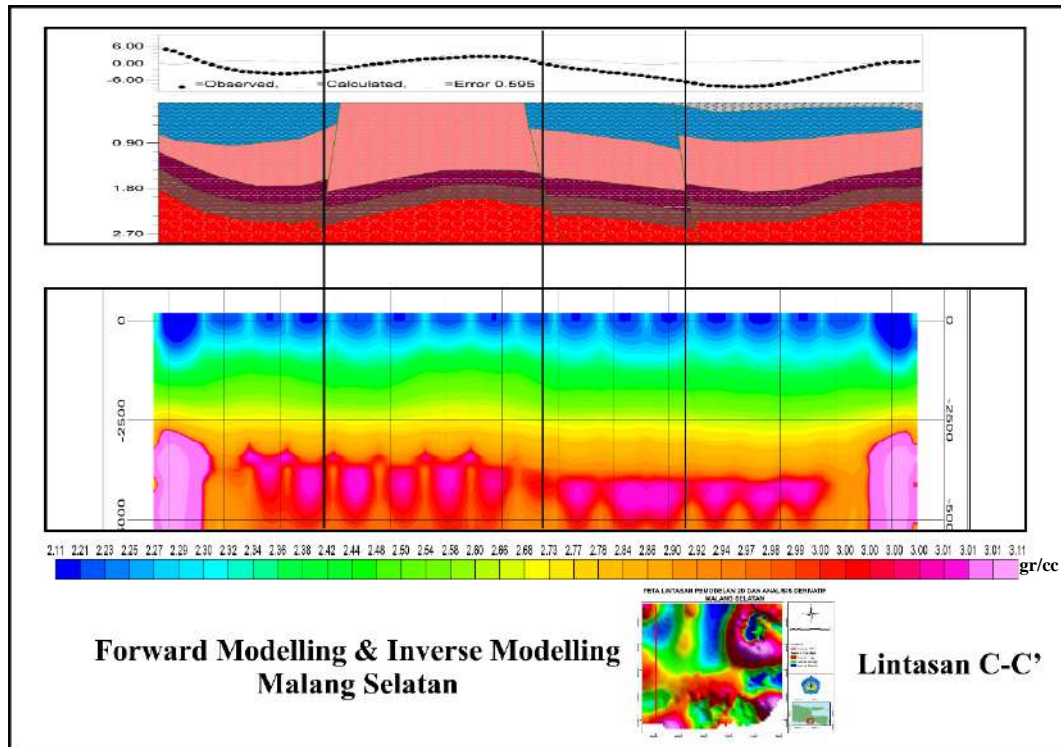


Gambar 59. Model 3D (*inverse*) lintasan B-B' data gravitasi lapangan

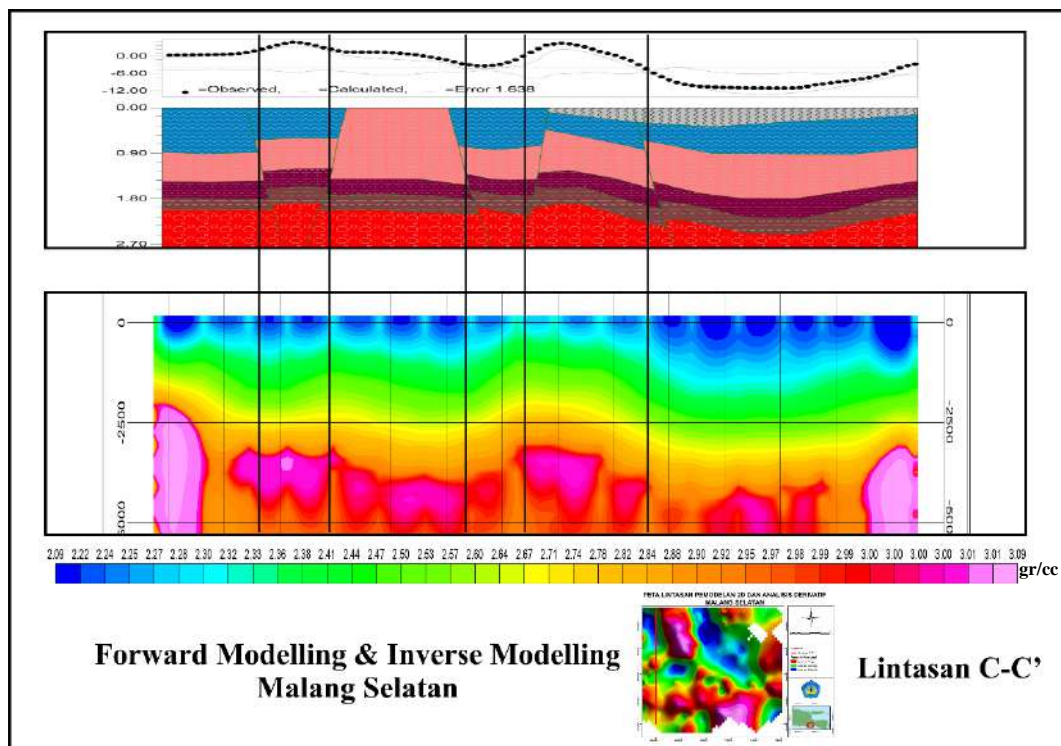
Berdasarkan data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan di lintasan B-B' menunjukkan hasil sudah sesuai antara pemodelan 2D (*forward*) dan pemodelan 3D (*inverse*) yang sudah dilakukan, kecenderungan pola sedimen dan tinggian *basement* yang dihasilkan oleh pemodelan 3D (*inverse*) di lintasan B-B' memperlihatkan kemiripan pada model 2D (*forward*) yang sudah dilakukan.

Hasil model 3D data gravitasi GGMPlus menunjukkan pola sedimen yang sedikit lebih tipis dibandingkan dengan data gravitasi lapangan sehingga sesuai dengan pemodelan 2D yang sudah dilakukan sebelumnya yang mendapatkan rata-rata ketebalan sedimen pada data gravitasi GGMPlus sebesar 1,8 km dan rata-rata ketebalan sedimen pada data gravitasi lapangan sebesar 2 km. Hasil model 3D (*inverse*) data gravitasi GGMPlus juga tidak memperlihatkan terdapatnya keberadaan sub-cekungan di wilayah ini namun hasil model 3D (*inverse*) data gravitasi lapangan menunjukkan bahwa terdapat sub-cekungan dengan ketebalan sedimen 2,5 km tepatnya di wilayah Kecamatan Pagelaran dengan kedalaman sedimen mencapai deposenter 2,5 km. Pola tinggian secara umum berada di kisaran 2,5 km oleh masing-masing data dengan pola tinggian yang signifikan berada dekat permukaan di wilayah Kecamatan Dampit yang memisahkan Sub-Cekungan C dan Sub-Cekungan B.

5.8.3 Model 3D (*Inverse*) Lintasan C-C'



Gambar 60. Model 3D (*inverse*) lintasan C-C' data gravitasi GGMPPlus



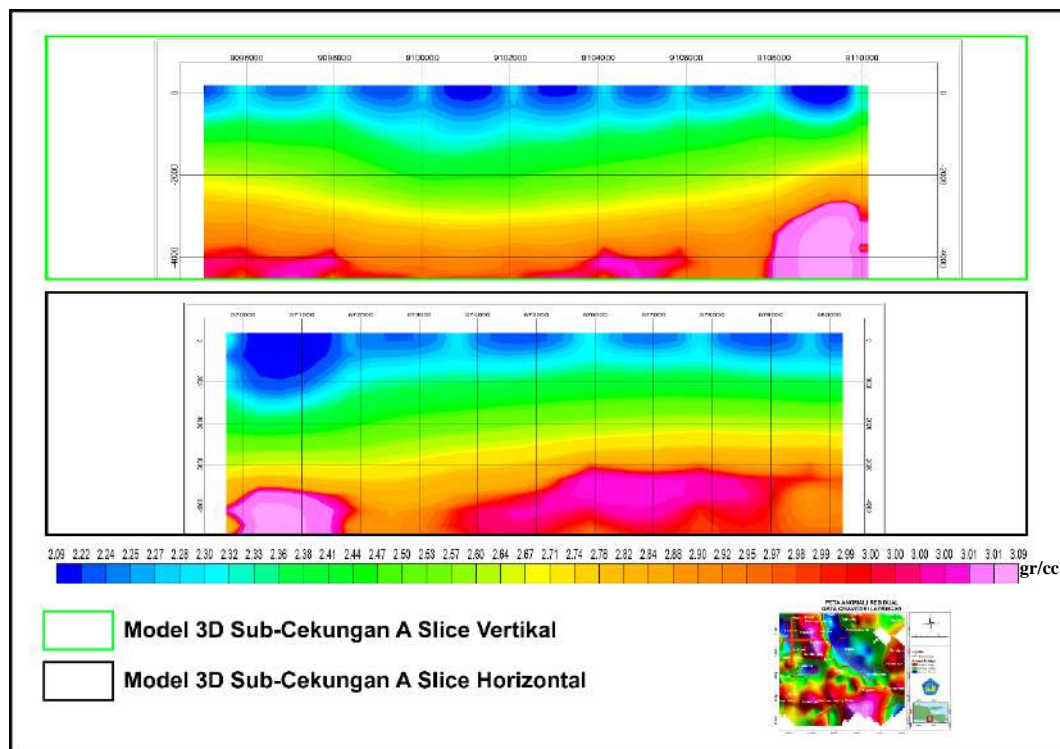
Gambar 61. Model 3D (*inverse*) lintasan C-C' data gravitasi lapangan

Berdasarkan data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan di lintasan C-C' menunjukkan hasil sudah sesuai antara pemodelan 2D (*forward*) dan pemodelan 3D (*inverse*) yang sudah dilakukan, kecenderungan pola sedimen dan tinggian *basement* yang dihasilkan oleh pemodelan 3D (*inverse*) di lintasan B-B' memperlihatkan kemiripan pada model 2D (*forward*) yang sudah dilakukan.

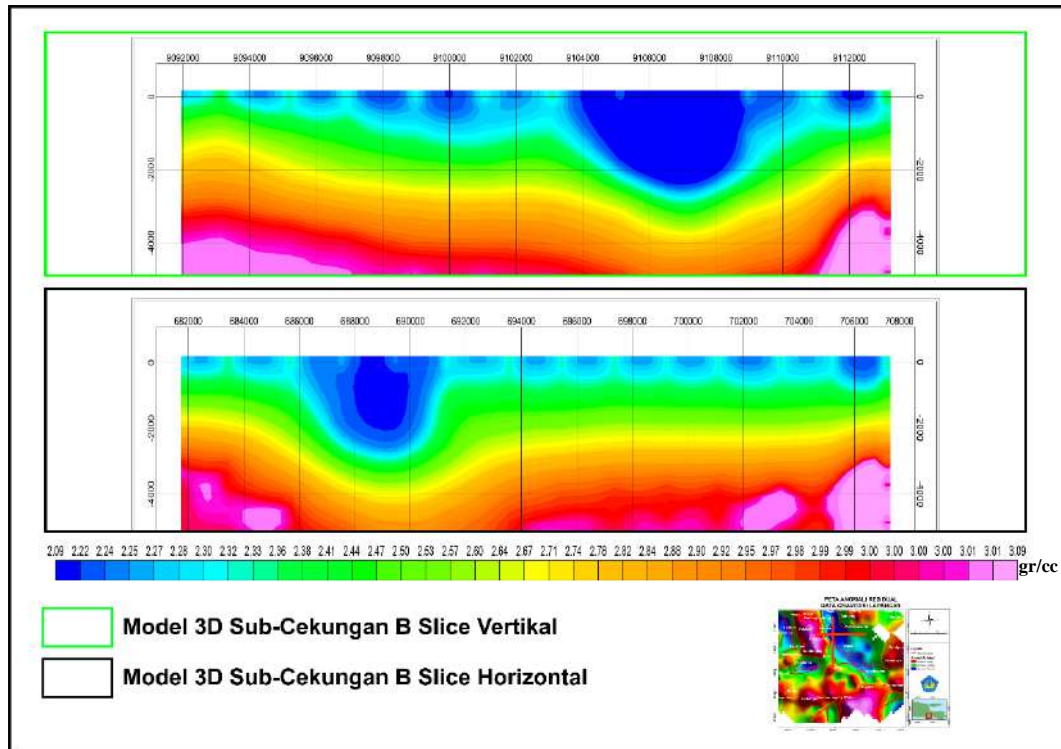
Hasil model 3D data gravitasi GGMPlus menunjukkan pola sedimen yang sedikit lebih tipis dibandingkan dengan data gravitasi lapangan sehingga sesuai dengan pemodelan 2D yang sudah dilakukan sebelumnya yang mendapatkan rata-rata ketebalan sedimen pada data gravitasi GGMPlus sebesar 1,8 km dan rata-rata ketebalan sedimen pada data gravitasi lapangan sebesar 2 km. Pada lintasan ini berdasarkan peta lembar geologi Turen terdapat keberadaan Formasi Nampol yang mencapai permukaan hasil model 3D (*inverse*) memperlihatkan bahwa wilayah ini ditandai dengan keberadaan sedimen yang tebal pada masing masing data tepatnya di wilayah Kecamatan Bantur sampai Kecamatan Pagak namun berdasarkan struktur geologinya model yang dihasilkan data gravitasi lapangan menampilkan struktur yang cukup rumit di wilayah yang sesuai dengan keberadaan formasi-formasi yang berumur Miosen Tengah sampai Miosen Akhir yang mencapai permukaan, kemudian pada bagian Sub-Cekungan A yang juga terlihat pada model menunjukkan korelasi yang sesuai dengan lintasan A-A' yang dilakukan dengan ketebalan sedimen pada data gravitasi lapangan berkisar 2,5 km. Pola tinggian secara umum berada di kisaran 2,5 km oleh masing-masing data dengan pola tinggian yang signifikan berada dekat permukaan di wilayah Kecamatan Pagak yang memisahkan Sub-Cekungan A dengan daerah yang memiliki sebaran Formasi Nampol dan Formasi Wonosari yang dominan di wilayah Barat Daya Malang Selatan.

5.9 Slice Horizontal dan Vertikal Sub-Cekungan Potensial

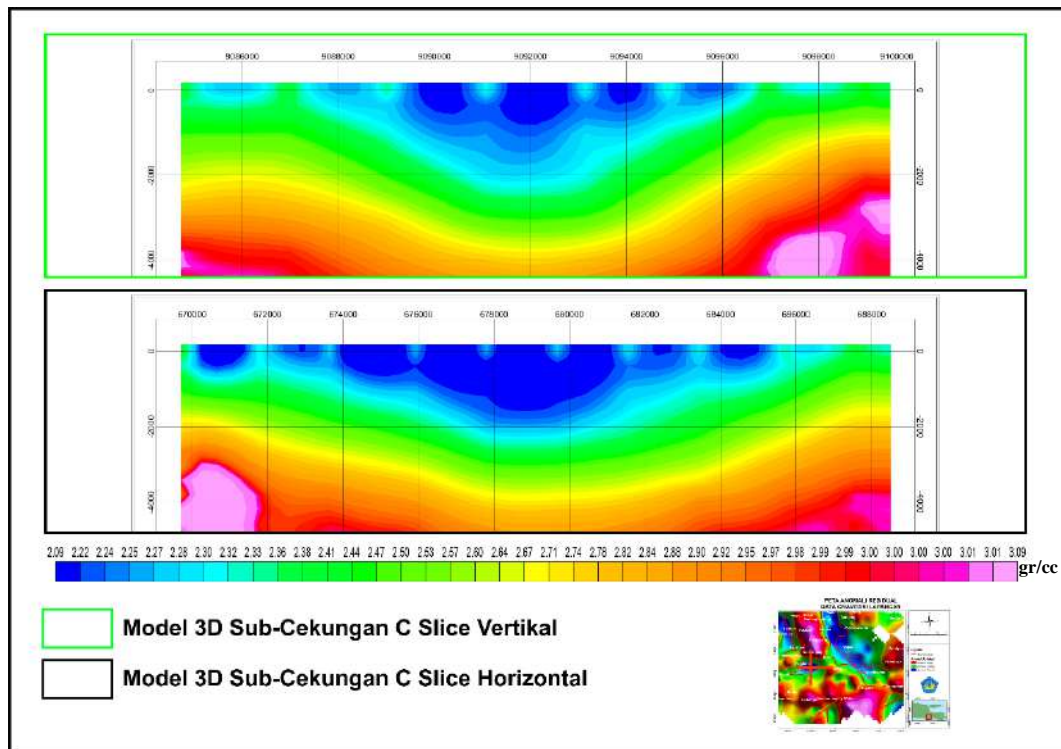
Berdasarkan kecocokan pemodelan 2D (*forward*) dan pemodelan 3D (*inverse*) serta didapatkan daerah sub-cekungan potensial keberadaan hidrokarbon yang memperlihatkan ketebalan sedimen signifikan pada Sub-Cekungan A di Kecamatan Ngajum dengan ketebalan rata-rata sedimen mencapai 2 km, Sub-Cekungan B di Kecamatan Tajinan dengan ketebalan rata-rata sedimen mencapai 2,5 km dan pada Sub-Cekungan C di Kecamatan Pagelaran dengan ketebalan rata-rata sedimen mencapai 2,5 km. Berdasarkan penelitian Prasetyadi ddk (2021), melalui pengujian di laboratorium singkapan dipermukaan mengungkapkan bahwa Formasi Nampol berpotensi menghasilkan *source rock* yang dimana berdasarkan stratigrafi geologi peta lembar Turen formasi ini termasuk ke dalam satuan formasi sedimen berumur Miosen Tengah serta hasil pemodelan 2D dan pemodelan 3D yang sudah dilakukan memperlihatkan keberadaan sedimen yang cukup masif di daerah ini sehingga wilayah ini menjadi sub-cekungan yang menarik untuk diteliti lebih jauh terutama prospek terdapatnya hidrokarbon.



Gambar 62. *Slicing* Sub-Cekungan A arah vertikal dan horizontal.



Gambar 63. *Slicing* Sub-Cekungan B arah vertikal dan horizontal



Gambar 64. *Slicing* Sub-Cekungan C arah vertikal dan horizontal

5.10 Perbandingan Deskriptif dan Korelasi Data

Hasil pemodelan 3D dan pemodelan 2D untuk setiap lintasan menunjukkan bahwa model data gravitasi GGMPlus lebih regional meskipun titik pengukuran dan elevasi relatif sama. Hasil pemodelan ini secara teori didukung oleh sintesis data gravitasi GGMPlus, yang menambahkan *forward modelling* gravitasi topografi dari data satelit GRACE-GOCE dan EGM2008. Menurut literatur penyedia data GGMPlus, variasi nilai data akan memiliki kesalahan dari nilai elevasi SRTM V.4.1, yang berkisar ± 10 meter, yang setara dengan kesalahan ± 3 mGal. Berdasarkan lintasan A-A', lintasan B-B' dan lintasan C-C' juga dapat dilihat pada lokasi dengan kondisi kontur topografi yang kasar dan kondisi litologi yang kompleks, data gravitasi GGMPlus mengalami keterbatasan untuk menangkap anomali yang dangkal atau kompleks maupun dari struktur struktur yang cukup dangkal. Sehingga untuk wilayah Malang Selatan disimpulkan penggunaan data gravitasi GGMPlus hanya baik untuk survei pendahuluan atau mendeteksi struktur yang dalam dan perlu untuk mengintegrasikan dengan data gravitasi lapangan untuk menghasilkan model bawah permukaan dengan kontras densitas yang lebih detail atau lokal

Untuk hasil pemodelan yang diintegrasikan didapatkan indikasi sesar yang terdapat dari hasil analisis derivatif dari kedua data seperti yang sudah ditampilkan. Dapat dilihat pada pembahasan sub-bab sebelumnya, adanya indikasi sesar naik dan sesar turun yang terlihat lebih jelas pada data gravitasi lapangan dibandingkan dengan data gravitasi GGMPlus. Hal tersebut dapat terjadi karena data yang digunakan merupakan data lapangan yang mempunyai tingkat presisi yang lebih baik dari elevasi dan nilai percepatan yang terukur. Dilihat dari pemodelan 2D dan 3D bahwa Malang Selatan memiliki sub-cekungan dengan ketebalan rata-rata 2,5 km dengan Formasi Wonosari dan Formasi Nampol yang terdiri dari batuan sedimen seperti batupasir, batugamping, napal pasiran dan batulempung dengan densitas rata rata 2,3 gr/cc samapi 2,4 gr/cc dan diperoleh ketebalan *basement* 10 km dengan densitas rata rata 2,8 gr/ cc.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Integrasi analisis spektrum data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan menunjukkan bidang batas anomali regional dan residual. Kedalaman bidang batas regional diperoleh rata-rata 10 km sampai 15 km dan Kedalaman bidang batas residual diperoleh rata-rata 1,8 sampai 2,5 km menunjukkan batas antara *basement* dan batuan sedimen.
2. Delineasi sub-cekungan berdasarkan anomali residual yang saling terintegrasi antara data gravitasi GGMPlus dan data gravitasi lapangan divalidasi oleh hasil analisis SVD mengungkapkan terdapat 5 sub-cekungan yang berada pada Kecamatan Ngajum, Kecamatan Tajinan, Kecamatan Pagelaran, Kecamatan Donomulyo dan Kecamatan Tempursari.
3. Hasil analisis SVD antara kedua data yang saling terintegrasi memperlihatkan zona patahan dengan arah relatif Barat Laut - Tenggara dan Timur Laut - Barat Daya pada lintasan Barat-Timur (A-A') diidentifikasi terdapat 5 zona patahan dengan nilai pada koordinat X= 665 km - 714 km. Pada lintasan Barat-Timur (B-B') diidentifikasi terdapat 3 zona patahan pada koordinat X= 669 km - 710 km Pada lintasan Selatan-Utara (C-C') diidentifikasi terdapat 5 zona patahan pada koordinat Y= 9070 km - 9115 km.

4. Analisis pemodelan 2D dan pemodelan 3D pada tiga sub-cekungan yang potensial untuk kemungkinan keberadaan hidrokarbon, yaitu Sub-Cekungan A, Sub-Cekungan B dan Sub-Cekungan C dengan formasi dominan Formasi Wonosari dan Formasi Nampol yang merupakan batuan sedimen dengan kedalaman deposenter sub-cekungan mencapai 2 km hingga 2,5 km di wilayah Kecamatan Ngajum, Kecamatan Tajinan dan Kecamatan Pagelaran.
5. Berdasarkan 2D dan 3D terdapat 6 formasi batuan pada Sub-Cekungan Malang Selatan. Formasi paling atas yaitu endapan kuartar merupakan Formasi Alluvium dengan densitas 1,8 gr/cc dan endapan tuf gunung api dengan densitas 2,2 gr/cc. kedua berupa Formasi Wonosari dengan densitas 2,3 gr/cc. Ketiga yaitu Formasi Nampol dengan densitas 2,4 gr/cc. Keempat yaitu Formasi Tuf Mandalika dengan nilai densitas 2,5 gr/cc. Kelima Formasi Mandalika dengan densitas 2,6 gr/cc dan keenam merupakan *basement high* dengan densitas 2,8 gr/cc.

6.2 Saran

Hasil analisis gravitasi yang didasarkan pada data gravitasi lapangan dan GGMPlus yang diintegrasikan untuk mengetahui delineasi sub-cekungan, struktur geologi, sesar, *graben* pola, dan tinggi *basement* di daerah Malang Selatan menarik untuk dilakukan penelitian lebih lanjut terkait sistem perminyakan di daerah ini. Oleh karena itu, penerapan metode geofisika yang lebih mendalam seperti seismik pasif tomografi (PST) dan magnetotelurik (MT) perlu dilakukan di Malang Selatan untuk diselidiki lebih detail fitur geologi di daerah ini terutama yang berkaitan dengan potensi hidrokarbon dan menganalisis potensi cebakan migas di daerah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Andari, W., Karyanto, K., dan Kurniawan, R. (2019). Identifikasi Batas Sub-Cekungan Hidrokarbon Menggunakan Analisis SHD (Second Horizontal Derivative) dan SVD (Second Vertical Derivative) Berdasarkan Korelasi Data Gravitasi Dan Seismik. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 5(1), 60-74. <https://doi.org/10.23960/jge.v5i1.23>.
- Blakely, R. J. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Application*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Boimau, Y., Suna, R., dan Susilo, A. (2018). Identification of Underground River Flow in Karst Area of Sumber Bening-Malang, Indonesia Based on Geoelectrical Self-Potential and Resistivity Data. *International Journal of Applied Physics*, 5, 1-7. <https://doi.org/10.14445/23500301/IJAP-V5I3P101..>
- Broto, S., dan Putranto, T.T. (2011). Aplikasi Metode Geomagnet Dalam Eksplorasi Panasbumi. *Teknik* .Vol. 32. No. 1.
- Constable, S C., Parker, R L., dan Constable, C G. (1987). Models from Electromagnetic Sounding Data. *Geophysics*, 52(3). 289-300.
- Drinkwater, M. R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., dan Popescu, A. (2003). VII: CLOSING SESSION: GOCE: ESA's First Earth Explorer Core Mission. *Space Science Reviews* 108, 419-432. <https://doi.org/10.1023/A:1026104216284>.
- Elkins, T. A. (1951). The second derivative method of gravity interpretation. *Geophysics*, 16, 29-50. <https://doi.org/10.1190/1.1437648>.
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inverse Geofisika*. Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Henderson, R. G., dan Zietz, I. (1949). The Computation of Second Vertical Derivative of Geomagnetic Fields. *Geophysics Journal*, 14.

- Hinze, W. J., von Frese, R. R., dan Saad, A. H. (2012). *Gravity and Magnetic Exploration: Principle, Practices, and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hirt, C. (2012). Efficient and accurate high-degree spherical harmonic synthesis of gravity field functionals at the Earth's surface using the gradient approach, *J. Geod.*, 86(9), 729-744. doi:10.1007/s00190-012-0550-y.
- Hirt, C., Claessens, S. J., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., dan Rexer, M. (2013). New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical Research Letters*, Vol 40 (16), 4279-4283. doi: 10.1002/grl.50838.
- Husein, S., dan Srijono. (2007). Tinjauan Geomorfologi Pegunungan Selatan DIY/Jawa Tengah: telaah peran faktor endogenik dan eksogenik dalam proses pembentukan pegunungan. *Prosiding Seminar Potensi Geologi Pegunungan Selatan dalam Pengembangan Wilayah*. Pusat Survei Geologi, Yogyakarta, 10 pp.
- Johannessen, J. A., Balmino, G., dan Provost, C. L. (2003). The European Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer Satellite Mission Its Impact on Geophysics. *Surveys in Geophysics*, 24, 339-386. <https://doi.org/10.1023/B:GEOP.00000004264.04667>.
- Makhrani. (2012). *Buku Ajar: Geologi Minyak dan Gas Bumi*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika. LKPP UH.
- Manrulu, R. H., dan Wahyudi, W. (2014). Pembentukan Karakter Melalui Aplikasi Sains (Pemodelan 3d Anomali Gravitasi Magma Gunungapi Merapi dengan Software Grablox, Bloxer dan Rockwork. *Prosiding*, 1(1), 107-115.
- Menke, W. (1984). *Geophysical Data Analysis Discrete Inverse Theory*. Academic Press.
- Ningsih, R. (2023). Deliniasi Sub-Cekungan Dan Interpretasi Pola Struktur Bawah Permukaan Cekungan Jawa Timur Bagian Utara (*Offshore* Utara Madura) Berdasarkan Analisis *Spectral Decomposition*, Serta Pemodelan 2d Dan 3d Data Gayabarat. *Skripsi*. Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung
- Nishijima, J., dan Naritomi, K. (2017). Interpretation of gravity data to delineate underground structure in the Beppu geothermal field, central Kyushu, Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 84-95. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.022>.
- Peters, K., dan Cassa, M. (1994). Applied Source Rock Geochemistry. *AAPG Memoir*, 60.

- Prasetyadi, C., Subandrio, A., Rachman, M.G., Barizi, A.R.F., dan Putro, G.S. (2021). Potensi Sistem Perminyakan Batuan Subvulkanik di Daerah Malang Selatan, Jawa Timur, Indonesia. *Open Journal of Yangtze Gas and Oil*, 6, 146-160. <https://doi.org/10.4236/ojogas.2021.64013>.
- Purnomo, J., Koesuma, S., dan Yunianto, M. (2013). Pemisahan Anomali Regional-Residual pada Metode Gravitasi Menggunakan Metode Moving Average, Polynomial dan Inversion. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 3, 10. <https://doi.org/10.13057/ijap.v3i01.1208>.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Ridha, M., dan Darminto, D. (2016). Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi dan Kedalaman. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 12(3). <https://doi.org/10.12962/j24604682.v12i3.1403>.
- Rosenbach, O. (1952). A Contribution to The Computation of The Second Derivative From Gravity Data. *Geophysics*, 17, 894-911. <https://doi.org/10.1190/1.1437943>
- Rosid, S. 2005. *Lecture Notes: Gravity Method in Exploration Geophysics*. Program Studi Geofisika, Universitas Indonesia.
- Sari, I. P. (2012). *Studi Komparasi Metode Filtering Untuk Pemisahan Anomali Regional dan Residual dari Data Anomali Bouguer*. Skripsi. Universitas Indonesia.
- 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 Gayaberat*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Save, H., Bettadpur, S., dan Tapley, B. (2016). High resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal Geophysics*, 121(10), 7547-7569. <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>.
- Setiadi, I., Setyanta, B., dan Widijono, B. S. (2010). Delineasi Cekungan Sedimen Sumatera Selatan Berdasarkan Analisis Data Gravitasi. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 20(2), 93-106.
- Setiadi, I., Diyanti, A., & Ardi, N. D. (2014). Interpretasi struktur geologi bawah permukaan daerah Leuwidamar berdasarkan analisis spektral data gayaberat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 15(4). <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v15i4>.

- Setiadi, I., dan Marjiyono, D. (2018). The Geological Subsurface Interpretation and Delineation of the Salawati Basin in Sorong Area and Its Surrounding Based on Spectral Analysis of the 2D and 3D Modelling of Gravity Data. *Jurnal Geologi Indonesia*, 19, 117-130.
- Setiadi, I., dan Nainggolan, T. B. (2021). Gravity Data Analysis Based on Optimum Upward Continuation Filter and 3D Inverse Modelling (Case Study at Sedimentary Basin in Volcanic Region Malang and Its Surrounding Area, East Java). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 873(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/873/1/012008>.
- Smyth, H., Hall, R., Hamilton, J., dan Kinny, P. (2005). East Java: Cenozoic basins, volcanoes, and ancient basement. *Proceedings 30th Indonesian Petroleum Association Annual Convention and Exhibition*, IPA05-G-045, 251-266.
- 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*, 2, 25-34. <https://doi.org/10.31957/jfp.v2i1.22>
- Sujanto, R. H., Kusnama, R. C., dan Baharuddin, R. 1992. *Peta Geologi Lembar Turen, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sumotarto, U. (2016). *Geologi Minyak Dan Gas Bumi*. Yogyakarta. Penerbit Ombak.
- Suprianto, A., Priyantari, N., dan Cahyono, B. E. (2021). Correlation Between GGMPlus, Topex and BGI Gravity Data in Volcanic Areas of Java Island. *Journal of Physics: Conference Series Vol. 1825* (1), 012023.
- Supriyanto. (2007). Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi (Edisi I). Departemen Fisika-FMIPA, Universitas Indonesia.
- Syamsuriadi, S., Hamzah, M., dan Aswad, S. (2013). Penentuan Struktur Bawah Permukaan Kota Makassar dengan Menggunakan Metode Gravitasi (Gravity).
- Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (Second Edition). Cambridge: Cambridge University Press.
- Van Bemmelen, R. W. (1949). *General Geology of Indonesia and adjacent archipelagoes*. The geology of Indonesia.
- Wulandari, F. I., dan Setiawan, A. (2015). Pemodelan Struktur Bawah Permukaan 3D Purwokerto dan Sekitarnya Berdasarkan Data Anomali Gravitasi Bouguer Lengkap. *Jurnal Fisika Indonesia*, 19(57), 6-12.
- Zhao, B. B., dan Chen, Y. Q. (2011). Singular Value Decomposition (SVD) for Extraction of Gravity Anomaly Associated with Gold Mineralization in

Tongshi Gold Field, Western Shandong Uplifted Block, Eastern China.
Nonlinear Processes in Geophysics, 18(1): 103-109.
<https://doi.org/10.5194/npg-18-103-2011>.