

VALIDASI PERANGKAT LUNAK GRAVITY TIDE CORRECTION PERSAMAAN LONGMAN (1959) BERDASARKAN GRAVITY TIDE OBSERVED, INSTRUMENT BASED DAN SOFTWARE BASED TEST

LONGMAN GRAVITY TIDE CORRECTION SOFTWARE VALIDATION BASED ON GRAVITY TIDE OBSERVED, INSTRUMENT BASED AND SOFTWARE BASED TEST

Accep Handyarso

Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian ESDM
Jl. Diponegoro No.57, Gedung C, Bandung - 40144
E-mail : acceph@yahoo.com

Naskah masuk: 20 April 2016; Naskah diperbaiki: 31 Oktober 2016; Naskah diterima: 22 Desember 2016

ABSTRAK

Telah dibuat perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat berdasarkan persamaan Longman. Perangkat lunak tersebut dikembangkan dengan menggunakan sistem operasi berbasis windows. Dalam paper ini dibahas mengenai algoritma perangkat lunak dan metode validasinya. Validasi yang dilakukan meliputi validasi fasa dan validasi amplitudo sinyal pasang surut. Mekanisme validasi menggunakan perbandingan antara data hasil pengamatan gaya berat secara langsung dengan data keluaran perangkat lunak yang dikembangkan. Validasi fasa memberikan hasil berupa nilai pergeseran statik (*static shift*) yang berasosiasi dengan nilai gaya berat di lokasi pengukuran, sedangkan validasi amplitudo dilakukan dengan melibatkan tiga metode yaitu: (1) Menggunakan data hasil pengamatan gaya berat secara langsung di antara dua titik pangkal gaya berat yang sudah diketahui nilainya (*gravity tide observed*), (2) Validasi amplitudo berdasarkan alat ukur CG-5 (*instrument based test*), dan (3) Menggunakan perangkat lunak lain berbasis komputer seperti *QuickTidePro* sebagai pembanding (*software based test*). Hasil pengujian menunjukkan akurasi perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang dikembangkan mencapai <50 μGal .

Kata kunci: Koreksi pasang surut gaya berat, Persamaan *Longman*, Pengamatan gaya berat langsung, *QuickTide Pro*, Instrumen ukur *scintrex CG-5*.

ABSTRACT

Gravity Tide Correction software has been made based on Longman equations. This software is developed for the windows operating system. This paper explains about the software algorithm and its validation methods. The validation methods invoked in this paper consist of phase validation and amplitude validation from gravity tide correction signal. The validation conducted based on the comparison between gravity tide observed data from the direct measurement and the data output from the developed gravity tide correction software. Phase validation gives static shift result which is associated with the gravity value at the measured place. While the amplitude validation involved three methods i.e. (1) Amplitude validation using gravity tide observed data between 2 point which the gravity value is already known, (2) Amplitude validation based on the gravimeter instrument like CG-5, and (3) Amplitude validation using another well-known software based on the computer like a QuickTidePro as a comparison. The test result shown that the accuracy of developed gravity tide correction software is up to less than 50 μGal .

Keywords: Gravity Tide Correction, Longman Equation, Gravity Tide Observed, QuickTide Pro, Scintrex CG-5 Instrument.

1. Pendahuluan

Anomali Bouguer pada dasarnya adalah perbedaan antara nilai gaya berat hasil pengukuran (g_{obs}) dengan nilai gaya berat teoritis (g_{theory}). g_{theory} ini dapat dihitung berdasarkan nilai g_{normal} yang kemudian dikoreksi dengan koreksi udara bebas (*free air*

correction), koreksi Bouguer (*bouguer correction*), dan koreksi medan (*terrain correction*). g_{normal} pada dasarnya merupakan aproksimasi nilai gaya berat teoritis berdasarkan fungsi lintang (*latitude*) yang beracuan kepada bidang referensi perhitungan geodesi tertentu. Persamaan gaya berat Internasional dikenal sebagai Reference Gravity Formula 1967[1]. Kemudian persamaan tersebut berkembang dengan

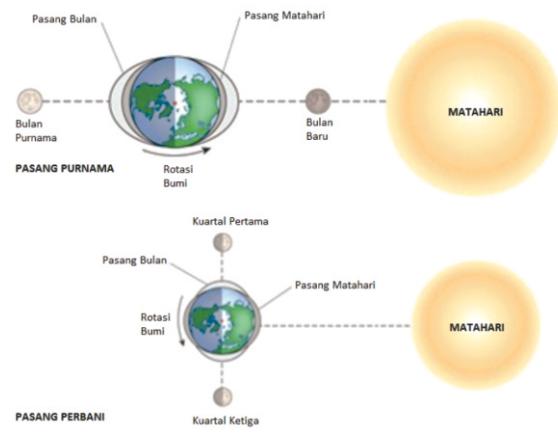
menggunakan acuan geodesi 1984 sebagai *Normal Gravity*[2]. Sedangkan g_{obs} merupakan nilai hasil pembacaan gaya berat di lapangan yang telah dikoreksi dengan koreksi pasang surut (*tide correction*) dan koreksi apungan (*drift correction*).

Koreksi pasang surut merupakan koreksi yang diterapkan pertama kali pada data hasil pengukuran lapangan sebelum koreksi *drift* dilakukan. Koreksi pasang surut ini memiliki kisaran nilai ± 0.3 mGal[3]. Nilai ini dapat dikatakan cukup signifikan di dalam proses interpretasi, terlebih apabila target anomali yang dicari berada pada kisaran nilai tersebut. Seperti aplikasi metode gaya berat untuk kegunaan-apian yang diuji cobakan di gunung Etna, Belgia atau survei gaya berat mikro untuk monitoring dinamika fluida bawah permukaan[4,5].

Saat ini ketersediaan perangkat lunak yang mampu menghitung koreksi pasang surut gaya berat masih sulit dijumpai. Walaupun sebenarnya sudah terdapat aplikasi perangkat lunak berbayar yang dapat diperoleh seperti *QuickTidePro (microglacoste)*, atau perangkat lunak berbasis instrument ukur seperti CG-5 (*scintrex*), akan tetapi harga perangkat tersebut masih tergolong mahal untuk bisa diperoleh. Selain itu untuk kepentingan edukasi perlu kiranya apabila kita mengembangkan perangkat lunak yang dapat melakukan perhitungan koreksi pasang surut gaya berat. Paper ini tidak membahas teori pasang surut gaya berat secara mendalam, namun paper ini hanya akan menjelaskan penerapan persamaan matematis yang telah dijabarkan oleh Longman terkait dengan koreksi pasang surut gaya berat dan mekanisme pengujinya[6]. Validasi perangkat lunak dilakukan dengan melalui validasi amplitudo maupun validasi fasa dari sinyal pasang surut gaya berat yang dihasilkan.

Tide atau pasang surut adalah deformasi daratan dan lautan dari bumi karena gaya gravitasi bulan dan matahari yang bekerja pada setiap bagian dari bumi. Efek pasang surut ini merupakan fungsi waktu dan posisi di permukaan Bumi[2]. Pada dasarnya setiap benda angkasa di luar bumi akan mempengaruhi pasang surut gaya berat, hal ini disebabkan karena hukum gravitasi Newton berlaku secara universal. Namun terdapat dua benda angkasa besar yang memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap pasang surut gaya berat yaitu bulan dan matahari (Gambar 1).

Perhitungan pasang surut dapat dilakukan dengan menghitung gaya tarik komponen vertikal dan komponen horizontal dari bulan dan matahari. Kemudian besar nilai koreksi pasang surut gaya berat adalah jumlah komponen vertikal dari gaya tarik matahari dan bulan[6].



Gambar 1. Ilustrasi konfigurasi Matahari, Bumi dan Bulan serta ilustrasi efek pasang surut yang dihasilkan. Pada saat Matahari, Bumi, dan Bulan berada pada satu garis lurus maka efek pasang surut akan maksimum, sedangkan pada saat posisi Matahari, Bumi, dan Bulan membentuk sudut 90° efek pasang surut berada pada level terendah[7].

$$g_m = \frac{\mu Mr}{d^3} (3\cos^2\theta - 1) + \frac{3\mu Mr^2}{2d^4} (5\cos^3\theta - 3\cos\theta) \quad (1)$$

$$g_s = \frac{\mu Sr}{D^3} (3\cos^2\varphi - 1) \quad (2)$$

$$h_m = \frac{3\mu Mr}{2d^3} \sin 2\theta + \frac{3\mu Mr^2}{2d^4} (5\cos^2\theta - 1) \sin\theta \quad (3)$$

$$h_s = \frac{3\mu Sr}{2D^3} \sin 2\theta \varphi \quad (4)$$

$$g_0 = g_m + g_s \quad (5)$$

$$h_0 = h_m + h_s \quad (6)$$

Dimana :

μ : konstanta gravitasi Newton (6.67×10^{-11} N·m²/kg²) dalam cgs)

M : massa Bulan (7.3537×10^{25} grams)

S : massa Matahari (1.993×10^{33} grams)

r : jarak titik amat P ke pusat Bumi

d : jarak dari pusat Bumi ke Bulan

D : jarak dari pusat Bumi ke Matahari

θ : sudut zenith Bulan

φ : sudut zenith Matahari

g_m : gaya tarik komponen vertikal akibat pengaruh Bulan

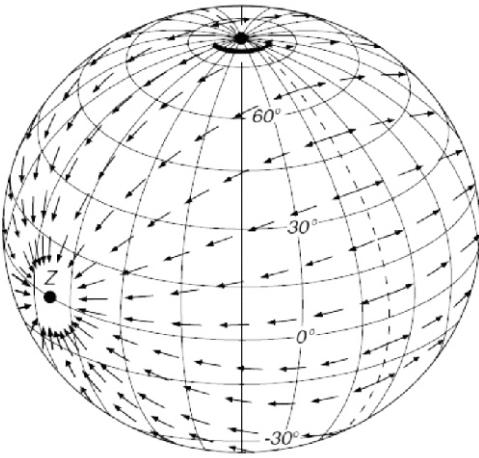
g_s : gaya tarik komponen vertikal akibat pengaruh Matahari

h_m : gaya tarik komponen horizontal akibat pengaruh Bulan

h_s : gaya tarik komponen horizontal akibat pengaruh Matahari

g_0 : gaya tarik (tidal) komponen vertikal total

h_0 : gaya tarik (tidal) komponen horizontal total



Gambar 2. Komponen vektor horizontal dari gaya tarik (tidal) di permukaan Bumi akibat pengaruh Bulan atau Matahari dilukiskan dengan tanda panah pada saat gaya tarik (tidal) vertikal berada pada posisi Z di ekuator Bumi[8].

Besarnya koreksi pasang surut (tidal) yang bekerja adalah superposisi dari gaya tarik komponen vertikal akibat pengaruh Bulan dan Matahari seperti ditunjukkan pada persamaan (5) dan mengabaikan persamaan (6). Visualisasi vektor gaya tarik vertikal dan horizontal ditunjukkan pada gambar 2.

Sedangkan parameter d , D , θ , dan φ adalah parameter yang berubah terhadap waktu. Perhitungan sudut zenith Bulan (θ) dan sudut zenith Matahari (φ) dapat dituliskan sebagai berikut[9].

$$\cos \theta = \sin \lambda \sin l \sin l + \cos \lambda \left(\cos^2 \frac{1}{2} I \cos(l - \chi) + \sin^2 \frac{1}{2} I \cos(l + \chi) \right) \quad (7)$$

$$\cos \varphi = \sin \lambda \sin \omega \sin l_1 + \cos \lambda \left(\cos^2 \frac{1}{2} \omega \cos(l_1 - \chi_1) + \sin^2 \frac{1}{2} \omega \cos(l_1 + \chi_1) \right) \quad (8)$$

Dimana :

- λ : lintang terestrial dari titik umum di permukaan Bumi
- I : kemiringan orbit Bulan terhadap katulistiwa
- l : bujur dari Bulan dalam orbitnya dihitung dari persimpangan naik dengan katulistiwa
- ω : kemiringan ekuator Bumi terhadap ekliptika (23.452°)
- l_1 : bujur Matahari di ekliptika diperhitungkan dari vernal equinox
- $\cos \theta$: nilai cosines dari sudut zenith Bulan
- $\cos \varphi$: nilai cosines dari sudut zenith Matahari

Bujur dari Bulan dalam orbitnya yang dihitung dari persimpangan naik dengan katulistiwa (l) dapat

dihitung dengan menggunakan persamaan berikut[9].

$$l = \sigma + 2e \sin(s - p) + \frac{5}{4} e^2 \sin 2(s - p) + \frac{15}{4} me \sin(s - 2h + p) + \frac{11}{8} m^2 \sin 2(s - h) \quad (9)$$

Sedangkan untuk bujur dari Matahari di ekliptika terhadap vernal equinox dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$l_1 = h + 2e_1 \sin(s - p_1) \quad (10)$$

Dimana :

σ : longitude rata-rata dari Bulan terhadap titik amat (dalam radian)

e : eccentricity dari orbit Bulan, menurut Schureman (1941) besarnya 0.054899720

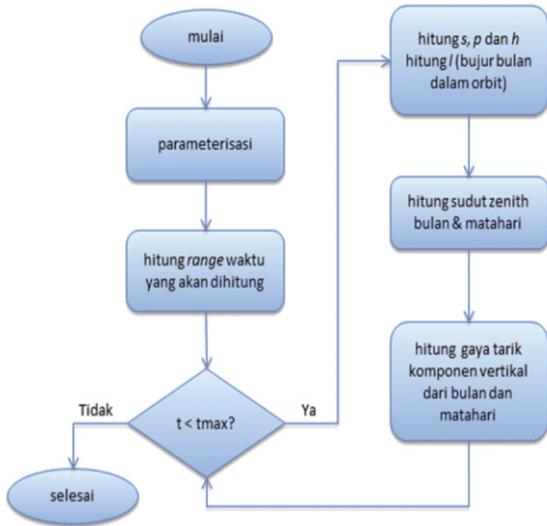
e_1 : eccentricity dari orbit Bumi
($0.0168 - 0.000042 t - 0.000000t^2$)

Dengan parameter s, p, p_1 , dan h adalah sebuah fungsi posisi yang berubah terhadap waktu (t). Keempat parameter tersebut dapat mengacu kepada hasil penelitian Schureman[9] atau Bartels[10].

2. Metode Penelitian

Proses perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak dimulai dengan memberikan informasi berupa: posisi bujur (*longitude*), posisi lintang (*latitude*), elevasi, hari, bulan, tahun, dan waktu (UTC) serta jumlah hari yang akan dihitung. Tahapan ini disebut sebagai parameterisasi. Tahap berikutnya adalah menghitung rentang waktu (*range*) perhitungan pasang-surut gaya berat yang akan dilakukan, dimana perubahan waktu (*increment*) ditetapkan setiap 0.1 jam. Interval waktu 0.1 jam dipilih karena variasi Tidal berupa 2 bukit dan 2 lembah dalam sehari, sehingga selang interval tersebut dipandang sudah cukup memadai. Setiap nilai waktu akan dihitung besar koreksi pasang surut gaya berat yang terjadi. Diagram alir (*flowchart*) dari perangkat lunak yang dikembangkan ditunjukkan pada gambar 3. Parameter jumlah hari yang akan dihitung dikonversi kedalam parameter waktu dalam skala desimal jam yang dinotasikan ke dalam t dengan batas maksimum (akhir) t_{max} .

Di dalam perangkat lunak ini, parameter s, p , dan h ditentukan berdasarkan hasil penelitian Schureman yang besarnya merupakan fungsi dari waktu (t). Sudut zenith Bulan ($\cos \theta$) dan sudut zenith Matahari ($\cos \varphi$) pada setiap interval waktu dihitung dengan menggunakan persamaan 7 dan persamaan 8.



Gambar 3. Diagram alir perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang dikembangkan. Perhitungan koreksi pasang surut dimulai dari parameterisasi sampai dengan perhitungan besarnya koreksi pasang surut berdasarkan basis waktu tertentu.

Dengan demikian gaya tarik komponen vertikal akibat pengaruh Bulan (g_s) dan akibat pengaruh Matahari (g_s) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1 dan persamaan 2. Besar koreksi pasang-surut gaya berat adalah superposisi dari gaya tarik komponen vertikal dari Bulan dan Matahari seperti dituliskan dalam persamaan 5 di atas.

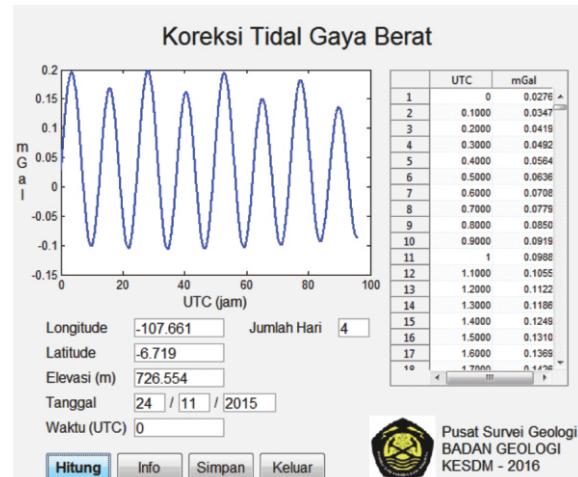
Gambar 4 adalah hasil simulasi perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat di lokasi titik pangkal gaya berat DG1A dengan koordinat 107.661° E dan 6.719° S yang memiliki ketinggian 726.554 m di atas MSL (mean sea level) pada tanggal 24 November 2015 sampai dengan 28 November 2015 (4 hari) dan basis waktu mengikuti *Universal Time Coordinat* (UTC).

Pengujian Perangkat Lunak. Karakteristik sinyal yang dihasilkan dari persamaan Longman memiliki bentuk sinyal sinusoidal dengan amplitudo dan fasa tertentu seperti diperlihatkan pada gambar 4, sehingga proses validasi perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat harus ditinjau dari dua sisi yaitu amplitudo dan fasa dari sinyal pasang surut. Mekanisme validasi fasa memerlukan data pengukuran *diurnal* gaya berat dalam periode waktu tertentu, sedangkan mekanisme validasi terhadap amplitudo memerlukan pengukuran pada dua atau lebih titik pangkal gaya berat yang telah diketahui nilai percepatan gravitasinya. Selain kedua metode validasi tersebut, mekanisme validasi perangkat lunak dapat pula dilakukan dengan membandingkan hasil keluaran perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat dengan perangkat

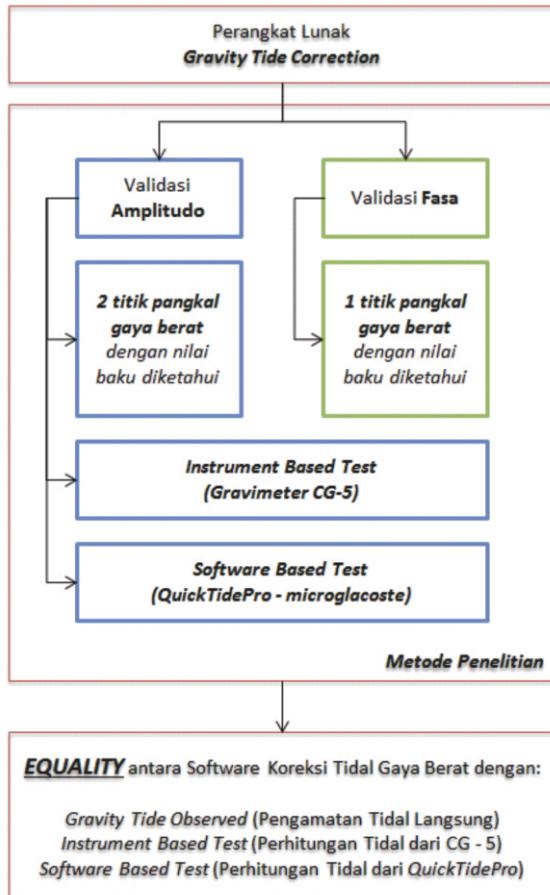
lunak lain yang sudah dikenal (software based test) atau dengan sebuah sistem instrumen ukur yang juga memberikan nilai koreksi pasang surut (instrument based test). Diagram penelitian ditunjukkan pada gambar 5.

Pengujian akan lebih mudah apabila dilakukan dengan menggunakan peralatan gravimeter absolute superconducting, sehingga tidak memerlukan titik-titik pangkal gaya berat dalam jaring-jaring gaya berat[11]. Namun paper ini akan menjelaskan mekanisme validasi perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat dengan menggunakan gravimeter diferensial dan bantuan dua buah titik pangkal gaya berat yang sudah diketahui nilai percepatan gravitasinya.

Titik pangkal gaya berat yang digunakan di dalam penelitian ini adalah titik pangkal DG1A yang berlokasi di depan Museum Geologi Bandung dengan koordinat 107.661° E dan 6.719° S dan titik pangkal GF VIII yang berlokasi di Burgundy Café dengan koordinat 107.647° E dan 6.829° S. Titik pangkal DG1A memiliki nilai gobs 977976.621 mGal dengan elevasi sebesar 726.554 m, sedangkan titik pangkal GF VIII memiliki nilai gobs 977877.7490 mGal dengan elevasi 1216.059 m[12].



Gambar 4. Hasil simulasi perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang dikembangkan pada titik DG1A.



Gambar 5. Skema metode penelitian yang dilakukan. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan validasi terhadap perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang telah dikembangkan.

3. Hasil dan Pembahasan

Validasi Fasa Sinyal. Pengujian fasa dari sinyal pasang surut gaya berat dilakukan dengan mensimulasikan perangkat lunak pada titik pangkal gaya berat yang telah diketahui nilai percepatan gravitasinya. Kemudian data hasil simulasi ini disebut sebagai data teoritis *Longman* atau data model (y_1), selain itu dilakukan pula pengukuran langsung (*Gravity Tide Observed*) pada titik pangkal gaya berat tersebut yang kemudian data hasil pengamatan ini disebut sebagai data observasi (y_2).

$$y_1 = g_{obs}(tugu) + ETCL \quad (11)$$

$$y_2 = g_{obs}(tugu) + (g_{meas} - s_{shift}) \quad (12)$$

Dimana :

- y_1 : Data diurnal gaya berat teoritis (*Longman*)
- y_2 : Data diurnal gaya berat hasil pengukuran langsung (*Gravity Tide Observed*)

$g_{obs}(tugu)$: Nilai percepatan gravitasi dari tugu (titik amat)

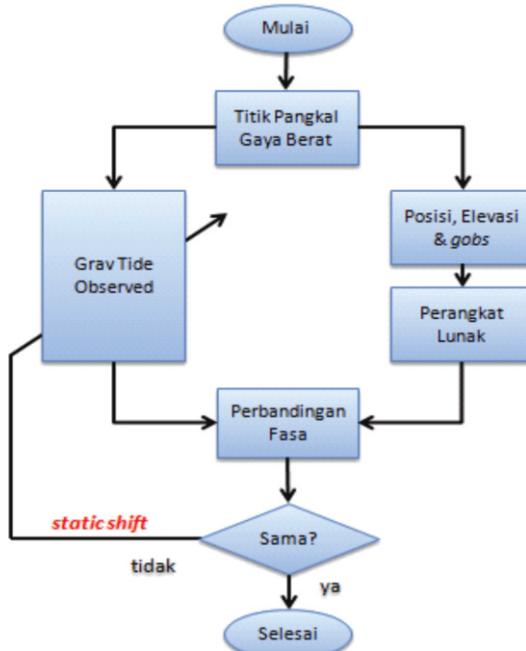
ETCL : *Earth Tide Correction Longman*

s_{shift} : Konstanta pergeseran statik

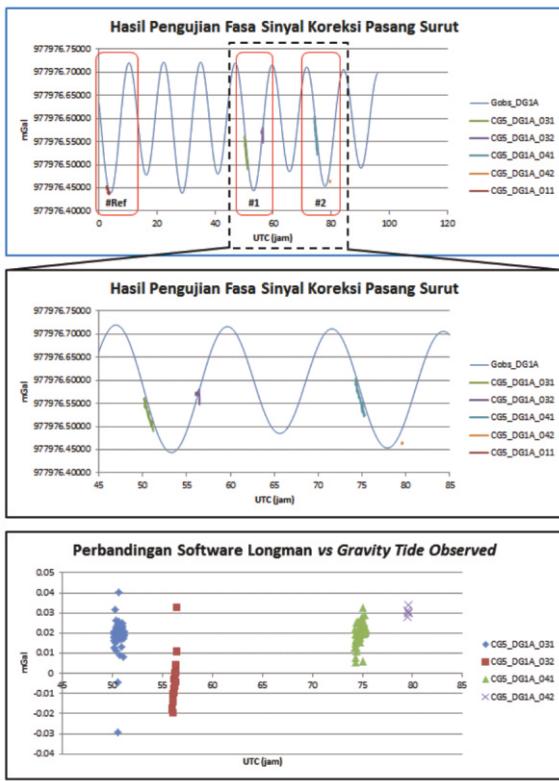
g_{meas} : Nilai percepatan gravitasi hasil pengukuran langsung (masih memiliki faktor tide atau faktor pasang surut).

Langkah berikutnya adalah mem-fit-kan data y_1 dan y_2 dengan memodifikasi konstanta pergeseran statik (*static shift*). Nilai konstanta pergeseran statik ini akan bersifat umum untuk semua waktu pengukuran selama berada pada lokasi yang sama. Besaran konstanta pergeseran statik ini akan berbeda dari satu tempat dengan tempat yang lain.

Hasil pada gambar 7 berikut diperoleh dengan menggunakan peralatan gravimeter CG-5 (*Scintrex*). Dari hasil pengolahan data diperoleh konstanta pergeseran statik sebesar 2093.04 mGal pada titik tugu DG1A yang memiliki nilai g_{obs} 977976.621 mGal. Nilai konstanta pergeseran statik ini kemudian digunakan untuk mengkoreksi data hasil pembacaan *Gravity Tide Observed* pada hari berikutnya, atau dengan kata lain hasil pembacaan hari pertama digunakan sebagai referensi/acuan.



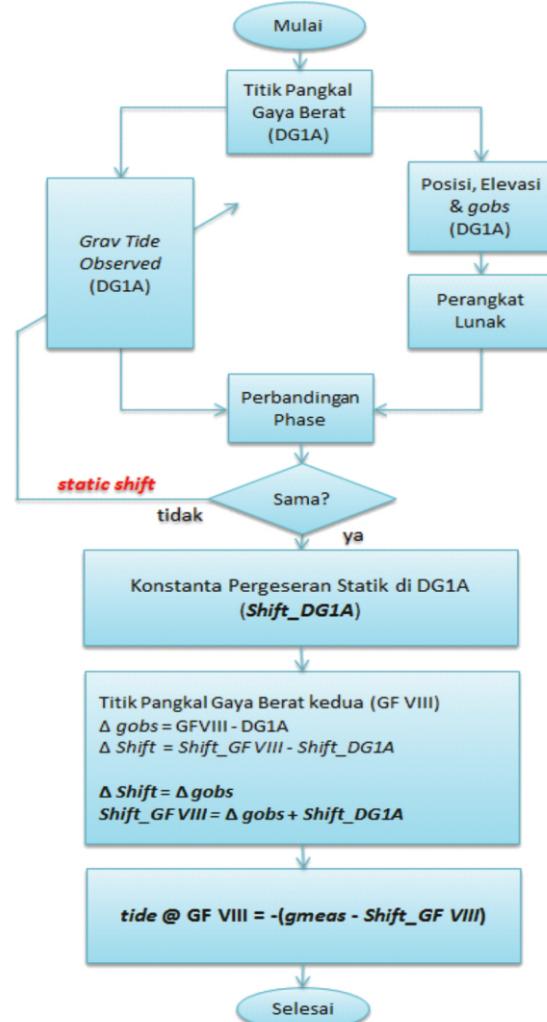
Gambar 6. Diagram alir (*flowchart*) pengujian fasa sinyal pasang surut gaya berat hasil keluaran dari perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat (*Gravity Tide Correction*) yang dikembangkan oleh Pusat Survei Geologi (PSG) dengan hasil pengukuran secara langsung atau *Gravity Tide Observed*.



Gambar 7. Hasil pengujian fasa sinyal koreksi pasang surut pada titik DG1A dengan posisi koordinat pada 107.661° E dan 6.719° S dengan ketinggian (elevasi) sebesar 726.554 m di atas MSL. Data model (y_1) ditunjukkan dengan garis Gobs_DG1A sedangkan data observasi (y_2) ditunjukkan dengan garis berwarna dan tebal.

Dengan menerapkan pergeseran statik ini maka hanya terjadi perubahan amplitudo dari sinyal pasang surut, sedangkan fasa sinyal akan tetap. Berdasarkan gambar 7 terlihat adanya kesamaan fasa sinyal hasil pengukuran *Gravity Tide Observed* dengan sinyal dari data teoritis persamaan Longman. Pengukuran #1 dan pengukuran #2 terlihat cukup berhimpit dengan arah trend yang sama dengan data teoritis dari persamaan Longman. Dimana perbedaan diantara keduanya tidak lebih dari ± 0.04 mGal atau $\pm 40 \mu\text{Gal}$.

Validasi Amplitudo Sinyal. Pengujian amplitudo sinyal koreksi pasang surut menggunakan metode yang sama dengan pengujian fasa seperti pada bagian sebelumnya, namun dengan adanya penambahan berupa titik pangkal gaya berat lain yang sudah diketahui nilai percepatan gravitasinya.



Gambar 8. Diagram alir (flowchart) pengujian amplitudo sinyal koreksi pasang surut gaya berat. Validasi amplitudo ini melibatkan diagram alir validasi fasa yang telah dilakukan sebelumnya dengan penambahan data dari titik pangkal gaya berat kedua sebagai pembanding.

Diagram alir pengujian amplitudo di dalam penelitian ini ditunjukkan pada gambar 8. Setelah melakukan pengujian fasa terhadap sinyal koreksi pasang surut gaya berat, maka akan diperoleh konstanta pergeseran statik pada titik DG1A. Berdasarkan informasi dari titik pangkal gaya berat kedua maka akan diperoleh perbedaan nilai percepatan gravitasi (Δg_{obs}) dari kedua titik pangkal gaya berat tersebut. Kemudian setelah diperoleh nilai Δg_{obs} , maka nilai pergeseran statik pada titik pangkal gaya berat kedua (GF VIII) dapat dihitung berdasarkan persamaan 14.

$$\Delta g_{obs} = g_{obs_02} - g_{obs_01} \quad (13)$$

$$Shift_GFVIII = \Delta g_{obs} + Shift_DG1A \quad (14)$$

Persamaan tersebut tidak mengandung koreksi pasang surut. Nilai yang diperoleh adalah nilai pergeseran statik pada titik pangkal gaya berat GF VIII (*Shift_GFVIII*). Dengan kata lain hasil pembacaan peralatan gravimeter secara langsung (*Gravity Tide Observed*) akan berada pada kisaran nilai *Shift_GFVIII* tersebut.

Dengan demikian maka besarnya koreksi pasang surut yang terjadi pada titik pangkal gaya berat GF VIII berdasarkan pengukuran langsung (*Observed*) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut.

$$tide = -(g_{meas} - Shift_GFVIII) \quad (15)$$

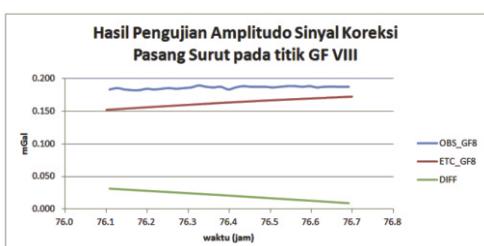
Dimana :

- Δg_{obs} : Perbedaan nilai percepatan gravitasi dari dua titik pangkal gaya berat (nilai tugu)
- g_{obs_01} : Nilai percepatan gravitasi pada titik pangkal gaya berat pertama (nilai tugu)
- g_{obs_02} : Nilai percepatan gravitasi pada titik pangkal gaya berat kedua (nilai tugu)
- g_{meas} : Nilai hasil pembacaan gravimeter pada titik pangkal gaya berat kedua
- $tide$: Amplitudo koreksi pasang surut (tide correction)

Berdasarkan persamaan 15 tersebut diatas dan data-data nilai tugu (g_{obs}) dari setiap titik pangkal gaya berat yang ada serta data-data hasil pembacaan langsung (*Observed*) atau g_{meas} dapat dirangkum ke dalam tabel berikut ini.

	g _{obs} (mGal)	g _{meas} (mGal)
DG1A	977976.6210	2093.04
GF VIII	977877.7490	1994.17 (*)
Delta (Δ)	-98.872	

Tanda bintang pada tabel menunjukkan nilai 1994.17 yang merupakan nilai pergeseran statik pada titik pangkal gaya berat GF VIII (*Shift_GFVIII*) berdasarkan nilai Δg_{obs} yang diperoleh dari data baku tugu DG1A dan tugu GF VIII.



Gambar 9. Hasil validasi amplitudo sinyal koreksi pasang surut dengan menggunakan 2 titik pangkal gaya berat yang telah diketahui nilai percepatan gravitasi bakunya.

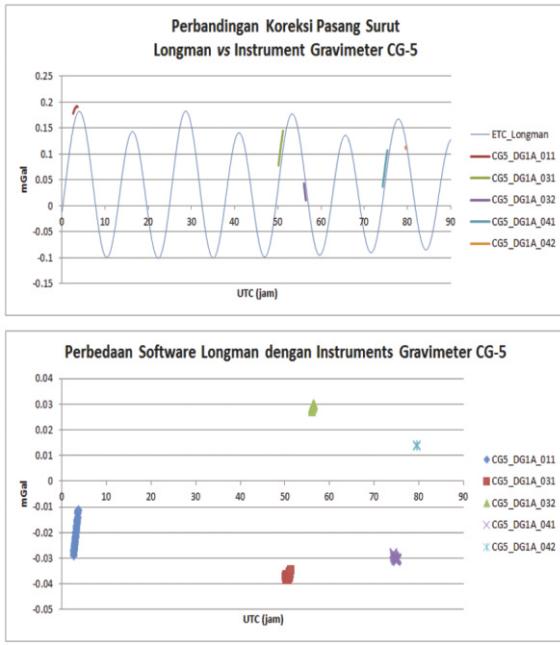
Berdasarkan hasil pengujian lapangan diperoleh besaran amplitudo koreksi pasang surut seperti diperlihatkan pada gambar 9.

Berdasarkan gambar 9 terlihat adanya perbedaan (DIFF) antara hasil pengukuran *Gravity Tide Observed* secara langsung dengan hasil perhitungan koreksi pasang surut dengan menggunakan persamaan *Longman* yang besarnya kurang dari $\pm 50 \mu\text{Gal}$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa perangkat lunak *Gravity Tide Correction* yang dikembangkan oleh Pusat Survei Geologi (PSG) berdasarkan persamaan *Longman* dapat memprediksi koreksi pasang surut gaya berat dengan tingkat kesalahan kurang dari $\pm 50 \mu\text{Gal}$.

Pengujian dengan Instrumen Ukur. Selain melakukan validasi amplitudo dengan bantuan 2 titik pangkal gaya berat yang diketahui nilai percepatan gravitasi bakunya, pengujian juga dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang sudah ada lebih dahulu. Perangkat lunak dimaksud dapat berupa perangkat lunak berbasis instrumen maupun perangkat lunak berbasis PC (*Personal Computer*). Perangkat lunak berbasis instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah *tide correction built-in* pada instrumen gravimeter CG-5 (*Scintrex*).

Gambar 10 memperlihatkan perbandingan *tide correction* berdasarkan persamaan *Longman* dengan *tide correction* dari instrument ukur CG-5 tanpa dilakukan proses apapun. Data keluaran dari perangkat lunak langsung dibandingkan dengan data keluaran dari instrumen ukur scintrex CG-5.

Berdasarkan Gambar 10 terlihat bahwa prediksi koreksi pasang surut dari perangkat lunak yang dikembangkan berdasarkan persamaan *Longman* memberikan hasil yang berhimpit dengan nilai koreksi pasang surut yang diberikan oleh instrumen gravimeter CG-5 (*Scintrex*). Secara umum perbedaan dari kedua data tersebut tidak lebih dari $\pm 0.04 \text{ mGal}$ atau $\pm 40 \mu\text{Gal}$. Koreksi pasang surut berdasarkan persamaan *Longman* ditunjukkan dengan garis tipis berwarna biru (*ETC_Longman*), sedangkan nilai koreksi pasang surut berdasarkan instrumen gravimeter CG-5 ditunjukkan dengan menggunakan garis berwarna dan tebal.



Gambar 10. Hasil pengujian perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat berdasarkan persamaan *Longman* yang dibandingkan dengan hasil perhitungan koreksi pasang surut dari instrumen ukur gravimeter CG-5 (*Scintrex*).



Gambar 11. Kegiatan pengukuran di lapangan dalam rangka validasi perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat di titik pangkal gaya berat DG1A (halaman Museum Geologi). Validasi yang dilakukan meliputi 2 hal yaitu validasi fasa dan validasi amplitudo berdasarkan *Gravity Tide Observed, Instrument Based Test, dan Software Based Test*.



Gambar 12. Hasil perhitungan koreksi pasang surut dengan menggunakan perangkat lunak QuickTidePro dari microglacoste pada koordinat 53.5° N dan 1.7° E, pada tanggal 18 November 2015 sampai dengan 19 November 2015 mulai pukul 15:11:08 selama 24 jam. (sumber: Cheryl Hancock-microglacoste).

Pengujian dengan Perangkat Lunak lain. Alternatif pengujian berikutnya adalah dengan membandingkan keluaran perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang dikembangkan dengan perangkat lunak yang sudah ada sebelumnya. Dalam penelitian ini digunakan perangkat lunak *QuickTidePro* dari *microglacoste*. Gambar 12 menunjukkan keluaran koreksi pasang surut gaya berat dengan menggunakan perangkat lunak *QuickTidePro* pada lokasi koordinat 53.5° N dan 1.7° E dengan ketinggian 100 m pada tanggal 18 November 2015 sampai dengan 19 November 2015, mulai pukul 15:11:08 selama 24 jam, interval perhitungan adalah 10 menit (sumber data: *Cheryl Hancock-microglacoste*).

Dengan menggunakan data pada gambar 12 maka dapat dibandingkan data hasil keluaran perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang dikembangkan oleh Pusat Survei Geologi (PSG) dengan data keluaran dari *QuickTidePro* milik *microglacoste*. Dengan demikian kita dapat dengan mudah melihat kesamaan pola koreksi pasang surut dari kedua perangkat lunak tersebut, selain itu kita dapat pula menghitung perbedaan dari kedua data tersebut. Gambar 13 menunjukkan perbandingan data koreksi pasang surut berdasarkan perangkat lunak *QuickTidePro* (*microglacoste*) dengan perangkat lunak koreksi pasang surut (PSG).



Gambar 13. Perbandingan QuickTidePro buatan microglacoste dengan perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang dikembangkan pada posisi koordinat 53.5° N dan 1.7° E, pada tanggal 18 November 2015 sampai dengan 19 November 2015 mulai pukul 15:11:08 selama 24 jam.

Dari hasil uji banding perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat (PSG) yang dikembangkan ini dengan perangkat lunak lain, dalam hal ini menggunakan perangkat lunak *QuickTidePro* (sumber: *microglacoste*, *Cheryl Hancock*) diperoleh perbedaan nilai (DIFF) kurang dari $\pm 20 \mu\text{Gal}$ antara kedua data dari perangkat lunak tersebut. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat yang dikembangkan oleh Pusat Survei Geologi (PSG) memiliki akurasi yang cukup baik.

4. Kesimpulan

Perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat formula Longman memberikan fasa yang sama dengan hasil pengukuran *Gravity Tide Observed* seperti diperlihatkan pada Gambar 7 dengan memberikan konstanta pergeseran statik yang berasosiasi dengan nilai gravitasi di lokasi titik pengamatan.

Besar konstanta pergeseran statik akan berbeda antara satu titik amat dengan titik amat yang lain, atau dengan kata lain nilai konstanta pergeseran statik berkaitan erat dengan nilai gravitasi di suatu tempat.

Berdasarkan pengamatan gaya berat secara langsung (*Gravity Tide Observed*) pada dua titik pangkal gaya berat, diperoleh perbedaan $< \pm 50 \mu\text{Gal}$ terhadap keluaran perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat persamaan Longman (Gambar 9).

Pengujian perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat dengan menggunakan perangkat lunak lain berbasis instrumen ukur (gravimeter CG-5) memberikan hasil yang sama (Gambar 10) dengan perbedaan $\pm 40 \mu\text{Gal}$.

Pengujian perangkat lunak koreksi pasang surut gaya berat dengan menggunakan perangkat lunak lain berbasis computer (dalam hal ini menggunakan *QuickTide Pro* dari *microglacoste*) memberikan hasil yang cukup baik dengan akurasi $< \pm 20 \mu\text{Gal}$ (Gambar 13).

Saran. Mekanisme validasi dapat dilakukan dengan menggunakan peralatan absolute superconducting gravimeter. Karena peralatan tipe ini memberikan nilai gravitasi absolut di titik pengamatan. Pembacaan secara kontinyu pada titik pangkal gaya berat dengan menggunakan perangkat ini akan memberikan nilai pembacaan gravitasi absolut dari waktu ke waktu sehingga besar nilai koreksi pasang surut yang timbul akibat pengaruh Bulan dan Matahari dapat dengan mudah dihitung. Mekanisme yang demikian akan mengurangi tingkat kesalahan yang mungkin terjadi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Pusat Survei Geologi yang telah memfasilitasi penulis dalam melakukan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada guru-guru dan teman penulis yaitu Prof. Dr. Wawan Gunawan A. Kadir, Dr. Hendra Grandis, Dr. Darharta Dahrin, Dr. Hermes Panggabean, Imam Setiadi, Subagio yang telah banyak memberikan bantuan, inspirasi dan diskusi yang menarik, *and the last but not least I would like to thanks to Cheryl Hancock from microglacoste for her kindly cooperations*.

Daftar Pustaka

- [1] Lilie, R.J., 1999. Whole Earth Geophysics : An Introductory Textbook for Geologists and Geophysicists. Prentice-Hall.
- [2] Blakely, R.J., 1995. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Cambridge University Press., New York.
- [3] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. 2004. Applied Geophysics 2nd edition. Cambridge University Press. Cambridge.
- [4] Panepinto, S., Greco, F., Luzio, D., Ducarme, B. 2008. Tidal Gravity Observations at Mt. Etna and Stromboli : Result Concerning the Modeled and Observed Tidal Factors. Annal Geophysics Vol. 51.
- [5] Sarkowi, M. 2005. Survei Gaya Berat Mikro 4D untuk Monitoring Dinamika Air Tanah. Fisika MIPA Universitas Lampung.
- [6] Longman, I.M., 1959. Formula for computing the tidal acceleration due to the moon and the sun. J. Geophysics, Res. 64. 2351 - 2355.
- [7] Garrison, T. 2016. Chapter 11 Tides Oceanography an Invitation to Marine Sciences 7th. www.slideplayer.com.

- [8] Stewart, Robert H. 2008. Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography Texas A&M University.
- [9] Schureman, P., 1941. Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. U.S. Coast and Geodetic Survey, Special Publication No. 98.
- [10] Bartels, J. 1957. Handbuch der Physik. Vol XLVIII. Geophysik II. Springer-Verlag, Berlin.
- [11] Jiangcun, Z., Heping, S., Bernard, D. 2015. Validating the synthetic tidal gravity parameters with superconducting gravimeter observations.
- [12] Setiadi, I., Subagio. 2012. Laporan Kegiatan In House Research: Pembuatan Benchmark dan Jalur Kalibrasi Gaya Berat. PSG.