



TUGAS AKHIR - RG141536

PEMODELAN GEOID KOTA SURABAYA MENGUNAKAN DATA PENGUKURAN GAYABERAT TERESTRIS

CHANDRA WIDIPERMANA
NRP 3513100011

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Muhammad Taufik
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - RG141536

**PEMODELAN GEOID KOTA SURABAYA
MENGUNAKAN DATA PENGUKURAN GAYABERAT
TERESTRIS**

**CHANDRA WIDIPERMANA
NRP 3513100011**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Muhammad Taufik
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL ASSIGNMENT - RG 141536

GEOID MODELLING OF SURABAYA USING TERRESTRIAL GRAVITY DATA MEASUREMENT

CHANDRA WIDIPERMANA
NRP 3513100011

Supervisor
Dr. Ir. Muhammad Taufik
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.

DEPARTEMENT OF GEOMATCS ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PEMODELAN GEOID KOTA SURABAYA
MENGUNAKAN DATA PENGUKURAN GAYA BERAT
TERESTRIS**

TUGAS AKHIR

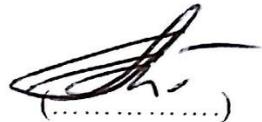
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Oleh:

CHANDRA WIDIPERMANA
NRP. 3513100011

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Dr. Ir. Muhammad Taufik
19550919 198603 1 001



2. Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.
19781231 200212 2 001



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PEMODELAN GEOID KOTA SURABAYA
MENGUNAKAN DATA PENGUKURAN GAYABERAT
TERESTRIS**

Nama : Chandra Widipermana
NRP : 3513100011
Departemen : Teknik Geomatika
Dosen Pembimbing: Dr. Ir. Muhammad Taufik
Ira M. Anjasmara,S.T.,M.Phil.,Ph.D.

ABSTRAK

Dengan berlakunya SRGI2013, maka model geoid harus tersedia di seluruh wilayah Indonesia. Data gayaberat terestris yang rapat di seluruh Indonesia diperlukan untuk memodelkan geoid Indonesia. Pemanfaatan EGM2008 bisa digunakan untuk pemodelan geoid Indonesia, namun ketelitiannya masih rendah.

Kota Surabaya yang merupakan salah satu kota besar di Indonesia dengan pembangunan yang pesat justru belum memiliki model geoid yang teliti karena kurangnya data gayaberat terestris. Oleh karena itu tujuan penelitian ini adalah memodelkan geoid Kota Surabaya dengan menyertakan data gayaberat terestris sehingga dapat meningkatkan ketelitian geoid. Pengukuran gayaberat di Kota Surabaya dilakukan dengan metode pengukuran gayaberat relatif menggunakan gravimeter LaCoste & Romberg G-1053.

Hasil dari model geoid Kota Surabaya dengan kontribusi 19 data pengukuran gayaberat mempunyai nilai undulasi maksimal 29,774 m dan minimal 28,461 meter dengan nilai rata-rata 29,017 dan standar deviasi sebesar 0,314 m.

Kata Kunci : EGM2008, gayaberat terestris, model geoid, Kota Surabaya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

GEOID MODELLING OF SURABAYA USING TERRESTRIAL GRAVITY DATA MEASUREMENT

Name : Chandra Widipermana
NRP : 3513100011
Departement : Teknik Geomatika
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Muhammad Taufik
Ira M. Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.

ABSTRACT

With the enactment of SRGI2013, the geoid model should be available throughout Indonesia. Condensed terrestrial gravity data across Indonesia are needed to make Indonesia's geoid model. Utilization of EGM2008 can be used for geoid modeling Indonesia, but its accuracy is still low.

Surabaya City which is one of the big cities in Indonesia with rapid development precisely does not have a thorough geoid model due to lack of data terrestrial gravity. Therefore, the purpose of this study is to model the geoid of Surabaya City with the data of gravity terrestrial so that can increase geoid accuracy. The measurement of gravity in Surabaya City was done by using relative gravity measurement method using LaCoste & Romberg G-1053 gravimeter.

The result of geoid model of Surabaya City with contribution of 19 measurement data of gravity has undulation maximum value 29,774 m and minimum 28,461 m with average value 29,017 m and standard deviation 0,314 m.

Keywords: *EGM2008, terrestrial gravity, geoid model, Surabaya City*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan Rahmat, Hidayah dan Karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul *“Pemodelan Geoid Kota Surabaya Menggunakan Data Pengukuran Gayaberat Terestris ”* ini dengan baik.

Selama pelaksanaan tugas akhir ini banyak pihak yang telah membantu penulis sehingga tugas akhir ini dapat berjalan dengan lancar. Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua dan seluruh keluarga atas doa dan restu serta semua dukungan yang diberikan selama kuliah
2. Mokhamad Nur Cahyadi,S.T.,M.Sc.,Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Geomatika FTSP ITS Surabaya.
3. Yanto Budisusanto,S.T.,M.T., selaku Kaprodi S-1 Teknik Geomatika FTSP ITS Surabaya.
4. Dr. Ir. Muhammad Taufik dan Ira Mutiara Anjasmara,S.T.,M.Phil.,Ph.D. selaku dosen pembimbing dalam penelitian tugas akhir ini.
5. Dr. Ing. Ir. Teguh Hariyanto, M.Sc. dan Akbar Kurniawan ST., MT., yang sudah membantu dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini
6. Staff Laboratorium Geofisika Jurusan Fisika Universitas Brawijaya yang telah memfasilitasi dalam pengukuran gayaberat pada penelitian tugas akhir ini.
7. Staff Laboratorium Geodesi dan Surveying yang telah memfasilitasi dalam pengukuran GPS pada penelitian tugas akhir ini.
8. Rega Yoze Oktavian dan Enira Suryaningsih selaku partner dalam pengerjaan tugas akhir ini.

9. Teman-teman angkatan 2013 serta adik tingkat angkatan 2014 Teknik Geomatika yang sudah membantu saat proses pengukuran di lapangan dan juga memberi semangat selama penelitian tugas akhir ini.
10. Semua pihak yang telah membantu dan mendukung hingga terselesaikannya tugas akhir ini yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih terdaat kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, kritik dan saran sangat penulis harapkan untuk perbaikan laporan ini kedepannya.

Akhir kata penulis menyampaikan terima kasih atas semua kesempatan yang telah diberikan kepada penulis, semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Prinsip Dasar Gayaberat Bumi.....	5
2.1.1 Gaya Gravitasi.....	5
2.1.2 Gayaberat Normal.....	6
2.2 Pengukuran Gayaberat.....	7
2.2.1 Pengukuran Gayaberat Absolut.....	7
2.2.2 Pengukuran Gayaberat Relatif.....	8
2.3 Gravimeter LaCoste & Romberg.....	10
2.3.1 Prinsip Kerja Gravimeter.....	10
2.3.2 Akuisisi Data Gayaberat.....	12
2.3.3 Konversi Nilai Bacaan Gravimeter.....	12
2.4 Koreksi Apungan (<i>Drift</i>) dan Gayaberat Observasi.....	13
2.4.1 Koreksi <i>Drift</i>	13
2.4.2 Perhitungan Gayaberat Observasi.....	14
2.5 Koreksi <i>Free-air</i> dan Anomali Gayaberat <i>Free-air</i>	14
2.5.1 Koreksi <i>Free-air</i>	14
2.5.2 Anomali Gayaberat <i>Free-air</i>	15
2.6 Model Geopotensial Global EGM2008.....	16
2.6.1 Deskripsi.....	16
2.6.2 Penerapan EGM 2008 di Indonesia.....	16

2.7 Metode <i>Gridding</i>	16
2.7.1 Metode <i>Natural Neighbor</i>	18
2.7.2 Metode <i>Krigging</i>	18
2.8 Penggunaan Fungsi <i>Stokes</i>	19
2.8.1 Direct Numerical Integration	21
2.8.2 <i>Fast Fourier Transform</i> (FFT)	21
2.8.3 <i>Least Square Collocation</i> (LSC)	24
2.9 Teknik <i>Remote Compute Restore</i> (RCR)	25
2.10 Standar Deviasi	25
2.11 Penelitian Sebelumnya	26
BAB III METODOLOGI	27
3.1 Lokasi Penelitian	27
3.2 Data dan Peralatan	27
3.2.1 Data	27
3.2.2 Peralatan	29
3.3 Metodologi Penelitian	31
3.3.1 Tahap Pelaksanaan Tugas Akhir	31
3.3.2 Tahap Pengolahan Data	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Hasil Pengolahan Data	37
4.1.1 Data GPS	37
4.1.2 Data Gayaberat	38
4.1.3 Data EGM 2008	45
4.1.4 Geoid Gravimetrik	48
4.1.5 Model Geoid Kota Surabaya	50
BAB V PENUTUP	51
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	51
DAFTAR PUSTAKA	53
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Metode Pendulum.....	7
Gambar 2.2 Ilustrasi Benda Jatuh Bebas	8
Gambar 2.3 Ilustrasi Gravimeter Sistem Pegas	9
Gambar 2.4 Gravimeter Lacoste&Romberg G-1053	10
Gambar 2.5 Skema Bagian Dalam Gravimeter LaCoste & Romberg	11
Gambar 2.6 Definisi Anomali Gayaberat	15
Gambar 2.7 Geoid EGM 2008 Pulau Jawa.....	17
Gambar 2.8 Diagram <i>Voronoi (Thiessen Polygon)</i>	18
Gambar 2.9 <i>Gridding</i> Data Metode <i>Krigging</i>	19
Gambar 3.1 Peta Sebaran Titik Pengukuran Gayaberat.....	28
Gambar 3.2 Diagram Alir Pelaksanaan Tugas Akhir.....	31
Gambar 3.3 Diagram Alir Pengolahan Data	34
Gambar 4.1 Grafik Nilai Standar Deviasi Pengukuran Gayaberat	39
Gambar 4.2 Grafik Nilai Koreksi <i>Drift</i>	41
Gambar 4.3 Peta Gayaberat Kota Surabaya.....	42
Gambar 4.4 Peta Anomali Gayaberat <i>Free-air</i> Kota Surabaya..	44
Gambar 4.5 Grid Kota Surabayaa 2×2'	45
Gambar 4.6 Geoid EGM 2008 Kota Surabaya	46
Gambar 4.7 Anomali Gayaberat EGM 2008 Kota Surabaya	47
Gambar 4.8 Geoid Gravimetrik Kota Surabaya.....	48
Gambar 4.9 Perbandingan Pola	49
Gambar 4.10 Geoid Kota Surabaya	50

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel Konversi Pembacaan Gravimeter LaCoste & Romberg G-1053	13
Tabel 3.1 Stasiun Referensi (<i>Base Station</i>)	29
Tabel 4.1 Koordinat Titik Pengukuran Dari GPS	37
Tabel 4.2 Konversi Nilai Bacaan Alat	38
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Koreksi <i>Drift</i> dan Gayabarat Observasi	40
Tabel 4.4 Perhitungan Anomali Gayabarat <i>Free-Air</i>	43
Tabel 4.5 Statistik Data EGM 2008	46
Tabel 4.6 Statistik Geoid Gravimetrik	48
Tabel 4.7 Statistik Model Geoid Kota Surabaya.....	50

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Di Indonesia sistem GPS (*Global Positioning System*) sudah banyak diaplikasikan, terutama yang terkait dengan aplikasi-aplikasi yang menuntut informasi tentang posisi. Dibandingkan dengan sistem dan metode penentuan posisi lainnya, GPS mempunyai banyak kelebihan dan menawarkan lebih banyak keuntungan, baik dalam segi operasionalnya maupun kualitas posisi yang diberikan. Meskipun keuntungan yang dapat diperoleh dari penggunaan GPS jauh lebih banyak, ada beberapa hal keterbatasan yang harus diperhatikan dalam pemakaian GPS, salah satunya komponen tinggi dari koordinat tiga dimensi yang diberikan oleh GPS adalah tinggi yang mengacu ke permukaan ellipsoid (tinggi ellipsoid). Jadi tinggi titik yang didapatkan dengan GPS bukanlah tinggi orthometris, yaitu tinggi yang mengacu pada permukaan geoid (Abidin, 2000). Geoid merupakan bidang ekuipotensial yang diasumsikan berimpit dengan muka laut rata yang tidak terganggu dan merepresentasikan bentuk bumi yang sesungguhnya (Heiskanen dan Moritz, 1967). Untuk mentransformasikan tinggi ellipsoid ke tinggi orthometris, diperlukan data undulasi yang dihasilkan dari model geoid di suatu wilayah (Fortopoulos dkk., 2003).

Dengan berlakunya SRGI2013, maka model geoid harus tersedia di seluruh wilayah Indonesia. Data gayaberat yang rapat di seluruh Indonesia diperlukan untuk memodelkan geoid Indonesia (Pangastuti, 2015). Pemanfaatan EGM2008 bisa digunakan untuk pemodelan geoid Indonesia, namun ketelitiannya masih rendah. Penelitian yang dilakukan oleh Ramdani (2013) menghitung ketelitian geoid EGM2008 di pulau Jawa dan Sumatra adalah 89,8 cm dan 33,4 cm. Ketelitian geoid ini tidak cukup untuk

mendukung pemetaan Rupabumi skala 1:1000 dan untuk pembangunan infrastruktur yang membutuhkan datum vertikal berketelitian tinggi. Rendahnya ketelitian model geoid dapat disebabkan karena berbagai faktor, misalnya ketersediaan data gayaberat teristris yang kurang (Triarahmadhana, 2014).

Kota Surabaya yang merupakan salahsatu kota besar di Indonesia yang sangat pesat pembangunannya justru belum memiliki model geoid yang teliti karena kurangnya data gayaberat teristris, sehingga perlu dilakukan pengukuran gayaberat teristris supaya ketelitian model geoidnya dapat meningkat.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini yaitu.

- a. Bagaimana mengetahui nilai anomali gayaberat *free-air* dari data EGM 2008 hasil pengukuran gayaberat teristris di Kota Surabaya?
- b. Bagaimana mengaplikasikan formula *Stokes* dalam hitungan geoid gravimetrik?
- c. Bagaimana menghasilkan model geoid Kota Surabaya?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini yaitu.

- a. Studi kasus yang digunakan dalam tugas akhir adalah di Kota Surabaya.
- b. Metode pengukuran gayaberat yang digunakan adalah metode pengukuran gayaberat relatif menggunakan gravimeter LaCoste Romberg tipe G-1053.
- c. Data yang digunakan untuk pemodelan geoid Kota Surabaya adalah data EGM 2008 dan data gayaberat teristris.
- d. Pemodelan geoid Kota Surabaya menggunakan teknik *Remote Computate Restore* (RCR).

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dalam tugas akhir ini yaitu.

- a. Mengetahui nilai gayaberat yang ada di Kota Surabaya
- b. Mengetahui nilai anomali gayaberat *free-air* dari data EGM 2008 dan hasil pengukuran gayaberat teristris di Kota Surabaya.
- c. Mengaplikasikan formula *Stokes* dalam hitungan geoid gravimetrik.
- d. Menghasilkan model geoid Kota Surabaya dengan kontribusi data gayaberat teristris.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari pelaksanaan tugas ini yaitu.

- a. Terdapat model geoid Kota Surabaya yang sudah mendapatkan kontribusi data gayaberat teristris.
- b. Model geoid Kota Surabaya bisa digunakan untuk mentransformasikan nilai tinggi ellipsoid yang didapat dari pengukuran GPS ke tinggi orthometris.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Prinsip Dasar Gayaberat Bumi

2.1.1 Gaya Gravitasi

Hukum dasar pada metode gayaberat ialah hukum gravitasi Newton, yang menyatakan bahwa gaya tarik antara dua benda bermasa m_1 dan m_2 yang berjarak r ditunjukkan pada persamaan (2.1)

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

Keterangan :

F : gaya tarik-menarik antara kedua benda (N)

m_1 : massa benda 1 (kg)

m_2 : massa benda 2 (kg)

R : jarak antara m_1 dan m_2

G : konstanta gravitasi umum
($6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

Jika m_2 adalah massa suatu objek di permukaan bumi, m_1 adalah massa bumi (m_e) dan r adalah radius bumi (R_e), maka dengan menggunakan Hukum II Newton dapat ditentukan percepatan yang dialami benda m_2 . Dalam hal ini percepatan yang dialami benda m_2 ialah percepatan gravitasi.

$$F = m \cdot g \quad (2.2)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.1) ke persamaan (2.2) akan didapatkan persamaan (2.3)

$$g = G \left(\frac{m_e}{R_e^2} \right) \quad (2.3)$$

Keterangan

g : percepatan gravitasi bumi (ms^{-2})

m_e : massa bumi (kg)

R_e : radius bumi (m)

2.1.2 Gayaberat Normal

Medan gayaberat yang bereferensi pada ellipsoid disebut dengan gayaberat normal. Sebagai basis model teoritis dari gayaberat dan potensial bumi, digunakan sebuah referensi ellipsoid global. Untuk menghitung nilai gayaberat normal diatas permukaan ellipsoid (γ), digunakan persamaan Somigliana (Anjasmara, 2013).

$$\gamma = \frac{a\gamma_a \cos^2 \varphi + b\gamma_b \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad (2.4)$$

Keterangan

γ : gayaberat normal di permukaan ellipsoid (mGal)

a : setengah sumbu panjang ellipsoid (m)

b : setengah sumbu pendek ellipsoid (m)

γ_a : medan gayaberat normal pada ekuator (mGal)

γ_b : medan gayaberat normal pada kutub (mGal)

φ : lintang geodetik (derajat)

Untuk mengetahui hubungannya dengan tinggi ellipsoid (h) digunakanlah *Taylor's series expansion*. (Anjasmara, 2013).

$$\gamma(h) = \gamma \left[1 - 2(1 + f + m - 2f \sin^2 \phi) \frac{h}{a} + 3 \frac{h^2}{a^2} \right] \quad (2.5)$$

Keterangan

$\gamma(h)$: gayaberat normal pada tinggi ellipsoid (mGal)

f : pengepengan ellipsoid

h : tinggi ellipsoid (m)

m : perbandingan sentrifugal gravitasi di ekuator nilai m dihitung menggunakan persamaan (2.6),

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} \quad (2.6)$$

Keterangan

ω : percepatan sudut rotasi bumi (rad s⁻¹)

GM : konstanta gravitasi geosentrik bumi

2.2 Pengukuran Gayaberat

Terdapat dua jenis pengukuran gayaberat antara lain gayaberat absolut dan gayaberat relatif.

2.2.1 Pengukuran Gayaberat Absolut

Gayaberat absolut mengacu pada satu titik dimana ketelitian pengukuran jarak dan waktu digunakan untuk menentukan nilai g . Terdapat dua metode pengukuran gayaberat absolut (Anjasmara, 2013), antara lain :

a. Metode pendulum

Menurut sejarah, pengukuran gayaberat absolut telah dilakukan menggunakan pengamatan pendulum, tetapi masalah yang dihadapi yaitu adanya tarikan atmosfer dan akurasi penentuan panjang dari pendulum. Metode pendulum sudah jarang digunakan saat ini. Ayunan pendulum secara bebas dengan panjang l dan massa M akan memenuhi persamaan berikut

$$Ml \frac{d^2\varphi}{dt^2} + M g \sin\varphi = 0 \quad (2.7)$$

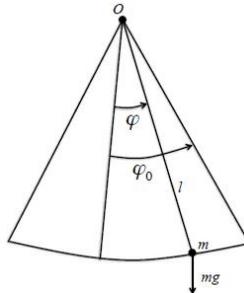
Keterangan :

M : massa pendulum (kg)

l : panjang tali (m)

g : percepatan gravitasi (ms^{-2})

φ : sudut fase



Gambar 2.1 Metode Pendulum
(Sumber : Torge, 2001)

b. Metode jatuh bebas

Prinsip benda jatuh bebas ini adalah dengan mengukur jarak yang dilalui sebuah benda jatuh dalam selang tertentu, dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut,

$$s = \frac{1}{2}gt^2 \quad (2.8)$$

Atau,

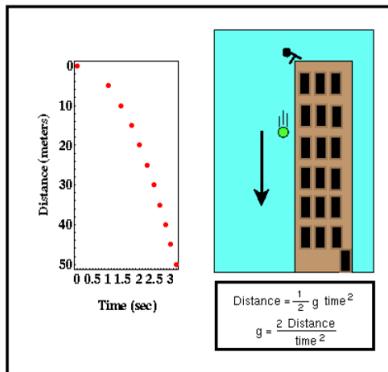
$$g = \frac{2s}{t^2} \quad (2.9)$$

Keterangan :

g : gayaberat (mGal)

s : jarak (m)

t : waktu (s)



Gambar 2.2 Ilustrasi Benda jatuh Bebas

(Sumber : Yusuf, 2015)

2.2.2 Pengukuran Gayaberat Relatif

Pengukuran gayaberat relatif merupakan suatu cara mendapatkan nilai g secara tidak langsung dengan mengukur perbedaan nilai gayaberat di suatu tempat relatif terhadap titik acuan yang nilai gayaberatnya sudah diketahui. Pengukuran gayaberat relatif biasanya menggunakan alat dengan sistem pegas. Perubahan gayaberat dapat dibaca dari perubahan simpangan pegas

(Yusuf, 2015). Berdasarkan hukum Hooke dinyatakan bahwa perubahan panjang pegas sebanding dengan gayaberat maka :

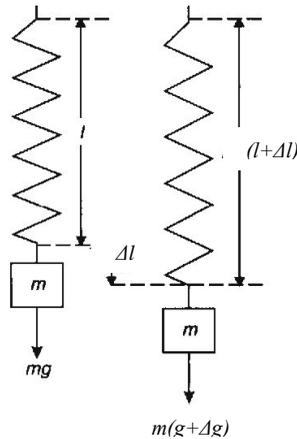
$$F = m \cdot g = k \cdot l \quad (2.10)$$

$$\Delta l = \left(\frac{m}{k}\right) \times \Delta g \quad (2.11)$$

Keterangan :

- m = massa
- k = konstanta elastis pegas
- g = gayaberat
- Δg = perubahan gayaberat
- l = panjang pegas
- Δl = perubahan panjang pegas

Perubahan panjang pegas akibat gayaberat digambarkan pada Gambar 2.3,



Gambar 2.3 Ilustrasi Gravimeter Sistem Pegas
(Sumber : Yusuf, 2015)

Alur pengukuran gayaberat relatif harus membentuk sebuah *loop* yaitu dimulai di titik yang sudah diketahui nilai gayaberatnya dan diakhiri di titik yang sama.

2.3 Gravimeter LaCoste & Romberg

Alat yang digunakan dalam pengukuran gayaberat adalah gravimeter. Metode yang biasa digunakan adalah gravimeter relatif karena proses mobilisasi dan pengaturan gravimeter yang absolut lebih rumit dibandingkan gravimeter relatif mengakibatkan rendahnya produktifitas pengukuran. Kondisi tersebut mengakibatkan pengukuran gayaberat relatif lebih efektif untuk pengukuran titik yang banyak pada kondisi lingkungan yang sulit dikontrol (Sabri dkk., 2015). Salah satu contoh gravimeter relatif adalah gravimeter LaCoste & Romberg.

Gravimeter LaCoste & Romberg terdiri dari dua model yaitu model G dan model D. Model G mempunyai jangkauan skala yang lebih besar, sekitar 7000 skala setara dengan 7000 mGal, sehingga pengoperasiannya tidak perlu diset ulang. Model D mempunyai ketelitian satu orde lebih tinggi dari model G, tetapi jangkauan skala hanya sekitar 2000 mGal, sehingga bila digunakan pada pengukuran yang mempunyai variasi medan gravitasi lebih dari 2000 mGal, gravimeter perlu diset ulang pada salah satu titik pengamatan lapangan.



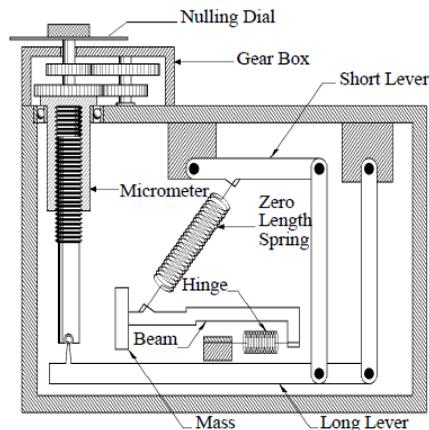
Gambar 2.4 Gravimeter Lacoste Romberg G-1053
(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

2.3.1 Prinsip Kerja Gravimeter

Secara Sederhana, mekanisme gravimeter LaCoste & Romberg terdiri dari suatu beban pada ujung batang yang ditahan oleh *zero length spring* yang

berfungsi sebagai *spring* (pegas) utama. Perubahan besarnya gayaberat bumi akan menyebabkan perubahan kedudukan benda, dan pengamatan dilakukan dengan pengaturan kembali kedudukan beban pada posisi semula (*null adjustment*). Pengaturan kembali ini dilakukan dengan memutar *measuring screw*. Banyaknya pemutaran *measuring screw* terlihat pada dial counter, yang berarti besarnya variasi gayaberat dari suatu tempat ke tempat lain.

Perubahan kedudukan pada ujung batang, disamping adanya gayaberat bumi, juga disebabkan oleh adanya guncangan-guncangan. Untuk menghilangkan guncangan maka pada ujung batang yang lain dipasang *Shock Eliminating Spring*. *Zero length spring* sering dipakai pada keadaan di mana gaya pegas berbanding lurus dengan jarak antara titik pegas dan titik dimana gaya bekerja.



Gambar 2.5 Skema Bagian Dalam Gravimeter
LaCoste & Romberg
(Sumber: Jaenudin, 2012)

2.3.2 Akuisisi Data Gayaberat

Akuisisi data gayaberat, secara umum terdapat dua konfigurasi yaitu konfigurasi random dan grid. Konfigurasi akuisisi random yaitu dengan datum point diposisikan secara acak dengan spasi variatif, biasanya digunakan untuk area topografi yang bervariasi. Konfigurasi grid adalah konfigurasi titik datum pengukuran yang dibentuk dari perpotongan garis lintasan dengan spasi yang teratur (Maryanto, 2016).

2.3.3 Konversi Bacaan Gravimeter

Nilai pembacaan gravimeter pada saat pengambilan data lapangan perlu dikonversi terlebih dahulu kedalam satuan miligal sebelum diolah. Proses konversi nilai menggunakan table konversi yang telah tersedia di *manual book* gravimeter (Maryanto, 2016). Persamaan yang digunakan dalam melakukan konversi adalah,

$$mGal = \{(bacaan - counter) \times faktor interval\} + nilai mGal \quad (2.12)$$

Keterangan :

mGal : hasil konversi bacaan alat (mGal)

bacaan : hasil bacaan alat saat pengukuran

counter : nilai dari tabel konversi

faktor interval : factor pengaki dari tabel konversi

nilai mGal : nilai bacaan yang didapat dari tabel konversi (mGal)

Misalnya, pada gravimeter LaCoste Romberg tipe G-1053 didapat bacaan 1434,2. Diambil nilai bulat sampai ratusan yaitu 1400. Dalam tabel konversi (Tabel 2.1), nilai 1400 = 1419,70 mGal. Sisa pembacaan yang belum dihitung adalah 34,2 dikalikan dengan faktor interval $34,2 \times 101401 = 34,679142$. Selanjutnya kedua

hasil tersebut dijumlahkan untuk mendapatkan nilai dalam satuan mGal. $1419,70 + 34,679142 = 1454,379142$ mGal (Maryanto, 2016). Contoh tabel konversi dapat dilihat pada tabel (2.1).

Tabel 2.1 Tabel konversi pembacaan gravimeter
La Coste Romberg G-1053

Counter Reading	Value in Miligals	Factor for Interval
1400	1419,70	101,401
1500	1521,10	101,404
1600	1622,50	101,409

2.4 Koreksi Apungan (*Drift*) dan Gayaberat Observasi

Setelah melalui tahap konversi bacaan alat ke satuan mGal, data gayaberat masih berupa gayaberat relatif. Selanjutnya harus dilakukan dikoreksi apungan (*drift*) dan di ikatkan ke titik acuan gayaberat supaya menjadi gayaberat observasi.

2.4.1 Koreksi *Drift*

Pada gravimeter relatif dengan system pegas dilengkapi dengan massa yang tergantung bebas pada ujungnya. Karena sifat elastis pegas, maka sistem pegas tidak kembali ke kedudukan semula. Koreksi karena sifat pegas ini dinamakan koreksi apungan (*drift*), dan selalu menunjukkan perubahan setiap waktu dari nilai pembacaan pada titik ukur yang sama (Yusuf, 2015). Persamaan dari koreksi *drift* ditunjukkan pada persamaan dibawah,

$$D_n = \frac{t_n - t_b}{t_{b'} - t_b} \times (gb' - gb) \quad (2.13)$$

Keterangan :

D_n : kesalahan *drift*

- D_n : koreksi *drift*
- g_b : nilai gayaberat di awal looping (mGal)
- g_b' : nilai gayaberat di akhir looping (mGal)
- t_n : waktu pengambilan data ke- n (jam)
- t_b : waktu pengambilan data di awal looping (jam)
- t_b' : waktu pengambilan data di akhir looping (jam)

Setelah didapat nilai koreksi drift, maka dijumlahkan dengan nilai gayaberat relatif hasil konversi seperti persamaan berikut,

$$g_{rel}k = g_{rel} - D_n \quad (2.14)$$

Keterangan :

- $g_{rel}k$: gayaberat relatif terkoreksi *drift* (mGal)
- g_{rel} : gayaberat relatif hasil konversi (mGal)
- D_n : koreksi *drift*

2.4.2 Perhitungan Gayaberat Observasi

Data gayaberat yang didapat dari pengukuran gayaberat relatif harus diikatkan ke suatu titik yang sudah memiliki nilai gaya berat absolut supaya dihasilkan nilai gayaberat observasi. Persamaannya ditunjukkan sebagai berikut,

$$g_{obs} = g_{base} + (g_{rel}kn - g_{rel}base) \quad (2.15)$$

Keterangan:

- g_{obs} : gayaberat observasi di titik pengamatan (mGal)
- g_{base} : gayaberat absolut di titik acuan (mGal)
- $g_{rel}kn$: gayaberat terkoreksi *drift* di titik n (mGal)
- $g_{rel}base$: gayaberat relatif titik acuan awal loop (mGal)

2.5 Koreksi Free-Air dan Anomali Gayaberat Free-Air

2.5.1 Koreksi *Free-Air*

Koreksi *Free-air* merupakan koreksi akibat perbedaan ketinggian pada titik pengukuran dengan mengabaikan adanya massa yang terletak diantara titik ukur dengan bidang referensi ukuran. Sebagai bidang referensi ukuran digunakan bidang geoid, yaitu bidang ekuipotensial

gayaberat, artinya bidang yang mempunyai potensial sama di setiap titiknya. Untuk keperluan praktis, geoid dapat didekati oleh permukaan laut rata-rata (Maryanto, 2016). Persamaan untuk koreksi *free-air* ditulis pada persamaan (2.9)

$$\delta g_f = 2\gamma(1 + f + m - 2f \sin^2 \phi) \frac{H}{a} + 3\gamma \frac{H^2}{a^2} \quad (2.16)$$

Atau pendekatan praktisnya dapat ditulis,

$$\delta g_f = 0.3086 H \quad (2.17)$$

Keterangan :

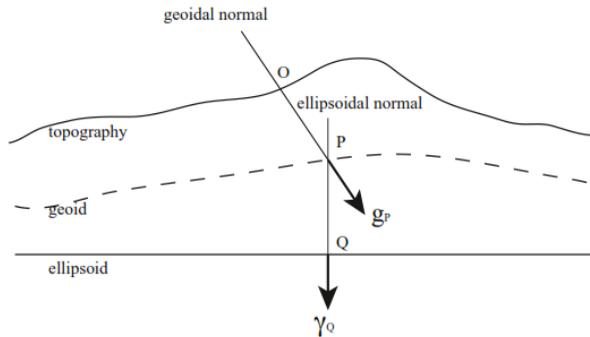
δg_f : koreksi *free-air* (mGal)

H : tinggi ortometrik (m)

2.5.2 Anomali Gayaberat Free-Air

Anomali gayaberat (Δg) merupakan perbedaan skalar antara gayaberat bumi pada geoid (g) dan gayaberat normal diatas ellipsoid (γ) yang dijelaskan pada persamaan (2.11) dan gambar 2.4

$$\Delta g = g_P - \gamma_Q \quad (2.18)$$



Gambar 2.6 Definisi Anomali Gayaberat

(Sumber : Anjasmara, 2013)

Anomali *free-air* dihitung dengan menjumlahkan nilai koreksi *free-air* (untuk elevasi positif) yang dijelaskan pada persamaan berikut,

$$\Delta g_F = g_{obs} - \gamma - \delta g_F \quad (2.19)$$

Keterangan :

Δg_F : anomali gayaberat *free-air* (mGal)

g_{obs} : gayaberat observasi (mGal)

γ : gayaberat normal (mGal)

2.6 Model Geopotensial Global EGM 2008

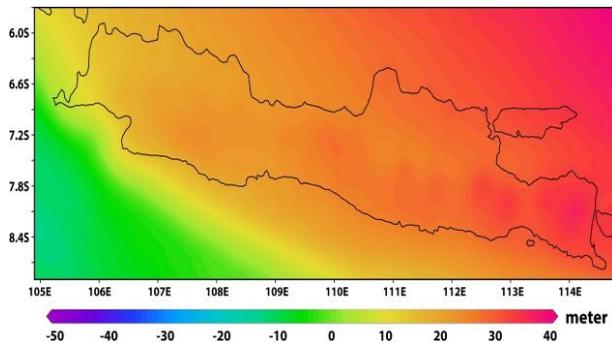
2.6.1 Deskripsi

EGM (*Earth Gravitational Model*) 2008 merupakan model *spherical harmonic* dari potensial gayaberat bumi yang dikembangkan dengan kombinasi kuadrat terkecil dari model gayaberat ITG-GRACE03S dan diasosiasikan dengan matriks kesalahan kovarian. Informasi gayaberat didapatkan dari pengukuran anomali gayaberat *free-air* dengan grid 5 menit. Grid tersebut dibentuk dari kombinasi data terestrial, turunan altimetri dan data gayaberat dari *airborne*. EGM 2008 dilengkapi dengan derajat hingga 2159 dan terdiri dari koefisien tambahan hingga 2190. Semua area merupakan data gayaberat yang berkualitas yang didapatkan dari undulasi geoid EGM2008 dan pengukuran GPS/Levelling secara independen dibawah orde 5-10 cm (Pavlis, dkk, 2012).

2.6.2 Penerapan EGM2008 di Indonesia

Dengan diberlakukannya SRGI2013, maka model geoid harus tersedia diseluruh wilayah Indonesia. Pemanfaatan data EGM2008 untuk pemodelan geoid di Indonesia hanya mampu menghasilkan geoid dengan ketelitian 0,441m (Ramdani, 2008 dalam Triarahmadhana, 2014). Data gayaberat yang rapat diperlukan untuk memodelkan geoid Indonesia. Data

gayabert yang cukup rapat hanya tersedia di pulau Kalimantan, Sulawesi dan Papua. Sedangkan untuk Pulau Jawa dan Sumatra geoid yang tersedia hanya EGM2008 (Pangastuti, 2015). Ramdani (2013) dalam penelitiannya menghitung ketelitian geoid untuk Pulau Jawa dan Sumatra adalah 89,8 cm dan 33,4 cm. ketelitian geoid ini tidak cukup untuk mendukung pemetaan Rupabumi sjala 1:1000 dan pembangunan infrastruktur yang membutuhkan datum vertikal berketelitian tinggi.



Gambar 2.7 Geoid EGM2008 Pulau Jawa

(Sumber : Pangastuti, 2015)

2.7 Metode Gridding

Grid adalah wilayah persegi empat yang terdiri dari baris dan kolom yang merata. perpotongan sebuah baris dan kolom disebut node grid. Baris berisi node grid dengan koordinat Y yang sama, dan kolom berisi node grid dengan koordinat X yang sama. Gridding menghasilkan nilai Z pada setiap node grid dengan menginterpolasi atau mengekstrapolasi nilai data.

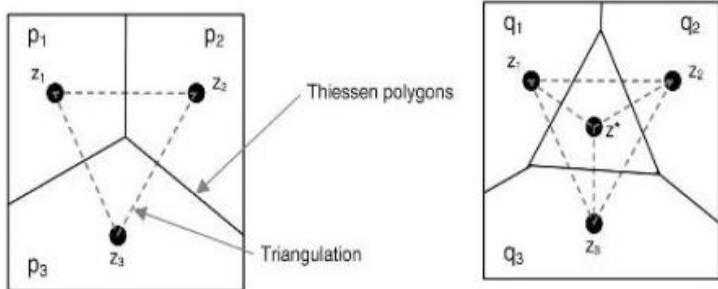
Parameter metode grid mengontrol prosedur interpolasi. Perbedaan antara metode gridding terdapat pada algoritma matematis yang digunakan untuk menghitung bobot selama interpolasi grid node. Setiap metode menghasilkan

representasi data yang berbeda. Terdapat beberapa metode gridding diantaranya metode *Natural Neighbor* dan metode *Krigging*.

2.7.1 Metode *Natural Neighbor*

Metode gridding *Natural Neighbor* cukup populer di beberapa bidang. Algoritma yang digunakan pada interpolasi natural neighbor ini bekerja dengan mencari titik-titik yang berdekatan dengan titik sampel dan mengaplikasikan bobot pada titik tersebut (Sibson, 1981 dalam Pasaribu, 2012).

Setiap titik dalam metode *Natural Neighbor* adalah titik-titik yang dihubungkan dengan diagram *Voronoi (Thiessen Polygon)*. Proses pertama yang terjadi adalah membangun polygon untuk semua titik-titik masukan yang digunakan dalam interpolasi. Berikutnya *Thiessen Polygon* yang baru akan dibuat dari sekitar titik-titik interpolasi. Metode *Natural Neighbor* tidak mengekstrapolasi data di luar dari lokasi data (yaitu garis besar *Polygon Thiessen*).



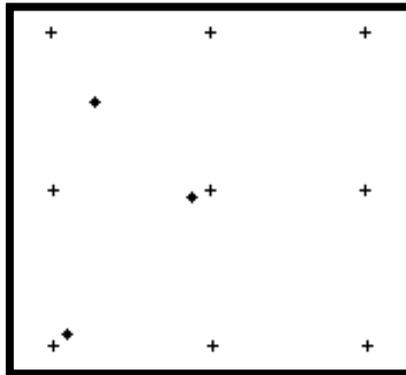
Gambar 2.8 Diagram *Voronoi (Thiessen Polygon)*
(Sumber : Marwade, dkk., 2006 dalam Pasaribu, 2012)

2.7.2 Metode *Krigging*

Kriging adalah metode gridding *geostatistical* yang telah terbukti bermanfaat dan populer di berbagai

bidang. Metode ini menghasilkan peta yang menarik secara visual dari data yang tidak teratur.

Kriging adalah metode gridding yang sangat fleksibel dan dapat disesuaikan dengan data dengan menentukan model variogram yang sesuai. Variogram adalah fungsi tiga dimensi. Ada dua variabel independen (arah θ , jarak pemisahan h) dan satu variabel dependen (nilai variogram $\gamma(\theta, h)$).



Gambar2.9 *Gridding* Data dengan Metode *Kriging*
(Sumber : Surfer 10)

2.8 Penggunaan Fungsi Stokes

Dalam pemodelan geoid, terdapat tahap hitungan geoid lokal yang disebut sebagai model geoid gravimetrik. Hitungan geoid gravimetrik menggunakan dua formula dasar, yaitu formula *Burns* dan fungsi *Stokes*. Formula *Burns* menunjukkan hubungan antara anomali potensial dan undulasi (Vanicek dan Krakiwsky, 1982). Nilai anomali potensial selanjutnya didefinisikan oleh *Stokes* sebagai fungsi yang dihasilkan dari nilai anomali gayaberat dan jarak spherical antara suatu luasan terhadap titik yang diketahui nilai anomali potensialnya (Heiskanen dan Moritz, 1967).

Formula *Burns* ditunjukkan melalui persamaan berikut (Vanicek dan Krakiwsky, 1982).

$$N = \frac{T}{\gamma'} \quad (2.20)$$

$$T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma \quad (2.21)$$

Dalam persamaan diatas terdapat elemen-elemen yang perlu dihitung terlebih dahulu, antara lain :

$$S(\psi) = \frac{1}{s} - 4 - 6s + 10s^2 - 3(1 - s^2)\ln(s + s^2) \quad (2.22)$$

dimana,

$$\psi = \text{Cos}^{-1} [\sin\varphi \sin\varphi' + \cos\varphi \cos\varphi' \cos(\lambda - \lambda')] \quad (2.23)$$

$$s = \sin\frac{\psi}{2} \quad (2.24)$$

dan,

$$d\sigma = \cos\varphi d\varphi d\lambda \quad (2.25)$$

Keterangan:

N : undulasi geoid (m)

T : anomali potensial

γ' : gayaberat normal rata-rata di ellipsoid WGS1984
(979764.4656 mGal)

R : Diameter bumi (6371008.7714 m)

ψ : jarak lengkung antara suatu luasan dengan titik anomali potensial.

$S(\psi)$: *Stoke's Kernel*

Δg : anomali gayaberat di titik grid

$d\sigma$: spherical surface element

φ : lintang titik acuan (derajat)

φ' : lintang di titik grid (derajat)

$d\varphi$: interval grid lintang (derajat)

λ : bujur titik acuan (derajat)

λ' : bujur di titik grid (derajat)

$d\lambda$: interval grid bujur (derajat)

Persamaan (2.20) dan (2.21) menghasilkan persamaan (2.26) yang disebut fungsi *Stokes* (Heiskanen dan Moritz, 1967).

$$N_{\Delta g} = \frac{R}{4\pi\gamma'} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma \quad (2.26)$$

Terdapat banyak metode dalam evaluasi praktis integral *Stokes*. Beberapa diantaranya membutuhkan nilai anomali gayaberas yang diketahui dalam bentuk grid yang tetap untuk mendapatkan tinggi geoid pada suatu titik. Berikut beberapa metode dalam penentuan geoid (Anjasmara, 2013),

2.8.1 *Direct Numerical Integration*

Metode ini merupakan metode yang paling sederhana yaitu dengan mengubah integral *Stokes* menjadi penjumlahan ganda dan dihitung secara paksa. Hasil yang didapatkan menjadi akurat karena tidak ada modifikasi pada integral *Stokes*. Fungsi penjumlahan tersebut merupakan fungsi terhadap lintang dan bujur yang menunjukkan sistem koordinat. Untuk mengetahui tinggi geoid suatu titik maka integral *Stokes*-nya menjadi

$$N_{\phi,\lambda} = \frac{R}{4\pi\gamma} \Delta\phi\Delta\lambda \sum_{\phi'} \sum_{\lambda'} \Delta g(\phi', \lambda') S(\psi) \cos\phi' \quad (2.27)$$

Untuk mendapatkan tinggi geoid diseluruh titik grid maka digunakan formula

$$N(\phi, \lambda) = \sum_{\phi} \sum_{\lambda} \{N_{\phi,\lambda}\} \quad (2.28)$$

Prosedur ini akan sangat memakan banyak waktu ketika jumlah perhitungan titik meningkat. Jika ukuran grid $N \times M$, maka jumlah perhitungan yang harus dilakukan sebanyak $(NM)^2$.

2.8.2 *Fast Fourier Transform (FFT)*

Ada kemungkinan untuk menulis integral *Stokes* dalam bentuk yang dikenal sebagai "konvolusi Integral".

Kadang-kadang pendekatan dan cara pintas ini perlu dilakukan. Metode yang memungkinkan adalah penggunaan metode Fast Fourier Transform (FFT).

Pada dasarnya, keuntungan dari FFT adalah kecepatan komputasinya. Untuk ukuran sebuah grid $N \times M$, FFT hanya membutuhkan operasi perhitungan sebanyak $NM \log(NM)$. Namun metode ini mensyaratkan data anomali gayaberat harus tersedia dalam bentuk grid tanpa ada celah grid yang kosong supaya perhitungan integral *Stokes* metode FFT dapat dilakukan.

Saat ini terdapat beberapa jenis FFT yang digunakan, antara lain :

1. 1D-FFT diatas bidang lengkung

Versi diskrit dari integral *Stokes* pada bola dapat dinyatakan persis dengan cara konvolusi satu dimensi dalam arah bujur:

$$N_{\varphi}(\lambda) = \frac{R}{4\pi\gamma} \Delta\varphi \Delta\lambda F_1^{-1} \{ \sum_{\varphi'} F_1 [S_{\varphi}(\Delta\lambda)] F_1 [\Delta g_{\varphi'}(\lambda') \cos\varphi'] \} \quad (2.29)$$

Dimana F_1 merupakan 1D-FFT dan F_1^{-1} adalah *inverse*-nya. Persamaan (2.21) hanya menghasilkan undulasi geoid sepanjang satu garis lintang, namun prosedurnya bisa diulangi untuk setiap garis lintang yang diinginkan.

1D-FFT lebih cepat daripada metode *Direct Numerical Integration* tetapi 1D-FFT tidak secepat metode 2D-FFT, namun lebih akurat.

2. 2D-FFT diatas bidang lengkung

Evaluasi integral *Stokes* pada bola menggunakan 2D-FFT tidak mungkin dilakukan. Namun, versi diskrit

integral Stokes pada bola dapat diubah menjadi konvolusi dua dimensi dengan memodifikasi *Kernel Stokes* :

$$N(\varphi, \lambda) = \frac{R}{4\pi\gamma} \Delta\varphi \Delta\lambda F_2^{-1} \{F_2[S'(\Delta\varphi, \Delta\lambda)] F_2[\Delta g(\varphi', \lambda') \cos\varphi']\} \quad (2.30)$$

Dimana S' adalah pendekatan *Kernel Stokes*, F_2 merupakan 2D-FFT dan F_2^{-1} adalah *inverse*-nya.

Kesalahan bisa mencapai nilai lebih dari 10cm, yang semata-mata disebabkan oleh pendekatan rumus dan dapat dihindari dengan menggunakan metode yang melibatkan 1D-FFT.

3. 2D-FFT diatas bidang datar

Jika daerah penelitian berukuran kecil (kurang dari beberapa ratus kilometer setiap sisi), kelengkungan bumi dapat diabaikan, dan koordinat geografis dianggap sebagai koordinat kartesian segiempat (x,y). Sebagai alternatif, dan untuk area yang lebih luas (seribu kilometer masing-masing sisi), grid topografi dapat diproyeksikan peta dengan menggunakan transformasi *conform*. Dalam kedua kasus, area integrasi merupakan bidang datar.

Pada pendekatan bidang datar, integral *Stokes*-nya dijelaskan sebagai berikut,

$$N_{x,y} = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{y'} \int_{x'} \frac{1}{l} \Delta g(x', y') dx' dy' \quad (2.31)$$

Dimana

$$l = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (2.32)$$

Dari ketiga jenis metode FFT, metode pertama yang menghasilkan hasil yang tepat dari integral *Stokes*. Dua metode lainnya hanya menghasilkan pendekatan

hasil karena modifikasi *Stokes kernel* dalam metode kedua, dan pendekatan bidang datar dalam metode ketiga.

2.8.3 *Least Square Collocation* (LSC)

Prinsip *collocation* sangat sederhana. Anomali potensial T di luar bumi merupakan fungsi harmonik yang dinyatakan dalam persamaan diferensial Laplace

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (2.33)$$

Representasi pendekatan secara analitik dari potensial eksternal T dihasilkan dari

$$T(P) = f(P) = \sum_{k=1}^q b_k \varphi_k(P) \quad (2.34)$$

kombinasi linear f dari fungsi basis yang tepat $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_q$ dengan koefisien yang sesuai b_k . Semua itu merupakan fungsi dari titik di luar P . Dimana T merupakan harmonik di luar permukaan bumi, dan fungsi φ_k juga merupakan fungsi harmonik sehingga,

$$\Delta \varphi_k = 0 \quad (2.35)$$

Pada pendekatan (2.18), nilai q terukur diasumsikan tidak memiliki kesalahan. Nilai tersebut diasumsikan menjadi fungsi linear $L_1 T, L_2 T, \dots, L_q T$ dengan anomali potensial T . Fungsi linear tidak ada yang lain LT yang berpengaruh secara linear terhadap T tapi tidak membutuhkan fungsi biasa termasuk diferensial dan integral (Hofmann, 2005). Sehingga nilai defleksi vertikalnya,

$$\xi = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \eta = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.36)$$

Nilai anomali gayaberat,

$$\Delta g = -\frac{\partial T}{\partial z} - \frac{2}{R} T \quad (2.37)$$

Gangguan gayaberat,

$$\delta g = -\frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.38)$$

2.9 Teknik Remote Compute Restore (RCR)

Pemodelan geoid dapat menggunakan teknik RCR (Serpas dan Jakeli, 2005). Prinsip teknik ini adalah membagi dua tahap hitungan geoid, yaitu tahap *remove* dan tahap *restore* (Ågren dan Sjöberg, 2004). Tahap *remove* yaitu menghilangkan pengaruh anomali EGM2008 pada hitungan residual anomali gayaberat, sedangkan tahap *restore* yaitu penggunaan undulasi model geoid global (MGG) untuk hitungan geoid lokal. Teknik RCR dijelaskan pada persamaan (2.38) (Anjasmara, 2015).

$$N = N_{MGG} + \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} (\Delta g_F - \Delta g_{MGG}) S(\psi) d\sigma \quad (2.38)$$

Keterangan :

N : undulasi geoid lokal (m)

N_{MGG} : undulasi geoid global (m)

Δg_{MGG} : Anomali gayaberat dari MGG (mGal)

2.10 Standar Deviasi

Standar deviasi digunakan sebagai kriteria untuk menilai ketelitian data pengamatan. Terdapat dua istilah tentang ketelitian, yaitu akurasi dan presisi. Akurasi atau kesaksamaan adalah tingkat kedekatan nilai-nilai pengamatan terhadap nilai sebenarnya. Presisi atau ketelitian adalah tingkat kedekatan nilai-nilai pengamatan satu sama lain, yang dapat dihitung besar kecilnya standar deviasi (τ) dari pengamatan. Apabila nilai standar deviasi yang kecil, berarti data tersebut teliti (Basuki, 2006 dalam Hidayat, 2014)

Standar deviasi dinyatakan dengan rumus berikut (Walpole, dalam Hidayat, 2014)

$$\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.39)$$

Keterangan :

τ : standar deviasi

- x_i : data ke- i
 μ : rata-rata data
 n : jumlah data

2.11 Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang dilakukan oleh Triarahmadhana (2014) mengenai Pemodelan geoid Lokal D.I.Yogyakarta menggunakan Metode *Fast Fourier Transformation* dan *Least Square Collocation*. Penelitian tersebut membahas bagaimana model geoid lokal D.I.Yogyakarta yang dihasilkan menggunakan dua macam metode yaitu *Fast Fourier Transformation* (FFT) dan *Least Square Collocation* (LSC). Evaluasi ketelitian geoid lokal D.I.Yogyakarta menggunakan metode FFT menghasilkan model geoid dengan ketelitian yang lebih tinggi daripada metode LSC. Secara berurutan, ketelitian model geoid yang dihasilkan dari metode FFT dan metode LSC adalah 0,127 m dan 0,174 m. Selisih ketelitian antara dua model geoid sebesar 0,047 m.

Ketelitian model geoid D.I.Yogyakarta dapat dicapai dengan tersedianya data anomali gayaberat *free-air* yang yang rapat dan tersebar merata di Wilayah D.I Yogyakarta jumlah data anomali gayaberat *free-air* sebanyak 400 titik yang didapat dari pengukuran gayaberat teristris.

BAB III

METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini berlokasi di Kota Surabaya yang merupakan ibukota Provinsi Jawa Timur. Kota Surabaya secara geografis terletak di 07°09' sampai 07°21' Lintang Selatan dan 112°36' sampai 112°57' Bujur Timur. Sebagian besar wilayah Kota Surabaya merupakan dataran rendah dengan ketinggian 3 - 6 meter di atas permukaan laut, sebagian lagi pada sebelah Selatan merupakan kondisi berbukit-bukit dengan ketinggian 25 - 50 meter di atas permukaan laut

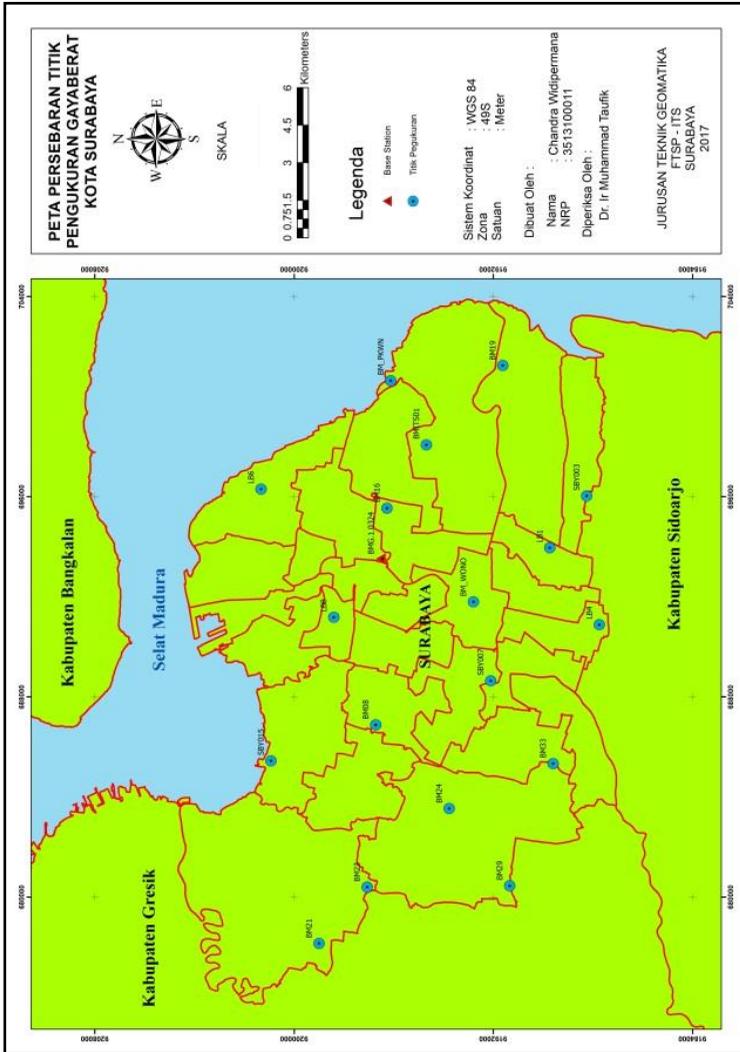
Penelitian ini melibatkan proses pengukuran untuk pemerolehan data. Pengukuran dilakukan di 19 titik yang tersebar di Kota Surabaya. Sebaran titik pengukuran gayaberat dapat dilihat pada Gambar 3.1.

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini dibagi menjadi dua jenis yaitu data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang penulis dapatkan secara langsung tanpa perantara melalui pengukuran di lapangan. Berikut data primer yang penulis dapatkan,

- a. Data gayaberat teristris Kota Surabaya yang diukur menggunakan metode gayaberat relative
- b. Data posisi titik pengukuran yang didapat dari survei menggunakan GPS Geodetik



Gambar 3.1 Peta Sebaran Titik Pengukuran Gayaberat
(Sumber : Penulis)

Sedangkan data sekunder merupakan data yang penulis dapatkan secara tidak langsung atau melalui perantara. Berikut adalah data sekunder yang penulis gunakan,

- a. Data posisi BM pengukuran penurunan tanah dari Pemerintah Kota Surabaya, BM pengukuran *Land Subsidence* milik BAKOSURTANAL, BM titik kontrol utama pemotretan udara Kota Surabaya tahun 2015. data posisi BM tersebut digunakan sebagai dasar perencanaan pengukuran gayaberat teristris di Kota Surabaya.
- b. Data titik acuan (*base station*) gayaberat di Kota Surabaya yang didapatkan dari Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG). Data tersebut merupakan hasil pengukuran tahun 2003 yang dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Stasiun Referensi (*Base Station*)

Nama	ϕ (LS)	λ (BT)	H (m)	g (mGal)
BMG.1.0324	7°15.94'	112°45.17'	5	978108.76

(Sumber : BMKG, 2003)

Data *base station* tersebut digunakan sebagai acuan dalam pengukuran gayaberat relatif

- c. Data Model Geopotensial Global EGM2008 yang di unduh di *website* <http://earth-info.nga.mil>. Dari data EGM2008 bisa didapat data undulasi dan data anomali gayaberat *free-air*.

3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini dibagi menjadi dua macam yaitu peralatan yang digunakan saat pengukuran di lapangan sebagai berikut,

- a. Gravimeter LaCoste & Romberg model G-1053 untuk melakukan pengukuran gayaberat relatif.
- b. GPS Navigasi untuk melakukan survei orientasi lapangan.
- c. GPS Geodetik untuk penentuan posisi 3-dimensi (ϕ, λ, h) di titik pengukuran
- d. Pita ukur untuk mengukur dimensi pilar dan tinggi alat.
- e. Jam digital untuk mengetahui waktu pengukuran
- f. Formulir pengukuran dan Alat tulis untuk mencatat hasil pengukuran.

Dan juga digunakan Laptop untuk melakukan pada saat pengolahan data dan pekerjaan studio dengan perangkat lunak sebagai berikut,

- a. Microsoft Office
Microsoft office yang digunakan dalam tugas akhir ini yaitu Microsoft Office Word yang digunakan dalam pembuatan laporan dan Microsoft Office Excel yang digunakan dalam pengolahan data gayaberat.
- b. Force 2.0
Force 2.0 digunakan untuk menjalankan program yang berguna untuk mengekstrak nilai undulasi geoid dari data EGM 2008.
- c. Aplikasi Gravsoft
Aplikasi Gravsoft digunakan untuk *gridding* data pengukuran dan mengekstrak nilai anomali gayaberat *free-air* dari data EGM 2008.
- d. Aplikasi GAMIT
Aplikasi GAMIT digunakan untuk melakukan pengolahan data pengukuran GPS.
- e. Aplikasi *Surfer*

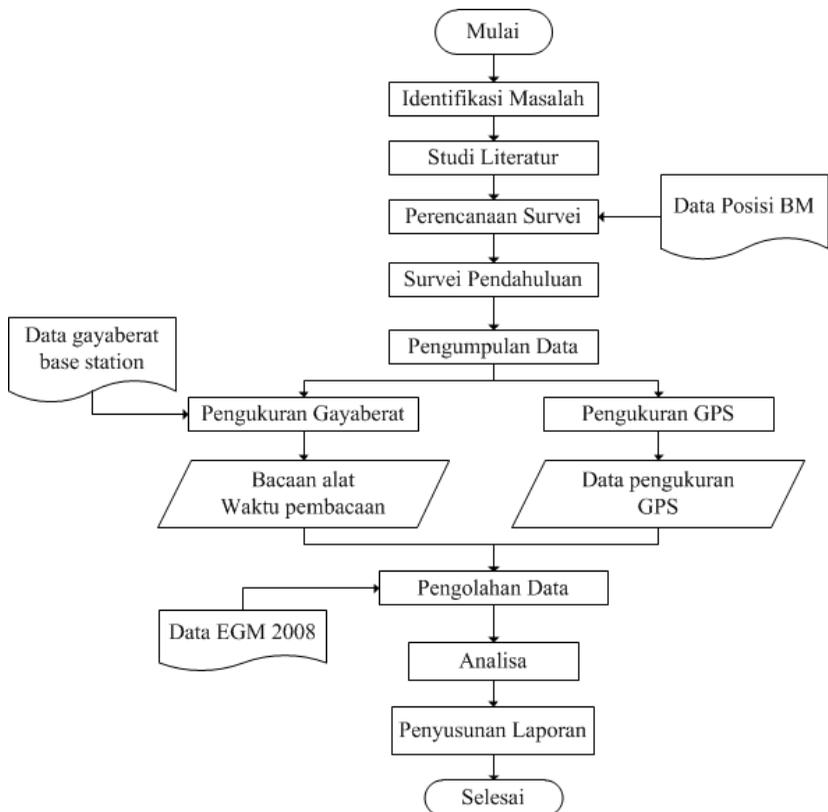
Aplikasi *Surfer* digunakan untuk *plotting* hasil pengolahan data yaitu anomali gayaberat *free-air* dan model geoid Kota Surabaya.

3.3 Metodologi Penelitian

Pada metodologi penelitian akan dijelaskan tahapan pelaksanaan tugas akhir dan tahap pengolahan data.

3.3.1 Tahap Pelaksanaan Tugas Akhir

Secara umum pelaksanaan tugas akhir ini dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut,



Gambar 3.2 Diagram Alir pelaksanaan Tugas Akhir

Berikut adalah penjelasan diagram alir diatas.

a. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan membaca buku, jurnal dan artikel yang berkaitan dengan pengukuran gayaberat relatif dan pemodelan geoid. Studi literatur bertujuan untuk menemukan dan mempertajam masalah penelitian dan mengetahui teori-teori atau landasan dalam pelaksanaan tugas akhir ini.

b. Identifikasi Masalah

Dalam tahap identifikasi masalah yang ditemukan di lapangan yang nantinya menjadi latar belakang dilakukannya tugas akhir ini. Dalam tahap ini penulis menyimpulkan bahwa di Pulau Jawa khususnya Kota Surabaya belum mempunyai model geoid yang teliti karena data yang tersedia hanya EGM2008. Untuk mencapai geoid yang teliti maka perlu tersedianya data anomali gayaberat *free-air* dari pengukuran gayaberat teristris di suatu wilayah.

c. Perencanaan Survei

Perencanaan survei perlu dilakukan untuk menyusun rencana kerjaselanjutnya supaya saat pelaksanaan pengukuran dapat berjalan efektif dan tepat metode. Terdapat 19 titik yang akan diukur, data titik-titik pengukuran dapat dilihat di Lampiran.

d. Survei Pendahuluan

Survei pendahuluan adalah kegiatan pra survei atau memeriksa kondisi BM dilapangan. Untuk mencari BM yang tersebar di Kota Surabaya, digunakan GPS navigasi untuk mengarahkan ke

lokasi BM. Kondisi BM ada yang masih utuh dan ada yang sudah rusak atau hilang sehingga tidak bisa dilakukan pengukuran, khususnya untuk pengukuran GPS geodetik.

e. Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data lebih cenderung ke arah tahap pengukuran (data primer) di lapangan yang didukung dengan data sekunder yang sudah didapat. Tahap pengumpulan data dibagi menjadi dua yaitu pengukuran gayabarat teristris menggunakan gravimeter dan penentuan posisi menggunakan GPS Geodetik.

f. Pengolahan Data

Pengolahan data dibagi lagi menjadi beberapa tahap yang nanti dijelaskan secara detail di sub-bab 3.3.2. Singkatnya terdapat pengolahan data tahap pertama yaitu pengolahan data yang diperoleh dari pengukuran dilapangan. Berikutnya adalah pengolahan data tahap kedua untuk mengetahui nilai anomali gayabarat *free-air* dari data EGM 2008 maupun data pengukuran gayabarat teristris. Tahap pengolahan data akhir adalah perhitungan geoid gravimetric menggunakan persamaan integral *stokes* metode *direct numerical integration* dan pemodelan geoid menggunakan teknik RCR. dan hasilnya di *plot* menggunakan Aplikasi *Surfer*.

g. Analisis Data

Hasil Perhitungan geoid di *plot* menggunakan Aplikasi *Surfer*.

h. Analisis Data

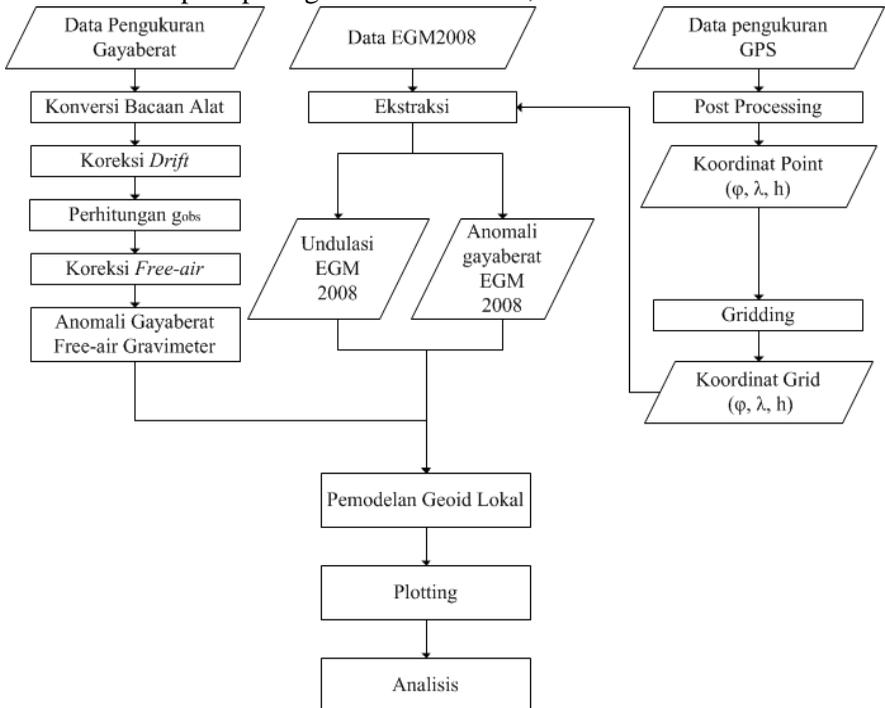
Melakukan analisa dari hasil pengukuran hingga pemodelan geoid Kota Surabaya.

i. Penyusunan Laporan

Tahap akhir dari keseluruhan penelitian yaitu membuat laporan yang sesuai dengan aturan penyusunan yang berlaku. Hasil akhir dari penelitian akan dilaporkan sebagai bentuk pertanggung jawaban atas penelitian yang telah dilaksanakan.

3.3.2 Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dalam beberapa tahapan seperti pada gambar 3.3 berikut,



Gambar 3.3 Diagram Alir Pengolahan Data

Dalam penelitian tugas akhir ini melibatkan tiga jenis data, antara lain data pengukuran gayaberat, data Model Geopotensial Global EGM 2008 dan data koordinat posisi titik pengukuran. Berikut adalah tahap pengolahan data,

- a. Pengolahan data pengukuran gayaberat
 - Konversi bacaan alat gravimeter ke satuan mGal menggunakan tabel konversi yang tersedia pada alat gravimeter. Secara umum konversi bisa dilakukan menggunakan persamaan 2.10.
 - Menghitung koreksi drift menggunakan persamaan 2.11 dan 2.12.
 - Mengikatkan gayaberat relative yang sudah terkoreksi *drift* ke nilai gayaberat absolut di *base station* supaya menjadi gayaberat observasi menggunakan persamaan 2.13.
 - Menghitung koreksi *free-air* menggunakan persamaan 2.14 atau 2.15.
 - Menghitung anomali gayaberat *free-air* menggunakan persamaan 2.17.
- b. Pengolahan data GPS
 - Melakukan *post processing* data GPS menggunakan perangkat lunak GAMIT sehingga didapat hasil koordinat tiga dimensi (ϕ, λ, h) di tiap titik pengukuran.
 - Melakukan proses *gridding* menggunakan perangkat lunak Gravsoft. sehingga didapat koordinat grid.
- c. Pengolahan data EGM 2008
 - Ekstraksi data EGM 2008 dengan input data dari hasil grid koordinat GPS. Ekstraksi data EGM 2008 menghasilkan data undulasi geoid (N_{GM}) dan anomali gayaberat *free-air* (Δg_{GM}).

d. Pemodelan Geoid

- Pemodelan geoid geoid gravimetrik menggunakan persamaan integral *Stokes*.
- Dari beberapa modifikasi dari persamaan integral *Stokes*, penelitian ini menggunakan metode *direct numerical integration*. Hasil dari perhitungan ini adalah nilai undulasi gravimetrik di tiap-tiap grid ($N_{\Delta g}$).
- Perhitungan nilai geoid menggunakan teknik RCR.

e. Plotting

Plotting merupakan tahap visualisasi dari data model geoid yang sudah dihitung. Plotting menggunakan perangkat lunak *Surfer*.

f. Analisis

Menganalisa setiap hasil dari pengukuran hingga proses pemodelan geoid Kota Surabaya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengolahan Data

4.1.1 Data GPS

Dari pengolahan data GPS didapatkan koordinat lintang (ϕ), bujur (λ) dan tinggi ellipsoid (h) di tiap-titik pengukuran seperti pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Koordinat Titik Pengukuran Dari GPS

POINT	GPS		
	λ (derajat)	ϕ (derajat)	h (m)
BMG.1.0324	112,7528333	-7,26566667	33,756
BM16	112,7712003	-7,26777969	32,255
LB06	112,7779449	-7,22198598	31,811
BM01 WONO	112,7373992	-7,29923895	36,799
LB04	112,7292626	-7,34503498	34,579
SBY007	112,7088247	-7,30564471	35,636
BM33	112,6789687	-7,3284172	38,897
BM29	112,634661	-7,31278384	37,392
BM24	112,6625164	-7,29075256	55,184
BM23	112,6339794	-7,26107722	48,583
BM21	112,6135265	-7,24364975	36,545
SBY015	112,6795862	-7,22596348	30,861
BM8	112,6927684	-7,2639636	34,450
LB08	112,7316054	-7,24862999	32,278
BM ITS01	112,7941488	-7,28198083	32,270
BM PKWN	112,8173715	-7,26897089	30,869
BM19	112,8229976	-7,30954947	31,274
LB01	112,7570445	-7,32690511	32,4726
SBY003	112,7758957	-7,34026342	31,2857

4.1.2 Data Gayaberat

Dari pengukuran gayaberat relatif di Kota Surabaya menggunakan gravimeter LaCoste & Romberg G-1053 diadaptasi data gayaberat sebanyak 19 titik. Pengolahan data gayaberat melalui beberapa tahap dan berikut merupakan hasil tiap tahap pengolahan datanya.

- Hasil Konversi Nilai Bacaan Alat

Ketika pengukuran gayaberat relatif menggunakan gravimeter LaCoste & Romberg data ukur masih berupa bacaan alat yang harus di konversi ke satuan mGal yang hasilnya dapat dilihat pada tabel 4.2. Konversi menggunakan tabel konversi masing-masing alat. Tabel konversi gravimeter LaCoste & Romberg bisa dilihat pada Lampiran.

Tabel 4.2. Konversi Nilai Bacaan Alat

POINT	Data Ukur Gayaberat		
	Bacaan Alat Rerata	Hasil Konversi (mGal)	Standar Deviasi
BMG.1.0324	1719,030	1743,209	0,000
BM 16	1719,282	1743,464	0,024
LB06	1726,005	1750,282	0,000
BM_WONO	1713,372	1737,471	0,000
LB04	1706,440	1730,441	0,000
SBY007	1714,222	1738,333	0,000
BM33	1711,520	1735,593	0,000
BM29	1714,141	1738,251	0,000
BM24	1711,088	1735,155	0,000
BM23	1714,160	1738,270	0,000
BM21	1719,411	1743,595	0,000
SBY015	1724,713	1748,972	0,221

BM8	1716,635	1740,780	0,000
LB08	1718,396	1742,566	0,022
BMITS01	1718,334	1742,503	0,016
BM_PKWN	1718,352	1742,521	0,000
BM19	1707,378	1731,392	0,325
LB01	1708,468	1732,498	0,066
SBY003	1704,015	1727,982	0,035
BMG.1.0324	1718,810	1742,986	0,000

Dari proses pengukuran, pembacaan alat gravimeter dibaca sebanyak tiga kali untuk mengetahui tingkat presisi nilai bacaan. Bacaan alat yang digunakan adalah bacaan alat rerata. Presisi bisa dihitung dengan mencari standar deviasi. Semakin tinggi nilai standar deviasi maka tingkat presisi semakin rendah. Nilai satandar deviasi pengukuran dijelaskan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik Nilai Standar Deviasi Pengukuran Gayaberat

Dari data yang di tunjukkan pada Tabel 4.2 nilai standar deviasi tertinggi terdapat di titik BM19. Tingginya nilai

standar deviasi dikarenakan bervariasinya nilai bacaan alat yang dibaca sebanyak tigakali. Variasi ini disebabkan karena gravimeter mengalami guncangan atau getaran di disaat pengukuran. Guncangan bisa berasal dari kendaraan atau aktivitas manusia di sekitar area pengukuran.

- Hasil Perhitungan Koreksi Drift dan Gayaberat Observasi
 Dalam pengukuran gayaberat relatif alur pengukuran harus berbentuk *loop* dengan kata lain diawali di *base station* dan diakhiri di *base station*. Base station harus sudah diketahui nilai gayaberat absolutnya sehingga pengukuran relatif nilainya bisa diikatkan Pada penelitian ini titik BMG.1.0324 digunakan sebagai *base station*. Hasil perhitungan koreksi *drift* dan gayaberat observasi bisa dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Koreksi *Drift* dan Gayaberat Observasi

POINT	Perhitungan Koreksi Drift dan Gayaberat Observasi		
	Koreksi Drift	G_rel (mGal)	G_Obs (mGal)
BMG.1.0324	0	1743,209	978108,760
BM 16	0,005	1743,469	978109,020
LB06	0,012	1750,295	978115,846
BM_WONO	0,038	1737,509	978103,0604
LB04	0,042	1730,484	978096,034
SBY007	0,048	1738,382	978103,932
BM33	0,058	1735,651	978101,202
BM29	0,064	1738,315	978103,866
BM24	0,070	1735,225	978100,776
BM23	0,079	1738,349	978103,900

BM21	0,091	1743,687	978109,238
SBY015	0,113	1749,085	978114,636
BM8	0,120	1740,901	978106,451
LB08	0,129	1742,695	978108,246
BM ITS01	0,141	1742,644	978108,195
BM_PKWN	0,150	1742,671	978108,222
BM19	0,169	1731,562	978097,112
LB01	0,188	1732,687	978098,237
SBY003	0,204	1728,186	978093,737
BMG.1.0324	0,223	1743,209	978108,760

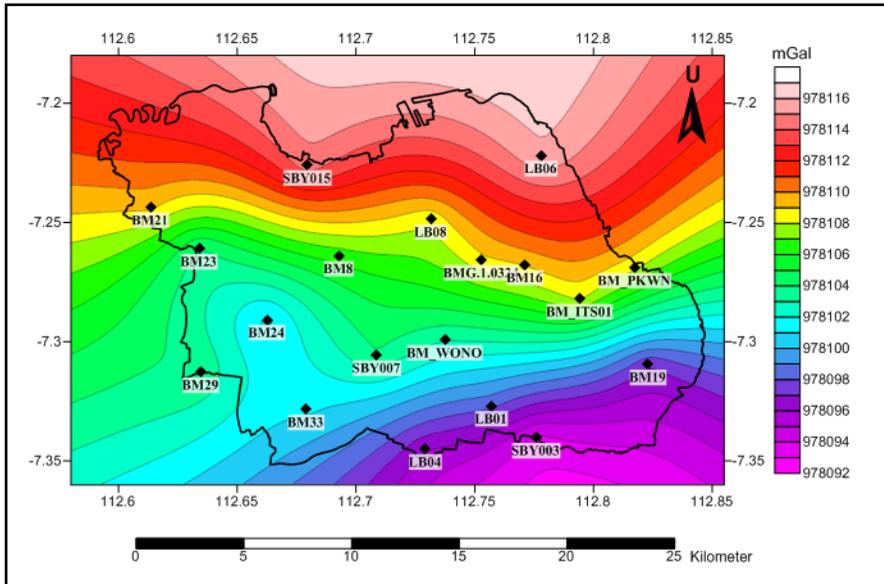
Nilai koreksi drift dipengaruhi oleh waktu. Pada Tabel 4.3 diatas bisa dilihat bahwa seiring berjalannya waktu saat pengukuran nilai koreksi *drift* nya juga semakin besar. Grafik pada gambar 4.2 menggambarkan nilai koreksi *drift* setiap pengukuran.



Gambar 4.2. Grafik Nilai Koreksi *Drift*

Setelah didapat nilai koreksi drift selanjutnya dijumlahkan ke masing-masing nilai gayaberat relatif.

Gayaberat relai yang sudah terkoreksi selanjutnya diikatkan ke nilai gayaberat absolut yang sudah diketahui di *base station*. Setelah diikatkan didapatkanlah nilai gayaberat observasi. Pada Gambar 4.3 merupakan peta gayaberat Kota Surabaya.



Gambar 4.3. Peta Gayaberat Kota Surabaya Hasil Pengukuran

Dari peta gayaberat Kota Surabaya diatas dapat dilihat bahwa nilai gayaberat di Surabaya yang besar berada di sebelah utara dan nilai gayaberat kecil disebelah selatan. Nilai gayaberat dipengaruhi beberapa faktor antarlain posisi lintang, ketinggian dan kepadatan massa bumi yang berbeda-beda.

Di Wilayah Surabaya utara, merupakan daerah yang dekat dengan laut dan material penyusun tanahnya merupakan sedimen yang tidak sepadat dengan tanah yang

berada di selatan yang merupakan batuan berlapis sehingga nilai gaya berat di utara lebih besar. Selain itu juga pengaruh ketinggian. Wilayah Surabaya utara merupakan wilayah yang lebih rendah dibanding wilayah selatan sehingga nilai gayaberat nya lebih besar di utara dibanding dengan wilayah selatan.

- Hasil Perhitungan Anomali Gayaberat *Free-Air*

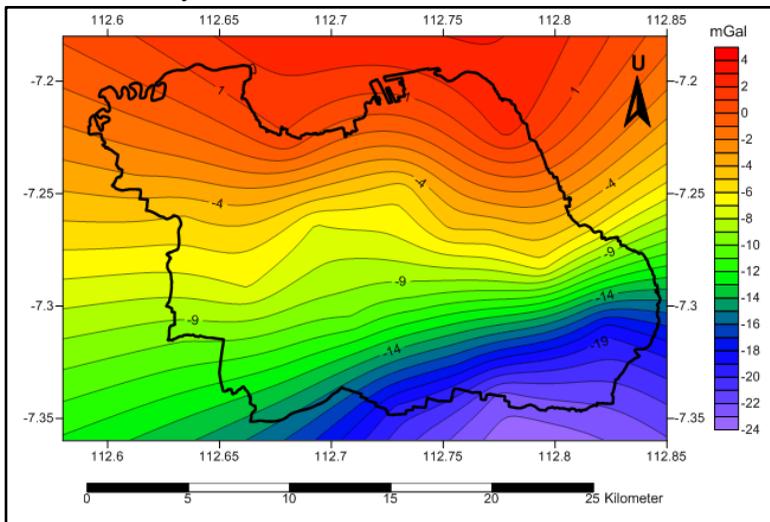
Untuk mengetahui nilai anomali gayaberat *free-air* (ΔgF) dilakukan perhitungan koreksi *free-air* (δgF). Hasil perhitungan bisa dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perhitungan Anomali Gayaberat *Free-Air*

POINT	Free-Air	
	δgF (mGal)	ΔgF (mGal)
BMG.1.0324	1,543	-4,961
BM 16	0,990	-5,302
LB06	0,772	2,339
BM WONO	2,466	-10,497
LB04	1,845	-19,188
SBY007	2,136	-10,101
BM33	3,186	-12,299
BM29	2,726	-9,739
BM24	8,176	-6,876
BM23	6,113	-5,144
BM21	2,383	-3,145
SBY015	0,565	0,832
BM8	1,722	-7,051
LB08	0,999	-5,633
BM ITS01	0,996	-6,442
BM PKWN	0,522	-6,594
BM19	0,705	-18,441
LB01	1,155	-17,261
SBY003	0,793	-22,430
BMG.1.0324	1,543	-4,961

Nilai koreksi *free-air* dipengaruhi nilai ketinggian di titik-titik pengukuran. Nilai ketinggian yang digunakan adalah tinggi Orthometrik pendekatan yang pada penelitian ini dicari dengan cara menyelisihkan nilai tinggi ellipsoid (h) dari GPS dengan nilai undulasi dari data EGM2008 ($N_{EGM2008}$) di tiap titik pengukuran.

Nilai anomali gayaberat *free-air* merupakan hal yang penting dalam pemodelan geoid. tertinggi adalah 2,339 mGal dan terendah adalah -22,430 mGal. Berikut merupakan visualisasi anomali gayaberat *free-air* Kota Surabaya.



Gambar 4.4. Peta Anomali Gayaberat *Free-Air* Kota Surabaya

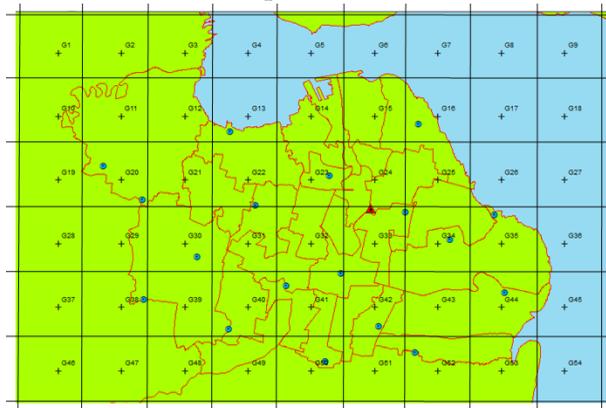
Dari Gambar 4.4 dapat diketahui bahwa anomali gayaberat *free-air* di Kota Surabaya didominasi dengan nilai negatif (-). Nilai anomali gayaberat *free-air* dipengaruhi dengan nilai ketinggian di suatu daerah.

Semakin tinggi suatu lokasi maka nilai koreksi *free-air* nya juga tinggi. Karena Surabaya memiliki nilai ketinggian yang rendah maka nilai koreksi *free-air* yang dihasilkan rendah.

Dengan menerapkan persamaan (2.17), berarti besarnya gayaberat observasi (g_{Obs}) lebih kecil daripada jumlah gayaberat normal ellipsoid (γ) dengan koreksi *free-air* (δ_{gF}). Dari arah tenggara menuju utara nilai anomali gayaberat *free-air* nya semakin bertambah disebabkan oleh beberapa hal. Yang pertama semakin ke utara nilai elevasi (H) di Surabaya semakin menurun sehingga nilai δ_{gF} juga semakin turun. Kedua semakin ke utara nilai g_{Obs} semakin bertambah.

4.1.3 Data EGM2008

Dari ekstraksi data EGM 2008 bisa diperoleh nilai anomali gayaberat dan nilai undulasi. Ekstraksi data EGM 2008 dengan memasukkan nilai koordinat yang sudah berbentuk grid. Wilayah Surabaya dibagi menjadi grid berukuran $2' \times 2'$ seperti Gambar 4.5.

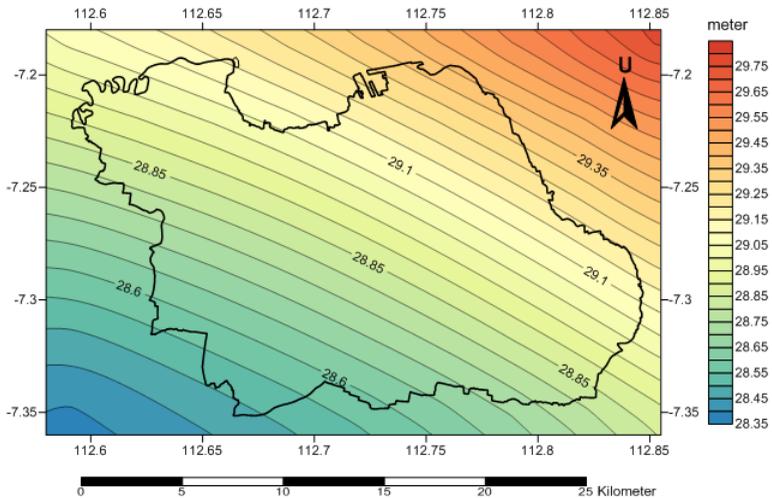


Gambar 4.5 Grid Kota Surabaya $2' \times 2'$

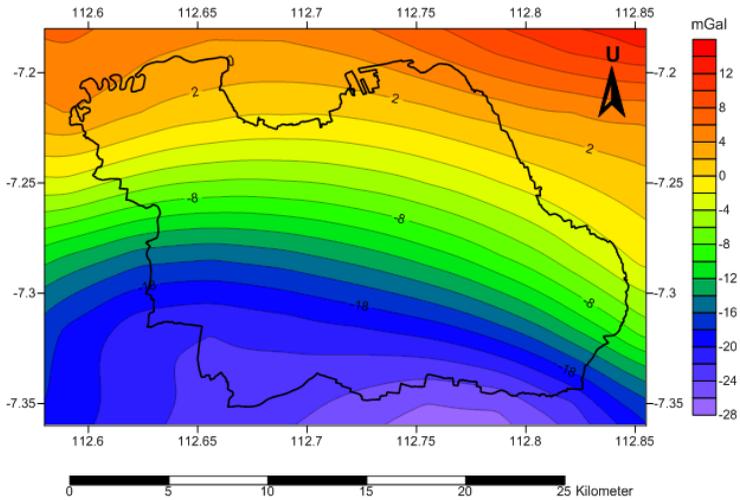
Nilai Undulasi geoid EGM2008 ($N_{EGM2008}$) tertinggi sebesar 29,762 m dan terendah adalah sebesar 28,393m. Surabaya. Sedangkan nilai anomali gayaberat EGM2008 ($\Delta g_{EGM2008}$) tertinggi adalah 12,818 mGal dan terendah adalah -26,036 mGal. Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 merupakan visualisai geoid dan anomali gayaberat EGM2008 di Kota Surabaya .

Tabel 4.5 Statistik Data EGM 2008

Data	Mak.	Min	Rerata	Std. Dev.
N_{EGM} (m)	29,762	28,393	28,967	0,337
Δg_{EGM} (mGal)	12,818	-26,036	-7,470	11,101



Gambar 4.6 Geoid EGM2008 di Kota Surabaya.



Gambar 4.7 Anomali Gayaberat EGM2008 Kota Surabaya.

4.1.4 Geoid Gravimetrik

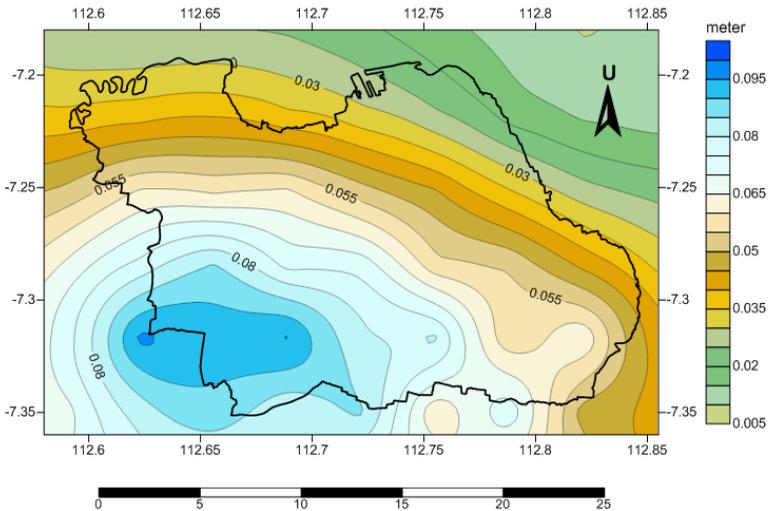
Perhitungan integral *stokes* dilakukan untuk mengetahui nilai geoid gravimetrik ($N_{\Delta g}$). Integral stokes yang digunakan adalah metode *direct numerical integration*.

Dari perhitungan integral stokes bisa memberikan kontribusi terbesar senilai 0,096 m dan terendah 0,010 m. statistik dari hasil hitungan geoid gravimetrik ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Statistik Geoid Gravimetrik

Data	Maks.	Min.	Rerata	Std. dev.
$N_{\Delta g}$ (m)	0,096	0,010	0,050	0,025

Visualisasi geoid gravimetrik dapat dilihat pada Gambar 4.7.



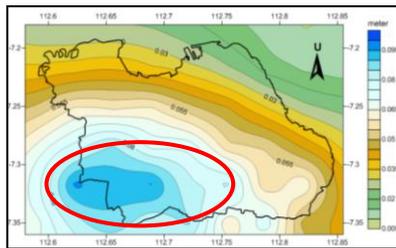
Gambar 4.8 Geoid Gravimetrik Kota Surabaya.

Dari Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa kontribusi geoid gravimetrik tertinggi berada di sebelah baratdaya dan terendah di sebelah timur laut Kota Surabaya. Apabila dilihat dari pola kontur geoid gravimetrik terdapat kemiripan dengan pola kondisi topografi dan formasi geologi di Kota Surabaya.

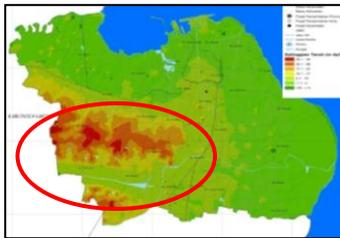
Jika dibandingkan dengan kondisi topografi, nilai geoid gravimetrik tertinggi berada pada elevasi tertinggi. Semakin turun elevasi tanahnya, nilai geoid gravimetriknya juga mengalami penurunan.

Sedangkan jika dibandingkan dengan formasi geologi, nilai geoid gravimetrik tertinggi berada di daerah formasi Lidah, formasi Kabuh dan formasi Pucangan. yang ditengah – tengah dari ketiga formasi tersebut terdapat antiklin. Antiklin merupakan struktur geologi

berupa lipatan lapisan batuan sedimen atau batuan metamorfosis yang cembung ke atas. Dan nilai geoid gravimetrik yang rendah mengarah ke struktur alluvial. Alluvial terdiri dari lapisan pasir, krikil, krakal dan lempung dan pecahan cangkang fosil yang merupakan sedimen.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.9 Perbandingan Pola pada (a) Peta Geoid Gravimetrik, (b) Peta Topografi, dan (c) Peta Formasi Geologi Surabaya

4.1.5 Model Geoid Kota Surabaya.

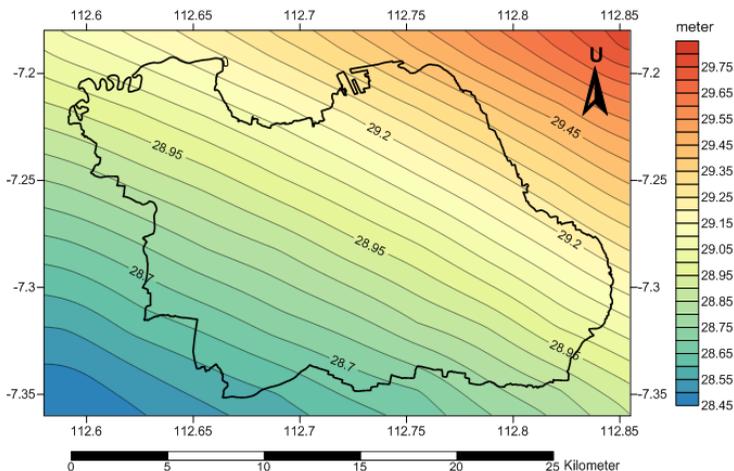
Model geoid Kota Surabaya yang dibuat merupakan model geoid dari EGM 2008 (N_{GM}) yang ditambahkan dengan kontribusi dari nilai geoid gravimetrik ($N_{\Delta g}$) dari pengolahan data gayaberat teristris. Pemodelan geoid ini

bisa dilakukan dengan menggunakan teknik RCR yang persamaannya sudah dijelaskan pada persamaan (2.37).

Tabel 4.7 Statistik Model Geoid Kota Surabaya

Data	Maks	Min	Rerata	Std. Dev.
N_{GM} (m)	29,762	28,393	28,967	0,337
N (m)	29,774	28,461	29,017	0,314

Geoid EGM 2008 Surabaya mengalami perubahan setelah mendapatkan kontribusi dari pengolahan data gayaberas teristris menggunakan persamaan Integral Stokes (N). dari pemodelan geoid menggunakan teknik *Remote Compute Restore* (RCR) dihasilkan nilai geoid tertinggi 29,774 m dan terendah 28,461 m. standar deviasi mengalami peningkatan dari 0,337 m menjadi 0,314 m sehingga dapat dikatakan bahwa model geoid menjadi lebih presisi. Visualisasi model geoid Kota Surabaya ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Geoid Kota Surabaya

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisa data yang sudah dilakukan, berikut merupakan beberapa hal yang dapat penulis simpulkan dalam penelitian tugas akhir ini.

1. Nilai Gayaberat di Kota Surabaya berkisar 978093,737 mGal hingga 978115,846 mGal dengan nilai gayaberat yang besar terletak di bagian utara Kota Surabaya karena diutara Surabaya tanahnya disusun oleh tanah alluvial (sedimen) yang kepadatannya rendah..
2. Anomali gayaberat *free-air* dari pengukuran gayaberat di Kota Surabaya berkisar -22,430 mGal hingga 2,339 mGal. Anomali gayaberat *free-air* Kota Surabaya lebih banyak yang bernilai negatif karena Surabaya merupakan daerah yang elevasinya rendah.
3. Penentuan geoid menggunakan formula *stokes* dengan metode *direct numerical itegration* memberikan kontribusi senilai 0,010 m hingga 0,096 m.
4. Model geoid Kota Surabaya dengan kontribusi 19 data pengukuran gayaberat mempunyai nilai maksimal 29,774 m dan minimal 28,461 meter dengan nilai rata-rata 29,017 dan standar deviasi sebesar 0,314 m.

5.2 Saran

Dalam pengerjaan penelitian tugas akhir tentunya masih terdapat banyak kekurangan, sehingga penulis mengajukan saran sebagai berikut.

1. Untuk mendapatkan kualitas data gayaberat yang bagus (standar deviasi yang kecil) sebaiknya memilih lokasi pengukuran gayaberat di tempat yang tidak menimbulkan getaran.

2. Melakukan pembacaan besaran alat lebih banyak supaya terdapat data ukuran lebih untuk menghitung standar deviasi alat yang lebih baik.
3. Untuk penentuan geoid sebaiknya akuisisi dataga yaberat menggunakan konfigurasi grid.
4. Mencoba melakukan penentuan geoid menggunakan metode yang lain seperti metode *Least Square Collocation* (LSC) dan *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mengetahui metode yang paling tepat (teliti) untuk penentuan geoid di Kota Surabaya.
5. Karena kurangnya titik TTG di Kota Surabaya, sebaiknya melakukan pengukuran GPS dan leveling supaya nilai (N) yang dihasilkan bisa dijadikan pembanding untuk mengetahui tingkat ketelitian geoid di Kota Surabaya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd-Elmotaal, H.A. 2001. *FFT Versus Least Square Collocation Techniques For Gravimetric Geoid Determination In Egypt*. Journal of Applied Geophysics. 10, 121-133.
- Abidin, H.Z. 2000. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Jakarta : PT Pradnya Paramita.
- Ågren, J. dan Sjöberg, L.E. 2004. *Comparison of some methods for modifying Stoke's formula in the GOCE era*. 2nd International GOCE User Workshop, 2004 Italy.
- Anjasmara, I.M. 2013. *Gravity Anomaly and Isostasy*. Catatan Kuliah. Surabaya : Jurusan Teknik Geomatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Anjasmara, I.M. 2013. *The Measurement of Gravity*. Catatan kuliah. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Geomatika.
- Fotopoulos, G., Kotsakis, C. dan Sideris, M.G. 2003. *How Accurately Can We Determine Orthometric Height Differences From GPS And Geoid Data?*. Journal of Surveying Engineering. 129, 1-10.
- Heiskanen, W.A. dan Moritz, H. 1967. *Physical Geodesy*. San Fransisco, USA, W.H. Freeman and Company.
- Hidayat, R. 2014. *Pengaruh Variasi Degree Model Geopotensial Global (MGG) Terhadap Ketelitian Geoid Lokal (Studi Kasus : Provinsi daerah Istimewa Yogyakarta)*. Skripsi. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada.

- Indrawan, P.Y., dkk. 2013. *Metode Gaya Berat*. Modul Praktikum Bandung : Program Studi Fisika. Institut Teknologi Bandung
- Jaenudin. 2012. *Metode Gravity*. Laporan Akhir Praktikum Geofisika II. Bandung : Jurusan Fisika. Universitas Padjadjaran.
- Maryanto, S. dkk. 2016. *Pedoman Praktikum Workshop Geofisika*. Malang : Jurusan Fisika, Universitas Brawijaya
- Pangastuti, D. dan Sofian, I. 2015. *Validasi Geoid EGM2008 di Jawa dan Sumatra dengan Menggunakan Parameter Mean Dynamic Topography (MDT) Pada Geoid Geometris*. Majalah Globe Vol. 17 No. 1 Juni 2015 : 079-088.
- Pasaribu, J. M. dan Haryani, N. S. 2012. *Perbandingan Teknik Interpolasi DEM SRTM dengan Metode Inverse Distance Weihgted (IDW), Natural Neighbor dan Spline*. Jurnal Penginderaan Jauh Vol. 9 No. 2 Desember 2012 : 126-139.
- Ramdani, D. 2013. *Global Geopotential Model Evaluation In Sumatra and Java*. 34th Asian Conference on Remote Sensing 2013 (ACRS 2013)
- Pavlis, N. K., dkk. 2012. *The Development and Evaluation of The Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*. *Journal of Geophysical Research* Vol 117, 1-38
- Sabri, L. M. 2015. *Pengolahan Ukuran Gayaberat Relatif dengan Metode Perataan Kuadrat Terkecil dengan Solusi Bertahap*. Prosiding SKF 2015
- Serpas, J.G. dan Jekeli, C. 2005. *Local Geoid Determination From Airborne Vector Gravimetry*. *Journal of Geodesy*, 78, 577-587.

- Supriyadi. 2009. *Studi Gaya Berat Relatif di Semarang*. Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia. 5,54-61
- Triarahmadhana, B., Heliani, L.S. dan Widjajanti, N. 2014. *Pemodelan Geoid Lokal D.I.Yogyakarta menggunakan Metode Fast Fourier Transformation dan Least Square Collocation*. Conference on Geospatial Information Science and Engineering. Yogyakarta
- Vanicek, P. dan Krakiwsky, E.J. 1982. *Geodesy: The Concepts*. New York, North-Holland Publishing Company.
- Yusuf, M. 2015. *Analisis Data Gayaberat Kombinasi dengan Menggunakan Gravimeter Absolut (A10) dan Gravimeter Relatif (LaCoste Romberg)*. Geophysical Instrumentation Subdivision, Meteorological Climatological and Geophysical Agency.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN

Lampiran 1

Tabel Konversi Gravimeter LaCoste & Romberg G-1053

COUNTER READING	VALUE IN MILIGALS	FACTOR FOR INTERVAL	COUNTER READING	VALUE IN MILIGALS	FACTOR FOR INTERVAL
0	0	1,01437			
100	101,44	1,01430	3600	3651,97	1,01554
200	202,87	1,01423	3700	3753,53	1,01561
300	304,29	1,01417	3800	3855,09	1,01568
400	405,71	1,01411	3900	3956,66	1,01574
500	507,12	1,01406	4000	4058,23	1,01580
600	608,52	1,01402	4100	4159,81	1,01586
700	709,93	1,01398	4200	4261,40	1,01591
800	811,32	1,01396	4300	4362,99	1,01596
900	912,72	1,01394	4400	4464,58	1,01600
1000	1013,11	1,01394	4500	4566,18	1,01604
1100	1115,51	1,01394	4600	4667,79	1,01606
1200	1216,90	1,01396	4700	4769,39	1,01608
1300	1318,30	1,01398	4800	4871,00	1,01610
1400	1419,70	1,01401	4900	4972,61	1,01610
1500	1521,10	1,01404	5000	5074,22	1,01609
1600	1622,50	1,01409	5100	5175,83	1,01607
1700	1723,91	1,01413	5200	5277,44	1,01604
1800	1825,32	1,01419	5300	5379,04	1,01599
1900	1929,74	1,01425	5400	5480,64	1,01594
2000	2028,17	1,01431	5500	5582,23	1,01587
2100	2129,60	1,01438	5600	5683,82	1,01578
2200	2231,04	1,01445	5700	5785,40	1,01569
2300	2332,48	1,01452	5800	5886,97	1,01558
2400	2433,93	1,01460	5900	5988,52	1,01546
2500	2535,39	1,01468	6000	6090,07	1,01533
2600	2636,86	1,01476	6100	6191,60	1,01519
2700	2738,34	1,01483	6200	6293,12	1,01505
2800	2839,82	1,01491	6300	6394,63	1,01489
2900	2941,31	1,01499	6400	6496,12	1,01474
3000	3042,81	1,01507	6500	6597,59	1,01459
3100	3144,32	1,01515	6600	6699,05	1,01445

Lampiran 2
Hasil Ekstraksi Data EGM 2008

GRID	EGM2008			
	λ (derajat)	φ (derajat)	N_EGM2008 (m)	Δg _EGM2008 (mGal)
G1	112.59	-7.185	29.062	6.082
G2	112.623	-7.185	29.119	4.684
G3	112.656	-7.185	29.186	4.002
G4	112.689	-7.185	29.264	4.059
G5	112.722	-7.185	29.352	5.011
G6	112.755	-7.185	29.450	6.914
G7	112.788	-7.185	29.552	9.263
G8	112.821	-7.185	29.656	11.269
G9	112.854	-7.185	29.762	12.818
G10	112.59	-7.218	28.907	4.072
G11	112.623	-7.218	28.959	2.063
G12	112.656	-7.218	29.020	0.734
G13	112.689	-7.218	29.091	0.187
G14	112.722	-7.218	29.173	0.441
G15	112.755	-7.218	29.264	1.461
G16	112.788	-7.218	29.360	2.852
G17	112.821	-7.218	29.459	3.967
G18	112.854	-7.218	29.560	4.698
G19	112.59	-7.251	28.755	-2.832
G20	112.623	-7.251	28.803	-5.314
G21	112.656	-7.251	28.859	-6.497
G22	112.689	-7.251	28.925	-6.472
G23	112.722	-7.251	29.002	-5.620
G24	112.755	-7.251	29.088	-4.133
G25	112.788	-7.251	29.181	-2.224

G26	112.821	-7.251	29.279	-0.378
G27	112.854	-7.251	29.379	1.075
G28	112.59	-7.284	28.610	-12.327
G29	112.623	-7.284	28.654	-15.140
G30	112.656	-7.284	28.707	-15.824
G31	112.689	-7.284	28.769	-14.925
G32	112.722	-7.284	28.841	-13.309
G33	112.755	-7.284	28.923	-11.177
G34	112.788	-7.284	29.014	-8.287
G35	112.821	-7.284	29.111	-4.779
G36	112.854	-7.284	29.210	-1.302
G37	112.59	-7.317	28.485	-18.345
G38	112.623	-7.317	28.526	-21.293
G39	112.656	-7.317	28.575	-21.897
G40	112.689	-7.317	28.630	-21.214
G41	112.722	-7.317	28.694	-20.371
G42	112.755	-7.317	28.767	-19.220
G43	112.788	-7.317	28.852	-16.717
G44	112.821	-7.317	28.945	-12.393
G45	112.854	-7.317	29.043	-7.094
G46	112.59	-7.35	28.393	-18.452
G47	112.623	-7.35	28.431	-21.146
G48	112.656	-7.35	28.473	-22.225
G49	112.689	-7.35	28.518	-23.029
G50	112.722	-7.35	28.569	-24.548
G51	112.755	-7.35	28.630	-26.036
G52	112.788	-7.35	28.704	-25.622
G53	112.821	-7.35	28.790	-22.226
G54	112.854	-7.35	28.883	-16.689

Lampiran 3
Hasil Nilai Geoid Gravimetrik dan Geoid Surabaya

GRID	Geoid	
	$N_{\Delta g}$ (m)	N (m)
G1	0.027	29.089
G2	0.026	29.145
G3	0.027	29.213
G4	0.026	29.290
G5	0.022	29.374
G6	0.018	29.468
G7	0.014	29.566
G8	0.010	29.666
G9	0.012	29.774
G10	0.036	28.943
G11	0.038	28.997
G12	0.040	29.060
G13	0.036	29.127
G14	0.032	29.205
G15	0.026	29.290
G16	0.018	29.378
G17	0.014	29.473
G18	0.013	29.573
G19	0.051	28.806
G20	0.060	28.863
G21	0.059	28.918
G22	0.060	28.985
G23	0.052	29.054
G24	0.045	29.133
G25	0.035	29.216

G26	0.027	29.306
G27	0.023	29.402
G28	0.066	28.676
G29	0.076	28.730
G30	0.085	28.792
G31	0.073	28.842
G32	0.073	28.914
G33	0.056	28.979
G34	0.054	29.068
G35	0.044	29.155
G36	0.034	29.244
G37	0.073	28.558
G38	0.096	28.622
G39	0.091	28.666
G40	0.096	28.726
G41	0.081	28.775
G42	0.081	28.848
G43	0.056	28.908
G44	0.064	29.009
G45	0.043	29.086
G46	0.068	28.461
G47	0.082	28.513
G48	0.087	28.560
G49	0.080	28.598
G50	0.086	28.655
G51	0.061	28.691
G52	0.073	28.777
G53	0.048	28.838
G54	0.043	28.926

Lampiran 4
Dokumentasi Pengukuran Gayaberat

	
<p>BMG.1.0324, Stasiun Gubeng</p>	<p>BM 16, Jl.Dharmahasada</p>
	
<p>BM LB6 Kenjeran</p>	<p>BM 11 Tj. Perak</p>
	
<p>BM Wonokromo</p>	<p>BM LB4 Jl. Ahmad Yani</p>



BM SBY007, Gunungsari



BM 33, Sumurwelut



BM 29, Lakar Santri



BM 24, Citra Land



BM 23, Citra Land



BM 21, Benowo



BM SBY015, Kalimas



BM 8, Perum. Darmo Satelit



BM LB8, Stasiun Pasarturi



BM ITS 01, Kampus ITS



BM PKWN, Pakuwon



BM 19, Mangrove Wonorejo



BM LB1 Rungkut Industri



**BM SBY 003 Pondok
Rambutan**

BIODATA PENULIS



Chandra Widipermana. Penulis dilahirkan di Bantul, 24 Agustus 1995, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di TK NW Mataram, SDN Telukan 01, SMP Negeri 1 Sukoharjo, kemudian di SMA Negeri 1 Sukoharjo. Kemudian penulis melanjutkan kuliah S-1 dengan mengikuti program SNMPTN tahun 2013 dan diterima di Jurusan Teknik Geomatika-FTSP, ITS pada tahun

2013 dan terdaftar dengan NRP 3513 100 011.

Selama kuliah di Teknik Geomatika, penulis aktif mengikuti organisasi kemahasiswaan. Penulis pernah menjabat sebagai Staff Divisi Minat Bakat Himpunan Mahasiswa Geomatika (HIMAGE-ITS) periode 2014/2015, Koordinator Divisi Karawitan Unit Kegiatan Tari dan Karawitan (UKTK-ITS) periode 2014/2015 dan Ketua Departemen Produksi Unit Kegiatan Tari dan Uarawitan (UKTK-ITS) periode 2015/2016. Selain itu penulis juga aktif mengikuti pelatihan serta kepanitiaan di tingkat jurusan maupun institut.

Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. Brantas Abipraya pada Proyek Waduk Tukul, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur. Penulis menyelesaikan program sarjana di ITS dengan mengambil Tugas Akhir bidang keahlian Geodinamika, dengan judul **“Pemodelan Geoid Kota Surabaya Menggunakan Data Pengukuran Gayaberat Teristris”**.