

**IDENTIFIKASI SEBARAN KANTONG LUMPUR DI KAWASAN
KESONGO MENGGUNAKAN METODE GRAVITASI
(Studi kasus : Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Jawa Tengah)**

SKRIPSI

Oleh :
RATIH PUSPITASARI
NIM. 19640022



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2023**

**IDENTIFIKASI SEBARAN KANTONG LUMPUR DI KAWASAN
KESONGO MENGGUNAKAN METODE GRAVITASI
(Studi kasus : Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Jawa Tengah)**

SKRIPSI

**Diajukan kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Oleh :
RATIH PUSPITASARI
NIM. 19640022**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2023**

HALAMAN PERSETUJUAN

IDENTIFIKASI SEBARAN KANTONG LUMPUR DI KAWASAN KESONGO
MENGUNAKAN METODE GRAVITASI
(Studi kasus : Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Jawa Tengah)

SKRIPSI

Oleh :
RATIH PUSPITASARI
NIM. 19640022

Telah Diperiksa dan Disetujui Untuk Diuji
Pada Tanggal, 14 Desember 2023

Pembimbing I



Irjan, M.Si
NIP. 19691231 200604 1 003

Pembimbing II



Dr. Umaiyatus Syarifah, M.A
NIP. 19820925 200901 2 005

Mengetahui,
Ketua Program Studi



Irman Fazi, M.Si
NIP. 19730 200312 1 002

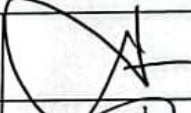
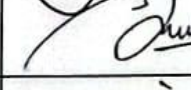
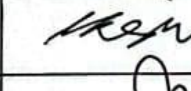
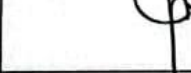
HALAMAN PENGESAHAN

IDENTIFIKASI SEBARAN KANTONG LUMPUR DI KAWASAN KESONGO MENGUNAKAN METODE GRAVITASI (Studi kasus : Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Jawa Tengah)

SKRIPSI

Oleh :
RATIH PUSPITASARI
NIM. 19640022

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Diterima sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal, 14 Desember 2023

Penguji Utama	<u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP. 19650504 199003 1 003	
Ketua Penguji	<u>Arista Romadani, M.Sc</u> NIP. 19900905 201903 1 018	
Sekretaris Penguji	<u>Irfan, M.Si</u> NIP. 19691231 200604 1 003	
Anggota Penguji	<u>Dr. Umayyatus Syarifah, M.A</u> NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengetahui,
Ketua Program Studi




Dini Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : RATIH PUSPITASARI
NIM : 19640022
Program Studi : FISIKA
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
Judul Penelitian : Identifikasi Sebaran Kantong Lumpur di Kawasan
Kesongo Menggunakan Metode Gravitasi (Studi
Kasus : Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Jawa
Tengah)

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi yang telah ditetapkan.

Malang, 07 Desember 2023
Yang Membuat Pernyataan


Ratih Puspitasari
NIM. 19640022

MOTTO

“내딛고서라도 짧게 빛을 내볼까 봐”

“I will shine bright. So, I can’t give up”

-bol4

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan mengucap rasa syukur Alhamdulillah

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua Bapak Bambang Sujono dan Ibu Chusmawati serta semua keluarga yang telah memberikan dukungan, restu dan mendoakan tiada henti demi kesuksesan penulisan skripsi ini.
2. Segenap Dosen, Pembimbing dan Admin Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan serta pengarahannya.
3. Teman-teman Fisika angkatan 2019 yang telah memberikan dukungan dan membantu dalam proses pengerjaan skripsi ini.
4. Sahabat-sahabat saya di Sidoarjo yang telah memberikan dukukngan, semangat, saran, menjadi tempat curhat keluh kesah dan menghibur saya dikala bersedih.
5. Diri saya sendiri.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah, serta ridho-Nya kepada penulis berupa kesehatan, keinginan dan kesabaran, sehingga penulis dapat menyusun skripsi yang berjudul **“Identifikasi Sebaran Kantong Lumpur di Kawasan Kesongo Menggunakan Metode Gravitasi (Studi kasus : Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Jawa Tengah)”** dengan baik. Sholawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada junjungan kita Baginda Rasulullah Nabi Muhammad SAW yang telah membimbing dan membawa kita dari zaman jahiliyah menuju zaman yang terang benderang yakni agama islam. Penulis menyusun skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Pada kesempatan ini, penulis tidak lupa menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu, memberi pengarahan, bimbingan serta dukungan semangat dalam penulisan skripsi ini, khususnya kepada :

1. Prof Dr. H. M. Zainuddin, M.A selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Prof Dr. Sri Harini, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Imam Tazi, M.Si selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

4. Irjan, M.Si selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan banyak arahan, bimbingan dan bantuan dalam penyusunan skripsi.
5. Segenap Dosen, Laboran dan Admin Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan serta pengarahannya.
6. Kedua orang tua Bapak Bambang Sujono dan Ibu Chusmawati serta semua keluarga yang telah memberikan dukungan, restu dan mendoakan tiada henti demi kesuksesan penulisan skripsi ini.
7. Sahabat-sahabat “ARINFA” yang selalu memberikan dukungan, semangat, doa serta masukan dalam proses pengerjaan skripsi ini.
8. Teman-teman Fisika angkatan 2019 yang selalu memberikan dukungan, terutama teruntuk NIM 19640001 dan 19640029 yang selalu menularkan kepanikan dan semangatnya dalam proses pengerjaan skripsi ini.
9. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang banyak membantu secara langsung maupun tidak dalam penulisan pengerjaan skripsi ini.

Terlepas dari hal itu, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, segala kritik, masukan serta saran yang bersifat membangun sangat diharapkan penulis demi tersusunnya skripsi ini dengan benar.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini bisa memberikan manfaat, tambahan ilmu serta inspirasi kepada para pembaca *Aamiin Ya Rabbal Alamin*.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Malang, 20 Maret 2023

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN.....	v
MOTTO.....	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
ABSTRAK.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Mud Volcano	6
2.1.1 Pengertian Gunung Lumpur (<i>Mud Volcano</i>).....	6
2.1.2 Material Pembentuk Gunung Lumpur	7
2.1.3 Proses Terbentuknya Gunung Lumpur	9
2.1.4 Faktor Penyebab Keluarnya Lumpur	12
2.1.5 Klasifikasi Gunung Lumpur.....	13
2.2 Teori Dasar Gravitasi	13
2.2.1 Teori Gravitasi Newton.....	13
2.2.2 Metode Gravitasi	15
2.2.3 Potensial Gravitasi.....	16
2.2.4 Rapat Massa Batuan.....	16
2.3 Data Gravitasi GGMplus	17
2.3.1 Koreksi Dalam Metode Gravitasi GGMPlus	20
A. Koreksi Bouguer	20
B. Koreksi Medan	21
C. Anomali Bouguer	23
D. Reduksi Bidang Datar	23
2.4 Analisis Spektrum.....	24
2.5 Pemisahan Anomali	26
2.6 Geologi Daerah Penelitian	29
BAB III METODE PENELITIAN.....	32

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	32
3.2 Data Penelitian	33
3.3 Peralatan Penelitian	33
3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian	33
3.4.1 Pengumpulan Data	33
3.4.2 Pengolahan Data	34
A. Koreksi Bouguer (Bouguer Correction)	34
B. Koreksi Medan (Terrain Correction)	35
C. Anomali Bouguer Lengkap (<i>Complete Bouguer Anomaly</i>)	35
D. Reduksi Bidang Datar	35
E. Analisis Spektrum	35
F. Pemisahan Anomali	36
3.4.3 Interpretasi Data	36
3.4 Diagram Alir Penelitian	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	38
4.1 Pengolahan Data	39
4.1.4 Analisis Spektrum	44
4.2 Interpretasi Kualitatif	49
4.3 Interpretasi Kuantitatif	52
4.3.4 Interpretasi Kuantitatif Penampang Sayatan A-A'	54
4.4 Kajian Keislaman	55
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	58
5.1 Kesimpulan	58
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses Terjadinya Semburan Lumpur	21
Gambar 2.2 Struktur Dasar Anatomi Gunung Lumpur Berbentuk Kerucut	11
Gambar 2.3 Koreksi Bouguer.....	21
Gambar 2.4 Hammer Chart	21
Gambar 2.5 Kurva RAPS	26
Gambar 2.6 Peta Geologi Daerah Penelitian Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Ngawi.....	29
Gambar 2.7 Penampang Geologi Jawa Tengah Bagian Utara Dari Utara Ngawi Hingga Rembang Melintasi Gunung Lumpur Kesongo.....	21
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian	32
Gambar 3.2 Diagram Alir.....	37
Gambar 4.1 Kontur Topografi Dan Titik Pengukuran	38
Gambar 4.2 Densitas Parasnis Lokasi Penelitian	40
Gambar 4.3 Kontur Anomali Bouger Lengkap	41
Gambar 4.4 Kontur Anomali Setelah Reduksi Bidang Datar.....	21
Gambar 4.5 Gridding Analisis Spektrum	44
Gambar 4.6 Contoh Grafik Analisis Spektrum Lintasan 1	21
Gambar 4.7 Kontur Anomali Regional	48
Gambar 4.8 Kontur Anomali Lokal	49
Gambar 4.9 Sayatan A-B pada Kontur Anomali Lokal	52
Gambar 5.0 Model Bawah Permukaan Sayatan A-B.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rapat Massa Batuan	21
Tabel 4.1 Estimasi Kedalaman Pada Lintasan 1	45
Tabel 4.2 Penentuan Estimasi Kedalaman Pada Semua Lintasan	47

ABSTRAK

Puspitasari, Ratih. 2023. **Identifikasi Sebaran Kantong Lumpur di Kawasan Kesongo Menggunakan Metode Gravitasi (Studi kasus : Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Jawa Tengah)**. Skripsi. Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing : (I) Irjan, M.Si (II) Umayyatus Syarifah, M.A.

Kata Kunci : Anomali, Gravitasi, Gunung Lumpur

Penelitian ini menggunakan metode gravitasi yang bertujuan untuk mengetahui struktur bawah permukaan serta sebaran kantong lumpur di Kawasan Kesongo, Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Jawa Tengah. Metode gravitasi merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan perbedaan nilai medan *gravity* akibat perbedaan densitas batuan di bawah permukaan.. Pengambilan data dilakukan melalui web GGMPPlus dengan luasan daerah penelitian 3 x 2 km dengan spasi 200 diperoleh 150 data. Hasil penelitian menunjukkan pola persebaran lumpur Kesongo berada pada anomali tinggi disebelah timur dengan nilai 1,5mGal dengan estimasi kedalaman rata-rata residual -381,7202 meter. Pada interpretasi kuantitatif kantong lumpur terlihat pada penampang model bawah permukaan sayatan A-B yang memotong titik semburan lumpur Kesongo dari Utara ke Selatan dengan kedalaman kantong lumpur berada sekitar 245 m di bawah permukaan.

ABSTRACT

Puspitasari, Ratih. 2023. Identification of Mud Bag Distribution in Kesongo Area Using Gravity Method (Case study: Gabusan Village, Blora Regency, Central Java). Thesis. Departement of Physics, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University Malang. Advisor : (I) Irjan, M.Si (II) Umaiatus Syarifah, M.A.

Kata Kunci : Anomaly, Gravity, Mud Volcano

This project uses the gravity method which aims to determine the subsurface structure and distribution of mud bags in the Kesongo Area, Desa Gabusan, Kabupaten Blora, Central Java. The gravity method is one of the geophysical methods that utilizes differences in gravity field values due to differences in the density of rocks below the surface. Data collection was carried out through the GGMPlus web with a research area of 3 x 2 km with a space of 200 obtained 150 data. The result showed that the distribution pattern of Kesongo mud was at a high anomaly in the east with a value of 1,5 mGal with an estimated average residual depth of -381,7202 meters. In the quantitative interpretation, the mud volcanoes can be seen in the cross-section of the A-B incision subsurface model which intersects the Kesongo mudflow point from north to south, which is in the Tawun Formation with an average rock density of 2,25 gr/cm³ with the depth of the mud bag being about 245 m below the surface.

مستخلص البحث

فوسفيتاساري، راتيه. تحديد توزيع أكياس الطين في منطقة كيسونغو باستخدام طريقة الجاذبية (دراسة حالة: قرية غابوسان ، بلورا ريجنسي، جاوة الوسطى). البحث الجامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. الأول: إرجان الماجستير الثاني، أومياتوس سياريقة ، الماجستير

الكلمات المفتاحية: الشذوذ ، الجاذبية ، جبل الطين

تستخدم هذه الدراسة طريقة الجاذبية التي تهدف إلى تحديد البنية تحت السطحية وتوزيع جيوب الطحالب في منطقة كيسونغو ، قرية غابوسان ، بلورا ريجنسي ، جاوة الوسطى. طريقة الجاذبية هي إحدى الطرق الجيوفيزيائية التي تستخدم الاختلافات في قيم مجال الجاذبية بسبب الاختلافات في كثافة الصخور تحت السطح. تم جمع البيانات من خلال شبكة GGMPPlus مع منطقة بحث 2×3 كم بمساحة 200 تم الحصول على 150 بيانات. أظهرت النتائج أن نمط توزيع طين كيسونغو كان في حالة شاذة عالية في الشرق بقيمة 1.5 مليون جالون بمتوسط عمق متبقي يقدر بـ 381.7202 متر. في التفسير الكمي ، يمكن رؤية كيس الطين في المقطع العرضي لنموذج شق A-B تحت السطحي الذي يتقاطع مع نقطة تدفق الطين كاسوعومن الشمال إلى الجنوب مع عمق كيس الطين حوالي 245 متر تحت السطح.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mud volcano atau gunung lumpur merupakan suatu fenomena geologi yang muncul akibat oleh adanya aliran fluida secara *vertical*, serta semburan lumpur umumnya terjadi di cekungan-cekungan sedimentasi di seluruh dunia. Gunung lumpur terbentuk ketika material berupa batuan, cairan maupun gas dilepaskan dari formasi batuan di kedalaman tertentu yang mempunyai kondisi tekanan luap (*overpressure*), yang kemudian membentuk morfologi yang khas (Burhannudinnur, 2019). Material yang dikeluarkan *mud volcano* berupa butiran sangat halus yang tersuspensi dalam cairan, seperti air atau hidrokarbon. Lumpur, gas, batuan, belerang dan garam (di wilayah kering) serta air akan diletuskan ke permukaan bumi melalui rekahan-rekahan yang terbentuk di sekitar dapur lumpur, sehingga terjadi semburan lumpur dari dalam bumi. Wilayah sesar mendatar aktif merupakan lahan subur *mud volcano*.

Fenomena alam berupa semburan lumpur ini tersebar luas di belahan dunia, salah satunya banyak ditemui di Indonesia bagian timur, yaitu Bleduk Kuwu dan Sangiran Provinsi Jawa Tengah, serta di Sidoarjo Provinsi Jawa Timur yang dikenal dengan sebutan LUSI (Lumpur Lapindo Sidoarjo) dan masih banyak lagi. Keberadaan gunung lumpur dapat dikaitkan dengan minyak dan gas bumi, struktur patahan, potensi bencana, kealamian dan pemandangan yang menarik sebagai tempat wisata.

Kawasan Kesongo Blora merupakan kawasan yang jauh dari keberadaan gunung berapi, tetapi fakta bahwa Pulau Jawa merupakan bagian dari jalur gunung api yang aktif (*ring of fire*) menjadikan salah satu faktor terjadinya fenomena *mud volcano* pada wilayah Kabupaten Blora. Pada bulan Agustus 2020, tepatnya pada tanggal 27 Agustus terjadi fenomena alam berupa semburan gas bercampur lumpur di Kawasan Kesongo, Desa Gabusan Kecamatan Jati Kabupaten Blora. Kondisi geologi Kawasan Kesongo pada masa lalu telah mengendapkan batuan secara cepat sehingga mengakibatkan adanya pengendapan air dalam pori-pori batuan secara terus menerus yang kemudian memunculkan kondisi gradien panas bumi. Hal tersebut membuat lapisan batuan bagian bawah tertekan dengan suhu yang semakin panas dan mengakibatkan adanya perubahan kondisi lapisan batuan. Sebagai lapisan yang tertekan, lapisan tersebut akan bergerak mencari kesetimbangan dan mengalami pencairan, sehingga mudah bergerak melalui zona lemah seperti patahan dan rekahan, serta dapat naik muncul ke permukaan (Satyana, 2008).

Gunung Lumpur Kesongo berada pada Zona Rembang yang terletak pada Kradenan Jawa Timur. Gunung Lumpur ini tergolong tidak aktif. Meskipun demikian, fenomena tersebut bukanlah yang pertama kali, tetapi pernah terjadi pada tahun 2006, 2008 dan 2013 pada titik lokasi yang sama. Menurut informasi yang ada telah terjadi ledakan baru pada bulan Februari dan April yang memakan korban jiwa akibat adanya gas beracun yang keluar bersamaan dengan lumpur. Kandungan gas ini berupa gas metana yang memiliki komposisi mencapai 78 % mol (Burhanuddinnur, 2019). Ledakan lumpur yang terjadi pada 3 tahun terakhir di kawasan tersebut getarannya terasa hingga radius 1 kilometer dengan tinggi semburan lumpur 10-20 meter.

Melihat fenomena tersebut, maka dilakukanlah penelitian yang bertujuan untuk mengeksplorasi lokasi semburan lumpur, sehingga didapatkan informasi bawah permukaan dari lokasi semburan. Hasil informasi yang diperoleh, dapat diperkirakan arah serta dilakukannya pemetaan terkait pola persebaran aliran semburan lumpur tersebut. Sebagaimana firman Allah dalam Q.S. al-Zalzalah {99} ayat 2 :

وَأَخْرَجَتِ الْأَرْضُ أَثْقَالَهَا ۖ

“Dan bumi telah mengeluarkan beban-beban berat (yang dikandung)nya.”
(Q.S al-Zalzalah{99}:2).

Dalam Q.S al-Zalzalah[99]:2, Allah menyatakan bahwa pada hari terjadinya guncangan dengan dahsyat, bumi akan mengeluarkan beban-beban berat yang dikandungnya, apapun beban yang dikeluarkan dapat berupa lumpur, gas, batuan, belerang dan garam serta air (kekayaan) yang ada di dalamnya bahkan mayat-mayat dari kubur (Rusydi, 2018). Sebagaimana adanya peristiwa letusan gunung Krakatau pada tahun 1883, gempa dan tsunami di Aceh pada tahun 2004, lumpur panas di Sidoarjo, Blora dan lain-lain yang begitu dahsyat sehingga mengeluarkan lava dan isi perut bumi lainnya.

Dalam bidang geofisika terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan, salah satu metode tersebut merupakan metode *gravity*. Pada desain penelitian yang akan dilakukan, diambil luasan 3 x 2 km dengan spasi 200 untuk memudahkan pengambilan data. Dengan kondisi lokasi penelitian yang tidak memungkinkan untuk mengambil data di lapangan maka digunakan pengambilan data sekunder yaitu melalui data satelit

Global Gravity Model Plus (GGMPlus). Data *gravity* yang diperoleh dari citra satelit GGMPlus ini menghasilkan data yang lebih rapat dan bagus dibandingkan data gravitasi pada citra satelit lainnya, kerapatan spasi antar titik yang didapat berjarak 200 meter. Metode *gravity* memiliki kelebihan dalam memberikan informasi yang cukup detail mengenai struktur geologi dan kontras densitas batuan. Metode ini memanfaatkan perbedaan nilai medan *gravity* akibat perbedaan densitas batuan di bawah permukaan. Metode ini dapat mendelineasi struktur bawah permukaan (Atef et al., 2016) baik berupa zona patahan yang ditandai dengan kontras densitas rendah dari batuan sekitarnya (Sugianto & Rahardinata, 2015).

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengidentifikasi struktur gunung lumpur. Berbagai metode geofisika juga diterapkan baik sendiri atau secara bersamaan. Salah satu penelitian tentang gunung lumpur menggunakan data *gravity* yang sudah pernah dilakukan di provinsi Golestan, Iran (Baghzendani et al., 2015) yang mendapatkan hasil model data gaya berat dengan densitas 2.55 sampai 2.239 gr/cm³. Dalam penelitian (Kopanina & Shvidskaya, 2023) yang dilakukan di kawasan gunung lumpur Sedati Sidoarjo, digunakan data gravitasi yang berhasil mendapatkan pemodelan inversi gravitasi 3D yang menunjukkan adanya blok batuan berkepadatan tinggi dengan nilai anomali tinggi sekitar 5mgal dan nilai densitas 2.6 sampai 3.00 gr/cm³ di sebelah barat yang diinterpretasikan sebagai cekungan yang menahan reservoir dari semburan lumpur. Dan terdapat anomali rendah -15 mgal di permukaan yang disebabkan massa batumannya sangat rendah dengan nilai massa jenis 2.2 sampai 1.8 gr/cm³.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana struktur bawah permukaan pada daerah penelitian?
2. Bagaimana pola sebaran kantong lumpur di bawah permukaan pada area penelitian berdasarkan data anomali metode *gravity*?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui struktur bawah permukaan pada daerah penelitian
2. Untuk mengetahui pola sebaran kantong lumpur di bawah permukaan pada area penelitian berdasarkan data anomali metode *gravity*

1.4 Batasan Masalah

1. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode gravitasi.
2. Penelitian ini menggunakan data GGMPlus yang diakses melalui <https://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/data/> dengan letak lokasi penelitian berada pada kawasan semburan lumpur Kesongo, Jawa Tengah dengan luas area 3 x 2 km.
3. *Software* yang digunakan adalah *Microsoft Excel*, *Oasis Montaj*, *Global Mapper 15*, *Matlab 2013*, *Surfer13*, dan *Google Earth*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat memberikan informasi terkait sebaran kantong lumpur di bawah permukaan serta geologi bawah permukaan daerah semburan lumpur kesongo berdasarkan metode *gravity*, sehingga dapat dijadikan acuan Pemerintah setempat untuk dapat ditindaklanjuti dan sebagai acuan dalam pengambilan keputusan untuk mitigasi bencana yang mungkin dapat ditimbulkan akibat adanya semburan lumpur.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mud Volcano

2.1.1 Pengertian Gunung Lumpur (*Mud Volcano*)

Mud volcano merupakan sebuah istilah umum dalam ilmu geologi yang bersifat generik. *Mud volcano* atau gunung lumpur merupakan hasil dari suatu formasi batuan berupa pasir butiran hingga lempung dan mempunyai densitas kecil yang mengalami perubahan akibat adanya tekanan aktivitas tektonik yang menyebabkan formasi tersebut tidak terkonsolidasi (*unconsolidation formation*) karena sifatnya yang lentur. *Mud volcano* atau gunung lumpur dihasilkan oleh adanya aliran fluida dan semburan lumpur yang umumnya terjadi pada cekungan-cekungan sedimentasi di seluruh dunia. Gunung lumpur terjadi ketika material, baik berupa batuan, cairan maupun gas keluar dari formasi batuan pada kedalaman tertentu yang mempunyai kondisi tekanan luap (*overpressure*), yang kemudian membentuk morfologi yang khas (Burhannudinnur, 2019).

Istilah *mud volcano* mengacu pada bentuk kerucut vulkanik yang terbentuk secara alami, namun kenampakan dari *mud volcano* sebenarnya tidak selalu bentuk kerucut atau *dome*, tetapi dapat berupa massa yang tidak kompeten (*incompetent masses*). Gunung lumpur menunjukkan adanya banyak kemiripan dengan vulkanisme magma dan banyak terminologi yang digunakan dalam menjelaskan proses terjadinya semburan dan proses terbentuknya gunung lumpur. Istilah gunung lumpur ini umumnya digunakan untuk struktur besar yang dihasilkan dari letusan breksi lumpur ke permukaan oleh gaya apung dan tekanan yang berlebihan (Bash, 2015).

Gunung lumpur di daratan terbentuk pada dua daerah, yaitu di daerah gunung api aktif dan di daerah cekungan minyak dan gas bumi. Pada daerah gunung api aktif umumnya terjadi pelepasan gas dan lumpur yang naik ke permukaan bumi melewati lapisan sedimen halus. Hal ini menyebabkan terjadinya erupsi kecil yang membentuk suatu kerucut berukuran kecil dengan tinggi maksimal 2 meter.

Fenomena gunung lumpur di Indonesia sudah banyak berkembang, ada beberapa penelitian yang sebelumnya pernah dilakukan oleh Burhannudinnur (2012) terkait gunung lumpur yang terletak di Zona Rembang daerah Kradenan, Gunung lumpur yang diteliti diantaranya adalah Gunung Lumpur Kesongo, Gunung Lumpur Kuwu, Gunung Lumpur Cangkringan, Gunung Lumpur Medang dan Gunung Lumpur Anak Kesongo.

2.1.2 Material Pembentuk Gunung Lumpur

Komposisi dari *mud volcano* terdiri dari berbagai fase yaitu padat, cair, gas dan plastik (S. Amelinda. & Santosa J., 2016). Komposisi utama dari gunung lumpur yakni, breksi lumpur, air dan gas. Jumlah relatif dan sifat kualitatif dari komponen tersebut sangat bervariasi bergantung pada geologi daerah dan proses lokal di tempat terjadinya semburan. Material yang dikeluarkan gunung lumpur berupa butiran sangat halus yang tersuspensi dalam cairan, seperti air atau hidrokarbon. Lumpur, gas, batuan, belerang dan garam (di wilayah kering) serta air akan diletuskan ke permukaan bumi melalui rekahan-rekahan yang terbentuk di sekitar sumber lumpur, sehingga terjadi semburan lumpur dari dalam bumi. Breksi lumpur, pada dasarnya terdiri dari matriks yang kaya akan mineral tanah liat dan merupakan komponen utama dari pembentukan gunung lumpur.

Menurut Kopf (2002) dalam (E.Shnyukov & Yanko H., 2020) , Beberapa gunung lumpur tidak bersifat eksplosif melainkan bersifat erupsi. Lumpur muda dan kuat memiliki tipe letusan eksplosif dan dapat melempar breksi lumpur dengan rasio matriks klastik yang sangat tinggi, sedangkan breksi lumpur yang lebih tua dari gunung lumpur dapat bebas dari kandungan lumpur hingga 99% pada aktivitas semburannya. Air dalam ekstrusi gunung lumpur umumnya berasal dari sumber dangkal serta dalam dan secara tidak langsung diturunkan melalui berbagai macam proses. Aliran gunung lumpur terbentuk dari viskositas yang berbeda, seperti campuran air dari breksi lumpur dan gunung lumpur.

Gas yang dihasilkan dan dikeluarkan hampir selalu didominasi oleh gas metana kurang lebih 70-99%. Hal ini disebabkan karena sebagian besar gunung lumpur berakar sangat dalam, sehingga gas metana lebih mendominasi dibandingkan gas biogenik (Etiope, 2005). Menurut Satyana dkk (2008), material gas metana yang dilepaskan pada erupsi gunung lumpur sekitar 86% dengan jumlah karbon dioksida, hidrogen sulfida, dan nitrogen lebih sedikit. Gas biasanya dilepaskan dari lubang gryphon dan dari tanah di area yang luas, selain itu gas tersebut keluar dari tutup yang berlumpur.

Allah berfirman bahwa bumi dibuat sebagai hampan yang luas tempat kehidupan manusia dan makhluk lainnya, meskipun bentuk bumi mendekati bulat seperti bola tetapi karena sangat besar dibandingkan manusia, maka permukaan bumi tampak datar dan luas terhampar. Dalam Q.S al-Baqarah[2]:22 disebutkan:

الَّذِي جَعَلَ لَكُمُ الْأَرْضَ فِرَاشًا وَالسَّمَاءَ بِنَاءً يُوَنِّزُ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجَ بِهِ ۖ مِنَ الثَّمَرَاتِ رِزْقًا لَّكُمْ ۚ فَلَا تَجْعَلُوا لِلَّهِ أُنْدَادًا وَأَنْتُمْ تَعْلَمُونَ ﴿٢٢﴾

“(Dialah) yang menjadikan bagimu bumi (sebagai) hamparan dan langit sebagai atap, dan Dialah yang menurunkan air (hujan) dari langit, lalu Dia menghasilkan dengan (hujan) itu buah-buahan sebagai rezeki untuk kamu. Oleh karena itu, janganlah kamu mengadakan tandingan-tandingan bagi Allah, padahal kamu mengetahui.” (Q.S al-Baqarah[2]:22)

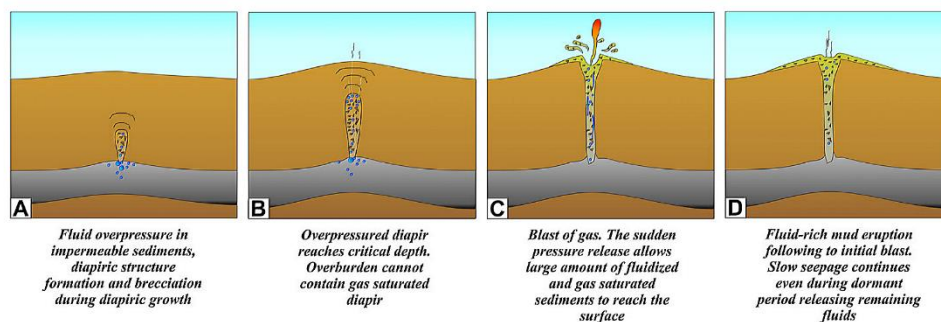
Manusia umumnya menempati wilayah-wilayah dataran, baik tinggi maupun rendah yang subur. Daerah dataran tersebut terbentuk melalui proses geologi dalam kurun waktu yang lama. Contohnya proses pembentukan gunung yang dimulai dari proses pelapukan dan terjadi erosi lalu proses pengendapan. Material-material hasil pelapukan dan erosi ini dihamparkan dan diendapkan di dataran yang lebih rendah. Hamparan-hamparan tersebut bisa mengandung mineral, gas yang dibawa dari batuan induknya (Rubini, 2016).

2.1.3 Proses Terbentuknya Gunung Lumpur

Banyak hipotesis yang telah diajukan untuk menjelaskan proses terbentuknya gunung lumpur. Salah satu teori menjelaskan bahwa gunung lumpur terbentuk akibat meningkatnya diapir lumpur dengan suplai gas dan cairan yang menjadi kekuatan pendorong dalam vulkanisme lumpur. Menurut Akesson (2008), vulkanisme lumpur melibatkan pembentukan formasi thermogenik dan pelepasan gas yang merupakan proses alami yang sampai batas tertentu secara independen akan dapat memaksa material yang terkubur pada kedalaman tertentu untuk keluar menuju permukaan.

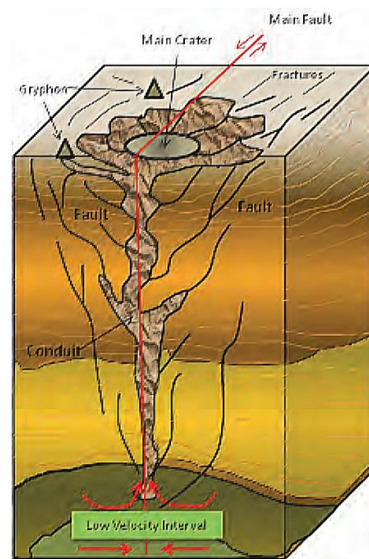
Gunung lumpur banyak terjadi di sepanjang zona depresi. Keberadaan *mud volcano* sangat berhubungan dengan aktivitas tektonik yang dimana fluida akan keluar dari daerah yang mengalami deformasi kerak kompleks akibat tektonik transpressional dan transtensional. Interaksi lempeng yang bertumbukan menghasilkan kondisi tekanan berlebih dan mengakibatkan terjadinya

penumpukan sedimen dan menghasilkan pembentukan diapir (P. Bambang et al., 2012). Permeabilitas batuan yang rendah menjadi penghalang fluida formasi yang tersimpan dalam pori batuan mencapai keseimbangan hidrostatik, sehingga terjadi *overpressure*. Jika kondisi awal permukaan terganggu, lumpur, fluida serta gas dapat berpotensi naik ke permukaan melalui patahan maupun rekahan. Adanya rembesan berupa lumpur dan gas yang muncul di permukaan, menandakan munculnya *mud volcano* (Mazzini, 2009).



Gambar 2.1 Proses terjadinya semburan lumpur (Mazzini, 2009)

Gunung lumpur terbentuk dari keluarnya gas alam yang naik ke permukaan bumi melalui saluran (*strike slip fault*) dan membawa lumpur yang memiliki kepadatan lebih rendah daripada suksesi sedimen di sekitarnya. Cairan, gas serta air permukaan akan dikeluarkan dalam bentuk kerucut seperti gunung dan membentuk kawah, kolam lumpur (*salses*) dan kerucut (*gryphons*) (P. Bambang et al., 2012). Bahan-bahan yang dibawa oleh aliran biasanya berupa batu-batu, lumpur, belerang, garam serta gas dari dalam membentuk kolom vertikal.



Gambar 2.2 Struktur dasar dan anatomi gunung lumpur berbentuk kerucut (P.Bambang et al., 2012)

Ada 4 syarat tertentu yang harus terpenuhi dalam perkembangan gunung lumpur (E.Shnyukov & Yanko H., 2020) :

1. Adanya lapisan tebal batuan lempung.
2. Kondisi tektonik yang menguntungkan, seperti adanya prisma akresi pada zona subduksi.
3. Patahan tektonik yang ada pada daerah perpotongan.
4. Struktur diapiric.

Adapun penjelasan terkait pemicu gunung lumpur yakni akibat adanya gaya dari dalam perut bumi (endogenik). Menurut Satyana dkk (2008), gunung lumpur adalah suatu intrusi massa yang relative bergerak (*mobile*) terhadap strata atau lapisan di sekitarnya yang disebabkan adanya gaya apung dan perbedaan tekanan yang berlebih (*oversaturated*) kemudian ketika massa yang mengintrusi sampai pada permukaan, maka terjadilah fenomena yang dikenal dengan sebutan gunung lumpur (*mud volcano*).

Gunung lumpur menunjukkan siklus aktivitas yang berbeda. Frekuensi semburan yang terjadi dikendalikan oleh adanya tekanan lokal dalam lapisan sedimen, sementara mekanisme dan evolusi semburan sangat bergantung pada keadaan konsolidasi serta gas yang terkandung dalam sedimen berbutir halus (P. Bambang et al., 2012).

2.1.4 Faktor Penyebab Keluarnya Lumpur

Beberapa gunung lumpur mengalami aktivitas yang cukup kontinu, dengan volume serta intensitas vulkanisme lumpur yang bervariasi. Gunung lumpur memiliki beberapa jenis frekuensi letusan yang aktif Akesson (2008).

Ada dua faktor yang menyebabkan keluarnya semburan lumpur (Krisnayanti & Agustawijaya, 2014):

1. Faktor Alam

Munculnya lumpur panas selalu dikaitkan dengan adanya gunung lumpur. Beberapa ahli geologi percaya dan menyebutkan bahwa semburan lumpur termasuk kedalam bencana alam yang dipicu oleh aktivitas tektonik berupa gempa bumi beberapa hari sebelum terjadi semburan.

Munculnya gunung lumpur juga dipicu dengan adanya lumpur yang bercampur dengan gas metana yang mendapatkan tekanan berlebih di bawah permukaan yang berusaha keluar menuju permukaan bumi.

2. Kegiatan Manusia

Selain faktor alam, kegiatan manusia juga dapat memicu munculnya semburan lumpur ke permukaan. Seperti pemasangan ring dan juga pengeboran minyak bumi yang dilakukan.

2.1.5 Klasifikasi Gunung Lumpur

Klasifikasi gunung lumpur dibagi menjadi 2, yakni klasifikasi menurut dimensinya dan klasifikasi menurut sifatnya (Remizovschi et al., 2018). Klasifikasi gunung lumpur menurut dimensinya antara lain; gryphons, kerucut lumpur dan gunung lumpur. Tinggi gryphon biasanya mencapai 3 meter, kerucut lumpur diatas 3 meter dan gunung lumpur diatas 50 meter. Sedangkan menurut sifatnya, gunung lumpur diklasifikasikan dalam tiga kelas, diantaranya:

1. Kelas 1 : tipe Lokbatan
2. Kelas 2 : tipe Chikishlyar
3. Kelas 3 : tipe Schugin

Gunung lumpur dapat diklasifikasikan menjadi gunung lumpur aktif, mati/terkubur serta semburan lumpur yang dapat menunjukkan mayoritas proses *land-building*. Gunung lumpur aktif dapat diidentifikasi melalui keberadaan aktivitas tidur yang terbatas (*dormant*). Gunung lumpur dapat dikatakan dalam fase tidur yakni tidak ada aktivitas rembesan ataupun deformasi pada permukaan.

2.2 Teori Dasar Gravitasi

2.2.1 Teori Gravitasi Newton

Isaac Newton mengemukakan, bahwa ada suatu gaya pada suatu jarak yang memungkinkan adanya interaksi antar dua benda atau lebih (Mosey & Lumi, 2016). Hukum gravitasi Newton menyimpulkan bahwa gaya gravitasi atau gaya tarik-menarik dapat berlaku secara universal dan sebanding dengan massa kedua benda berbanding terbalik dengan kuadrat jarak kedua benda tersebut (Giancoli, 2009), dan dirumuskan :

$$F = G \frac{m_2 m_1}{r^2} \quad (2.1)$$

Dimana, F merupakan gaya tarik-menarik antara kedua benda (N), m adalah massa benda (kg) dan G merupakan konstanta gravitasi ($6,67 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$).

Jika diasumsikan bahwa bumi itu bulat, maka gaya yang diberikan oleh bumi yang bermassa M kepada suatu benda dengan massa m diatas permukaan bumi, maka persamaan menjadi (Halliday dan Resnick, 2010) :

$$F = G \frac{mM}{r^2} \quad (2.2)$$

Karena nilai dari jarak benda m ke permukaan bumi sangat kecil, maka nilai r sebanding dengan jari-jari bumi R , sehingga persamaan menjadi :

$$F = G \frac{mM}{R^2} \quad (2.3)$$

Berdasarkan Hukum II Newton, gaya yang bekerja pada benda yang memiliki massa m akan mengalami percepatan a , dan dapat dirumuskan :

$$F = m.a \quad (2.4)$$

Dimana :

F = Gaya yang menyebabkan massa benda bergerak (N)

m = Massa benda (kg)

a = Percepatan (m/s^2)

Jika percepatan (α) pada metode *gravity* merupakan percepatan gravitasi maka didefinisikan sebagai g sehingga persamaan menjadi (Hinze, von Frese, dan Saad, 2013) :

$$F = m.g \quad (2.5)$$

Dimana :

F = Gaya yang menyebabkan massa benda bergerak (N)

g = Percepatan gravitasi di atas permukaan bumi (m/s^2)

m = Massa benda (kg)

Percepatan pada benda m hanya disebabkan oleh gaya tarik bumi (Rahman dkk, 2014), maka persamaan (2.3) dan (2.5) digabungkan sehingga didapat :

$$m \cdot g = G \frac{m \cdot M}{R^2} \quad (2.6)$$

Karena benda m memiliki massa sangat kecil dibandingkan dengan massa bumi M , sehingga percepatan gravitasi dari massa benda m dengan massa benda M hanya dipengaruhi oleh tarikan massa M .

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (2.7)$$

Dimana, g merupakan percepatan gravitasi diatas permukaan bumi (m/s^2) , G merupakan konstanta gravitasi ($6,67 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$), M merupakan massa bumi (kg) dan R merupakan jari-jari bumi (m).

2.2.2 Metode Gravitasi

Metode gravitasi didasarkan pada hukum Newton tentang gravitasi. Metode ini disebut juga dengan metode gaya berat. Metode gravitasi merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengetahui keadaan geologi bawah permukaan berdasarkan distribusi variasi medan gravitasi bumi. Variasi medan gravitasi disebabkan adanya variasi densitas batuan di bawah permukaan (Kurniawan dan Sehad, 2012), sehingga dalam pelaksanaannya yang diselidiki adalah perbedaan gravitasi dari satu titik pengamatan terhadap pengamatan lainnya (Sulistianingsih, 2009). Metode ini memiliki keefektifan dalam identifikasi struktur geologi yang memiliki kontras densitas baik yang bersifat lokal sampai dengan

regional pada arah lateral (Sudrajat, 2023). Metode gravitasi sering digunakan dalam mempelajari batuan dasar, lubang-lubang di dalam massa batuan dan shaft terpendam.

2.2.3 Potensial Gravitasi

Pada potensial gravitasi, prinsip superposisi berlaku, yang berarti potensial gravitasi dari sekumpulan massa dari masing-masing massa. Prinsip superposisi dapat diterapkan pada potensial gravitasi dalam distribusi massa yang bersifat kontinu. Persamaan fungsi potensial skalar oleh massa dm pada titik (x,y,z) sepanjang jarak antara $P(0,0,0)$ dan r dapat dinyatakan dalam persamaan (Telford dkk, 1990) :

$$dU(P) = G \frac{dm}{r} = G\rho \frac{dxdydz}{r} \quad (2.8)$$

Untuk $\rho(x, y, z)$ merupakan densitas dan $r = x^2 + y^2 + z^2$.

2.2.4 Rapat Massa Batuan

Menurut (Kadir., 1999 dalam Naufal & Supriyadi, 2015) rapat massa batuan merupakan perbandingan antara massa suatu batuan terhadap volumenya. Batuan dengan pori-pori yang terisi oleh fluida seperti air, minyak ataupun gas dapat dinyatakan sebagai rapat massa dengan n komponen. Rapat massa (kontras densitas) pada batuan merupakan sasaran utama pada metode ini, Ada beberapa faktor yang mempengaruhi nilai rapat massa batuan diantaranya rapat massa butir pembentuknya, porositas batuan serta kandungan fluida yang terdapat dalam pori-pori batuan, proses pembentukan, pemadatan batuan akibat adanya tekanan dan derajat pelapukan batuan (Telford, dkk, 1990). Rapat massa batuan ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Rapat Massa Batuan (Telford, 1990)

Tipe Batuan	Rentang Densitas (g/cm³)	Rata-rata (g/cm³)
Batuan Sedimen		
Overbunden		1,92
Tanah	1,2 – 2,4	1,92
Lumpur	1,63 – 2,60	2,21
Kerikil	1,7 – 2,3	2,0
Pasir	1,7 – 2,3	2,0
Batuan pasir	1,61 – 2,76	2,35
Serpih	1,77 – 3,20	2,40
Lempung	1,93 – 2,90	2,55
Dolomit	2,28 – 2,90	2,70
Batuan Beku		
Riolit	2,35 – 2,70	2,52
Andesit	2,4 – 2,8	2,61
Granit	2,50 – 2,81	2,64
Granodiorit	2,67 – 2,89	2,73
Propiri	2,60 – 2,89	2,74
Kuarsa diorit	2,62 – 2,96	2,79
Diorit	2,72 – 2,99	2,85
Lava	2,80 – 3,00	2,90
Diabas	2,5 – 3,2	2,91
Basal	2,7 – 3,3	2,99
Gabro	2,7 – 3,5	3,02
Peridotit	2,78 – 3,37	3,15
Asam Beku	2,30 – 3,11	2,16
Basa Beku	2,09 – 3,17	2,79
Batuan Metamorf		
Kuarsit	2,5 – 2,7	2,6
Sekis	2,39 – 2,90	2,64
Graywek	2,6 – 2,7	2,65
Marmer	2,6 – 2,9	2,75
Serpenit	2,4 – 3,1	2,78
Slat	2,7 – 2,9	2,79
Gneis	2,59 – 3,00	2,80
Ampibolit	2,90 – 3,04	2,96
Eclogit	3,20 – 3,54	3,37

2.3 Data Gravitasi GGMplus

GGMPlus (Global Gravity Model Plus) merupakan gabungan dari satelit gravitasi yaitu GRACE (ITG2010), GOCE (TIM-4), dan EGM2008 yang dipadukan dengan informasi data gravitasi topografi beresolusi tinggi yang berasal dari data topografi pada resolusi sekitar 200 m. GGMplus menyediakan lima fungsi medan gravitasi, yang meliputi percepatan gravitasi, gravitasi *disturbance*, defleksi vertikal utara-selatan dan timur-barat, serta ketinggian *quasigeoid* (Agustin & Wibawa, 2022). GGMplus menyediakan peta medan gravitasi terkomputerisasi pada 0,002 deg (7,2 arc-detik, dengan Resolusi 220 m searah lintang) untuk semua area daratan Bumi dalam jarak 60 lintang geografis, dan zona laut ~ 10 km yang berdampingan di sepanjang garis pantai (Hirt, dkk, 2013).

Satelit GRACE (*Gravity Recovery and Climat Experiment*) merupakan satelit gravimetri yang memiliki misi untuk menyediakan model medan gravitasi bumi (Zakariya, dkk . 2022). Beroperasi dengan cara memonitor perubahan jarak antara dua pasang satelit GRACE pada orbitnya untuk mendeteksi gaya berat bumi. Kedua satelit ini melaju dengan lintasan orbit dengan jarak sekitar 220 km yang tersambung oleh *K-band microwave*. Untuk melihat pergerakan akibat gaya non-gravitasi dari satelit, keduanya dilengkapi dengan *starcamera* yang digunakan untuk mempertahankan posisi kedua satelit pada posisi orbitnya dan akselerometer untuk menghilangkan efek dari gaya lain selain gaya berat. Satelit GRACE juga dilengkapi dengan antenna receiver GPS untuk menentukan posisi dari satelit GRACE. Ketinggian orbit satelit GRACE adalah 485 km-300 km.

Satelit GOCE (*Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer*) diluncurkan pada tanggal 17 maret 2009 sebagai bagian dari misi ESA (European

Space Agency) dalam bidang geodesi dan geodinamik berupa kombinasi dari SGG (Satellite Gravity Gradiometry) dan SST (Satellite-to-Satellite Tracking). Tujuan utama dari misi GOCE yaitu untuk menentukan gravity field statis berupa geoid dan gravity anomaly dengan akurasi 1 sentimeter untuk tinggi geoid, dan 1 miligal untuk gravity anomaly, pada spasial grid 100 kilometer dipermukaan bumi bahkan lebih kecil dari itu. Data yang dihasilkan oleh GOCE memberikan model yang unik dari medan gaya berat bumi dan juga dalam hal representasi bidang ekipotensial yang diwakili oleh geoid (Herlin,dkk, 2018).

Earth Gravitational Model 2008 (EGM 2008) adalah model Geopotensial Global yang dipublikasikan oleh *National Geospasial-Intellegence Agency* (NGA) dan salah satu model yang mempunyai data anomali gravitasi dan nilai undulasi geoid. Informasi gaya berat di dapatkan dari pengukuran anomaly free air dengan grid 5 menit. Grid tersebut dibentuk dari kombinasi data terestrial, turunan altimetry dan data gaya berat dari airborne. Kelebihan dari data GGMPlus ini dibanding pengukuran data lapangan yaitu tidak memerlukan biaya dan dapat melakukan perluasan wilayah penelitian dengan mudah.

Ketersediaan data gravitasi GGMPlus mencakup di daratan dan area dekat pantai dalam 60° LU dan 60° LS, yang meliputi hampir 80% massa permukaan bumi dan 99,7% area berpenduduk yang dapat dimanfaatkan untuk survey geofisika di wilayah Indonesia (Hirt dkk, 2013 dalam Sudrajad, 2023).

Sebagai data sekunder dengan resolusi tinggi, GGMPlus memberikan gambaran yang lebih detail terkait kondisi medan gravitasi pada suatu daerah. Hasil pengolahan anomali gravitasi dari data GGMplus dapat memberikan informasi

dalam menentukan densitas, kedalaman, bentuk geometri dari struktur penyebab anomali di bawah permukaan melalui suatu pemodelan.

2.3.1 Koreksi Dalam Metode Gravitasi GGMPlus

A. Koreksi Bouguer

Koreksi *Bouguer* memperhitungkan massa batuan yang terdapat di antara stasiun pengukuran dengan bidang *geoid*. Koreksi ini dilakukan dengan menghitung tarikan gravitasi yang disebabkan oleh batuan berupa *slab* dengan ketebalan H dan densitas rata-rata ρ . Koreksi ini dihitung dengan persamaan (Telford, dkk., 1990):

$$g_B = 2\pi G \rho h \quad (2.9)$$

Dimana :

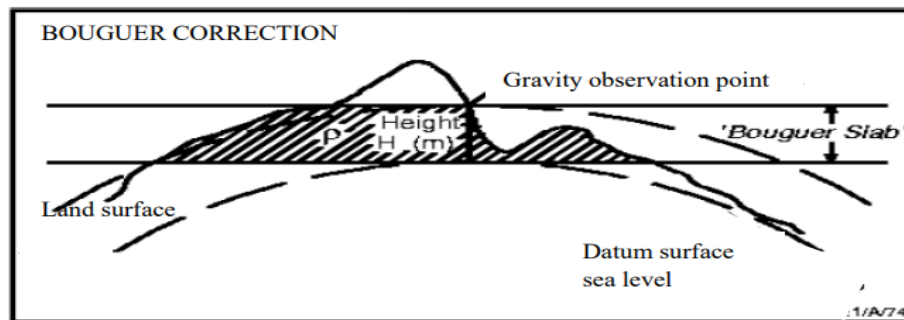
$\pi = 3,14$; $G = 6,67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} det^{-3}$; ρ dalam gr/cm^3 ; dan h dalam meter, maka :

$$g_B = 0,04192 \rho h \text{ mGal} \quad (2.10)$$

Tanda koreksi *Bouguer* berbanding terbalik dengan koreksi udara bebas. Pada koreksi *Bouguer*, jika titik pengukuran berada di atas bidang *geoid*, maka koreksi akan dikurangkan. Hal ini disebabkan oleh adanya massa di atas bidang *geoid* yang membuat nilai g titik pengukuran lebih besar dari nilai g pada bidang *geoid*, sehingga untuk menyesuaikan titik pengukuran ke bidang *geoid* koreksi harus dikurang. Sebaliknya, jika titik pengukuran berada di bawah bidang *geoid*, koreksi akan ditambah.

Metode penentuan densitas batuan dapat kita cari dengan menggunakan metode paranis, yaitu metode dengan pendekatan analitis dimana akan terbentuk nilai sebaran densitas batuan pada level ketinggian yang berbeda-beda sehingga

akan terlihat nilai rata-rata sebuah densitas pada batuan yang berada di daerah peneli.

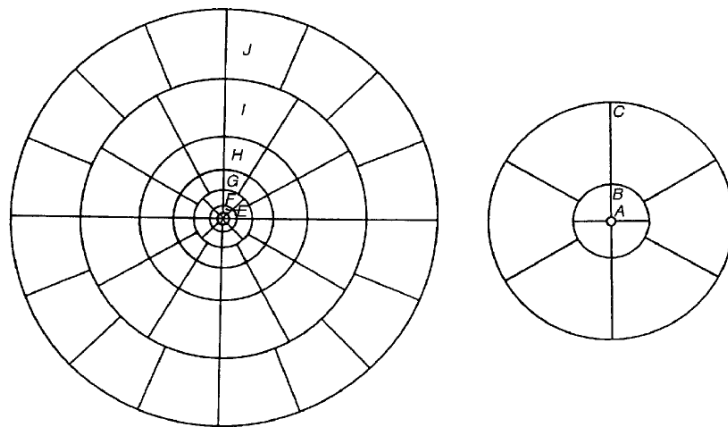


Gambar 2.3 Koreksi Bouger (Zhou, 1990 dalam Darma Aji , dkk, 2019)

B. Koreksi Medan

Koreksi medan atau topografi dilakukan untuk mengoreksi adanya pengaruh penyebaran massa yang tidak teratur di sekitar lokasi titik pengukuran. Dalam proses koreksi Bouguer diasumsikan bahwa titik pengukuran di lapangan berada pada suatu bidang datar yang sangat luas. Sedangkan seringkali kenyataan di lapangan memiliki topografi yang berundulasi, seperti adanya lembah dan gunung. Oleh karena itu, jika hanya melakukan koreksi bouguer saja hasilnya akan kurang sempurna.

Dengan kondisi tersebut maka koreksi medan ditambahkan pada nilai gravitasi. Untuk perhitungan nilai koreksi medan dapat dilakukan menggunakan Hammer Chart seperti gambar 2.4.



Gambar 2.4 Hammer Chart (Reynolds, 2011)

Hammer chart dibedakan berdasarkan besarnya nilai radius dari titik pengukuran gravitasi, dimana terdapat zona inner dan zona outer. Adapun pembagian zona sebagai berikut:

- a. Zona B: radius 6,56 - 54,6 ft dan dibagi menjadi 4 sektor
- b. Zona C: radius 54,6 – 175 ft dan dibagi menjadi 6 sektor
- c. Zona D : radius 175 – 558 ft dan dibagi menjadi 6 sektor
- d. Zona E : radius 558 – 1280 ft dan dibagi menjadi 8 sektor
- e. Zona F : radius 1280 – 2936 ft dan dibagi menjadi 8 sektor
- f. Zona G : radius 2936 – 5018 ft dan dibagi menjadi 12 sektor
- g. Zona H : radius 5018 – 8575 ft dan dibagi menjadi 12 sektor
- h. Zona I : radius 8575 – 14612 ft dan dibagi menjadi 12 sektor

Besar nilai koreksi medan didapatkan dengan rumus: (Long dan Kaufmann, 2010).

$$TC = \frac{2\pi G\rho}{N} (r_2 - r_1) + \sqrt{(r_1^2 + z^2)} - \sqrt{(r_2^2 + z^2)} \quad (2.11)$$

Dengan:

G = Konstanta gravitasi ($6,67 \times 10^{-11} N \cdot m^2/kg^2$)

ρ = Densitas rata-rata daerah penelitian (gr/cm^3)

r_1 = Radius bagian dalam suatu zona (m)

r_2 = Radius bagian luar suatu zona (m)

z = Beda ketinggian dari titik pengamatan (m)

N = Jumlah segmen dalam cincin Hammer Chart

C. Anomali Bouguer

Setelah melakukan proses koreksi di atas, maka akan didapatkan nilai anomali bouguer lengkap (*Complete Bouguer Anomaly*). Anomali Bouguer Lengkap adalah anomali yang disebabkan oleh variasi densitas secara lateral pada batuan di kerak bumi yang sudah berada di bidang referensi yaitu bidang geoid. Untuk mendapatkan nilai anomali bouguer lengkap maka dapat melalui persamaan di bawah ini:

$$ABL = FAA - BC + TC \quad (2.12)$$

Dengan :

ABL = Anomali Bouguer Lengkap (mGal)

FAA = Free Air Anomali (mGal)

BC = Bouguer Correction (mGal)

TC = Terrain Correction (mGal)

Nilai anomali Bouguer di atas adalah anomali bouguer lengkap atau Complete Bouguer Anomaly (CBA). Untuk anomali Bouguer tanpa memasukkan koreksi medan ke dalam perhitungan adalah Simple Bouguer Anomaly (SBA) atau Anomali Bouguer Sederhana.

D. Reduksi Bidang Datar

Data anomali *bouguer* lengkap masih terletak pada permukaan topografi yang memiliki variasi ketinggian. Perbedaan ketinggian ini dapat mengakibatkan distorsi pada data medan gravitasi. Oleh karena itu, untuk meminimalisir adanya distorsi dalam analisa lanjut diperlukan data anomali medan gaya berat pada bidang datar. Proses ini menggunakan metode sumber ekuivalen titik massa ini adalah dengan menentukan sumber ekuivalen titik massa diskrit pada kedalaman tertentu di bawah permukaan dengan memanfaatkan data anomali *bouguer* lengkap.

2.4 Analisis Spektrum

Analisa energi spektrum atau *Energy Spectral Analysis* (ESA) adalah alat dari metode gravitasi yang menggunakan persamaan transformasi fourier untuk menentukan kedalaman anomali. Transformasi fourier dilakukan untuk mengubah data gravitasi dari fungsi amplitudo anomali gravitasi secara spasial menjadi fungsi amplitudo anomali gravitasi dalam domain frekuensi. Secara matematis persamaan transformasi fourier anomali gayaberat pada lintasan yang diinginkan sebagai berikut: (Blakely, 1996).

$$F(g_z) = 2\pi G\mu e^{|k|(z_0 - z')} \quad (2.13)$$

Dimana:

(g_z) = Anomali gayaberat (mGal)

G = Konstanta gravitasi ($6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$)

μ = Anomali rapat massa (gr/cm^3)

k = Bilangan gelombang (Rad/m)

z_o = Ketinggian titik amat (m)

z' = Kedalaman benda anomali (m)

Apabila distribusi rapat massa bersifat random dan tidak ada korelasi antara masing-masing nilai gayaberat, maka nilai $\mu = 1$. Sehingga hasil transformasi fourier anomali gayaberat menjadi:

$$A = C e^{|k|(z_o - z')} \quad (2.14)$$

Dimana:

A = Amplitudo (m)

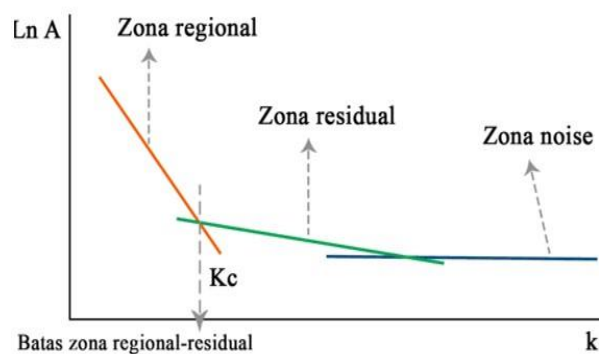
C = Konstanta

Selanjutnya dengan melogaritmakan hasil transformasi fourier di atas, maka akan diperoleh hubungan antara Logaritma natural amplitudo ($\ln A$) dengan bilangan gelombang k dan kedalaman ($z_o - z'$):

$$\ln A = (z_o - z')|k| + \ln C \quad (2.15)$$

Persamaan di atas merupakan nilai estimasi kedalaman anomali dari gradien masing-masing grafik spektrum pada tiap lintasan. Nilai Logaritma natural amplitudo ($\ln A$) diplotkan pada bilangan gelombang (k). Grafik tersebut akan memperlihatkan dua tren anomali yang berpotongan. Tren anomali dengan (k)

bernilai kecil merupakan zona regional. Sedangkan zona residual atau lokal direpresentasikan dengan (k) bernilai besar. Setelah dilakukan plot kurva, maka dilakukan estimasi kedalaman dengan cara membuat garis regresi linier pada zona residual dan zona regional. Ilustrasi penentuan kedalaman pada proses regresi data logaritma hasil transformasi fourier ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kurva RAPS (Blakely, 1996)

Dalam penelitian ini pada proses transformasi fourier dilakukan dengan menggunakan bantuan aplikasi Oasis Montaj. Sebuah grid dalam domain spasial ditransformasikan menjadi domain frekuensi menggunakan *fast fourier transform* (FFT). Hasil dari FFT merupakan kurva *radially averaged power spectrum* (RAPS) sehingga dapat memperkirakan kedalaman dengan mengestimasi nilai bilangan gelombang (k) dan Logaritma natural Amplitudo ($\ln A$). Hubungan (k) dengan panjang gelombang (λ) diperoleh dari persamaan :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} \quad (2.16)$$

$$\lambda = N \cdot \Delta x \quad (2.17)$$

Dimana :

N = Lebar Jendela

Δx = Panjang lintasan

2.5 Pemisahan Anomali

Anomali bouguer lengkap yang diperoleh dari nilai anomali gravitasi disebabkan oleh perbedaan densitas batuan di daerah dangkal dan daerah yang lebih dalam dari permukaan. Efek dari batuan bawah permukaan yang dangkal merupakan anomali residual dan efek batuan di daerah dalam disebut anomali regional. Moving average adalah salah satu teknik untuk memisahkan anomali regional dan anomali residual pada data anomali bouguer lengkap. Moving average dilakukan dengan cara melewatkan anomali yang memiliki frekuensi rendah (*Low pass filter*). Hal itu dikarenakan frekuensi rendah mempunyai penetrasi yang lebih dalam maka output dari proses ini adalah anomali regional.

Secara sistematis persamaan moving average adalah sebagai berikut:(Setiawan, 2019)

$$\Delta g_{reg} = \frac{\Delta g(i-n) + \dots + \Delta g(i) + \dots + \Delta g(i+n)}{N} \quad (2.18)$$

Dimana:

Δg_{reg} = Anomali Regional

N = Lebar jendela

i = Nomor stasiun

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

Hal penting pada proses *moving average* adalah penentuan lebar jendela yang tepat. Bilangan gelombang *cutoff* yang diperoleh dari analisis spektral digunakan sebagai masukan dalam perhitungan menentukan lebar jendela. Untuk menentukan lebar jendela menggunakan persamaan di bawah ini: (Blakely, 1996)

$$N = \frac{2\pi}{k_c \Delta x} \quad (2.19)$$

Dimana,

N = Lebar jendela

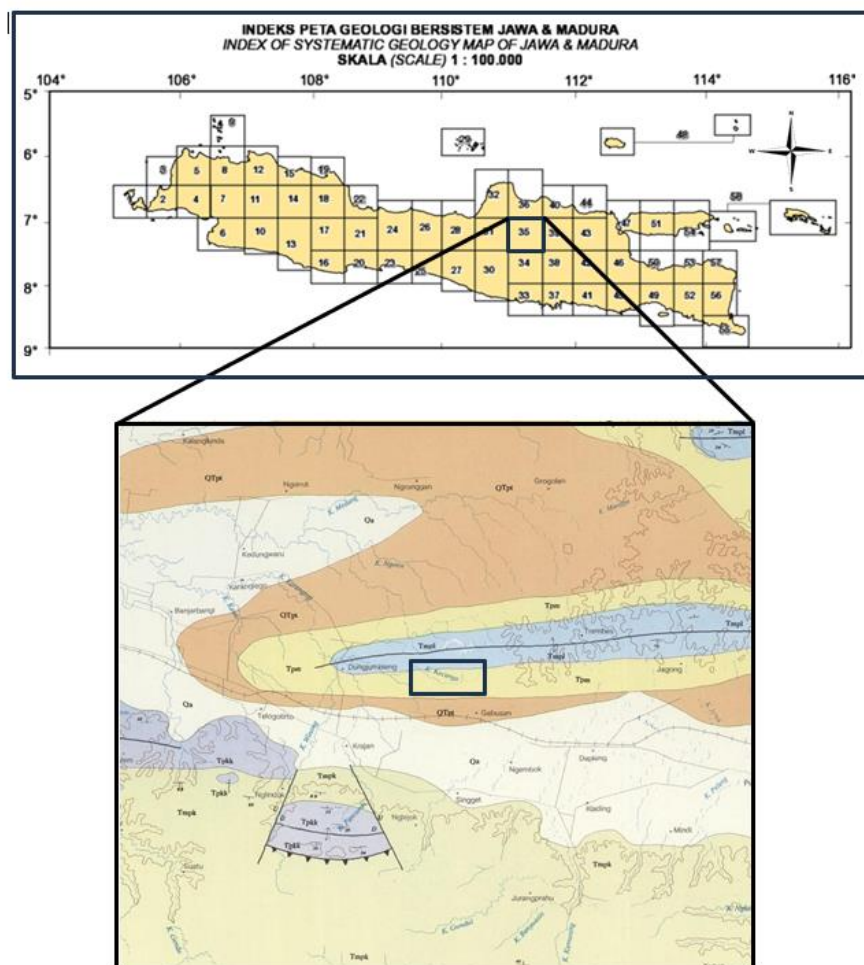
k_c = Bilangan gelombang *cut off*

Δx = Panjang lintasan

Untuk anomali residual didapatkan dengan cara anomali bouguer lengkap dikurangkan dengan anomali regional.

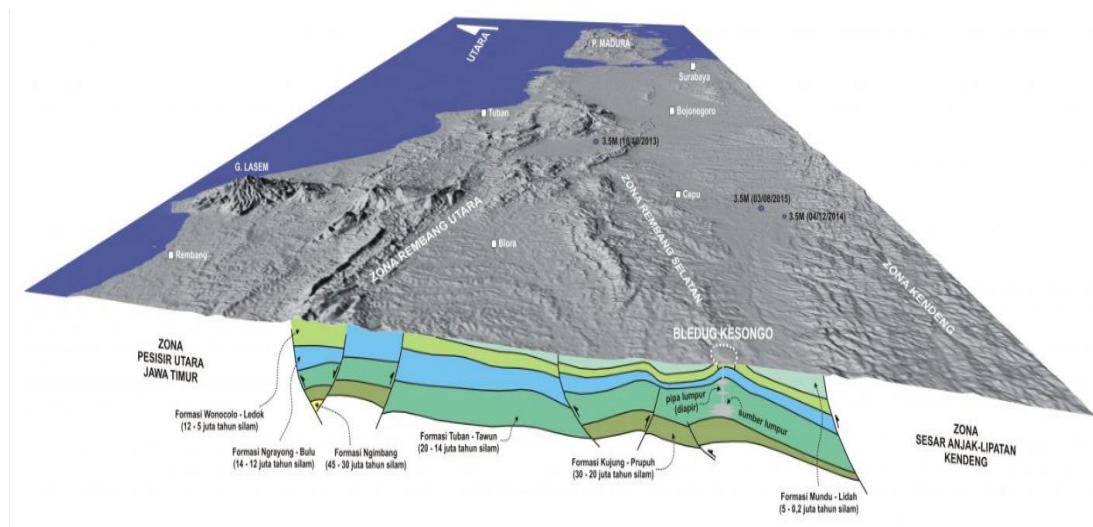
2.6 Geologi Daerah Penelitian

Secara regional daerah penelitian termasuk dalam peta geologi Indonesia Lembar Ngawi, Jawa dengan skala 1:100.000 yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Lokasi penelitian berada di Desa Gabusan Kecamatan Jati Kabupaten Blora, Jawa Tengah. Gunung Lumpur Kesongo berada pada Zona Rembang yang terletak pada Kradenan Jawa Timur.



Gambar 2.6 Peta geologi daerah penelitian berdasarkan peta geologi regional lembar Ngawi

Sutarso dan Suyitno (1976) menyatakan bahwa secara fisiografi daerah penelitian termasuk dalam Zona Rembang yang merupakan bagian dari cekungan sedimentasi Jawa Timur bagian Utara (East Java Geosyncline). Cekungan ini terbentuk pada Oligosen Akhir yang berarah timur – barat hampir sejajar dengan Pulau Jawa (Van Bemmelen, 1949). Koesoemadinat (1978) menyebutkan bahwa cekungan Jawa Timur bagian Utara lebih merupakan geosiklin dengan ketebalan sedimen Tersier mungkin melebihi 6000 meter. Suatu hal yang khas dari Cekungan Jawa Timur bagian Utara berarah timur – barat dan terlihat merupakan gejala tektonik Tersier Muda.



Gambar 2.7 Penampang geologi Jawa Tengah bagian utara dari utara Ngawi hingga Rembang melintasi Gunung Lumpur Kesongo

Gambar 2.7 di atas menunjukkan penampang geologi kawasan lumpur Kesongo, yang telah terbentuk melalui proses sedimentasi batuan laut dangkal sejak 45 juta tahun silam. Formasi batuan yang mengalami pengendapan dan saling bertumpuk, termasuk Formasi Tawun yang berpotensi menjadi sumber

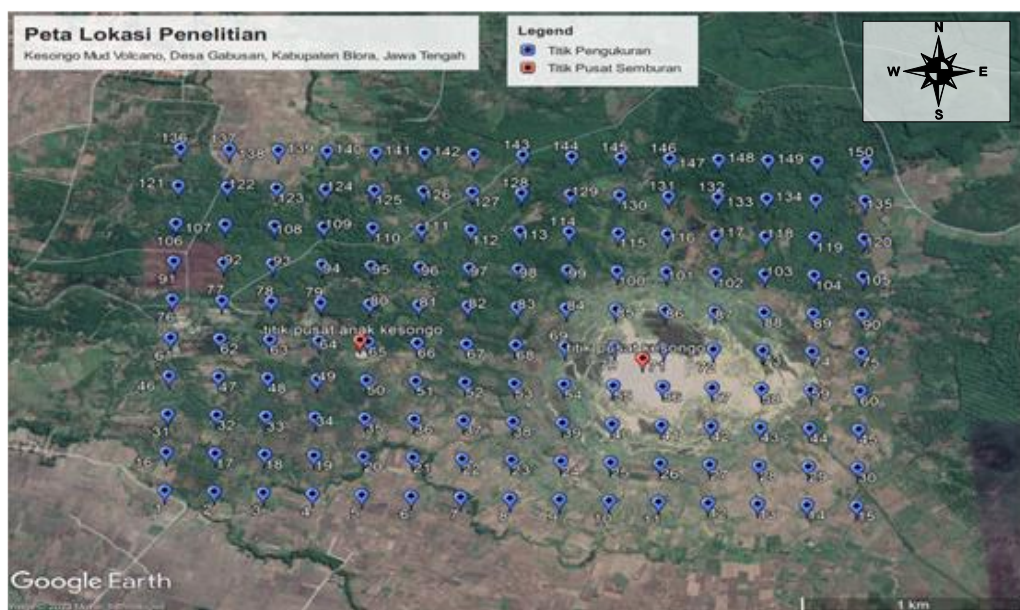
lumpur bagi Kesongo. Secara umum Formasi ini tersusun oleh lapisan batuan perselingan antara batulempung pasir dengan batupasir dan batugamping yang kaya akan foraminifera golongan orbitoid (*Lepidocyclina*, *Cycloclypeus*). Batulempung pasir berwarna abu-abu hingga abu-abu kecoklatan, semakin ke atas cenderung berubah menjadi batulanau dengan konkresi oksida besi. Batupasirnya biasanya cukup keras berwarna kemerahan, sebagian bersifat gampingan dan sebagian tidak. Batugampingnya berwarna coklat muda hingga abu-abu muda, berbutir halus sampai sedang. Penyusun utamanya adalah fosil foraminifera besar dengan sedikit pencampur batupasir kuarsa. Ketebalan batugamping ini mencapai 30 m.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di sekitar semburan lumpur Kawasan Kesongo Desa Gabusan Kecamatan Jati Kabupaten Blora, Jawa Tengah dengan luas area penelitian 3 x 2 km yang terletak pada koordinat lintang $7^{\circ} 10' 1,20''$ LS - $7^{\circ} 8' 56,40''$ LS dan bujur $111^{\circ} 14' 6''$ BT - $111^{\circ} 15' 46,80''$ BT. Lokasi semburan lumpur tersebut terletak cukup jauh dari pemukiman warga, yang berjarak kurang lebih 2 km. Kawasan kesongo sendiri merupakan kawasan hutan lindung.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

3.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder dari data gravitasi satelit. Melalui <https://bgi.obs-mip.fr/data-products/grids-and-models/modele-global-ggmplus2013/> kita dapat mengunduh datanya. Data dari GGMplus digunakan karena memiliki resolusi data yang baik dengan kerapatan antar jarak 200 meter.

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian kali ini yaitu :

1. *Hardware*: Laptop.
2. *Software*: Microsoft Excel, Oasis Montaj, Global Mapper 15, Matlab 2013, Surfer13, dan Google Earth.

3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Prosedur pelaksanaan penelitian ini meliputi beberapa tahapan, diantaranya yaitu pengumpulan data, pengolahan data, dan interpretasi data.

3.4.1 Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data GGMplus yang dapat diakses melalui <https://bgi.obs-mip.fr/data-products/grids-and-models/modele-global-ggmplus2013/>. Lalu mencari koordinat daerah penelitian yang sudah tersedia di web GGMplus. Kemudian titik koordinat tersebut di unduh dan di *ekstrak* menggunakan *software Matlab* untuk mendapatkan data gravitasi dari GGMplus yang sudah terkoreksi sampai *Free Air Anomaly* (FAA).

3.4.2 Pengolahan Data

Pada pengolahan data metode gravity dilakukan beberapa koreksi untuk mendapatkan nilai gravitasi yang hanya disebabkan oleh pengaruh variasi densitas di bawah permukaan. Karena data yang diperoleh dari GGMplus sudah tersedia sampai koreksi data *Free Air Anomaly* (FAA) maka dilanjutkan dengan melakukan koreksi Bouguer, *Terrain Correction* dan mencari nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL).

A. Koreksi Bouguer (Bouguer Correction)

Pada koreksi Bouguer, metode yang digunakan untuk mencari densitas batuan rata-rata pada daerah penelitian adalah metode Paranis. Untuk mencari densitas batumannya dilakukan dengan cara memplot ke dalam grafik dengan masukan nilai X dan Y, untuk nilai X adalah perhitungan dari $0,04193 \cdot h - TC/\rho_0$ dengan ρ_0 merupakan nilai densitas rata-rata sementara ($2,67 \text{ gr/cm}^3$) dan nilai Y adalah nilai anomali udara bebas (FAA), lalu dibuat garis linear untuk mendapatkan gradien dari kurva plot. Maka muncul nilai $y = ax + b$, dengan nilai a (gradien) merupakan nilai densitas rata-rata pada daerah penelitian.

Setelah mendapatkan nilai densitas rata-rata, maka dilakukan perhitungan melalui persamaan (2.11) untuk nilai koreksi bouguer. Selanjutnya menghitung Anomali Bouguer Sederhana (ABS) dengan memasukkan nilai *Free Air Anomaly* (FAA) dikurangi dengan koreksi Bouguer pada *Microsoft Excel*. Untuk perhitungannya seperti di bawah ini:

$$ABS = FAA - BC \quad (3.1)$$

B. Koreksi Medan (Terrain Correction)

Untuk perhitungan koreksi medan (*Terrain Correction*) dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat komputer. *Software* yang dibutuhkan yaitu *Global Mapper* dan *Oasis Montaj* dengan memasukkan data koordinat titik ukur, peta *Digital Elevation Model* (DEM), serta nilai elevasi dari setiap titik pengukuran.

C. Anomali Bouguer Lengkap (*Complete Bouguer Anomaly*)

Setelah dilakukan koreksi, maka menghitung nilai Anomali Bouguer Lengkap (ABL) dengan cara menjumlah nilai Anomali Bouguer Sederhana (ABS) dan koreksi medan. Menggunakan persamaan di bawah ini:

$$ABL = ABS + TC \quad (3.2)$$

Semua perhitungan koreksi dilakukan di dalam *Microsoft Excel*. Hasil anomali dari setiap koreksi dibuat suatu kontur yang bertujuan untuk mempermudah saat interpretasi. Proses pembuatan kontur dilakukan dengan menggunakan *software Surfer13* dengan memasukkan nilai koordinat UTM dan nilai anomalnya.

D. Reduksi Bidang Datar

Pada proses reduksi bidang datar dilakukan menggunakan *software Matlab R2013a* menggunakan script metode *Dampney*. Script ini membutuhkan *inputan* nilai elevasi (ketinggian) rata-rata dan file dengan RBD.txt sebagai masukannya yang berisi data koordinat bujur, lintang, ketinggian, dan nilai ABL. Hasil dari proses ini berupa peta kontur ABL yang tereduksi ke bidang datar.

E. Analisis Spektrum

Proses analisa spektrum dilakukan pada kontur anomali bouguer lengkap yang telah tereduksi ke bidang datar. Data anomali dilakukan *slicing* beberapa lintasan,

selanjutnya dilakukan tranformasi fourier di *Microsoft Excel* pada data yang sudah di *slicing*. Kemudian dibuat kurva RAPS untuk mendapatkan nilai kedalaman rata-rata dari anomali regional dan lokal.

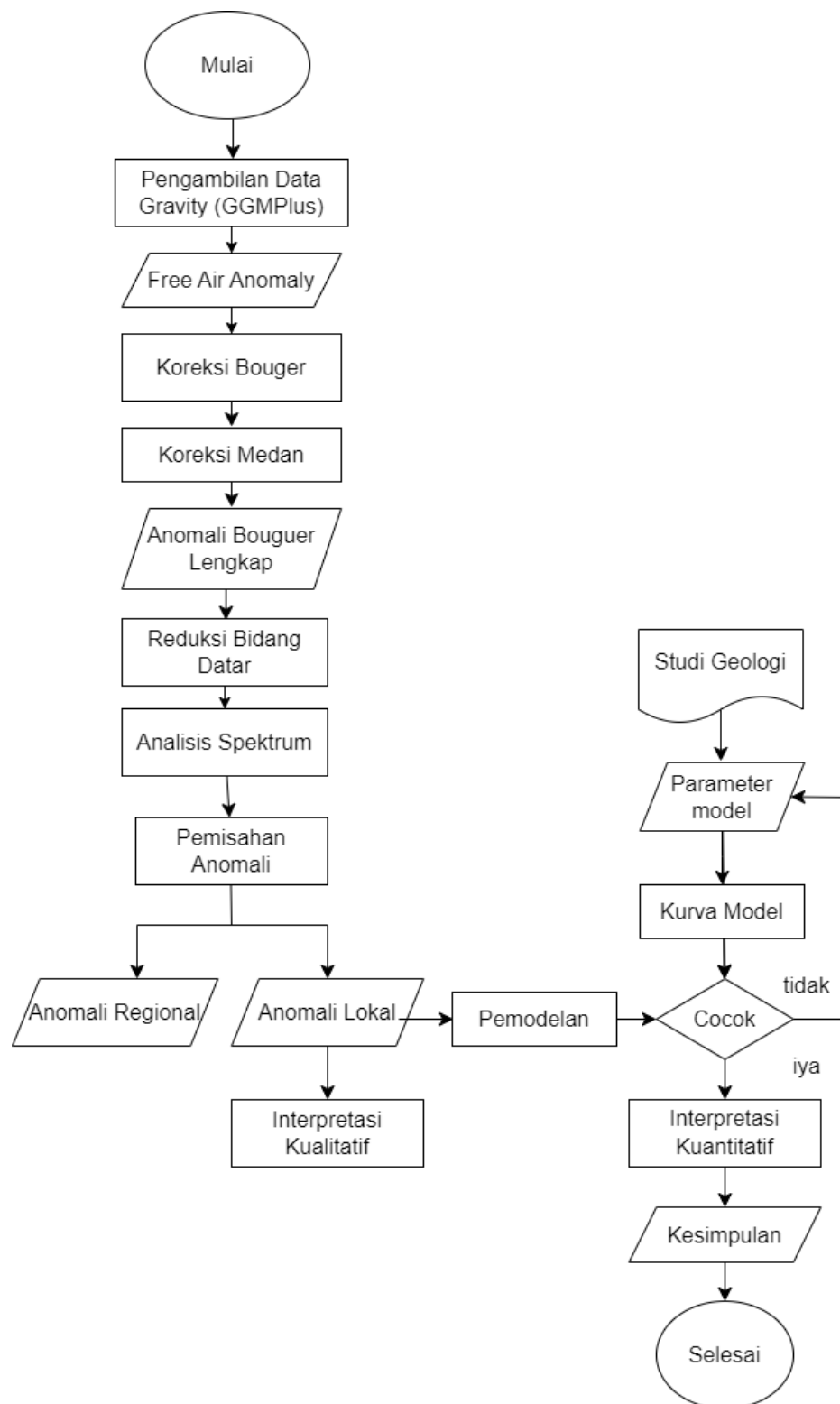
F. Pemisahan Anomali

Pemisahan anomali bouguer lengkap dilakukan dengan menggunakan metode *moving average*. Setelah mendapatkan kedalaman rata-rata anomali regional dan lokal dilanjutkan mencari lebar jendela sebagai masukan dari metode *moving average*. Outputan dari proses ini adalah anomali regional dan untuk menentukan anomali lokal digunakan pengurangan antara data ABL yang sudah tereduksi bidang datar dan data anomali regional.

3.4.3 Interpretasi Data

Tahap interpretasi dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif dengan melibatkan informasi data geologi daerah penelitian. Interpretasi kualitatif dilakukan dengan menganalisis persebaran nilai anomali lokal pada area penelitian yang sudah dikonturkan menggunakan *software Surfer13*. Sedangkan interpretasi kuantitatif dilakukan dengan cara menganalisis model bawah permukaan dari suatu penampang anomali lokal dengan menggunakan *software Oasis Montaj*.

3.4 Diagram Alir Penelitian

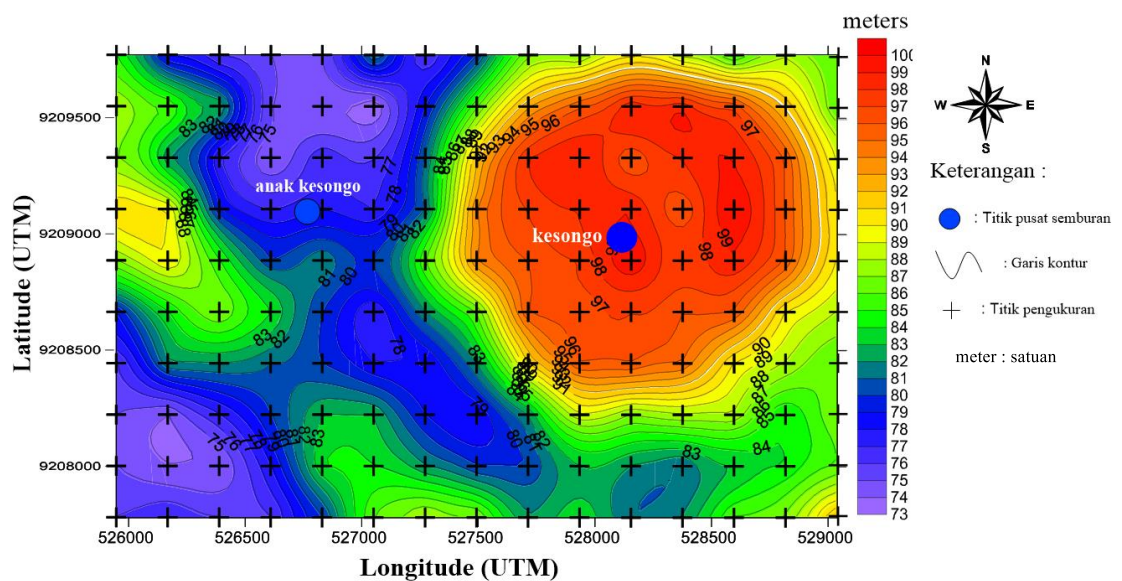


Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengetahui struktur bawah permukaan yaitu metode gaya berat (*gravity*) dengan mengukur nilai percepatan gravitasi. Variasi medan gravitasi di setiap titik data disebabkan oleh perbedaan densitas dari setiap batuan. Dalam ilmu geofisika, metode gravitasi menjadi langkah awal dalam melakukan eksplorasi. Data Anomali Bouguer Lengkap yang digunakan pada penelitian ini merupakan data citra satelit GGMPlus yang telah diolah melalui beberapa koreksi dari metode gravitasi. Data yang diperoleh dari citra satelit GGMPlus berupa titik koordinat lintang dan bujur serta nilai anomaly udara bebas (*Free Air Anomaly*). Data yang diperoleh berjumlah 150 data dengan spasi antar titik pengukuran yaitu 200 meter yang berlokasi di kawasan Lumpur Kesongo, Desa Gabusan, Jati, Kabupaten Blora, Jawa Tengah dengan ketinggian rata-rata 86 meter.



Gambar 4.1 Kontur Topografi dan Titik Pengukuran

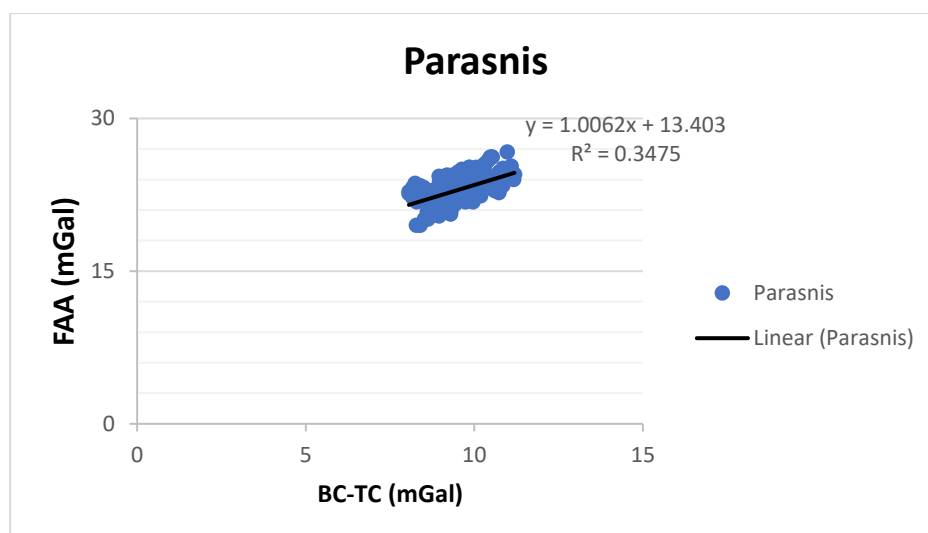
Gambar 4.1 merupakan topografi daerah penelitian di Desa Gabusan, Jati, Kabupaten Blora Jawa Tengah. Daerah penelitian ini terletak pada koordinat lintang $7^{\circ} 10' 1,20''$ LS - $7^{\circ} 8' 56,40''$ LS dan bujur $111^{\circ} 14' 6''$ BT - $111^{\circ} 15' 46,80''$ BT dengan elevasi minimum 73 m dan elevasi maksimum 100 m. Pada kontur topografi daerah penelitian ini menunjukkan hubungan antara elevasi dan kenampakan morfologi daerah penelitian. Morfologi pada semburan lumpur kesongo ini membentuk layaknya bukit melingkar yang ditunjukkan dengan warna merah pada ketinggian antara 92 m – 100 m. Ketinggian letak semburan lumpur kesongo dapat dilihat dari peta kontur ini memiliki ketinggian 98 m – 100 m, sedangkan untuk semburan lumpur anak kesongo memiliki ketinggian 78 m – 79 m. Hal ini dapat diketahui dari informasi geologi bahawa daerah penelitian ini terletak pada daerah yang memiliki dataran rendah dan terletak pada zona Rembang yang memiliki potensi sumber *mud volcano*.

4.1 Pengolahan Data

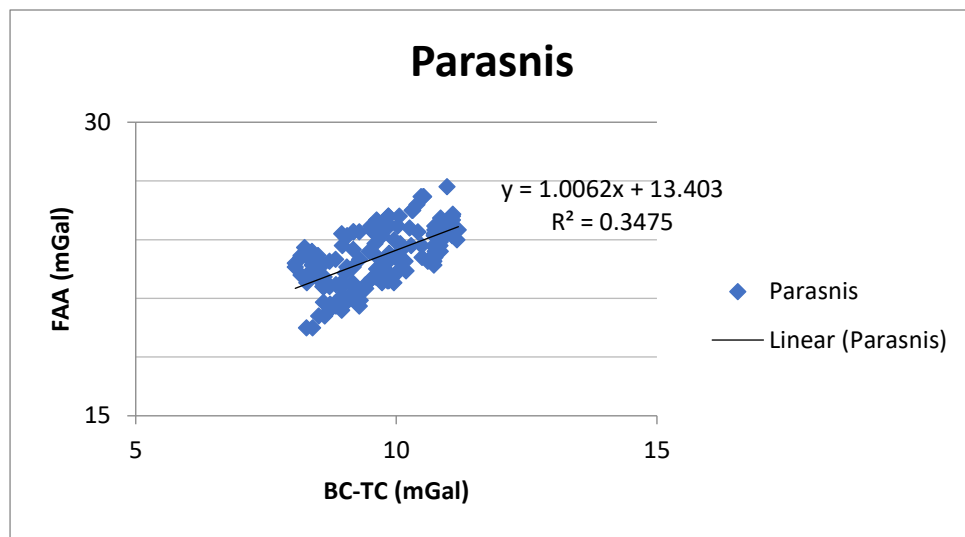
Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode gravitasi dengan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari data citra satelit GGMPlus <http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>. dengan luasan 3 km x 2 km dan jarak antar spasi 200 m, diperoleh data sebanyak 150 data. Data yang diperoleh dari citra satelit GGMPlus berupa titik koordinat lintang dan bujur serta nilai anomali udara bebas (*Free Air Anomaly*). Elevasi titik penelitian juga dapat diperoleh dari fitur tambahan web GGMPlus. Setelah mendapatkan data berupa koordinat, elevasi dan FAA, dilakukan perhitungan nilai koreksi medan. Koreksi medan diperoleh dengan menggunakan bantuan *software Oasis Montaj* dengan inputan data DEM pada lokasi penelitian. Data DEM tersebut lalu diolah terlebih

dahulu dengan *software Global Mapper*, pada proses pengolahan data harus diketahui nilai batas lokal/Inner dan regional/Outer dari lokasi penelitian. Setelah itu dapat diolah lagi menggunakan *software Oasis Montaj*.

Sebelum melakukan koreksi Bouguer, kita harus menentukan nilai densitas parasnis. Densitas parasnis adalah densitas rata-rata dari lokasi penelitian. Densitas parasnis ini dapat diperoleh dengan korelasi pada sumbu Y yaitu nilai FAA (mGal) dan sumbu X yaitu perhitungan dari $0,04192 \cdot h - TC/\rho_0$ dimana h merupakan elevasi atau ketinggian (m), TC merupakan koreksi terrain (mGal) dan ρ_0 merupakan densitas rata-rata batuan ($2,67 \text{ gr/cm}^3$). Kemudian kedua variable tersebut di plot pada *Ms.Excel* dan didapat suatu persamaan garis linier dengan mengklik titik-titik data yang terplot pada grafik, lalu pilih *trendline "display equation on chart"* sehingga muncul persamaan regresi linier. Dengan mencari gradien garis lurus $y = mx + c$, dimana nilai m (gradien) yaitu $1,0062 \text{ gr/cm}^3$. Yang merupakan nilai densitas parasnis dari lokasi penelitian.



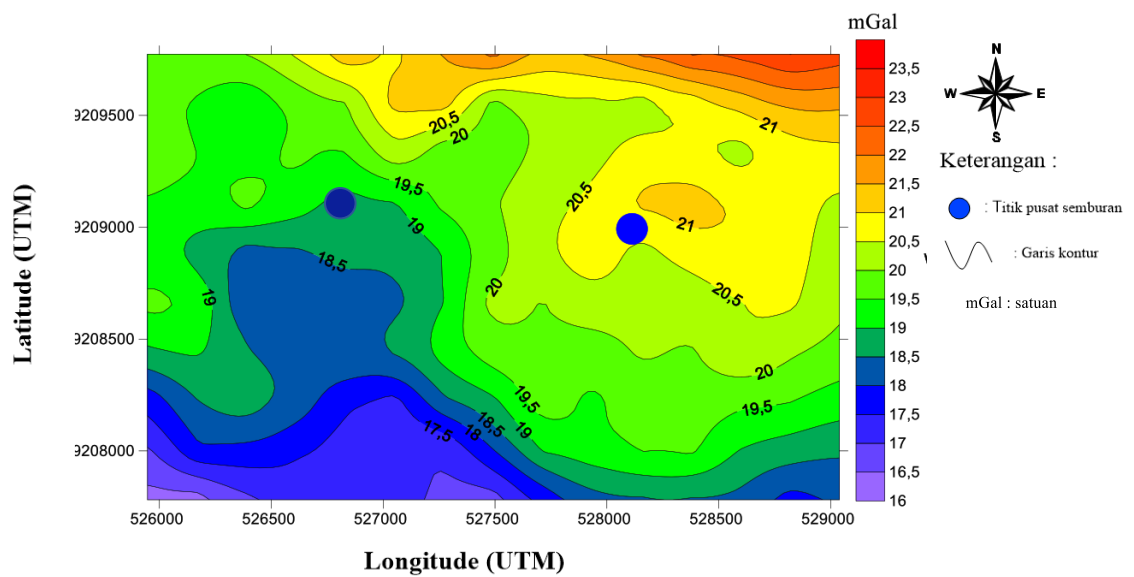
Gambar 4.2 Densitas Parasnis Lokasi Penelitian



Gambar 4.3 Garis Linear Densitas Parasnis

Nilai densitas parasnis tersebut kemudian digunakan untuk menghitung koreksi Bouguer (*Bouguer Correction*). Koreksi Bouguer diperlukan untuk mereduksi pengaruh efek anomali udara bebas yang dapat mempengaruhi nilai medan pada titik pengukuran.

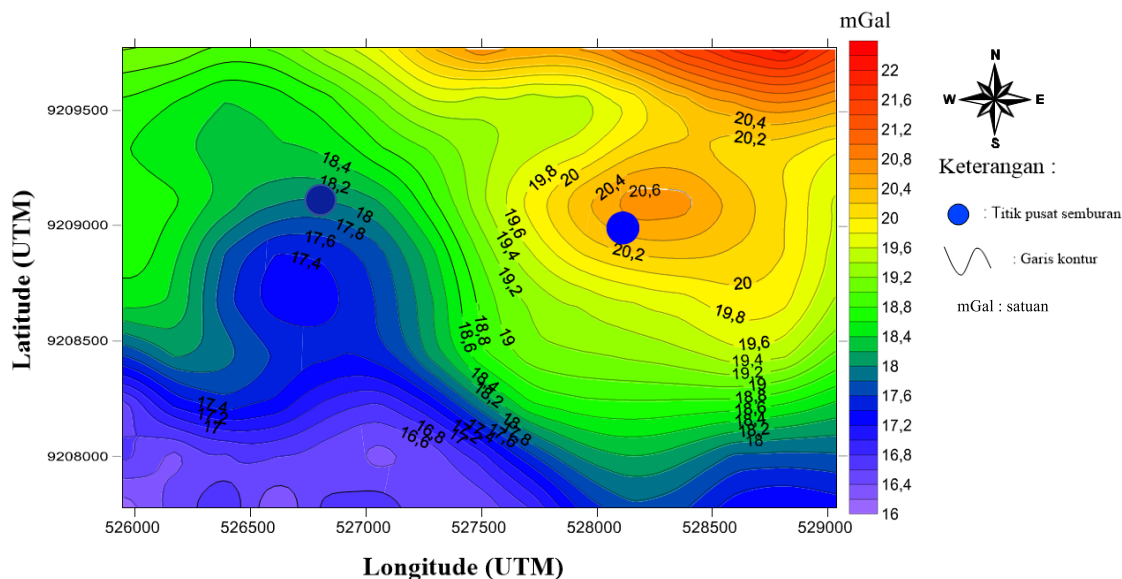
4.1.1 Anomali Bouguer Lengkap



Gambar 4.4 Kontur Anomali Bouguer Lengkap

Nilai anomali bouguer lengkap yang dihasilkan melalui perhitungan kemudian dikonturkan menggunakan *software Surfer13*. Untuk mendapatkan nilai anomali bouguer lengkap dilakukan koreksi-koreksi standar dalam metode gravitasi, yaitu koreksi bouger yang dilakukan setelah mendapatkan nilai densitas parasnis untuk mendapatkan nilai anomali bouger sementara dengan perhitungan FAA(*Free Air Anomaly*)-BC(*Bouguer Correction*), dilanjutkan dengan koreksi terrain. Setelah mendapatkan nilai koreksi terrain dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai anomali bouguer lengkap dengan menambahkan nilai anomali bouger sementara dengan nilai koreksi terrain yang telah didapatkan. Anomali ini menunjukkan distribusi anomali gravitasi pada daerah penelitian yang dipengaruhi oleh target dibawah permukaan dan merupakan gabungan dari anomali lokal dan anomali residual. Pada Gambar 4.3 peta persebaran anomali bouguer lengkap, dapat diketahui nilainya berkisar antara 16 mGal – 23,5 mGal. Sumber lumpur kesongo dan anak kesongo sendiri terletak di arah timur dan barat yang ditandai dengan titik warna biru. Dimana nilai anomali disekitar titik pusat anak kesongo bernilai rendah berkisar 18 mGal – 19 mGal yang ditandai dengan warna biru kehijauan dan biru tua, sedangkan nilai anomali disekitar titik pusat lumpur kesongo bernilai tinggi berkisar 20 mGal – 21 mGal. Tinggi rendahnya nilai anomali menunjukkan perbedaan nilai kerapatan massa batuan yang berbanding lurus dengan nilai anomalnya.

4.1.2 Reduksi Bidang Datar



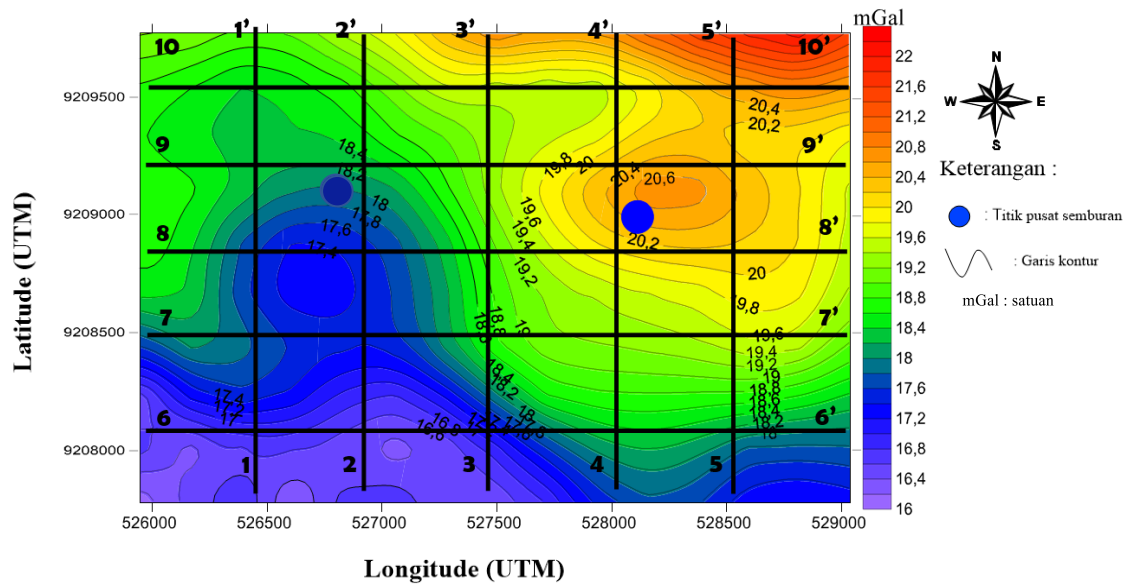
Gambar 4.5 Kontur Anomali setelah Reduksi Bidang Datar

Nilai anomali bouguer lengkap yang telah diplot dan menghasilkan kontur pada Gambar 4.3 masih berada pada topografi yang tidak rata sehingga dapat menimbulkan distorsi anomali. Distorsi data disebabkan adanya variasi jarak di sekitar sumber anomali. Sehingga diperlukannya proyeksi ke suatu bidang datar tertentu untuk meminimalkan adanya distorsi anomali. Reduksi bidang datar ini dilakukan dengan menggunakan metode Dampney atau sumber ekivalen titik massa. Reduksi bidang datar dilakukan dengan bantuan *software Matlab* dengan memasukkan beberapa *inputan* yang memperhatikan ketinggian dan kedalaman daerah penelitian. *Inputan* yang digunakan adalah *equivalent depth* sebesar 1000 m, *height of plane* sebesar -100 m, iterasi 100 dan RMS error 0.57531%. Setelah itu *outputan* data dari *Matlab* dipindahkan ke *Surfer13* untuk melakukan plot kontur, sehingga didapatkan hasil reduksi bidang datar yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pola persebaran anomali dari reduksi ke bidang datar tidak jauh beda dengan

anomali bouguer lengkap, hal ini menunjukkan bahwa anomali tidak dipengaruhi oleh topografi secara signifikan. Terlihat bahwa nilai reduksi bidang datar lebih kecil dibandingkan dengan anomali bouguer lengkap, yakni berkisar antara 16 mGal hingga 22 mGal. Hal ini dikarenakan distorsi anomali akibat topografi yang tak homogen telah diminimalkan.

4.1.3 Analisis Spektrum

Analisis spektrum dilakukan untuk mengetahui kedalaman optimum benda penyebab anomali yang diinterpretasikan secara kualitatif. Analisis spektrum dilakukan dengan melakukan digitasi pada 10 slicing line yang terdiri dari 5 *slicing* arah horizontal sumbu X dan 5 slicing line ke arah vertical sumbu Y. Semua slicing ditunjukkan pada gambar 4.5. Analisis spektrum diterapkan pada peta anomali bouguer lengkap yang sudah tereduksi ke bidang datar. Contoh hasil kurva spektrum ditunjukkan oleh gambar 4.6. Kurva spektrum memberikan informasi tentang kedalaman optimum anomali lokal dan anomali regional. Nilai kedalaman optimum anomali dapat diketahui melalui nilai slope linier ABL yang sudah dilakukan FFT (*Fast Fourier Transform*). Garis slope linier akan ditentukan menjadi dua, yaitu sebagai slope linier yang dimungkinkan sebagai anomali regional dan anomali lokal.



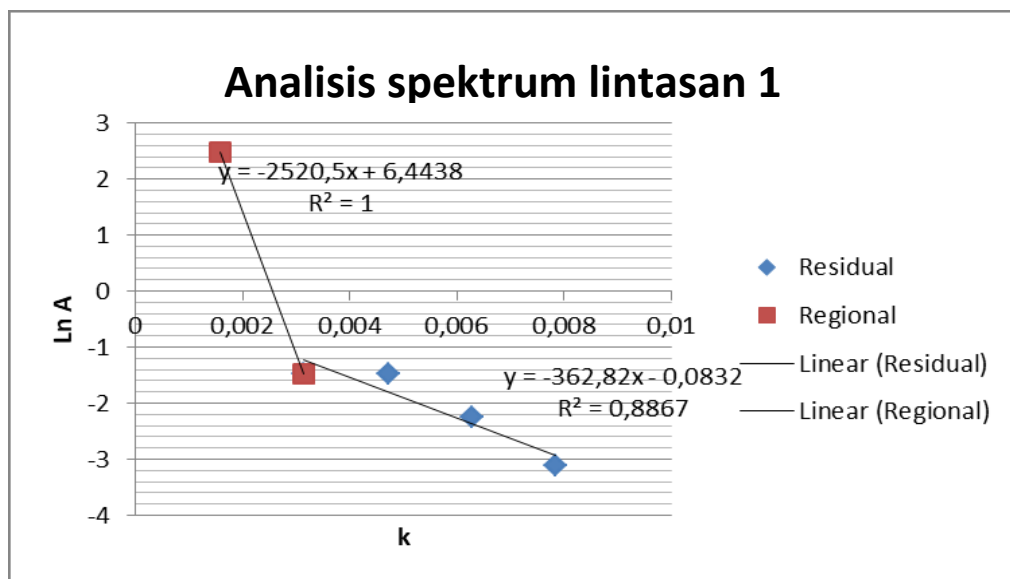
Gambar 4.6 *Gridding* Analisis Spektrum

Setelah dilakukan *gridding* sebanyak 10 lintasan maka akan muncul nilai anomali bouguer lengkap dari setiap lintasan yang dilalui. Dari fungsi anomali bouguer lengkap dalam domain spasial menjadi fungsi anomali bouguer lengkap dalam domain frekuensi menggunakan transformasi fourier. Untuk hasil transformasi *fourier* pada lintasan 1 di dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Estimasi kedalaman pada lintasan 1

Titik	ABL	Amplitudo	Jark Lintasan	Frekuensi	k	Ln A
1	16.08	12,019444	2000	0,00025	0,00157	2,486526
2	17.02	0,2297606		0,0005	0,00314	-1,47072
3	17.05	0,2280066		0,00075	0,00471	-1,47838
4	17.09	0,1060223		0,001	0,00628	-2,24411
5	18.02	0,0444119		0,00125	0,00785	-3,11425
6	18.04	0,0843547		0,0015	0,00942	-2,47272
7	18.05	0,1195165		0,00175	0,01099	-2,1243
8	18.06	0,080576		0,002	0,01256	-2,51855
9	18.07	0,0458333		0,00225	0,01413	-3,08274
10	18.08	0,080576		0,0025	0,0157	-2,51855
11	18.08	0,1195165		0,00275	0,01727	-2,1243
12	18.09	0,0843547		0,003	0,01884	-2,47272
13	19.02	0,0444119		0,00325	0,02041	-3,11425
14	19.04	0,1060223		0,0035	0,02198	-2,24411
15	19.04	0,2280066		0,00375	0,02355	-1,47838
16	19.05	0,2297606		0,004	0,02512	-1,47072

Pada lintasan 1 didapatkan sebanyak 16 data nilai anomali bouguer lengkap dari 16,08 mGal sampai 19,05 mGal. Kemudian didapatkan nilai Ln A dan nilai bilangan gelombang (k), setelah itu dari kedua nilai tersebut di buat plot kurva dengan sumbu X adalah bilangan gelombang (k) dan sumbu Y adalah Ln A. Pada grafik tersebut terlebih dahulu ditentukan titik-titik anomali regional dan anomali residual dengan cara melihat tren perubahan nilai Ln A dari titik 1 sampai titik 16. Apabila perubahan anomali sangat besar maka dimungkinkan adalah anomali regional dan apabila tren perubahan anomali rendah maka itu adalah anomali lokal. Untuk perubahan anomali yang sangat kecil maka itu dimungkinkan adalah *noise*.



Gambar 4.7 Contoh Grafik Analisis Spektrum Lintasan 1

Pada kurva grafik lintasan 1 didapatkan estimasi kedalaman anomali regional sebesar -2520,5 meter sedangkan estimasi kedalaman anomali residual atau lokal sebesar -362,82 meter. Setelah semua lintasan dilakukan transformasi fourier dan dibuat kurva grafik hubungan antara Ln A dan bilangan gelombang (k), maka semua nilai estimasi kedalaman dimasukkan ke dalam tabel (4.2) di bawah ini. Setelah semua estimasi kedalaman dimasukkan ke dalam tabel dilanjutkan dengan mencari nilai lebar jendela (N) untuk inputan pada proses pemisahan anomali regional dan anomali residual.

Tabel 4.2 Penentuan estimasi kedalaman pada semua lintasan

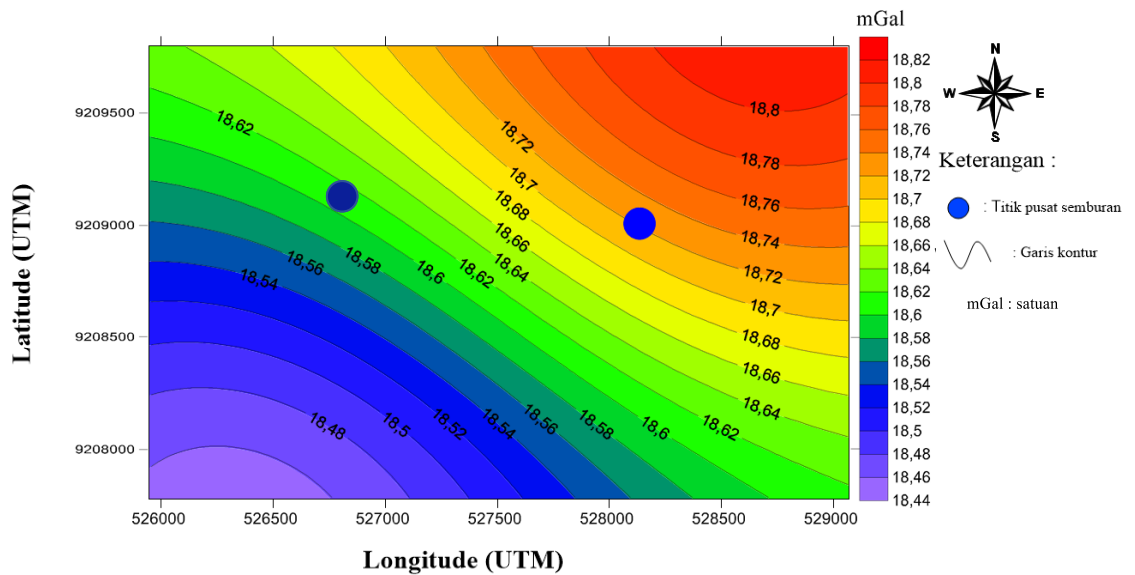
Lintasan	Regional (h)	Residual (h)	C 1	C 2	Lamdha	k(Cut Off)	N (Lebar Jendela)
1	-2520,5	-362,82	6,4438	-0,0832	2076,027333	0,003025008	20,76027333
2	-2548,3	-344,32	6,4827	-0,2987	2041,023152	0,003076888	20,41023152
3	-2256,8	-329,59	6,0698	-0,059	1974,755058	0,003180141	19,74755058
4	-2390,5	-248,18	6,3131	-0,6267	1938,639384	0,003239385	19,38639384
5	-2201,1	-686,65	6,0245	1,5538	2127,350527	0,002952029	21,27350527
6	-7128,3	-104,89	9,8943	-4,7367	3014,62749	0,002083176	30,1462749
7	-4747,4	-340,76	7,4649	-1,4217	3114,093039	0,002016639	31,14093039
8	-3988,6	-958,61	6,6846	0,3538	3005,676565	0,00208938	30,05676565
9	-5267,4	-77,812	8,0594	-2,872	2981,375912	0,00210641	29,81375912
10	-3968,9	-363,57	6,727	-1,4916	2754,906237	0,002279569	27,54906237
Rerata	-3701,78	-381,7202					25,0284747

Pada proses analisis spektrum dengan membuat 10 lintasan didapatkan estimasi kedalaman regional dan residual dari semua lintasan. Untuk kedalaman anomali regional paling rendah terdapat pada lintasan 5 dengan estimasi kedalaman mencapai -2201,1 meter dari permukaan laut, sedangkan estimasi anomali regional paling dalam terdapat di lintasan 6 dengan estimasi -7128,3 meter dari permukaan laut dan didapatkan nilai rata-rata estimasi kedalaman regional mencapai -3701,78 meter. Pada estimasi kedalaman anomali residual dengan estimasi kedalaman paling rendah terdapat pada lintasan 9 yaitu nilai estimasi sebesar -77,81 meter, sedangkan untuk estimasi kedalaman anomali residual paling dalam terdapat pada lintasan 8 dengan nilai estimasi sebesar -958,61 meter, maka didapatkan nilai rata-rata kedalaman dari semua lintasan yaitu -3881,72 meter. Setelah didapatkan semua nilai kedalamannya, maka dilanjutkan penentuan lebar jendela (N) sebagai salah satu inputan pada proses pemisahan anomali

regional dengan anomali residual. Didapatkan nilai lebar jendela (N) pada daerah penelitian sebesar 25.

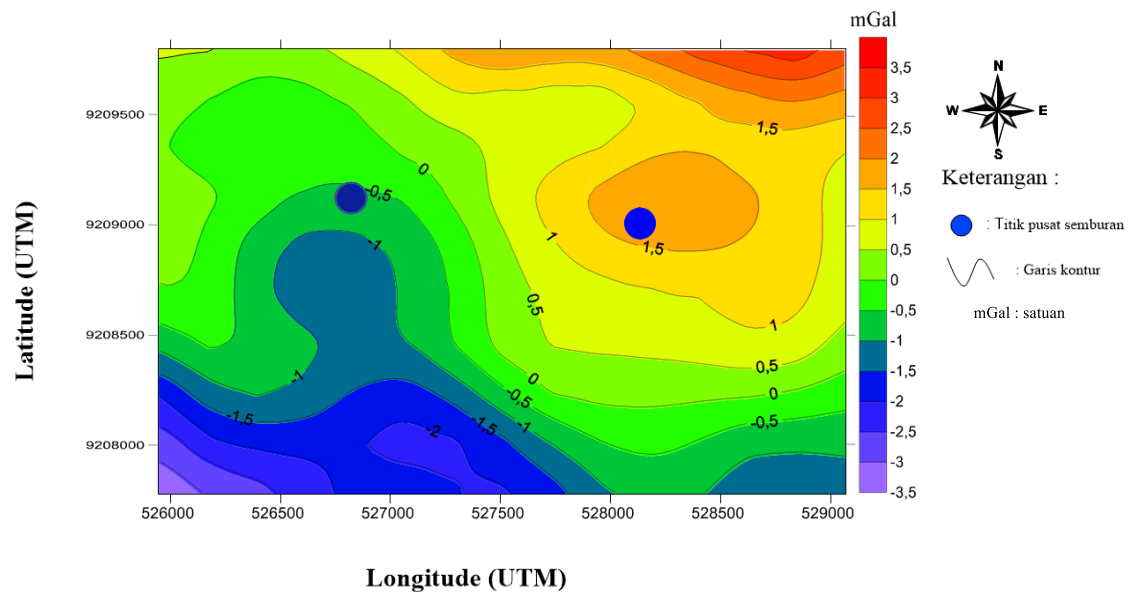
4.2 Interpretasi Kualitatif

Data anomali hasil reduksi bidang datar harus dipisahkan untuk membedakan antara anomali regional dan anomali lokal. Interpretasi kualitatif merupakan suatu bentuk penafsiran dari suatu anomali dengan membaca pola anomali gravitasi yang dapat dihubungkan dengan struktur geologi daerah penelitian serta data-data kebumihannya. Pemisahan anomali lokal dan anomali regional dari kontur anomali reduksi bidang datar dilakukan pendekatan dengan menggunakan metode *moving average*. Proses *moving average* (nilai rata-rata bergerak) dilakukan dengan meratakan nilai anomali bouguer lengkap yang sudah tereduksi bidang datar. Dengan menggunakan metode ini, pengaruh efek anomali lokal dihilangkan sehingga didapatkan kecenderungan anomali regionalnya. Untuk mendapatkan anomali residual maka dilakukan pengurangan anomali bouguer lengkap dengan anomali regional. Proses pemisahan ini dilakukan dengan bantuan *software Oasis Montaj* kemudian dikonturkan dengan *software Surfer13* dengan inputan lebar jendela (N) yang sudah dilakukan analisis spektrum.



Gambar 4. 8 Kontur Anomali Regional

Kontur persebaran anomali regional ditunjukkan pada gambar 4.7. Nilai berkisar antara 18,44 mGal hingga 18,82 mGal, dengan interval nilai anomali 0,02 mGal. Nilai anomali tinggi terletak di bagian timur laut dengan nilai 18,72 mGal hingga 18,82 mGal ditunjukkan dengan warna merah. Sedangkan nilai anomali rendah terletak di bagian barat daya dan dengan nilai 18,44 mGal hingga 18,54 mGal menunjukkan warna biru. Nilai anomali tinggi dikaitkan dengan struktur batuan tua yang terbentuk lebih awal dari batuan di atasnya. Batuan tersebut menjadi lebih padat karena pemadatan yang terus menerus akibat tekanan dari batuan di atasnya.



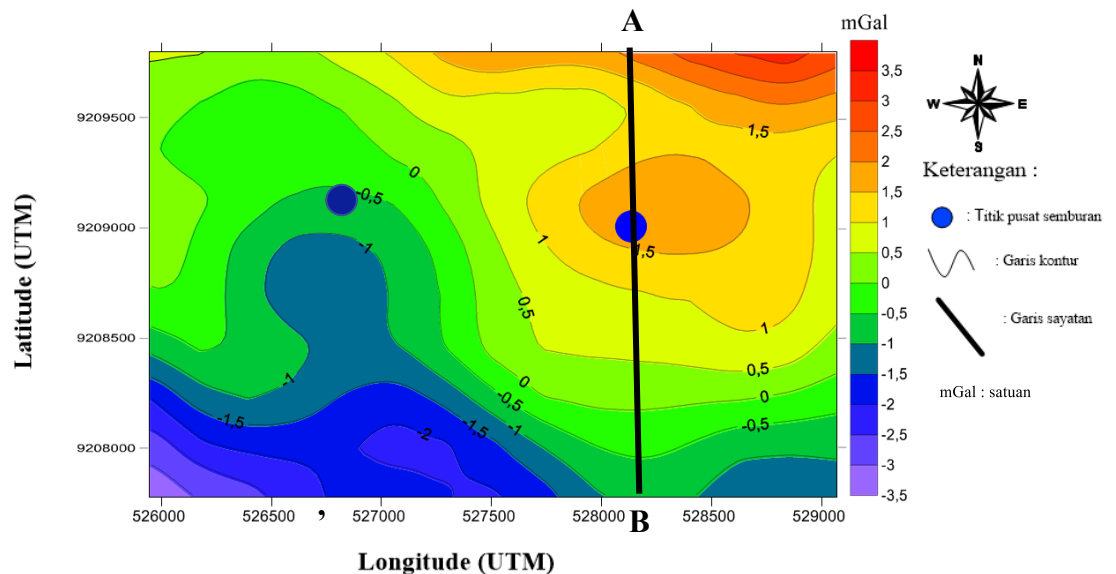
Gambar 4.9 Kontur Anomali Lokal

Dalam proses interpretasi dibutuhkan kedalaman yang dangkal, karena pada kedalaman yang dangkal telah mengalami proses erosi dan deformasi batuan. Sehingga diperlukan anomali lokal untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan. Hasil persebaran anomali lokal ditunjukkan pada gambar 4.9. Anomali lokal daerah penelitian memiliki jangkauan nilai dari -3,5 mGal hingga 3,5 mGal. Untuk setiap nilai pada kontur anomali lokal terdapat nilai positif dan negatif. Nilai anomali berbanding lurus dengan nilai densitas. Nilai densitas yang tinggi untuk struktur batuan di bawah permukaan ditunjukkan dengan nilai positif. Sebaliknya, nilai negatif menunjukkan nilai kerapatan yang rendah pada struktur batuan di bawah permukaan.

Target dari penelitian ini adalah sebaran kantong lumpur di kawasan Kesongo. Morfologi pada semburan lumpur kesongo ini membentuk layaknya

Setelah proses pemisahan nilai anomali lokal serta anomali regional, selanjutnya dilakukan interpretasi kuantitatif dengan cara menganalisis penampang anomali lokal dari beberapa hasil *slice*. Proses ini dilakukan untuk memodelkan struktur bawah permukaan dari hasil *slice* yang dilakukan menggunakan *software Oasis Montaj* dengan *inputan* nilai anomali hasil dari irisan kontur anomali lokal dan irisan kontur topografi. Dalam melakukan pemodelan diperlukan data geologi daerah penelitian dan parameter rapat massa batuan (densitas) sebagai data acuan atau pendukung dalam melakukan pemodelan. Data geologi yang digunakan berupa data Lembar geologi Ngawi yang dimana lokasi penelitian terbentuk dari formasi Mundu, formasi Wonocolo, formasi Ngrayung, formasi Tawun, formasi Kujung, formasi Ngimbang dan basement. Dari beberapa formasi tersebut dapat diketahui batuan yang tersusun seperti batuan napal, napal lempungan, lempung pasir, dan

pasir, lempung gampingan, batupasir kuarsa dan batuan beku. Pada penelitian ini dibuat sayatan anomaly dari Utara - Selatan yang melewati titik pusat semburan lumpur Kesongo yaitu sayatan penampang A-B pada kontur anomaly lokal.

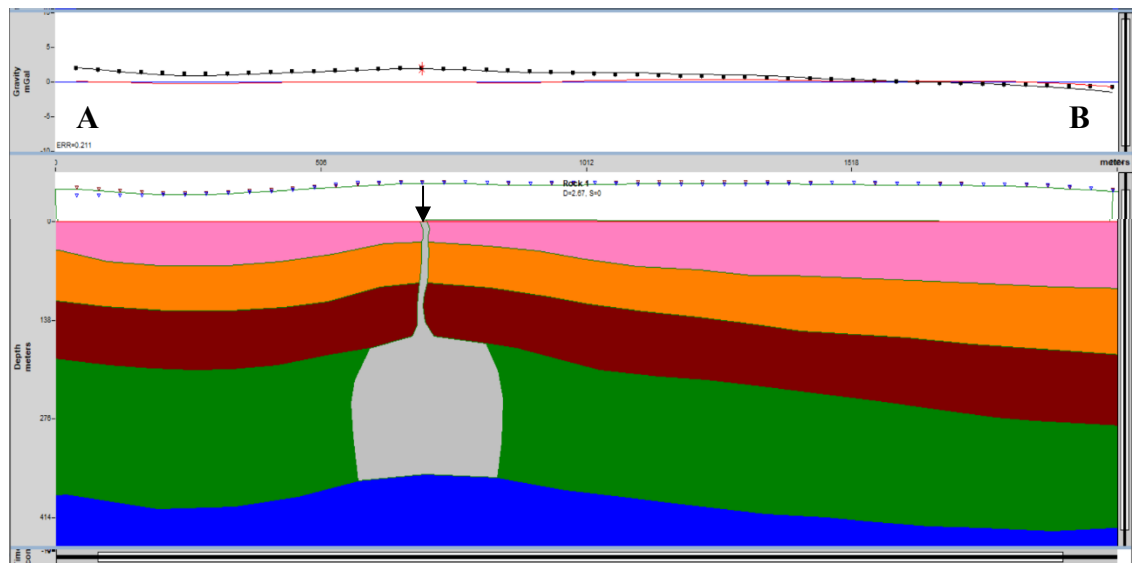


Gambar 4.10 Sayatan A-B pada kontur anomaly lokal

Data hasil sayatan digunakan sebagai *inputan* untuk pemodelan berupa data topografi dan nilai anomaly. Model yang digunakan pada penelitian ini menggunakan pendekatan *forward modelling*, yaitu proses penjabaran data dari suatu pemodelan dengan menghitung respon teoritis dan distribusi sifat dari sumber anomaly. Pendekatan ini dilakukan karena data yang didapatkan berupa data sintetik atau gabungan dari beberapa sumber data. Metode trial and error juga digunakan dalam penelitian ini untuk mengetahui hasil pemodelan yang sama dengan keadaan struktur bawah permukaan yang sebenarnya. Percobaan dilakukan hingga didapatkan nilai *error* terkecil.

4.3.1 Interpretasi Kuantitatif Penampang Sayatan A-B

Penampang anomali A-B pada Gambar 4.11 memotong pola dari Utara menuju Selatan melewati titik semburan lumpur Kesongo dengan panjang lintasan 2000 m dengan kedalaman pemodelan ± 400 m. Nilai *error* yang dihasilkan yaitu 0.21%.



Keterangan :

 F. <u>Mundu</u> : Napal (1,77 gr/cm ³)	 F. <u>Kuiung</u> : Lempung gampingan (2,4 gr/cm ³)
 F. <u>Wonocolo</u> : Napal Lempungan (1,95 gr/cm ³)	 Kantong Lumpur (1,5 gr/cm ³)
 F. <u>Ngravong</u> : Lempung pasir (2,02 gr/cm ³)	↓ Titik Pusat Semburan Lumpur
 F. <u>Tawun</u> : Pasir (2,25 gr/cm ³)	

Gambar 4.10 Model Bawah Permukaan Sayatan A-B

Interpretasi dari penampang A-B pada Gambar 4.11 dapat diketahui bahwasannya terdapat 5 lapisan formasi. Pada lapisan pertama berwarna merah muda yaitu formasi Mundu yang memiliki batuan Napal secara menyeluruh dengan nilai densitas 1,77 gr/cm³ ketebalan $\pm 50 - 75$ m. Pada lapisan kedua berwarna kuning yaitu formasi Wonocolo yang didominasi dengan batuan napal lempungan dengan nilai densitas 1,95 gr/cm³ ketebalan ± 75 m. Pada lapisan ketiga berwarna

coklat yaitu formasi Ngrayong yang didominasi oleh batuan lempung pasir dengan nilai densitas $2,02 \text{ gr/cm}^3$ ketebalan $\pm 50 \text{ m}$. Pada lapisan keempat berwarna hijau merupakan formasi Tawun yang didominasi dengan batuan pasir dengan nilai densitas $2,25 \text{ gr/cm}^3$ ketebalan $\pm 100 \text{ m}$. Pada lapisan kelima berwarna biru merupakan formasi Kujung yang didominasi batuan lempung gampingan dengan nilai densitas $2,4 \text{ gr/cm}^3$ ketebalan $\pm 60 \text{ m}$. Pada sayatan A-B melewati titik pusat semburan lumpur Kesongo dengan panjang lintasan 2000 m , dapat dilihat bahwasannya terdapat sumber lumpur dibawah permukaan. Kantong lumpur terletak pada formasi Tawun dilapisan keempat yang berada di kedalaman sekitar 245 m dibawah permukaan dengan lebar 270 m .

Secara umum hasil pemodelan struktur bawah permukaan penampang sayatan A-B terdiri dari lima lapisan formasi. Gunung lumpur terjadi diakibatkan adanya tekanan berlebih pada formasi batuan di kedalaman tertentu. Sistem gunung lumpur Kesongo disini dapat lihat berada pada Formasi Tawun, dimana formasi ini terdiri dari lapisan-lapisan batulempung tebal yang berselang-seling (Jawa, 2022). Zona potensial lumpur Kesongo dari data yang dihasilkan berada pada kedalaman sekitar 245 m .

4.4 Kajian Keislaman

Al Quran merupakan firman Allah SWT mengandung berbagai pengetahuan yang sangat luas. Isi kandungan al-Quran tidak hanya menjelaskan tentang muamalah manusia saja, namun ada banyak juga terdapat kandungan ilmu terkait pengetahuan yang dapat membuktikan kebenaran ilmiah. Hal tersebut menunjukkan kebesaran Allah SWT dan sebagai petunjuk kepada manusia dalam memanfaatkan apa yang diciptakan-Nya dengan bijaksana dan selalu bersyukur

atas apa yang telah diciptakan. Sebagaimana Allah SWT berfirman dalam Q.S al-Imran{3} ayat 191 :

الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَامًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ السَّمٰوٰتِ وَالْاَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هٰذَا بَاطِلًا سُبْحٰنَكَ فَقِنَا عَذَابَ النَّارِ ۙ ۱۹۱

“(Yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri, duduk atau dalam keadaan berbaring, dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata), “Ya Tuhan kami, tidaklah Engkau menciptakan semua ini sia-sia; Mahasuci Engkau, lindungilah kami dari azab neraka.” (Q.S al-Imran{3}:191).

Dalam ayat ke 191 Q.S al-Imran{3} menjelaskan bahwa Allah SWT dalam penciptaan langit dan bumi tidak ada yang sia-sia. Hal tersebut dijadikan renungan bagi manusia agar senantiasa selalu mengingat Allah dalam keadaan apapun dan berfikir tentang nikmat-nikmat dan kebesaran Allah SWT dalam menciptakan apa saja yang ada di langit dan di bumi. Di bumi banyak hal yang dapat dipelajari dan diperhatikan mulai dari manusianya, hewan, tumbuhan, kandungan bumi yang sangatlah beragam, dapat berupa gas, batuan, belerang, garam serta air (kekayaan) dan lumpur (Rubini, 2016). hingga peristiwa/fenomena yang terjadi secara alami maupun akibat campur tangan manusia.

Salah satu fenomena alam yang diamati adalah semburan lumpur di kawasan Kesongo yang diperkirakan muncul akibat adanya endapan batuan pada masa lalu yang memunculkan kondisi lapisan batuan bawah tertekan dengan suhu yang panas. Sebagai lapisan yang tertekan akan bergerak menvari kesetimbangan dan mengalami pencairan dan naik ke permukaan bumi.

Dalam penelitian ini dapat diketahui kandungan dibawah permukaan bumi yang muncul pada permukaan yaitu lumpur serta pola sebarannya dengan

menggunakan metode *gravity* berdasarkan nilai rapat massa batuan yang dapat dijadikan informasi dalam studi keilmuan dan juga informasi warga setempat akan sebaran semburan lumpur .

Konsep gravitasi dijelaskan Allah SWY dalam Q.S al-Insyiqaq[84] ayat 3-4 :

وَإِذَا الْأَرْضُ مُدَّتْ ۖ ۓ وَأَلْقَتْ مَا فِيهَا وَتَخَلَّتْ ۖ ۔

“Dan apabila bumi diratakan (3) dan memuntahkan apa yang ada di dalamnya dan menjadi kosong(4)” (Q.S al-Insyiqaq [84] :3-4).

Dalam Q.S al-Insyiqaq[84] ayat 3-4, Allah menjelaskan bahwa apabila bumi memiliki gaya gravitasi yang menarik benda-benda dan materi-materi , maka bagian atasnya akan turun ke bawah dan sebaliknya, menahan apa yang ada di bawah. Dalam kajian sains, bumi memiliki gaya tarik yang lebih besar dibandingkan dengan gaya tarik bulan yang diperkirakan seperenam dari gaya tarik bumi (Rubini, 2016).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian metode gravitasi pada lokasi semburan lumpur, dapat disimpulkan bahwa :

1. Struktur bawah permukaan pada area penelitian ini secara umum didominasi oleh batuan napal, napal lempungan, lempung pasir, pasir dan lempung gampingan.
2. Berdasarkan interpretasi kualitatif peta kontur anomali residual yang didapatkan, pola persebaran lumpur kesongo berada pada anomali tinggi disebelah timur dengan nilai 1,5mGal dengan estimasi kedalaman rata-rata residual -381,7202 meter. Pada interpretasi kuantitatif kantong lumpur terlihat pada penampang model bawah permukaan sayatan A-B yang memotong titik semburan lumpur Kesongo dari Utara ke Selatan dengan kedalaman kantong lumpur berada sekitar 245 m di bawah permukaan pada formasi Tawun.

5.2 Saran

Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan menggunakan metode geofisika lain dengan arah sayatan yang berbeda agar pemodelan struktur bawah permukaan serta identifikasi kantong lumpur pada area penelitian dapat terpetakan dengan lebih baik dan detail.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustin, N., & Wibawa, A. (2022). Analisis Data Gravitasi Untuk Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Potensi Panas Bumi Cipari. *Jambura Geoscience Review*, 4(1), 22–32. <https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v4i1.12114>
- Akesson, Maria. (2008). *Mud Volcanoes a Review*. Thesis. Lund: Departement of Geology Lund University
- Agustin, N., & Wibawa, A. (2022). Analisis Data Gravitasi Untuk Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Potensi Panas Bumi Cipari. *Jambura Geoscience Review*, 4(1), 22–32. <https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v4i1.12114>
- Atef, H., Abd El-Gawad, A. M. S., Abdel Zaher, M., & Farag, K. S. I. (2016). The contribution of gravity method in geothermal exploration of southern part of the Gulf of Suez–Sinai region, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 5(1), 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.02.005>
- Baghzendani, H. R., Aghajani, H., & Solimani, M. (2015). Subsurface modeling of mud volcanoes, using density model and analysis of seismic velocity. *Journal of Mining & Environment*, 6(1), 31–39.
- Bash, E. (2015). Bab 1-2. *PhD Proposal*, 1, 1–40. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64308-9>
- Blakely, R. J. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. cambridge university press.
- Burhannudinnur, M. (2019). Karakteristik Gunung Lumpur Zona Rembang Dan Implikasinya Terhadap Lapangan Migas Di Jawa Timur. *Lembaran Publikasi Minyak Dan Gas Bumi*, 53(3), 123–149. <https://doi.org/10.29017/lpmgb.53.3.432>
- Etiopo, G. (2005). Mud volcanoes and microseepage: The forgotten geophysical components of atmospheric methane budget. *Annals of Geophysics*, 48(1), 1–7.
- Herlin, Y., Laila, A., & Kahar, S. (2018). Pemodelan Geoid Indonesia dengan Data Satelit GOCE. *Geodesi Undip*, 2(Sistem Informasi Geografis), 240–252.
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., & Rexer, M. (2013). New Ultrahigh-Resolution Picture of Earth's Gravity Field. *Geophysical Research Letters*, 40, 4279–4283. <https://doi.org/10.1002/grl.50838>
- Jawa, N. E. C. (2022). *Penentuan Zona Sistem Gunung Lumpur Kesongo Menggunakan Kecepatan Interval Seismik pada Potensi Overpressure di Formasi Tawun , Lapangan “ F ”, Salah satu topik penting dalam eksplorasi dan pengembangan di industri migas adalah Mud Volcano System*. 10(3),

196–205. <https://doi.org/10.13170/10.3.23649>

- Kopanina, A. V, & Shvidskaya, K. A. (n.d.). *3D inversion modelling of gravity data for identification of subsurface structures in the mud volcano area of Sedati , Sidoarjo 3D inversion modelling of gravity data for identification of subsurface structures in the mud volcano area of Sedati , Sidoarjo*. 0–10. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2582/1/012009>
- Krisnayanti, B. D., & Agustawijaya, D. S. (2014). Characteristics of Lusi mud volcano and its impacts on the Porong River. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 1(4), 207–210. <https://doi.org/10.15243/83>
- Long, L. T., & Kaufmann, D. R. (2010). Acquisition and analysis of terrestrial gravity data. In *Acquisition and Analysis of Terrestrial Gravity Data*. Cambridge University. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139162289>
- Mazzini, A. (2009). Mud volcanism: Processes and implications. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), 1677–1680. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.05.003>
- Mosey, H. I. R., & Lumi, B. M. (2016). Determining Sam Ratulangi University ' S Local Gravity Acceleration Based on Harmonic Oscillation Theory. *Jurnal Ilmiah Sains*, 16(2), 104–107. <https://media.neliti.com/>
- Naufal, M. A. (M), & Supriyadi, S. (Supriyadi). (2015). Analisis Perubahan Densitas Bawah Permukaan Berdasarkan Data Gaya Berat Mikro Antar Waktu, Studi Kasus Di Semarang. *Jurnal Fisika Unnes*, 5(2), 80137. <https://www.neliti.com/id/publications/80137/>
- P., B., T., H., Sunardi, E., Hadi, S., & Sawolo, N. (2012). Mud Volcano and Its Evolution. *Earth Sciences*, March 2014. <https://doi.org/10.5772/24944>
- Remizovschi, A., Carpa, R., & Drăgan-Bularda, M. (2018). Biological and geological traits of terrestrial mud volcanoes - a review. *Analele Universitatii Din Oradea, Fascicula Biologie*, 25(2), 70–82.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley Blackwell.
- Rubini, R. (2016). Tafsir 'Ilmi. In *Al-Manar* (Vol. 5, Issue 2). <https://doi.org/10.36668/jal.v5i2.37>
- Rusydi, A. (2018). Tafsir Ayat Kauniyah. *Al Qalam: Jurnal Ilmiah Keagamaan Dan Kemasyarakatan*, 9(17). <https://doi.org/10.35931/aq.v0i0.56>
- S. A., K., & S. J., B. J. (2016). Identifikasi Pola Persebaran Sumber Lumpur Bawah Tanah Pada Mud Volcano Gunung Anyar Rungkut Surabaya Menggunakan Metode Geolistrik. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 5(1).
- Satyana, A. H. and A. (2008). Satyana., 2008, MUD DIPIRS AND MUD VOLCANOES IN DEPRESSIONS OF JAVA TO MADURA : ORIGINS, NATURES, AND IMPLICATIONS TO PETROLEUM SYSTEM. *PROCEEDINGS, INDONESIAN PETROLEUM ASSOCIATION ThirtySecond*

Annual Convention & Exhibition, 2, 1–34.

- Setiaswan, F. (2019). *Pemisahan Anomali Regional dan Residual Data Gayaberat Studi Kasus di Kota Lama Semarang*. 1(1), 29–36.
- 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(1), 25–34. <https://doi.org/10.31957/jfp.v2i1.22>
- Sugianto, A., & Rahardinata, T. (2015). Pemodelan Gaya Berat 3D Daerah Panas Bumi Dolok Marawa Kabupaten Simalungun, Sumatera Utara 3D Gravity Modeling of Dolok Marawa Geothermal Field in Simalungun Regency, North Sumatera. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 10(2), 32–45. <https://doi.org/10.47599/bsdg.v10i2.140>
- Zakariya, H., Margiono, R., Novitri, A., & Pevriadi, A. (2022). Identifikasi Anomali Gravitasi di Wilayah Sulawesi Tenggara Berdasarkan Data Gravitasi GGMplus. *PROGRESS: Jurnal Geofisika*, 1(1), 62–69. <https://jurnal.stmkg.ac.id/index.php/pjg>
- Sulistianingsih, Fithri (2009). *Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Daerah X Untuk Menentukan Sumber Pasir Besi Dengan Metode Gravity*: Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Program Fisika. Depok, Universitas Indonesia.
- Telford W.M, Geldart L.P., dan Sheriff R.E. (2004). *Applied Geophysics Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- Zain, Muhammad Amir, Muhammad Fahrur Rozi, Anisa Nur Septikasari, Muhammad Nuruddianto, Supriyanto, dan Ahmad Zarkasyi. 2015. “Studi Penerapan Metode Analisis Derivatif pada Data Potensial Gravitasi.” *E-Journal Fisika IV*: 65–70.
- Zakariya, Hilmi, Relly Margiono, Adinda Novitri, dan Anggi Pevriadi. 2022. “Identifikasi Anomali Gravitasi di Wilayah Sulawesi Tenggara Berdasarkan Data Gravitasi GGMplus.” *Progress Jurnal Geofisika* 1: 62–69.

LAMPIRAN

LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Penelitian

Titik Ukur	Longitude (X)	Latitude (Y)	UTM X	UTM Y	FAA (mGal)	Elevasi (m)
1	111.235	-7.163	525947	9208225	19.5	75
2	111.237	-7.163	526167	9208225	19.5	74
3	111.239	-7.163	526387	9208225	20.1	77
4	111.241	-7.163	526607	9208225	20.4	80
5	111.243	-7.163	526837	9208225	20.6	83
6	111.245	-7.163	527057	9208225	20.9	83
7	111.247	-7.163	527277	9208225	20.6	79
8	111.249	-7.163	527497	9208225	20.4	78
9	111.251	-7.163	527717	9208225	21.1	82
10	111.253	-7.163	527937	9208225	21.8	89
11	111.255	-7.163	528157	9208225	21.8	87
12	111.257	-7.163	528377	9208225	21.9	88
13	111.259	-7.163	528597	9208225	21.9	88
14	111.261	-7.163	528817	9208225	21.5	84
15	111.263	-7.163	529037	9208225	21.9	87
16	111.235	-7.161	525947	9208445	20.1	76
17	111.237	-7.161	526167	9208445	21	82
18	111.239	-7.161	526387	9208445	21	82
19	111.241	-7.161	526607	9208445	20.8	81
20	111.243	-7.161	526837	9208445	20.8	80
21	111.245	-7.161	527057	9208445	20.7	78
22	111.247	-7.161	527277	9208445	20.5	78
23	111.249	-7.161	527497	9208445	21.3	82
24	111.251	-7.161	527717	9208445	22.4	91
25	111.253	-7.161	527937	9208445	22.7	96
26	111.255	-7.161	528157	9208445	22.9	96
27	111.257	-7.161	528377	9208445	22.9	95
28	111.259	-7.161	528597	9208445	22.4	90
29	111.261	-7.161	528817	9208445	22.3	88
30	111.263	-7.161	529037	9208445	22.2	86
31	111.235	-7.159	525947	9208665	20.8	79
32	111.237	-7.159	526167	9208665	21.5	84
33	111.239	-7.159	526387	9208665	21.9	87
34	111.241	-7.159	526607	9208665	21.7	84
35	111.243	-7.159	526837	9208665	21.1	80
36	111.245	-7.159	527057	9208665	20.8	77

37	111.247	-7.159	527277	9208665	21.7	82
38	111.249	-7.159	527497	9208665	22.1	86
39	111.251	-7.159	527717	9208665	23.1	96
40	111.253	-7.159	527937	9208665	23.1	96
41	111.255	-7.159	528157	9208665	23.4	97
42	111.257	-7.159	528377	9208665	23.4	96
43	111.259	-7.159	528597	9208665	23.3	96
44	111.261	-7.159	528817	9208665	23	90
45	111.263	-7.159	529037	9208665	22.9	88
46	111.235	-7.157	525947	9208885	22	87
47	111.237	-7.157	526167	9208885	22.5	90
48	111.239	-7.157	526387	9208885	22	85
49	111.241	-7.157	526607	9208885	21.6	80
50	111.243	-7.157	526837	9208885	21.8	82
51	111.245	-7.157	527057	9208885	21.8	80
52	111.247	-7.157	527277	9208885	22.5	86
53	111.249	-7.157	527497	9208885	23.1	94
54	111.251	-7.157	527717	9208885	23.6	96
55	111.253	-7.157	527937	9208885	23.7	97
56	111.255	-7.157	528157	9208885	24	100
57	111.257	-7.157	528377	9208885	23.9	97
58	111.259	-7.157	528597	9208885	24.2	99
59	111.261	-7.157	528817	9208885	23.8	96
60	111.263	-7.157	529037	9208885	23.4	90
61	111.235	111.235	525947	9209105	22.9	91
62	111.237	-7.155	526167	9209105	22.9	90
63	111.239	-7.155	526387	9209105	21.7	79
64	111.241	-7.155	526607	9209105	21.6	77
65	111.243	-7.155	526837	9209105	21.6	78
66	111.245	-7.155	527057	9209105	21.6	77
67	111.247	-7.155	527277	9209105	22.3	81
68	111.249	-7.155	527497	9209105	23.7	94
69	111.251	-7.155	527717	9209105	24	97
70	111.253	-7.155	527937	9209105	24.3	98
71	111.255	-7.155	528157	9209105	24.3	99
72	111.257	-7.155	528377	9209105	24.2	96
73	111.259	-7.155	528597	9209105	24.5	100
74	111.261	-7.155	528817	9209105	24.3	96
75	111.263	-7.155	529037	9209105	23.8	90
76	111.235	-7.153	525947	9209335	22.8	87
77	111.237	-7.153	526167	9209335	22.6	82

78	111.239	-7.153	526387	9209335	21.9	77
79	111.241	-7.153	526617	9209335	21.8	74
80	111.243	-7.153	526837	9209335	22.1	77
81	111.245	-7.153	527057	9209335	22	76
82	111.247	-7.153	527277	9209335	22.6	81
83	111.249	-7.153	527497	9209335	23.7	92
84	111.251	-7.153	527717	9209325	24.4	98
85	111.253	-7.153	527937	9209325	24.8	99
86	111.255	-7.153	528157	9209325	24.5	96
87	111.257	-7.153	528377	9209325	24.7	98
88	111.259	-7.153	528597	9209325	25	99
89	111.261	-7.153	528817	9209325	24.7	96
90	111.263	-7.153	529037	9209325	24	89
91	111.235	-7.151	525947	9209555	23.3	88
92	111.237	-7.151	526167	9209555	23.1	86
93	111.239	-7.151	526387	9209555	23	83
94	111.241	-7.151	526617	9209555	22.4	75
95	111.243	-7.151	526837	9209555	22.1	74
96	111.245	-7.151	527057	9209555	22.2	73
97	111.247	-7.151	527277	9209555	23	79
98	111.249	-7.151	527497	9209555	23.8	86
99	111.251	-7.151	527717	9209555	24.4	93
100	111.253	-7.151	527937	9209555	24.7	96
101	111.255	-7.151	528157	9209555	25.2	99
102	111.257	-7.151	528377	9209555	25.3	99
103	111.259	-7.151	528597	9209555	25.1	97
104	111.261	-7.151	528817	9209555	24.6	92
105	111.263	-7.151	529037	9209555	24.2	86
106	111.235	-7.149	525947	9209775	23.4	85
107	111.237	-7.149	526167	9209775	22.9	78
108	111.239	-7.149	526387	9209775	22.6	76
109	111.241	-7.149	526617	9209775	22.7	75
110	111.243	-7.149	526837	9209775	22.7	75
111	111.245	-7.149	527057	9209775	23.5	82
112	111.247	-7.149	527277	9209775	23	76
113	111.249	-7.149	527497	9209775	23.7	80
114	111.251	-7.149	527717	9209775	24.2	87
115	111.253	-7.149	527937	9209775	24.4	87
116	111.255	-7.149	528157	9209775	24.7	90
117	111.257	-7.149	528377	9209775	24.6	88
118	111.259	-7.149	528597	9209775	24.5	85

119	111.261	-7.149	528817	9209775	24.8	88
120	111.263	-7.149	529037	9209775	24.6	86
121	111.235	-7.147	525947	9209995	23.2	76
122	111.237	-7.147	526167	9209995	23	75
123	111.239	-7.147	526387	9209995	22.6	72
124	111.241	-7.147	526617	9209995	22.8	72
125	111.243	-7.147	526837	9209995	23.1	74
126	111.245	-7.147	527057	9209995	24.1	81
127	111.247	-7.147	527277	9209995	24.4	86
128	111.249	-7.147	527497	9209995	23.4	75
129	111.251	-7.147	527717	9209995	24.2	81
130	111.253	-7.147	527937	9209995	24.4	82
131	111.255	-7.147	528157	9209995	24.4	82
132	111.257	-7.147	528377	9209995	24.9	86
133	111.259	-7.147	528597	9209995	25.2	90
134	111.261	-7.147	528817	9209995	25.5	92
135	111.263	-7.147	529037	9209995	25.2	88
136	111.235	-7.145	525947	9210215	23.3	74
137	111.237	-7.145	526167	9210215	23.1	73
138	111.239	-7.145	526387	9210215	23.2	73
139	111.241	-7.145	526617	9210215	23.6	74
140	111.243	-7.145	526837	9210215	24.4	83
141	111.245	-7.145	527057	9210215	24.3	80
142	111.247	-7.145	527277	9210215	24.7	85
143	111.249	-7.145	527497	9210215	25.5	92
144	111.251	-7.145	527717	9210215	25	86
145	111.253	-7.145	527937	9210215	25.2	88
146	111.255	-7.145	528157	9210215	25.8	93
147	111.257	-7.145	528377	9210215	26.2	94
148	111.259	-7.145	528597	9210215	26.2	94
149	111.261	-7.145	528817	9210215	26.7	98
150	111.263	-7.145	529037	9210215	26.2	94

Titik Ukur	BC (mGal)	ABS (mGal)	TC (mGal)	ABL (mGal)	Rho Parasnis (gr/cm ²)	RBD (mGal)	Lokal (mGal)
1	3.14	16.4	0.002025	16.3573	1	15.11	-3.21
2	3.1	16.4	0.020392	16.4176	1	15.51	-2.90
3	3.23	16.9	-0.012806	16.8586	1	15.79	-2.61
4	3.35	17	0.007791	17.0534	1	16.22	-2.20
5	3.48	17.1	0.000482	17.1203	1	16.67	-1.83

6	3.48	17.4	-0.03907	17.3807	1	16.75	-1.79
7	3.31	17.3	0.00114	17.2887	1	16.53	-1.97
8	3.27	17.1	0.035491	17.165	1	16.46	-2.02
9	3.44	17.7	-0.008116	17.6536	1	16.82	-1.64
10	3.73	18.1	0.019607	18.0878	1	17.45	-1.05
11	3.65	18.2	0.02728	18.1794	1	17.76	-0.77
12	3.69	18.2	-0.009957	18.2002	1	17.64	-0.94
13	3.69	18.2	0.060613	18.2708	1	17.3	-1.25
14	3.52	18	-0.023849	17.954	1	17.2	-1.35
15	3.65	18.3	0.034461	18.2866	1	17.3	-1.29
16	3.19	16.9	-0.011103	16.9022	1	15.67	-2.70
17	3.44	17.6	0.012029	17.5738	1	16.34	-2.10
18	3.44	17.6	-0.046853	17.5149	1	16.57	-1.86
19	3.4	17.4	0.056111	17.4598	1	16.61	-1.86
20	3.35	17.4	0.003509	17.4491	1	16.48	-1.98
21	3.27	17.4	-0.001898	17.4276	1	16.33	-2.14
22	3.27	17.2	0.006139	17.2356	1	16.44	-2.04
23	3.44	17.9	0.042396	17.9041	1	16.91	-1.54
24	3.82	18.6	0.003797	18.5882	1	17.56	-0.95
25	4.03	18.7	0.061155	18.7359	1	18.04	-0.52
26	4.03	18.9	0.060044	18.9348	1	18.2	-0.39
27	3.98	18.9	0.078189	18.9948	1	18.07	-0.57
28	3.77	18.6	0.061935	18.6882	1	17.76	-0.85
29	3.69	18.6	-0.022948	18.5872	1	17.74	-0.87
30	3.61	18.6	-0.008695	18.5853	1	17.77	-0.89
31	3.31	17.5	0.009508	17.497	1	16.51	-1.85
32	3.52	18	0.095214	18.0731	1	17.25	-1.21
33	3.65	18.3	0.080832	18.3329	1	17.51	-0.98
34	3.52	18.2	-0.018687	18.1592	1	17.33	-1.15
35	3.35	17.7	0.012371	17.758	1	16.94	-1.56
36	3.23	17.6	0.040327	17.6117	1	16.77	-1.71
37	3.44	18.3	0.02643	18.2882	1	17.2	-1.28
38	3.61	18.5	0.076372	18.5704	1	17.91	-0.68
39	4.03	19.1	0.106672	19.1814	1	18.57	-0.03
40	4.03	19.1	0.017085	19.0918	1	18.73	0.13
41	4.07	19.3	0.043001	19.3758	1	18.76	0.13
42	4.03	19.4	0.004491	19.3792	1	18.74	0.11
43	4.03	19.3	-0.010236	19.2645	1	18.71	0.03
44	3.77	19.2	0.048107	19.2744	1	18.58	-0.06
45	3.69	19.2	0.003789	19.2139	1	18.35	-0.28
46	3.65	18.4	0.097332	18.4494	1	17.63	-0.83
47	3.77	18.7	-0.006466	18.7198	1	18.05	-0.47
48	3.56	18.4	-0.020086	18.4159	1	17.87	-0.66
49	3.35	18.2	0.028481	18.2741	1	17.58	-0.94

50	3.44	18.4	0.041488	18.4032	1	17.45	-1.09
51	3.35	18.4	0.028261	18.4739	1	17.51	-1.04
52	3.61	18.9	0.012322	18.9063	1	18.05	-0.51
53	3.94	19.2	0.072445	19.231	1	18.75	0.17
54	4.03	19.6	0.023138	19.5979	1	19.12	0.50
55	4.07	19.6	0.063125	19.6959	1	19.19	0.56
56	4.19	19.8	0.088609	19.8956	1	19.26	0.62
57	4.07	19.8	0.036382	19.8692	1	19.36	0.70
58	4.15	20	0.035312	20.0842	1	19.54	0.85
59	4.03	19.8	-0.031294	19.7434	1	19.47	0.76
60	3.77	19.6	0.018853	19.6452	1	18.98	0.31
61	3.82	19.1	0.041449	19.1258	1	18.46	-0.07
62	3.77	19.1	0.049244	19.1755	1	18.35	-0.21
63	3.31	18.4	0.00558	18.3931	1	17.66	-0.88
64	3.23	18.4	0.076929	18.4483	1	17.3	-1.22
65	3.27	18.3	0.030276	18.3597	1	17.35	-1.19
66	3.23	18.4	0.013395	18.3848	1	17.62	-0.92
67	3.4	18.9	0.12674	19.0304	1	18.14	-0.43
68	3.94	19.8	0.087362	19.8459	1	18.84	0.23
69	4.07	19.9	0.007883	19.9407	1	19.23	0.60
70	4.11	20.2	0.054695	20.2456	1	19.43	0.78
71	4.15	20.1	-0.010394	20.1385	1	19.59	0.91
72	4.03	20.2	0.052014	20.2267	1	19.7	1.02
73	4.19	20.3	0.011831	20.3188	1	19.9	1.19
74	4.03	20.3	0.058188	20.3329	1	19.84	1.10
75	3.77	20	-0.010613	20.0157	1	19.37	0.70
76	3.65	19.2	-0.018559	19.1335	1	18.74	0.17
77	3.44	19.2	0.012099	19.1738	1	18.44	-0.13
78	3.23	18.7	-0.024076	18.6473	1	17.79	-0.79
79	3.1	18.7	-0.006027	18.6912	1	17.4	-1.16
80	3.23	18.9	0.015665	18.8871	1	17.46	-1.11
81	3.19	18.8	0.00261	18.8159	1	17.74	-0.84
82	3.4	19.2	0.038463	19.2421	1	18.31	-0.29
83	3.86	19.8	0.032534	19.875	1	19.04	0.41
84	4.11	20.3	-0.002406	20.2885	1	19.6	0.93
85	4.15	20.6	0.072169	20.7211	1	20.02	1.32
86	4.03	20.5	0.011574	20.4863	1	20.22	1.48
87	4.11	20.6	0.072208	20.6631	1	20.27	1.51
88	4.15	20.8	0.020733	20.8697	1	20.17	1.43
89	4.03	20.7	0.016261	20.691	1	20	1.24
90	3.73	20.3	0.008816	20.277	1	19.53	0.83
91	3.69	19.6	-0.033522	19.5766	1	18.73	0.15
92	3.61	19.5	-0.054635	19.4394	1	18.64	0.04
93	3.48	19.5	-0.018977	19.5008	1	18.33	-0.27

94	3.14	19.3	0.076171	19.3314	1	18.04	-0.60
95	3.1	19	-0.012647	18.9845	1	18	-0.63
96	3.06	19.1	0.00623	19.1453	1	18.19	-0.43
97	3.31	19.7	0.023673	19.7112	1	18.74	0.08
98	3.61	20.2	0.103138	20.2972	1	19.35	0.66
99	3.9	20.5	-0.012319	20.4882	1	19.89	1.20
100	4.03	20.7	0.004563	20.6793	1	20.36	1.64
101	4.15	21	0.013249	21.0622	1	20.73	1.96
102	4.15	21.1	-0.009531	21.1394	1	20.68	1.90
103	4.07	21	0.024703	21.0575	1	20.35	1.56
104	3.86	20.7	0.124241	20.8667	1	20.02	1.25
105	3.61	20.6	-0.010626	20.5834	1	19.57	0.86
106	3.56	19.8	0.092263	19.9282	1	18.61	0.01
107	3.27	19.6	0.034923	19.6644	1	18.44	-0.16
108	3.19	19.4	-0.093445	19.3199	1	18.32	-0.29
109	3.14	19.6	0.016462	19.5717	1	18.38	-0.26
110	3.14	19.6	0.009646	19.5649	1	18.45	-0.20
111	3.44	20.1	0.022044	20.0838	1	18.76	0.10
112	3.19	19.8	0.03684	19.8502	1	19	0.34
113	3.35	20.3	-0.019212	20.3264	1	19.33	0.64
114	3.65	20.6	0.026561	20.5787	1	19.55	0.86
115	3.65	20.8	0.07436	20.8265	1	19.75	1.03
116	3.77	20.9	0.122824	21.0491	1	20.14	1.40
117	3.69	20.9	0.07588	20.986	1	20.24	1.48
118	3.56	20.9	-0.007828	20.9281	1	20.08	1.32
119	3.69	21.1	-0.000822	21.1093	1	20.06	1.27
120	3.61	21	-0.010447	20.9836	1	19.81	1.06
121	3.19	20	0.025985	20.0393	1	18.79	0.15
122	3.14	19.9	0.075395	19.9306	1	18.62	-0.03
123	3.02	19.6	0.000505	19.5815	1	18.4	-0.23
124	3.02	19.8	0.000018	19.7811	1	18.51	-0.14
125	3.1	20	-0.034021	19.9632	1	18.74	0.08
126	3.4	20.7	0.09835	20.802	1	19.15	0.47
127	3.61	20.8	0.090256	20.8843	1	19.59	0.84
128	3.14	20.3	0.041878	20.2971	1	19.52	0.78
129	3.4	20.8	0.020932	20.8246	1	19.48	0.73
130	3.44	21	0.007876	20.9696	1	19.51	0.77
131	3.44	21	0.007239	20.969	1	19.86	1.10
132	3.61	21.3	-0.057749	21.2363	1	20.31	1.52
133	3.77	21.4	0.038304	21.4646	1	20.62	1.82
134	3.86	21.6	-0.053568	21.5889	1	20.84	1.99
135	3.69	21.5	0.002693	21.5129	1	20.6	1.83
136	3.1	20.2	0.007094	20.2043	1	19.22	0.53
137	3.06	20	0.01438	20.0535	1	19.18	0.45

138	3.06	20.1	-0.006578	20.1325	1	18.96	0.26
139	3.1	20.5	0.11009	20.6073	1	19.03	0.33
140	3.48	20.9	0.009973	20.9298	1	19.44	0.69
141	3.35	20.9	0.01122	20.9568	1	19.79	1.03
142	3.56	21.1	0.014514	21.1505	1	20.36	1.55
143	3.86	21.6	-0.008678	21.6338	1	20.74	1.85
144	3.61	21.4	0.011205	21.4052	1	20.57	1.68
145	3.69	21.5	0.008196	21.5184	1	20.61	1.73
146	3.9	21.9	0.037223	21.9377	1	21.04	2.15
147	3.94	22.3	0.014021	22.2726	1	21.5	2.59
148	3.94	22.3	-0.003822	22.2548	1	21.84	2.91
149	4.11	22.6	-0.004272	22.5866	1	22.08	3.11
150	3.94	22.3	0.127557	22.3861	1	21.55	2.71

Lampiran 2 Contoh Perhitungan

Diketahui : Titik 1, Elevasi = 75 meter , FAA = 19,5 mGal

1. Koreksi Bouguer

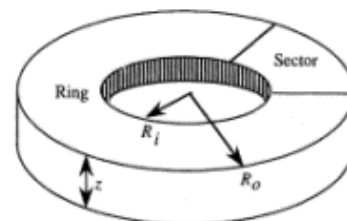
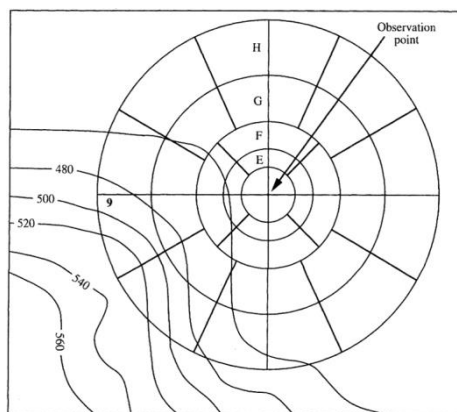
$$BC = 0,04193 \times 1 \times h = 0,04193 \times 2,52 \times 75 = 3,14 \text{ mGal}$$

$$ABS = FAA - BC = 19,5 - 3,14 = 16,4 \text{ mGal}$$

2. Koreksi Terrain

Menentukan rata-rata elevasi daerah penelitian $h = 86$ meter

- a. Menentukan zona dan kompartement dengan cara menyesuaikan dari ketinggian rata-rata daerah penelitian. Maka daerah penelitian masuk dalam zona D yang memiliki 6 sektor dengan jarak 50,3 – 170,1 meter.
- b. Menentukan ketinggian rata-rata dari setiap sektor daerah penelitian.
 - Sektor 1 = 89 meter
 - Sektor 2 = 81 meter
 - Sektor 3 = 79 meter
 - Sektor 4 = 76,1 meter
 - Sektor 5 = 74,2 meter
 - Sektor 6 = 80 meter
- c. Menentukan perbedaan relatif antar ketinggian titik stasiun dengan ketinggian setiap sektor
 - Sektor 1 = $75 - 89 = -14$ meter
 - Sektor 2 = $75 - 81 = -6$ meter
 - Sektor 3 = $75 - 79 = -4$ meter
 - Sektor 4 = $75 - 76,1 = -1,1$ meter
 - Sektor 5 = $75 - 74,2 = 0,8$ meter
 - Sektor 6 = $75 - 80 = -5$ meter



- d. Perhitungan setiap sektor

- Sektor 1

Diketahui : $R_i = 50,3$ m; $R_o = 170,1$ m; $z = 14$ m; $n = 6$

Ditanya : g_{sektor} 1

$$\begin{aligned} \text{Jawab : } & \frac{2\pi G\rho}{n} \left[(R_i - R_o) + \sqrt{(R_i^2 + z^2)} - \sqrt{(R_o^2 + z^2)} \right] \\ &= \frac{0,04193 \times 1}{6} \left[(170,1 - 50,3) + \sqrt{(50,1^2 + 14^2)} - \sqrt{(170,1^2 + 14^2)} \right] \\ &= 0,006988 [116,8 + 55,107984 - 170,875159] \\ &= 0,006988 [1,232815] = 0,008615 \text{ mGal} \end{aligned}$$

- e. Setelah semua perbedaan ketinggian relatif dihitung menggunakan persamaan terrain, maka nilai koreksi dari semua sektor dimasukkan kedalam tabel.

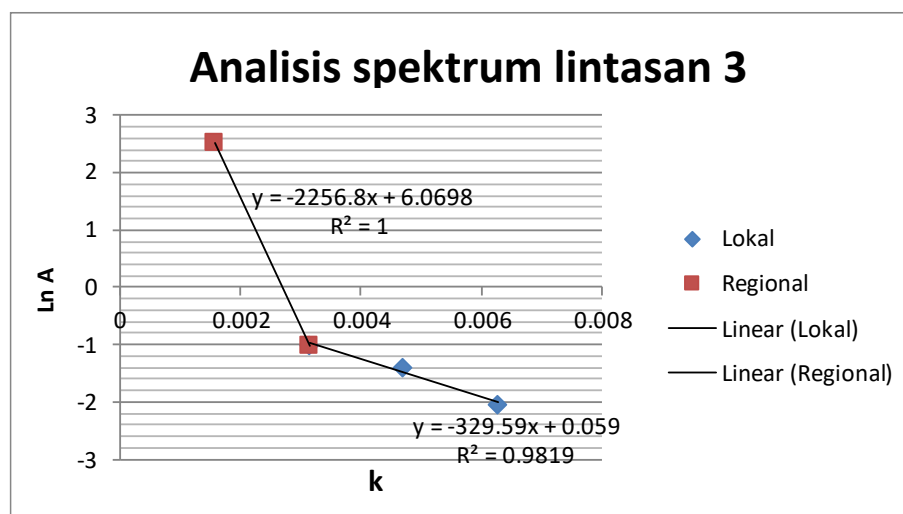
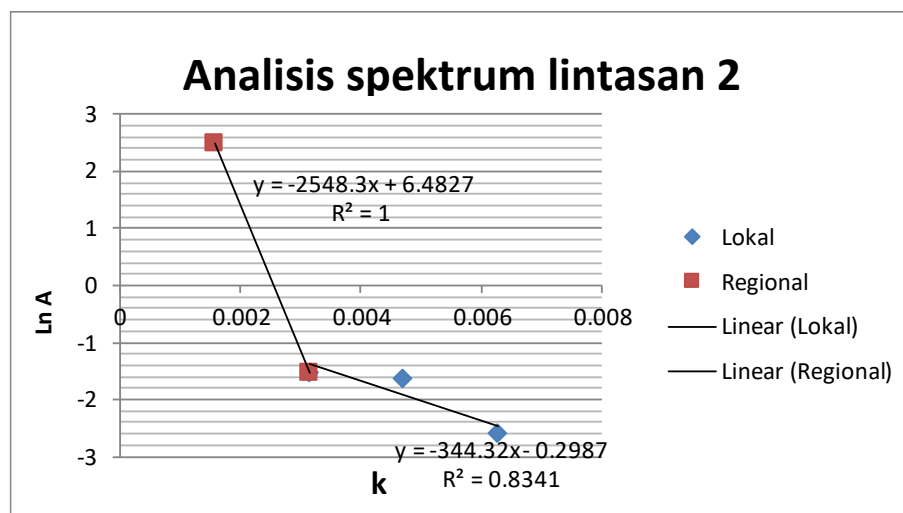
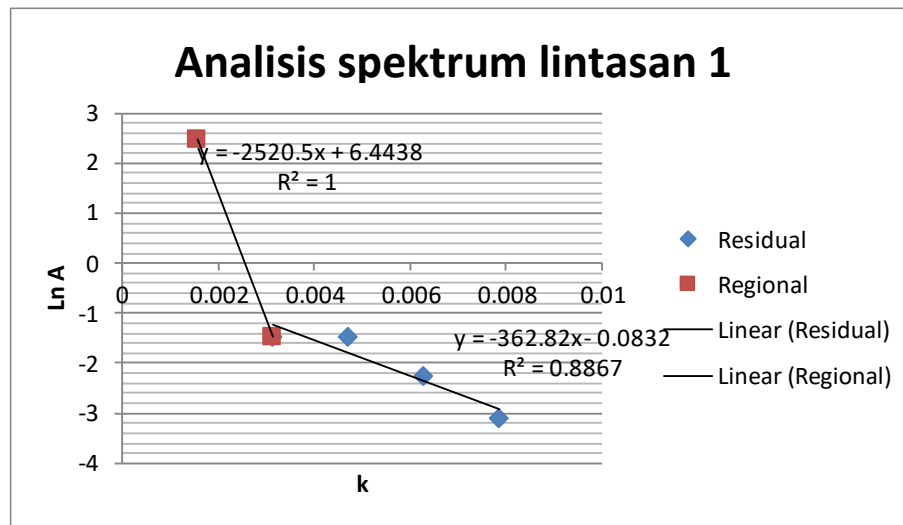
Tabel koreksi terrain pada titik 1

Sektor	Ketinggian rata-rata (meter)	Ketinggian relatif (meter)	g_{sektor} (mGal)
1.	89	-14	0,008615
2.	81	-6	0,001613
3.	79	-4	0,000719
4.	76,1	-1,1	0,000054
5.	74,2	0,8	0,000028
6.	80	-5	0,001122
Rerata			0,002025

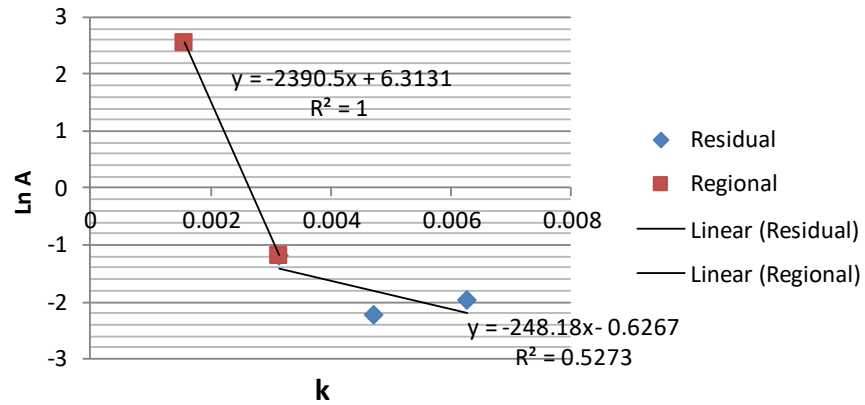
3. Perhitungan ABL

$$ABL = ABS + TC = 16,4 + 0,002025 = 16,36 \text{ mGal}$$

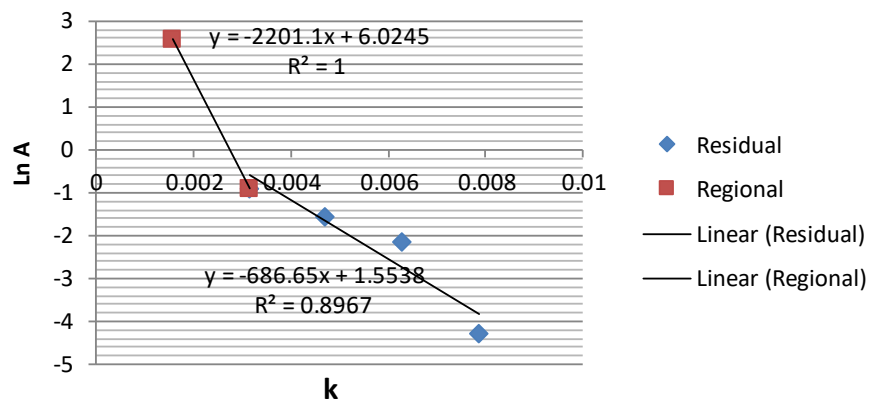
Lampiran 3 Grafik Analisis Spektrum



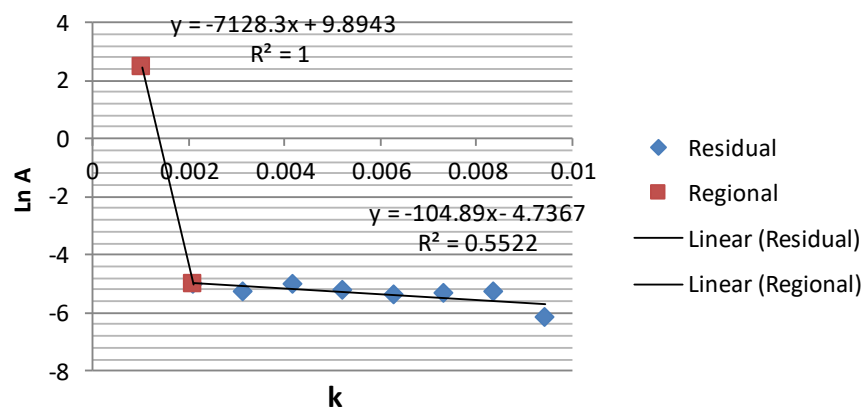
Analisis spektrum lintasan 4



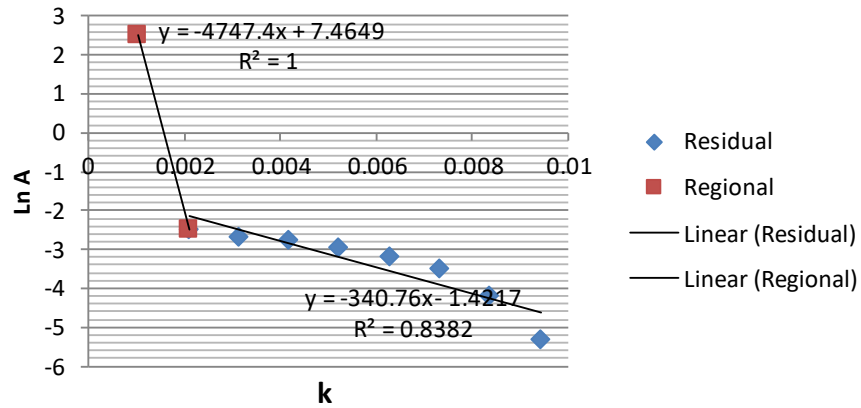
Analisis spektrum lintasan 5



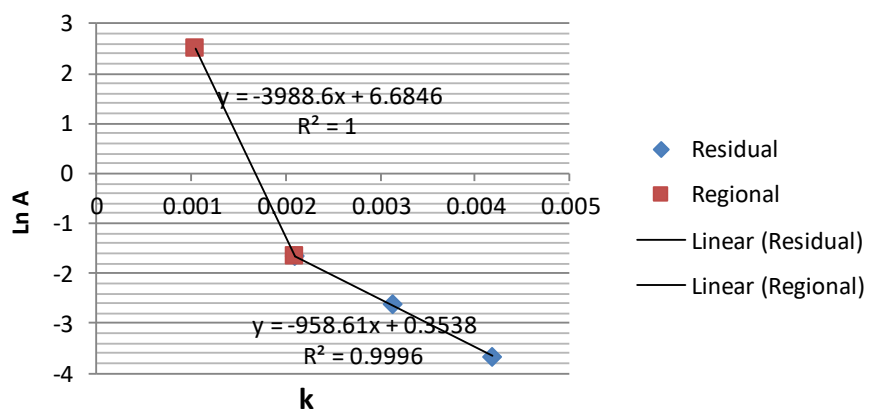
Analisis spektrum lintasan 6



Analisis spektrum lintasan 7



Analisis spektrum lintasan 8



Analisis spektrum lintasan 9

