



TUGAS AKHIR - RM184831

**PERBANDINGAN METODE *DIRECT NUMERICAL INTEGRATION*, *FAST FOURIER TRANSFORM* DAN *LEAST SQUARE COLLOCATION* DALAM MEMODELKAN GEOID KOTA SURABAYA**

WAHYUNAN ANDIKA  
NRP 0331154000051

Dosen Pembimbing  
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





TUGAS AKHIR - RM184831

**PERBANDINGAN METODE *DIRECT NUMERICAL INTEGRATION*, *FAST FOURIER TRANSFORM* DAN *LEAST SQUARE COLLOCATION* DALAM MEMODELKAN GEOID KOTA SURABAYA**

WAHYUNAN ANDIKA  
NRP 0331154000051

Dosen Pembimbing  
Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK GEOMATIKA  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2019

*Halaman Ini sengaja dikosongkan*

FINAL PROJECT - RM184831

**COMPARISON OF DIRECT NUMERICAL  
INTEGRATION, FAST FOURIER TRANSFORM  
AND LEAST SQUARE COLLOCATION METHOD  
FOR MODELLING GEOID MODEL IN SURABAYA**

WAHYUNAN ANDIKA  
NRP 03311540000051

*Supervisor*

Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil, Ph.D

*GEOMATICS ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019*

*Halaman Ini sengaja dikosongkan*

**PERBANDINGAN METODE *DIRECT NUMERICAL INTEGRATION*, *FAST FOURIER TRANSFORM* DAN *LEAST SQUARE COLLOCATION* DALAM MEMODELKAN GEOID LOKAL SURABAYA**

**Nama Mahasiswa** : Wahyunan Andika  
**NRP** : 0331154000051  
**Departemen** : Teknik Geomatika  
**Dosen Pembimbing** : Ira Mutiara Anjasmara ,S.T.,M.Phil,  
Ph.D

**ABSTRAK**

*Earth Gravitational Model 2008* (EGM2008) merupakan model geoid global yang didapatkan dengan kombinasi data gayaberat terestrial, data gayaberat airborne, data satelit gayaberat, dan satelit altimetri. Model geoid EGM2008 untuk wilayah Indonesia memiliki ketelitian yang rendah karena tidak adanya kontribusi data gayaberat lokal. Dalam memodelkan geoid secara gravimetric terdapat 3 metode yang dapat digunakan, yaitu *Direct Numerical Integration* (DNI), *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *Least Square Collocation* (LSC). Kota Surabaya merupakan salah satu kota besar di Indonesia belum memiliki model geoid lokal dikarenakan kurangnya data gayaberat terestris.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan geoid Kota Surabaya dari data gayaberat terestris menggunakan metode DNI, FFT, dan LSC. Dengan kontribusi 143 data gayaberat terestris, untuk geoid yang dihasilkan menggunakan metode DNI mempunyai nilai undulasi maksimal ( $N_{\max}$ ) sebesar 29.844 m, nilai undulasi minimal ( $N_{\min}$ ) sebesar 28.396 m, dan standar deviasi ( $\sigma_N$ ) sebesar 0.321 m. Geoid yang dihasilkan menggunakan metode FFT mempunyai nilai undulasi maksimal ( $N_{\max}$ ) sebesar 29.862 m, nilai undulasi minimal ( $N_{\min}$ ) sebesar 28.409 m, dan standar deviasi ( $\sigma_N$ ) sebesar 0.322 m. Metode LSC menghasilkan geoid dengan nilai undulasi maksimal ( $N_{\max}$ )

sebesar 29.879 m, nilai undulasi minimal ( $N_{\min}$ ) sebesar 28.423 m, dan standar deviasi ( $\sigma_N$ ) sebesar 0.322 m.

.

**Kata kunci** – *EGM2008, model geoid, Surabaya, Direct Numerical Integration, Fast Fourier Transform, Least Square Collocation*



**COMPARISON OF DIRECT NUMERICAL INTEGRATION,  
FAST FOURIER TRANSFORM AND LEAST SQUARE  
COLLOCATION METHOD FOR MODELLING GEOID  
MODEL IN SURABAYA**

**Name** : Wahyunan Andika  
**NRP** : 0331154000051  
**Department** : Teknik Geomatika  
**Supervisor** : Ira Mutiara Anjasmara,S.T.,M.Phil, Ph.D

**ABSTRACT**

*Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) is a global geoid model obtained by a combination of terrestrial gravity, airborne gravity, satellite gravity, and satellite altimetry data. The accuracy of EGM2008 geoid model in Indonesia is still low due the lack of contribution of local gravity data to the model. To develop gravimetric geoid model, there are 3 methods that can be used, namely Direct Numerical Integration (DNI), Fast Fourier Transform (FFT) and Least Square Collocation (LSC). Surabaya is a metropolitan and the second largest city in Indonesia that needs a high accuracy geoid model for the vertical reference system. Currently there is is no local geoid model in Surabaya due to the lack of terrestrial gravity data.*

*The aim of this study is to develop geoid model for Surabaya from terrestrial gravity data by using DNI, FFT, and LSC methods. From 143 terrestrial gravity data, the geoid model from the DNI for has a maximum value ( $N_{max}$ ) of 29.844 m, a minimum value ( $N_{min}$ ) of 28.396 m, a standard deviation ( $\sigma_N$ ) of 0.321 m, the Fast Fourier Transform method has a maximum value ( $N_{max}$ ) of 29.862 m, a minimum value ( $N_{min}$ ) of 28.409 m, standard deviation ( $\sigma_N$ ) 0.322 m, and the Least Square Collocation method has a maximum value ( $N_{max}$ ) of 29.879 m, a minimum value ( $N_{min}$ ) of 28.423 m, a standard deviation ( $\sigma_N$ ) of 0.322 m.*

**Keywords** - *EGM2008, geoid model, Surabaya, Direct Numerical Integration, Fast Fourier Transform, Least Square Collocation*

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**PERBANDINGAN METODE *DIRECT NUMERICAL***  
***INTEGRATION, FAST FOURIER TRANSFORM* DAN**  
***LEAST SQUARE COLLOCATION* DALAM**  
**MEMODELKAN GEOID LOKAL KOTA SURABAYA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik

Pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Geomatika  
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

Oleh :

**Wahyunan Andika**  
NRP. 0331154000051

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil., Ph.D.  
NIP. 198012212003121001



*Halaman Ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini dengan berjalan lancar dan laporan tugas akhir dengan judul “**Perbandingan Metode *Direct Numerical Integration*, *Fast Fourier Transform* dan *Least Square Collocation* Dalam Memodelkan Geoid Lokal Surabaya**” dapat selesai dengan baik dan tepat waktu. Laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu prasyarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Strata-1 pada Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Selama pelaksanaan penelitian tugas akhir dan penyusunan laporan tugas akhir ini, ada banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik secara moral maupun material sehingga penelitian tugas akhir ini dapat berjalan dengan baik, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis Tua Barasa dan Lastuti, adik penulis Camelya Tiya Seisia atas doa dan dukungan yang diberikan selama ini.
2. Ibu Ira Mutiara Anjasmara, S.T., M.Phil, Ph.D selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan dukungan, arahan dan bimbingan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak M. Nur Cahyadi S.T, M.Sc, Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Geomatika ITS serta Bapak Yanto Budisusanto S.T, M.Eng selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Geomatika ITS.
4. Bapak dan ibu Dosen beserta staf Teknik Geomatika ITS yang telah mmberikan ilmu, pengalaman dan bantuan dalam pelaksanaan penelitian Tugas Akhir.
5. Saudara seperjuangan mahasiswa Teknik Geomatika ITS angkatan 2015 (G17) yang telah memberikan dukungan dan bantuan baik secara moril maupun materil.

6. Pihak-pihak yang mendukung dalam penelitian tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Laporan Tugas Akhir ini disusun untuk penunjang dan menambah ilmu pengetahuan kepada pembaca. Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan ini tidak terlepas dari kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun guna dalam penyempurnaan laporan ini kedepannya

Surabaya, 4 Juni 2019

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xviii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xxi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Prinsip Dasar Gayaberat Bumi .....	5
2.1.1 Gayaberat Normal .....	5
2.1.2 Anomali Gayaberat.....	6
2.2 Koreksi Apungan ( <i>Drift</i> ) dan Gaya Berat Observasi.....	7
2.2.1 Koreksi Apungan ( <i>Drift Correction</i> ).....	7
2.2.2 Perhitungan Gayaberat Observasi .....	8
2.3 Reduksi Gayaberat <i>Free-Air</i> .....	9
2.4 Koreksi <i>Free-Air</i> dan Anomali Gayaberat <i>Free-Air</i> .....	11
2.4.1 Koreksi <i>Free-Air</i> .....	11

2.4.2 Anomali Gayaberat <i>Free-Air</i> .....	11
2.5 Koreksi <i>Bouguer</i> Sederhana.....	12
2.6 Koreksi <i>Terrain</i> .....	14
2.7 Anomali <i>Bouguer</i> Komplit.....	15
2.8 Koreksi Atmosferis.....	16
2.9 Kondensasi <i>Helmert</i> .....	16
2.10 Model Geopotensial Global EGM2008.....	17
2.11 Penggunaan Fungsi <i>Stokes</i> .....	18
2.11.1 <i>Direct Numerical Integration</i> .....	20
2.11.2 <i>Fast Fourier Transform</i> .....	21
2.11.3 <i>Least Square Collocation</i> .....	24
2.12 Standar Deviasi.....	31
2.14 <i>Matrix Laboratory</i> (MatLab).....	32
2.15 <i>Generic Mapping Tools</i> (GMT) .....	32
2.16 GRAVSOFTE.....	33
2.17 Teknik <i>Remove Compute Restore</i> .....	33
2.18 Uji Statistika .....	34
2.19 Uji Akurasi .....	36
2.20 Geoid Gravimetrik.....	36
2.21 Penelitian Terdahulu.....	37
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>41</b>
3.1 Lokasi Penelitian .....	41
3.2 Data dan Peralatan.....	42
3.2.1 Data.....	42
3.2.2 Peralatan .....	42



3.3 Metodologi Penelitian .....	42
3.3.1 Tahap Penelitian .....	43
3.3.2 Pengolahan Data .....	45
<b>BAB IV HASIL DAN ANALISA.....</b>	<b>49</b>
4.1 Data Gayaberat Terestris .....	49
4.1.1 Hasil Perhitungan Koreksi Apungan ( <i>Drift</i> ).....	49
4.1.2 Hasil Perhitungan Gayaberat Observasi .....	50
4.1.3 Hasil Perhitungan Anomali <i>Free-Air</i> .....	51
4.2 Data GPS .....	54
4.2.1 Koordinat GPS .....	54
4.3 Data EGM2008 .....	55
4.3.1 Ekstraksi Data EGM2008.....	55
4.4 Geoid Gravimetrik.....	57
4.5 Hasil Pemodelan Geoid dan Perbandingan .....	60
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>65</b>
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	66
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>67</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>69</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>121</b>

*Halaman Ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Geoid dan Ellipsoid referensi .....	7
Gambar 2.2 Reduksi Gayaberat.....	9
Gambar 2.3 Anomali Gayaberat .....	12
Gambar 2.4 Koreksi Lempeng Bouguer dan Koreksi Terrain.....	13
Gambar 2.5 Model EGM 2008 Wilayah Indonesia.....	18
Gambar 3.1 Peta Kota Surabaya.....	41
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	43
Gambar 3.3 Diagram Alir Pengolahan Data.....	45
Gambar 4.1 Grafik Nilai Koreksi <i>Drift</i> Dalam 1 Hari Pengukuran Data Gayaberat Terestris .....	50
Gambar 4.2 Peta Gayaberat Observasi Kota Surabaya .....	51
Gambar 4.3 Peta Anomali Gayaberat <i>Free-Air</i> Kota Surabaya .....	53
Gambar 4.4 Peta Geoid Kota Surabaya dari EGM2008 .....	56
Gambar 4.5 Peta Anomali Gayaberat Kota Surabaya dari EGM2008 .....	56
Gambar 4.6 Peta Geoid Gravimetrik Metode <i>Direct Numerical Integration</i> Kota Surabaya.....	57
Gambar 4.7 Peta Geoid Gravimetrik Metode <i>Fast Fourier Transform</i> Kota Surabaya.....	58
Gambar 4.8 Peta Geoid Gravimetrik Metode <i>Least Square Collocation</i> Kota Surabaya.....	58
Gambar 4.9 Perbandingan Pola pada (a) Peta Topografi Kota Surabaya dengan (b) Peta Geoid Gravimetrik Kota Surabaya Metode <i>Direct Numerical Integration</i> , (c) Peta Geoid Gravimetrik Kota Surabaya Metode <i>Fast Fourier Transform</i> , dan (d) Peta Geoid Gravimetrik Kota Surabaya Metode <i>Least Square Collocation</i> ...	59
Gambar 4.10 Peta Geoid Kota Surabaya Metode DNI.....	60
Gambar 4.11 Peta Geoid Kota Surabaya Metode FFT.....	61
Gambar 4.12 Peta Geoid Kota Surabaya Metode LSC .....	61

*Halaman Ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Tabel Hasil Perhitungan Koreksi <i>Drift</i> Dalam 1 Hari Pengukuran Data Gayaberat Terestris.....	49
Tabel 4.2 Tabel Hasil Koreksi dan Anomali <i>Free-Air</i> .....	52
Tabel 4.3 Tabel Koordinat Data Gayaberat Terestris.....	54
Tabel 4.4 Statistik Data EGM2008 .....	55
Tabel 4.5 Statistik Ketiga Metode Model Geoid Kota Surabaya	60
Tabel 4.6 Hasil Uji T Metode <i>Direct Numerical Integration</i> , <i>Fast Fourier Transform</i> , dan <i>Least Square Collocation</i> .....	62
Tabel 4.7 Hasil Uji Akurasi Metode <i>Direct Numerical Integration</i> , <i>Fast Fourier Transform</i> , dan <i>Least Square Collocation</i> .....	62

*Halaman Ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 .....	69
Lampiran 2 .....	78
Lampiran 3 .....	87
Lampiran 4 .....	96
Lampiran 5 .....	105
Lampiran 6 .....	111
Lampiran 7 .....	116





# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

*Ellipsoid* merupakan model bumi yang digunakan untuk perhitungan matematis. Teknologi *Global Navigation Satellite System* (GNSS) merupakan teknologi survei dan pemetaan yang memiliki peran penting saat ini. Teknologi GNSS dapat digunakan untuk menentukan posisi tiga dimensi dengan beracuan pada ellipsoid global yaitu World Geodetic System 1984 (WGS84). Pengaplikasian GNSS dalam penentuan tinggi yang dihasilkan tidak mempunyai realisasi fisis karena menggunakan *ellipsoid* sebagai bidang referensi. Tinggi yang ideal untuk berbagai pekerjaan adalah tinggi yang mempunyai realisasi fisis dan didefinisikan melalui suatu bidang referensi dalam cakupan global (Sylvester *et al.* 2018). Agar tinggi yang didapatkan dari pengukuran GNSS dapat digunakan secara optimal, maka perlu mengubah tinggi ellipsoid menjadi tinggi yang berealisasi fisis yaitu tinggi ortometrik. Dalam mengubah tinggi ellipsoid menjadi tinggi ortometrik memerlukan data undulasi yang dihasilkan dari model geoid di suatu wilayah (Triarahmadhana, 2014).

Geoid merupakan bidang ekipotensial yang diasumsikan berimpit dengan muka laut rata-rata dengan mengabaikan dinamika permukaan laut dan merepresentasikan bentuk bumi yang sesungguhnya (Heiskanen dan Moritz, 1967). Penentuan Geoid adalah penentuan penyimpangan geoid atau undulasi geoid dan defleksi vertikal terhadap ellipsoid referensi. Nilai undulasi geoid tidak pernah sama di setiap tempat, hal tersebut disebabkan ketidakseragaman sebaran densitas bumi. Nilai undulasi geoid tersebut digunakan untuk memodelkan bentuk geoid yang sebenarnya (Heiskanen dan Moritz, 1967 dalam Suryaningsih, 2017).

Pemodelan potensial gayaberasat bumi yang akurat secara global dalam resolusi tinggi merupakan hal yang mendasar dalam

bidang geodesi, geofisika, oseanografi dan berbagai aplikasinya. Hingga saat ini sudah banyak terdapat model geoid global, salah satunya adalah *Earth Gravitational Model 2008* (EGM2008).

EGM2008 merupakan model 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 2.5 menit. Grid tersebut dibentuk dari kombinasi data terestrial, turunan altimetri dan data gayaberat dari airborne. EGM 2008 dilengkapi dengan derajat hingga 2160 dan terdiri dari koefisien tambahan hingga 2190 (National Geospatial-Intelligence Agency, 2008). Informasi tinggi ortometrik dapat diturunkan dari data model geoid global, sehingga suatu model geoid global dapat dijadikan suatu acuan dalam penentuan informasi tinggi. Akan tetap karena kontribusi pengukuran gayaberat di wilayah Indonesia untuk EGM2008 sangat kurang, maka resolusi dari model geoid EGM2008 di Indonesia juga rendah.

Kondisi saat ini menunjukkan bahwa di Indonesia belum terdapat model geoid yang mempunyai ketelitian yang sangat tinggi. Hal tersebut mendasari bahwa belum tersedianya model geoid sebagai bidang referensi tinggi yang ideal di Indonesia. Pemanfaatan data EGM2008 untuk pemodelan geoid di Indonesia hanya mampu menghasilkan geoid dengan ketelitian 0.441 m (Triarahmadhana, 2014). Padahal untuk keperluan geodetik, model geoid harus mempunyai ketelitian setara 0.010 m (Ramdani, 2008). Rendahnya ketelitian model geoid di Indonesia dapat disebabkan berbagai faktor, misalnya ketersediaan data gayaberat terestris yang terbatas (Triarahmadhana, 2014).

Kota Surabaya sendiri belum memiliki model geoid lokal yang baik. Model geoid lokal Surabaya dapat diperoleh dari data pengukuran gayaberat lokal dan pemodelan geoid gravimetrik melalui pemecahan integral Stokes dengan metode *Direct Numerical Integration* (DNI), *Fast Fourier Transform* (FFT), dan *Least Square Collocation* (LSC), oleh karena itu penulis ingin

memodelkan geoid Kota Surabaya dengan metode DNI, FFT, dan LSC dan membandingkannya.

### 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana memodelkan geoid Kota Surabaya dengan menggunakan metode *Direct Numerical Integration*, *Fast Fourier Transform*, dan *Least Square Collocation*?
- b. Bagaimana perbandingan pemodelan geoid Kota Surabaya dengan menggunakan DNI, FFT dan LSC?

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Studi kasus yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Kota Surabaya.
- b. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data EGM2008 dan data gayaberas terestris Kota Surabaya.
- c. Pemodelan geoid Kota Surabaya menggunakan metode DNI, FFT, dan LSC.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian penelitian ini sebagai berikut:

- a. Mendapatkan model geoid Kota Surabaya menggunakan pemecahan integral *stokes* dengan metode DNI, FFT dan LSC.
- b. Membandingkan model geoid Kota Surabaya yang didapatkan dari metode DNI, FFT dan LSC.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian tugas akhir ini adalah model geoid Kota Surabaya dapat digunakan sebagai referensi tinggi untuk pengukuran topografi dan penelitian yang dilakukan di wilayah Kota Surabaya.

*Halaman Ini sengaja dikosongkan*

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Prinsip Dasar Gayaberat Bumi

#### 2.1.1 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 ( $\gamma$ ), digunakan persamaan Somigliana (Anjasmara, 2019).

$$\gamma = \frac{a\gamma_a \cos^2 \varphi + b\gamma_b \sin^2 \varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \quad (2.1)$$

Keterangan:

$\gamma$  : gayaberat normal di permukaan ellipsoid(mGal)

$a$  : setengah sumbu panjang ellipsoid (m)

$b$  : setengah sumbu pendek ellipsoid (m)

$\gamma_a$  : medan gayaberat normal pada ekuator (mGal)

$\gamma_b$  : medan gayaberat normal pada kutub (mGal)

$\varphi$  : lintang geodetik (derajat)

Untuk mendapatkan nilai gaya berat normal pada ketinggian tertentu di atas ellipsoid ( $\gamma(h)$ ) digunakanlah Taylor's series expansion (Anjasmara, 2019).

$$\gamma(h) = \gamma[1 - 2(1 + f + m - 2f \sin^2 \phi) \frac{h}{a} + 3 \frac{h^2}{a^2}] \quad (2.2)$$

Keterangan:

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

$f$  : penggepengan ellipsoid

$h$  : tinggi ellipsoid (m)

$m$  : perbandingan sentrifugal gravitasi di ekuator (dihitung menggunakan persamaan (2.3))

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} \quad (2.3)$$

Keterangan:

$\omega^2$  : percepatan sudut rotasi bumi ( $\text{rad s}^{-1}$ )

$GM$  : konstanta gravitasi geosentrik bumi.

### 2.1.2 Anomali Gayaberat

Perbedaan kecil diantara potensial gayaberat sebenarnya  $W$  dan potensial gayaberat normal  $U$  dinyatakan sebagai  $T$ , sehingga

$$W(x, y, z) = U(x, y, z) + T(x, y, z) \quad (2.4)$$

keterangan:

$W$  : potensial gayaberat sebenarnya

$U$  : potensial gayaberat normal

$T$  : anomali potensial

$T$  disebut sebagai anomali potensial atau gangguan potensial. Jika dibandingkan geoid dan ellipsoid referensi dengan potensial yang sama  $U_o = W_o$  titik  $P$  pada geoid diproyeksikan pada titik  $Q$  pada ellipsoid seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. Jarak  $PQ$  antara geoid dan ellipsoid disebut tinggi geoid atau undulasi geoid dan dinotasikan sebagai  $N$ .

Mempertimbangkan vektor gayaberat  $g$  pada  $P$  dan vektor gayaberat normal  $\gamma$  pada  $Q$ , maka vektor anomali gayaberat  $\Delta g$  didefinisikan sebagai perbedaan keduanya,

$$\Delta g = g_p - \gamma_p \quad (2.5)$$

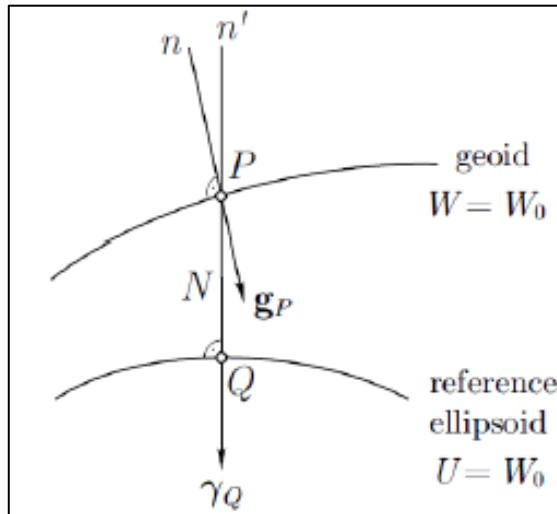
keterangan:

$\Delta g$  : anomali gayaberat

$g_p$  : gayaberat sebenarnya pada titik  $p$

$\gamma_p$  : gayaberat normal pada titik  $p$

Perbedaan besaran antara keduanya disebut anomali gayaberat. Perbedaan arah antara keduanya disebut defleksi vertikal. Untuk representasi anomali gayaberat dapat dilihat pada



Gambar 2. 1 Geoid dan Ellipsoid referensi  
(Anjasmara, 2019)

## **2.2 Koreksi Apungan (Drift) dan Gaya Berat Observasi**

Setelah melalui pengambilan data gayaberat menggunakan gravimeter, data gayaberat masih berupa gayaberat relatif. Selanjutnya perlu dilakukan koreksi apungan (*drift correction*) dan diikatkan ke titik acuan gayaberat agar menjadi gayaberat observasi.

### **2.2.1 Koreksi Apungan (*Drift Correction*)**

Pada gravimeter relatif dengan sistem 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,

$$D_n = \frac{t_n - t_b}{t_{b'} - t_b} x (gb' - gb) \quad (2.6)$$

Keterangan:

$D_n$  : kesalahan drift

$gb$  : nilai gayaberat di awal looping (mGal)

$gb'$  : 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,

$$g_{relk} = g_{rel} - D_n \quad (2.7)$$

Keterangan:

$g_{relk}$  : gayaberat relatif terkoreksi drift (mGal)

$g_{rel}$  : gayaberat relatif hasil konversi (mGal)

$D_n$  : koreksi drift.

### 2.2.2 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,

$$g_{Obs} = g_{base} + (g_{relkn} - g_{relbase}) \quad (2.8)$$

Keterangan:

$g_{Obs}$  : gayaberat observasi di titik pengamatan (mGal)

$g_{base}$  : gayaberat absolut di titik acuan (mGal)

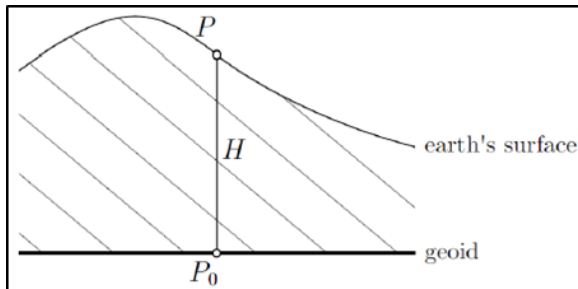


$g_{rel}^{kn}$  : gayaberat terkoreksi drift di titik n (mGal)  
 $g_{rel}^{base}$  : gayaberat relatif titik acuan awal loop (mGal).

### 2.3 Reduksi Gayaberat Free-Air

Gayaberat ( $g$ ) diukur dari permukaan fisik bumi sehingga harus dibedakan dari gayaberat normal  $\gamma$  yaitu gayaberat dari ellipsoid. Nilai  $g$  dapat disamakan dengan nilai muka laut rata-rata (MSL/*Mean Sea Level*) sehingga diperlukan reduksi (pengurangan). Dengan adanya suatu massa di atas permukaan laut maka metode reduksi berbeda-beda bergantung pada massa topografi tersebut. Reduksi gayaberat biasanya disamakan dengan anomali gayaberat dan gangguan gayaberat. Reduksi gayaberat memiliki tiga tujuan utama yaitu:

- penentuan geoid
- interpolasi dan ekstrapolasi gayaberat
- investigasi lempeng bumi.



Gambar 2.2 Reduksi Gayaberat  
(Anjasmara, 2019)

Secara teoritis, untuk mereduksi gayaberat pada geoid dibutuhkan  $\partial g / \partial H$ , gradien vertikal gayaberat. Jika  $g$  merupakan nilai yang diamati dari permukaan bumi maka nilai  $g_0$  pada geoid didapatkan dari *Taylor Expansion*:

$$g_0 = g - \frac{\partial g}{\partial h} H \quad (2.9)$$

keterangan:

$g_0$  : gayaberat pada geoid

$g$  : gayaberat yang diamati dipermukaan bumi

dimana  $H$  merupakan tinggi antara P, titik gayaberat di atas geoid dan  $P_0$  titik yang terhubung pada geoid. Anggap bahwa ada massa di atas geoid dan abaikan semua kecuali yang linier maka didapatkan

$$g_0 = g - \partial gF \quad (2.10)$$

$$\partial gF = -\frac{\partial g}{\partial h} H \quad (2.11)$$

keterangan:

$\partial gF$  : reduksi *free-air*

$g_0$  : gayaberat pada geoid

$g$  : gayaberat yang diamati dipermukaan bumi

merupakan reduksi *free-air* pada geoid. Asumsikan bahwa tidak ada massa di atas geoid yang dapat diinterpretasikan sehingga secara matematis massa tersebut telah dihilangkan sebelumnya, sehingga pada reduksi ini disebut *free-air*. Dalam banyak tujuan praktis cukup digunakan  $\partial g/\partial H$  untuk gradien normal gayaberat (dihubungkan dengan tinggi ellipsoid  $h$ )  $\partial y/\partial h$ , didapatkan

$$\delta g_F = -\frac{\partial Y}{\partial h} H \quad (2.12)$$

$$\Delta g_F = g - \gamma_{(h)} + \delta gF \quad (2.13)$$

keterangan:

$\Delta g_F$  : anomali gayaberat *free-air* (mGal)

$g$  : gayaberat pengukuran (mGal)

$\gamma$  : gayaberat normal (mGal)

$\delta g_F$  : koreksi *free-air* (mGal)

$\partial y/\partial h$  : gradien normal gayaberat

$H$  : tinggi ortometrik

dimana  $H$  merupakan tinggi ortometrik dalam satuan meter (Hofmann, 2005).

## **2.4 Koreksi Free-Air dan Anomali Gayaberat Free-Air**

### **2.4.1 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 ekipotensial gayaberat, artinya bidang yang mempunyai potensial sama di setiap titiknya. Untuk keperluan praktis, geoid dapat didekati oleh permukaan laut rata-rata (Anjasmara, 2019). Persamaan untuk koreksi free-air ditulis pada persamaan (2.14).

$$\delta g_F = 2\gamma(1 + f + m - 2f\sin^2\phi) \frac{H}{a} + 3\gamma \frac{H^2}{a^2} \quad (2.14)$$

Keterangan:

$\delta g_F$  : koreksi free-air (mGal)

$H$  : tinggi ortometrik (m)

$f$  : pengepengan

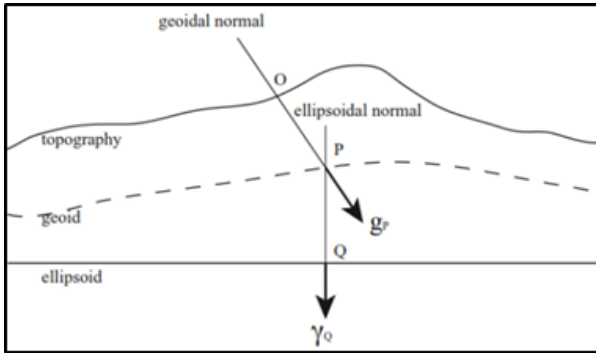
$m$  : *geodetic parameter*

$a$  : *semi major axis*

### **2.4.2 Anomali Gayaberat Free-Air**

Anomali gayaberat ( $\Delta g$ ) merupakan perbedaan skalar antara gayaberat bumi pada geoid ( $g$ ) dan gayaberat normal diatas ellipsoid ( $\gamma$ ) yang dijelaskan pada persamaan (2.11) (Anjasmara, 2019).

$$\Delta g = g_p - \gamma_Q \quad (2.15)$$



Gambar 2.3 Anomali Gayaberat (Anjasmara, 2019)

Keterangan:

$\Delta g$  : anomali gaya berat

$g_p$  : geoidal normal

$\gamma_p$  : elipsoidal normal

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

$$\Delta g_F = g_{obs} - \gamma + \delta g_F \quad (2.16)$$

Keterangan:

$\Delta g_F$  : anomali gayaberat free-air (mGal)

$g_{obs}$  : gayaberat observasi (mGal)

$\gamma$  : gayaberat normal (mGal)

$\delta g_F$  : koreksi free-air (mGal)

### 2.5 Koreksi Bouguer Sederhana

Efek dari material yang terdapat diantara titik observasi gayaberat dan geoid dapat memperbesar nilai gayaberat observasi karena adanya gaya tarik dari massa material tersebut. Koreksi ini

digunakan sebagai pendekatan sederhana dengan mengganti efek dari topografi dengan sebuah lempengan lingkaran yang radiusnya tak hingga dengan ketebalan  $H$ , yaitu tinggi dari stasiun  $P$ . Koreksi lempeng Bouguer dapat dinyatakan sebagai berikut

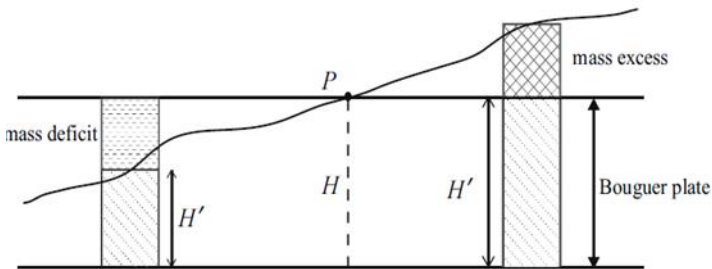
$$\delta g_B = 2\pi G\rho H \quad (2.17)$$

keterangan:

- $\delta g_B$  : koreksi *bouguer*  
 $G$  : *gravitational constant*  
 $\rho$  : massa jenis bumi  
 $H$  : tinggi ortometrik.

Dimana  $\rho$  adalah densitas dari koreksi Bouguer, biasanya digunakan nilai  $2670 \text{ kg. m}^{-3}$ , jika  $H$  dalam meter dan  $\delta g_B$  dalam mGal, maka persamaan 2.17 dinyatakan sebagai berikut:

$$\delta g_B = 0,1119H \quad (2.18)$$



Gambar 2.4 Koreksi Lempeng Bouguer dan Koreksi Terrain  
 (Heiskanen dan Moritz, 1967 dalam Anjasmara, 2019)

Maka anomali *Bouguer* sederhana dinyatakan sebagai berikut:

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

keterangan:

- $\Delta g_B$  : anomali *bouguer* (mGal)  
 $g_{Obs}$  : gayaberat observasi (mGal)  
 $\gamma$  : gayaberat normal (mGal)  
 $\delta g_F$  : koreksi free-air (mGal)  
 $\delta g_B$  : koreksi *bouguer* (mGal)

Nilai koreksi *Bouguer* dikurangkan dari nilai gayaberat observasi karena efek gravitasi dari massa topografi perlu dihilangkan, dalam hal ini topografi direpresentasikan dengan sebuah lempeng.

Jika diperlukan nilai anomali *Bouguer* di wilayah laut, maka perlu digunakan nilai densitas massa yang sesuai pada persamaan 2.17. Untuk mempertahankan kekonsistenan dengan anomali *Bouguer* di darat, lautan di representasikan oleh lempeng *Bouguer* dengan ketebalan yang sama dengan kedalaman dasar laut pada titik observasi, sehingga:

$$\delta g_B = 2\pi G(\rho - \rho_\omega)D \quad (2.20)$$

keterangan:

- $\Delta g_B$  : anomali *bouguer*  
 $G$  : *gravitational constant*  
 $\rho$  : densitas massa bumi  
 $\rho_\omega$  : densitas dari air laut

Dimana densitas dari air laut  $\rho_\omega = 1030 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $D$  adalah kedalaman dasar laut (negatif), dan  $G = 6.67428 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

## **2.6 Koreksi Terrain**

Koreksi *Terrain* merupakan efek kumulatif dari titik P dari koreksi untuk kelebihan dan kekurangan massa. Nilai koreksi tersebut dihitung dan dijumlahkan dari semua deviasi jarak di permukaan bumi yang berhubungan dengan lempeng *Bouguer*. Koreksi *Terrain* diberikan untuk memperhitungkan detail topografi yang ada di atas lempeng *Bouguer*. Koreksi *Terrain*

selalu bernilai positif, baik untuk kelebihan massa maupun kekurangan massa. Hal ini karena:

- a. untuk kelebihan massa di atas stasiun gayaberat: massa tersebut akan menyebabkan tarikan gravitasi ke atas pada titik P yang arahnya berlawanan dengan arah gayaberat (tarikan negatif), maka koreksi yang nilainya positif harus diberikan pada kelebihan massa tersebut
- b. untuk kekurangan massa di bawah stasiun gayaberat, penggunaan lempeng Bouguer sebenarnya telah menghilangkan massa yang tidak ada, sehingga efek gayaberat dari massa tersebut perlu ditambahkan (koreksi positif) untuk menjaga supaya nilai gayaberatnya tetap.

Secara matematis, koreksi Terrain dapat dinyatakan sebagai berikut (sampai orde kedua untuk bumi datar):

$$\delta g_T = \frac{G\rho R^2}{2} \int_{\sigma} \frac{(H' - H)^2}{l^3} d\sigma - \frac{3G\rho R^2}{8} \int_{\sigma} \frac{(H' - H)^2}{l^5} d\sigma \quad (2.21)$$

dimana,  $R$  adalah radius rata-rata bumi,  $\rho$  adalah densitas massa koreksi Bouguer,  $H$  tinggi stasiun  $P$ ,  $H'$  tinggi tiap titik di stasiun  $P$  dengan jarak  $l$  dari stasiun  $P$ . Pada daerah yang mempunyai topografi datar, koreksi Terrain mempunyai nilai tipikal sekitar 0,5 mGal. Untuk wilayah perbukitan nilai tersebut bertambah besar menjadi sekitar 10 mGal, dan untuk wilayah pegunungan sekitar 100 mGal (Heiskanen dan Moritz, 1967 dalam Anjasmara, 2019).

### **2.7 Anomali Bouguer Komplit**

Anomali *Bouguer* komplit dihitung dengan menambahkan koreksi Terrain pada koreksi Bouguer sederhana, sehingga:

$$\Delta g_{CB} = g_{Obs} - \gamma + \delta g_F - \delta g_B + \delta g_T \quad (2.22)$$

keterangan:

$\Delta g_{CB}$  : anomali *bouguer* komplit

$g_{Obs}$  : gayaberat observasi

$\gamma$  : gayaberat normal

$\delta g_F$  : koreksi free-air

$\delta g_B$  : koreksi *bouguer*

$\delta g_T$  : koreksi *terrain*

Permukaan dari anomali *Bouguer* komplit umumnya lebih halus dibandingkan anomali *Free-Air* karena sudah tidak ada lagi efek dari gayaberat yang disebabkan oleh topografi yang bervariasi. Bahkan idealnya, anomali *Bouguer* komplit adalah negatif untuk wilayah daratan dan positif di wilayah lautan, hal ini dapat dijelaskan dalam prinsip isostasi.

## 2.8 Koreksi Atmosferis

Koreksi atmosferis berbentuk polinomial yang sesuai dengan data observasi atmosferis:

$$\delta g_{ac} = 0,871 - 1,02981 \times 10^{-4}H + 5,3105 + 10^{-9}H^2 - 2,1642 \times 10^{-13}H^3 + 9,5246 \times 10^{-18}H^4 + 2,2411 \times 10^{-22}H^5 \quad (2.23)$$

dimana  $\delta g_{ac}$  yaitu koreksi atmosferis dalam mGal, dan  $H$  yaitu tinggi ortometrik dalam meter (Anjasmara, 2019).

## 2.9 Kondensasi Helmert

*Helmert* mengusungkan suatu skema dalam massa topografi dimampatkan ke dalam geoid sehingga total massa dari bumi tidak mengalami perubahan, dan potensial gayaberatnya tidak terganggu. Anomali gayaberat yang terbentuk dari skema tersebut ialah anomali kondensasi (atau anomali *Helmert*). Anomali *Helmert* ditentukan dengan cara mereduksi nilai anomali gayaberat ke atas geoid (melalui koreksi *Free-Air*), menghilangkan efek gaya tarik massa topografi (melalu koreksi *Bouguer* komplit,



$-\delta g_B + \delta g_T$ ), tetapi kemudian mengembalikan massa topografi tersebut sebagai gaya tarik dari massa lempengan silinder dengan radius tak hingga yang sangat tipis.

$$\Delta g_H = g_{obs} - \gamma + \delta g_F - \delta g_B + \delta g_T + \delta g_C \quad (2.24)$$

keterangan:

$\Delta g_H$  : kondensasi *helmert*

$g_{obs}$  : gayaberat observasi

$\gamma$  : gayaberat normal

$\delta g_F$  : koreksi free-air

$\delta g_B$  : koreksi *bouguer*

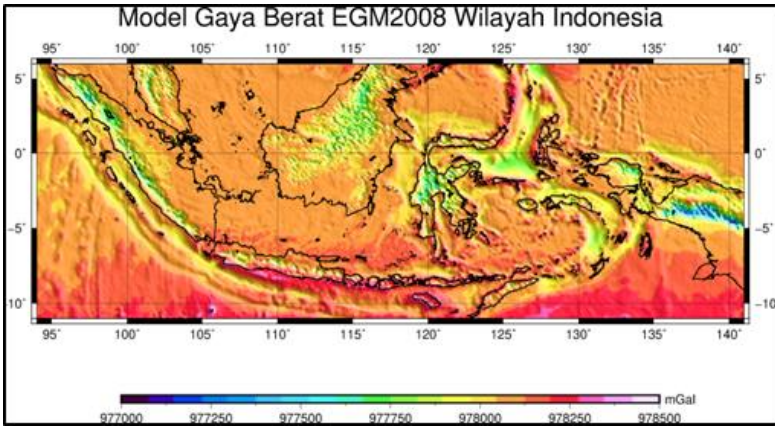
$\delta g_T$  : koreksi *terrain*

$\delta g_C$  : gaya tarik lempeng silinder

dimana  $\delta g_C$  adalah gaya tarik dari lempeng silinder (Anjasmara, 2019).

## **2.10 Model Geopotensial Global EGM2008**

EGM2008 merupakan model 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 2.5 menit. Grid tersebut dibentuk dari kombinasi data terestrial, turunan altimetri dan data gayaberat dari airborne. EGM2008 dilengkapi dengan derajat hingga 2160 dan terdiri dari koefisien tambahan hingga 2190 (*National Geospatial-Intelligence Agency, 2008*). Semua area merupakan data gayaberat yang berkualitas yang didapatkan dari undulasi geoid EGM 2008 dan pengukuran.



Gambar 2.5 Model EGM 2008 Wilayah Indonesia

Gambar 2.5 merupakan hasil pengeplotan data EGM2008 dengan letak astronomis sesuai dengan wilayah Indonesia menggunakan software *Generic Mapping Tools* (GMT).

### 2.11 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 *Bruns* dan fungsi *Stokes*. Formula *Bruns* menunjukkan hubungan antara anomali potensial dan undulasi (Vanicek, 1976). 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. Formula *Bruns* ditunjukkan melalui persamaan berikut (Torge, 2001).

$$N = \frac{T}{\gamma} \quad (2.25)$$

$$T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g s(\psi) d\sigma \quad (2.26)$$

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

$$S(\psi) = \frac{1}{s} - 4 - 6s + 10s^2 - 3(1 - s^2)\ln(s + s^2) \quad (2.27)$$

dimana,

$$\psi = \text{Cos}^{-1} [\sin\varphi \sin\varphi' + \cos\varphi \cos\varphi' \cos(\lambda - \lambda')] \quad (2.28)$$

$$s = \sin \frac{\psi}{2} \quad (2.29)$$

dan,

$$d\sigma = \cos\varphi d\varphi d\lambda \quad (2.30)$$

Keterangan:

$N$  : undulasi geoid (m)

$T$  : anomali potensial

$\gamma$  : gayaberat normal

$R$  : diameter bumi (6371008.7714 m)

$\psi$  : jarak lengkung antara suatu luasan dengan titik anomali potensial

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

$\Delta g$  : anomali gayaberat di titik grid

$d\sigma$  : spherical surface element

$\varphi$  : lintang titik acuan (derajat)

$\varphi'$  : lintang di titik grid (derajat)

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

$\lambda$  : bujur titik acuan (derajat)

$\lambda'$  : bujur di titik grid (derajat)

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

Persamaan (2.25) dan (2.26) menghasilkan persamaan (2.31) yang disebut fungsi *Stokes* (Heiskanen dan Moritz 1967).

$$N\Delta g = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma \quad (2.31)$$

keterangan:

- $N$  : undulasi geoid (m)  
 $R$  : diameter bumi (6371008.7714 m)  
 $\gamma$  : gayaberat normal  
 $\Delta g$  : anomali gayaberat  
 $S(\psi)$  : *Stoke's Kernel*

Terdapat banyak metode dalam evaluasi praktis integral Stokes. Beberapa diantaranya membutuhkan nilai anomali gayaberat yang diketahui dalam bentuk grid yang tetap untuk mendapatkan tinggi geoid pada suatu titik. Berikut beberapa metode dalam penentuan geoid (Anjasmara, 2019).

### 2.11.1 *Direct Numerical Integration*

Metode ini merupakan metode yang paling sederhana yaitu dengan mengubah integral Stokes menjadi penjumlahan ganda dan dihitung secara langsung. 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,

$$N\Delta g = \frac{R}{4\pi\gamma} \Delta\phi\Delta\lambda \sum \phi' \sum \lambda' \Delta g(\phi', \lambda') S(\psi) \cos\phi' \quad (2.32)$$

keterangan:

- $N$  : undulasi geoid (m)  
 $R$  : diameter bumi (6371008.7714 m)  
 $\gamma$  : gayaberat normal  
 $\Delta g$  : anomali gayaberat

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

$\Delta\phi$  : resolusi grid *latitude*

$\Delta\lambda$  : resolusi grid *longitude*

$\phi'$  : *latitude* data gayaberat terestris

Untuk mendapatkan tinggi geoid diseluruh titik grid maka digunakan formula

$$N(\phi, \lambda) = \sum \phi' \sum \lambda' \{N_{\phi, \lambda}\} \quad (2.33)$$

keterangan:

$N(\phi, \lambda)$ : undulasi semua titik

$\phi'$  : *longitude* grid

$\lambda'$  : *latitude* grid

$N_{\phi, \lambda}$  : undulasi suatu titik

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

### 2.11.2 *Fast Fourier Transform*

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 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:

## a. 1D-FFT diatas bidang lengkung

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

$$N_{\varphi}(\lambda) = \frac{R}{4\pi\gamma} \Delta\varphi\Delta\lambda F_1^{-1} \left\{ \sum \varphi' F_1 [S_{\varphi}(\Delta\lambda)] F_1 [\Delta g_{\varphi'}(\lambda') \cos\varphi'] \right\} \quad (2.34)$$

keterangan:

- $N$  : undulasi geoid (m)  
 $R$  : diameter bumi (6371008.7714 m)  
 $\gamma$  : gayaberat normal  
 $\Delta g$  : anomali gayaberat  
 $S$  : *Stokes kernel*  
 $\Delta\phi$  : resolusi grid *latitude*  
 $\Delta\lambda$  : resolusi grid *longitude*  
 $\phi'$  : *latitude* data gayaberat terestris  
 $F_1$  : 1D-FFT  
 $F_1^{-1}$  : *inverse* 1D-FFT

Dimana  $F_1$  merupakan 1D-FFT dan  $F_1^{-1}$  adalah inverse-nya. Persamaan (2.18) 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.

## b. 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*:

$$N_{\varphi}(\lambda) = \frac{R}{4\pi\gamma} \Delta\varphi\Delta\lambda F_2^{-1} \left\{ \sum \varphi' F_2 [S_{\varphi}(\Delta\lambda)] F_2 [\Delta g_{\varphi'}(\lambda') \cos\varphi'] \right\} \quad (2.35)$$

$N$	: undulasi geoid (m)
$R$	: diameter bumi (6371008.7714 m)
$\gamma$	: gayaberat normal
$\Delta g$	: anomali gayaberat
$S$	: <i>Stokes kernel</i>
$\Delta\phi$	: resolusi grid <i>latitude</i>
$\Delta\lambda$	: resolusi grid <i>longitude</i>
$\phi'$	: <i>latitude</i> data gayaberat terestris
$F_2$	: 2D-FFT
$F_2^{-1}$	: <i>inverse</i> 2D-FFT.

Dimana  $S'$  adalah pendekatan *Kernel Stokes*,  $F_2$  merupakan 2D-FFT dan  $F_2^{-1}$  adalah *inverse*-nya. Kesalahan bisa mencapai nilai lebih dari 10 cm, yang semata-mata disebabkan oleh pendekatan rumus dan dapat dihindari dengan menggunakan metode yang melibatkan 1D-FFT.

c. 2D-FFT pada 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 konform. Dalam kedua kasus, area integrasi merupakan bidang datar. Pada pendekatan bidang datar, integral Stokes-nya dijelaskan sebagai berikut,

$$N_{x,y} = \frac{R}{4\pi\gamma} \int y' \int x' \frac{1}{l} \Delta g(x', y') dx' dy' \quad (2.36)$$

keterangan:

$N$	: undulasi geoid (m)
$R$	: diameter bumi
$\gamma$	: gayaberat normal
$y'$	: koordinat y kartesian grid

$x'$  : koordinat x kartesian grid

$l$  : jarak

$\Delta g$  : anomali gayaberat

dimana,

$$l = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (2.37)$$

$l$  : jarak

$x'$  : koordinat x kartesian grid

$y'$  : koordinat y kartesian grid

$x$  : koordinat x kartesian data

$y$  : koordinat y kartesian data

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.

### 2.11.3 *Least Square Collocation*

Teori *least square collocation* digunakan pada geodesi fisik untuk solusi nilai batas gravimetrik. Pendekatan Wiener-Hopf menggunakan prediksi kuadrat terkecil untuk interpolasi anomali gayaberat pada bidang terestrial (radius R) (Moritz, 1978 dalam Mputhi, 2016). Kasus parametrik penyesuaian kuadrat terkecil dapat dinyatakan sebagai berikut (Moritz, 1972 dalam Mputhi, 2016):

$$x = AX + n \quad (2.38)$$

keterangan:

$x$  : vektor pengamatan

$A$  : matriks desain yang berisi koefisien yang tidak diketahui dengan ukuran  $(n \times u)$

$X$  : vektor solusi atau vektor parameter yang tidak diketahui dengan ukuran  $(u \times 1)$

$n$  : vektor residual dengan ukuran  $(n \times 1)$ .



Interpolasi kuadrat terkecil menggunakan rumus prediksi Wiener-Kolmogorov dari teori proses stokastik; ini dapat dinyatakan sebagai berikut (Moritz, 1972 dalam Mputhi, 2016):

$$s_p = [C_{P1} C_{P2} \dots C_{Pn}] \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \dots & \bar{C}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C}_{n1} & \dots & \bar{C}_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Ini bisa disingkat menjadi persamaan 2.40

$$s_p = C_{pi} \bar{C}_{ij}^{-1} l_i \quad (2.40)$$

dimana:

$$l = s + n = x - AX \quad (2.41)$$

keterangan:

$s_p$  : proses stokastik

$AX$  : efek pengamatan sistematis

$C_{pi}$  : vektor kovarian fungsi sinyal

$\bar{C}_{ij}$  : *cross covariance matrix*, antara nilai interpolasi dan pengamatan.

a. Interpolasi anomali gayaberat menggunakan LSC

Anomali gayaberat pada bidang lengkung dapat diinterpolasi dari anomali gayaberat yang diukur di permukaan bumi menggunakan teknik interpolasi kuadrat terkecil. Ini dapat dinyatakan sebagai berikut (Moritz, 1978 dalam Mputhi, 2016).

$$\Delta g_p = C_{pi} \bar{C}_{ij}^{-1} \Delta g_i \quad (2.42)$$

Keterangan:

$\Delta g_p$  : anomali gayaberat pada bidang lengkung

$\Delta g_i$  : anomali gayaberat yang diukur di permukaan bumi

$C_{pi}$  : vektor kovarian fungsi anomali gayaberat

$\bar{C}_{ij}$  : *error covariance matrix*, matriks identitas digunakan dalam kasus ini karena tidak ada rincian lebih lanjut yang diberikan untuk anomali gravitasi yang diamati

Dalam hal ini efek sistematis diasumsikan nol ( $AX = 0$ ). Fungsi kovarians dari gangguan potensial terhadap titik data di luar bidang lengkung dapat dinyatakan pada persamaan 2.43 (Moritz, 1972 dalam Mputhi, 2016):

$$K(P, Q) = \sum_{n=2}^{n_{max}} k_n \left( \frac{R^2}{r_p r_q} \right)^{(n+1)} \bar{P}_n(\text{Cos}\psi pq) \quad (2.43)$$

keterangan:

$\bar{P}_n(\text{Cos}\psi pq)$  : Fungsi polinomial Legendre yang sepenuhnya dinormalisasi

$\psi pq$  : *spherical distance* antara 2 titik di bidang lengkung

$r_p r_q$  : ellipsoid lokal antara titik p dan q

$k_n$  : koefisien yang dihitung dari fungsi koefisien harmonik

$$k_n = \sum_{m=0}^n (a_{nm}^{-2} + b_{nm}^{-2}) \quad (2.44)$$

keterangan:

$a_{nm}^{-2}, b_{nm}^{-2}$  : koefisien harmonik dinormalisasi

*Spherical distance* dihitung menggunakan persamaan 2.45,

$$\psi_{PQ} = \cos^{-1} [\cos\varphi_P \cdot \cos\varphi_Q + \sin\varphi_P \cdot \sin\varphi_Q \cdot \cos(\lambda_Q - \lambda_P)] \quad (2.45)$$

Fungsi kovarians yang sesuai dari anomali gayaberat dapat dinyatakan sebagai berikut (Moritz, 1970 dalam Mputhi, 2016):

$$C(P, Q) = cov(\Delta g_P, \Delta g_Q) \quad (2.46)$$

maka,

$$C(P, Q) = \sum_{n=2}^{n_{max}} c_n \left( \frac{R^2}{r_p r_q} \right)^{(n+2)} \overline{P}_n(\text{Cos}\psi pq) \quad (2.47)$$

$$c_n = \left( \frac{n-1}{R} \right)^2 k_n \quad (2.48)$$

keterangan:

$\overline{P}_n(\text{Cos}\psi pq)$  : Fungsi polinomial Legendre yang sepenuhnya dinormalisasi

$\psi pq$  : *spherical distance* antara 2 titik di bidang lengkung

$r_p r_q$  : ellipsoid lokal antara titik p dan q

$k_n$  : koefisien yang dihitung dari fungsi koefisien harmonik

$c_n$  : Koefisien dihitung dari koefisien harmonic

Anomali gayaberat terukur diasumsikan tidak bersalah dalam kasus ini. Fungsi kovarians  $K(P, Q)$  dan  $C(P, Q)$  dapat saling terkait dengan, ini menunjukkan bahwa satu fungsi dapat dihitung dari yang lain (Moritz, 1972 dalam Mputhi, 2016).

Anomali gayaberat yang diinterpolasi dapat dinyatakan dalam bentuk matriks menggunakan interpolasi kuadrat terkecil pada persamaan 2.49

$$\Delta g_p^* = [C_{P1} C_{P2} \dots C_{Pn}] \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \dots & \bar{C}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{C}_{n1} & \dots & \bar{C}_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta g_1 \\ \vdots \\ \Delta g_n \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Keterangan:

$\Delta g_p^*$  : interpolasi rata-rata anomali gayaberat grid

$\Delta g_i$  : anomali gayaberat yang diukur di permukaan bumi

$C_{pi}$  : vektor kovarian fungsi anomali gayaberat

$\bar{C}_{ij}$  : *error covariance matrix*, matriks identitas digunakan dalam kasus ini karena tidak ada rincian lebih lanjut yang diberikan untuk anomali gravitasi yang diamati

Kondisi penyesuaian kuadrat terkecil adalah untuk menentukan model untuk meminimalkan jumlah kuadrat residu (koreksi) untuk jumlah yang diamati. Residual dari titik data yang diukur dinyatakan sebagai berikut:

$$V = \Delta g_p - \Delta g_p^* \quad (2.50)$$

Keterangan:

$\Delta g_p$  : rata-rata anomali gayaberat pengamatan pada grid

$\Delta g_p^*$  : interpolasi rata-rata anomali gayaberat grid.

#### b. Undulasi geoid menggunakan LSC

Evaluasi integral *Stokes* memberikan koreksi terhadap ketinggian geoid yang dihitung dari koefisien *spherical harmonic*. Ini mengurangi kesalahan pengamatan yang disediakan oleh data gayaberat. Sebagian besar kesalahan ini dapat dikurangi menggunakan model geopotensial global tingkat tinggi (Featherstone dan Vella, 1999).

Semua jumlah ini, seperti anomali gayaberat, ketinggian geoidal, defleksi vertikal dan lain-lain, dapat diturunkan dari potensial diferensial T. Menggunakan operasi linear seperti diferensiasi atau formula integral. Dengan cara yang sama semua fungsi kovarians sinyal dapat diturunkan dari satu fungsi kovarians dasar, fungsi kovarians dari potensi diferensial oleh

operasi linier yang sesuai (Moritz, 1972 dalam Mputhi, 2016). Ketinggian geoid yang dihitung dari anomali gayaberat oleh integral Stokes seperti yang diungkapkan oleh persamaan 2.26 dapat disingkat dalam bentuk matriks sebagai (Moritz, 1972).

$$N_P = L_{PA}\Delta g_A \quad (2.51)$$

Keterangan:

$L_{PA}$  : operator linier yang bertindak untuk mengubah anomali gayaberat menjadi ketinggian geoid, dalam hal ini menunjukkan penerapan integral Stokes

$\Delta g_A$  : anomali gayaberat

$N_P$  : tinggi geoid pada permukaan

Kovarians antara anomali gravitasi pada titik P dan tinggi geoidal pada titik Q dapat dihitung dengan menggunakan hukum propagasi ko-varian (Moritz, 1972 dalam Mputhi, S.M., 2016), dapat disingkat sebagai berikut:

$$cov(\Delta g_P, N_Q) \quad (2.52)$$

Operator yang menentukan tinggi geoidal dari T pada persamaan 2.25 diterapkan pada fungsi kovarians dari T ( $K(P, Q)$ ), dapat dinyatakan sebagai berikut (Moritz, 1972 dalam Mputhi, 2016)

$$N_Q = \frac{1}{\gamma} K(P, Q) \quad (2.53)$$

Keterangan:

$N_Q$  : undulasi geoid

$\gamma$  : gayaberat normal

$K(P, Q)$  : kovarian fungsi

Lalu menerapkan operasi yang menentukan anomali gayaberat dari T, dapat dinyatakan pada persamaan 2.54 (Moritz, 1972 dalam Mputhi, 2016).

$$\Delta g_p = -\frac{\partial}{\partial r_p} \left( \frac{1}{\gamma} K(P, Q) \right) - \frac{2}{R} \left( \frac{1}{\gamma} K(P, Q) \right) \quad (2.54)$$

Keterangan:

- $r_p$  : ellipsoid lokal antara titik p  
 $\Delta g_p$  : anomali gayaberat pada titik p  
 $R$  : diameter bumi (6371008.7714) m  
 $K(P, Q)$  : kovarian fungsi

Oleh karena itu, fungsi kovarians antara anomali gayaberat dan ketinggian geoidal dapat dinyatakan sebagai berikut (Moritz, 1972 dalam Mputhi, 2016):

$$\text{cov}(\Delta g_p, N_Q) = -\frac{1}{\gamma'} \frac{\partial K(P, Q)}{\partial r_p} - \frac{2}{\gamma' R} K(P, Q) \quad (2.55)$$

keterangan:

- $\text{cov}(\Delta g_p, N_Q)$  : kovarians gangguan potensial  
 $\gamma$  : gayaberat normal  
 $R$  : diameter bumi (6371008.7714) m

Selanjutnya, setelah turunan dari fungsi kovarians gangguan potensial sehubungan dengan, persamaan 2.55 dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{cov}(\Delta g_p, N_Q) = -\frac{1}{\gamma'} G_n - \frac{2}{\gamma' R} K(P, Q) \quad (2.56)$$

dimana,

$$G_n = \frac{\partial K(P, Q)}{\partial r_p} = - \sum_{n=2}^{n_{max}} k_n \cdot (n+1) \left( \frac{R^2}{r_p r_Q} \right)^n \cdot \left( \frac{R^2}{r_p^2 r_Q} \right) \bar{P}_n(\cos \psi_{PQ}) \quad (2.57)$$

keterangan:

- $\text{cov}(\Delta g_p, N_Q)$  : kovarians gangguan potensial

$\gamma$	: gayaberat normal
$R$	: diameter bumi (6371008.7714) m
$K(P, Q)$	: kovarian fungsi
$n$	: jumlah data

Ini memberikan bukti bahwa ketinggian geoid dapat dihitung dengan menggunakan teknik *least square collocation*. Fungsi kovarians antara anomali gayaberat dan ketinggian geoidal digunakan untuk vektor  $C_{pi}$ . Matriks kovarian silang  $\bar{C}_{ij}$  ditentukan oleh residu antara anomali gayaberat yang diinterpolasi dan anomali gayaberat yang diamati. Oleh karena itu, tinggi geoid dapat dihitung dari *least square collocation* menggunakan persamaan 2.40 sebagai berikut:

$$N_p = C_{pi} \bar{C}_{ij}^{-1} \Delta g_p^* \quad 2.58$$

keterangan:

$C_{pi}$	: vektor kovarian fungsi sinyal
$\bar{C}_{ij}$	: <i>cross covariance matrix</i> , antara nilai interpolasi dan pengamatan
$\Delta g_p^*$	: interpolasi rata-rata anomali gayaberat grid
$N_p$	: undulasi geoid

## **2.12 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 ( $\tau$ ) dari pengamatan. Apabila nilai standar deviasi yang kecil, berarti data tersebut teliti (Hidayat, 2014 dalam Widhipermana, 2017). Standar deviasi dinyatakan dengan rumus berikut (Borge, 2013),

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.59)$$

Keterangan,

$\sigma$  : standar deviasi

$x_i$  : data ke- $i$

$\mu$  : rata-rata data

$n$  : jumlah data

### **2.14 Matrix Laboratory (MatLab)**

*Matrix Laboratory* (MatLab) merupakan bahasa pemrograman yang digunakan untuk komputasi teknik. Bahasa ini mengintegritaskan proses komputasi, visualisasi, dan pemrograman dengan *environment* yang mudah digunakan dengan mengekspresikan masalah dan solusi ke dalam notasi matematika. Kegunaan umum dari MatLab diantaranya untuk matematika dan komputasi, pengembangan algoritma, akuisisi data, pemodelan dan simulasi, pembuatan *prototype*, analisis data, visualisasi, dan pengembangan aplikasi termasuk *Graphic User Interface* (GUI).

MatLab adalah sebuah sistem interaktif yang elemen data dasarnya adalah *array* yang tidak membutuhkan pengaturan dimensi. Hal ini memungkinkan penyelesaian banyak masalah komputasi teknik, terutama yang berhubungan dengan formulasi matriks dan vektor. Dalam beberapa kasus, dapat juga dilakukan penulisan program dalam bahasa seperti C dan Fortran. Awalnya Matlab dibuat untuk menyediakan akses yang mudah untuk pengembangan *software* matriks dalam proyek LINPACK dan EISPACK. Saat ini, MatLab menggabungkan LAPACK dan BLAS *library* untuk komputasi matriks. Di lingkungan universitas, MatLab digunakan sebagai alat pembelajaran standard untuk tahap pengenalan dan lanjut dalam matematika, teknik, dan sains (The MathWorks, 2018).

### **2.15 Generic Mapping Tools (GMT)**



*Generic Mapping Tools* merupakan kumpulan *open source* sebanyak 80 *command line* data geografis dan kartesian, dan menghasilkan hasil sebuah gambar dalam format *.ps(post script)* dimana membutuhkan *open source* lainnya yaitu *Ghost Script*, *Ghost Script View*, dan GNU AWK. GMT menyediakan lebih dari 30 proyeksi peta dan transformasi yang membutuhkan data seperti data garis pantai, sungai, dan batas negara. GMT dikembangkan dan dikelola oleh Paul Wessel, Walter H. F. Smith, Remko Sharroo, Joaquim Luis dan Florian Wobbe dengan bantuan dari serangkaian sukarelawan global, dan didukung oleh *National Science Foundation* (Wessel *et al*, 2013).

## **2.16 GRAVSOF**

GRAVSOF merupakan program untuk melakukan operasi dasar geodesi fisik, dan melakukan aritmatika dasar dan penanganan *file* data, baik dalam format titik atau grid. Terdapat 28 *main command line* untuk perhitungan geodesi fisik. GRAVSOF bukan *freeware* dan pengguna program perlu menandatangani perjanjian bahwa program tidak boleh didistribusikan ulang. Lisensi komersial tersedia untuk sebagian atau semua program. Untuk penggunaan ilmiah program disediakan gratis. Untuk melakukan *plotting* data yang telah di proses di GRAVSOF perlu menggunakan *software* GMT dan Surfer (Forsberg dan Tscheming, 2008).

## **2.17 Teknik Remove Compute Restore**

Teknik *Remove Compute Restore* (RCR) membagi dua tahap hitungan geoid, yaitu tahap *remove* dan tahap *restore*. Tahap *remove* yaitu menghilangkan pengaruh anomali EGM2008 pada perhitungan residual anomali gayaberas, sedangkan tahap *restore* pada penggunaan undulasi model geoid global EGM2008 (MGG) pada perhitungan geoid. Teknik RCR dijelaskan pada persamaan (2.60) (Hofmann-Wellenhof, 2005).

$$N = N_{MGG} + \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} (\Delta g_F - \Delta g_{MGG}) S(\psi) d\sigma \quad (2.60)$$

Keterangan :

$N$  : undulasi geoid lokal (m)

$N_{MGG}$  : undulasi geoid global (m)

$\Delta g_{MGG}$  : anomali gayaberat model global (mGal)

$\gamma$  : gayaberat normal

### **2.18 Uji Statistika**

Uji Statistik memiliki tiga macam hipotesis berdasarkan komparatif dua sampel dan yang digunakan tergantung pada kalimat dalam perumusan hipotesis (Sugiyono, 2007), berikut ini tiga macam pengujian,

a. Uji Dua Pihak

Uji dua pihak digunakan untuk melihat perbedaan atau kesamaan dari sampel A dengan sampel B, hipotesis yang digunakan adalah:

$$H_0: A_1 = B_2 \quad (2.61)$$

$$H_1: A_1 \neq B_2 \quad (2.62)$$

b. Uji Satu Pihak

Uji satu pihak digunakan untuk melihat apakah nilai perbandingan lebih kecil atau lebih besar dari sampel A dengan sampel B, hipotesis yang digunakan yaitu,

$$H_0: A_1 \geq B_2 \text{ atau } H_0: A_1 \leq B_2 \quad (2.63)$$

$$H_1: A_1 > B_2 \text{ atau } H_1: A_1 < B_2 \quad (2.64)$$

keterangan:

- $H_0$  : hipotesis awal  
 $H_1$  : hipotesis tandingan  
 $A_1$  : sampel A  
 $B_2$  : sampel B

Statistik parametris yang digunakan untuk menguji hipotesis komparatif rata-rata dua sampel bila datanya berbentuk interval atau rasio adalah uji t. Rumusan uji t yang digunakan untuk menguji hipotesis komparatif dua sampel yang independen ditunjukkan pada persamaan 2.65 dan 2.66,

*Separated Varians*

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_1}}} \quad (2.65)$$

*Polled Varians*

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - n_2)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (2.66)$$

keterangan:

- $\bar{x}_1$  : rata-rata sampel 1  
 $\bar{x}_2$  : rata-rata sampel 2  
 $s_1^2$  : varian sampel 1  
 $s_2^2$  : varian sampel 2.

Uji t yang akan digunakan dapat dipilih berdasarkan kriteria sebagai berikut:

- bilanya jumlah anggota sampel ( $n_1 = n_2$ ) dan varian homogen ( $s_1^2 = s_2^2$ ), maka dapat digunakan uji t, baik yang *separated* maupun *polled varians*, untuk mengetahui t table digunakan  $dk$ (derajat kepercayaan) yang besarnya  $dk = n_1 + n_2 - 2$

- b. bila jumlah anggota sampel ( $n_1 \neq n_2$ ) dan varian homogen ( $s_1^2 = s_2^2$ ), digunakan uji t *polled varians*, besarnya  $dk = n_1 + n_2 - 2$
- c. bila jumlah anggota sampel ( $n_1 = n_2$ ) dan varian tidak homogen ( $s_1^2 \neq s_2^2$ ) dapat digunakan baik *separated* dan *polled varians* dengan nilai  $dk = n_1 - 1$  atau  $dk = n_2 - 1$
- d. bila jumlah anggota sampel ( $n_1 \neq n_2$ ) dan varian tidak homogen ( $s_1^2 \neq s_2^2$ ) digunakan persamaan *separated varians*. Nilai t sebagai pengganti nilai t tabel dogitung dari selisih harga t tabel dengan besarnya nilai nilai  $dk = n_1 - 1$  dan  $dk = n_2 - 1$ , dbagi menjadi dua dan kemudian ditambah dengna nilai t terkecil.

Derajat kepercayaan menggunakan taraf kesalahan 5%.

### 2.19 Uji Akurasi

Uji akurasi digunakan untuk mengetahui data yang di dapat dari pengukuran akurat terhadap data yang sebenarnya, dengan mencari nilai selang kepercayaan rata-rata dari data yang akan diuji akurasinya (Ulama, 2019).

Uji akurasi menggunakan nilai batas atas dan batas bawah sebagai parameter akurasi yang ditunjukkan pada persamaan 2.67,

$$BA = \bar{x} + z \frac{\alpha \cdot sd}{2 \sqrt{n}} \quad (2.67)$$

$$BB = \bar{x} - z \frac{\alpha \cdot sd}{2 \sqrt{n}} \quad (2.68)$$

keterangan:

- $\bar{x}$  : rata-rata yang diuji  
 $z$  : nilai tabel z  
 $\alpha$  : tingkat kesalahan  
 $sd$  : standar deviasi data yang di uji  
 $\sqrt{n}$  : jumlah data

### 2.20 Geoid Gravimetrik

Geoid gravimetrik, seperti yang digunakan oleh 'ahli geodesi klasik', adalah permukaan ekuipotensial spesifik yang dapat dihitung dari pengukuran gravitasi melalui integral *Stokes*. Definisi geoid ini diwujudkan melalui formulasi dan solusi *Stokes* dari masalah nilai batas geodesi fisik. Definisi klasik ini adalah dari kepentingan mendasar dalam ilmu geodesi, oseanografi, dan geofisika (Vanicek dan Christou, 1994 dalam Featherstone, 1998). Peningkatan dalam aspek komputasi dan teoritis dari aspek geoid gravimetrik mempunyai banyak kemajuan telah dicapai dalam bidang ini selama dekade terakhir. Namun, penentuan geoid gravimetrik tidak sempurna karena terdapat sejumlah sumber kesalahan yaitu (Featherstone, 1998),

- a. Teori dan persamaan yang digunakan dalam penentuan gravimetri geoid berisi beberapa perkiraan dan asumsi, yang menghalangi solusi geoid yang paling akurat.
- b. Koefisien geopotensial global menggunakan dasar untuk perhitungan geoid regional yang mengandung kesalahan yang memiliki panjang gelombang panjang dan tidak dapat sepenuhnya dikoreksi oleh data gravitasi lokal (Vanicek dan Featherstone, 1998 dalam Featherstone, W, 1998).
- c. Data gayaberat dan ketinggian terestrial yang digunakan untuk menghitung anomali gayaberat juga salah, yang merambat ke semua komponen geoid gravimetrik. Misalnya, pengukuran gravitasi Australia dikumpulkan terutama untuk tujuan eksplorasi sumber daya dan ketinggiannya ditentukan dengan menggunakan metode barometrik yang tidak akurat, yang membuat anomali gravitasi tidak sesuai.

### **2.21 Penelitian Terdahulu**

Penelitian yang dilakukan oleh Triarahmadhana (2014) mengenai pemodelan geoid D.I.Yogyakarta menggunakan metode *fast fourier transform* dan *least square collocation*. Penelitian tersebut membahas bagaimana model geoid lokal D.I.Yogyakarta yang dihasilkan menggunakan dua macam metode yaitu *fast fourier transform* (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.

Penelitian yang dilakukan oleh Widi-permana (2017) mengenai pemodelan geoid lokal Surabaya menggunakan data pengukuran gaya berat terestris. Penelitian tersebut membahas bagaimana model geoid lokal Surabaya yang dihasilkan menggunakan data gaya berat terestris dengan metode *direct numerical integration*. 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 di utara Surabaya tanahnya disusun oleh tanah alluvial (sedimen) yang kepadatannya rendah. 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. 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.

Penelitian yang dilakukan oleh Suryaningsih E. (2017) mengenai studi kesesuaian penggunaan geoid global EGM 2008 untuk keperluan lokal di Surabaya dengan membandingkan data EGM 2008 dan data in situ. Penelitian tersebut membahas tingkat kesesuaian penggunaan EGM 2008 untuk keperluan lokal di Surabaya. Anomali gayaberat *free air* yang didapatkan dari EGM

2008 di Kota Surabaya berkisar antara -30 mGal hingga 10 mGal. Lebih dari setengah dari wilayah Kota Surabaya memiliki anomali gayaberat *free air* yang kecil (negatif) dan sangat tidak bervariasi. Selisih data anomali gayaberat *free air* pengukuran dan EGM 2008 berkisar antara 0-21 mGal. Selisih yang besar disebabkan kurangnya titik pengukuran serta variasi topografi area tersebut. Selisih anomali *free air* data insitu dan data EGM 2008 pada titik pengukuran maka EGM 2008 cukup sesuai dengan rata-rata selisih 5.727 mGal dan presentase data yang sesuai adalah 66.67%. Dari hasil grdding yang dilakukan oleh Suryaningsih E. didapatkan nilai rata-rata perbedaan selisih 10.350 mGal dan presentase data yang sesuai 64.10%.

Dalam penelitian ini pemodelan geoid Kota Surabaya menggunakan metode DNI, FFT, dan LSC yang kemudian hasil geoid ketiga metode tersebut dibandingkan untuk mengetahui metode yang mempunyai ketelitian yang paling baik.

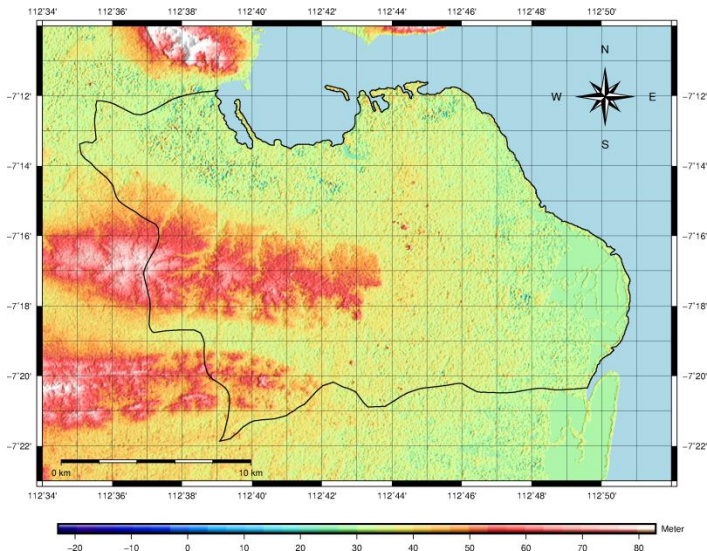
*Halaman Ini sengaja dikosongkan*



## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan di Kota Surabaya dengan letak astronomis di  $07^{\circ}09'$  sampai  $07^{\circ}21'$  Lintang Selatan dan  $112^{\circ}36'$  sampai  $112^{\circ}57'$  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 (Badan Pusat Statistik Kota Surabaya, 2018). Surabaya sendiri memiliki luas wilayah seluruhnya kurang lebih  $326.36 \text{ km}^2$  yang terbagi 31 Kecamatan, dan 163 Desa/Kelurahan. Surabaya sendiri mempunyai berbatasan dengan Selat Madura disebelah utara dan timur, berbatasan dengan Kabupaten Sidoarjo disebelah selatan, dan berbatasan dengan Kabupaten Gresik disebelah barat.



Gambar 3.1 Peta Topografi Kota Surabaya

### 3.2 Data dan Peralatan

#### 3.2.1 Data

Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini antara lain:

- a. Data 143 titik pengukuran gayaberat, penelitian Anjasmara (2018) pada tahun Oktober 2017 dan November 2018.
- b. Data Model Geopotensial Global EGM2008
- c. Data GPS

#### 3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

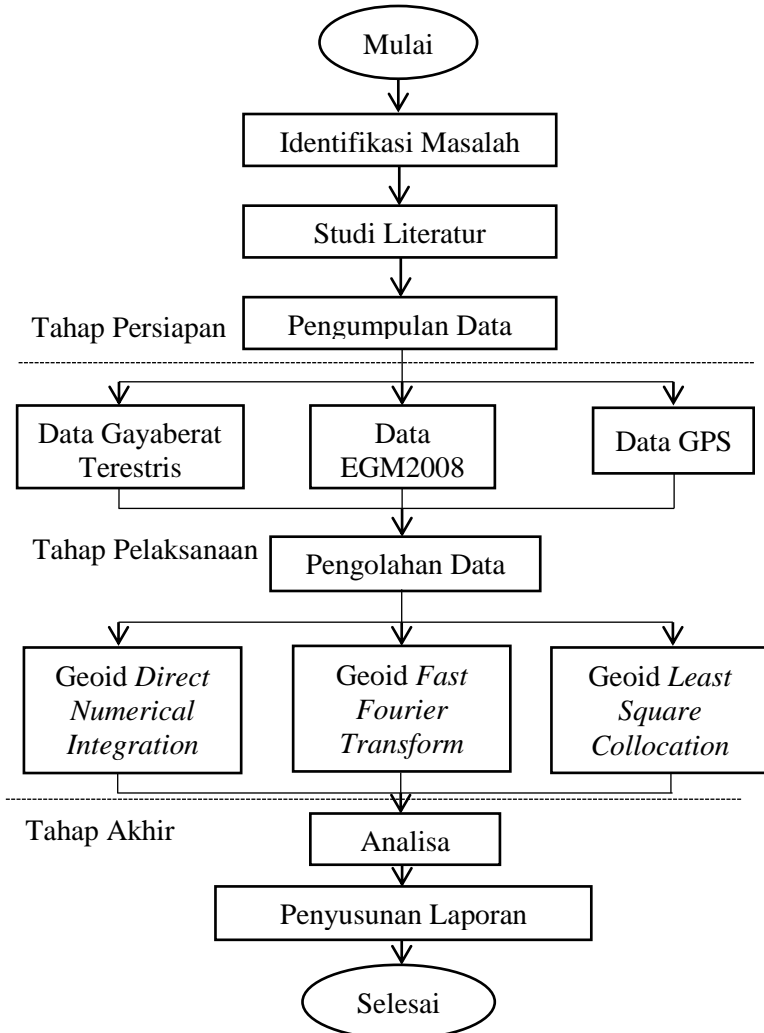
- a. Aplikasi GRAVSOFT digunakan untuk melakukan pemodelan geoid menggunakan metode LSC dan FFT.
- b. Aplikasi Matlab untuk perhitungan fungsi *stokes* metode DNI.
- c. Aplikasi *Generic Mapping Tools* (GMT) untuk pengeplotan agar menjadi peta gaya berat, peta anomali gaya berat dan peta geoid.

### 3.3 Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini akan dilaksanakan dengan beberapa tahapan pelaksanaan penelitian. Di bawah ini terdiri dari dua diagram alir yang menjelaskan pelaksanaan penelitian ini antara lain adalah diagram alir pelaksanaan penelitian yaitu diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan penulis dan diagram alir pengolahan data yaitu diagram alir yang menjelaskan lebih detail pengolahan data pada penelitian ini oleh penulis. Berikut ini merupakan gambaran dan penjelasan dari masing-masing diagram alir metodologi penelitian ini:

### 3.3.1 Tahap Penelitian

Tahapan yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah:



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah penjelasan diagram alir metode penelitian:

1. Identifikasi Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana hasil dan perbandingan metode *direct numerical integration*, *fast fourier transform*, dan *least square collocation* dalam memodelkan geoid Kota Surabaya.

2. Studi Literatur

Bertujuan untuk mendapatkan referensi yang berhubungan dengan gayaberat normal, koreksi apungan, koreksi dan anomaly *free-air*, model geopotensial EGM2008, metode *direct numerical integration*, *fast fourier transform*, dan *least square collocation* dan pengolahan data gayaberat menjadi geoid.

3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data berupa data gayaberat terestris (penelitian yang dilakukan oleh Ira Mutiara Anjasmara, dengan waktu pengambilan data Oktober 2017 dan Novermber 2018), Data EGM2008 dan Data GPS.

4. Pengolahan Data

Pengolahan data dibagi menjadi beberapa tahap yang akan dijelaskan pada pada subbab 3.3.2. Singkatnya terdapat pengolahan data tahap pertama yaitu mengubah data gayaberat relatif menjadi gayaberat observasi agar dapat digunakan pada tahap yang kedua yaitu memodelkan geoid. Tahap kedua yaitu memodelkan geoid menggunakan data gayaberat observasi, data ekstraksi EGM2008 dan GPS menggunakan metode *direct numerical integration*, *fast fourier transform* dan *least square collocation*.

5. Analisa

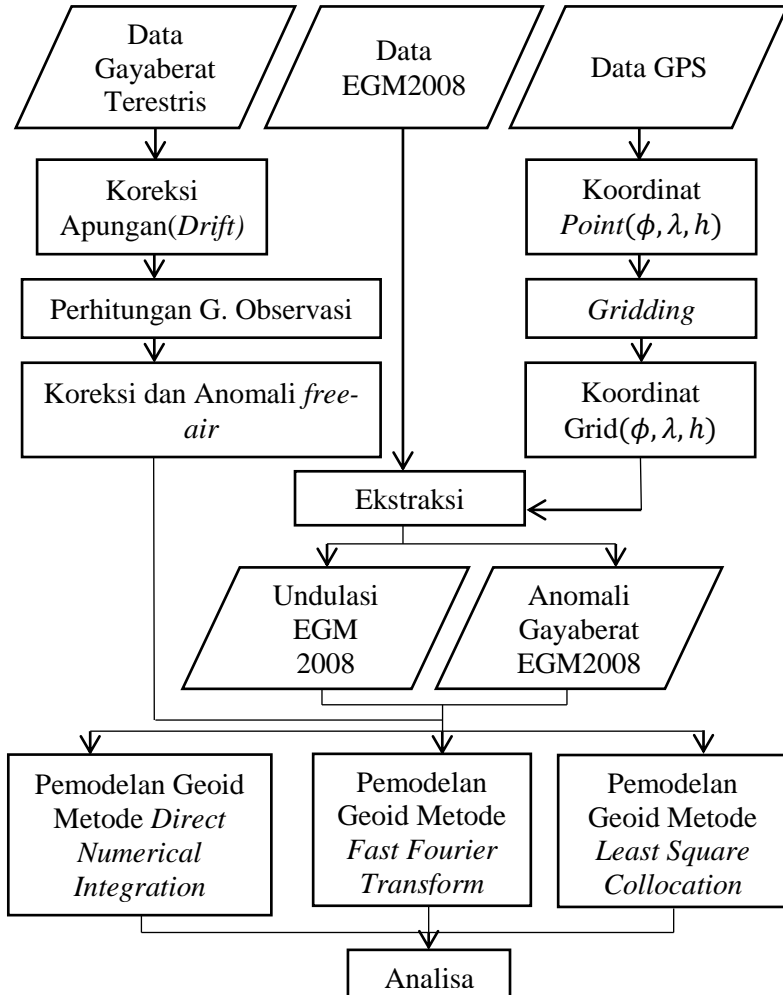
Analisa pada hasil pemodelan geoid Kota Surabaya menggunakan ketiga metode dan perbandingan ketiga metode

6. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari penelitian ini.

### 3.3.2 Pengolahan Data

Pada tahap pengolahan data penelitian, dapat diketahui pada diagram alir gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3 Diagram Alir Pengolahan Data

Pada penelitian ini terdapat tiga jenis data yaitu data gayaberat terestris, data EGM2008 dan data GPS. Berikut ini adalah tahap pengolahan data,

#### 1. Pengolahan data gayaberat

- a) Menghitung koreksi apungan (*drift*) menggunakan persamaan 2.6 dan menghitung gayaberat relatif terkoreksi menggunakan persamaan 2.7.
- b) Mengikatkan gayaberat relatif yang sudah terkoreksi *drift* ke nilai gayaberat absolut sesuai tabel 3.1 agar menjadi gayaberat observasi dengan menggunakan persamaan 2.8.

Tabel 3.1 Tabel Stasiun Refrensi

Nama	Lintang	Bujur	H (M)	g (mGal)
ITSN	7.28198	112.7941	-7.2819	978106.504

- c) Menghitung koreksi *free-air* dengan menggunakan persamaan 2.14.
  - d) menghitung anomali gayaberat *free-air* dengan menggunakan persamaan 2.16.
- #### 2. Pengolahan Data GPS
- a) Melakukan *post-processing* data GPS sehingga didapat hasil koordinat tiga dimensi ( $\phi, \lambda, h$ ) pada titik gayaberat terestris.
  - b) Melakukan proses *gridding* menggunakan perangkat lunak Gravsoft sehingga mendapat koordinat grid.
- #### 3. Ekstraksi EGM2008

Ekstraksi data EGM2008 dengan input data dari hasil koordinat data GPS dan data grid yang dilakukan dengan Gravsoft yang menghasilkan data undulasi dan anomali gayaberat EGM2008.

#### 4. Pemodelan Geoid

- a) Pemodelan geoid pada penelitian ini menggunakan metode *direct numerical integration*, *fast fourier transform*, dan *least square collocation* dengan menggunakan data gayabarat terestris, data GPS, dan data EGM2008.
- b) Kemudian hasil pemodelan geoid dari ketiga metode di *plotting* menggunakan *Generic Mapping Tools* (GMT).

#### 5. Analisa

Menganalisa data hasil pemodelan geoid ketiga metode dan membandingkan data ketiga metode dengan rata-rata, nilai maksimum, nilai minimum, standar deviasi masing-masing metode, mengecek hipotesa dengan uji t dan uji akurasi.

#### 6. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari penelitian ini.

*Halaman Ini Sengaja dikosongkan*



## BAB IV HASIL DAN ANALISA

### 4.1 Data Gayaberat Terestris

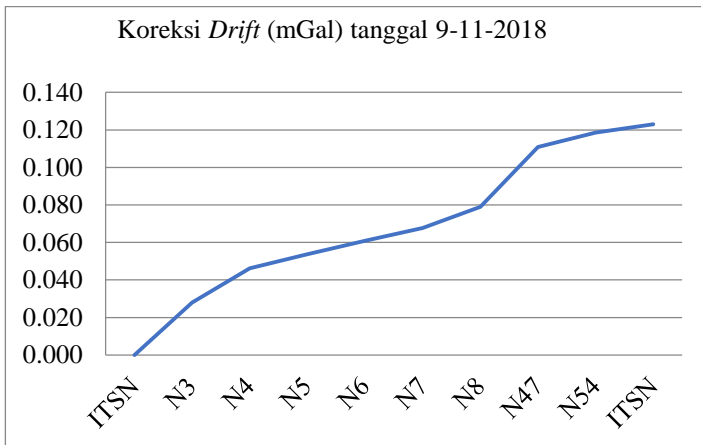
#### 4.1.1 Hasil Perhitungan Koreksi Apungan (*Drift*)

Dalam data gayaberat terestris harus berbentuk *loop* yaitu diawali pada *base station* dan diakhiri pada *base station*, hal ini digunakan untuk menghindari kesalahan dalam menghitung gayaberat observasi. *Base station* harus diketahui nilai gayaberat absolutnya, dan dapat juga dibuat *base station* baru dengan mengukur gayaberat *looping* menggunakan titik *base station* yang baru dengan yang lama dalam waktu pengukuran 1 titik selama 1 jam, dan pengukuran tidak boleh melebihi 12 jam. Pada penelitian ini menggunakan *base station* pada titik BM ITS 1 dan ITSN.

Tabel 4.1 Tabel Hasil Perhitungan Koreksi *Drift* Dalam 1 Hari  
Pengukuran Data Gayaberat Terestris

Titik	Koreksi <i>Drift</i> dan Gayaberat			
	G.Rel. (mGal)	Koreksi <i>drift</i> (mGal)	grel terkoreksi (mGal)	G.Observasi (mGal)
ITS				
N	3867.533	0.000	3867.533	978106.504
N3	3868.590	0.028	3868.562	978107.533
N4	3860.222	0.046	3860.176	978099.146
N5	3861.776	0.054	3861.722	978100.693
N6	3862.434	0.061	3862.373	978101.344
N7	3859.382	0.068	3859.314	978098.285
N8	3858.728	0.079	3858.649	978097.619
N4				
7	3865.084	0.111	3864.973	978103.944
N5				
4	3865.016	0.118	3864.898	978103.868
ITS				
N	3867.656	0.123	3867.533	978106.504

Nilai koreksi apungan (*drift*) dipengaruhi oleh waktu. Pada tabel 4.1 bisa dilihat bahwa data gayaberat terestris seiring berjalannya waktu nilai koreksi apungan (*drift*) semakin besar. Pada gambar 4.1 grafik yang menggambarkan nilai koreksi apungan (*drift*).

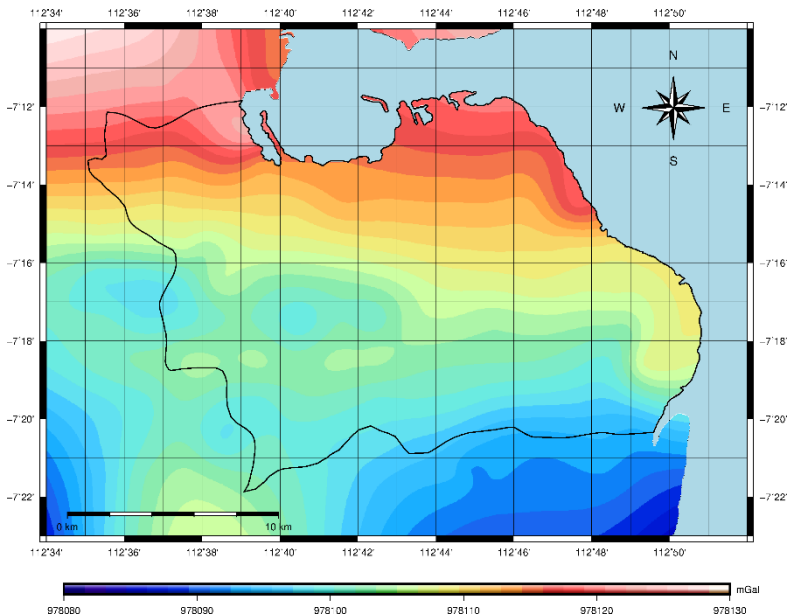


Gambar 4.1 Grafik Nilai Koreksi *Drift* Dalam 1 Hari Pengukuran Data Gayaberat Terestris

Setelah nilai koreksi apungan (*drift*) didapatkan kemudian gayaberat relatif data gayaberat terestris dikoreksikan dengan nilai koreksi apungan agar menjadi nilai gayaberat relatif terkoreksi, menggunakan persamaan 2.7.

#### 4.1.2 Hasil Perhitungan Gayaberat Observasi

Gayaberat relatif yang sudah terkoreksi kemudian diikatkan ke nilai gayaberat absolut *base station*, dengan menggunakan persamaan 2.8. Hasil dari pengikatan tersebut yaitu nilai gayaberat observasi, yang dapat dilihat berupa pada gambar 4.2 visualisasi peta gayaberat Kota Surabaya.



Gambar 4.2 Peta Gayaberat Observasi Kota Surabaya

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa nilai gayaberat Kota Surabaya yang besar pada wilayah Surabaya bagian Utara dengan rentang nilai 978112 mGal – 978122 mGal dan yang kecil pada wilayah Surabaya bagian Selatan dengan rentang nilai 978094 mGal – 978101 mGal

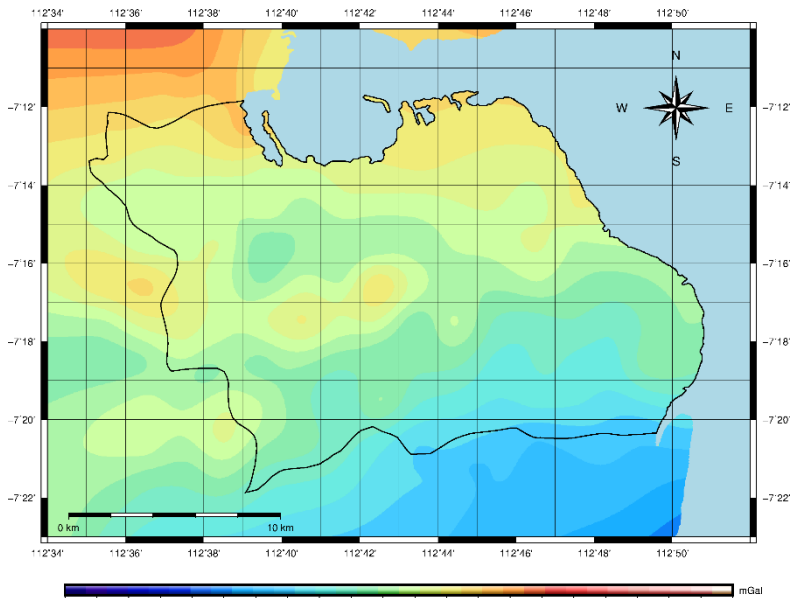
#### 4.1.3 Hasil Perhitungan Anomali *Free-Air*

Untuk mengetahui nilai anomali gayaberat *free-air*  $\Delta gF$  dilakukan perhitungan koreksi *free-air*  $\delta gF$ . Hasil Perhitungan koreksi dan anomali *free-air* dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Tabel Hasil Koreksi dan Anomali *Free-Air*

Bujur	Lintang	<i>Free-Air</i>	
		Koreksi(mGal)	Anomali(mGal)
112.794	-7.282	0.979	-7.508
112.812	-7.276	0.531	-7.107
112.793	-7.242	0.830	-0.299
112.793	-7.242	0.563	4.362
112.778	-7.222	0.665	2.916
112.775	-7.241	0.701	-0.467
112.775	-7.258	3.027	1.389
112.759	-7.258	1.971	-0.742
112.775	-7.291	0.433	-10.422
112.776	-7.274	2.414	-2.500
112.808	-7.292	0.277	-11.317
112.792	-7.308	1.085	-12.925
112.808	-7.308	1.249	-13.195
112.792	-7.325	1.943	-14.799
112.809	-7.325	1.162	-16.901
112.776	-7.340	0.795	-21.621
112.805	-7.343	1.200	-20.536
112.791	-7.342	1.210	-20.819
112.775	-7.325	2.131	-14.140
112.757	-7.327	1.152	-16.060
112.742	-7.325	1.612	-13.427
112.759	-7.309	0.301	-13.518
112.775	-7.309	1.099	-12.130
112.741	-7.241	1.264	0.720

Nilai koreksi *free-air* dipengaruhi oleh ketinggian pada titik data gayaberat terestris. Ketinggian yang digunakan adalah tinggi orthometrik pendekatan yang dimana pada penelitian ini dicari dengan cara menyelisihkan tinggi ellipsoid ( $h$ ) dari data GPS dengan undulasi data EGM2008 ( $N_{EGM2008}$ ) pada titik data gayaberat terestris dan GPS. Gambar 4.3 merupakan visualisasi anomali *free-air* Kota Surabaya.



Gambar 4.3 Peta Anomali Gayaberat *Free-Air* Kota Surabaya

Dari gambar 4.3 dapat diketahui bahwa anomali gayaberat *free-air* Kota Surabaya kebanyakan bernilai negatif, dengan nilai terkecil yaitu  $-23.373$  mGal dan nilai terbesar  $16.555$  mGal. Anomali gayaberat *free-air* dipengaruhi dengan ketinggian pada suatu daerah, semakin tinggi suatu daerah maka koreksi *free-air* daerah tersebut juga semakin tinggi. Dikarenakan Surabaya memiliki ketinggian yang rendah maka nilai koreksi *free-air* yang dihasilkan rendah.

## 4.2 Data GPS

### 4.2.1 Koordinat GPS

Tabel 4.3 merupakan koordinat GPS dan tinggi ellipsoid data.

Tabel 4.3 Tabel Koordinat Data Gayaberat Terestris

Bujur	Lintang	<i>Ell. Height(m)</i>
112.794	-7.282	32.213
112.812	-7.276	30.847
112.793	-7.242	31.935
112.793	-7.242	31.068
112.778	-7.222	31.464
112.775	-7.241	31.464
112.775	-7.258	38.918
112.759	-7.258	35.446
112.775	-7.291	30.343
112.776	-7.274	36.849
112.808	-7.292	29.929
112.792	-7.308	32.422
112.808	-7.308	33.000
112.792	-7.325	35.121
112.809	-7.325	32.637
112.776	-7.340	31.290
112.805	-7.343	32.667
112.791	-7.342	32.666
112.775	-7.309	32.416
112.741	-7.241	33.200
112.742	-7.278	35.760
112.740	-7.292	43.142

Bujur	Lintang	<i>Ell. Height(m)</i>
112.815	-7.296	32.593
112.741	-7.308	38.068
112.724	-7.342	30.833
112.743	-7.341	33.289
112.608	-7.293	58.067

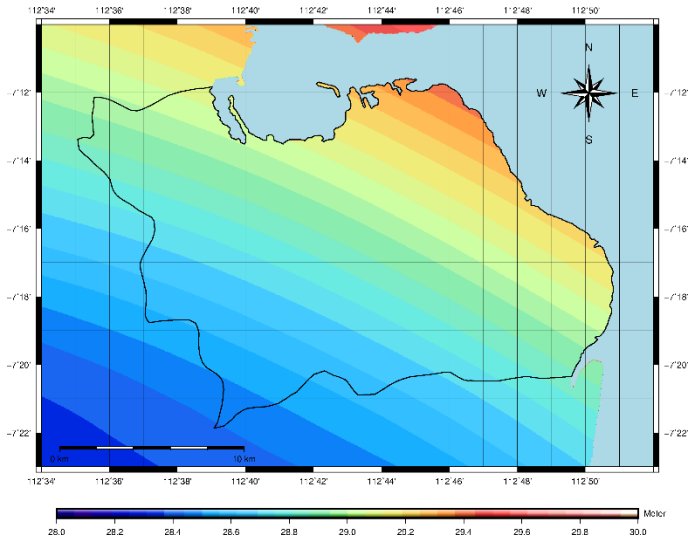
### 4.3 Data EGM2008

#### 4.3.1 Ekstraksi Data EGM2008

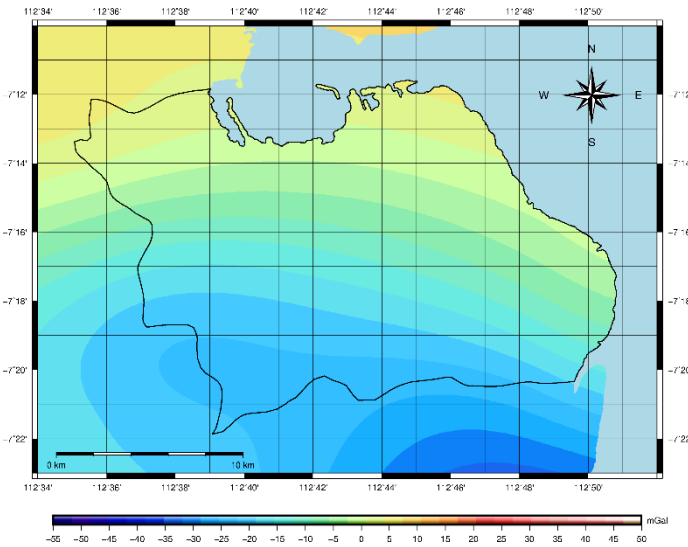
Hasil ekstraksi data EGM2008 didapatkan nilai anomali gayaberat dan nilai undulasi. Ekstraksi data EGM2008 dengan memasukkan data koordinat yang sudah berbentuk grid, dengan pembagian grid sebesar  $1' \times 1'$ . Nilai undulasi geoid EGM2008 ( $N_{EGM2008}$ ) tertinggi sebesar 29.8400 m dan terendah 28.3320 m di Kota Surabaya. Sedangkan nilai anomali EGM2008 tertinggi sebesar 16.0381mGal dan yang terkecil sebesar -30.5974 mGal. Gambar 4.4 Dan 4.5 merupakan visualisasi geoid dan anomali gayaberat di Kota Surabaya menggunakan GMT, dan tabel 4.4 merupakan statistikundulasi dan anomali gayaberat EGM2008.

Tabel 4.4 Statistik Data EGM2008

Data	Maks(m)	Min(m)	Rerata(m)	Std. Dev(m).
$N_{EGM2008}$	29.840	28.332	28.926	0.347
$\Delta g_{EGM2008}$	16.038	-30.597	-8.823	11.642



Gambar 4.4 Peta Geoid Kota Surabaya dari EGM2008

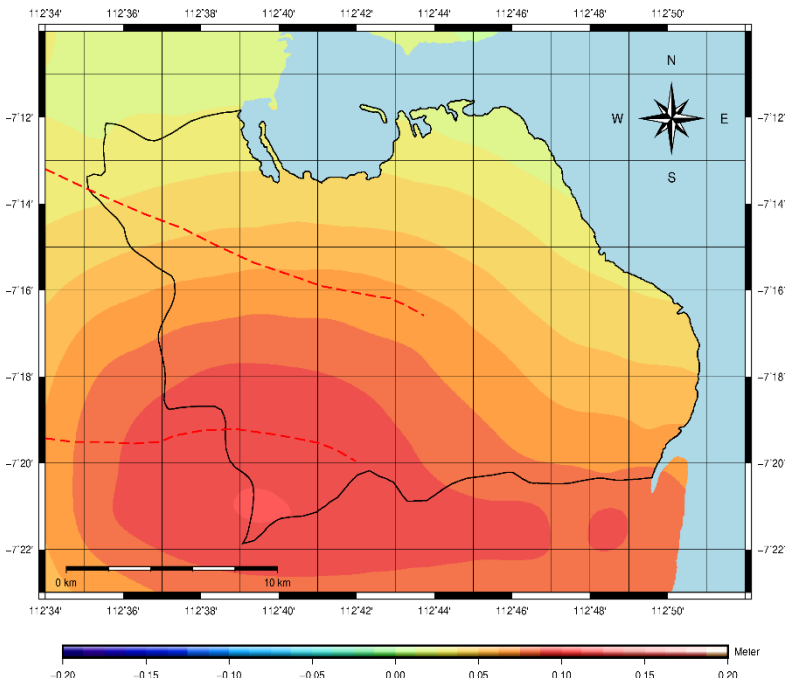


Gambar 4.5 Peta Anomali Gayaberat Kota Surabaya dari EGM2008

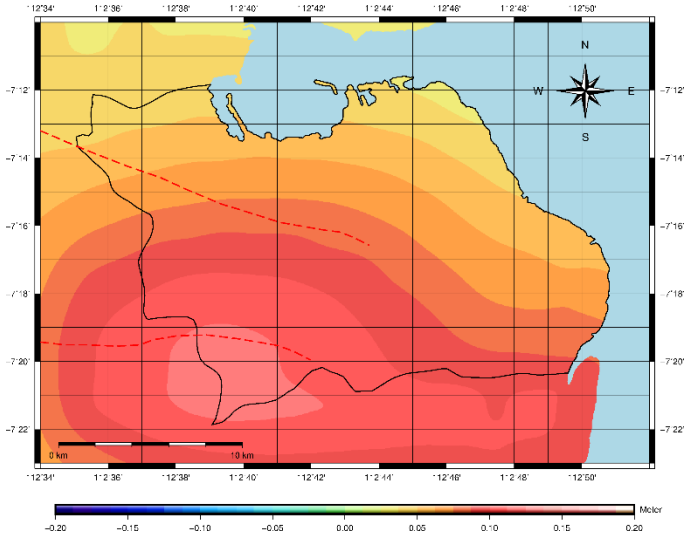


#### 4.4 Geoid Gravimetrik

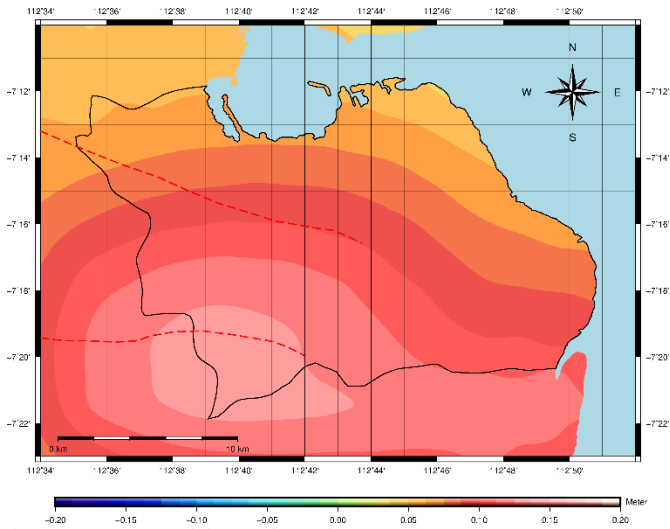
Perhitungan integral *Stokes* dilakukan untuk mengetahui geoid gravimetrik/geoid lokal. Dari perhitungan integral *Stokes* dari ketiga metode tersebut memberikan kontribusi, metode *direct numerical integration* terbesar 0.099 m dan terkecil -0.001 m, metode *fast fourier transform* terbesar 0.114 m dan terkecil 0.016 m, metode *least square collocation* 0.130 m dan 0.033 m. Gambar 4.6, 4.7 dan 4.8 merupakan visualisasi geoid gravimetrik ketiga metode.



Gambar 4.6 Peta Geoid Gravimetrik Metode *Direct Numerical Integration* Kota Surabaya

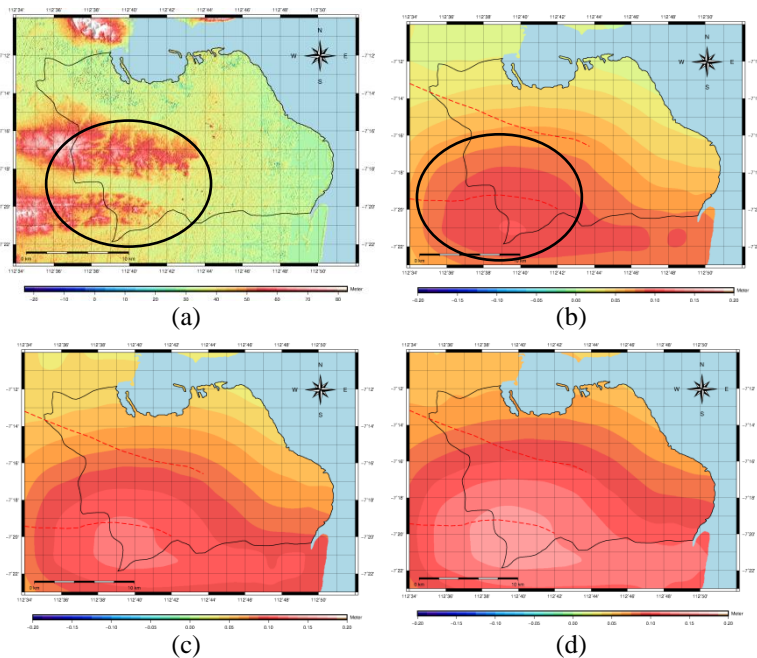


Gambar 4.7 Peta Geoid Gravimetrik Metode *Fast Fourier Transform* Kota Surabaya



Gambar 4.8 Peta Geoid Gravimetrik Metode *Least Square Collocation* Kota Surabaya

Dari visualisasi gambar 4.6, 4.7 dan 4.8 terlihat bahwa kontribusi geoid gravimetrik tertinggi berada pada Surabaya bagian Barat Daya dan terendah pada Surabaya bagian Timur Laut. Jika dilihat dari pola kontur geoid gravimetrik terdapat kemiripan dengan pola kondisi topografi Kota Surabaya. Jika dibandingkan dengan kondisi topografi Kota Surabaya nilai geoid gravimetrik tertinggi memiliki kemiripan dengan topografi Surabaya yang memiliki elevasi yang tinggi, dan begitu juga dengan daerah dengan elevasi yang rendah memiliki kemiripan dengan nilai geoid gravimetrik yang rendah.



Gambar 4.9 Perbandingan Pola pada (a) Peta Topografi Kota Surabaya dengan (b) Peta Geoid Gravimetrik Kota Surabaya Metode *Direct Numerical Integration*, (c) Peta Geoid Gravimetrik Kota Surabaya Metode *Fast Fourier Transform*, dan (d) Peta Geoid Gravimetrik Kota Surabaya Metode *Least Square Collocation*

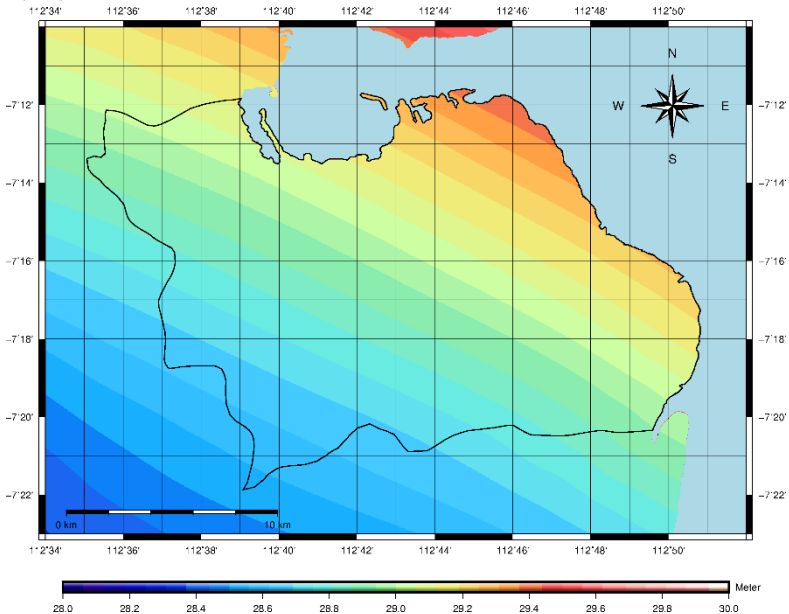
#### 4.5 Hasil Pemodelan Geoid dan Perbandingan

Geoid gravimetrik yang sudah dihitung kemudian ditambahkan nilai EGM2008 menggunakan teknik *remove restore compute* agar menjadi model geoid, dalam pemodelan geoid Kota Surabaya menggunakan metode *direct numerical integration, fast fourier transform, dan least square collocation*.

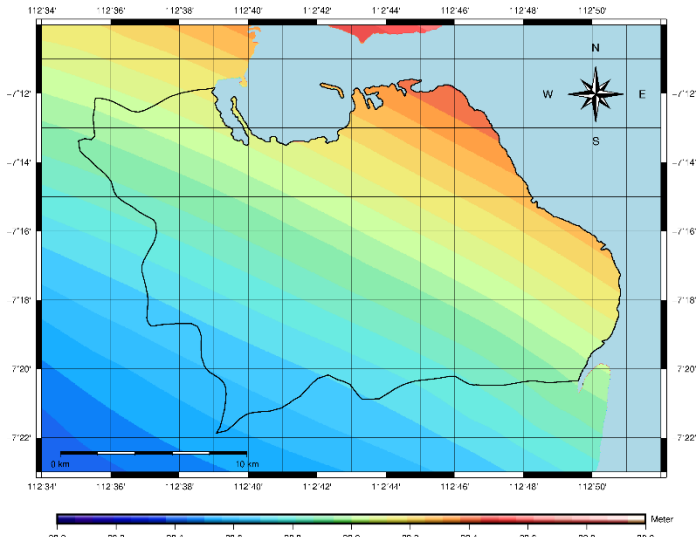
Tabel 4.5 Statistik Ketiga Metode Model Geoid Kota Surabaya

Data	Maks. (m)	Min. (m)	Rerata (m)	Std. Dev. (m)
DNI	29.844	28.395	28.980	0.320
FFT	29.861	28.409	28.996	0.321
LSC	29.878	28.422	29.013	0.322
EGM2008	29.840	28.332	28.926	0.347

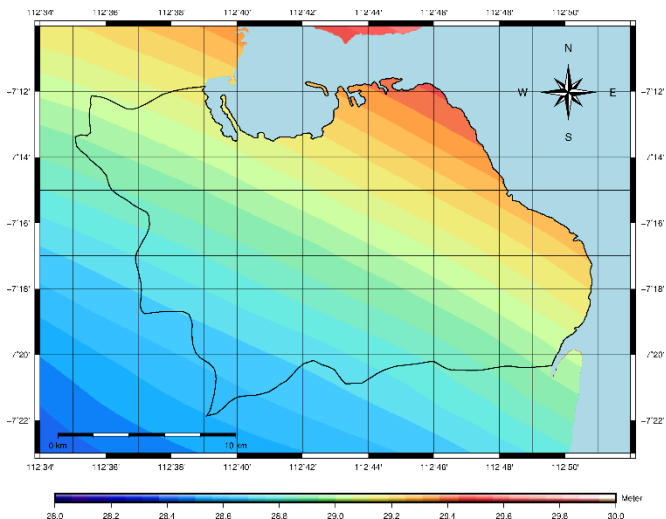
Visualisasi ketiga metode model geoid pada gambar 4.10, 4.11, 4.12.



Gambar 4.10 Peta Geoid Kota Surabaya Metode DNI



Gambar 4.11 Peta Geoid Kota Surabaya Metode FFT



Gambar 4.12 Peta Geoid Kota Surabaya Metode LSC

Tabel 4.6 Hasil Uji T Metode *Direct Numerical Integration*, *Fast Fourier Transform*, dan *Least Square Collocation*

Metode	Hasil
<i>Direct Numerical Integration - Fast Fourier Transform</i>	$H_0$ Diterima
<i>Direct Numerical Integration - Least Square Collocation</i>	$H_0$ Diterima

Tabel 4.7 Hasil Uji Akurasi Metode *Direct Numerical Integration*, *Fast Fourier Transform*, dan *Least Square Collocation*

Metode	Hasil
<i>Direct Numerical Integration - Fast Fourier Transform</i>	Kurang Teliti
<i>Direct Numerical Integration - Least Square Collocation</i>	Kurang Teliti

$H_0$  yang digunakan yaitu metode *direct numerical integration* lebih baik dari pada metode *fast fourier transform*, *least square collocation* dan  $H_1$  yang digunakan metode *fast fourier transform* dan *least square collocation* lebih baik dibandingkan *direct numerical integration*, maka hipotesa sebelumnya diterima pada uji perbandingan. Berdasarkan tabel 4.7 metode *fast fourier transform* dan *least square collocation* tidak akurat dibandingkan dengan *direct numerical integration*, dengan BA dan BB pada pengujian akurasi *direct numerical integration - fast fourier transform* 28.997 m dan 28.995 m sedang nilai yang dianggap benar yaitu rerata metode *direct numerical integration* yaitu 28.980 m dan untuk pengujian akurasi BA dan BB *direct numerical integration - least square collocation*, 29.014 m dan 29.012 m, dilihat dari BA dan BB setiap metode, metode *fast fourier transform* lebih mendekati nilai yang dianggap benar (karena metode DNI melakukan perhitungan integral stokes secara langsung tanpa mengurangi perhitungan dibandingkan FFT dan LSC) dibandingkan dengan metode *least square collocation*.

Berdasarkan tabel 4.5 model geoid Kota Surabaya metode *direct numerical integration* memiliki nilai maksimum yaitu 29.844 m yang berada pada Surabaya Utara dan terendah 28.395 m yang berada pada Surabaya bagian Barat Daya dan memiliki standar deviasi 0.320 m, untuk model geoid Kota Surabaya metode *fast fourier transform* memiliki nilai maksimum yaitu 29.861 m yang berada pada Surabaya Utara dan terendah 28.409 m yang berada pada Surabaya bagian Barat Daya dan memiliki standar deviasi 0.321 m, dan model geoid Kota Surabaya metode *least square collocation* memiliki nilai maksimum yaitu 29.878 m yang berada pada Surabaya Utara dan terendah 28.422 m yang berada pada Surabaya bagian Barat Daya dan memiliki standar deviasi 0.322 m.

*Halaman Ini Sengaja dikosongkan*



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data yang sudah dilakukan, berikut ini merupakan hal yang dapat penulis simpulkan dalam penelitian ini.

- a. Nilai gayaberat di Kota Surabaya berkisar 978091.862 mGal hingga 978125.219 mGal dengan nilai gayaberat terbesar di daerah Surabaya bagian Utara.
- b. Anomali gayaberat *free-air* dari data gayaberat terestris berkisar -23.379 mGal hingga 16.554 mGal, anomali gayaberat Kota Surabaya banyak yang bernilai negative.
- c. Pemodelan geoid gravimetrik memberikan kontribusi dengan metode *direct numerical integration* berkisar -0.0010 m hingga 0.099 m, metode *fast fourier transform* berkisar 0.016 m hingga 0.114 m, metode *least square collocation* berkisar 0.033 m hingga 0.130 m.
- d. Pemodelan geoid Kota Surabaya metode *direct numerical integration* mempunyai nilai maksimal 29.844 m, nilai minimal 28.395 m, nilai rata-rata 28.980 m, standar deviasi 0.320 m, metode *fast fourier transform* mempunyai nilai maksimal 29.861 m, nilai minimal 28.409 m, nilai rata-rata 28.996 m, standar deviasi 0.321 m dan metode *least square collocation* mempunyai nilai maksimal 29.878 m, nilai minimal 28.4229 m, nilai rata-rata 29.0133 m, standar deviasi 0.322 m.
- e. Dalam uji akurasi metode DNI dianggap benar (karena metode DNI melakukan perhitungan integral *stokes* secara langsung tanpa mengurangi perhitungan dibandingkan FFT dan LSC), dengan hasil perbandingan antara metode FFT dan LSC yaitu metode FFT lebih baik dibandingkan dengan metode LSC.

### 5.2 Saran

Dalam pengerjaan penelitian ini tentunya masih terdapat banyak kekurangan, sehingga penulis mengajukan saran sebagai kekurangan, sehingga penulis mengajukan saran:

- a. Gunakan data yang lebih rapat, agar mendapatkan kontribusi geoid yang merata.
- b. Gunakan tinggi ortometrik dari pengukuran sipat datar, agar mendapatkan tinggi ortometrik yang sesuai.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anjasmara. 2019. *Physical Geodesy*. Surabaya: Departemen Teknik Geomatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. 2018. *Statistik Daerah Kota Surabaya 2018*. Surabaya: Badan Pusat Statistik Kota Surabaya.
- Borge, A. 2013. *The Geoid For The Baltic Countries Determined By The Least Squares Modification Of Stokes' Formula*. Thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology
- Featherstone, W. 1998. *Do We Need A Gravimetric Geoid Or A Model Of The Australian Height Datum To Transform GPS Height in Australia*. Perth: Curtin University.
- Forsberg dan Tschering. 2008. *An Overview Manual for The Gravsoft: Geodetic Gravity Field Modelling Programs*. Denmark: DTU-Space.
- Heiskanen, dan Moritz. 1967. *Physical Geodesy*. San Fransisco: W.H. Freeman and Company.
- Hofmann-Wellenhof. 2005. *Physical Geodesy*. New York: Springer Wien New York.
- Mputhi, S. M. 2016. *A Comparison Of Least Squares Collocation And The Fast Fourier Transform Methods For Gravimetric Geoid Determination*. Cape Town: University Of Cape Town.
- National Geospatial-Intelligence Agency. 2008. *EGM 2008 - WGS84 Version*.  
<URL:[http://earthinfo.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08\\_wgs84.html](http://earthinfo.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html)> .Dikunjungi pada 2 Januari 2019, jam 10.23.
- Peprah, Ziggah, dan Yakubu. 2017. *Performance Evaluation Of The Earth Gravitational Model 2008(EGM 2008)*. Tarkwa: Department of Geomatic Engineering, University of Mines and Technology.

- Ramdani. 2008. *Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) Di Indonesia. Journal of Geodesy*.78, 304-313.
- Sugiyono. 2007. *Statistika Untuk Penelitian*. Bandung: Alfabeta.
- Suryaningsih, E. 2017. *Studi Kesesuaian Penggunaan Model Geoid Global EGM 2008 Untuk Keperluan Lokal di Kota Surabaya*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sylvester *et al.* 2018. *Procedure for the determination of Local Gravimetric-Geometric Geoid Model*. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering. Nigeria.
- The MathWorks. 2018. *MatLab Primer*. Natick: The Mathworks.
- Triarahmadhana. 2014. *Pemodelan Geoid Lokal D. I. Yogyakarta menggunakan Metode Fast Fourier Transform dan Least Square Collocation*. Conference on Geospatial Information Science and Engineering. Yogyakarta.
- Torge, W. 2001. *Geodesy*. Berlin: de Gruyter.
- Ulama, B.S. 2019. *Uji Statistik dan Uji Akurasi Data Pengamatan*. Bandung: J.R. Putra Interviewer.
- Vanicek, P. 1976. *Physical Geodesy*. Brunswick: University of New Brunswick.
- Wessel *et al.* 2017. *The Generic Mapping Tools: GMT Documentation release 5.4.5*. Columbia: Columbia University.
- Widhipermana. 2017. *Pemodelan Geoid Kota Surabaya Menggunakan Data Pengukuran Gaya Berat Terestris*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- 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.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

Tabel Ekstraksi Data EGM2008

Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomali (mGal)
112.591	-7.175	29.113	5.904
112.591	-7.208	28.955	4.788
112.625	-7.208	29.009	2.958
112.741	-7.208	29.279	2.259
112.758	-7.208	29.327	2.949
112.775	-7.208	29.376	3.725
112.591	-7.225	28.877	2.719
112.608	-7.225	28.902	1.586
112.625	-7.225	28.929	0.608
112.658	-7.225	28.989	-0.711
112.675	-7.225	29.024	-1.044
112.691	-7.225	29.061	-1.171
112.725	-7.225	29.143	-0.816
112.741	-7.225	29.188	-0.349
112.758	-7.225	29.235	0.269
112.775	-7.225	29.283	0.971
112.591	-7.241	28.800	-0.734
112.608	-7.241	28.824	-2.018
112.625	-7.241	28.850	-3.074
112.641	-7.241	28.877	-3.838
112.658	-7.241	28.908	-4.305
112.675	-7.241	28.941	-4.501
112.691	-7.241	28.977	-4.467
112.708	-7.241	29.015	-4.231

Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomali (mGal)
112.725	-7.241	29.057	-3.812
112.741	-7.241	29.100	-3.222
112.775	-7.241	29.193	-1.667
112.791	-7.241	29.241	-0.825
112.591	-7.258	28.724	-5.278
112.608	-7.258	28.747	-6.708
112.625	-7.258	28.772	-7.799
112.641	-7.258	28.799	-8.486
112.658	-7.258	28.828	-8.781
112.675	-7.258	28.860	-8.745
112.691	-7.258	28.895	-8.453
112.708	-7.258	28.932	-7.964
112.725	-7.258	28.972	-7.310
112.741	-7.258	29.015	-6.504
112.758	-7.258	29.060	-5.553
112.775	-7.258	29.106	-4.483
112.791	-7.258	29.154	-3.347
112.808	-7.258	29.203	-2.218
112.591	-7.275	28.650	-10.208
112.608	-7.275	28.672	-11.771
112.625	-7.275	28.696	-12.873
112.641	-7.275	28.722	-13.457
112.658	-7.275	28.751	-13.563
112.675	-7.275	28.782	-13.291
112.691	-7.275	28.815	-12.754
112.708	-7.275	28.852	-12.039
112.725	-7.275	28.891	-11.188
112.741	-7.275	28.932	-10.200

Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomali (mGal)
112.758	-7.275	28.976	-9.053
112.775	-7.275	29.022	-7.737
112.791	-7.275	29.069	-6.275
112.808	-7.275	29.118	-4.727
112.591	-7.291	28.580	-14.631
112.608	-7.291	28.602	-16.301
112.625	-7.291	28.625	-17.406
112.641	-7.291	28.650	-17.909
112.658	-7.291	28.678	-17.884
112.675	-7.291	28.708	-17.470
112.691	-7.291	28.740	-16.817
112.708	-7.291	28.775	-16.031
112.725	-7.291	28.812	-15.152
112.741	-7.291	28.852	-14.153
112.758	-7.291	28.894	-12.970
112.775	-7.291	28.939	-11.545
112.791	-7.291	28.986	-9.859
112.808	-7.291	29.034	-7.954
112.591	-7.308	28.517	-17.772
112.608	-7.308	28.537	-19.502
112.625	-7.308	28.560	-20.609
112.641	-7.308	28.584	-21.085
112.658	-7.308	28.610	-21.041
112.675	-7.308	28.639	-20.650
112.691	-7.308	28.669	-20.088
112.708	-7.308	28.702	-19.471

Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomali (mGal)
112.725	-7.308	28.737	-18.821
112.741	-7.308	28.775	-18.073
112.758	-7.308	28.815	-17.110
112.775	-7.308	28.858	-15.814
112.791	-7.308	28.904	-14.117
112.808	-7.308	28.951	-12.034
112.825	-7.308	29.000	-9.661
112.591	-7.325	28.461	-19.249
112.608	-7.325	28.481	-20.971
112.625	-7.325	28.502	-22.074
112.641	-7.325	28.525	-22.585
112.658	-7.325	28.550	-22.647
112.675	-7.325	28.576	-22.460
112.691	-7.325	28.604	-22.213
112.708	-7.325	28.634	-22.013
112.725	-7.325	28.667	-21.857
112.741	-7.325	28.702	-21.630
112.758	-7.325	28.740	-21.156
112.775	-7.325	28.780	-20.252
112.791	-7.325	28.824	-18.800
112.808	-7.325	28.870	-16.780
112.591	-7.341	28.414	-19.222
112.608	-7.341	28.433	-20.853
112.625	-7.341	28.454	-21.934
112.641	-7.341	28.475	-22.524
112.658	-7.341	28.498	-22.790



Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomaly (mGal)
112.725	-7.341	28.603	-24.087
112.741	-7.341	28.635	-24.563
112.758	-7.341	28.669	-24.763
112.775	-7.341	28.707	-24.448
112.791	-7.341	28.749	-23.451
112.808	-7.341	28.792	-21.722
112.825	-7.341	28.839	-19.350
112.591	-7.358	28.377	-18.345
112.608	-7.358	28.396	-19.809
112.625	-7.358	28.415	-20.840
112.641	-7.358	28.434	-21.522
112.658	-7.358	28.455	-22.035
112.675	-7.358	28.476	-22.587
112.691	-7.358	28.498	-23.344
112.708	-7.358	28.522	-24.367
112.725	-7.358	28.547	-25.578
112.741	-7.358	28.575	-26.771
112.758	-7.358	28.607	-27.667
112.775	-7.358	28.641	-27.989
112.808	-7.358	28.721	-26.233
112.575	-7.375	28.332	-15.993
112.591	-7.375	28.350	-17.534
112.608	-7.375	28.367	-18.788
112.625	-7.375	28.385	-19.749
112.641	-7.375	28.402	-20.514
112.658	-7.375	28.420	-21.253

Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomali (mGal)
112.675	-7.375	28.439	-22.154
112.691	-7.375	28.458	-23.355
112.708	-7.375	28.478	-24.881
112.725	-7.375	28.500	-26.624
112.741	-7.375	28.525	-28.354
112.758	-7.375	28.553	-29.773
112.775	-7.375	28.585	-30.590
112.791	-7.375	28.620	-30.597
112.808	-7.375	28.659	-29.720
112.825	-7.375	28.700	-28.037
112.841	-7.375	28.744	-25.755
112.858	-7.375	28.788	-23.155
112.575	-7.358	28.359	-16.486
112.791	-7.358	28.680	-27.534
112.825	-7.358	28.765	-24.167
112.841	-7.358	28.811	-21.542
112.858	-7.358	28.857	-18.640
112.575	-7.341	28.396	-17.117
112.841	-7.341	28.886	-16.533
112.858	-7.341	28.934	-13.536
112.575	-7.325	28.442	-17.021
112.825	-7.325	28.918	-14.287
112.841	-7.325	28.967	-11.505
112.858	-7.325	29.016	-8.659
112.575	-7.308	28.497	-15.557
112.841	-7.308	29.050	-7.153

Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomali (mGal)
112.858	-7.308	29.100	-4.683
112.575	-7.291	28.561	-12.547
112.825	-7.291	29.084	-5.923
112.841	-7.291	29.134	-3.883
112.858	-7.291	29.185	-1.942
112.575	-7.275	28.630	-8.335
112.825	-7.275	29.168	-3.176
112.841	-7.275	29.218	-1.697
112.858	-7.275	29.269	-0.332
112.575	-7.258	28.703	-3.649
112.825	-7.258	29.253	-1.163
112.841	-7.258	29.303	-0.217
112.858	-7.258	29.354	0.639
112.575	-7.241	28.778	0.659
112.808	-7.241	29.290	-0.045
112.825	-7.241	29.340	0.620
112.841	-7.241	29.391	1.174
112.858	-7.241	29.442	1.682
112.758	-7.241	29.146	-2.490
112.575	-7.225	28.853	3.913
112.791	-7.225	29.332	1.667
112.808	-7.225	29.381	2.274
112.825	-7.225	29.431	2.751
112.841	-7.225	29.482	3.122
112.858	-7.225	29.534	3.490
112.708	-7.225	29.101	-1.094

Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomali (mGal)
112.641	-7.225	28.958	-0.163
112.575	-7.208	28.930	5.833
112.608	-7.208	28.981	3.807
112.641	-7.208	29.039	2.276
112.658	-7.208	29.072	1.774
112.675	-7.208	29.108	1.458
112.691	-7.208	29.147	1.337
112.708	-7.208	29.189	1.426
112.725	-7.208	29.233	1.736
112.791	-7.208	29.426	4.486
112.808	-7.208	29.476	5.145
112.825	-7.208	29.527	5.662
112.841	-7.208	29.579	6.079
112.858	-7.208	29.631	6.514
112.575	-7.191	29.007	6.606
112.591	-7.191	29.033	5.659
112.608	-7.191	29.061	4.827
112.625	-7.191	29.090	4.151
112.641	-7.191	29.122	3.649
112.658	-7.191	29.157	3.323
112.675	-7.191	29.194	3.178
112.691	-7.191	29.235	3.233
112.708	-7.191	29.278	3.513
112.725	-7.191	29.324	4.040
112.741	-7.191	29.372	4.804
112.758	-7.191	29.421	5.755

Bujur	Lintang	EGM2008	
		N EGM2008 (m)	Anomali (mGal)
112.775	-7.191	29.472	6.801
112.791	-7.191	29.523	7.828
112.808	-7.191	29.575	8.742
112.825	-7.191	29.628	9.503
112.841	-7.191	29.680	10.153
112.858	-7.191	29.734	10.814
112.575	-7.175	29.086	6.793
112.608	-7.175	29.142	5.208
112.625	-7.175	29.173	4.729
112.641	-7.175	29.206	4.461
112.658	-7.175	29.243	4.392
112.675	-7.175	29.282	4.521
112.691	-7.175	29.324	4.865
112.708	-7.175	29.369	5.456
112.725	-7.175	29.416	6.320
112.741	-7.175	29.466	7.449
112.758	-7.175	29.517	8.785
112.775	-7.175	29.570	10.226
112.791	-7.175	29.623	11.649
112.808	-7.175	29.677	12.948
112.825	-7.175	29.731	14.075
112.841	-7.175	29.785	15.068
112.858	-7.175	29.840	16.038

## Lampiran 2

Tabel Nilai Geoid Gravimetrik dan Geoid Metode *Direct Numerical Integration*

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.591	-7.175	0.016	29.129
112.591	-7.208	0.025	28.980
112.625	-7.208	0.027	29.036
112.741	-7.208	0.024	29.303
112.758	-7.208	0.021	29.348
112.775	-7.208	0.016	29.392
112.591	-7.225	0.032	28.909
112.608	-7.225	0.035	28.937
112.625	-7.225	0.037	28.966
112.658	-7.225	0.039	29.028
112.675	-7.225	0.040	29.064
112.691	-7.225	0.039	29.100
112.725	-7.225	0.037	29.180
112.741	-7.225	0.035	29.223
112.758	-7.225	0.031	29.266
112.775	-7.225	0.026	29.309
112.591	-7.241	0.041	28.841
112.608	-7.241	0.044	28.868
112.625	-7.241	0.047	28.897
112.641	-7.241	0.049	28.926
112.658	-7.241	0.049	28.957
112.675	-7.241	0.050	28.991
112.691	-7.241	0.049	29.026

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.708	-7.241	0.049	29.064
112.725	-7.241	0.047	29.104
112.741	-7.241	0.044	29.144
112.775	-7.241	0.035	29.228
112.791	-7.241	0.030	29.271
112.591	-7.258	0.051	28.775
112.608	-7.258	0.055	28.802
112.625	-7.258	0.058	28.830
112.641	-7.258	0.060	28.859
112.658	-7.258	0.061	28.889
112.675	-7.258	0.061	28.921
112.691	-7.258	0.061	28.956
112.708	-7.258	0.060	28.992
112.725	-7.258	0.057	29.029
112.741	-7.258	0.053	29.068
112.758	-7.258	0.048	29.108
112.775	-7.258	0.042	29.148
112.791	-7.258	0.038	29.192
112.808	-7.258	0.034	29.237
112.591	-7.275	0.062	28.712
112.608	-7.275	0.066	28.738
112.625	-7.275	0.070	28.766
112.641	-7.275	0.072	28.794
112.658	-7.275	0.074	28.825
112.675	-7.275	0.073	28.855
112.691	-7.275	0.072	28.887
112.708	-7.275	0.069	28.921

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.725	-7.275	0.066	28.957
112.741	-7.275	0.062	28.994
112.758	-7.275	0.056	29.032
112.775	-7.275	0.050	29.072
112.791	-7.275	0.045	29.114
112.808	-7.275	0.042	29.160
112.591	-7.291	0.072	28.652
112.608	-7.291	0.077	28.679
112.625	-7.291	0.081	28.706
112.641	-7.291	0.084	28.734
112.658	-7.291	0.084	28.762
112.675	-7.291	0.084	28.792
112.691	-7.291	0.082	28.822
112.708	-7.291	0.079	28.854
112.725	-7.291	0.075	28.887
112.741	-7.291	0.068	28.920
112.758	-7.291	0.064	28.958
112.775	-7.291	0.057	28.996
112.791	-7.291	0.052	29.038
112.808	-7.291	0.050	29.084
112.591	-7.308	0.079	28.596
112.608	-7.308	0.085	28.622
112.625	-7.308	0.089	28.649
112.641	-7.308	0.093	28.677
112.658	-7.308	0.094	28.704
112.675	-7.308	0.092	28.731
112.691	-7.308	0.090	28.759



Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.708	-7.308	0.086	28.788
112.725	-7.308	0.081	28.818
112.741	-7.308	0.076	28.851
112.758	-7.308	0.070	28.885
112.775	-7.308	0.064	28.922
112.791	-7.308	0.060	28.964
112.808	-7.308	0.058	29.009
112.825	-7.308	0.059	29.059
112.591	-7.325	0.083	28.544
112.608	-7.325	0.089	28.570
112.625	-7.325	0.095	28.597
112.641	-7.325	0.097	28.622
112.658	-7.325	0.098	28.648
112.675	-7.325	0.097	28.673
112.691	-7.325	0.094	28.698
112.708	-7.325	0.090	28.724
112.725	-7.325	0.086	28.753
112.741	-7.325	0.081	28.783
112.758	-7.325	0.076	28.816
112.775	-7.325	0.071	28.851
112.791	-7.325	0.068	28.892
112.808	-7.325	0.068	28.938
112.591	-7.341	0.084	28.498
112.608	-7.341	0.090	28.523
112.625	-7.341	0.096	28.550
112.641	-7.341	0.098	28.573
112.658	-7.341	0.099	28.597

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.675	-7.341	0.098	28.620
112.691	-7.341	0.096	28.643
112.708	-7.341	0.093	28.667
112.725	-7.341	0.089	28.692
112.741	-7.341	0.085	28.720
112.758	-7.341	0.082	28.751
112.775	-7.341	0.080	28.787
112.791	-7.341	0.080	28.829
112.808	-7.341	0.078	28.870
112.825	-7.341	0.081	28.920
112.591	-7.358	0.084	28.461
112.608	-7.358	0.089	28.485
112.625	-7.358	0.094	28.509
112.641	-7.358	0.097	28.531
112.658	-7.358	0.099	28.554
112.675	-7.358	0.099	28.575
112.691	-7.358	0.097	28.595
112.708	-7.358	0.096	28.618
112.725	-7.358	0.094	28.641
112.741	-7.358	0.092	28.667
112.758	-7.358	0.091	28.698
112.775	-7.358	0.092	28.733
112.808	-7.358	0.091	28.812
112.575	-7.375	0.063	28.395
112.591	-7.375	0.072	28.422
112.608	-7.375	0.079	28.446
112.625	-7.375	0.083	28.468

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.641	-7.375	0.087	28.488
112.658	-7.375	0.088	28.508
112.675	-7.375	0.088	28.527
112.691	-7.375	0.088	28.546
112.708	-7.375	0.087	28.565
112.725	-7.375	0.086	28.586
112.741	-7.375	0.085	28.610
112.758	-7.375	0.084	28.637
112.775	-7.375	0.084	28.669
112.791	-7.375	0.085	28.705
112.808	-7.375	0.082	28.741
112.825	-7.375	0.080	28.780
112.841	-7.375	0.075	28.819
112.858	-7.375	0.063	28.851
112.575	-7.358	0.070	28.429
112.791	-7.358	0.083	28.763
112.825	-7.358	0.081	28.846
112.841	-7.358	0.080	28.891
112.858	-7.358	0.069	28.925
112.575	-7.341	0.072	28.468
112.841	-7.341	0.073	28.959
112.858	-7.341	0.065	28.999
112.575	-7.325	0.071	28.513
112.825	-7.325	0.064	28.982
112.841	-7.325	0.065	29.032
112.858	-7.325	0.058	29.074
112.575	-7.308	0.067	28.564

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.841	-7.308	0.055	29.105
112.858	-7.308	0.050	29.150
112.575	-7.291	0.062	28.623
112.825	-7.291	0.047	29.131
112.841	-7.291	0.047	29.181
112.858	-7.291	0.042	29.227
112.575	-7.275	0.055	28.685
112.825	-7.275	0.039	29.207
112.841	-7.275	0.038	29.256
112.858	-7.275	0.035	29.304
112.575	-7.258	0.046	28.749
112.825	-7.258	0.031	29.284
112.841	-7.258	0.030	29.333
112.858	-7.258	0.028	29.382
112.575	-7.241	0.038	28.816
112.808	-7.241	0.025	29.315
112.825	-7.241	0.023	29.363
112.841	-7.241	0.021	29.412
112.858	-7.241	0.021	29.463
112.758	-7.241	0.040	29.186
112.575	-7.225	0.031	28.884
112.791	-7.225	0.021	29.353
112.808	-7.225	0.017	29.398
112.825	-7.225	0.014	29.445
112.841	-7.225	0.013	29.495
112.858	-7.225	0.014	29.548
112.708	-7.225	0.039	29.140

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.641	-7.225	0.038	28.996
112.575	-7.208	0.026	28.956
112.608	-7.208	0.028	29.009
112.641	-7.208	0.030	29.069
112.658	-7.208	0.030	29.102
112.675	-7.208	0.030	29.138
112.691	-7.208	0.030	29.177
112.708	-7.208	0.029	29.218
112.725	-7.208	0.028	29.261
112.791	-7.208	0.012	29.438
112.808	-7.208	0.008	29.484
112.825	-7.208	0.005	29.532
112.841	-7.208	0.005	29.584
112.858	-7.208	0.007	29.638
112.575	-7.191	0.022	29.029
112.591	-7.191	0.023	29.056
112.608	-7.191	0.023	29.084
112.625	-7.191	0.023	29.113
112.641	-7.191	0.023	29.145
112.658	-7.191	0.023	29.180
112.675	-7.191	0.023	29.217
112.691	-7.191	0.022	29.257
112.708	-7.191	0.021	29.299
112.725	-7.191	0.019	29.343
112.741	-7.191	0.017	29.389
112.758	-7.191	0.014	29.435
112.775	-7.191	0.009	29.481

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.791	-7.191	0.005	29.528
112.808	-7.191	0.001	29.576
112.825	-7.191	-0.001	29.627
112.841	-7.191	-0.001	29.679
112.858	-7.191	0.003	29.737
112.575	-7.175	0.022	29.108
112.608	-7.175	0.021	29.163
112.625	-7.175	0.020	29.193
112.641	-7.175	0.020	29.226
112.658	-7.175	0.020	29.263
112.675	-7.175	0.019	29.301
112.691	-7.175	0.018	29.342
112.708	-7.175	0.017	29.386
112.725	-7.175	0.015	29.431
112.741	-7.175	0.013	29.479
112.758	-7.175	0.010	29.527
112.775	-7.175	0.007	29.577
112.791	-7.175	0.004	29.627
112.808	-7.175	0.001	29.678
112.825	-7.175	-0.000	29.730
112.841	-7.175	0.000	29.785
112.858	-7.175	0.004	29.844

## Lampiran 3

Tabel Nilai Geoid Gravimetrik dan Geoid Metode *Fast Fourier Transform*

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.591	-7.175	0.033	29.146
112.591	-7.208	0.042	28.997
112.625	-7.208	0.044	29.053
112.741	-7.208	0.042	29.321
112.758	-7.208	0.039	29.366
112.775	-7.208	0.033	29.409
112.591	-7.225	0.049	28.926
112.608	-7.225	0.052	28.954
112.625	-7.225	0.054	28.983
112.658	-7.225	0.056	29.045
112.675	-7.225	0.057	29.081
112.691	-7.225	0.056	29.117
112.725	-7.225	0.054	29.197
112.741	-7.225	0.052	29.240
112.758	-7.225	0.049	29.284
112.775	-7.225	0.043	29.326
112.591	-7.241	0.058	28.858
112.608	-7.241	0.061	28.885
112.625	-7.241	0.063	28.913
112.641	-7.241	0.065	28.942
112.658	-7.241	0.066	28.974
112.675	-7.241	0.067	29.008
112.691	-7.241	0.066	29.043
112.741	-7.241	0.061	29.161
112.775	-7.241	0.052	29.245

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.791	-7.241	0.047	29.288
112.591	-7.258	0.067	28.791
112.608	-7.258	0.071	28.818
112.625	-7.258	0.074	28.846
112.641	-7.258	0.076	28.875
112.658	-7.258	0.078	28.906
112.675	-7.258	0.078	28.938
112.691	-7.258	0.078	28.973
112.708	-7.258	0.077	29.009
112.725	-7.258	0.074	29.046
112.741	-7.258	0.070	29.085
112.758	-7.258	0.065	29.125
112.775	-7.258	0.059	29.165
112.791	-7.258	0.055	29.209
112.808	-7.258	0.051	29.254
112.591	-7.275	0.078	28.728
112.608	-7.275	0.082	28.754
112.625	-7.275	0.087	28.783
112.641	-7.275	0.088	28.810
112.658	-7.275	0.090	28.841
112.675	-7.275	0.089	28.871
112.691	-7.275	0.089	28.904
112.708	-7.275	0.085	28.937
112.725	-7.275	0.083	28.974
112.741	-7.275	0.078	29.010
112.758	-7.275	0.072	29.048
112.775	-7.275	0.067	29.089



Bujur	Lintang	Geoid gravimetri (m)	Geoid (m)
112.791	-7.275	0.062	29.131
112.808	-7.275	0.059	29.177
112.591	-7.291	0.088	28.668
112.608	-7.291	0.092	28.694
112.625	-7.291	0.097	28.722
112.641	-7.291	0.100	28.750
112.658	-7.291	0.101	28.779
112.675	-7.291	0.100	28.808
112.691	-7.291	0.099	28.839
112.70	-7.291	0.095	28.870
112.725	-7.291	0.092	28.904
112.741	-7.291	0.085	28.937
112.758	-7.291	0.080	28.974
112.775	-7.291	0.074	29.013
112.7917	-7.291	0.069	29.055
112.808	-7.291	0.067	29.101
112.591	-7.308	0.095	28.612
112.608	-7.308	0.100	28.637
112.625	-7.308	0.105	28.665
112.641	-7.308	0.109	28.693
112.658	-7.308	0.109	28.719
112.675	-7.308	0.108	28.747
112.691	-7.308	0.106	28.775
112.708	-7.308	0.102	28.804
112.725	-7.308	0.098	28.835
112.741	-7.308	0.092	28.867
112.758	-7.308	0.086	28.901

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.775	-7.308	0.080	28.938
112.791	-7.308	0.076	28.980
112.808	-7.308	0.075	29.026
112.825	-7.308	0.075	29.075
112.591	-7.325	0.098	28.559
112.608	-7.325	0.104	28.585
112.625	-7.325	0.110	28.612
112.641	-7.325	0.113	28.638
112.658	-7.325	0.113	28.663
112.675	-7.325	0.112	28.688
112.691	-7.325	0.110	28.714
112.708	-7.325	0.105	28.739
112.725	-7.325	0.102	28.769
112.741	-7.325	0.097	28.799
112.758	-7.325	0.092	28.832
112.775	-7.325	0.087	28.867
112.791	-7.325	0.084	28.908
112.808	-7.325	0.084	28.954
112.591	-7.341	0.099	28.513
112.608	-7.341	0.105	28.538
112.625	-7.341	0.110	28.564
112.641	-7.341	0.113	28.588
112.658	-7.341	0.114	28.612
112.675	-7.341	0.113	28.635
112.691	-7.341	0.111	28.658
112.708	-7.341	0.108	28.682
112.725	-7.341	0.105	28.708

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.741	-7.341	0.101	28.736
112.758	-7.341	0.098	28.767
112.775	-7.341	0.096	28.803
112.791	-7.341	0.096	28.845
112.808	-7.341	0.094	28.886
112.825	-7.341	0.097	28.936
112.591	-7.358	0.098	28.475
112.608	-7.358	0.103	28.499
112.625	-7.358	0.109	28.524
112.641	-7.358	0.112	28.546
112.658	-7.358	0.114	28.569
112.675	-7.358	0.113	28.589
112.691	-7.358	0.112	28.610
112.708	-7.358	0.111	28.633
112.725	-7.358	0.109	28.656
112.741	-7.358	0.107	28.682
112.758	-7.358	0.106	28.713
112.775	-7.358	0.107	28.748
112.808	-7.358	0.107	28.828
112.575	-7.375	0.077	28.409
112.591	-7.375	0.086	28.436
112.608	-7.375	0.092	28.459
112.625	-7.375	0.097	28.482
112.641	-7.375	0.101	28.503
112.658	-7.375	0.102	28.522
112.675	-7.375	0.103	28.542
112.691	-7.375	0.102	28.560

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.708	-7.375	0.101	28.579
112.725	-7.375	0.101	28.601
112.741	-7.375	0.100	28.625
112.758	-7.375	0.099	28.652
112.775	-7.375	0.099	28.684
112.791	-7.375	0.100	28.720
112.808	-7.375	0.097	28.756
112.825	-7.375	0.096	28.796
112.841	-7.375	0.091	28.835
112.858	-7.375	0.079	28.867
112.575	-7.358	0.084	28.443
112.791	-7.358	0.098	28.778
112.825	-7.358	0.097	28.862
112.841	-7.358	0.096	28.907
112.858	-7.358	0.085	28.942
112.575	-7.341	0.086	28.482
112.841	-7.341	0.090	28.976
112.858	-7.341	0.081	29.015
112.575	-7.325	0.086	28.528
112.825	-7.325	0.080	28.998
112.841	-7.325	0.082	29.049
112.858	-7.325	0.075	29.091
112.575	-7.308	0.082	28.579
112.841	-7.308	0.072	29.122
112.858	-7.308	0.067	29.167
112.575	-7.291	0.077	28.638
112.825	-7.291	0.064	29.148

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.841	-7.291	0.063	29.197
112.858	-7.291	0.059	29.244
112.575	-7.275	0.070	28.700
112.825	-7.275	0.056	29.224
112.841	-7.275	0.055	29.273
112.858	-7.275	0.052	29.321
112.575	-7.258	0.062	28.765
112.825	-7.258	0.048	29.301
112.841	-7.258	0.047	29.350
112.858	-7.258	0.045	29.399
112.575	-7.241	0.054	28.832
112.808	-7.241	0.043	29.333
112.825	-7.241	0.040	29.380
112.841	-7.241	0.039	29.430
112.858	-7.241	0.038	29.480
112.758	-7.241	0.057	29.203
112.575	-7.225	0.048	28.901
112.791	-7.225	0.039	29.371
112.808	-7.225	0.034	29.415
112.825	-7.225	0.031	29.462
112.841	-7.225	0.030	29.512
112.858	-7.225	0.031	29.565
112.708	-7.225	0.056	29.157
112.641	-7.225	0.055	29.013
112.575	-7.208	0.043	28.973
112.608	-7.208	0.045	29.026
112.641	-7.208	0.047	29.086

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.658	-7.208	0.047	29.119
112.675	-7.208	0.048	29.156
112.691	-7.208	0.047	29.194
112.708	-7.208	0.046	29.235
112.725	-7.208	0.045	29.278
112.791	-7.208	0.030	29.456
112.808	-7.208	0.025	29.501
112.825	-7.208	0.023	29.550
112.847	-7.208	0.022	29.601
112.858	-7.208	0.025	29.656
112.575	-7.191	0.039	29.046
112.591	-7.191	0.040	29.073
112.608	-7.191	0.040	29.101
112.625	-7.191	0.040	29.130
112.647	-7.191	0.040	29.162
112.658	-7.191	0.040	29.197
112.675	-7.191	0.040	29.234
112.691	-7.191	0.039	29.274
112.708	-7.191	0.038	29.316
112.725	-7.191	0.036	29.360
112.741	-7.191	0.034	29.406
112.758	-7.191	0.031	29.452
112.775	-7.191	0.027	29.499
112.791	-7.191	0.022	29.545
112.808	-7.191	0.018	29.593
112.825	-7.191	0.016	29.644
112.841	-7.191	0.016	29.696

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.858	-7.191	0.020	29.754
112.575	-7.175	0.039	29.125
112.608	-7.175	0.038	29.180
112.625	-7.175	0.037	29.210
112.641	-7.175	0.037	29.243
112.658	-7.175	0.037	29.280
112.675	-7.175	0.036	29.318
112.691	-7.175	0.036	29.360
112.708	-7.175	0.034	29.403
112.725	-7.175	0.033	29.449
112.741	-7.175	0.030	29.496
112.758	-7.175	0.027	29.544
112.775	-7.175	0.024	29.594
112.791	-7.175	0.021	29.644
112.808	-7.175	0.018	29.695
112.825	-7.175	0.016	29.747
112.841	-7.175	0.017	29.802
112.708	-7.241	0.066	29.081
112.725	-7.241	0.064	29.121
112.858	-7.175	0.021	29.861

## Lampiran 4

Tabel Nilai Geoid Gravimetrik dan Geoid Metode *Fast Fourier Transform*

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.625	-7.208	0.061	29.070
112.742	-7.208	0.059	29.338
112.759	-7.208	0.056	29.383
112.775	-7.208	0.051	29.427
112.592	-7.225	0.065	28.942
112.608	-7.225	0.068	28.970
112.625	-7.225	0.070	28.999
112.659	-7.225	0.073	29.062
112.675	-7.225	0.074	29.098
112.692	-7.225	0.073	29.134
112.725	-7.225	0.071	29.214
112.742	-7.225	0.069	29.257
112.759	-7.225	0.066	29.301
112.775	-7.225	0.061	29.344
112.592	-7.242	0.074	28.874
112.608	-7.242	0.077	28.901
112.625	-7.242	0.080	28.930
112.642	-7.242	0.082	28.959
112.659	-7.242	0.083	28.991
112.675	-7.242	0.084	29.025
112.692	-7.242	0.083	29.060
112.775	-7.242	0.069	29.262
112.792	-7.242	0.064	29.305
112.592	-7.259	0.084	28.808



Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.608	-7.259	0.088	28.835
112.625	-7.259	0.091	28.863
112.642	-7.259	0.093	28.892
112.659	-7.259	0.095	28.923
112.675	-7.259	0.094	28.954
112.692	-7.259	0.095	28.990
112.709	-7.259	0.093	29.022
112.725	-7.259	0.091	29.063
112.742	-7.259	0.087	29.102
112.759	-7.259	0.082	29.142
112.775	-7.259	0.076	29.182
112.792	-7.259	0.072	29.226
112.809	-7.259	0.069	29.272
112.592	-7.275	0.094	28.744
112.608	-7.275	0.098	28.770
112.625	-7.275	0.103	28.799
112.642	-7.275	0.105	28.827
112.659	-7.275	0.107	28.858
112.675	-7.275	0.106	28.888
112.692	-7.275	0.105	28.920
112.709	-7.275	0.102	28.954
112.725	-7.275	0.099	28.990
112.742	-7.275	0.095	29.027
112.759	-7.275	0.089	29.065
112.775	-7.275	0.083	29.105
112.792	-7.275	0.079	29.148

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.809	-7.275	0.076	29.194
112.592	-7.292	0.103	28.683
112.608	-7.292	0.108	28.710
112.625	-7.292	0.113	28.738
112.642	-7.292	0.116	28.766
112.659	-7.292	0.117	28.795
112.675	-7.292	0.116	28.824
112.692	-7.292	0.115	28.855
112.709	-7.292	0.112	28.887
112.725	-7.292	0.108	28.920
112.742	-7.292	0.102	28.954
112.759	-7.292	0.097	28.991
112.775	-7.292	0.091	29.030
112.792	-7.292	0.085	29.071
112.809	-7.292	0.084	29.118
112.592	-7.309	0.110	28.627
112.608	-7.309	0.116	28.653
112.625	-7.309	0.120	28.680
112.642	-7.309	0.124	28.708
112.659	-7.309	0.125	28.735
112.675	-7.309	0.124	28.763
112.692	-7.309	0.122	28.791
112.709	-7.309	0.118	28.820
112.725	-7.309	0.114	28.851
112.742	-7.309	0.108	28.883
112.759	-7.309	0.103	28.918

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.775	-7.309	0.097	28.955
112.792	-7.309	0.093	28.997
112.809	-7.309	0.091	29.042
112.826	-7.309	0.092	29.092
112.592	-7.325	0.113	28.574
112.608	-7.325	0.119	28.600
112.625	-7.325	0.125	28.627
112.642	-7.325	0.128	28.653
112.659	-7.325	0.129	28.679
112.675	-7.325	0.128	28.704
112.692	-7.325	0.126	28.730
112.709	-7.325	0.121	28.755
112.725	-7.325	0.118	28.785
112.742	-7.325	0.113	28.815
112.759	-7.325	0.108	28.848
112.775	-7.325	0.104	28.884
112.792	-7.325	0.100	28.924
112.809	-7.325	0.101	28.971
112.592	-7.342	0.113	28.527
112.608	-7.342	0.119	28.552
112.625	-7.342	0.125	28.579
112.642	-7.342	0.128	28.603
112.659	-7.342	0.130	28.628
112.675	-7.342	0.128	28.650
112.692	-7.342	0.126	28.673
112.709	-7.342	0.124	28.698

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.725	-7.342	0.121	28.724
112.742	-7.342	0.117	28.752
112.759	-7.342	0.114	28.783
112.775	-7.342	0.112	28.819
112.792	-7.342	0.112	28.861
112.809	-7.342	0.110	28.902
112.826	-7.342	0.114	28.953
112.592	-7.359	0.112	28.489
112.608	-7.359	0.118	28.514
112.625	-7.359	0.123	28.538
112.642	-7.359	0.127	28.561
112.659	-7.359	0.128	28.583
112.675	-7.359	0.128	28.604
112.692	-7.359	0.127	28.625
112.709	-7.359	0.126	28.648
112.725	-7.359	0.124	28.671
112.742	-7.359	0.123	28.698
112.759	-7.359	0.122	28.729
112.775	-7.359	0.123	28.764
112.809	-7.359	0.123	28.844
112.575	-7.375	0.090	28.422
112.592	-7.375	0.100	28.450
112.608	-7.375	0.106	28.473
112.625	-7.375	0.111	28.496
112.642	-7.375	0.115	28.517
112.659	-7.375	0.116	28.536

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.675	-7.375	0.117	28.556
112.692	-7.375	0.117	28.575
112.709	-7.375	0.116	28.594
112.725	-7.375	0.116	28.616
112.742	-7.375	0.115	28.640
112.759	-7.375	0.114	28.667
112.775	-7.375	0.115	28.700
112.792	-7.375	0.115	28.735
112.809	-7.375	0.113	28.772
112.826	-7.375	0.111	28.811
112.842	-7.375	0.106	28.850
112.859	-7.375	0.095	28.883
112.575	-7.359	0.098	28.457
112.792	-7.359	0.114	28.794
112.826	-7.359	0.113	28.878
112.842	-7.359	0.112	28.923
112.859	-7.359	0.101	28.958
112.575	-7.342	0.100	28.496
112.842	-7.342	0.106	28.992
112.859	-7.342	0.098	29.032
112.575	-7.325	0.100	28.542
112.826	-7.325	0.097	29.015
112.842	-7.325	0.098	29.065
112.859	-7.325	0.092	29.108
112.575	-7.309	0.098	28.595
112.842	-7.309	0.089	29.139

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.859	-7.309	0.084	29.184
112.575	-7.292	0.093	28.654
112.826	-7.292	0.081	29.165
112.842	-7.292	0.080	29.214
112.859	-7.292	0.076	29.261
112.575	-7.275	0.086	28.716
112.826	-7.275	0.073	29.241
112.842	-7.275	0.072	29.290
112.859	-7.275	0.069	29.338
112.575	-7.259	0.078	28.781
112.826	-7.259	0.066	29.319
112.842	-7.259	0.064	29.367
112.859	-7.259	0.062	29.416
112.575	-7.242	0.071	28.849
112.809	-7.242	0.060	29.350
112.826	-7.242	0.058	29.398
112.842	-7.242	0.056	29.447
112.859	-7.242	0.055	29.497
112.759	-7.242	0.074	29.220
112.575	-7.225	0.065	28.918
112.792	-7.225	0.056	29.388
112.809	-7.225	0.051	29.432
112.826	-7.225	0.049	29.480
112.842	-7.225	0.047	29.529
112.859	-7.225	0.048	29.582
112.7090	-7.2250	0.0736	29.1746

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.642	-7.225	0.072	29.030
112.575	-7.208	0.060	28.990
112.608	-7.208	0.062	29.043
112.642	-7.208	0.064	29.103
112.650	-7.208	0.065	29.137
112.675	-7.208	0.065	29.173
112.692	-7.208	0.064	29.211
112.709	-7.208	0.063	29.252
112.725	-7.208	0.063	29.296
112.792	-7.208	0.047	29.473
112.809	-7.208	0.042	29.518
112.826	-7.208	0.040	29.567
112.842	-7.208	0.039	29.618
112.859	-7.208	0.042	29.673
112.575	-7.192	0.056	29.063
112.592	-7.192	0.057	29.090
112.608	-7.192	0.057	29.118
112.620	-7.192	0.057	29.147
112.642	-7.192	0.057	29.179
112.659	-7.192	0.057	29.214
112.675	-7.192	0.057	29.251
112.692	-7.192	0.057	29.292
112.709	-7.192	0.055	29.333
112.725	-7.192	0.054	29.378
112.742	-7.192	0.052	29.424
112.759	-7.192	0.048	29.469

Bujur	Lintang	Geoid gravimetrik (m)	Geoid (m)
112.775	-7.192	0.044	29.516
112.792	-7.192	0.039	29.562
112.809	-7.192	0.035	29.610
112.826	-7.192	0.033	29.661
112.842	-7.192	0.033	29.713
112.859	-7.192	0.037	29.771
112.575	-7.175	0.056	29.142
112.608	-7.175	0.056	29.198
112.625	-7.175	0.054	29.227
112.642	-7.175	0.054	29.260
112.659	-7.175	0.054	29.297
112.675	-7.175	0.054	29.336
112.692	-7.175	0.053	29.377
112.709	-7.175	0.052	29.421
112.725	-7.175	0.050	29.466
112.742	-7.175	0.047	29.513
112.759	-7.175	0.045	29.562
112.775	-7.175	0.041	29.611
112.792	-7.175	0.038	29.661
112.809	-7.175	0.035	29.712
112.826	-7.175	0.034	29.765
112.592	-7.175	0.051	29.164
112.592	-7.208	0.058	29.013
112.709	-7.242	0.083	29.098
112.725	-7.242	0.081	29.138
112.742	-7.242	0.078	29.178
112.842	-7.175	0.034	29.819
112.859	-7.175	0.038	29.878



## Lampiran 5

Tabel Titik Koordinat

Titik	Bujur	Lintang	h (m)
N59	112.822	-7.310	32.462
N58	112.819	-7.274	32.221
N56	112.809	-7.259	34.06
N46	112.756	-7.268	34.209
N45	112.758	-7.232	33.054
N09	112.591	-7.357	53.731
N28	112.641	-7.342	59.464
N27	112.642	-7.305	42.294
N26	112.640	-7.258	45.767
N32	112.673	-7.355	38.036
N35	112.691	-7.358	37.503
N29	112.640	-7.360	40.43
N10	112.591	-7.357	34.301
N19	112.641	-7.342	33.494
N18	112.642	-7.305	37.359
N23	112.640	-7.258	35.385
N30	112.673	-7.355	33.568
N31	112.691	-7.358	33.327
N24	112.640	-7.360	33.156
N15	112.609	-7.324	52.072
N20	112.625	-7.323	45.586
N21	112.624	-7.345	46.174
N22	112.627	-7.353	40.439
N43	112.743	-7.257	34.261

---

Titik	Bujur	Lintang	h (m)
N12	112.608	-7.275	68.943
N13	112.608	-7.293	58.067
N14	112.606	-7.307	40.808
N05	112.591	-7.291	48.468
N06	112.591	-7.308	40.244
N07	112.591	-7.326	52.647
N08	112.591	-7.344	57.024
N47	112.757	-7.291	32.891
N54	112.792	-7.292	32.470
N03	112.589	-7.252	41.725
N04	112.589	-7.273	66.130
N51	112.775	-7.360	31.947
N49	112.758	-7.357	32.891
N48	112.761	-7.341	33.503
N44	112.744	-7.358	33.267
N40	112.726	-7.359	34.801
N38	112.707	-7.360	34.948
N37	112.707	-7.342	36.330
N57	112.806	-7.358	31.972
N60	112.820	-7.335	31.939
N55	112.747	-7.355	32.005
N53	112.790	-7.277	32.430
N52	112.792	-7.258	32.416
N42	112.741	-7.224	33.371
N11	112.624	-7.225	32.663
N01	112.586	-7.177	36.334

---

---

Titik	Bujur	Lintang	h (m)
N02	112.593	-7.212	33.268
N52	112.792	-7.257	32.798
N41	112.741	-7.208	32.472
N50	112.774	-7.208	32.806
N97	112.794	-7.282	32.213
N103	112.811	-7.275	30.847
N95	112.792	-7.241	31.935
N85	112.792	-7.241	31.068
N86	112.777	-7.222	31.464
N87	112.774	-7.241	31.464
N88	112.775	-7.257	38.918
N79	112.758	-7.258	35.446
N90	112.775	-7.291	30.343
N89	112.775	-7.274	36.849
N104	112.808	-7.292	29.929
N99	112.791	-7.308	32.422
N105	112.808	-7.308	33.000
N100	112.792	-7.324	35.121
N106	112.808	-7.325	32.637
N93	112.775	-7.340	31.290
N107	112.804	-7.342	32.667
N101	112.790	-7.341	32.666
N92	112.775	-7.325	35.685
N83	112.757	-7.326	32.461
N74	112.741	-7.324	33.928
N82	112.758	-7.308	29.789

---

---

Titik	Bujur	Lintang	h (m)
N91	112.775	-7.309	32.416
N69	112.741	-7.240	33.200
N71	112.741	-7.277	35.760
N72	112.740	-7.292	43.142
N73	112.740	-7.308	38.068
N75	112.742	-7.341	33.289
N66	112.723	-7.341	30.833
N65	112.724	-7.325	36.031
N64	112.725	-7.308	37.075
N55	112.708	-7.305	35.656
N54	112.706	-7.291	53.511
N63	112.724	-7.292	33.377
N61	112.725	-7.258	30.971
N62	112.722	-7.276	44.444
N44	112.692	-7.264	34.600
N35	112.674	-7.258	32.235
N26	112.658	-7.258	28.726
N27	112.658	-7.273	37.762
N28	112.662	-7.290	55.171
N29	112.657	-7.308	37.914
N39	112.679	-7.328	38.871
N30	112.657	-7.325	51.188
N22	112.640	-7.324	52.506
N21	112.634	-7.312	37.553
N13	112.628	-7.291	57.800
N19	112.641	-7.275	44.392

---

---

Titik	Bujur	Lintang	h (m)
N11	112.634	-7.261	48.471
N18	112.625	-7.258	42.110
N10	112.624	-7.241	33.521
N8	112.623	-7.208	32.146
N5	112.607	-7.225	30.224
N6	112.613	-7.243	35.747
N17	112.641	-7.242	31.814
N25	112.662	-7.243	35.401
N34	112.672	-7.244	29.572
N33	112.679	-7.226	30.877
N42	112.695	-7.225	33.596
N52	112.707	-7.259	31.663
N45	112.692	-7.274	44.421
N37	112.675	-7.291	62.165
N38	112.676	-7.309	41.784
N47	112.689	-7.308	36.746
N48	112.692	-7.324	34.556
N56	112.708	-7.325	45.906
N77	112.758	-7.224	31.956
N76	112.759	-7.210	31.583
N59	112.726	-7.224	35.297
N60	112.725	-7.241	30.976
N51	112.711	-7.241	31.307
N49	112.691	-7.343	40.543
N40	112.675	-7.343	44.001
N31	112.657	-7.345	45.041

---

Titik	Bujur	Lintang	h (m)
N32	112.657	-7.357	37.348
N14	112.626	-7.304	47.358
N12	112.624	-7.274	58.143
N20	112.641	-7.288	49.771
N36	112.675	-7.275	47.974
N46	112.692	-7.293	49.593
N53	112.707	-7.275	58.138
N7	112.607	-7.258	41.913
N3	112.591	-7.241	33.068
N2	112.594	-7.222	34.443
N24	112.657	-7.223	31.151
N43	112.692	-7.242	31.324
N16	112.609	-7.346	51.623
N17	112.608	-7.358	41.625
N110	112.814	-7.296	32.593

## Lampiran 6

Tabel Hasil Koreksi dan Anomali *Free-Air*

Bujur	Lintang	<i>Free-Air</i>	
		Koreksi(mGal)	Anomali(mGal)
112.741	-7.308	2.868	-8.071
112.743	-7.341	1.436	-18.009
112.724	-7.342	0.689	-18.293
112.725	-7.325	2.273	-11.692
112.725	-7.308	2.573	-8.390
112.709	-7.306	2.142	-7.911
112.707	-7.292	7.635	0.573
112.724	-7.292	1.410	-8.445
112.725	-7.259	0.617	-4.030
112.723	-7.277	4.804	-0.396
112.693	-7.264	1.769	-4.999
112.675	-7.258	1.042	-5.376
112.658	-7.258	-0.032	-7.692
112.659	-7.274	2.779	-6.430
112.662	-7.291	8.172	1.440
112.658	-7.308	2.872	-6.562
112.679	-7.328	3.179	-8.915
112.658	-7.326	6.987	-2.720
112.641	-7.324	7.400	-0.955
112.635	-7.313	2.776	-6.838
112.628	-7.291	9.002	2.196
112.641	-7.275	4.836	-1.000
112.634	-7.261	6.079	1.037
112.625	-7.242	1.441	-1.570
112.624	-7.208	0.968	6.276

Bujur	Lintang	<i>Free-Air</i>	
		Koreksi(mGal)	Anomal(mGal)i
112.608	-7.225	0.409	1.105
112.614	-7.244	2.137	-1.254
112.641	-7.242	0.908	-2.476
112.662	-7.243	2.004	-0.286
112.673	-7.245	0.201	-4.192
112.680	-7.226	0.571	0.992
112.695	-7.226	1.398	2.760
112.708	-7.259	0.845	-4.542
112.692	-7.275	4.815	-2.323
112.676	-7.292	10.325	4.188
112.676	-7.309	4.057	-5.290
112.689	-7.308	2.494	-7.364
112.692	-7.325	1.836	-11.557
112.709	-7.325	5.330	-5.738
112.759	-7.225	0.839	2.660
112.760	-7.210	0.698	5.286
112.726	-7.224	1.897	4.793
112.725	-7.241	0.592	-0.768
112.712	-7.241	0.704	-0.754
112.692	-7.343	3.703	-10.771
112.676	-7.343	4.778	-7.796
112.658	-7.346	5.109	-5.751
112.657	-7.357	2.744	-9.924
112.626	-7.305	5.796	-1.180
112.624	-7.275	9.087	2.663
112.641	-7.289	6.514	-0.837



Bujur	Lintang	<i>Free-Air</i>	
		Koreksi(mGal)	Anomali(mGal)
112.675	-7.275	5.922	-1.000
112.692	-7.294	6.438	-0.785
112.708	-7.276	9.039	6.671
112.607	-7.258	4.063	-1.595
112.592	-7.241	1.316	-1.588
112.594	-7.223	1.713	4.652
112.658	-7.223	0.665	1.731
112.692	-7.242	0.725	-0.678
112.815	-7.296	1.100	-10.859
112.742	-7.209	0.986	6.063
112.775	-7.209	1.060	6.116
112.792	-7.258	1.123	-2.367
112.741	-7.225	1.291	3.631
112.624	-7.225	1.154	2.001
112.586	-7.177	2.235	16.555
112.594	-7.212	1.336	6.837
112.791	-7.278	1.042	-6.260
112.793	-7.258	1.006	-2.706
112.807	-7.358	1.004	-23.003
112.820	-7.336	0.952	-20.204
112.747	-7.355	1.024	-22.496
112.776	-7.361	1.022	-23.373
112.758	-7.358	1.321	-22.009
112.761	-7.341	1.489	-19.898
112.744	-7.358	1.446	-20.730
112.727	-7.360	1.931	-18.907

Bujur	Lintang	<i>Free-Air</i>	
		Koreksi(mGal)	Anomali(mGal)
112.707	-7.361	1.986	-17.374
112.708	-7.343	2.395	-13.878
112.589	-7.252	4.004	0.726
112.589	-7.273	11.565	6.992
112.591	-7.292	6.137	-2.738
112.591	-7.308	3.619	-7.500
112.591	-7.327	7.466	-3.292
112.592	-7.344	8.831	-1.618
112.758	-7.291	1.234	-9.293
112.793	-7.293	1.076	-9.717
112.609	-7.275	12.428	7.876
112.608	-7.293	9.095	1.795
112.607	-7.308	3.787	-6.325
112.609	-7.325	7.280	-1.883
112.626	-7.324	5.271	-3.773
112.624	-7.345	5.471	-3.768
112.609	-7.347	7.160	-1.933
112.609	-7.358	4.082	-7.259
112.627	-7.354	3.707	-6.416
112.743	-7.257	1.616	-1.482
112.618	-7.191	1.611	11.824
112.606	-7.214	1.403	5.649
112.624	-7.191	2.551	12.913
112.643	-7.191	1.932	12.081
112.634	-7.195	1.255	10.324
112.653	-7.212	1.288	10.848

Bujur	Lintang	<i>Free-Air</i>	
		Koreksi(mGal)	Anomali(mGal)
112.656	-7.192	1.396	6.704
112.692	-7.358	2.779	-13.476
112.674	-7.356	2.949	-11.036
112.640	-7.360	3.704	-6.499
112.591	-7.357	7.824	-4.526
112.642	-7.342	9.564	1.076
112.642	-7.306	4.228	-4.244
112.640	-7.258	5.237	0.716
112.759	-7.232	1.191	2.188
112.810	-7.260	1.499	-2.603
112.820	-7.274	0.946	-6.240
112.823	-7.310	1.074	-7.449
112.756	-7.268	1.606	-3.435
112.626	-7.259	4.116	-0.870
112.742	-7.278	2.111	-4.500
112.740	-7.292	4.411	-2.221

## Lampiran 7

Tabel Koordinat Data Gayaberat Terestris

Bujur	Lintang	<i>Ell. Height(m)</i>
112.725	-7.325	36.031
112.725	-7.308	37.075
112.709	-7.306	35.656
112.707	-7.292	53.511
112.724	-7.292	33.377
112.725	-7.259	30.971
112.723	-7.277	44.444
112.693	-7.264	34.601
112.675	-7.258	32.235
112.658	-7.258	28.726
112.659	-7.274	37.762
112.662	-7.291	55.172
112.658	-7.308	37.914
112.679	-7.328	38.872
112.658	-7.326	51.188
112.641	-7.324	52.506
112.635	-7.313	37.553
112.628	-7.291	57.800
112.641	-7.275	44.392
112.634	-7.261	48.472
112.626	-7.259	42.110
112.625	-7.242	33.521
112.624	-7.208	32.146
112.608	-7.225	30.224
112.662	-7.243	35.401
112.673	-7.245	29.572

Bujur	Lintang	<i>Ell. Height(m)</i>
112.695	-7.226	33.596
112.708	-7.259	31.663
112.692	-7.275	44.421
112.676	-7.292	62.165
112.676	-7.309	41.784
112.689	-7.308	36.746
112.692	-7.325	34.556
112.709	-7.325	45.906
112.759	-7.225	31.956
112.760	-7.210	31.583
112.726	-7.224	35.297
112.725	-7.241	30.976
112.712	-7.241	31.307
112.692	-7.343	40.543
112.676	-7.343	44.001
112.658	-7.346	45.041
112.657	-7.357	37.348
112.626	-7.305	47.358
112.624	-7.275	58.143
112.641	-7.289	49.771
112.675	-7.275	47.974
112.692	-7.294	49.593
112.708	-7.276	58.138
112.607	-7.258	41.913
112.592	-7.241	33.068
112.594	-7.223	34.443
112.692	-7.242	31.324

Bujur	Lintang	<i>Ell. Height(m)</i>
112.742	-7.209	32.472
112.775	-7.209	32.806
112.792	-7.258	32.798
112.741	-7.225	33.371
112.624	-7.225	32.663
112.586	-7.177	36.334
112.594	-7.212	33.268
112.791	-7.278	32.430
112.793	-7.258	32.416
112.807	-7.358	31.972
112.820	-7.336	31.939
112.747	-7.355	32.005
112.776	-7.361	31.947
112.758	-7.358	32.891
112.761	-7.341	33.503
112.744	-7.358	33.267
112.727	-7.360	34.801
112.707	-7.361	34.948
112.708	-7.343	36.330
112.589	-7.252	41.725
112.589	-7.273	66.130
112.591	-7.292	48.468
112.591	-7.308	40.244
112.591	-7.327	52.647
112.592	-7.344	57.024
112.758	-7.291	32.891
112.609	-7.275	68.943

Bujur	Lintang	<i>Ell. Height(m)</i>
112.607	-7.308	40.808
112.609	-7.325	52.072
112.626	-7.324	45.586
112.624	-7.345	46.174
112.609	-7.347	51.623
112.609	-7.358	41.625
112.627	-7.354	40.439
112.743	-7.257	34.261
112.618	-7.191	34.301
112.606	-7.214	33.494
112.624	-7.191	37.359
112.643	-7.191	35.385
112.634	-7.195	33.156
112.653	-7.212	33.327
112.656	-7.192	33.568
112.692	-7.358	37.503
112.674	-7.356	38.036
112.640	-7.360	40.430
112.591	-7.357	53.731
112.642	-7.342	59.464
112.642	-7.306	42.294
112.640	-7.258	45.767
112.759	-7.232	33.054
112.810	-7.260	34.060
112.820	-7.274	32.221
112.823	-7.310	32.462
112.680	-7.226	30.878

Bujur	Lintang	<i>Ell. Height(m)</i>
112.775	-7.325	35.685
112.742	-7.325	33.928
112.757	-7.327	32.461
112.759	-7.309	29.789
112.614	-7.244	35.747
112.641	-7.242	31.814
112.658	-7.223	31.151
112.793	-7.293	32.470
112.756	-7.268	34.209



## BIODATA PENULIS



Penulis bernama Wahyunan Andika biasa dipanggil Dika. Lahir di Jakarta pada tanggal 5 November 1997. Penulis bertempat tinggal di Jl. H.Muhyin No.35 04/06, Jaticempaka, Pondok Gede, Bekasi. Penulis telah menempuh pendidikan antara lain TK Fadlurrahman. Setelah lulus TK, penulis menempuh Pendidikan SD yaitu di SDN Jatiwaringin 24 (2003-2009). Setelah lulus SD, penulis menempuh pendidikan lanjut pada SMPN 135 Jakarta Timur (2009-2012). Setelah lulus, Penulis menempuh pendidikan di SMAN 81 Jakarta Timur (2012-2015). Pada tahun 2015, penulis diterima di Teknik Geomatika Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur SBMPTN. Selama di bangku kuliah penulis mengikuti kegiatan organisasi maupun kepanitiaan. Penulis pernah mengikuti beberapa kegiatan kepanitiaan antara lain pada acara Pekan Seni Mahasiswa ITS Tahun 2016, OC LKMM Pra Tingkat Dasar Tahun 2016. Penulis pernah mengikuti lomba internasional Oil Fest yang di selenggarakan di Jakarta oleh Universitas Trisakti, dan peserta seminar Seminar Nasional Oilrig tahun 2016 di Jakarta. Selain itu, Penulis juga aktif dalam bidang organisasi antara lain adalah Staff Departemen Kreativitas Mahasiswa HIMAGE ITS Tahun 2017-2018 dan Staff Divisi Big Event Tahun 2018-2019. Penulis juga pernah melaksanakan kerja praktik di Badan Pertanahan Nasional Kota Tarakan pada Tahun 2018. Pada tugas akhirnya, penulis mengambil bidang Pemodelan Geoid dengan judul Perbandingan Metode *Direct Numerical Integration*, *Fast Fourier Transform*, dan *Least Square Collocation* Dalam Memodelkan Geoid Kota Surabaya.