

**IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN
BENDUNGAN SUTAMI DAN SEKITARNYA
MENGUNAKAN METODE GAYABERAT**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Oleh:

ELWIN PURWANTO

105090300111028



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

MALANG

2014

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAAN
BENDUNGAN SUTAMI DAN SEKITARNYA
MENGUNAKAN METODE GAYABERAT**

**Oleh:
ELWIN PURWANTO
105090300111028**

Telah dipertahankan di depan Majelis Penguji
Pada tanggal.....
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Sains dalam Bidang Fisika

telah diperiksa dan disahkan oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Sunaryo, S.Si., M.Si.
NIP196712281994121001

Drs. Wasis, M.AB
NIP 195511091984031001

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika**

Drs. Adi Susilo, Ph.D
NIP 193312271991031002

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Elwin Purwanto

NIM : 105090300111028

Penulisan Tugas Akhir Berjudul :

**IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN
BENDUNGAN SUTAMI DAN SEKITARNYA
MENGUNAKAN METODE GAYABERAT**

dengan ini menyatakan bahwa:

1. Isi dari Tugas Akhir yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di bagian isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Tugas Akhir ini.
2. Apabila di kemudian hari ternyata Tugas Akhir yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan segala kesadaran.

Malang, 19 Desember 2014

Yang Menyatakan,

Elwin Purwanto
105090300111028

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



IDENTIFIKASI STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN BENDUNGAN SUTAMI DAN SEKITARNYA MENGUNAKAN METODE GAYABERAT

ABSTRAK

Bendungan Sutami merupakan bendungan terbesar di Jawa Timur yang dimanfaatkan dalam berbagai hal bagi kehidupan masyarakat sekitar. Dilihat dari kondisi geologi, bendungan Sutami terletak di atas Endapan Tuf dan Endapan Gunungapi Butak dengan kemungkinan terdapat tiga formasi batuan lain yang turut menyusun batuan di sekitar bendungan, Formasi Wuni, Formasi Campurdarat, dan Formasi Nampol. Berdasarkan penelitian gayaberat yang dilakukan di daerah tersebut, diperoleh anomali Bouguer sekitar 105 mGal – 215 mGal. Dengan menggunakan metode upward kontinuasi, didapatkan anomali regional dan lokal pada ketinggian 1900 m. Setelah dilakukan pemodelan menggunakan metode *Talwani* $2\frac{1}{2}D$ dihasilkan lima jenis batuan dengan densitas antara 1,92 g/cm³, 2,0 g/cm³, 2,35 g/cm³, 2,55 g/cm³, dan 2,9 g/cm³ yang secara berurutan diindikasikan sebagai soil dan batuapung, tuf pasiran, batu pasir, batu gamping, dan lava. Kelima jenis batuan yang diperoleh merupakan jenis batuan yang berasal dari gunungapi. Pada dua lintasan pemodelan yang dihasilkan terdapat kemiringan tajam yang diindikasikan sebagai kelurusan struktur yang terjadi pada jarak sekitar 1,5 km dari bendungan.

Kata Kunci: Bendungan Sutami, anomali Bouguer, densitas

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



SUBSURFACE STRUCTURE IDENTIFICATION OF SUTAMI DAM AND SURROUNDING USING GRAVITY METHOD

ABSTRACT

Sutami dam is the largest dam in East Java. This dam is located at Sumberpucung, Malang, East Java. In geological map, this dam is located at Tuff Deposits and Butak Volcanic Products. There are three other Formations that build this location: Wuni Formation, Campurdarat Formation, and Nampol Formation. Based on the gravity research in this area, Bouguer anomaly obtained between 105 – 215 mGal. This Bouguer anomaly is an anomaly superposition of regional and local anomalies. Using upward continuation method on 1900 m height, regional and local anomalies can be separated. After modeling used $2\frac{1}{2}D$ Talwani method obtained five types of rock with density of 1,92 g/cm³, 2,0 g/cm³, 2,35 g/cm³, 2,55 g/cm³, dan 2,9 g/cm³ respectively indicated as soil and pumice, sandy tuff, sandstone, limestone, and lava. In two line modeling, there are sharp slope which indicated as the straightness of the structure occurs at a distance of about 1,5 km from the dam.

Kata Kunci: Sutami dam, Bouguer anomal, density



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil' alamin,

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT karena atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, penulisan skripsi yang berjudul **“Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Bendungan Sutami Dan Sekitarnya Menggunakan Metode Gayaberat”** dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Agung Muhammad SAW, pemimpin seluruh ummat sekaligus penuntun bagi kita semua.

Selama pelaksanaan penelitian hingga penyelesaian penulisan tugas akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu, Bapak, dan Adik yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam setiap saat agar bisa segera menyelesaikan proses pelaksanaan skripsi ini.
2. Dr. Sunaryo, S.Si,M.Si selaku dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran bagi penulis dari penelitian hingga penulisan skripsi.
3. Drs. Wasis, M.AB selaku dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan saran secara intensif bagi penulis dari penelitian hingga penulisan skripsi.
4. Ir. D.J. Djoko Henry S.,M.Phil.,PhD. selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan dukungan, bimbingan, kritik dan saran selama pelaksanaan proses menempuh akademik di Jurusan Fisika Universitas Brawijaya.
5. Drs. Adi Susilo, Ph.D. selaku Ketua Jurusan dan rer.nat. Abdurrouf, M.Sc. selaku Sekretaris Jurusan beserta seluruh Dosen dan staf Jurusan Fisika yang telah membimbing dan memberikan banyak pembelajaran penting selama menempuh pendidikan di Jurusan Fisika Universitas Brawijaya.
6. Seluruh pihak yang turut membantu dalam proses penelitian terutama Diah, Fina, Hanif, Galuh, Amanda, Puguh, Atul, dan Fikri.
7. Seluruh Keluarga Fisika 2010 tanpa terkecuali sebagai saudara sekaligus sahabat yang selalu ada di saat penulis membutuhkan bantuan.

8. Keluarga Pengurus HIMAFIS UB dari periode 2011 hingga 2014 terutama periode 2013 yang sudah menjadi keluarga baru sekaligus rekan kerja bagi penulis untuk berbagi ilmu dalam proses pendewasaan.

9. Seluruh Keluarga Besar Jurusan Fisika Universitas Brawijaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan penulisan yang lebih baik lagi. Serta penulis juga sangat berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Malang, 19 Desember 2014

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUK	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	iii
LEMBAR PERNYATAAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I TINJAUAN PUSTAKA	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Prinsip Dasar Metode Gayaberat	5
2.1.1 Teori dasar gayaberat	5
2.1.2 Percepatan gravitasi	6
2.1.3 Potensial gravitasi	7
2.2 Pengukuran Gayaberat	8
2.3 Gambaran Permukaan Bumi	9
2.3.1 Spheroid referensi	9
2.3.2 Geoid	10
2.4 Koreksi-Koreksi Metode Gayaberat	11
2.4.1 Koreksi pasang surut (<i>tidal correction</i>)	11
2.4.2 Koreksi apungan (<i>drift correction</i>)	12
2.4.3 Koreksi lintang (<i>latitude correction</i>)	13
2.4.4 Koreksi udara bebas (<i>free-air correction</i>)	15
2.4.5 Koreksi Bouguer (<i>Bouguer correction</i>)	16
2.4.6 Koreksi medan (<i>terrain correction</i>)	17
2.5 Anomali Bouguer	19
2.6 Tinjauan Umum Daerah Penelitian	20
2.6.1 Kondisi Geografis	20
2.6.2 Susunan Stratigrafi	20
2.6.3 Kondisi Geologi	23

BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	25
3.2 Peralatan Penelitian	26
3.3 Metode Interpretasi.....	27
3.4 Tahapan Pengolahan Data	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN	55



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gaya Gravitasi antara dua buah benda	5
Gambar 2.2 Bentuk muka bumi tidak bulat sempurna	7
Gambar 2.3 Perbedaan bentuk bumi	9
Gambar 2.4 Perbedaan posisi geoid dan spheroid referensi	10
Gambar 2.5 Efek massa batuan yang mempengaruhi posisi geoid	11
Gambar 2.6 Skema <i>free-air correction</i>	15
Gambar 2.7 Koreksi Bouguer	16
Gambar 2.8 Topografi tidak teratur yang menjadikan perlu dilakukan koreksi medan	18
Gambar 2.9 <i>Hammer chart</i>	18
Gambar 2.10 Cincin silinder untuk menghitung koreksi medan ...	19
Gambar 2.11 Peta geologi daerah penelitian	21
Gambar 2.12 Slicing peta geologi daerah penelitian	22
Gambar 3.1 Titik pengukuran gayaberat	25
Gambar 3.2 Skema gravimeter LaCoste-Romberg	26
Gambar 3.3 Gravimeter LaCoste-Romberg Model G-1053	27
Gambar 3.6 Kontur anomali Bouguer lengkap dan titik pengukuran	28
Gambar 3.6 Diagram alir penelitian	31
Gambar 4.1 Peta kontur anomali Bouguer	33
Gambar 4.2 Peta kontur elevasi	34
Gambar 4.3 Hubungan antara elevasi dengan anomali Bouguer ...	35
Gambar 4.4 Overlay peta geologi dan peta kontur anomali Bouguer	37
Gambar 4.5 Anomali regional	38
Gambar 4.6 Anomali lokal	39
Gambar 4.7 Posisi <i>slicing</i> pada peta kontur anomali lokal	41
Gambar 4.8 Pemodelan <i>line A – A'</i>	42
Gambar 4.9 Pemodelan slice B – B'	45

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Keterangan warna lapisan batuan pada hasil pemodelan <i>line A – A'</i>	43
Tabel 4.2	Keterangan warna lapisan batuan pada hasil pemodelan <i>line B – B'</i>	46

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data gayaberat daerah penelitian	55
Lampiran 2 Peta geografis daerah penelitian	58
Lampiran 3 Peta geologi daerah penelitian	59
Lampiran 4 Tabel densitas batuan.....	60
Lampiran 5 Peta anomali Bouguer daerah penelitian.....	62
Lampiran 6 Lokasi <i>slice line</i> A – A' dan <i>line</i> B – B'	63
Lampiran 7 Dokumentasi kegiatan penelitian.....	64



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB I

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan konsep tektonik lempeng, Indonesia merupakan kepulauan yang terletak di daerah interaksi antara tiga lempeng besar, yaitu lempeng Hindia-Australia, lempeng Pasifik, dan lempeng Eurasia. Ditinjau dari geodinamika, lempeng Eurasia di bagian utara relatif diam, lempeng Pasifik bergerak ke arah barat dengan kecepatan 7 – 13 cm pertahun, sedangkan di tenggara/selatan lempeng Hindia-Australia bergerak ke utara dengan kecepatan 6 – 10 cm pertahun (Katili, 1973). Kondisi ini menyebabkan Indonesia menjadi sangat rawan terhadap bahaya gempa bumi, gerakan patahan aktif, tsunami, dan letusan gunung api yang tersusun dalam formasi *ring of fire* (Natawidjaja, 2007). Menurut Soebowo, 2007 dalam Ridhwan, 2010, wilayah yang sering terkena pengaruh dari kondisi ini yaitu pada wilayah yang terletak berdekatan dengan batas antar lempeng sehingga mengakibatkan daerah-daerah tersebut rawan terhadap aktivitas seismik yang ditimbulkan oleh pergeseran antar lempeng.

Pulau Jawa, terutama wilayah pantai Jawa bagian selatan termasuk dalam wilayah yang memiliki kerentanan bahaya gempa bumi tinggi karena wilayah ini berada \pm 200 km sebelah selatan zona subduksi Jawa Selatan. Daerah ini merupakan perbatasan lempeng yang aktif sehingga sering timbul gempa bumi tektonik karena adanya tumbukan antar lempeng (Soebowo, 2007 dalam Ridhwan, 2010).

Pada dasarnya, di bagian barat Indonesia adalah lempeng Asia Tenggara yang merupakan *extrusion block* akibat tumbukan benua India dan Asia pada masa mesozoikum (Taponnier et al., 1977). Dengan demikian, dapat terjadi berbagai macam peristiwa seperti patahan lempeng akibat tumbukan, muncul gunung baru, saling menjauh antar lempeng, dan jika terjadi di dasar laut dapat berpotensi terjadinya tsunami.

Bendungan Sutami merupakan Bendungan Nasional kedua yang dibangun oleh Departemen Pekerjaan Umum setelah Bendungan

Jatiluhur di Purwakarta, Jawa Barat. Bendungan yang diresmikan Presiden Soeharto pada tahun 1977 ini terletak di Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang. Bendungan terbesar di propinsi Jawa Timur selain didesain mampu mengendalikan banjir juga dirancang sebagai sumber debit air bagi irigasi daerah hilir dan telah menjadi pembangkit listrik tenaga air.

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang dapat menggambarkan bentuk atau geologi bawah permukaan berdasarkan variasi medan gravitasi bumi yang ditimbulkan oleh perbedaan densitas (rapat massa) antar batuan. Pada prinsipnya metode ini digunakan karena kemampuannya membedakan densitas dari satu sumber anomali terhadap densitas lingkungan sekitarnya (Sunaryo¹, 2012). Metode ini didasarkan pada gaya tarik-menarik antara dua buah partikel sebanding dengan perkalian massa kedua partikel tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara pusat keduanya (Purnomo, 2013).

Penelitian di sekitar Bendungan Sutami menjadi sangat penting untuk mengetahui struktur bawah permukaannya. Dengan diketahuinya nilai anomali Bouguer dapat digunakan dalam analisa kondisi geologi daerah tersebut. Informasi ini bermanfaat dalam mengetahui ketahanan bendungan dan sebagai studi struktur bawah permukaan di daerah sekitar Bendungan Sutami. Salah satu ilmu yang dapat digunakan dalam penggambaran struktur bawah permukaan ini yaitu ilmu geofisika.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dilakukan identifikasi struktur bawah permukaan Bendungan dan sekitarnya menggunakan metode gayaberat dengan rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimanakah gambaran struktur bawah permukaan di daerah penelitian berdasarkan data gayaberat?
2. Jenis batuan apa saja yang dapat diidentifikasi berada di daerah penelitian?
3. Berdasarkan kondisi geologi yang diperoleh, bagaimanakah ketahanan Bendungan Sutami?

1.3 Batasan Masalah

Ruang lingkup atau batasan masalah yang didefinisikan dalam pelaksanaan penelitian ini mencakup:

1. Penelitian dilakukan di daerah seluas $10 \times 10 \text{ km}^2$ dengan titik fokus berada di Bendungan Sutami dan sekitarnya.
2. Pengolahan data hanya dilakukan menggunakan metode *upward continuation* untuk memperoleh data anomali regional dan lokal.
3. Dilakukan pemodelan kondisi bawah permukaan menggunakan metode *Talwani* $2\frac{1}{2}D$ dengan bantuan program *Grav2DC*.

1.4 Tujuan

Penelitian mengenai struktur bawah permukaan di Bendungan Sutami dan sekitarnya dilakukan dengan tujuan untuk:

1. Mengetahui gambaran struktur bawah permukaan di daerah penelitian berdasarkan data gayaberat.
2. Mengidentifikasi jenis batuan yang ada di daerah penelitian
3. Mengetahui ketahanan Bendungan Sutami berdasarkan kondisi geologi yang diperoleh.

1.5 Manfaat

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini yaitu:

1. Memberikan wawasan dan pengetahuan lebih mendalam kepada mahasiswa mengenai penggunaan metode gayaberat dalam kehidupan sehari-hari.
2. Memberikan informasi mengenai struktur bawah permukaan sekitar Bendungan Sutami, Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



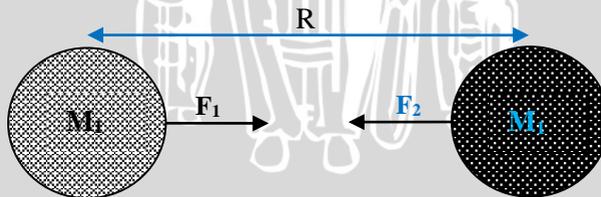
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Prinsip Dasar Metode Gayaberat

Metode gayaberat merupakan salah satu metode geofisika yang dapat mengamati kondisi bawah permukaan dengan mengamati sifat fisis batuan berupa variasi densitas atau massa jenis (Sidik, 2014). Variasi densitas batuan tersebut akan menimbulkan perbedaan percepatan gravitasi di permukaan bumi (Hartati, 2012). Metode gayaberat bekerja berdasarkan sifat batuan yang membentuk bumi, dimana antara batuan satu dengan batuan yang lain memiliki kepadatan yang berbeda. Jika terdapat anomali di bawah permukaan, maka nilai medan gravitasi yang terukur akan menyimpang dari keadaan normal pada medan gravitasi di lokasi tersebut (Sunaryo², 2012). Sedangkan gayaberat adalah gaya tarik menarik antara benda satu dengan benda yang lain karena keduanya memiliki massa. Besarnya nilai gayaberat antara kedua benda tersebut sebanding dengan massa benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya (Lillie, 1999).

2.1.1 Teori dasar gayaberat

Isaac Newton mengemukakan bahwa dua benda yang terpisah dengan jarak r akan mengalami gaya tarik gravitasi. Gaya tarik menarik antara dua benda tersebut bergantung pada jarak dan massa masing-masing benda itu sendiri.



Gambar 2.1 Gaya Gravitasi antara dua buah benda

Hukum Gravitasi Newton dapat dituliskan dalam persamaan berikut.

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

dimana F = Gaya Gravitasi (N)

G = Konstanta gravitasi ($6.672 \times 10^8 \text{ (gr/cm}^3\text{)}^{-1}\text{s}^2$)

R = Jarak antar benda (m)

M = Massa benda (kg)

Dalam hal ini, M_1 diasumsikan sebagai massa bumi dan M_2 diasumsikan sebagai massa benda yang berada di permukaan bumi, sehingga r adalah jari-jari bumi.

2.1.2 Percepatan gravitasi

Hukum Newton II menyatakan bahwa gaya sebanding dengan perkalian massa benda dengan percepatan yang dialami oleh benda tersebut. Maka dapat ditulis persamaan (2.2).

$$F = M_2 \times a$$

$$a = \frac{F}{M_2} \quad (2.2)$$

Percepatan gravitasi yang dialami oleh benda bermassa M_2 akibat tarikan dari bumi bermassa M_1 dengan jarak R dapat dituliskan sebagai berikut.

$$g = G \frac{M_1}{R^2} \quad (2.3)$$

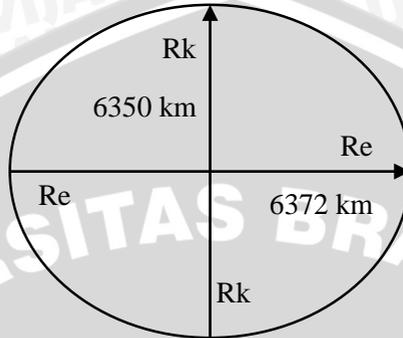
dengan begitu dapat ditulis bahwa:

$$g = G \frac{M_1}{R^2} = \frac{F}{M_2} \quad (2.4)$$

dimana g adalah percepatan gravitasi (m/s^2).

Persamaan tersebut menyatakan bahwa gravitasi berbanding lurus dengan masa bumi (M_1) dan berbanding terbalik dengan kuadrat jari-jari bumi. Namun pada kenyataannya percepatan gravitasi tidak selalu sama di seluruh muka bumi karena bentuk bumi yang tidak bulat sempurna. Jari-jari di ekuator (R_e) lebih besar daripada jari-jari di kutub (R_k). Jari-jari di ekuator lebih

besar karena adanya gaya sentrifugal yang menarik massa keluar (Suhadiyatno, 2008).



Gambar 2.2 Bentuk muka tidak bulat sempurna (WGS64)

2.1.3 Potensial gravitasi

Potensial gravitasi adalah energi yang dibutuhkan untuk memindahkan suatu massa dari titik satu ke titik yang lain (Rosid, 2005). Suatu benda dengan massa tertentu dalam sistem ruang akan menimbulkan medan potensial di sekitarnya. Medan potensial bersifat konservatif yaitu usaha yang dilakukan dalam suatu medan gravitasi tidak bergantung pada lintasan yang ditempuh, melainkan hanya bergantung pada posisi awal dan akhir (Telford et al, 1990).

Gravitasi merupakan vektor dengan arah lintasan sepanjang garis yang menghubungkan kedua pusat massa, dan gaya ini timbul sebagai fungsi potensial skalar (Rosid, 2005 dalam Torkis, 2012). Fungsi potensial skalar, disebut *Newtonian* atau potensial tiga dimensi yang dinyatakan dalam persamaan di bawah ini.

$$\nabla U(\vec{r}) = -\frac{F(\vec{r})}{m_2} = -g(\vec{r}) \quad (2.5)$$

$$U(\vec{r}) = \int_{\infty}^r (\nabla U) \cdot dr = - \int_{\infty}^r g \cdot dr$$

$$U(\vec{r}) = -Gm \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = G \frac{m}{r} \quad (2.6)$$

Fungsi U pada persamaan 2.5 di atas disebut potensial gravitasi sedangkan gravitasi g merupakan medan potensial. Pada

persamaan tersebut, tanda minus menunjukkan arah gayaberatnya menuju ke titik yang dituju.

2.2 Pengukuran Gayaberat

Pengukuran percepatan gravitasi pertama kali dilakukan oleh Galileo sehingga untuk menghormati Galileo, maka digunakan satuan Gal untuk percepatan gravitasi.

$$1 \text{ Gal} = 1 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} = 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Satuan anomali gravitasi yang terukur dalam kegiatan eksplorasi diberikan dalam orde miligal (mgal).

$$1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ Gal}$$

Dalam satuan m.k.s gravitasi diukur dalam satuan g.u (gravity unit) atau $\mu\text{m/s}^2$.

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

(Octonovrilna dan Pudja, 2008)

Pengukuran gravitasi di suatu titik di atas permukaan bumi yang memiliki anomali yang berada di bawah permukaan bumi, dapat dianalogikan dengan pengukuran gravitasi akibat adanya gaya tarik bumi terhadap benda lain. Perubahan percepatan gravitasi (Δg) dipengaruhi oleh adanya perubahan massa (Δm) dan jarak (Δr) pada titik pengamatan di permukaan bumi. Sehingga dapat ditulis persamaan di bawah ini.

$$\Delta g = \frac{G(\Delta\rho)(V)}{r^2} \quad (2.7)$$

Dari persamaan tersebut, diperoleh hubungan bahwa perubahan percepatan gravitasi berbanding lurus dengan perubahan rapat massanya.

Data hasil pengukuran dari penelitian ini adalah data gravitasi observasi. Dalam hal ini terdapat dua faktor yang mempengaruhi nilai gravitasi, yaitu variasi temporal (terhadap waktu) dan variasi spasial (terhadap jarak).

a. Variasi Temporal (terhadap waktu)

Merupakan perubahan percepatan gravitasi yang diamati terhadap waktu. Dalam variasi ini terdapat dua koreksi yaitu koreksi waktu dan koreksi alat (*drift*)

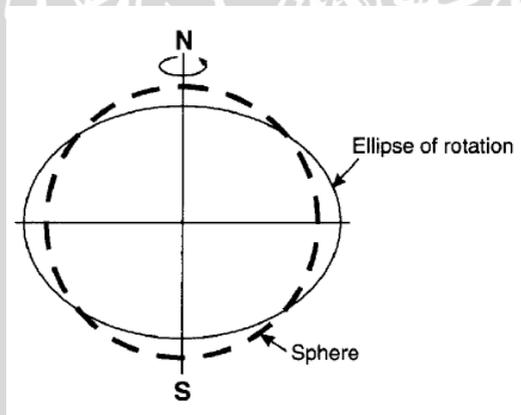
b. Variasi Spasial (terhadap jarak)

Merupakan perubahan percepatan gravitasi yang dilihat berdasarkan pengaruh ruang. Dalam hal ini dapat diartikan bahwa perubahan percepatan gravitasi yang terjadi dari suatu tempat ke tempat yang lain seperti pengaruh geologi tetapi tidak berhubungan dengan geologi seperti halnya pengaruh lintang, ketinggian, slab atau penambahan massa, dan topografi. Koreksi-koreksi dalam variasi ini meliputi koreksi lintang, koreksi udara bebas, koreksi Bouguer, dan koreksi terrain.

2.3 Gambaran Permukaan Bumi

2.3.1 Spheroid referensi

Berdasarkan pengukuran geodesi dan satelit, dapat diketahui bahwa bumi memiliki bentuk bulat hampir sempurna seperti bola (*spheroid*). Bumi mengalami pemipihan pada kutub (*flattened*) dan pembesaran pada ekuator (*bulging*) yang terjadi akibat adanya aktivitas rotasi bumi sehingga bentuk bumi menjadi tidak bulat sempurna.



Gambar 2.3 Perbedaan bentuk bumi (Reynolds, 1997)

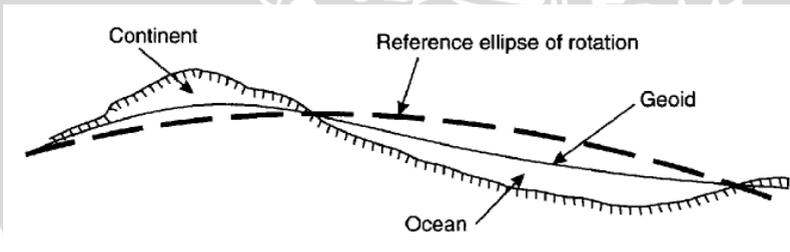
Spheroid referensi adalah suatu ellipsoid dengan pemipihan pada kutub yang merupakan perkiraan permukaan laut rata-rata dan efek massa di daratan telah dihilangkan (Telford et al, 1990).

2.3.2 Geoid

Geoid dapat didefinisikan sebagai bidang ekipotensial yang berhimpit dengan permukaan laut pada saat keadaan tenang dan tanpa gangguan. Oleh karena itu secara praktis geoid dianggap berhimpit dengan permukaan laut rata-rata (*mean sea level*). Jarak geoid terhadap ellipsoid disebut dengan undulasi geoid (N). Setiap tempat memiliki nilai undulasi geoid yang berbeda adanya ketidakseragaman sebaran densitas batuan di permukaan bumi.

Spheroid referensi berlaku jika tidak terjadi undulasi di permukaan bumi (Rosid, 2005). Namun kenyataannya permukaan bumi sangat bervariasi. Terdapat undulasi berupa lembah dan bukit di permukaan bumi. Elevasi rata-rata benua sekitar 500 m dan elevasi maksimum daratan depresi dasar laut memiliki orde 9.000 m terhadap muka laut. Muka laut dan dipengaruhi oleh variasi elevasi dan perubahan densitas secara lateral. Muka laut rata-rata didefinisikan sebagai geoid (Latifah, 2010).

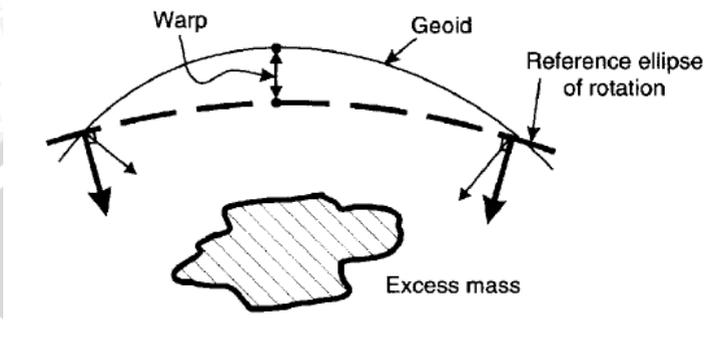
Geoid dan spheroid referensi tidak pernah berada pada satu garis yang sama (Torkis, 2012). Posisi geoid di benua lebih tinggi daripada spheroid referensi, sedangkan posisi geoid di samudera lebih rendah daripada spheroid referensi.



Gambar 2.4 Perbedaan posisi geoid dan spheroid referensi (Reynolds, 1997)

Perbedaan posisi geoid dan spheroid referensi di benua dan di samudera disebabkan oleh adanya efek tarikan massa batuan (gambar 2.5). Posisi geoid di benua lebih tinggi daripada spheroid referensi karena efek tarikan massa batuan di atasnya. Sedangkan posisi geoid di samudera lebih rendah daripada spheroid referensi

karena hilangnya efek tarikan massa batuan di atasnya akibat densitas air yang rendah (Telford et al, 1990 dalam Torkis, 2012).



Gambar 2.5 Efek massa batuan yang mempengaruhi posisi geoid (Reynolds, 1997)

2.4 Koreksi-Koreksi Metode Gayaberat

Data gravitasi observasi yang diperoleh merupakan data yang masih mentah dan belum bisa langsung diinterpretasi. Hal ini dikarenakan variasi nilai percepatan gravitasi tidak hanya dipengaruhi oleh distribusi massa jenis yang tidak merata, melainkan juga dipengaruhi oleh posisi titik pengamatan di permukaan bumi. Selain itu, bentuk muka bumi yang tidak bulat secara sempurna dan adanya inhomogenitas batuan akan memberikan perbedaan massa jenis batuan dari suatu tempat ke tempat yang lain sehingga menimbulkan medan gravitasi yang tidak merata antara titik amat satu dengan yang lainnya. Oleh karena itu, sebelum diinterpretasi harus dilakukan beberapa koreksi data terlebih dahulu. Koreksi-koreksi yang perlu dilakukan yaitu koreksi pasang surut air laut (*tidal correction*), koreksi alat (*drift correction*), koreksi lintang (*latitude correction*), koreksi udara bebas (*free air correction*), koreksi Bouguer (*Bouguer correction*), dan koreksi medan (*terrain correction*).

2.4.1 Koreksi pasang surut (*tidal correction*)

Perubahan nilai gravitasi suatu titik juga dipengaruhi oleh adanya pasang surut bumi yang diakibatkan oleh gaya tarikan

antara bumi dengan benda angkasa khususnya matahari dan bulan. Hal ini disebabkan karena peristiwa revolusi bumi mengelilingi matahari, revolusi bulan mengelilingi bumi, dan rotasi bumi sendiri yang mengakibatkan perbedaan nilai gravitasi di setiap permukaan bumi. Tujuan dilakukan koreksi ini yaitu untuk menyeimbangkan ke posisi normal. Nilai koreksi ini bervariasi terhadap waktu, lintang, dan kedudukan benda langit. Gaya pasang surut bernilai maksimum jika posisi bulan dan matahari saling berlawanan dalam satu arah dan bernilai minimum jika posisi keduanya saling tegak lurus. Koreksi pasang surut dapat dihitung dengan persamaan 2.9 berikut.

$$\delta g_T = \frac{3}{2} \rho GR \left[\frac{M_m}{r_m^3} \left(\cos 2\theta_m + \frac{1}{3} \right) + \frac{M_s}{r_s^3} \left(\cos 2\theta_s + \frac{1}{3} \right) \right] \quad (2.9)$$

Dengan δg_T = koreksi pasang surut bumi

R = jari-jari bumi

M_m = massa bulan

M_s = massa matahari

r_m = jarak bulan ke bumi

r_s = jarak matahari ke bumi

ρ = 1.16, peregangan bumi karena gaya pasang surut

θ_m = sudut yang dibentuk oleh garis yang menghubungkan titik pusat bulan dan bumi, dengan garis antara titik pusat bumi dengan titik pengamatan

θ_s = sudut yang dibentuk oleh garis yang menghubungkan titik pusat bumi dan matahari, dengan garis antara titik pusat bumi dengan titik pengamatan

θ_m dan θ_s dihitung dengan suatu formula menggunakan program komputer berdasarkan pengukuran alat astronomi (Suhadiyatno, 2008). Untuk lebih mudah, dalam menentukan nilai koreksi pasang surut bumi dapat dilakukan dengan menggunakan software koreksi tidal.

2.4.2 Koreksi apungan (*drift correction*)

Koreksi drift dilakukan untuk mengkoreksi adanya kesalahan dalam pembacaan nilai gravitasi saat melaksanakan

pengukuran di suatu titik. *Drift* merupakan penyimpangan pembacaan nilai gravitasi akibat adanya beberapa faktor seperti elastisitas pegas pada alat, pengaruh suhu, adanya guncangan terhadap alat yang terjadi selama proses pengambilan data. Pada umumnya, gravimeter dirancang dengan sistem keseimbangan pegas dan dilengkapi oleh massa (beban) yang tergantung bebas di ujungnya. Karena pegas tidak elastik sempurna, maka sistem pegas tidak kembali ke kedudukan awal. Koreksi alat akibat sifat pegas yang tidak kembali ke kedudukan semula ini disebut dengan koreksi apungan (Suhadiyatno, 2008).

Koreksi *drift* dapat ditentukan secara mudah dengan melakukan pengulangan pengukuran di stasiun yang sama pada waktu yang berbeda dalam hari yang sama (Reynolds, 1997). Penentuan koreksi *drift* ini juga dilakukan pengukuran *base station* dua kali dengan sistem tertutup. Maksud dari sistem tertutup yaitu survei diawali dengan pengukuran di suatu titik dan diakhiri di titik ukur yang sama. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan nilai gravitasi yang terukur di awal dan di akhir survei. Perbedaan pada kedua nilai tersebut disebabkan oleh adanya kesalahan dalam pembacaan gravimeter, oleh karena itu perlu dilakukan koreksi. Secara matematis, koreksi drift dapat dinyatakan dalam persamaan 2.8 berikut.

$$DC_B = \frac{g_A - g'_A}{t'_A - t_A} (t_B - t_A) \quad (2.8)$$

dimana DC_B = koreksi drift pada stasiun B

g_A = nilai gravitasi di base stasiun A pada waktu t_A

g'_A = nilai gravitasi di base stasiun B pada waktu t'_A saat penutupan

t_A = waktu pengukuran di stasiun A saat awal pengukuran

t'_A = waktu pengukuran di stasiun A saat penutupan

t_B = waktu pengukuran di stasiun B

2.4.3 Koreksi lintang (*latitude correction*)

Koreksi lintang diberikan karena adanya perbedaan pada nilai percepatan gravitasi di setiap lintang geografis yang

disebabkan oleh adanya gaya sentrifugal dan bentuk ellipsoid. Dengan melakukan koreksi ini akan diperoleh anomali medan gayaberat yang merupakan selisih antara medan gayaberat observasi dengan medan gayaberat normal.

Medan gayaberat normal didapatkan berdasarkan rumusan-rumusan teoritis. Maka dalam koreksi ini digunakan rumusan medan gayaberat normal pada sferoid referensi ($z=0$) yang ditetapkan oleh *The International of Geodesy (IAG)* yang diberi nama *Geodetic Reference System 1967 (GRS 67)* sebagai fungsi lintang (Burger, 1992 dalam Faizah, 2010).

Jari-jari bumi di bagian ekuator/khatulistiwa lebih besar daripada di kutub, oleh karena itu besarnya nilai percepatan gravitasi di ekuator lebih kecil daripada di kutub. Nilai gravitasi naik sebanding dengan naiknya lintang tempat, semakin ke kutub semakin besar efek gravitasnya. Selain itu, pengaruh dari adanya rotasi bumi membuat percepatan sentrifugal bernilai maksimum di ekuator dan bernilai nol di kedua kutub (Faizah, 2010).

Pada umumnya koreksi lintang digunakan untuk memperoleh nilai gayaberat normal jika jarak pengukuran berorde 1-2 km. Apabila pengukuran orde kedua dari suku-suku yang lebih tinggi dapat diabaikan (Faizah, 2010).

$$g\phi = g_E(1 + \beta \sin^2\phi - \epsilon \sin^2 2\phi) \text{ mgal} \quad (2.10)$$

$$\frac{dg\phi}{ds} = \frac{1}{R\phi} \frac{dg}{d\phi} = \frac{1}{R\phi} g_E(\beta \sin^2\phi - 2\epsilon \sin^4\phi)$$

$$W = 1.307 \sin^2 2\sin^2\phi \text{ mgal/mil}$$

$$W = 0.8122 \sin^2 2\sin^2\phi \text{ mgal/km} \quad (2.11)$$

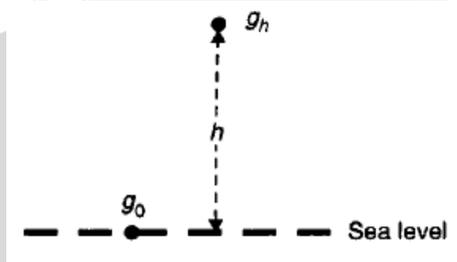
Dimana $g\phi$ = nilai gayaberat normal

$R\phi$ = jari-jari ekuator

$$\frac{dg\phi}{ds} = W = \text{koreksi Lintang}$$

2.4.4 Koreksi udara bebas (*free-air correction*)

Koreksi udara bebas merupakan perbedaan antara gayaberat yang terukur di sea level dan di suatu titik h meter dengan tanpa adanya batuan di antara kedua titik (Reynolds, 1997). Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan perbedaan percepatan gravitasi yang timbul akibat adanya perbedaan ketinggian dari setiap titik pengukuran. Semua titik ukur ditarik ke bidang geoid dengan mengabaikan kandungan batuan yang ada di antara titik pengukuran dengan geoid.



Gambar 2.6 Skema *free-air correction* (Reynolds, 1997)

Koreksi udara bebas didasarkan pada kenyataan bahwa gravitasi bumi dapat dianggap sama jika massa bumi terkonsentrasi di pusat bumi (Dobrin dan Savit, 1988). Namun dalam kenyataannya, pengukuran gravitasi seringkali dilakukan di daerah yang tinggi di *mean sea level (m.s.l)*. Selain itu, pengukuran juga sering dilakukan pada ketinggian yang berbeda-beda. Oleh karena itu perlu dilakukan koreksi perbedaan ketinggian (*free air correction*) sebesar h dimana dalam selang ketinggian tersebut diisi oleh udara bebas (Suhadiyatno, 2008). Sebelum di bandingkan dengan g_0 , maka g yang terukur harus dikoreksi terlebih dahulu terhadap ketinggian.

$$FAC = g - g_0 = 2 \frac{g_0}{R_0} h \approx 0.9406 h \text{ (h dalam feet)}$$

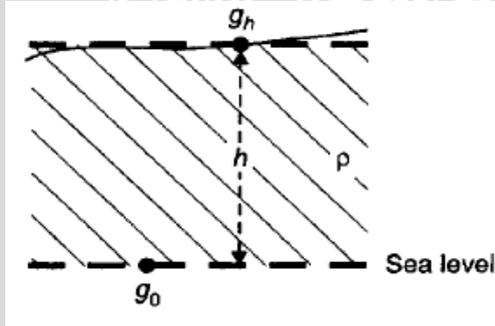
$$FAC \approx 0.3086 h \text{ (h dalam meter)} \quad (2.12)$$

Dalam perhitungan koreksi udara bebas, dapat dijumlah maupun dikurang tergantung pada ketinggian h . Koreksi dijumlah jika titik pengukuran berada di atas geoid. Hal ini dilakukan karena semakin

tinggi suatu permukaan bumi, maka percepatan gravitasinya akan semakin kecil yang diakibatkan adanya penambahan jarak antara pusat bumi dengan titik amat. Sehingga untuk menyamakan dengan bidang geoid, koreksi harus ditambah. Begitu pula sebaliknya, koreksi dikurang jika titik pengukuran berada di bawah geoid. Namun selama ini yang sering digunakan dalam survei gayaberat yaitu koreksi ini dijumlah karena sebagian besar permukaan bumi berada di atas geoid (Hartati, 2012).

2.4.5 Koreksi Bouguer (*Bouguer correction*)

Koreksi Bouguer adalah koreksi yang dilakukan untuk menghilangkan perbedaan ketinggian dengan tidak mengabaikan massa di bawahnya (Latifah, 2010). Perbedaan ketinggian tersebut akan mengakibatkan adanya pengaruh massa di bawah permukaan bumi yang mempengaruhi besarnya percepatan gaya berat pada titik ukur. Koreksi Bouguer memasukkan efek kandungan massa batuan yang terletak di antara titik pengukuran dengan geoid yang sebelumnya diabaikan dalam koreksi udara bebas (Hartati, 2012).



Gambar 2.7 Koreksi Bouguer (Reynolds, 1997)

Koreksi Bouguer disebabkan adanya gaya tarik material dengan densitas ρ dan tebal h yang terletak di antara titik ukur dengan datum referensi dan diabaikan pada koreksi udara bebas. Apabila titik ukur terletak di tengah daratan yang luas dan memiliki ketebalan dan densitas yang uniform, maka pembacaan gravitasi akan meningkat akibat adanya tarikan material yang terletak di antara titik ukur dan datum. Koreksi Bouguer ini dapat diberikan oleh rumusan berikut.

$$BC = 2\pi G\rho h$$

$$BC = 0.04188\rho h \quad (2.13)$$

dimana BC = Koreksi Bouger (mgal)

ρ = rapat massa (gr/cm²)

h = ketinggian titik ukur (m)

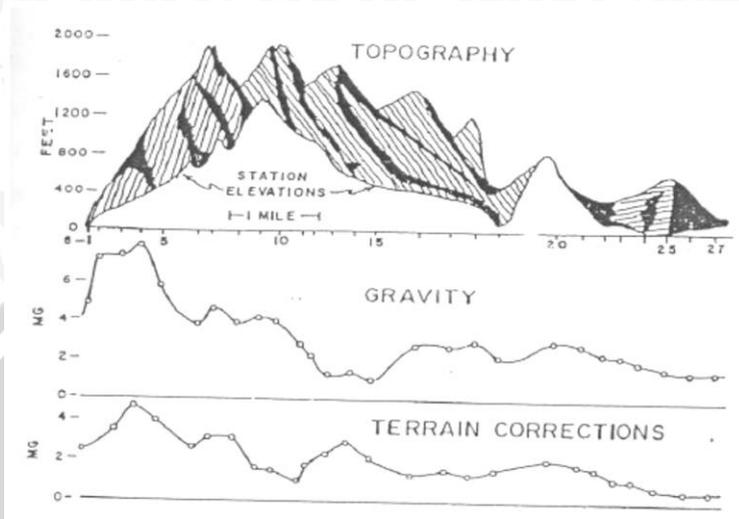
2.4.6 Koreksi medan (*terrain correction*)

Grant dan West (1965) menyatakan bahwa massa yang terletak di antara titik ukur dengan bidang spheroid dapat disederhanakan menjadi dua bagian:

1. Bidang lempeng datar dengan ketebalan yang sama dengan ketinggian titik ukur terhadap permukaan spheroid. Tarikan massa ini disebut dengan efek Bouger.
2. Bagian yang berada di atas atau bagian yang hilang di bawah permukaan lempeng. Tarikan ini dinyatakan sebagai efek topografi.

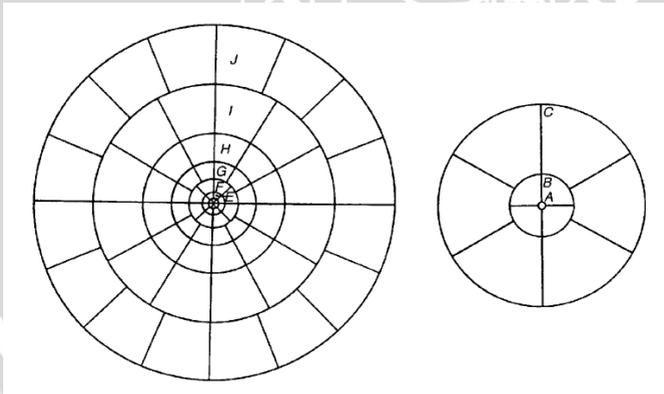
Koreksi medan dilakukan untuk mengkoreksi adanya pengaruh penyebaran massa yang tidak merata di sekitar titik ukur. Dalam koreksi Bouguer diasumsikan bahwa titik pengukuran di lapangan berada pada suatu bidang datar yang sangat luas. Namun kenyataannya, topografi di lapangan sangat bervariasi karena terdapat lembah dan gunung. Sehingga jika hanya dilakukan koreksi Bouguer saja masih kurang sempurna.





Gambar 2.8 Topografi tidak teratur yang menjadikan perlu dilakukan koreksi medan (Nettleton, 1976)

Perhitungan koreksi medan dapat dilakukan menggunakan *Hammer Chart* yang telah dikembangkan oleh Sigmund Hammer. Hammer Chart membagi area ke dalam beberapa zona dan kompartemen (segmen). Hammer melakukan pendekatan pengaruh topografi dengan suatu cincin yang terlihat pada gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9 *Hammer chart* (Reynolds, 1997)

Menurut Reynolds (1997), dengan menggunakan pendekatan cincin silinder, besarnya koreksi topografi dapat dituliskan dalam persamaan 2.14 di bawah ini.

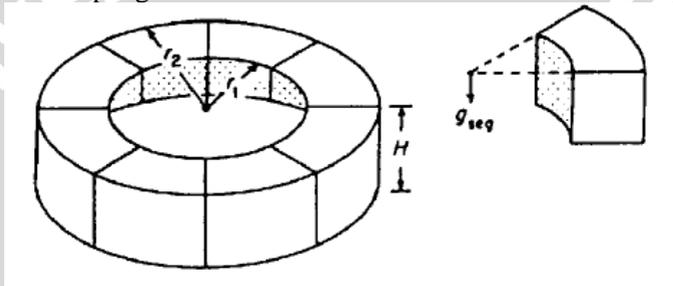
$$TC = \frac{2\pi\rho G}{N} \left[r_2 - r_1 + \sqrt{r_1^2 + z^2} - \sqrt{r_2^2 + z^2} \right] \text{ mgal} \quad (2.14)$$

dimana N = jumlah kompartemen pada zona yang digunakan

r_2 = radius luar (m)

r_1 = radius dalam (m)

z = perbedaan ketinggian rata-rata kompartemen dan titik pengukuran



Gambar 2.10 Cincin silinder untuk menghitung koreksi medan (Reynolds, 1997)

2.5 Anomali Bouguer

Anomali Bouguer merupakan nilai yang diperoleh dari selisih antara nilai gayaberat pengamatan dengan nilai gayaberat normal yang seharusnya terukur pada titik pengamatan. Gayaberat normal adalah nilai gayaberat pada titik pengamatan yang telah dikoreksi udara bebas (*free air correction*), koreksi Bouguer (*Bouguer correction*), dan koreksi medan (*terrain correction*) (Faizah, 2010). Data mentah yang diperoleh dari pengamatan di lapangan tidak bisa langsung digunakan untuk interpretasi kondisi bawah permukaan suatu daerah. Data mentah perlu dikoreksi terlebih dahulu sehingga dapat terpisahkan antara data dengan *noise* serta dapat diperoleh data jadi yang bisa diinterpretasi. Secara matematis, anomali Bouguer dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$BA = g_{obs} - (g\Phi - FAC + BC - TC)$$

$$BA = g_{obs} - g\Phi + FAC - BC + TC \quad 2.15$$

keterangan:

BA = *Bouguer Anomaly*

g_{obs} = nilai gayaberat pengamatan yang telah dikoreksi pasang surut dan koreksi drift

$g\Phi$ = nilai gayaberat normal di tempat pengamatan

FAC = *free air correction* (koreksi udara bebas)

BC = *Bouguer correction* (koreksi Bouguer)

TC = *terrain correction* (koreksi medan)

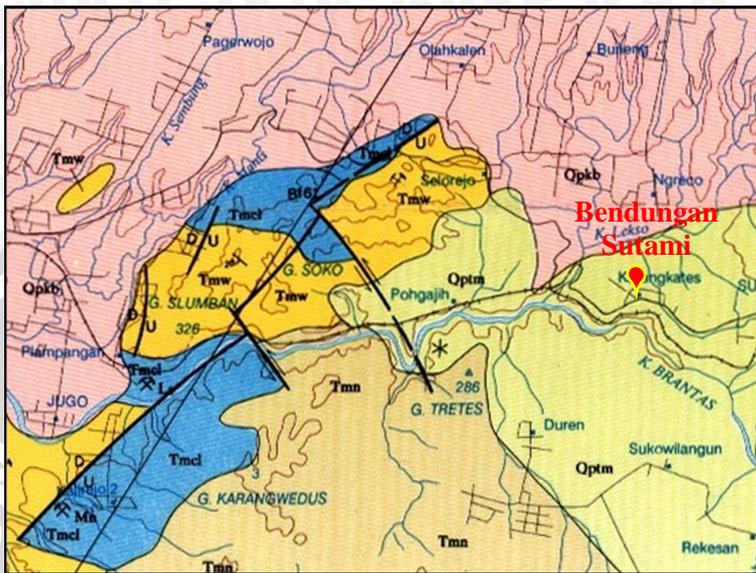
2.6 Tinjauan Umum Daerah Penelitian

2.6.1 Kondisi Geografis

Penelitian ini dilaksanakan di sekitar Bendungan Sutami Karangates, Sumberpucung, Kabupaten Malang. Secara geografis, daerah ini merupakan perbatasan antara Kabupaten Malang dan Kabupaten Blitar. Luas wilayah yang menjadi daerah penelitian yaitu 10 km x 10 km yang dibatasi oleh 8.09965° LS – 8.20230° LS dan 112.36717° BT– 112.46630° BT. Bendungan terbesar di Jawa Timur ini dibangun sejak tahun 1960-1972 dan diresmikan oleh Presiden Soeharto pada tahun 1972. Air dari bendungan ini berasal dari sungai Brantas. Bendungan Sutami berfungsi sebagai penampung air sekaligus sebagai irigasi bagi daerah setempat dan digunakan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air. Secara morfologi, daerah ini memiliki topografi yang bervariasi dengan ketinggian sekitar 188 – 387 m.

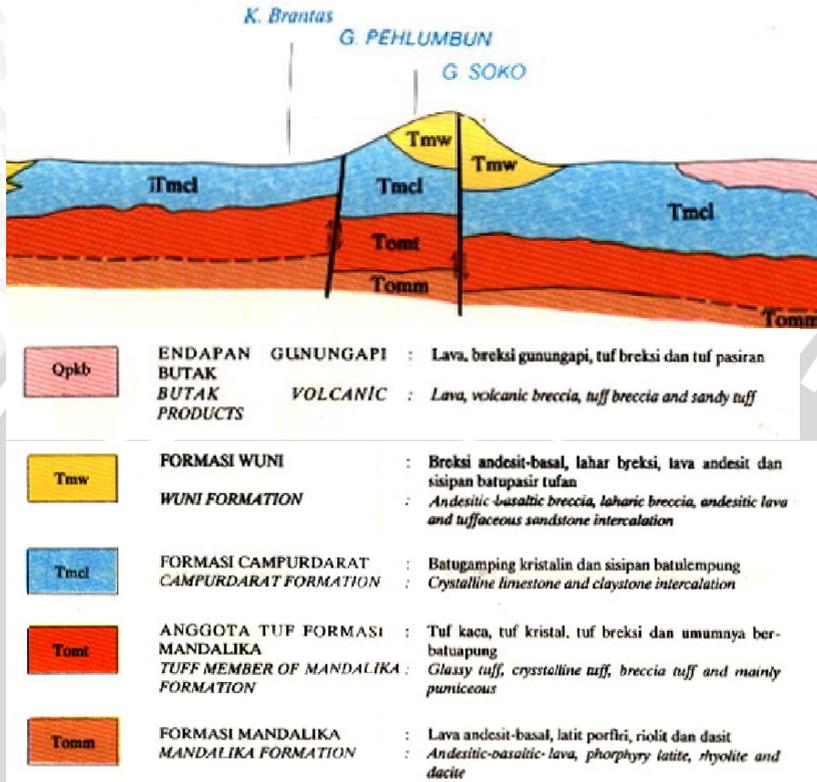
2.6.2 Susunan Stratigrafi

Susunan stratigrafi daerah penelitian berdasarkan Peta Geologi Lembar Blitar (Sjarifudin dan Hamidi, 1992) dapat diklasifikasikan menjadi lima formasi batuan yaitu Formasi Wuni, Formasi Campurdarat, Formasi Nampol, Endapan Gunungapi Butak, dan Endapan Tuf. Bendungan Sutami Karangates terletak di Endapan Tuf (Qptm).



Tmw	FORMASI WUNI <i>WUNI FORMATION</i>	: Breksi andesit-basal, lahar breksi, lava andesit dan sisipan batupasir tufan : <i>Andesitic-basaltic breccia, laharic breccia, andesitic lava and tuffaceous sandstone intercalation</i>
Tmn	FORMASI NAMPOL <i>NAMPOL FORMATION</i>	: Batupasir gampingan-tufan, batulempung dan napal : <i>Calcareous-tuffaceous limestone, claystone and marl</i>
Tmcl	FORMASI CAMPURDARAT <i>CAMPURDARAT FORMATION</i>	: Batugamping kristalin dan sisipan batulempung : <i>Crystalline limestone and claystone intercalation</i>
Opkb	ENDAPAN GUNUNGAPI BUTAK <i>BUTAK VOLCANIC PRODUCTS</i>	: Lava, breksi gunungapi, tuf breksi dan tuf pasiran : <i>Lava, volcanic breccia, tuff breccia and sandy tuff</i>
Optm	ENDAPAN TUF <i>TUFF DEPOSITS</i>	: Tuf lapili, tuf batuapung dan lava : <i>Lapilli tuff, pumice tuff and lava</i>

Gambar 2.11 Peta geologi daerah penelitian (Sjarifudin dan Hamidi, 1992)



Gambar 2.12 Slicing peta geologi daerah penelitian (Sjarifudin dan Hamidi, 1992)

Formasi batuan di daerah penelitian dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

- a. Formasi Wuni (Tmw)
Formasi Wuni didominasi oleh batuan berasal dari letusan gunungapi purba yang terendapkan di atas formasi Campurdarat. Litologi dari formasi ini terdiri dari breksi andesit-basal, lahar breksi, lava andesit dan sisipan batupasir tufan.
- b. Formasi Campurdarat (Tmcl)
Pengendapan terjadi di atas anggota tuf formasi mandalika. Litologi formasi Campurdarat terdiri dari batugamping kristalin dan sisipan batulempung.

- c. Formasi Nampol (Tmn)
Formasi Nampol terdiri dari batupasir gampingan-tufan, batulempung dan napal.
- d. Endapan Gunungapi Butak (Qpkb)
Litologi yang terdapat disini adalah lava, breksi gunungapi, tuf breksi, dan tuf pasiran.
- e. Endapan Tuf (Qptm)
Endapat tuf diisi oleh batuan tuf lapilli, tuf batuapung dan lava.

2.6.3 Kondisi Geologi

Kabupaten Malang dan Kabupaten Blitar merupakan kawasan dengan struktur geologi yang cukup kompleks. Jenis batuan beku, batuan sedimen, dan batuan metamorf dapat ditemui di kawasan ini. Selain itu, terdapat sesar normal yang memanjang dari desa Selorejo sampai desa Jugo, Kecamatan Kesamben, Blitar dan dipotong oleh dua buah sesar geser jurus yang salah satunya tepat memotong gunung Soko dan gunung Pehlumbun. Sesar-sesar tersebut umumnya terjadi pada batuan Formasi Wuni dan Formasi Campurdarat yang berumur tersier. Daerah penelitian ini memiliki beberapa titik lokasi tambang di antaranya di desa Jugo yaitu tambang batu gamping, di desa Kalirejo 2 yang merupakan lokasi penambangan mangan, begitu pula dengan di desa Selorejo.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

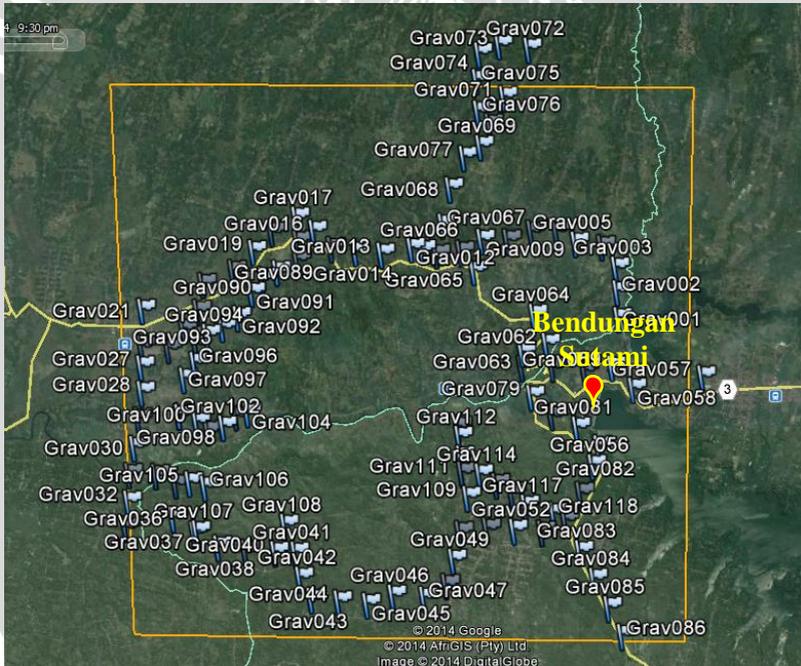


BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

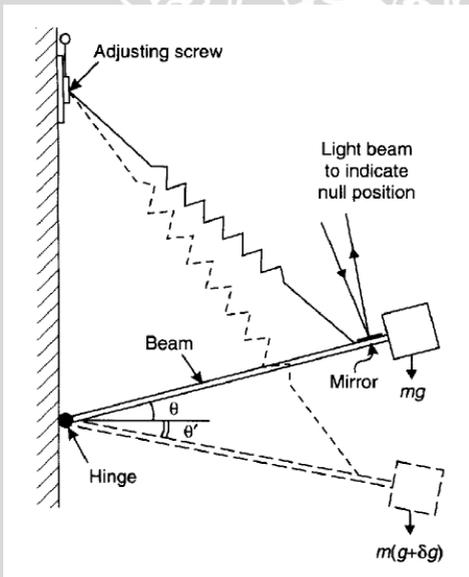
Data penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh dari survei gayaberat di sekitar Bendungan Sutami Karangates, Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang. Survei ini dilaksanakan pada tanggal 10 Mei 2014 – 10 September 2014. Daerah penelitian ini meliputi daerah seluas 10 km x 10 km pada koordinat 8.09965° LS – 8.20230° LS dan 112.36717° BT– 112.46630° BT. Data yang digunakan terdiri dari 120 titik yang tersebar seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Titik pengukuran gayaberat

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Gravimeter LaCoste-Romberg Model G-1053, *GPS* Garmin, peta geologi, dan perangkat komputer. Gravimeter LaCoste-Romberg Model G-1053 merupakan alat yang dikembangkan oleh LaCoste's long-period seismograph (LaCoste 1934) dan diilustrasikan seperti pada gambar 3.2. Pegas yang digunakan terbuat dari bahan logam dengan nilai konduktivitas termal yang tinggi namun tidak bisa diinsulasi secara total untuk menghilangkan efek panas dan harus ditempatkan di ruang tertutup dengan temperature yang stabil. Ketika alat ini dikembangkan pada tahun 1930an, beratnya bisa mencapai 30 kg. namun dengan teknologi yang lebih modern membuat alat ini menjadi lebih ringan yaitu sekitar 2 kg tanpa baterai yang digunakan untuk memanaskan koil. Pegas dan alat gravimeter jenis ini lebih mudah untuk dipindah-pindah dan tidak terlalu sensitif terhadap guncangan. Gravimeter LaCoste-Romberg ini mampu mengukur hingga $3\mu\text{Gal}$.



Gambar 3.2 Skema gravimeter LaCoste-Romberg (Reynolds, 1997)



Gambar 3.3 Gravimeter LaCoste-Romberg Model G-1053

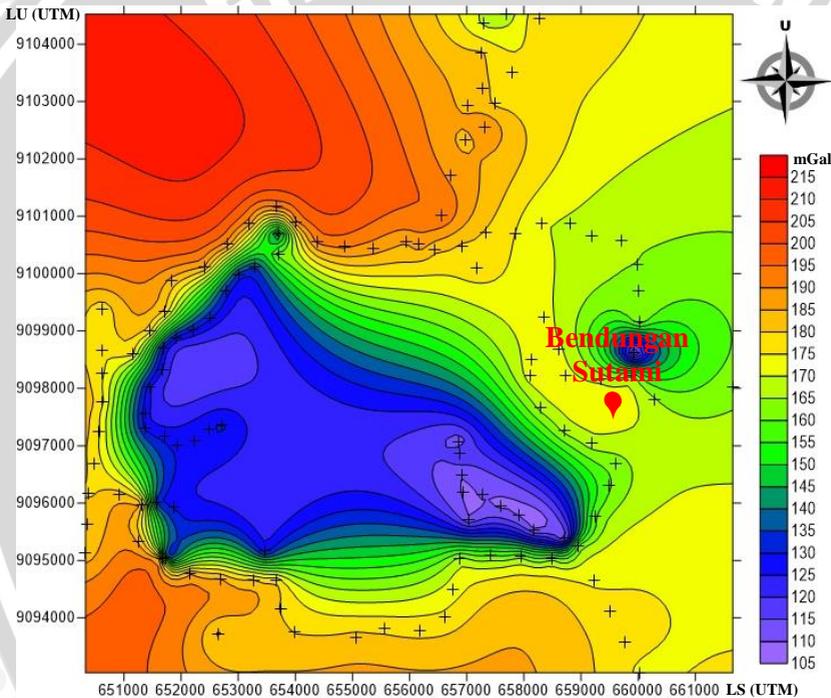
GPS (Global Positioning System) berfungsi sebagai penunjuk koordinat lokasi penelitian. Sedangkan peta geologi berfungsi untuk mengetahui kondisi geologi lokal dari daerah penelitian. Dan perangkat komputer digunakan dalam pengolahan data penelitian. Selain itu juga digunakan beberapa alat penunjang meliputi alat tulis, penunjuk waktu, dan kamera. Di samping alat-alat yang telah disebutkan di atas, juga digunakan *software* untuk pengolahan data penelitian ini yang meliputi *Microsoft Office, Surfer 11, MapSource, Google Earth, Magpick, dan Grav2DC.*

3.3 Metode Interpretasi

Interpretasi data anomali gayaberat dalam penelitian ini dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Metode yang digunakan dalam interpretasi secara kualitatif adalah menganalisa kondisi geologi serta peta kontur anomali Bouguer lengkap dari daerah penelitian. Sedangkan pada interpretasi data secara kuantitatif, dilakukan pemodelan 2D bawah permukaan daerah penelitian dari kontur anomali Bouguer dan menganalisa hasil pemodelan yang telah diperoleh.

3.4 Tahapan Pengolahan Data

Penelitian dilakukan melalui beberapa tahap dari pelaksanaan survei gayaberat di lokasi penelitian, pengolahan data, dan analisis hasil pengolahan atau interpretasi. Dalam pengolahan data, digunakan *Microsoft Excel* untuk melakukan koreksi gayaberat terhadap data hingga diperoleh data anomali Bouguer. Data tersebut kemudian diplot dalam *Surfer 11* sehingga dapat diketahui distribusi nilai anomali pada daerah penelitian. Hasil plot ini digunakan dalam interpretasi kualitatif.



Gambar 3.6 Kontur anomali Bouguer lengkap dan titik pengukuran

Anomali Bouguer merupakan gabungan antara anomali regional dan anomali lokal. Anomali regional berasal dari batu-batuan yang sifatnya luas dan dalam. Anomali ini memiliki frekuensi yang rendah dan kontur anomali yang cenderung *smooth*. Sedangkan anomali lokal berasal dari batu-batuan yang sifatnya sempit dan dangkal. Ciri dari anomali lokal yaitu konturnya yang tidak *smooth* dan memiliki

frekuensi tinggi. Karena anomali Bouguer masih merupakan superposisi dari anomali regional dan lokal, maka perlu dilakukan pemisahan sehingga diperoleh anomali lokal yang merupakan anomali dari benda terkubur yang dicari untuk menentukan struktur bawah permukaan di daerah penelitian. Untuk memisahkan anomali lokal dan regional, penulis menggunakan metode kontinuitas ke atas (*upward continuation*). Kontinuitas ke atas merupakan metode yang mentransformasi medan potensial yang diukur pada suatu permukaan sehingga medan potensial di lokasi pengukuran akan cenderung menonjolkan anomali yang disebabkan oleh sumber yang dalam (efek regional) dengan menghilangkan atau mengabaikan anomali yang disebabkan oleh sumber dangkal (efek lokal). Hasil dari metode ini yaitu anomali berupa kecenderungan regionalnya. Sedangkan anomali lokal diperoleh dengan menghitung selisih antara anomali Bouguer dengan anomali regional. Proses ini dilakukan dengan menentukan ketinggian target hingga diperoleh pola yang relatif sama atau konstan. Ketinggian kontinuitas dipilih sedemikian rupa sehingga efek lokal tertekan sekecil mungkin. Hal ini data dilihat dari kontur anomalnya. Perlakuan ini dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan resolusi vertikal pada hasil pemodelan 2D nantinya.

Pemisahan anomali lokal dan residual menggunakan metode kontinuitas ke atas ini dilakukan dengan menggunakan bantuan *software magpick*. Proses ini dilakukan secara bertahap yaitu dilakukan kontinuitas ke atas dengan ketinggian pertama diambil dari rata-rata ketinggian daerah penelitian. Dalam penelitian ini, ketinggian rata-rata daerah penelitian yaitu sekitar 200 m. Kemudian ketinggian ditambah hingga diperoleh pola kontur anomali regional yang cenderung tetap dengan perubahan anomali yang relatif kecil. Berdasarkan analisis, semakin tinggi kontinuitas maka akan memberikan kedalaman bidang batas lokal yang semakin dangkal. Hal ini sesuai dengan sifat dasar kontinuitas ke atas yaitu menekan efek lokal yang ada pada data anomali. Berdasarkan mekanisme ini, anomali regional (Gambar 4.5) dan anomali lokal (Gambar 4.6) diperoleh dengan pengangkatan ke atas pada ketinggian 1900 m.

Anomali lokal yang diperoleh dari pemisahan ini digunakan untuk melakukan pemodelan geologi. Dengan begitu akan mempermudah dalam melakukan interpretasi kondisi bawah

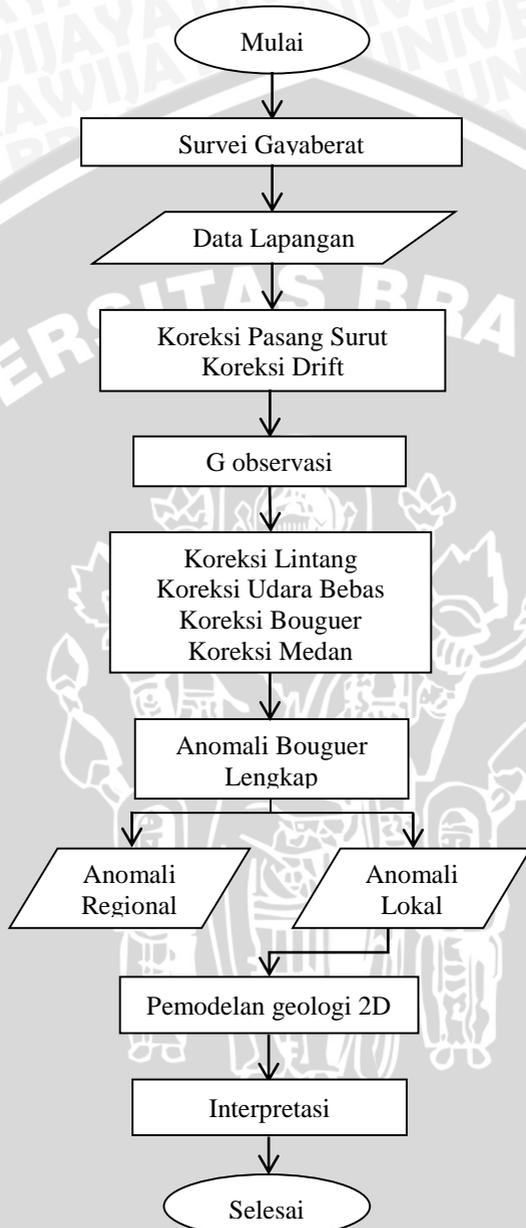
permukaan dari daerah penelitian. Pada pemodelan anomali lokal diawali dengan membuat sayatan (*slice*) pada kontur anomali lokal yang telah diperoleh. Sayatan ini dilakukan pada kontur yang memiliki kontras anomali tinggi. Hal ini dilakukan agar dapat diketahui kondisi bawah permukaannya dan lebih mudah dalam mengindikasikan jenis batuan di sekitarnya yang memiliki densitas sama. Pada pemodelan ini digunakan strike line sepanjang 3,2 km. Dengan adanya strike line ini akan diperoleh pemodelan $2\frac{1}{2}D$.

Pemodelan bawah permukaan pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Talwani $2\frac{1}{2}D$ yang menerapkan metode langsung (*forward method*) dengan bantuan dari program *Grav2dc*. Pada metode ini dilakukan perbandingan nilai model terbentuk berdasarkan parameter dengan anomali terukur (Blakely, 1996). Dengan begitu akan diperoleh ralat terkecil. Secara matematis, perhitungan ralat dapat dihitung menggunakan rumusan berikut.

$$R_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{XL_i - XM_i}{XL_i} \times 100\%$$

dimana

- R_M = ralat rata-rata model terhadap data lapangan
- XL_i = data lapangan terukur
- XM_i = data model terhitung
- n = jumlah data



Gambar 3.6 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

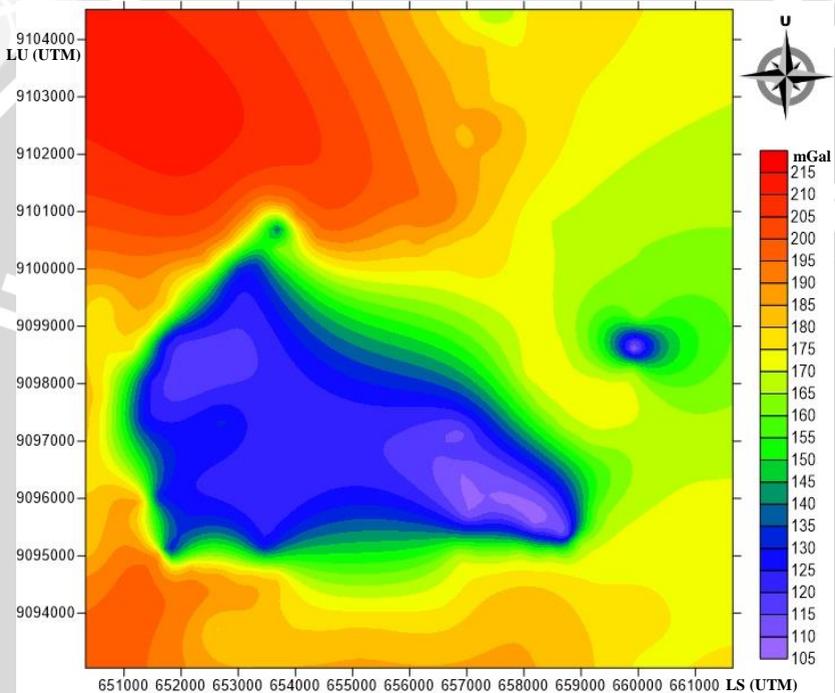
Penelitian struktur bawah permukaan menggunakan metode gayaberat di sekitar Bendungan Sutami Kecamatan Sumberpucung, Malang diperoleh data gayaberat seperti pada lampiran 1. Data tersebut diberikan koreksi-koreksi sesuai yang disebut dalam metodologi sehingga diperoleh *Complete Bouguer Anomaly (CBA)* atau anomali Bouguer lengkap. Berdasarkan data anomali Bouguer yang diperoleh, dapat dilakukan analisa dan pemodelan geologi bawah permukaan.

Secara morfologi, Kabupaten Malang merupakan daerah dengan karakteristik yang mempunyai bentuk dataran bervariasi. Daerah ini memiliki lembah dan perbukitan sehingga ketinggian dari satu tempat dengan tempat yang lain kadang memiliki perbedaan yang sangat tinggi. Hal ini tidak lepas dari proses pembentukannya.

Hubungan antara elevasi dengan besarnya gayaberat pada suatu titik pengukuran sangat erat. Sesuai dengan pernyataan Newton bahwa gaya gravitasi bumi terhadap benda di atas permukaan berbanding terbalik dengan jarak (benda terhadap pusat bumi). Maka dapat dikatakan bahwa semakin tinggi suatu titik atau semakin jauh suatu titik dari pusat bumi, maka percepatan gravitasinya akan semakin rendah karena percepatan gravitasi berbanding lurus dengan gaya gravitasi. Dengan begitu pada suatu titik pengukuran yang rendah akan memiliki anomali gayaberat yang tinggi, begitu pula sebaliknya semakin tinggi titik pengukuran maka anomali gayaberat akan semakin kecil.

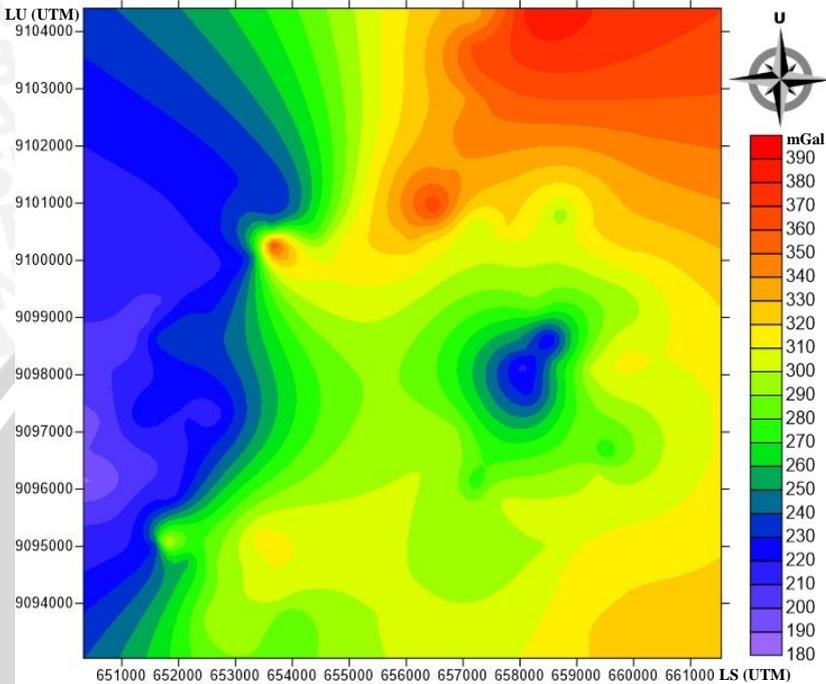
Peta kontur anomali Bouguer daerah penelitian pada gambar 4.1 di bawah menunjukkan bahwa nilai anomali Bouguer berkisar antara 105 mGal – 215 mGal. Anomali yang tinggi ditunjukkan oleh warna merah dengan nilai 185 mGal – 215 mGal. Anomali sedang ditunjukkan oleh warna hijau dengan nilai 145 mGal – 184 mGal. Sedangkan anomali rendah ditunjukkan oleh warna biru dengan nilai 105 mGal – 144 mGal. Kecenderungan anomali rendah berada di bagian tengah, hal ini disebabkan karena adanya keterbatasan data. Pada bagian tengah tidak terdapat data pengukuran sehingga pada program *Surfer* anomali di bagian tengah dianggap sama dengan

anomali di titik terdekatnya. Dan pada titik-titik pengukuran di sekitar bagian tengah memiliki anomali yang rendah. Anomali tinggi ditunjukkan berada di sebelah barat laut dan sebagian terlihat di sebelah barat daya. Sedangkan kecenderungan anomali sedang ditunjukkan berada di sisi luar dari anomali rendah yang berpusat di bagian tengah dan bagian timur.



Gambar 4.1 Peta kontur anomali Bouguer

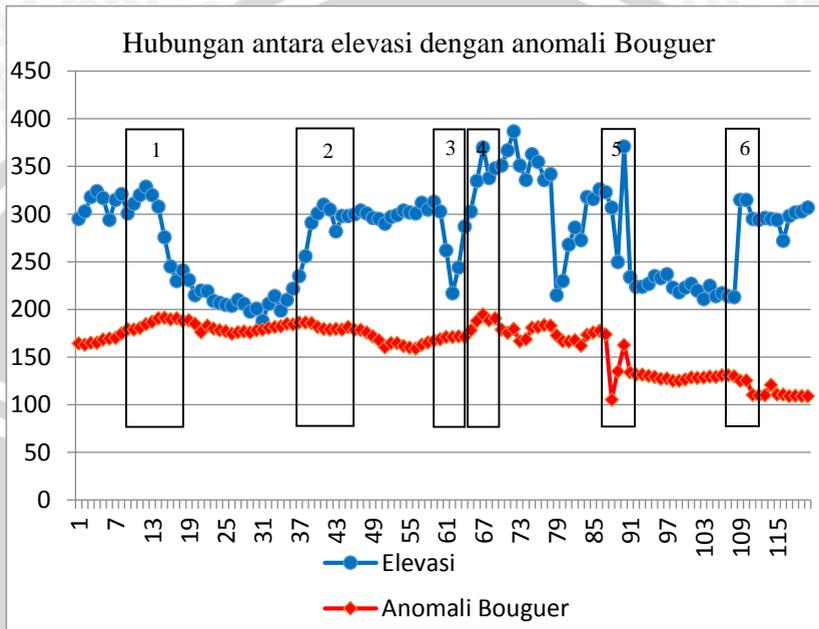
Sedangkan pada peta kontur elevasi daerah penelitian (gambar 4.2) dapat dilihat bahwa ketinggian permukaan berkisar antara 180 – 390 m. Daerah yang rendah diperlihatkan pada kontur bagian barat dan beberapa titik di tengah (di sekitar jembatan Lahor) dengan warna biru dan nilai elevasi 180 – 250 m. Lalu daerah dengan elevasi sedang ditunjukkan berada di bagian tengah hingga timur dengan warna hijau dan nilai 251 – 330 m. Sedangkan daerah tinggi ditunjukkan berada di sebelah timur laut dengan warna merah dan nilai 331 – 390 m.



Gambar 4.2 Peta kontur elevasi

Jika dibandingkan antara peta kontur elevasi dengan peta kontur anomali Bouguer, maka terdapat beberapa perbedaan dengan pernyataan mengenai hubungan antara keduanya. Dari perbandingan ini dapat dikatakan bahwa pada daerah penelitian memiliki anomali tertentu. Anomali tersebut berada pada sebelah barat, dimana pada peta kontur elevasi ditunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki elevasi yang rendah dan pada peta kontur anomali Bouguer juga ditunjukkan memiliki nilai yang rendah pula. Pada daerah ini diindikasikan bahwa batuan yang memenuhi adalah batuan dengan densitas yang rendah. Dimungkinkan pada daerah ini dulunya merupakan lembah atau jurang yang dipenuhi oleh batuan muda akibat terjadinya sedimentasi hingga tertutup. Sehingga batuan keras pada daerah ini berada pada lapisan yang cukup dalam. Sedangkan pada peristiwa kedua, kedua peta kontur menunjukkan elevasi tinggi dan anomali yang tinggi diindikasikan bahwa pada daerah tersebut dipenuhi oleh batuan keras dengan densitas yang tinggi. Dimungkinkan peristiwa ini terjadi karena dulunya daerah ini

merupakan daerah perbukitan yang terkikis sehingga batuan muda yang ada di atasnya berpindah ke daerah yang lebih rendah. Dengan begitu, pada daerah ini mayoritas diisi oleh batuan keras.



Gambar 4.3 Hubungan antara elevasi dengan anomali Bouguer

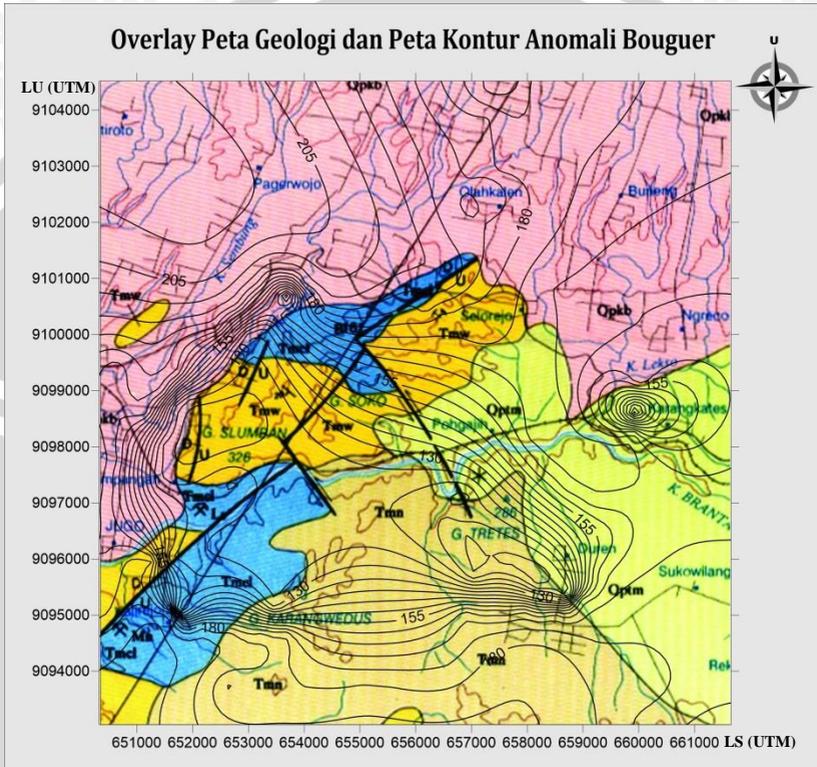
Hubungan antara elevasi dengan anomali Bouguer dapat dilihat pada gambar grafik (gambar 4.3) di atas. Pada gambar ini diperlihatkan lebih rinci mengenai anomali tertentu yang membuat hubungan antara keduanya tidak sesuai dengan teori. Pada peristiwa 1 ditunjukkan bahwa elevasi mengalami kenaikan namun anomalnya juga tetap tinggi dibandingkan dengan anomali yang terukur sebelumnya. Hal yang hampir sama ditunjukkan pada peristiwa 2 dimana elevasi meningkat dengan drastis, namun anomalnya mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan. Lalu pada peristiwa 3 ditunjukkan bahwa terjadi penurunan elevasi yang sangat curam, namun anomalnya tidak mengalami kenaikan. Pada peristiwa 4, elevasi mengalami kenaikan yang tinggi dan anomalnya juga ikut naik. Hal yang sama juga terjadi pada peristiwa 5 dimana terjadi penurunan dan kenaikan yang curam pada elevasi, namun anomalnya juga mengikuti penurunan dan kenaikan tersebut. Hal

yang seharusnya terjadi adalah keduanya saling berkebalikan yaitu ketika elevasi meningkat, maka anomalnya akan menurun. Lalu pada peristiwa 6 ditunjukkan bahwa setelah elevasi rendah, kemudian terjadi kenaikan elevasi yang curam. Namun pada anomalnya hanya ditunjukkan terjadi penurunan yang tidak terlalu signifikan.

Untuk mengetahui kondisi geologi daerah penelitian, dapat dilakukan perbandingan antara anomali Bouguer dengan peta geologi regional daerah penelitian. Daerah penelitian berada pada peta geologi lembar Blitar (Gambar 3.4). daerah ini terletak pada 5 formasi batuan yaitu Formasi Wuni (Tmw), Formasi Campurdarat (Tmcl), Formasi Nampol (Tmn), Endapan Gunungapi Butak (Qpkb), dan Endapan Tuf (Qptm). Dari kelima formasi ini, dua diantaranya masuk dalam kategori endapan permukaan yaitu Formasi Campurdarat dan Formasi Nampol. Sedangkan tiga formasi lainnya masuk dalam kategori batuan gunungapi, yaitu Formasi Wuni, Endapan Gunungapi Butak, dan Endapan Tuf. Selain itu berdasarkan umur pembentukannya, kelima formasi ini juga memiliki umur yang berbeda-beda. Formasi batuan yang memiliki umur paling muda adalah Endapan Tuf yang terbentuk pada dua periode yaitu akhir Plistosen hingga awal Holosen pada zaman Kuartar. Lalu Endapan Gunungapi Butak terbentuk pada awal periode Plistosen pada zaman Kuartar. Formasi Nampol terbentuk pada pertengahan periode Miosen pada zaman Tersier. Sedangkan Formasi Wuni terbentuk pada awal hingga pertengahan Miosen zaman Tersier. Dan formasi yang paling tua yaitu Formasi Campurdarat yang terbentuk pada awal Miosen zaman Tersier.

Berdasarkan informasi mengenai kondisi geologi daerah penelitian dari peta geologi, kelima formasi tersebut memiliki litologi yang bervariasi. Pada Formasi Wuni diisi oleh batuan breksi andesit-basal, lahar breksi, lava andesit dan sisipan batupasir tufan. Formasi Campurdarat terdiri dari batugamping kristalin dan sisipan batulempung. Lalu pada Formasi Nampol terdiri dari batupasir gampingan-tufan, batulempung dan napal. Sedangkan Endapan Gunungapi Butak terdapat lava, breksi gunungapi, tuf breksi, dan tuf pasiran. Dan pada Endapan Tuf diisi oleh batuan tuf lapilli, tuf batuapung dan lava.

Jika dibandingkan antara anomali Bouguer dengan peta geologi daerah penelitian, diperoleh korelasi yang cukup sesuai seperti pada gambar 4.4 di bawah.

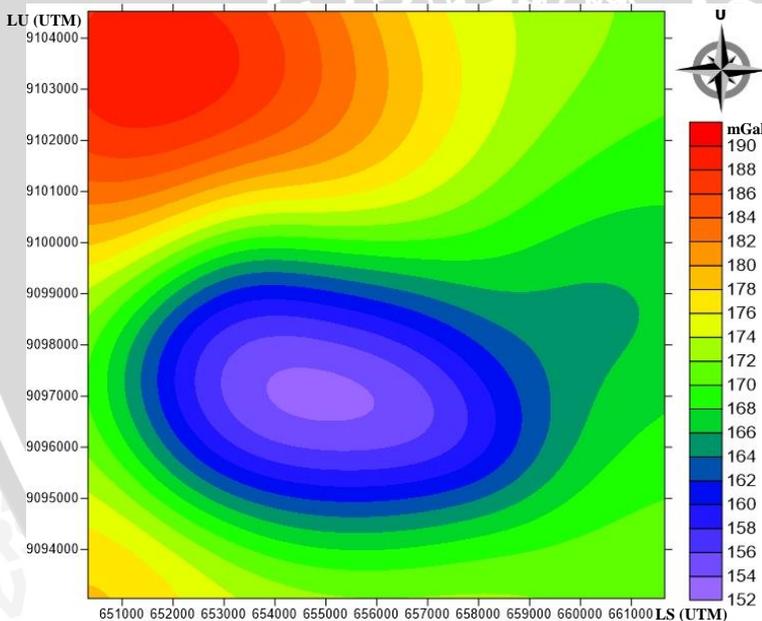


Gambar 4.4 Overlay peta geologi dan peta kontur anomali Bouguer (Sjarifudin dan Hamidi, 1992)

Pada peta geologi diperlihatkan bahwa batuan yang ada di sebelah utara (Qpkb) lebih tua daripada batuan yang ada di sebelah selatan (Qptm). Hal ini juga diperlihatkan pada peta kontur anomali Bouguer dimana anomali di sebelah utara lebih tinggi daripada anomali di sebelah selatan. Dari peta overlay di atas juga dapat dilihat adanya kerapatan kontur anomali Bouguer yaitu di sebelah barat. Pada daerah tersebut kontur anomalnya terlihat sangat rapat yang menunjukkan bahwa perbedaan anomali tinggi dengan anomali rendah sangat curam. Sedangkan pada peta geologi, diperlihatkan

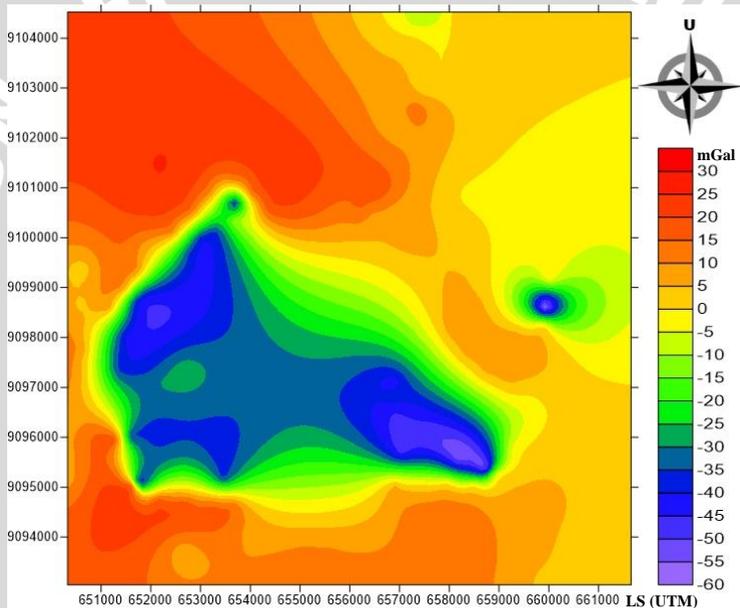
bahwa pada daerah tersebut merupakan pertemuan antara tiga formasi batuan yaitu Endapan Gunungapi Butak, Formasi Campurdarat, dan Formasi Wuni.

Data anomali Bouguer ini merupakan gabungan dari efek anomali dalam (regional) dan efek anomali dangkal (lokal). Oleh karena itu, data ini tidak bisa langsung digunakan untuk interpretasi struktur bawah permukaan. Data anomali gayaberat harus dipisahkan terlebih dahulu antara anomali regional dan anomali lokal. Dalam penelitian ini dilakukan pemisahan menggunakan metode *upward continuation*. Karena pada metode ini terjadi penekanan terhadap efek anomali lokal yang ada pada data anomali gayaberat, sehingga yang diperoleh adalah anomali regional (Gambar 4.5). Sedangkan anomali lokal (Gambar 4.6) diperoleh dari selisih antara anomali gayaberat dengan anomali regional. Pada penelitian ini, diperoleh ketinggian pengangkatan dengan hasil anomali regional yang konstan yaitu pada ketinggian 1900 m.



Gambar 4.5 Anomali regional

Berdasarkan anomali regional diperoleh besarnya nilai anomali yang berkisar antara 152 – 190 mGal. Pada anomali regional ini diperlihatkan persebaran anomali tinggi, sedang, dan rendah. Anomali tinggi, sedang, dan rendah diperlihatkan secara berurutan dari barat daya ke timur laut. Namun anomali rendah hanya berada di bagian tengah, sehingga di bagian selatan dari anomali rendah diisi oleh anomali sedang. Hal ini terjadi seperti pembahasan sebelumnya yaitu pada bagian tengah tidak terdapat data pengukuran sehingga anomali yang diperlihatkan disesuaikan dengan anomali yang ada di titik terdekatnya.



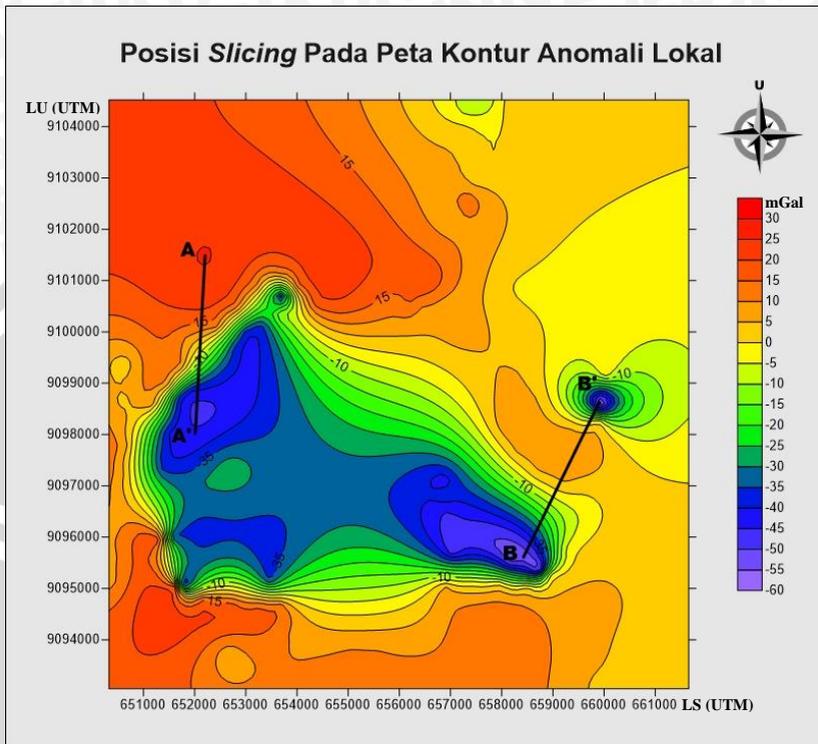
Gambar 4.6 Anomali lokal

Pada peta kontur anomali lokal di atas, dapat diamati bahwa anomali yang terukur juga memperlihatkan anomali tinggi, sedang dan rendah. Pada anomali lokal diperoleh nilai anomali yang berkisar antara -60 – 30 mGal. Anomali tinggi ditunjukkan oleh warna merah dengan nilai anomali dari 0 – 30 mGal yang berada di sebagian besar daerah penelitian yaitu sebelah barat laut, barat daya hingga tenggara dan menyambung hingga bagian utara. Anomali sedang berkisar antara -30 hingga -1 mGal yang berada di bagian timur dan sebagian

membentuk pola melingkar di bagian tengah. Pola dari anomali sedang tersebut berada di sebelah luar dari anomali rendah yang berada di bagian tengah dan sedikit di bagian timur. Anomali rendah memiliki nilai anomali antara -60 sampai -31 mGal. Dengan menggunakan peta kontur anomali lokal ini juga dilakukan interpretasi terhadap kondisi bawah permukaan. Interpretasi ini dilakukan dengan mengamati hasil pemodelan kondisi bawah permukaan.

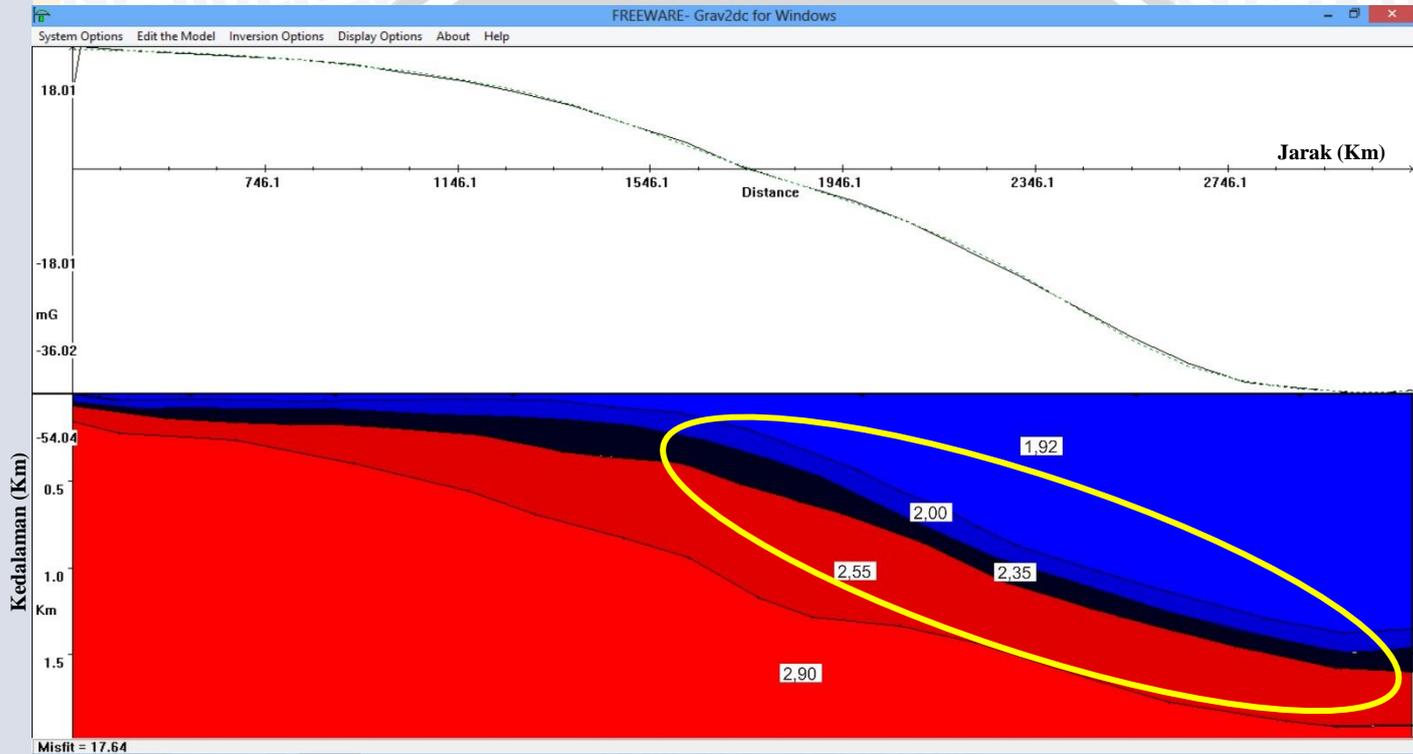
Pemodelan bawah permukaan pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Talwani $2\frac{1}{2}D$ yang menerapkan metode langsung (*forward method*) dengan bantuan dari program *Grav2dc*. Dengan melakukan pemodelan ini dapat diperoleh gambaran mengenai struktur bawah permukaan lebih mendalam. Pada program *Grav2dc* dimasukkan data hasil potongan (*slice*) pada peta kontur anomali lokal. Pemilihan daerah yang *dislice* pada penelitian ini didasarkan pada kontur anomali lokal yang memiliki kecenderungan kerapatan tinggi. Hal ini dilakukan karena pada daerah dengan kontur yang rapat biasanya menandakan adanya suatu peristiwa geologi seperti struktur, patahan, dan peristiwa geologi lainnya.

Pada penelitian ini digunakan dua buah *slice* untuk melakukan pemodelan (Gambar 4.7). *Slice* pertama dilakukan dengan bentangan *line A – A'* dari utara (titik A) ke selatan (titik A') pada kontur bagian barat. *Line A – A'* memiliki panjang bentangan 3,2 km. Pada *line* ini telah mencakup hampir keseluruhan nilai anomali lokal yaitu dari titik A dengan nilai anomali maksimal (30 mGal) sampai titik A' dengan nilai anomali mencapai minimum (-55 mGal). Sedangkan *slice* kedua yaitu *line B – B'* memiliki panjang bentangan 3,4 km. *Line B – B'* terbentang dari titik dengan nilai anomali minimum (-60 mGal) di sebelah tenggara peta kontur ke arah timur laut sampai tepat di atas jembatan Lahor (-55 mGal). Letak dari kedua *slice* tersebut dapat dilihat pada gambar 4.7 di bawah.



Gambar 4.7 Posisi *slicing* pada peta kontur anomali lokal

Pada pemodelan bawah permukaan daerah penelitian dari kedua *line* di atas, ditentukan kedalaman maksimum yaitu 2 km. Kedalaman ini ditentukan berdasarkan kebutuhan analisis yaitu untuk mengetahui kondisi bawah permukaan daerah penelitian. Oleh karena itu, kedalaman 2 km sudah cukup untuk mengetahui kondisi struktur bawah permukaan. Hasil pemodelan ini diestimasi berdasarkan korelasi dengan peta geologi. Dengan begitu pemodelan bisa dilaksanakan lebih mudah karena sudah memperoleh informasi beberapa jenis batuan yang ada di daerah penelitian. Selain itu dengan informasi geologi daerah penelitian, model yang dihasilkan secara fisis dapat diterima. Berdasarkan pemodelan 2D diperoleh hasil seperti pada gambar 4.8 dan gambar 4.9 di bawah.



Gambar 4.8 Pemodelan *line A – A'*

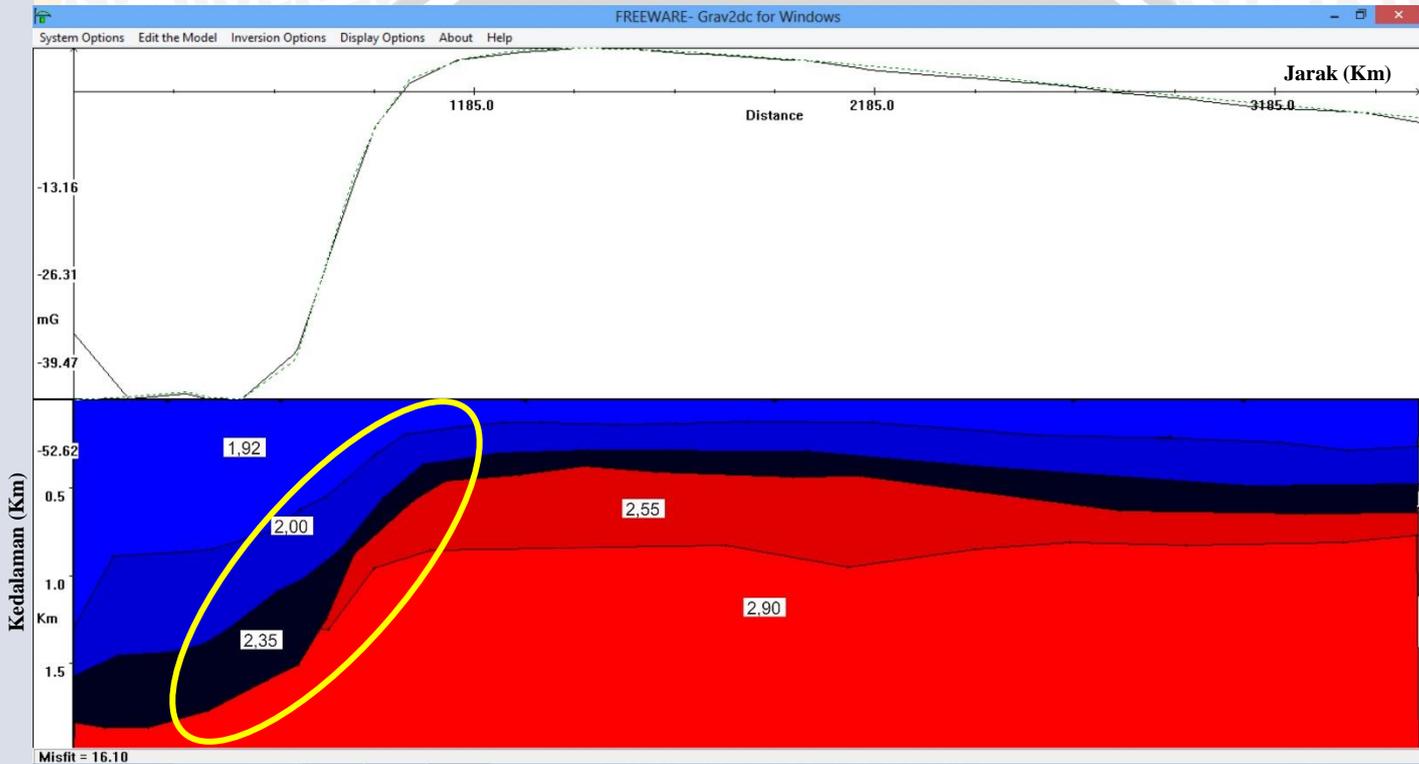
Tabel 4.1 Keterangan warna lapisan batuan pada hasil pemodelan *line A – A'*

No.	Lapisan	Densitas	Jenis
1		1,92 gr/cm ³	Soil dan batuapung
2		2,00 gr/cm ³	Tuf pasiran
3		2,35 gr/cm ³	Batu pasir dan andesit
4		2,55 gr/cm ³	Batu gamping
5		2,9 gr/cm ³	Lava

Pemodelan *line A – A'* memperlihatkan terdapat lima buah poligon yang memanjang. Berdasarkan informasi geologi dan lokasi daerah penelitian yang berdekatan dengan gunungapi Kelud, maka dapat diindikasikan bahwa kelima poligon tersebut menggambarkan batuan yang berasal dari gunungapi. Poligon 1 berada di bagian paling atas yang memanjang dari jarak 0 hingga jarak 3,2 km. Namun poligon 1 memiliki perbedaan ketebalan yang cukup besar antara jarak 0 dan jarak 3,2 km. Pada jarak 0 – 1,3 km poligon 1 memiliki ketebalan sekitar 50 m dan dari jarak 1,3 km poligon 1 semakin menebal ke bawah mencapai kedalaman 1,25 km pada jarak 3,2 km. Poligon 1 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = -0,75 \text{ gr/cm}^3$ dan nilai densitas model $1,92 \text{ gr/cm}^3$. Poligon 1 ditafsirkan sebagai soil dan batuapung. Poligon 2 memiliki perbedaan yang cukup signifikan dengan poligon 1 dimana poligon 2 memiliki ketebalan yang cukup konstan. Poligon 2 berada di bawah poligon 1 dan memiliki pola yang mengikuti pola dari poligon 1. Pada jarak 0 hingga 850 m poligon 2 memiliki ketebalan sekitar 50 m kemudian menebal menjadi 100 m hingga jarak 3,2 km. Sesuai dengan pola yang terjadi pada poligon 1, terjadi penurunan pada jarak 1,3 km sehingga dari jarak tersebut poligon 2 menyisip semakin dalam sampai kedalaman maksimum yaitu 1,35 km. Poligon 2 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = -0,67 \text{ gr/cm}^3$ dengan nilai densitas model

2,00 gr/cm³ yang ditafsirkan sebagai tuf pasiran. Poligon 3 memiliki pola yang sama dengan poligon 2 yaitu mengalami penurunan mulai jarak 1,3 km hingga 3,2 km. Pada jarak 0 – 200 m, poligon 2 memiliki ketebalan sekitar 50 m selanjutnya menebal dengan ketebalan maksimum sekitar 200 m yang terletak pada jarak 1,2 – 1,9 km. Poligon 3 ini berada di bawah poligon 2 dengan kedalaman maksimum 1,5 km. Poligon 3 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = -0,67 \text{ gr/cm}^3$ dengan nilai densitas model 2,35 gr/cm³ yang ditafsirkan sebagai batu pasir. Selain itu, berdasarkan informasi geologi pada lapisan ini juga bisa diisi oleh andesit dengan nilai densitas yang sama. Poligon 4 juga hampir sama dengan 2 poligon di atasnya (poligon 2 dan 3), poligon ini juga mengalami penurunan pada jarak yang sama. Yang membuat berbeda pada poligon 4 adalah ketebalan yang cenderung lebih tebal daripada poligon 2 dan 3. Pada jarak 0 – 0,7 km, poligon 4 memiliki ketebalan sekitar 100 m. Kemudian poligon semakin menebal hingga ketebalan maksimum sekitar 1,1 km pada jarak 1,8 km. Poligon ini mencapai kedalaman maksimum yaitu sekitar 1,9 km. Poligon 4 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = 0,12 \text{ gr/cm}^3$ dengan nilai densitas model 2,55 gr/cm³ yang ditafsirkan sebagai batu gamping. Poligon 5 merupakan poligon yang terletak di lapisan paling bawah pada pemodelan ini. Poligon ini memiliki ketebalan maksimum sekitar 1,8 km yaitu pada jarak 0 km. Kemudian poligon mengalami penipisan dengan mengikuti pola keempat poligon di atasnya hingga mencapai ketebalan maksimum sekitar 100 m. Poligon 5 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = 0,23 \text{ gr/cm}^3$ dengan nilai densitas model 2,9 gr/cm³ yang ditafsirkan sebagai lava.

Berdasarkan pemodelan *line A – A'* di atas, dapat dikatakan adanya kemenerusan struktur pada daerah penelitian. Hal ini diperlihatkan pada pemodelan dengan pola penurunan lapisan yang cukup drastis dan memanjang. Dimungkinkan pada daerah ini terjadi pertemuan formasi batuan. Jika dikorelasikan dengan peta geologi, pada daerah ini terdapat pertemuan antara tiga formasi batuan yaitu Formasi Wuni, Formasi Campurdarat, dan Endapan Gunungapi Butak.



Gambar 4.9 Pemodelan slice B – B'

Tabel 4.2 Keterangan warna lapisan batuan pada hasil pemodelan *line B – B'*

No.	Lapisan	Densitas	Jenis
1		1,92 gr/cm ³	Soil dan batuapung
2		2,00 gr/cm ³	Tuf pasiran
3		2,35 gr/cm ³	Batu pasir dan andesit
4		2,55 gr/cm ³	Batu gamping
5		2,9 gr/cm ³	Lava

Pemodelan *line B – B'* memberikan gambaran geologi bawah permukaan berdasarkan poligon-poligon yang diperlihatkan pada gambar 4.9 di atas. Pada *line B – B'*, didapatkan lima buah poligon seperti pada *line A – A'*. Poligon 1 yang berada di bagian paling atas memiliki ketebalan maksimum sekitar 1,3 km dengan lokasi pada jarak 0 km. Poligon 1 mengalami penipisan dari jarak 0 km hingga 0,8 km. Lalu dari jarak 0,8 km sampai jarak 3,4 cenderung konstan yaitu dengan ketebalan sekitar 100 – 200 m. Poligon 1 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = -0,75 \text{ gr/cm}^3$ dan nilai densitas model 1,92 gr/cm³ yang ditafsirkan sebagai soil dan batuapung. Poligon 2 mengalami kenaikan dari kedalaman 1,55 km menjadi 0,3 km pada jarak 0 – 1,1 km. Poligon 2 memiliki ketebalan maksimum sekitar 500 m dan ketebalan minimum 150 m. Poligon ini mengalami kenaikan yang cukup signifikan pada jarak 0 – 0,8 km dan mengalami penurunan kembali secara perlahan dari jarak sekitar 2 – 3,4 km. Poligon 2 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = -0,67 \text{ gr/cm}^3$ dan nilai densitas model 2,00 gr/cm³ yang ditafsirkan sebagai pasir dan tuf pasiran. Poligon 3 memiliki pola yang hampir sama dengan pola 2 yaitu terjadi kenaikan pada jarak 0 – 0,8 km dengan ketebalan maksimum 400 m. Pada jarak 0 – 250 m, poligon 3 berada pada kedalaman maksimum yaitu pada kedalaman 1,4 km. Poligon 3 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = -0,32 \text{ gr/cm}^3$ dan nilai densitas

model $2,35 \text{ gr/cm}^3$ yang ditafsirkan sebagai batu pasir dan andesit. Poligon 4 diperlihatkan mulai ada pada jarak 600 m. Pada saat itu, poligon mengalami kenaikan hingga jarak sekitar 900 m selanjutnya memanjang hingga jarak 3,4 km. Poligon 4 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = 0,12 \text{ gr/cm}^3$ dengan nilai densitas model $2,55 \text{ gr/cm}^3$ ditafsirkan sebagai batu gamping. Sedangkan poligon 5 berkebalikan dengan poligon 1 yaitu pada jarak 0 – 250 m memiliki ketebalan minimum sekitar 150 m selanjutnya menebal secara drastis menjadi 1,2 km pada jarak 750 m. Kemudian poligon 5 memanjang hingga jarak 3,4 km dengan ketebalan cukup konstan. Poligon 5 memiliki kontras densitas $\Delta\rho = 0,23 \text{ gr/cm}^3$ dengan nilai densitas model $2,9 \text{ gr/cm}^3$ yang ditafsirkan sebagai lava.

Berdasarkan pemodelan line B – B', diperoleh gambaran kondisi bawah permukaan daerah penelitian dimana pada *line* ini terdapat kemenerusan struktur yang digambarkan pada jarak 0 – 1 km. Pada lokasi ini terdapat perbedaan densitas yang cukup tinggi. Pada jarak 0 – 700 m didominasi oleh batuan dengan densitas rendah sedangkan pada jarak 700 m – 3,4 km didominasi oleh batuan dengan densitas tinggi. Jika dikorelasikan dengan peta geologi, pada daerah ini merupakan perbatasan antara dua formasi batuan yaitu antara Endapan Tuf dengan Endapan Gunungapi Butak. Endapan Tuf berada di sebelah selatan sedangkan Endapan Gunungapi Butak berada di sebelah utara. Berdasarkan informasi umur batuan, Endapan Gunungapi Butak lebih tua dibandingkan dengan Endapan Tuf. Hasil pemodelan ini sesuai dengan informasi geologi dimana line B – B' terbentang dari sebelah selatan ke utara dimana formasi yang lebih muda berada di sebelah selatan dan formasi yang lebih tua berada di sebelah utara. Sehingga dapat dimungkinkan bahwa struktur kenaikan lapisan tersebut merupakan pola yang terjadi karena adanya pertemuan antara dua formasi batuan.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa pada kontur anomali Bouguer lengkap diperoleh rentang nilai anomali sebesar 105 – 215 mGal. Anomali Bouguer dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi geologi daerah penelitian dengan melakukan pemodelan. Dari pemodelan yang dilakukan, di Bendungan Sutami dan sekitarnya terdapat lima jenis batuan yaitu soil dan batuapung, tuf pasiran, batu pasir dan andesit, batu gamping, dan lava. Pada daerah penelitian diindikasikan terdapat struktur dengan jarak 1,5 km dari bendungan. Struktur yang terdapat di daerah penelitian ini diakibatkan oleh kelurusan dan merupakan batas antara formasi batuan.

5.2 Saran

Pada penelitian mengenai penggunaan metode gayaberat untuk identifikasi struktur bawah permukaan ini terdapat beberapa kekurangan. Oleh sebab itu dapat dituliskan saran kepada peneliti selanjutnya sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian menggunakan metode geofisika lain untuk mengetahui kondisi geologi daerah penelitian secara spesifik seperti metode geolistrik dengan luas wilayah dipersempit yang fokus pada Bendungan Sutami.
2. Diharapkan dapat digunakan metode analisis pada penelitian berikutnya agar dapat diketahui lebih jelas indikasi adanya struktur di daerah penelitian dan batas kontak struktur.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR PUSTAKA

- Asikin, S. 1979. *Dasar-Dasar Geologi Struktur*. Departemen Teknik Geologi ITB. Bandung.
- Blakely, R.J. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Dobrin, M.B. dan Savit, C.H. 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting 4th Edition*. McGraw-Hill Collage. New York.
- Faizah, Iiz. 2010. *Interpretasi Kualitatif Medan Gravitasi Berdasarkan Hasil Perhitungan Anomali Residu Menggunakan Metode Polynomial Fitting di Karangsembung – Jawa Tengah*. Program Studi Fisika UIN Syarif Hidayatullah. Jakarta.
- Grant, F.S., and West, G.F. 1965. *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. McGraw Hill. New York.
- Hartati, Anita. 2012. *Identifikasi Struktur Patahan Berdasarkan Analisa Derivative Metode Gayaberat di Pulau Sulawesi*. Program Studi Fisika UI. Depok.
- Ibnu, D.A., Subandriyo., Wiyono. 2002. *Interpretasi Bawah Permukaan Gunung Bromo Tengger*. Prosiding HAGI. Jakarta.
- Katili, John, A. 1973. *On Fitting Certain Geological And Geophysical Features of The Indonesian Island Arc to The New Global Tectonics*. University of Western Press. Australia.
- Latifah, Iif. 2010. *Penentuan Anomali Bouguer dan Densitas Rata-Rata Batuan Berdasarkan Data Gravitasi di Daerah Semarang*. UIN Syarif Hidayatullah. Jakarta.
- Lillie, R. J. 1999. *Whole Eart Geophysics*. Prentice-hall. Inc. USA.
- Natawidjaja, D.H. 2007. *Tectonicsetting Indonesia dan Pemodelan Sumber Gempa Bumi dan Tsunami (Pelatihan Pemodelan Run-Up, Ristek)*. Geoteknologi-LIPI. Bandung.
- Octonovrilna, L. dan Pudja, I.P. 2008. *Analisis Perbandingan Anomaly Gravitasi dengan Persebaran Intrusi Air Asin (Studi Kasus Jakarta 2006-2007)*. Akademi Meteorologi dan Geofisika. Jakarta.
- Purnomo, J., Koesomo, S., Yunianto, M. 2013. *Pemisahan Anomali Regional-Residual pada Metode Gravitasi Menggunakan Metode Moving Average, Polynomial, dan Inversion*. *Indonesian Journal of Applied Physics*. Vol 3 Nomor 1 Hal: 10.

- Reynolds, J.M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons. Chichester.
- Ridhwan, Muhamad. 2010. *Interpretasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Kretek dan Sekitarnya Kabupaten Bantul Provinsi DI Yogyakarta Berdasarkan Data Anomali Gravitasi*. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Rosid, Syamsu. 2005. *Lecture Notes: Gravity Method in Exploration Geophysics*. Geofisika FMIPA UI. Depok.
- Sidik, I.F., Susilo, A., Sulastomo, G. 2014. *Identifikasi Sesar di Daerah Pongkor Bogor Jawa Barat dengan Menggunakan Metode Gayaberat*. Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya. Malang.
- Sjarifudin, M.Z. dan Hamidi, S. 1992. *Peta Geologi Lembar Blitar, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung
- Soebowo, E., Adrin, T., Sarah, D. 2007. *Studi Potensi Likuifaksi di Daerah Zona Patahan Opak Patalan-Bantul Jogjakarta (Prosiding Seminar Geoteknologi Kontribusi Ilmu Kebumihan Dalam Pembangunan Berkelanjutan)*. Pusat Penelitian Geoteknologi – LIPI. Bandung.
- Suhadiyatno. 2008. *Pemodelan Metode Gravitasi Tiga Dimensi Dengan Menggunakan Matlab*. Jurusan Fisika FMIPA UI. Depok.
- Sunaryo¹. 2012. *Identification Of Arjuno-Welirang Volcano-Geothermal Energy Zone By Means Of Density And Susceptibility Contrast Parameters*. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Volume 12 No. 01.
- Sunaryo². 2012. *Study on Mineralization Zone of Blitar District by Means of Simple Bouguer Anomaly*. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). Volume 2, Issue 6.
- Tapponnier, P., Molnar, P. 1977. *Active Faulting and Tectonics in China*. J. Geophys. Res. 82, 2905 – 2930.
- Telford, W. M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys D.A. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. London.
- Torkis, Rahman. 2012. *Analisa dan Pemodelan Struktur Bawah Permukaan Berdasarkan Metode Gaya Berat di Daerah*

Prospek Panas Bumi Gunung Lawu. Program Studi Fisika UI.
Depok.

Untung, M. 2001. *Dasar-dasar Magnet dan Gayaberat Serta
Beberapa Penerapannya.* ITB. Bandung.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



LAMPIRAN

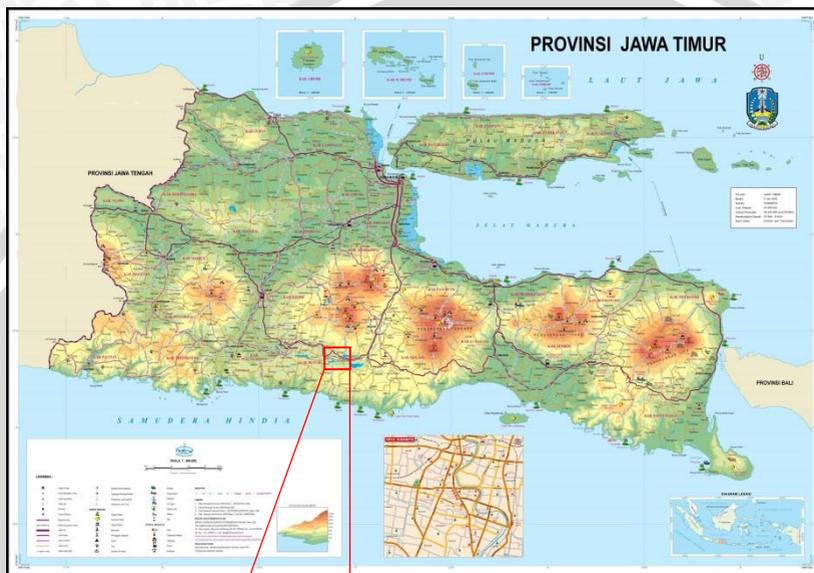
Lampiran 1 Data gayaberat daerah penelitian

No.	Lintang	Bujur	Elevasi	G Obs.	G ϕ	FAC	TC	AB
1	659922.394	9099107.39	295	978242.430	978135.9593	91.0075	0.079247	164.594
2	659905.8949	9099625.372	303	978239.491	978135.8404	93.4755	0.007984	163.277
3	659881.8218	9100084.4	318	978238.171	978135.7351	98.103	0.004124	165.010
4	659607.8026	9100496.402	324	978237.080	978135.6408	99.954	0.00275	165.193
5	659095.6562	9100573.8	317	978241.650	978135.6235	97.7945	0.026633	168.427
6	658727.2964	9100799.974	294	978247.092	978135.5719	90.699	0.03524	169.403
7	658235.0367	9100786.978	315	978243.952	978135.5753	97.1775	0.007984	170.364
8	657771.6156	9100620.895	321	978247.414	978135.6137	99.0285	0.001375	174.961
9	657257.3876	9100630.083	301	978255.763	978135.612	92.8585	0.042456	179.418
10	656856.2076	9100402.949	311	978253.346	978135.6645	95.9435	0.042014	178.916
11	656383.9891	9100345.628	320	978253.454	978135.678	98.72	0.017538	180.757
12	655892.2228	9100470.838	329	978255.743	978135.6497	101.4965	0.029547	184.857
13	655309.6318	9100362.285	320	978259.939	978135.675	98.72	0.031528	187.259
14	654810.22	9100402.726	308	978265.961	978135.6661	95.018	0.011844	190.909
15	654336.6316	9100476.249	276	978272.702	978135.6497	85.146	0.020939	191.379
16	653977.8355	9100818.462	245	978277.246	978135.5715	75.5825	0.00661	189.888
17	653637.1372	9101083.198	230	978281.085	978135.5111	70.955	0.023231	190.852

18	653160.504	9100804.687	241	978276.254	978135.5753	74.3485	0.00661	188.105
19	652790.0944	9100439.183	231	978278.999	978135.6594	71.2635	0.009359	188.801
20	652395.7364	9100051.641	215	978278.679	978135.7486	66.3275	0	185.234
21	650620.9408	9099307.543	220	978268.983	978135.9208	67.87	0	176.349
22	651809.008	9099799.298	219	978275.690	978135.8069	67.5615	0	182.973
23	651709.9181	9099283.573	209	978274.734	978135.9254	64.4765	0.016163	179.947
24	651435.0844	9098932.48	207	978273.483	978136.0063	63.8595	0.03138	178.238
25	651138.106	9098551.972	205	978273.036	978136.0939	63.2425	0	177.278
26	650616.6938	9098596.131	204	978270.677	978136.0842	62.934	0	174.732
27	650606.2175	9098212.807	210	978271.000	978136.1723	64.785	0	176.147
28	650617.3926	9097718.825	206	978272.591	978136.2859	63.551	0	176.838
29	650562.3851	9097201.107	198	978273.287	978136.405	61.083	0	175.841
30	650476.0582	9096655.85	201	978275.256	978136.5306	62.0085	0.00275	178.277
31	650380.6352	9096134.583	188	978278.799	978136.6507	57.998	0.021857	179.161
32	650366.0077	9095609.357	206	978276.821	978136.7718	63.551	0.001375	180.583
33	650327.5676	9095106.327	214	978276.341	978136.8878	66.019	0	181.560
34	650902.1103	9096114.382	199	978279.834	978136.655	61.3915	0	182.335
35	651296.337	9095939.791	210	978280.484	978136.6949	64.785	0	185.109
36	651251.917	9095298.55	222	978277.642	978136.8428	68.487	0.00275	184.482
37	651667.7928	9095013.294	235	978277.119	978136.9082	72.4975	0.021398	186.471
38	652131.4787	9094746.301	256	978272.997	978136.9694	78.976	0.00275	186.401
39	652667.3874	9094659.675	291	978265.581	978136.989	89.7735	0.011844	185.861
40	653238.4232	9094637.43	301	978259.296	978136.9937	92.8585	0.022773	181.550

41	653633.1989	9094626.848	310	978255.753	978136.9958	95.635	0.00275	179.755
42	653721.5263	9094149.178	305	978256.230	978137.106	94.0925	0.001375	179.137
43	653945.9959	9093746.603	282	978261.448	978137.1988	86.997	0.028172	179.764
44	652632.883	9093705.073	298	978257.478	978137.2094	91.933	0.004124	178.907
45	655021.7196	9093645.163	298	978260.241	978137.2214	91.933	0.007984	181.663
46	655516.2625	9093805.622	300	978256.914	978137.1839	92.55	0.013678	178.772
47	656122.1033	9093762.941	304	978255.883	978137.1933	93.784	0.00661	178.512
48	656550.8151	9094002.876	301	978253.965	978137.1375	92.8585	0.001375	176.054
49	656682.886	9094481.62	296	978250.732	978137.0269	91.316	0.011844	171.958
50	656818.8086	9095008.272	295	978246.614	978136.9052	91.0075	0.001375	167.755
51	657347.9065	9095069.063	290	978240.388	978136.8908	89.465	0.028466	160.586
52	657867.54	9095048.784	297	978243.265	978136.895	91.6245	0.001375	164.809
53	658407.3112	9095011.839	299	978242.723	978136.9031	92.2415	0.013219	164.665
54	658865.3768	9095235.062	304	978238.942	978136.8513	93.784	0.00275	161.908
55	659159.2092	9095748.244	302	978237.470	978136.7327	93.167	0.005235	160.165
56	659398.0206	9096280.054	301	978236.637	978136.61	92.8585	0.00275	159.255
57	661540.0068	9097977.228	312	978237.992	978136.2176	96.252	0.00275	163.166
58	660192.9882	9097748.021	305	978241.810	978136.2714	94.0925	0	165.551
59	659792.3095	9098171.542	313	978242.226	978136.1744	96.5605	0.001375	167.639
60	659264.9807	9098103.394	303	978245.184	978136.1905	93.4755	0.101014	168.713
61	658640.7592	9098160.919	262	978255.958	978136.1778	80.827	0.072546	171.404

Lampiran 2 Peta geografis daerah penelitian



Lampiran 4 Tabel densitas batuan (Telford, 1990)

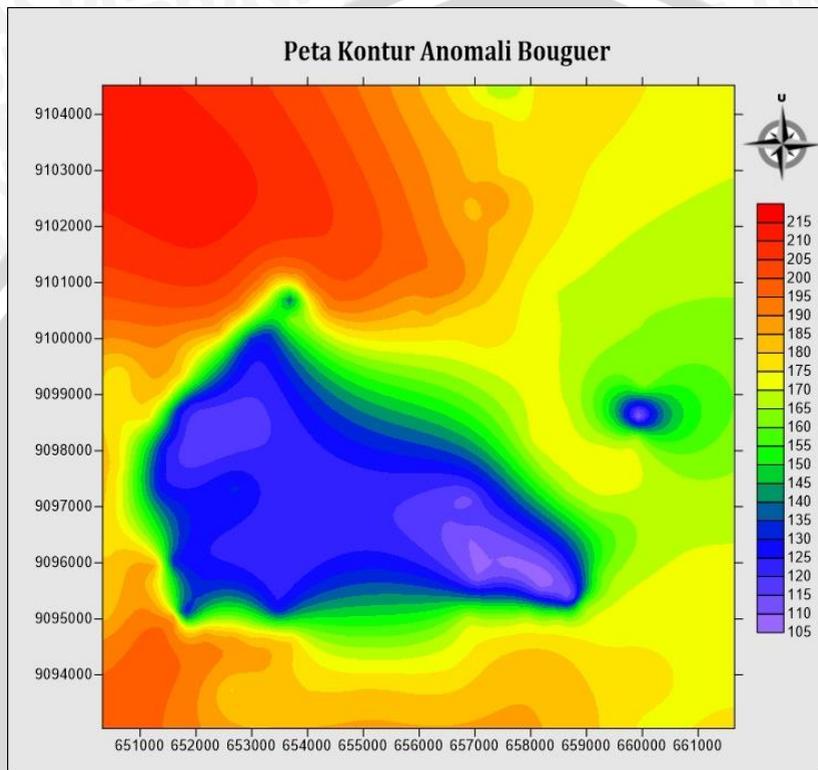
Type batuan	Rentang densitas (gr/cm ³)	Average (gr/cm ³)
Batuan Sedimen		
Overburden		1.92
Soil	1.20 – 2.40	1.92
Clay	1.63 – 2.60	2.21
Gravel	1.70 – 2.40	2.00
Sand	1.70 – 2.30	2.00
Sandstone	1.61 – 2.76	2.35
Shale	1.77 – 3.2	2.4
Limestone	1.93 – 2.90	2.55
Dolomite	2.28 – 2.90	2.7
Batuan Beku		
Rhyolite	2.35 – 2.70	2.52
Andesite	2.40 – 2.80	2.61
Granite	2.50 – 2.81	2.64
Granodiorite	2.67 – 2.79	2.73
Porphyry	2.60 – 2.89	2.74
Quartz diorite	2.62 – 2.96	2.79
Diorite	2.72 – 2.99	2.85
Lavas	2.80 – 3.00	2.90
Diabase	2.50 – 3.20	2.91
Basalt	2.70 – 3.30	2.99
Gabbro	2.70 – 3.50	3.03
Peridotite	2.78 – 3.37	3.15
Acid igneous	2.30 – 3.11	2.61
Basic igneous	2.09 – 3.17	2.79
Batuan Metamorf		
Quartzite	2.50 – 2.70	2.60
Schists	2.39 – 2.90	2.64
Graywacke	2.60 – 2.70	2.65
Marble	2.60 – 2.90	2.75
Serpentine	2.40 – 3.10	2.78

Slate	2.70 – 2.90	2.79
Gneiss	2.59 – 3.00	2.80
Amphibolite	2.90 – 3.04	2.96
Eclogite	3.20 – 3.54	3.37
Metamorphic	2.40 – 3.10	2.74

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 5 Peta anomali Bouguer daerah penelitian



Lampiran 6 Lokasi *slice line* A – A' dan line B – B'



Lampiran 7 Dokumentasi kegiatan penelitian

