

Evaluasi Koreksi Tidal (*Solid Earth Tide*) pada Survei *Time-Lapse Microgravity* menggunakan Gravimeter Relatif

Eko Januari Wahyudi^{1,a)}, Indra Gunawan^{1,b)}, dan Dadi Abdurrahman^{1,c)}

¹Laboratorium Geofisika Eksplorasi,
Kelompok Keilmuan Geofisika Terapan dan Eksplorasi,
Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} ekojw@gf.itb.ac.id (corresponding author)

^{b)} gunawan@geoph.itb.ac.id

^{c)} dadi.gading1@gmail.com

Abstrak

Perhitungan teoretis dari koreksi tidal (*solid earth tide*) di permukaan Bumi akibat Bulan dan Matahari sangat umum digunakan untuk pengolahan awal data gravimeter relatif. Koreksi tidal merupakan koreksi utama pada data mentah gravimeter relatif dengan orde bisa mencapai $\pm 300 \mu\text{Gal}$. Setelah koreksi tidal dilakukan pada data gravimeter relatif, beda pembacaan pada waktu yang berbeda dan pada lokasi pengamatan yang sama akan memperlihatkan kualitas drift dari skema pengukuran loop gravimeter relatif. Pada studi ini, dilakukan evaluasi pada algoritma koreksi tidal yang sudah disusun dengan bahasa pemrograman Scilab pada penelitian sebelumnya. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan program koreksi tidal yang sudah disusun dengan nilai koreksi tidal teoretis yang terekam pada gravimeter Scintrex CG5 dari kegiatan survei *time-lapse microgravity* 2014 dan 2016. Daerah penelitian seluas 25 km^2 berada di Kabupaten Blora, Jawa Tengah diamati dengan gravimeter Scintrex CG5 dengan distribusi stasiun berupa grid. Lebih dari 4000 rekaman data mentah Scintrex CG-5 pada daerah penelitian memberikan perbedaan dengan rentang nilai antara -3 sampai $5 \mu\text{Gal}$. Berdasarkan sampel-sampel tersebut, rata-rata perbedaan nilai koreksi tidal adalah $1,46 \mu\text{Gal}$. Peta *time-lapse* terkait perbedaan koreksi tidal pada selang waktu akuisisi data dari perhitungan program yang dibuat dan rekaman gravimeter Scintrex CG5 pada titik pengamatan di daerah penelitian menunjukkan perbedaan pada rentang nilai antara $-0,80$ sampai $0,80 \mu\text{Gal}$.

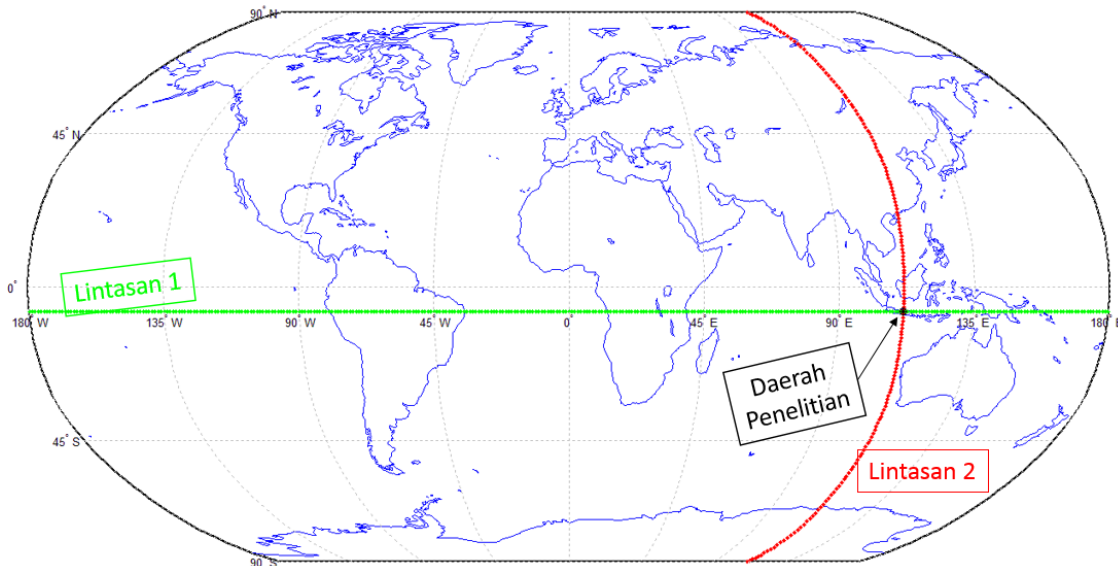
Kata-kata kunci: koreksi tidal, gravimeter relatif, akuisisi, *time-lapse microgravity*

PENDAHULUAN

Perhitungan koreksi tidal (*solid earth tide*) menggunakan formulasi matematis Longman (1959) telah disusun algoritmanya menggunakan bahasa pemrograman Scilab dan juga telah dipresentasikan pada studi sebelumnya [1,2]. Pada studi tersebut, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan koreksi tidal dengan data observasi gravimeter kontinu (gPhone). Perhitungan teoretis dari koreksi tidal (*solid earth tide*) sangat umum digunakan untuk pengolahan awal data gravimeter relatif. Koreksi tidal (*solid earth tide*) merupakan koreksi utama pada data mentah gravimeter relatif dengan orde bisa mencapai $\pm 300 \mu\text{Gal}$. Setelah koreksi tidal dilakukan pada data gravimeter relatif, beda pembacaan pada waktu yang berbeda dan pada lokasi pengamatan yang sama akan memperlihatkan kualitas drift dari skema pengukuran loop gravimeter relatif.

Beberapa skema pengaturan untuk *input* gravimeter Scintrex CG5 (berkaitan dengan perhitungan koreksi tidal teoretis) belum bisa secara fleksibel kami gunakan untuk evaluasi pada penelitian ini. Evaluasi *input* untuk koreksi tidal teoretis yang sudah disusun akan kami gunakan untuk melihat pengaruh perbedaan jarak (secara horizontal dan vertikal) pada hasil perhitungan. Pengaruh rata-rata dari perbedaan *input* koordinat horizontal (lintang dan bujur) dievaluasi pada interval jarak 1° , sedangkan pengaruh rata-rata dari perbedaan *input* koordinat vertikal (elevasi) dievaluasi pada interval jarak 100 meter.

Pada studi ini, telah dilakukan evaluasi pada algoritma koreksi tidal yang sudah disusun dengan membandingkan hasil perhitungannya dengan nilai koreksi tidal teoretis yang terekam pada gravimeter Scintrex CG5 dari kegiatan survei *time-lapse microgravity* 2014 dan 2016[3]. Simulasi perhitungan koreksi tidal pada kegiatan survei *time-lapse microgravity* di daerah penelitian pada tahun 2014 dan 2016 dilakukan dan disajikan dalam bentuk peta *time-lapse*. Daerah penelitian (ditunjukkan pada Gambar 1) *time-lapse microgravity* seluas 25 km² yang berada di Kabupaten Blora diamati dengan distribusi stasiun berupa grid. Jarak rata-rata dari interval stasiun pengamatan adalah 250 meter.



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian.

KOREKSI TIDAL (*SOLID EARTH TIDE*)

Perhitungan koreksi tidal (*solid earth tide*) pada studi ini melibatkan percepatan gravitasi tidal akibat Bulan (g_m) dan Matahari (g_s). Komponen vertikal (g_o) dari koreksi tidal (*solid earth tide*) secara matematis ditunjukkan dengan persamaan (1) berikut:

$$g_o = g_m + g_s \tag{1}$$

Penyederhanaan dari komponen vertikal dari *tidal force* (g_m) pada suatu titik di permukaan Bumi yang diakibatkan oleh Bulan ditunjukkan dengan formulasi matematis sebagai berikut:

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

Pada persamaan (2) simbol-simbol matematis yang digunakan terdiri dari: μ , M , r , d , dan θ secara berturut-turut adalah konstanta gravitasi, massa Bulan, rata-rata jarak dari pusat ke permukaan Bumi, rata-rata jarak dari pusat Bumi ke pusat Bulan, dan sudut zenith pada Bulan.

Penyederhanaan dari komponen vertikal dari *tidal force* (g_s) pada suatu titik di permukaan Bumi yang diakibatkan oleh Matahari ditunjukkan dengan formulasi matematis sebagai berikut:

$$g_s = \frac{\mu S r}{D^3} (3\cos^2\varphi - 1) \tag{3}$$

Pada persamaan (3) simbol-simbol yang belum dijelaskan terdiri dari: S , D , dan φ secara berturut-turut adalah massa Matahari, rata-rata jarak dari pusat Bumi ke pusat Matahari, dan sudut zenith pada Matahari.

SCILAB CODE

Perangkat lunak untuk keperluan koreksi tidal dengan *graphical user interface* yang cukup memudahkan *user* disarankan menggunakan VIKI (<https://github.com/gunawanfryst/Viki---Gravity-Modeling/>) Sedangkan, berikut ini ditunjukkan implementasi perhitungan *solid earth tide* dengan bahasa pemrograman Scilab. Penyusunan algoritma juga memperhatikan hasil yang dikembangkan oleh Weng, Forsberg, dan hasil modifikasi cct/eva dalam arsip file pada *website* Tom Van Baak (www.LeanSecond.com/tools).

```
//start tidal correction (EJW-->01102017-26122017)
//helped by ign 18.01.2018
//julian date dengan epoch 2000 --> 1Jan2000 jam 12:00:00 = 2451545.0
clc (); clear;
//input --> x,y,z coordinate
lat=-6.9281; lon=107.7690; height=800.62;
//input --> date & time with format: yyyy mm dd hh mm ss
dtm1=[2014 04 04 00 00 00]; dtm2=[2014 04 06 23 00 00];
//Konstanta2:
e=0.054899720;
c=3.84402E10;
c1=1.495978707E13;
i=5.145*%pi/180;
omega=23.43927944*%pi/180;
ss=1.9884E33;
mm=7.3458E25;
my=6.67428E-8;
m=0.074804;
a=6.3781366E8;
e_2=e*e;
year=[dtm1(1) dtm2(1)];
month=[dtm1(2) dtm2(2)];
day=[dtm1(3) dtm2(3)];
hour=[dtm1(4) dtm2(4)];
minute=[dtm1(5) dtm2(5)];
second=[dtm1(6) dtm2(6)];
for k=1:2
    if (month<=2) //January & February
        year=year-1;
        month=month+12;
    end
    jd = floor(365.25*(year+4716))+floor(30.6001*(month+1))+2...
        -floor(year/100.0)+floor(floor(year/100)/4)+day-1524.5...
        +(hour+minute/60+second/3600)/24-2451545.0;
end
//series per minute = 1/(60*24) day
time=(jd(1):(1/(24)):jd(2));
//perhitungan julian centuries
tt=time/36525+1.0;
tt2=tt.*tt;
tt3=tt2.*tt;
//perhitungan parameter s, p, h, N, p1, e1 (cek Longman(1959)) dg satuan radians
s= 4.720023438+(8399.7093.*tt)+(4.40695E-5.*tt2)+(3.29E-8.*tt3);
p= 5.835124721+(71.018009.*tt)-(1.80546E-4.*tt2)-(2.181E-7.*tt3);
h= 4.881627934+(628.33195.*tt)+(5.2796E-6.*tt2);
N= 4.523588570-(33.757153.*tt)+(3.67488E-5.*tt2)+(3.87E-8.*tt3);
p1= 4.908229467+(3.0005264E-2.*tt)+(7.9024E-6.*tt2)+(5.81E-8.*tt3);
e1= 0.01675104-(4.18E-5.*tt)-(1.26E-7.*tt2);
e1_2=e1.*e1;
```

```

//Perhitungan jarak antara pusat bumi dan bulan:
aprim=1/(c*(1-e_2));
a1prim=1/(c1.*(1-e1_2));
resd=(1/c)+(aprim*e*cos(s-p))+(aprim*e_2*cos(2*(s-p))+...
((15/8)*aprim*m*e*cos(s-2*h+p))+(aprim*m*m*cos(2*(s-h)));
resdd=(1./c1)+(a1prim.*e1.*cos(h-p1));
//Perhitungan sudut di Bulan dan matahari:
coslambdacos(lat*%pi/180);
sinlambdasin(lat*%pi/180);
r=(a*(sqrt(1/(1+0.006738*(sinlambdacos^2))))+(height.*100);
LL=lon*%pi/180;
cosiicos(omega)*cos(i)-sin(omega)*sin(i)*cos(N);
siniisqrt(1-(cosii).^2);
ii=atan(sinii./cosii);
ny=asin(sin(i).*sin(N)./sinii);
t=2.*%pi.*(time-floor(time))+LL;
ksil=t+h;
ksi=ksil-ny;
L1=h+(2.*e1.*sin(h-p1));
alfaa=2.*atan((sin(omega).*sin(N)./sinii)/(1+cos(N).*cos(ny)+sin(N).*sin(ny).*cos(omega)));
sigmas=s-N+alfa;
L=sigma+(2.*e.*sin(s-p))+5.*e_2.*sin(2.*(s-p))/4+(15.*m.*e.*sin(s-2.*h+p)/4)+(11.*m.*m.*sin(2.*(s-h))/8);
costhetasinlambdasinii.*sin(L)+(coslambdacos(ii./2).^2.*cos(L-ksi)+(sin(ii./2).^2.*cos(L+ksi));
cosphisinlambdasin(omega).*sin(L1)+(coslambdacos(omega./2).^2.*cos(L1-ksi1)+(sin(omega./2).^2.*cos(L1+ksi1));
//Perhitungan komponen vertikal (tidal)
LoveFactor = 1 + 0.59 - 1.5 * 0.27;
gs=(my.*ss.*r.*(resdd).^3).*(3.*(cosphi).^2-1);
gm=((my.*mm.*r.*(resd).^3).*(3.*(costheta).^2-1))+((3.*my.*mm.*(r).^2.*(resd).^4./2).*(5.*(costheta).^3-3.*costheta));
g0=(gm+gs)*1000000*LoveFactor; //mikroGal
//konversi waktu dalam jam
jam=(time-time(1)).*24;
subplot(2,1,1);
plot(jam,g0);
xlabel("hour(s)","fontsize",3,"color","black");
ylabel("earth tide (mGal)","fontsize",3,"color","black");
//konversi waktu dalam menit
menit=(time-time(1)).*24*60;
subplot(2,1,2);
plot(menit,-g0,'');
xlabel("minute(s)","fontsize",3,"color","black");
ylabel("minus earth tide (mGal)","fontsize",3,"color","black");

```

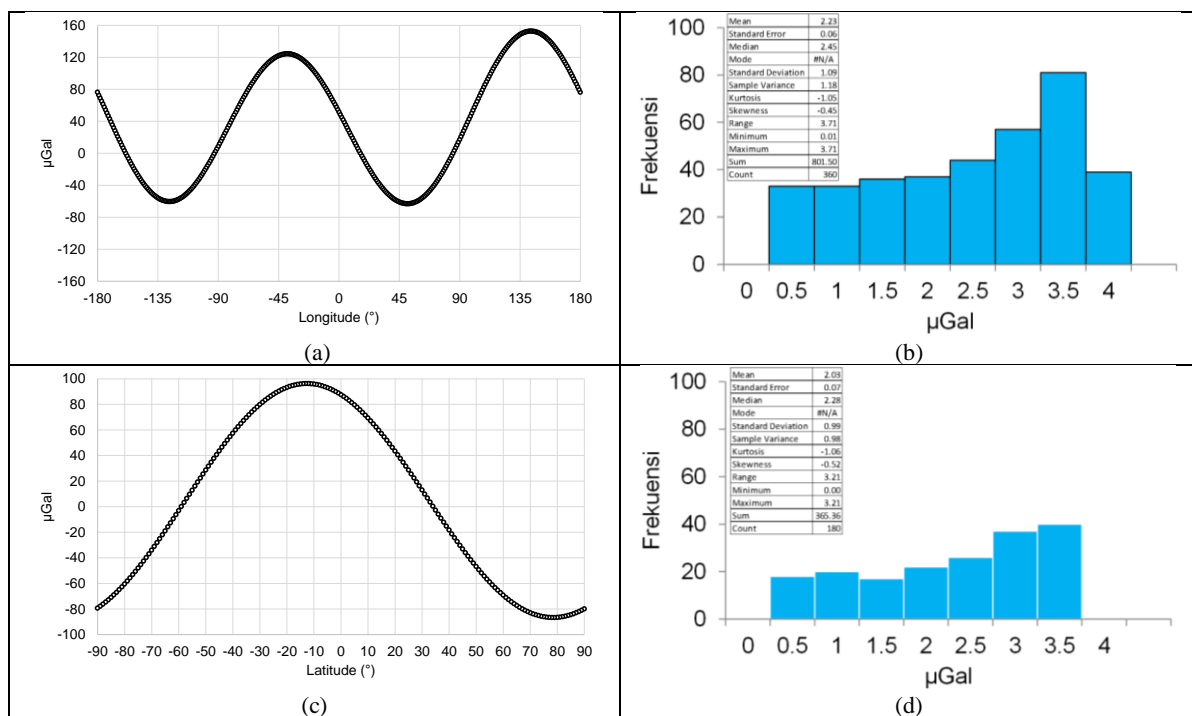
EVALUASI INPUT KOORDINAT UNTUK PERHITUNGAN KOREKSI TIDAL

Skema pengaturan *input* gravimeter Scintrex CG5 untuk setiap kali survei sangat memperhatikan acuan grid. *Input* koordinat untuk perhitungan koreksi tidal teoretis dalam gravimeter Scintrex CG5 hanya dilakukan satu kali saja (di awal survei). Tentu saja *input* koordinat yang dipilih adalah mengacu pada lokasi yang relatif dekat dengan daerah penelitian, sehingga untuk posisi setiap stasiun pengamatan gravity akan menggunakan koreksi tidal pada lokasi yang sedikit berbeda dari lokasi stasiun yang sebenarnya. Asumsi untuk perbedaan *input* lokasi tersebut menunjukkan bahwa koreksi tidal yang dihasilkan perhitungan tidak berbeda signifikan. Pada bagian ini, akan ditunjukkan hasil perhitungan koreksi tidal pada variasi koordinat horizontal (lintang dan

bujur) serta pada variasi koordinat vertikal (elevasi). Pada setiap variasi koordinat tersebut digunakan input waktu pengamatan yang sama yaitu pada tanggal 28 September 2014 jam 04.23.02 (*Greenwich Mean Time*).

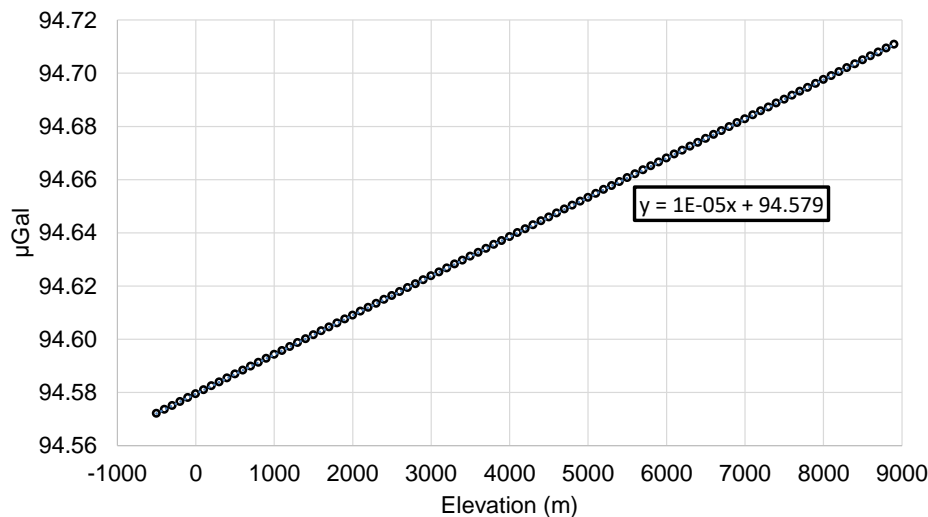
Variasi koordinat horizontal (bujur) menggunakan lintasan 1 (Gambar 1 ditunjukkan dengan *dotplot* hijau interval jarak 1°) berada pada Lintang Selatan (-7,1°LS) dan ketinggian 0 meter di atas permukaan laut. Variasi percepatan gravitasi tidal menghasilkan nilai pada rentang -80 sampai 160 μGal (Gambar 2a). Pada setiap interval jarak 1° tersebut terdapat perbedaan rata-rata mencapai 2,23 μGal/°. Histogram dan statistik deskriptif dari perbedaan nilai koreksi tidal pada interval jarak 1° lintasan 1 ditunjukkan pada Gambar 2b.

Variasi koordinat horizontal (lintang) menggunakan lintasan 2 (Gambar 1 ditunjukkan dengan *dotplot* merah interval jarak 1°) berada pada Bujur Timur (111.6°BT) dan ketinggian 0 meter di atas permukaan laut. Variasi percepatan gravitasi tidal menghasilkan nilai pada rentang -100 sampai 100 μGal (Gambar 2c). Pada setiap interval jarak 1° tersebut terdapat perbedaan rata-rata mencapai 2,03 μGal/°. Histogram dan statistik deskriptif dari perbedaan nilai koreksi tidal pada interval jarak 1° lintasan 2 ditunjukkan pada Gambar 2d.



Gambar 2. Variasi percepatan gravitasi tidal di Bumi akibat Bulan dan Matahari: (a) pada koordinat lintasan 1, (b) histogram dari perbedaan nilai koreksi tidal pada interval 1° sepanjang lintasan 1, (c) pada koordinat lintasan 2, dan (d) histogram dari perbedaan nilai koreksi tidal pada interval 1° sepanjang lintasan 2.

Posisi perpotongan lintasan 1 dan 2 (Gambar 1 ditunjukkan dengan *dotplot* hitam) berada pada 111,6°BT dan -7,1°LS. Variasi koordinat vertikal (elevasi) pada perpotongan lintasan 1 dan 2 disimulasikan mulai -500 sampai 8900 meter dari permukaan laut. Variasi percepatan gravitasi tidal menghasilkan nilai dengan kecenderungan linier pada rentang 94,56 sampai 94,72 μGal (Gambar 3). Pendekatan garis lurus terhadap kecenderungan yang linier tersebut memberikan gradien $1,48 \times 10^{-5}$.



Gambar 3. Variasi percepatan gravitasi tidal di Bumi akibat Bulan dan Matahari (pada perpotongan lintasan 1 dan 2 dan interval ketinggian 100 meter).

Evaluasi *input* koordinat untuk perhitungan koreksi tidal berdasarkan hasil perhitungan program yang telah disusun menunjukkan perbedaan yang cukup kecil. Perubahan *input* koordinat horizontal pada arah bujur dan lintang menunjukkan perbedaan rata-rata mencapai $2,00 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Gal}/\text{m}$ dan $1,82 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Gal}/\text{m}$. Untuk perubahan *input* koordinat vertikal pada arah elevasi berdasarkan perhitungan sampel-sampel menunjukkan perbedaan rata-rata mencapai $1,45 \times 10^{-5}$ $\mu\text{Gal}/\text{m}$. Angka-angka tersebut diperoleh berdasarkan perhitungan sampel-sampel dengan menggunakan 1° adalah sekitar 111,32 km.

SIMULASI PENGARUH KOREKSI TIDAL PADA PETA *TIME-LAPSE* MICROGRAVITY DI DAERAH PENELITIAN

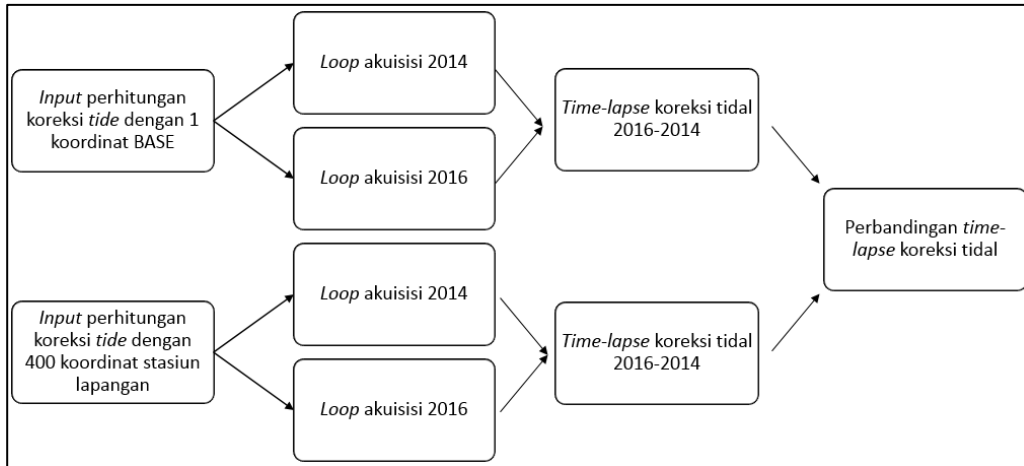
Secara umum, gravimeter scintrex CG5 memerlukan input data koordinat yang berhubungan untuk perhitungan koreksi tidal teoretiknya. Input data koordinat tersebut hanya dilakukan sekali pada setiap awal rekaman kegiatan akuisisi sehingga tidak bisa dilakukan perubahan koordinat di setiap posisi stasiun pengamatan. Jarak terjauh dari input data koordinat pada setiap kegiatan survey bisa mencapai 30 km, sehingga pada bagian ini akan ditunjukkan simulasi pada daerah penelitian dengan menggunakan jadwal kegiatan akuisisi pada tahun 2014 dan 2016.

Skema simulasi tersebut ditunjukkan lebih jelas dengan diagram alir pada Gambar 4. Perbandingan *time-lapse* koreksi tidal 2016-2014 untuk input satu koordinat BASE dan input 400 koordinat di daerah penelitian. Informasi *loop* akuisisi 2014 dan 2016 dan waktu pengamatan ditunjukkan secara ringkas pada Gambar 5. Perbandingan dari *time-lapse* koreksi tidal 2016-2014 menggunakan skema simulasi dan data tersebut ditunjukkan sebagai peta pada Gambar 6. Nilai *time-lapse* koreksi tidal pada peta tersebut (Gambar 6a dan 6b) berada pada rentang ± 180 μGal . Selisih antara nilai *time-lapse* koreksi tidal pada Gambar 6a dan 6b relatif sangat kecil yaitu pada rentang $\pm 0,80$ μGal (Gambar 7).

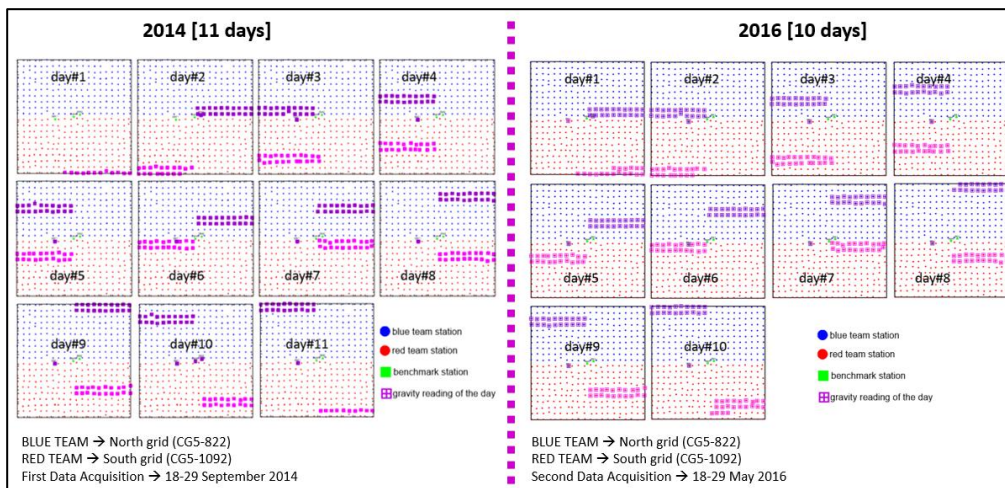
PERBANDINGAN KOREKSI TIDAL TEORETIS SCINTREX CG5 DAN HASIL PERHITUNGAN PROGRAM

Perbandingan koreksi tidal teoretis Scintrex CG5 rekaman kegiatan akuisisi di daerah penelitian dan hasil perhitungan program yang telah dibuat dilakukan menggunakan input koordinat yang sama. Berdasarkan rekaman scintrex CG5 dari kegiatan akuisisi di daerah penelitian kami membandingkan 4515 sampel (Gambar 8). Selisih nilai koreksi tidal teoretis dari program yang dibuat dan Scintrex CG5 berada pada rentang -3 sampai +5 μGal . Jika kami perhatikan pada Gambar 9, selisih koreksi tidal teoretis tersebut masih memiliki pola yang sinusoids. Histogram dan deskripsi statistik berdasarkan selisih koreksi tidal teoretis ditunjukkan pada Gambar 10. Perhitungan selisih nilai koreksi tidal teoretis dari program yang dibuat dan Scintrex CG5 menunjukkan

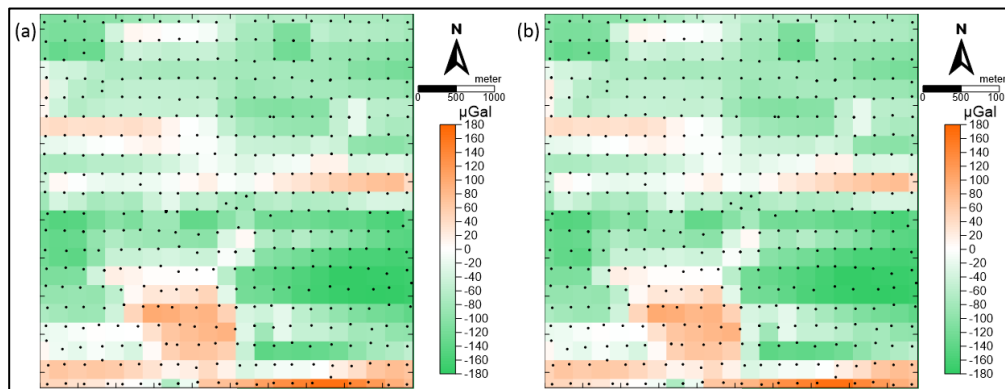
pola sinusoids pada rentang -3 sampai +5 μGal memberikan indikasi adanya perhitungan koreksi tidal tambahan seperti pengaruh *ocean tidal loading*. Perbedaan nilai berada pada rentang negatif dan positif merupakan pola sinusoidal yang mungkin bisa kita lanjutkan untuk evaluasi yang lebih detail dari perhitungan *ocean tidal loading*.



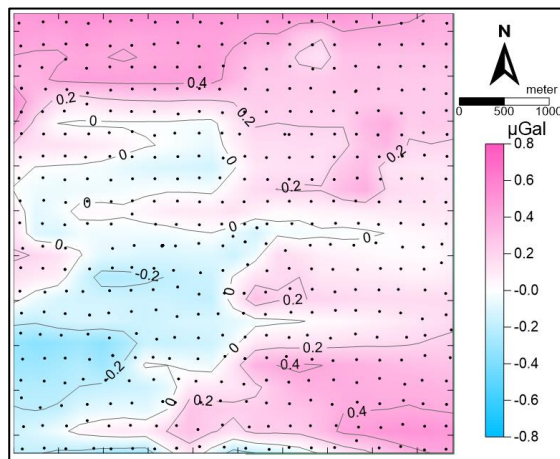
Gambar 4. Diagram alir untuk melihat pengaruh input koreksi tidal menggunakan simulasi di daerah penelitian.



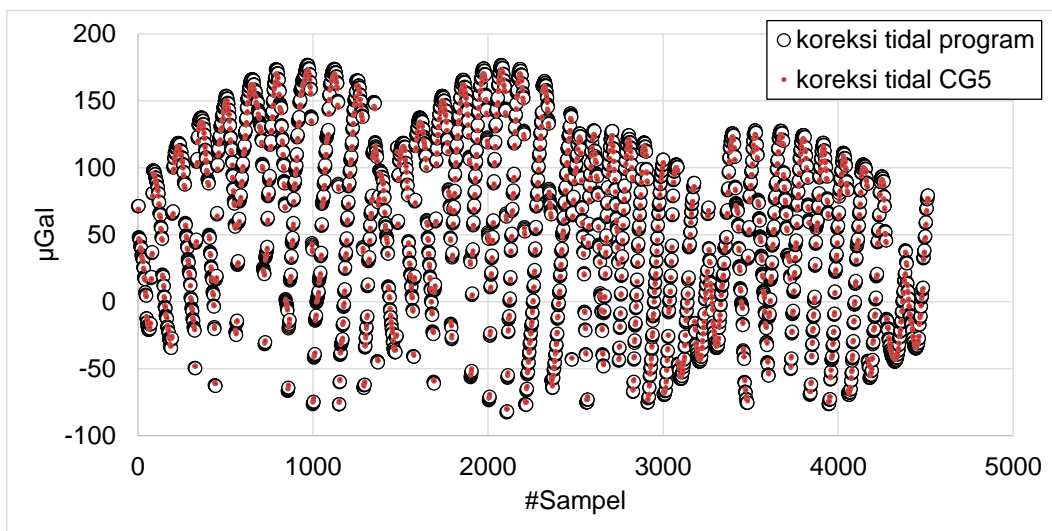
Gambar 5. Perbandingan akuisisi data 2014 dan 2016 untuk input koreksi tidal di daerah penelitian.



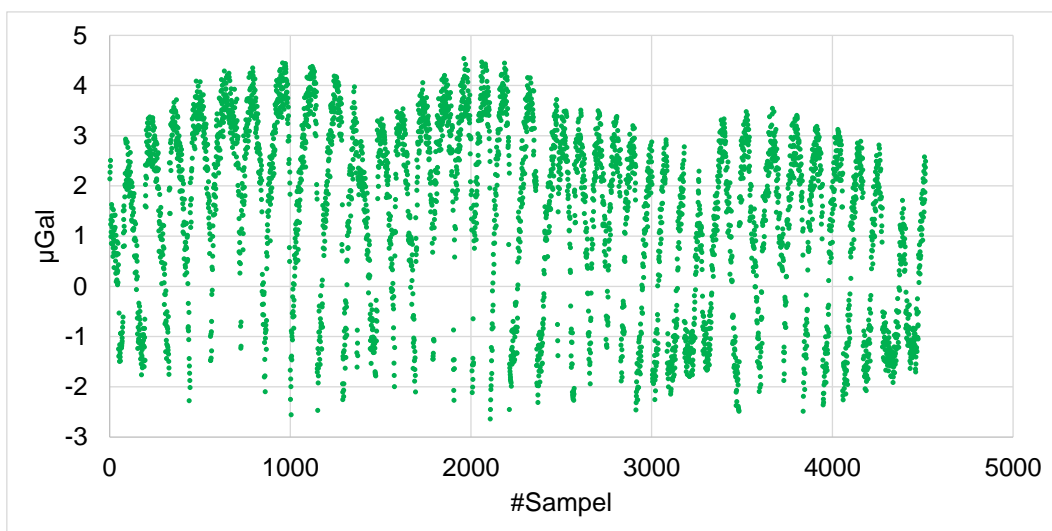
Gambar 6. Perbandingan *time-lapse* koreksi tidal 2016-2014 dengan input: (a) satu koordinat BASE dan (b) 400 koordinat stasiun lapangan.



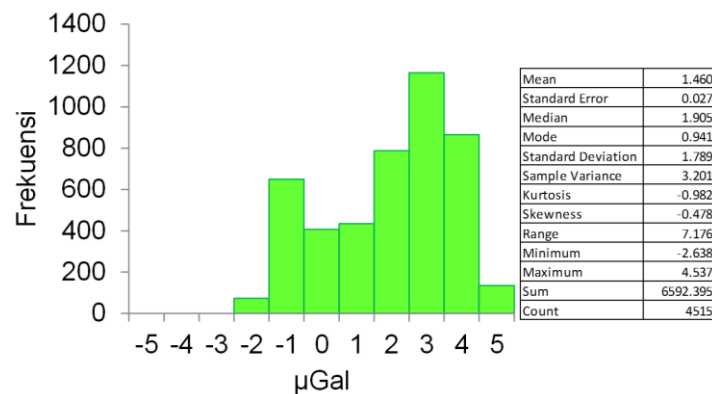
Gambar 7. Selisih peta time-lapse koreksi tidal 2016-2014 antara Gambar 6a dan Gambar 6b.



Gambar 8. Perbandingan koreksi tidal teoritis antara rekaman Scintrex CG5 (•) dan program yang dibuat (o).



Gambar 9. Selisih koreksi tidal teoritis antara program yang dibuat dan rekaman Scintrex CG5.



Gambar 10. Histogram dan deskripsi statistik berdasarkan selisih koreksi tidal teoretis Gambar 9.

KESIMPULAN

Ringkasan dari hasil evaluasi untuk program perhitungan koreksi tidal yang telah dibuat adalah sebagai berikut:

1. Perubahan *input* koordinat horizontal pada arah bujur dan lintang menunjukkan perbedaan rata-rata mencapai $2,00 \times 10^{-5}$ µGal/m dan $1,82 \times 10^{-5}$ µGal/m.
2. Perubahan *input* koordinat vertikal pada arah elevasi berdasarkan perhitungan sampel-sampel menunjukkan perbedaan rata-rata mencapai $1,45 \times 10^{-5}$ µGal/m.
3. Skema simulasi pada daerah penelitian memberikan selisih nilai *time-lapse* koreksi tidal pada rentang $\pm 0,80$ µGal.
4. Perhitungan selisih nilai koreksi tidal teoretis dari program yang dibuat dan Scintrex CG5 menunjukkan pola sinusoids pada rentang -3 sampai +5 µGal

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada prodi Teknik Geofisika FTTM ITB.

REFERENSI

1. M. Longman, *Formulas for Computing the Tidal Accelerations due to the Moon and the Sun*, Journal of Geophysical Research, **64**, 2351–2355 (1959)
2. E. J. Wahyudi, I. Gunawan, M. Hidayat, dan P. S. Lestari, *Perhitungan Koreksi Tidal dengan Menggunakan Bahasa Pemrograman Scilab untuk Pengolahan Awal Data Gravimeter Relatif*, Simposium Nasional Inovasi Pembelajaran dan Sains (2018)
3. E. J. Wahyudi, R. Marthen, Y. Fukuda, dan Y. Nurali, *Time-lapse microgravity data acquisition in baseline stage of CO₂ injection Gundih pilot project*, Earth and Environmental Science: IOP Conference Series, **62**, 012047 (2017)