

PEMODELAN GEOID KOTA SEMARANG

Tanggo Rastawira¹⁾ Ir. Sutomo Kahar, M.Si. ²⁾ L.M. Sabri, S.T., M.T. ³⁾

¹⁾ Mahasiswa Teknik Geodesi Universitas Diponegoro

²⁾ Dosen Pembimbing I Teknik Geodesi Universitas Diponegoro

³⁾ Dosen Pembimbing II Teknik Geodesi Universitas Diponegoro

ABSTRAK

Kota Semarang merupakan ibukota provinsi Jawa Tengah yang memiliki kondisi topografi yang unik dengan variasi dataran dan perbukitan. Kondisi topografi yang seperti itu menjadikan penentuan tinggi orthometrik dengan metode sipat datar menyebar ke seluruh wilayah Kota Semarang membutuhkan tenaga, waktu, dan biaya yang tidak sedikit. Adanya teknologi GPS yang mampu menyajikan data informasi tentang posisi secara cepat dan tepat dapat dijadikan alternatif penentuan tinggi teliti di masa kini. Akan tetapi tinggi yang dihasilkan oleh GPS adalah tinggi yang mengacu pada ellipsoid, maka dibutuhkan model geoid yang teliti untuk mengkonversi tinggi geodetik menjadi tinggi orthometrik.

Pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai penentuan model geoid pada lokasi pengukuran gayaberat lokal Kota Semarang. Penentuan geoid dilakukan dengan metode kombinasi yaitu dengan menggabungkan informasi dari gayaberat lokal dengan model geopotensial global EGM96 sampai dengan derajat dan orde 120. Tinggi undulasi geoid Kota Semarang hasil perhitungan metode kombinasi berkisar antara 26,73026703 sampai dengan 26,99150681 meter dengan titik terendah di BM Surip 7 sedangkan yang tertinggi di daerah Walter Mongisidi. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa model geoid yang dihasilkan dari metode kombinasi lebih baik dibandingkan dengan pemakaian model geopotensial global EGM96 dan EGM2008 sampai derajat dan orde penuh.

Kata kunci: Tinggi Orthometrik, Model Geoid, Metode Kombinasi.

ABSTRACT

Semarang city is the capital of the province of Central Java which has a unique topography with a variety of plains and hills. That topography makes the determination of orthometrik height using levelling methods spread throughout the city of Semarang takes a lot of energy, time, and cost. The existence of GPS technology is able to present information of data position quickly and accurately which can be used as an alternative high-conscientious determination in the present. However, the height produced by GPS is height which referring to the ellipsoid, so the accurate geoid models is needed to convert geodetic height to be orthometrik height.

In this final project will discuss the determination of the geoid models at local gravity measurement locations of Semarang City. Geoid determination is done using combination method that combining information from local gravity and the global geopotential models EGM96 up to degree and order 120. The height of geoid undulation at Semarang City is about 26,73026703 to 26,99150681 meters with lower point at BM Surip 7 and the higher at Walter Mongisidi areas. The verification results showing that the result of geoid models using combination method is better than the use of a global geopotential models EGM96 and EGM2008 up to degree and order maximum.

Keywords: Orthometrik Height, Geoid Models, Combination Method.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Geoid disebut sebagai model bumi yang mendekati sesungguhnya. Lebih jauh geoid didefinisikan sebagai bidang equipotensial gayaberasat atau bidang nivo yang berimpit dengan permukaan laut rata-rata (tidak terganggu) [Kahar, S. 2007]. Di dalam geodesi geoid bereferensi terhadap ellipsoid karena ellipsoid merupakan model matematis pendekatan bumi. Jarak antara permukaan ellipsoid dengan permukaan geoid dinamakan undulasi geoid.

Di dalam geodesi besaran tinggi adalah salah satu unsur posisi yang sangat penting. Geoid merupakan referensi tinggi yang dipakai pada penentuan tinggi orthometrik. Tinggi orthometrik adalah tinggi yang mengacu pada permukaan geoid. Tinggi orthometrik ini lah yang biasa dipakai untuk keperluan praktis seperti rekayasa, survei, dan pemetaan. Pada saat ini dan yang akan datang kebutuhan akan model geoid akan mendesak karena pesatnya pemakaian GPS untuk keperluan rekayasa dan survei pemetaan

Kota Semarang terbagi menjadi 2 wilayah, yaitu wilayah Semarang atas dan wilayah Semarang bawah. Kondisi topografi Kota Semarang yang sangat bervariasi tersebut menyebabkan penentuan tinggi orthometrik dengan pengukuran sipat datar menyebar ke seluruh bagian Kota Semarang membutuhkan tenaga, waktu, dan biaya yang tidak sedikit.

Survei GPS adalah metode penentuan posisi dari beberapa titik secara teliti (orde ketelitian mm-cm) terhadap satu atau beberapa titik kontrol yang telah diketahui koordinatnya, dengan menggunakan pengamatan fase dari satelit GPS yang diamati dalam selang waktu tertentu [Abidin, 2000]. Adanya teknologi GPS yang mampu menyajikan data informasi tentang posisi secara cepat dan tepat dapat dijadikan alternatif penentuan tinggi teliti di masa kini. Akan tetapi dalam penentuan posisi menggunakan GPS komponen tinggi yang diberikan adalah tinggi yang mengacu pada permukaan ellipsoid. Untuk mentransformasikan tinggi ellipsoid yang dihasilkan oleh GPS ke tinggi orthometrik diperlukan informasi tentang nilai undulasi geoid yang dapat ditentukan menggunakan data gayaberasat.

Salah satu penentuan geoid adalah dengan menggunakan model geopotensial global seperti EGM96. Namun penggunaan model geopotensial global ini untuk dikombinasikan dengan pengukuran GPS guna memperoleh nilai tinggi orthometrik masih banyak kekurangan. Untuk mengatasinya adalah dengan menentukan model geoid lokal Kota Semarang dengan menggunakan data gayaberasat relatif Kota Semarang yang dikombinasikan dengan model geopotensial global EGM96. Dengan pemodelan geoid Kota Semarang yang teliti diharapkan survey penentuan tinggi orthometrik dapat ditentukan dengan teliti menggunakan teknologi GPS.

Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana model geoid pada lokasi pengukuran gayaberasat relatif Kota Semarang ?
2. Apakah model geoid yang dihasilkan dapat dijadikan sebagai referensi tinggi untuk keperluan praktis ?

Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari tugas akhir ini adalah :

1. Pengukuran gayaberasat di Kota Semarang.
2. Perhitungan nilai undulasi geoid dengan metode kombinasi.
3. Pemodelan geoid Kota Semarang.
4. Aplikasi model geoid yang didapatkan untuk keperluan penentuan tinggi orthometrik.

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Untuk mengetahui nilai gayaberasat Kota Semarang
2. Untuk mengetahui nilai undulasi geoid dari perhitungan metode kombinasi.
3. Untuk pembuatan peta geoid Kota Semarang.
4. Untuk membandingkan undulasi geoid gravimetrik yang didapatkan dari perhitungan dengan hasil undulasi geoid geometrik.

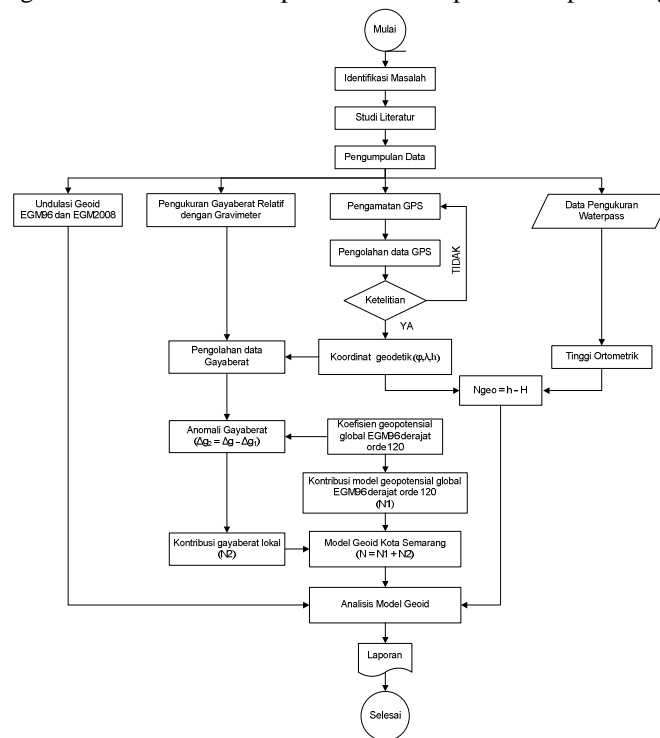
Batasan Masalah

Dalam penulisan tugas akhir ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut :

1. Daerah penelitian merupakan titik-titik pengukuran gayaberat relatif Kota Semarang.
2. Untuk perhitungan undulasi geoid dilakukan pada 23 titik pengamatan gayaberat relatif yang telah dibagi berdasarkan grid 1'x1'.
3. Pengukuran gayaberat relatif dengan Gravimeter Scintrex CG-5 Autograv pada bulan Oktober tahun 2012.
4. Pengamatan GPS dengan menggunakan GPS tipe geodetik Topcon Hiper II pada 23 titik pengamatan dengan base yaitu stasiun CORS Kantor Pertanahan Kabupaten Semarang dan Kabupaten Demak.
5. Data tinggi orthometrik dari pengukuran sipat datar tahun 2004 hingga 2012 pada titik-titik verifikasi.
6. Model geopotensial global yang digunakan adalah EGM96 dengan derajat dan orde sampai 120.
7. Undulasi geometrik dari pengukuran GPS dan sipat datar (*levelling*) dianggap sebagai variabel yang benar.
8. Analisis ketelitian dan orde untuk data tinggi orthometrik tidak dilakukan.

Metodelogi Penelitian

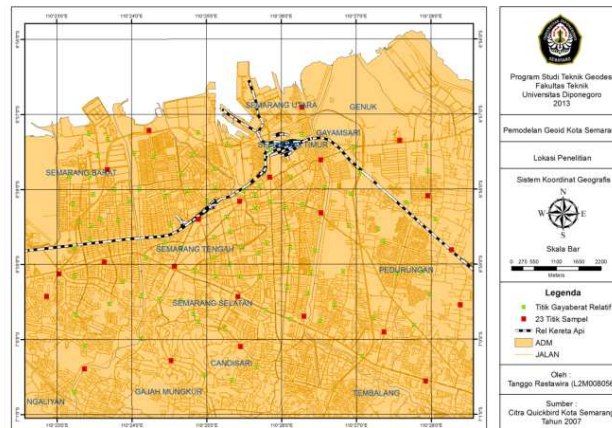
Metodelogi penelitian yang akan dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Penelitian

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah lokasi pengukuran gayaberat relatif Kota Semarang yang terletak antara 06°56'30" - 07°01'00" Lintang Selatan dan 110°22'30" - 110°28'30" Bujur Timur. Berikut adalah gambaran lokasi penelitian untuk pemodelan geoid Kota Semarang beserta titik-titik pengukurannya.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

Lokasi pengukuran gayaberat difokuskan di kawasan perkotaan yang merupakan daerah yang memiliki dampak penurunan tanah yang signifikan setiap tahunnya. Pengukuran gayaberat relatif Kota Semarang dilakukan oleh Dr. Supriyadi M.Si Kepala Lab Fisika Universitas Negeri Semarang untuk pengamatan gayaberat mikro antar waktu. Metode gayaberat mikro antar waktu merupakan pengembangan dari metode gayaberat dengan dimensi keempatnya adalah waktu yang kemudian hasilnya digunakan untuk menentukan *recharge area* dan pola aliran air tanah di daerah Kota Semarang.

Untuk keperluan penentuan undulasi lokal Kota Semarang, titik-titik gayaberat dibagi-bagi per satuan luasan grid 1'x1' seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Setiap luasan grid minimal terdapat satu titik pengamatan gayaberat relatif. Penentuan luasan grid ini didasarkan atas distribusi data gayaberat dan ketersediaan data koordinat yang teliti pada daerah observasi.

Data Penelitian

Data-data yang digunakan dalam pemodelan geoid Kota Semarang antara lain :

1. Data gayaberat relatif di titik-titik pengamatan pada bulan Oktober tahun 2012.
2. Data pengamatan GPS metode statik dengan CORS Kantor Pertanahan Kabupaten Semarang dan Demak.
3. Data tinggi orthometrik.
4. Koefisien geopotensial dari model geopotensial global EGM96 derajat dan orde 120.

Alat dan Bahan

1. Gravimeter Scintrex CG-5 Autograv.
2. GPS Tipe Geodetik Topcon Hiper II.
3. Kontroler Topcon FC-200.
4. Perangkat lunak TopSURV v.7, Topcon Link v.7.5, GNSS Solutions 3.80.8, Matlab R2009a, ArcGIS 9.3, Surfer 9, Microsoft Office 2007, dan Gravsoft atas izin dari Mr. C.C. Tscherning (*University of Copenhagen*).



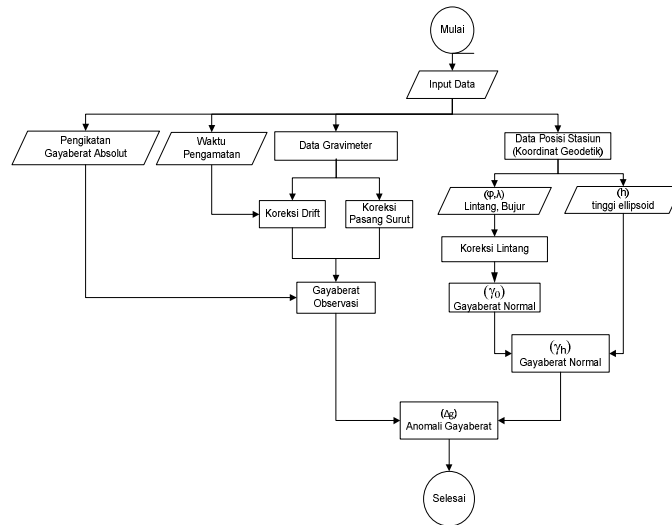
Gambar 3. Alat yang Digunakan

TINJAUAN PUSTAKA

Pemrosesan Gayaberat

Pemrosesan data gayaberat sering disebut dengan reduksi data gayaberat. Proses data gayaberat mencakup keseluruhan proses yang berawal dari nilai pembacaan gravimeter sampai diperoleh nilai anomali

gayaberat. Pemrosesan data gayaberat dilakukan dengan melakukan koreksi gayaberat meliputi koreksi apungan, koreksi pasang surut, koreksi lintang (gayaberat normal).



Gambar 4. Alur Pemrosesan Data Gayaberat

Koreksi-koreksi Gayaberat

Tujuan dari koreksi gayaberat ini adalah untuk mereduksi nilai gayaberat pengamatan pada geoid dan untuk memindahkan massa topografi luar pada geoid dengan menganggap geoid menjadi suatu pembatasan permukaan [Torge, W.2001]. Koreksi-koreksi gayaberat yang dipakai dalam penelitian ini antara lain:

1. Koreksi Apungan (Drift Correction)

Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan kesalahan pembacaan pada alat akibat perpindahan dari suatu titik pengamatan ke titik pengamatan lain. Pada saat dilakukan perpindahan alat akan terjadi guncangan yang mengakibatkan bergesernya pembacaan titik nol pada alat gravimeter. Secara matematis besarnya koreksi drift diberikan pada persamaan berikut :

$$D_n = \frac{t_n - t_B}{t'_B - t_B} (g'_B - g_B) \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

- D_n = Koreksi drift pada titik-n
- t_n = Waktu pembacaan pada titik-n
- t_B = Waktu pembacaan di titik ikat pada awal looping
- t'_B = Waktu pembacaan di titik ikat pada akhir looping
- g_B = Nilai pembacaan di titik ikat pada awal looping
- g'_B = Nilai pembacaan di titik ikat pada akhir looping

2. Koreksi Pasang Surut (Tide Correction)

Koreksi pasang surut bumi dimaksudkan untuk menghilangkan perbedaan pembacaan yang disebabkan oleh pengaruh jarak dari matahari dan bulan pada setiap saat. Pengaruh jarak matahari dan bulan ini akan berpengaruh terhadap bacaan gravimeter. Besarnya koreksi pasang surut [Longman, I.M, 1959], yaitu :

$$T_{ic} = \frac{3Gr}{2} \left\{ \frac{2M}{3d^2} (\sin p - 1) + \frac{Mr}{d^4} (5 \cos^3 p - 3 \cos p) + \frac{2s}{3D^3} (3 \cos^2 q - 1) \right\} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

T_{ic} = Koreksi pasang surut

- G = Konstanta gravitasi Newton
- M = Massa bulan
- r = Jarak titik pengamatan ke pusat bumi
- D = Jarak antara pusat bumi dan matahari
- d = Jarak antara pusat bumi dan bulan
- p = Sudut zenith bulan
- q = Sudut zenith matahari

Hasil dari koreksi pasang surut dan koreksi *drift* kemudian digunakan untuk menghitung nilai g_{obs} dengan persamaan sebagai berikut :

$$g_{obs} = \Delta g_{stasiun} - D_n + T_{ic} \dots\dots\dots(3)$$

Dengan g_{obs} adalah gayaberat observasi yang telah dikoreksi *drift* dan pasang surut.

3. Koreksi Lintang

Perputaran bumi mengakibatkan perbedaan percepatan gravitasi bumi pada setiap lintang. Oleh sebab itu dilakukan reduksi pada lintang dimana titik observasi berada. Dari proses reduksi ini didapatkan nilai gayaberat normal pada titik yang diamati. Gayaberat normal merupakan suatu nilai teoritis yang mempresentasikan kecepatan gravitasi yang dihasilkan oleh ellipsoidal bumi yang menganggap densitasnya homogen.

Dengan memasukkan parameter dari sistem WGS 84 pada persamaan gayaberat normal dapat dituliskan sebagai berikut [Torge, W. 2001]:

$$\gamma_0 = 9,780327(1 + 0,0053024 \sin^2\varphi - 0,0000058 \sin^2 2\varphi) \text{ms}^{-2} \dots\dots\dots(4)$$

Dengan γ_0 adalah nilai gayaberat normal pada posisi titik yang diamati dan φ adalah koordinat lintang.

Untuk menentukan anomali gayaberat, gayaberat normal yang dipakai harus mengacu pada tinggi ellipsoid permukaan (h). Dalam hubungannya terhadap tinggi ellipsoid persamaan gayaberat normal menjadi :

$$\gamma_h = \gamma_0 - (3,0877 \times 10^{-3} - 4,3 \times 10^{-6} \sin^2\varphi)h + 0,72 \times 10^{-6}h^2 \text{ms}^{-2} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana :

- γ_h = Gayaberat normal terhadap tinggi ellipsoid
- γ_0 = Gayaberat normal di ellipsoid
- φ = Koordinat lintang geodetik
- h = Tinggi geodetik / tinggi suatu permukaan diatas ellipsoid referensi

4. Anomali Gayaberat

Anomali gayaberat adalah perbedaan gayaberat di geoid dan gayaberat normal pada permukaan referensi ellipsoid untuk setiap lintang pengamatan [Heiskanen & Moritz, 1967]. Dalam penentuan geoid lokal atau pada daerah yang dikategorikan dalam permukaan bumi yang datar (*flat-earth*), nilai anomali gayaberat dan gangguan gayaberat nilainya adalah sama [Sneeuw, N. 2006] :

$$\Delta g = -\frac{\partial T}{\partial R} = \delta g \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

- Δg = Anomali gayaberat
- ∂T = Gangguan potensial
- ∂R = Gangguan jarak pusat bumi ke titik pengamatan
- g_{obs} = Gayaberat observasi
- γ_h = Gayaberat normal terhadap tinggi ellipsoid
- δg = Gangguan gayaberat

Gangguan gayaberat didefinisikan sebagai selisih antara gayaberat hasil observasi suatu titik g_{obs} di atas permukaan bumi dengan gayaberat normal di titik tersebut γ_h (pada ketinggian h) :

$$\delta g = g_{obs} - \gamma_h \dots\dots\dots(7)$$

Dimana :

- δg = Gangguan gayaberat
- g_{obs} = Gayaberat observasi
- γ_h = Gayaberat normal terhadap tinggi ellipsoid

Untuk mendapatkan gayaberat normal (γ_h) dibutuhkan tinggi terhadap ellipsoid referensi dan dengan menggunakan teknologi GPS, tinggi ellipsoid / geodetik dapat diperoleh dengan mudah melalui persamaan (5).

Perhitungan Undulasi Geoid

Perhitungan undulasi geoid dapat dilakukan dalam berbagai cara dan metode pendekatan salah satunya adalah dengan pendekatan Stokes. Namun untuk perhitungan undulasi geoid dengan Pendekatan Stokes diperlukan informasi gayaberat yang merata di seluruh permukaan bumi (global), sedangkan gayaberat yang tersedia hanya bersifat lokal. Permasalahan ini dapat diatasi dengan menggunakan metode kombinasi yaitu dengan mengkombinasikan antara informasi gayaberat yang bersifat lokal (gelombang pendek) dengan informasi gayaberat yang bersifat global (gelombang panjang). Berikut akan dijelaskan mengenai metode penentuan geoid metode kombinasi.

Metode kombinasi

Pada prinsipnya pendekatan Stokes adalah perhitungan global, sedangkan data anomali gayaberat hanya tersedia pada daerah yang bersifat lokal. Permasalahan ini dapat teratasi dengan menggunakan metode kombinasi yaitu mengkombinasikan antara informasi gayaberat yang bersifat lokal (gelombang pendek) dengan informasi gayaberat yang bersifat global (gelombang panjang). Formula dasar untuk metode kombinasi diberikan :

$$N = N_1 + N_2 \dots\dots\dots(8)$$

Dengan :

- N_1 = Undulasi geoid dari kontribusi model geopotensial global
- N_2 = Undulasi geoid dari kontribusi gayaberat lokal dengan Pendekatan Stokes

1. Kontribusi Model Geopotensial Global (N1)

Kontribusi geoid dari model geopotensial global dihitung menggunakan perpaduan bola harmonik dengan L adalah derajat maksimum model, dengan rumus perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$N_1 = R \sum_{l=2}^L \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos \vartheta) (\Delta \bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \dots\dots\dots(9)$$

Dengan :

- N_1 = Undulasi geoid dari kontribusi model geopotensial global
- R = Jari-jari bola bumi
- $\bar{P}_{lm}(\cos \vartheta)$ = Polinom legendre *fully-normalized* bola harmonik
- ϑ = Co-lintang ($90 - \varphi$)
- $\Delta \bar{C}_{lm}, \Delta \bar{S}_{lm}$ = Koefisien geopotensial *fully-normalized* bola harmonik pada model geopotensial global
- φ, λ = Koordinat geodetik titik komputasi
- l, m = derajat dan orde model geopotensial global

Dalam penentuan kontribusi dari model geopotensial menentukan fungsi legendre *fully-normalized* bola harmonik $\bar{P}_{lm}(\cos \vartheta)$ dilakukan dengan beberapa tahapan sebagai berikut [Torge, W. 2001] :

1. Menghitung polinom legendre zona harmonik $P_l(t)$

$$P_1(t) = \frac{1}{2^{l+1}} \times \frac{d^l}{dt^l} (t^2-1)^l \dots\dots\dots(10)$$

2. Menghitung fungsi legendre *associated* $P_{lm}(t)$

$$P_{lm}(t) = (1-t^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m}{dt^m} P_l(t) \dots\dots\dots(11)$$

3. Menghitung fungsi legendre *fully-normalized* bola harmonik $\bar{P}_{lm}(\cos \vartheta)$

$$\bar{P}_{lm}(t) = \sqrt{k(2l+1) \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_{lm}(t), k = \begin{cases} 1 & \text{untuk } m=0 \\ 2 & \text{untuk } m \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots(12)$$

Dimana :

- t = cos ϑ
- ϑ = Co-lintang (90 – φ)
- l,m = derajat, orde model geopotensial global

2. Kontribusi Gayaberat Lokal (N₂)

Perhitungan Kontribusi gayaberat lokal dilakukan dengan pendekatan Stokes. Untuk parameter anomali gayaberat dihitung 2 kali. Pertama-tama kita tentukan terlebih dahulu anomali gayaberat yang sesuai dengan N1. Kemudian kita hilangkan pengaruh anomali gayaberat yang bersifat global tersebut terhadap anomali gayaberat yang bersifat lokal. Tahapan perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$\Delta g_1 = \gamma_0 \sum_{l=2}^L \bar{P}_{lm}(\cos \vartheta) (l-1) (\Delta \bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{lm} \sin m\lambda) \dots\dots\dots(13)$$

$$\Delta g_2 = \Delta g - \Delta g_1 \dots\dots\dots(14)$$

$$N_2 = \frac{R}{4\pi\gamma_0} \iint_{\sigma_0} S(\psi) \Delta g_2 \, d\sigma \dots\dots\dots(15)$$

Dimana :

- N₂ = Undulasi dari kontribusi model geopotensial global
- Δg = Anomali gayaberat hasil ukurangeopotensial global
- Δg_2 = Anomali gayaberat reduksi
- R = Jari-jari bola bumi
- $\bar{P}_{lm}(\cos \vartheta)$ = Fungsi legendre *fully-normalized* bola harmonik
- ϑ = Co-lintang (90 – φ)
- $\Delta \bar{C}_{lm}, \Delta \bar{S}_{lm}$ = Koefisien geopotensial *fully-normalized* bola harmonik pada model geopotensial global
- φ, λ = Koordinat geodetik titik komputasi
- l,m = derajat dan orde model geopotensial global
- γ_0 = Gayaberat normal diatas permukaan ellipsoid
- S(ψ) = Fungsi Stokes

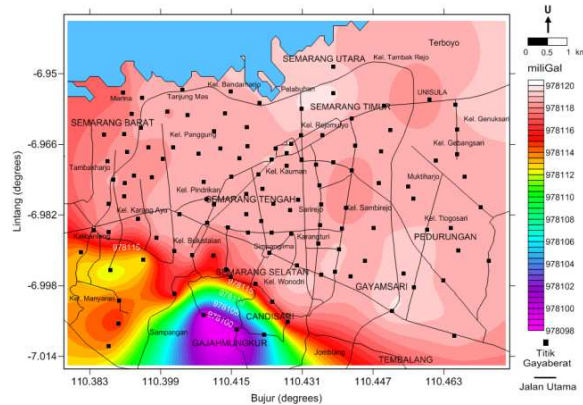
Catatan bahwa daerah integrasi σ_0 merupakan batas daerah yang kita ukur anomali gayaberatnya.

Dalam menentukan undulasi geoid dengan pendekatan Stokes digunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). FFT mengasumsikan fungsi grid menjadi periode dalam x dan y, grid-grid tersebut harus melingkupi dari daerah pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

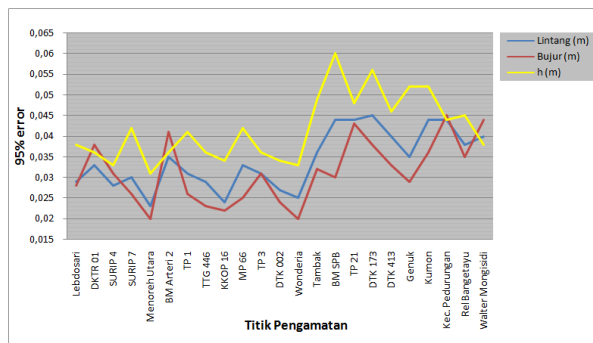
Hasil Pengolahan Gayaberat Lokal

Nilai gayaberat observasi (g_{obs}) yang diperoleh berdasarkan atas pengikatan dari stasiun gayaberat absolut di titik DG0 yang berada di Bandung ke titik Base pengukuran gayaberat relatif di Semarang yaitu pada titik KKOP 16 di taman Gajahmungkur Semarang dan telah melalui proses koreksi pasang surut dan *drift*. Hasil perhitungan gayaberat observasi kemudian digambarkan pada perangkat lunak Surfer 9.0 :



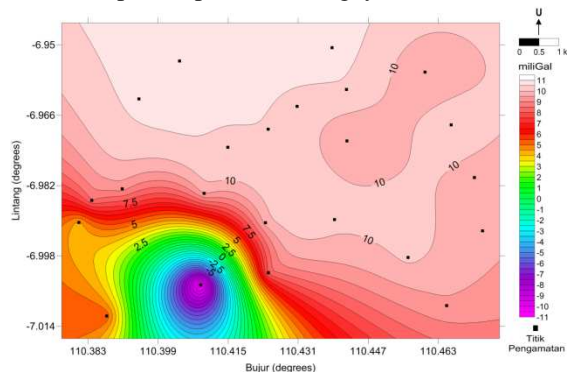
Gambar 5. Peta Gayaberat Observasi Kota Semarang bulan Oktober 2012

Pada penelitian ini titik pengukuran gayaberat yang dipakai hanya 23 titik dengan pembagian grid 1'x1'. Dari 23 titik pengamatan tersebut kemudian dilakukan pengukuran GPS geodetik untuk diperoleh nilai gayaberat normal (γ_h) melalui persamaan (5). Hasil pengukuran GPS telah mencapai ketelitian yang memadai untuk dijadikan referensi koordinat yang teliti. Berikut adalah grafik nilai ketelitian komponen horizontal dan komponen vertikal hasil pengukuran GPS geodetik yang dilakukan :



Gambar 6. Grafik Ketelitian Pengukuran GPS

Kemudian melalui persamaan (7), nilai gayaberat observasi (g_{obs}) dan gayaberat normal (γ_h) dari 23 titik pengamatan direduksi ke nilai anomali gayaberat. Hasil perhitungan anomali gayaberat kemudian di interpolasi dengan *software* surfer 9.0 untuk mendapatkan peta anomali gayaberat Kota Semarang.



Gambar 7. Peta Anomali Gayaberat (Δg) Kota Semarang bulan Oktober 2012

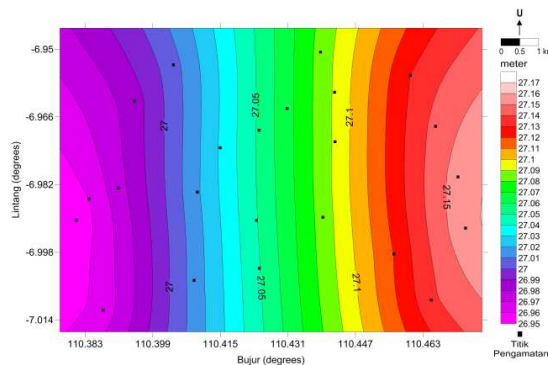
Nilai anomali gayaberat hasil ukuran (Δg) di Kota Semarang bervariasi antara -10,595 sampai dengan 10,788 mGal. Perbedaan nilai anomali gayaberat di daerah Utara dan Selatan lebih dikarenakan daerah Kota Semarang yang terdiri dari dataran di bagian Utara dan perbukitan di bagian Selatan.

Hasil Perhitungan Undulasi Geoid

Dalam menghitung undulasi geoid dengan metode kombinasi ada 2 tahapan yang harus dilakukan yaitu menghitung kontribusi dari model geopotensial global EGM 96 dan menghitung kontribusi gayaberat lokal dengan pendekatan Stokes metode *remove-restore*.

1. Kontribusi dari Model Geopotensial Global EGM96 (N1)

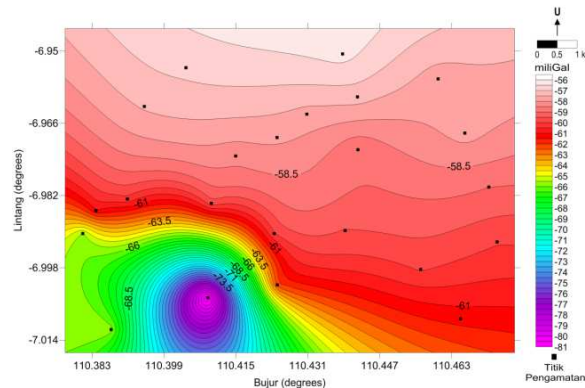
Nilai kontribusi Undulasi geoid dari model geopotensial global EGM96 sampai derajat dan orde 120 diperoleh melalui persamaan (9). Dari perhitungan dihasilkan nilai undulasi geoid N1 untuk daerah Kota Semarang bervariasi antara 26,95282765 sampai dengan 27,1573895 meter. Hasil perhitungan N1 di titik-titik pengamatan kemudian di interpolasi dengan menggunakan *software* Surfer 9.0 agar didapatkan visualisasi dari tinggi undulasi N1.



Gambar 8. Kontribusi N1 EGM96 Derajat dan Orde 120

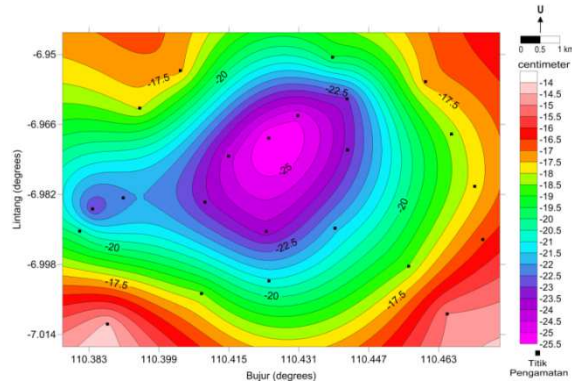
2. Kontribusi dari Gayaberat Lokal (N2)

Anomali gayaberat lokal hasil ukuran (Δg) yang telah dihitung sebelumnya direduksi kembali terhadap anomali gayaberat dari model geopotensial global EGM96 (Δg_1) melalui persamaan (13) dan (14). Hasil anomali gayaberat reduksi (Δg_2) bervariasi dari -56,3128439 sampai dengan -81,26682884 mGal. Nilai anomali gayaberat reduksi inilah yang nantinya akan digunakan dalam perhitungan kontribusi undulasi geoid dengan pendekatan Stokes (N2).



Gambar 9. Anomali Gayaberat Reduksi (Δg_2)

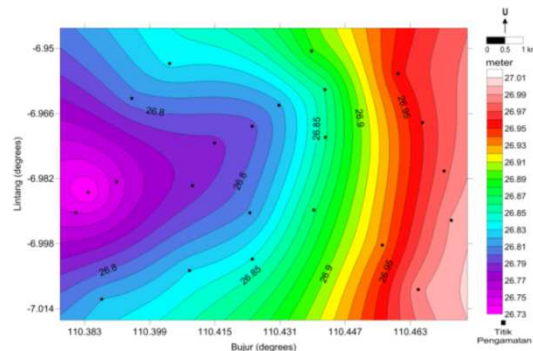
Nilai anomali gayaberat reduksi (Δg_2) di titik pengamatan kemudian dimasukkan kedalam persamaan (15) agar didapatkan nilai N2 dengan pendekatan Stokes. Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai N2 sangat kecil (skala cm) sekitar -14,38708656 sampai dengan -25,46921951 cm. Nilai kontribusi N2 ini sangat mempengaruhi undulasi geoid metode kombinasi, bahwa semakin baik data gayaberat lokal yang didapatkan maka semakin baik nilai gayaberat reduksi (Δg_2) mempresentasikan undulasi geoid N2, sehingga model geoid yang dihasilkan akan semakin baik.



Gambar 10. Nilai kontribusi N2 terhadap Model Geoid Semarang

3. Hasil Undulasi Geoid Metode Kombinasi

Dari perhitungan N1 dan N2 dihasilkan nilai undulasi geoid Kota Semarang yang berkisar antara 26,73026703 sampai dengan 26,99150681 meter. Tinggi undulasi geoid yang paling kecil terdapat di titik Surip 7 yang lokasinya berada di bundaran kalibanteng, sedangkan tinggi undulasi geoid yang paling besar terdapat di daerah Walter Mongisidi.

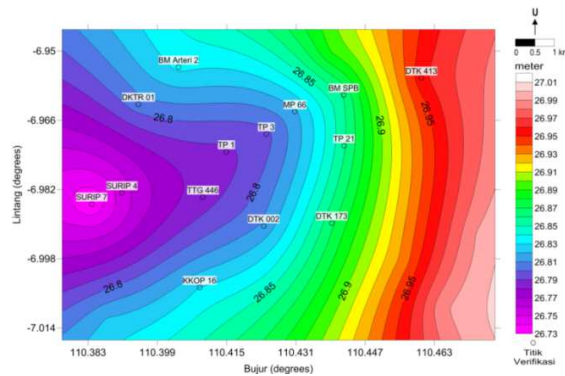


Gambar 11. Model Geoid Kota Semarang Hasil Metode Kombinasi

Proses Verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk mengetahui keakuratan dari model geoid yang dihasilkan. Pada penelitian ini undulasi geometrik dianggap sebagai variabel yang benar dalam penentuan undulasi geoid lokal. Proses verifikasi dilakukan dengan membandingkan hasil undulasi geoid geometrik dari pengukuran GPS dan *levelling* dengan undulasi geoid hasil metode kombinasi dan model geopotensial global.

Dengan menggunakan persamaan [$\text{selisih} = N_{\text{geo}} - N_{\text{(Kombinasi/MGG)}}$], dapat diketahui nilai keakuratan model geoid metode kombinasi dibandingkan dengan model geopotensial global (MGG) yang dijadikan pembanding. Dalam proses verifikasi ini diasumsikan bahwa H dan h diukur secara akurat oleh pengukuran sipat datar (*levelling*) dan pengamatan GPS untuk mendapatkan nilai undulasi geometrik. Kualitas N dapat dilihat dari besar kecilnya selisih antara undulasi geometrik dengan undulasi metode kombinasi dan model geopotensial global.



Gambar 12. Model Geoid Kota Semarang Hasil Metode Kombinasi beserta Titik Verifikasi

Hasil dari proses verifikasi dengan membandingkan undulasi geometrik dengan undulasi geoid metode kombinasi dan model geopotensial global EGM96 dan EGM2008 pada 14 titik verifikasi. Semakin kecil nilai selisihnya maka model tersebut dianggap akurat dalam penentuan tinggi orthometrik dengan teknologi GPS.

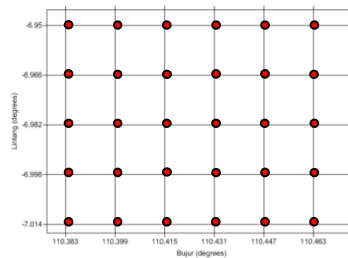
Tabel 1. Perbandingan Selisih Undulasi Geoid terhadap Undulasi Geoid Metode Geometrik

Titik Verifikasi	Undulasi Geoid (meter)				Selisih (meter)		
	N Geometrik	N Kombinasi	N EGM96	N EGM2008	Kombinasi	EGM96	EGM2008
DKTR 01	26,18	26,8063	24,745	25,4696	-0,6263	1,435	0,7104
SURIP 4	26,347	26,7552	24,7454	25,4817	-0,4082	1,6016	0,8653
SURIP 7	26,508	26,7303	24,744	25,4743	-0,2223	1,764	1,0337
BM Arteri 2	26,7295	26,8326	24,7507	25,485	-0,1031	1,9788	1,2445
TP 1	25,753	26,7880	24,7527	25,5118	-1,0350	1,0003	0,2412
TTG 446	26,587	26,7853	24,7508	25,5113	-0,1983	1,8362	1,0757
KKOP 16	27,006	26,8304	24,7535	25,5326	0,1756	2,2525	1,4734
MP 66	26,356	26,8178	24,7607	25,5349	-0,4618	1,5953	0,8211
TP 3	26,175	26,7972	24,7565	25,525	-0,6222	1,4185	0,65
DTK 002	26,785	26,8119	24,7533	25,5356	-0,0269	2,0317	1,2494
BM SPB	26,35	26,8604	24,7673	25,554	-0,5104	1,5827	0,796
TP 21	26,288	26,8585	24,762	25,5539	-0,5705	1,526	0,7341
DTK 173	26,789	26,8678	24,7561	25,5549	-0,0788	2,0329	1,2341
DTK 413	26,107	26,9569	24,7776	25,5824	-0,8499	1,3294	0,5246

Dari tabel terlihat bahwa selisih model geoid metode kombinasi terhadap undulasi geoid metode geometrik lebih baik dibandingkan model geopotensial global EGM 96 dan EGM2008. Hal ini mengindikasikan bahwa pemakaian model geoid metode kombinasi untuk pengukuran tinggi orthometrik dengan teknologi GPS mendekati nilai tinggi orthometrik hasil pengukuran sipat datar (*levelling*) dibandingkan dengan penggunaan model geopotensial global saja.

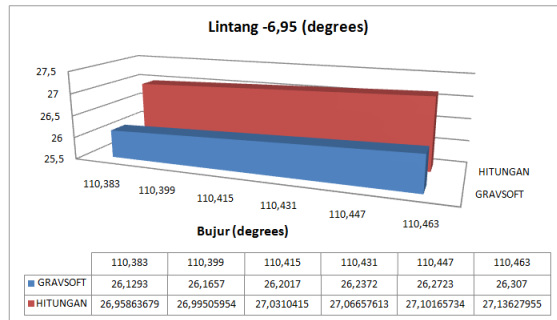
Analisis Perbandingan antara Nilai N1 Hasil perhitungan dengan Software Gravsoft

Hasil perhitungan N1 yang telah dilakukan kemudian dibandingkan dengan *software* Gravsoft agar diperoleh keyakinan terhadap perhitungan yang dilakukan. Analisis dilakukan pada lintang -6,95 sampai dengan 7,014 *degrees* dan bujur 110,383 sampai dengan 110,463 *degrees* dengan interval grid 0,016 x 0,016 *degrees* (setara dengan 1'x1') dan untuk *maximal degree* diinputkan 120 dikarenakan perhitungan yang dilakukan hanya sampai dengan derajat orde 120. Perhitungan *software* Gravsoft memanfaatkan fungsi grid yang diinputkan sehingga untuk perhitungannya menyesuaikan perpotongan grid yang terbentuk.



Gambar 13. Titik komputasi *software* Gravsoft

Perbandingan hasil N1 dibagi menjadi 5 daerah menurut lintang yang sejajar (penampang Barat ke Timur). Contoh Perbandingan hasil N1 pada lintang -6,95 derajat ditunjukkan pada gambar berikut :

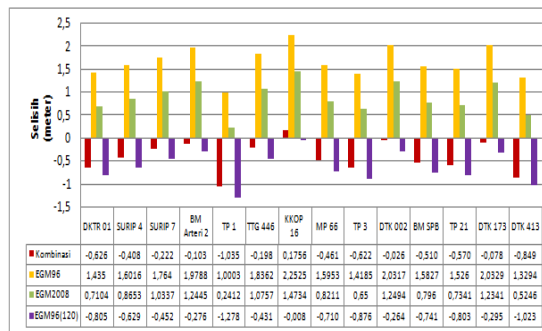


Gambar 14. Grafik Nilai N1 Hitungan dan Gravsoft pada Lintang -6,95 Derajat

Perbandingan nilai N1 relatif konstan berkisar antara -0,8163 sampai dengan -0,8294 meter. Perbedaan nilai N1 hasil *software Gravsoft* dengan hasil perhitungan diakibatkan penggunaan rumus dan parameter perhitungan yang berbeda.

Analisis Proses Verifikasi

Hasil proses verifikasi menunjukkan bahwa terdapat selisih antara undulasi geoid metode geometrik dengan undulasi geoid metode kombinasi dan model geopotensial global. Selisih nilai tersebut kemudian dibuat grafik untuk mempermudah dalam menganalisis selisih undulasi geoid dari model geoid yang dihasilkan:



Gambar 15. Grafik Selisih Model Geoid terhadap Undulasi Geoid Geometrik pada Titik Verifikasi

Grafik di atas mengasumsikan selisih model geoid yang mendekati angka nol mampu menyajikan informasi geoid yang lebih akurat. Pada grafik juga ditambahkan data undulasi geoid EGM96 sampai derajat dan orde 120 untuk mengetahui sejauh mana model tersebut mampu menginterpretasikan geoid untuk daerah Kota Semarang. Dari grafik terlihat jelas bahwa dari 14 titik verifikasi model geoid metode kombinasi lebih baik diantara model geoid yang lain. Pada grafik juga terlihat bahwa model geoid EGM96(120) ternyata lebih baik didalam menginterpretasikan geoid di Kota Semarang dibandingkan dengan EGM96 dan EGM2008. Untuk mengetahui ketelitian dari keempat model geoid tersebut kemudian dilakukan uji statistik pada 14 titik verifikasi. Hasil statistik tersebut dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. Statistik Selisih Undulasi Geoid

Data	Max	Min	Mean	RMS	σ
N _{Geo} - N _{Kombinasi}	0,1756	-1,0350	-0,3956	0,5124	0,3380
N _{Geo} - N _{EGM96}	2,2525	1,0003	1,67035	1,7012	0,3346
N _{Geo} - N _{EGM2008}	1,4734	0,2412	0,9038	0,9594	0,3338
N _{Geo} - N _{EGM96(120)}	-0,0084	-1,2783	-0,6141	0,6979	0,2646

Perhitungan nilai RMS (*Root Mean Square*) dan standar deviasi (σ) dari selisih undulasi geoid didapatkan dengan rumus :

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Dimana :

- x = Selisih tinggi undulasi geoid
- \bar{x} = Nilai rata-rata selisih tinggi undulasi geoid
- σ = Standar deviasi
- i = 1 sampai n
- n = Jumlah keseluruhan titik verifikasi undulasi geoid geometrik

Pada **Tabel 2.** terlihat bahwa nilai ketelitian model geoid metode kombinasi lebih baik dibandingkan dengan hasil dari model geoid yang lain. Hal ini disebabkan metode kombinasi memiliki informasi gayaberat yang bersifat lokal dan informasi gayaberat yang bersifat global sekaligus, sedangkan EGM96, EGM2008, dan EGM96₍₁₂₀₎ hanya memiliki informasi gayaberat yang bersifat global saja sehingga hasilnya kurang akurat. Pada model geopotensial global pada dasarnya adalah menentukan *quasigeoid* atau permukaan yang sangat dekat dengan geoid pada semua titik. Oleh karena itu untuk model geopotensial global memiliki standar deviasi yang sangat baik. Sedangkan untuk ketelitiannya belum bisa dianggap baik. Secara statistik dapat dilihat pula bahwa penggunaan EGM96 sampai derajat orde 120 untuk daerah Kota Semarang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan model geopotensial EGM96 sampai derajat dan orde penuh dan EGM2008.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis penelitian yang telah dikemukakan pada bab-bab sebelumnya, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari model geoid yang dihasilkan dari solusi kombinasi, tinggi undulasi geoid di Kota Semarang berkisar antara 26,73026703 sampai dengan 26,99150681 meter. Tinggi undulasi geoid yang paling kecil terdapat di titik Surip 7 yang lokasinya berada di bundaran kalibanteng, sedangkan tinggi undulasi geoid yang paling besar terdapat di daerah Walter Mongisidi. Jadi dapat disimpulkan bahwa undulasi geoid di Kota Semarang tidak bisa dilihat dari kondisi topografinya, bahwa daerah bertopografi lebih tinggi belum tentu memiliki undulasi geoid yang lebih besar dibandingkan daerah bertopografi rendah.
2. Selisih antara undulasi geoid geometrik dengan undulasi geoid metode kombinasi masih sangat besar yaitu antara 2 cm sampai dengan 1 meter. Hal ini mengindikasikan bahwa model geoid yang dihasilkan dari metode kombinasi belum bisa dijadikan referensi untuk penentuan tinggi orthometrik untuk keperluan praktis dengan teknologi GPS ($H = h - N$). Namun statistika pada titik-titik verifikasi menunjukkan bahwa model geoid yang dihasilkan masih lebih baik dibandingkan dengan penggunaan model geopotensial global (EGM96 dan EGM2008). Titik pengamatan yang berjumlah 23 titik dengan pembagian grid 1' x 1' juga dianggap belum mewakili daerah Kota Semarang.

1.1. Saran

Dari hasil analisis yang dilakukan pada penelitian ini, maka ada beberapa saran yang dapat penulis kemukakan sebagai bahan pertimbangan dalam penelitian selanjutnya untuk mendapatkan model geoid Kota Semarang yang lebih baik dan akurat :

1. Perlu dilakukan pengukuran gayaberat dengan daerah yang lebih luas dengan tingkat kerapatan yang baik.
2. Menambahkan titik-titik pengamatan untuk proses verifikasi.
3. Penggunaan *software* pengolah data GPS tipe ilmiah.
4. Tinggi orthometrik yang didapatkan perlu dikoreksi pasut dan gayaberat sehingga diperoleh data yang fix.
5. Penggunaan *software* perhitungan yang lebih canggih untuk menghitung fungsi legendre *fully-normalized* bola harmonic hingga derajat orde maksimal.
6. Untuk mempersingkat waktu dalam menghitung parameter-parameter dalam penentuan geoid lokal dapat menggunakan *software* Gravsoft melalui izin dari Mr. C.C. Tscherning (*University of Copenhagen*) atau melalui izin Dosen yang diberi hak pakai oleh pembuat *software* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H.Z. 2007. *Penentuan Posisi dengan GPS dan Aplikasinya*. Jakarta : PT Pradnya Paramita.
- Anonim. 2002. *Surfer User's Guide*. Colorado-U.S.A. : Golden Software Inc.
- Chaerunnisa. 2010. *Identifikasi Struktur Bawah Permukaan yang Diduga sebagai Pemicu Meluasnya Semburan Lumpur Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur Menggunakan Gayaberat*. Bandung : Repository Universitas Pendidikan Indonesia.
- Forsberg, R., C.C. Tscherning. 2008. *An overview manual for the GRAVSOFTE Geodetic Gravity Field Modelling Programs*. Denmark : Kerjasama DTU (National Space Institute) dan University of Copenhagen.
- Forsberg, Rene. 2010. *Terrain Effect in Geoid Computations*. Denmark : Geodetic Division National Survey and Cadastre.
- Garland, G.D. 1979. *Introduction to Geophysics*. Saunders, Philadelphia.
- Heiskanen, Weikko A. Dan Helmut Moritz. 1967. *Physical Geodesy*. United State of America : W.H. Freeman and Company.
- Hidayat, Ahmad. 2012. *Analisis Ketelitian Planimetrik Pengukuran Metode Kinematik GNSS pada Kawasan dengan Obstruksi Tinggi*. Semarang : Program Studi Teknik Geodesi Universitas Diponegoro.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Moritz. 2005. *Physical Geodesy*, Austria : Springer-Verlag Wien.
- Kahar, Sutomo. 2007. *Diktat Pelengkap Kuliah Pengantar Geodesi*. Semarang : Penerbit Teknik Geodesi Universitas Diponegoro.
- Kamarudin, Noor. 1999. *Perkembangan dalam Penentuan Model Geoid Masa Kini*. Malaysia : Akademik Fakulti Kejuruteraan dan Sains Geoinformasi.
- Kasenda, Adolfientje. 2009. *High Precision Geoid for Modernization of Height Systems in Indonesia*. Sydney : School of Surveying and Spatial Information Systems The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Kurniawan, Dedi. 2010. *Pembuatan Perangkat Lunak Untuk Perhitungan Data Ukuran Gaya Berat*. Semarang : Program Studi Teknik Geodesi Universitas Diponegoro.
- Li, Ye Ca., Michael G. Sideris. 1994. *Minimization and Estimation of Geoid Undulation Errors*, *Bulletin Geodesique*. Springer-Verlag.
- Longman, I.M. 1959. *Formulas for Computing the Tidal Acceleration due to the Moon and the sun*. J. Geophys. Res., 64,2351-2355.
- Nugroho, Gesit Faikar Izzani. 2011. *Analisis Penampang Utara - Selatan Undulasi Geoid Kota Semarang*. Semarang : Program Studi Teknik Geodesi Universitas Diponegoro.
- Prasetyo, Mohamad Heru. 2008. *Penentuan Model Geoid Lokal (Studi Kasus : Delta Mahakam, Total E&P Indonesia)*. Bandung : Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan ITB.
- Sneeuw, Nico. 2006. *Lecture Notes : Physical Geodesy*. Stuttgart : Institute of Geodesy Universitat Stuttgart.
- Supriyadi. 2009. *Studi Gaya Berat Relatif di Semarang*. Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia 5. Semarang : Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Negeri Semarang.
- Susanto, Abdullah. 2010. *Pemodelan Geoid dari Data Satelit Grace (Studi Kasus : Wilayah Indonesia)*. Surabaya : Digilib ITS.
- Timmen, Ludger. 2010. *Absolute and Relative Gravimetry*. Germany : Institut für Erdmessung (IfE), Leibniz Universität Hannover (LUH), Schneiderberg.
- Torge, Wolfgang. 2001. *Geodesy, 3rd Edition*. Berlin : De Gruyter.
- Model Geopotensial Global : <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>
- Official Website EGM96: <http://cddis.nasa.gov/926/egm96/gendesc.html>
- Spider Web : <http://www.bpnri-cors.net/spiderweb/frmIndex.aspx>