

PENGUKURAN GAYABERAT MENGGUNAKAN GRAVIMETER ABSOLUT A-10

Studi Kasus di Jakarta dan Makassar, Indonesia

(The Gravity Observation by using A-10 Absolute Gravimeter, Case Study in Jakarta and Makassar, Indonesia)

Prayudha Hartanto¹, Safirotul Huda², Widy Putra², dan Irpan Septiawan²

¹ Bidang Penelitian, Badan Informasi Geospasial

² Pusat Jaring Kontrol Geodesi dan Geodinamika, Badan Informasi Geospasial

Jl. Raya Jakarta-Bogor Km. 46, Cibinong, Jawa Barat

E-mail: hartantoprayudha@gmail.com

Diterima: 31 Juli 2018; Direvisi: 8 April 2019; Disetujui untuk Dipublikasikan: 9 Mei 2019

ABSTRAK

Pengukuran gayaberat absolut merupakan pengukuran nilai gayaberat dengan mengamati percepatan vertikal benda jatuh bebas. Pada tahun 2017, Badan Informasi Geospasial (BIG) melakukan pengukuran gayaberat absolut di beberapa pilar Gayaberat Utama (GBU) di Indonesia dengan menggunakan gravimeter A-10. Tujuan penulisan makalah ini adalah memaparkan teknik pengukuran dan pengolahan data gayaberat absolut di GBU yang merupakan bagian dari Jaring Kontrol Gayaberat (JKG) dengan menggunakan gravimeter A-10. Titik-titik yang akan dijadikan pembahasan dalam naskah ini adalah GBU018 di Jakarta dan GBU035 di Makassar. Pengukuran di tiap titik dilakukan sebanyak 10 set dengan jumlah *drop* untuk setiap set sebanyak 120. Hasil yang diperoleh adalah nilai gayaberat absolut (μgal) beserta ketidakpastiannya. Nilai gayaberat (g) hasil pengolahan di lapangan (*on-site*) untuk GBU018 adalah $978140735,73 \pm 11,17 \mu\text{gal}$, sedangkan untuk GBU035 adalah $978117560,92 \pm 7,16 \mu\text{gal}$. Nilai-nilai tersebut diperoleh setelah dilakukan koreksi gradien gayaberat. Koreksi tersebut diperoleh dari pengamatan gradien menggunakan gravimeter relatif dengan besaran $-296,30 \mu\text{gal/m}$ untuk GBU018 dan $-324,14 \mu\text{gal/m}$ untuk GBU035.

Kata kunci: anomali gayaberat, gravimeter absolut, gradien gayaberat

ABSTRACT

Absolute gravity measurement is measuring the gravity value by observing the vertical acceleration of a free-falling body. In 2017, the Geospatial Information Agency of Indonesia (BIG) effectuated an absolute gravity campaign over some points in Indonesia by using an A-10 gravimeter. The objective of this writing is to describe the measurement and processing steps taken in absolute gravity survey over some gravity network benchmarks. Some of those points were GBU018 (Jakarta) and GBU035 (Makassar). Each point was measured for 120 drops, with 10 number of sets. The obtained results were both gravity values and their uncertainties (μgal). The gravity values (g) as obtained on-site were $978140735.73 \pm 11.17 \mu\text{gal}$ for GBU018 and $978117560.92 \pm 7.16 \mu\text{gal}$ for GBU035. Those values were generated after gravity gradient correction had been applied. Moreover, the correction values which were obtained by using relative gravimeter with magnitude of $-296.30 \mu\text{gal/m}$ for GBU018 and $-324.14 \mu\text{gal/m}$ for GBU035.

Keywords: gravity anomaly, absolute gravimeter, gravity gradient

PENDAHULUAN

Gayaberat adalah penjumlahan dari vektor percepatan gravitasi (a) dan percepatan sentrifugal (a_c) sebagaimana dinyatakan dalam **Persamaan 1**. Menurut Sneeuw, magnitudo dari vektor gayaberat bervariasi dari nilai rata-ratanya, yakni $9,8 \text{ ms}^{-2}$, sebesar $\pm 0,025 \text{ ms}^{-2}$. Variasi ini disebabkan oleh kecepatan bola bumi dan rotasinya (Sneeuw, 2006).

$$g = a + a_c \dots\dots\dots(1)$$

Besaran skalar gayaberat (g) dapat diukur menggunakan alat yang disebut sebagai *gravity*

meter (gravimeter). Metode pengukurannya dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu metode absolut dan relatif. Metode pengukuran gayaberat absolut dilakukan dengan cara mengukur nilai gayaberat di suatu lokasi secara langsung dengan menggunakan prinsip unting-unting maupun benda jatuh bebas. Sedangkan pengukuran gayaberat relatif pada prinsipnya adalah mengukur selisih nilai gayaberat di suatu titik dengan titik lain yang telah diketahui nilai g nya (titik ikat).

Badan Informasi Geospasial (BIG) sebagai instansi penyelenggara Informasi Geospasial Dasar, di dalamnya mencakup Jaring Kontrol Gayaberat (JKG), melaksanakan pengukuran gayaberat

absolut di beberapa titik di Indonesia pada tahun 2017. Titik-titik yang diukur adalah pilar Gayabarat Utama (GBU) yang terletak di Jakarta, Jawa Barat dan Pulau Sulawesi. Alat yang digunakan adalah gravimeter A-10. Pengukuran JKG di Indonesia dengan menggunakan gravimeter absolut sesungguhnya telah dilaksanakan untuk JKG orde 0. Pengukuran tersebut dilakukan oleh Fukuda dkk pada tahun 2002 di Bandung dan Yogyakarta dengan menggunakan gravimeter FG-5. Nilai gayabarat absolut yang diperoleh untuk Bandung adalah 977976701,2 μ gal dan untuk Yogyakarta 978203093,5 μ gal (Fukuda et al., 2004). Sementara itu, pengukuran gayabarat absolut menggunakan gravimeter A-10 di Indonesia telah dilakukan beberapa kali, yakni dalam rentang tahun 2008-2011 (Fukuda et al., 2016; Setyawan et al., 2015) dan pada tahun 2014 (Nishijima et al., 2015), namun keduanya tidak ditujukan untuk membuat JKG.

Pengukuran gayabarat absolut yang dilakukan oleh Fukuda pada 2008-2011 di Jakarta tersebut bertujuan untuk memantau penurunan muka tanah di Jakarta. Penelitian serupa di Taiwan pernah dilakukan oleh Hwang et al (2010). Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Nishijima et al (2015) bertujuan memantau injeksi CO₂ pada sumur gas Gundih, Jawa Tengah.

Paparan di atas menunjukkan bahwa pengukuran gayabarat absolut menggunakan gravimeter A-10 untuk pembuatan JKG belum pernah dilaksanakan di Indonesia. Pada tahun 2017, BIG mendatangkan gravimeter A-10 produksi terbaru dengan nomor seri 049 untuk memutakhirkan JKG di seluruh Indonesia. Produksi terbaru alat tersebut diharapkan mampu mengurangi pengaruh buruk suhu dan kelembaban tinggi pada pompa ion vakum dan *laser control*, sebagaimana yang terjadi pada A-10 produksi sebelum tahun 2010 (Fukuda et al., 2017). Tujuan penulisan naskah ini adalah memaparkan teknik pengukuran dan pengolahan data gayabarat absolut di JKG dengan menggunakan gravimeter A-10.

Penggunaan gravimeter absolut A-10 memiliki keunggulan dibandingkan dengan FG-5, yaitu berat instrumen yang lebih ringan dengan dimensi yang lebih kecil. Keunggulan lain dari gravimeter A-10 adalah kemampuannya untuk dioperasikan menggunakan sumber daya listrik 12V-DC pada suhu yang rendah (Kazama et al., 2013). Dengan spesifikasi tersebut, gravimeter absolut A-10 dianggap mampu mengukur nilai gayabarat dengan tingkat ketelitian dan efisiensi yang tinggi. Beberapa negara yang menggunakan gravimeter A-10 untuk pembuatan JKG adalah Polandia (Dykowski et al., 2014), Arab Saudi (Ayhan et al., 2015) dan Antartika (Kazama et al., 2013).

METODE

Pengukuran gayabarat absolut dilakukan di atas titik Gayabarat Utama Badan Informasi Geospasial (GBU) yang baru dibangun pada tahun 2017. Titik tersebut adalah GBU018 di Jakarta dan GBU035 di Makassar. Gravimeter yang digunakan adalah A-10, yang merupakan gravimeter absolut *portable* yang dapat beroperasi dengan daya 12V DC. Gravimeter A-10 terdiri dari laser, interferometer, perangkat isolasi inersia dan sebuah jam atom untuk mengukur posisi massa uji secara akurat (Nishijima et al., 2015).

Prinsip pengoperasian A-10 secara sederhana adalah menjatuhkan (*drop*) sebuah massa uji dalam ruang vakum dari ketinggian 7 cm. Dengan menggunakan laser, interferometer, perangkat isolasi inersia dan sebuah jam atom (rubidium), posisi massa uji dapat diketahui secara akurat. Laser yang digunakan oleh instrumen A-10 memiliki dua panjang gelombang yang bervariasi setiap saat. Kemudian, nilai gayabarat diestimasi secara akurat, dengan akurasi 10 μ gal, dengan cara meratakan nilai gayabarat absolut hasil pengukuran kedua pulsa laser tersebut (Kazama et al., 2013).

Berdasarkan pengamatan posisi tersebut, dapat diturunkan percepatan vertikal akibat pengaruh gayabarat (Micro-g LaCoste, 2008a) Akurasi gravimeter A-10 adalah 10 μ gal (absolut), sedangkan ketelitiannya adalah 10 μ gal pada lokasi yang tenang (Micro-g LaCoste, 2008a). Nilai akurasi dan ketelitian A-10 memang tidak sebaik gravimeter FG-5 (Micro-g LaCoste, 2008b), namun berdasarkan penelitian oleh Mäkinen et al (2010), RMS selisih pengukuran kedua gravimeter tersebut kurang dari 3 μ gal. Penelitian sejenis yang dilakukan di Tiongkok juga menunjukkan hasil yang serupa, yakni RMS selisih pengukuran kurang dari 4 μ gal (Wang et al., 2014).

Dalam pengoperasiannya, gravimeter A-10 dihubungkan dengan sebuah komputer pengolah data yang telah terinstal perangkat lunak g9. Perangkat lunak ini dapat mengolah data pengamatan gayabarat absolut baik secara *real-time* maupun *post-mission* (Micro-g LaCoste, 2012). Pada moda pengamatan *real-time*, terdapat beberapa parameter yang harus diketahui sebelum pengamatan dilakukan, antara lain posisi 3D titik, gradien gayabarat, polar motion X dan Y serta jumlah sampling. Nilai-nilai parameter yang ditentukan selengkapnya dapat dilihat pada

Tabel 1.

Tabel 1. Parameter *setup* pengamatan gayabarat absolut.

| Parameter (satuan) | Nilai |
|---|---------------------------------------|
| Posisi 3D titik (lintang ⁰ , bujur ⁰ , elevasi (m)) | -6,1236107; 106,6800773; 25,478 |
| Nominal Pressure (mbar) | 1010,19 |

| Parameter (satuan) | Nilai |
|-----------------------------|--------|
| Gradien gayaberat (µgal/cm) | -2,963 |
| Setup height (cm) | -0,5 |
| Polar X (arcsec) | 0,184 |
| Polar Y (arcsec) | 0,4431 |
| Transfer height (cm) | 0 |
| Sampling set | 10 |
| Drops/set | 120 |
| Set interval (menit) | 3 |
| Drop interval (detik) | 1 |
| Koreksi pasang surut | ETGTAB |
| Reject sigma | 2 |

Nilai gradien gayaberat diperoleh melalui pengamatan gradien vertikal. Metode pengamatannya adalah dengan mengukur nilai gayaberat relatif menggunakan gravimeter CG-6 (Scintrex Limited, 2016) di suatu titik pada tiga ketinggian yang berbeda menggunakan **Persamaan 2** (Ager et al., 1982).

$$GGV = (g_1 - g_2) / (z_1 - z_2) \dots\dots\dots(2)$$

Pada persamaan tersebut, GGV adalah gradien gayaberat vertikal, z_1 adalah ketinggian yang lebih rendah dan z_2 adalah ketinggian yang lebih tinggi. Sementara, g_1 adalah nilai gayaberat pengamatan di z_1 , dan g_2 adalah nilai gayaberat pengamatan di z_2 .

Pada GBU018, ketiga ketinggian tersebut adalah 118 cm, 84,5 cm dan 18 cm. Sedangkan pada GBU035 adalah 109,8 cm, 78 cm dan 15 cm. Nilai-nilai gradien di setiap ketinggian tersebut kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai gradien gayaberat vertikal di masing-masing titik, yakni -296,30 µgal/m untuk GBU018 dan -324,14 µgal/m untuk GBU035. Dokumentasi pengukuran gradien gayaberat di Makassar dapat dilihat dalam **Gambar 1**.

Perangkat lunak g9 digunakan untuk menghitung nilai gayaberat absolut pada setiap set pengukuran maupun pada akhir kegiatan. Selain nilai gayaberatnya, nilai ketidakpastian gayaberat juga turut dihitung dengan menggunakan **Persamaan 3** berikut.

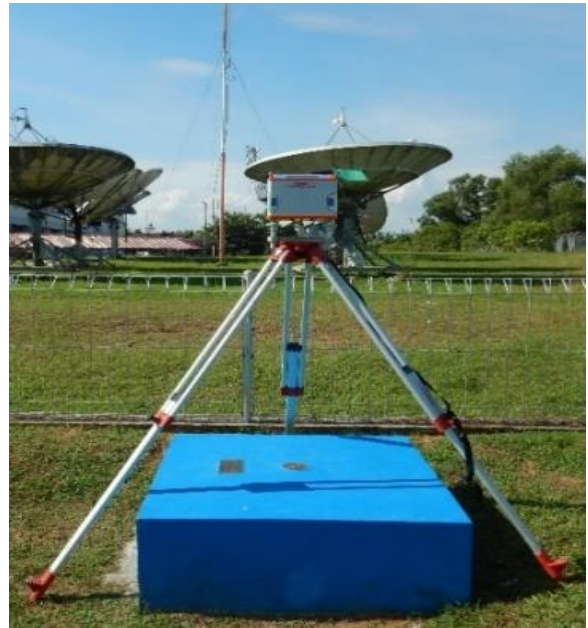
$$\delta_{tot} = \sqrt{\delta_{sis}^2 + \delta_{stat}^2} \dots\dots\dots(3)$$

di mana δ_{stat} adalah ketidakpastian statistik yang diperoleh dari standar deviasi set (σ_{set}) dibagi dengan akar kuadrat dari jumlah set (N_{set}) sebagaimana ditampilkan dalam **Persamaan 4**.

Sementara itu, δ_{sis} adalah total ketidakpastian sistematis, yang mencakup kesalahan pemodelan (barometrik, pergerakan kutub, pasut bumi padat, pembebanan samudera), kesalahan sistem instrumen (laser, jam atom, pabrik), kesalahan

akibat faktor kondisi lingkungan, kesalahan pada saat setting instrumen, dan kesalahan akibat gradien gayaberat vertikal (GGV).

$$\delta_{stat} = \sigma_{set} / \sqrt{N_{set}} \dots\dots\dots(4)$$



Gambar 1. Pengamatan gradien gayaberat di GBU035 Makassar.

Koreksi pasang surut (pasut) bumi padat yang diterapkan dalam pengukuran ini dihitung menggunakan perangkat lunak ETGTAB (Wenzel, 1996a) yang terintegrasi dengan perangkat lunak g9. ETGTAB merupakan perangkat lunak penghitung model pasut bumi padat (*tidal potential*, akselerasi dan *tilts*) menggunakan metode dekomposisi harmonik seperti tertulis dalam **Persamaan 5** berikut (Agnew, 2015) :

$$\frac{v}{g} = K_2 \left(\frac{6\pi}{5} \right) \left[\sin \epsilon \cos \epsilon \sin \Omega t + \frac{1}{2} \sin \epsilon (1 + \cos \epsilon) \sin(\Omega - 2\beta) t + \frac{1}{2} \sin \epsilon (1 - \cos \epsilon) \sin(\Omega + 2\beta) t \right] \dots\dots\dots(5)$$

Model ini terdiri dari penjumlahan berhingga dari gelombang pasut pada domain frekuensi (Van Camp, 2003) dengan akurasi maksimum mencapai 0,06 µgal pada domain temporal (Wenzel, 1996b). Dengan nilai akurasi tersebut, model ini dinilai memenuhi kebutuhan koreksi pengukuran gayaberat absolut (Van Camp, 2003). Koreksi lain yang perlu dilakukan adalah koreksi pembebanan samudera (*ocean loading*). *Ocean loading* adalah perubahan muka bumi secara periodik akibat redistribusi massa samudera yang terjadi di atas lantai samudera (Clarke et al., 2010). Koreksi *ocean loading* yang disediakan secara *default* oleh perangkat lunak g9 adalah Schwiderski (Schwiderski et al., 1978).



Gambar 2. a) Gravimeter absolut A-10 diletakkan di dalam tenda saat melakukan pengukuran, b) Sumber listrik AC digunakan saat pengukuran.

Koreksi-koreksi lain yang perlu dilakukan terhadap data pengamatan gayaberat absolut adalah tekanan barometrik, pergerakan kutub, referensi posisi massa uji, perubahan panjang gelombang laser, *self attraction*, difraksi dan *tilt instrument*. Masing-masing jenis koreksi tersebut telah disediakan nilai *default*-nya oleh perangkat lunak g9. Namun untuk keperluan kajian ilmiah lanjutan, dapat dilakukan modifikasi terhadap nilai-nilai *default* koreksi tersebut.

Pengamatan gayaberat menggunakan gravimeter A-10 dapat dilakukan baik di luar maupun di dalam ruangan. Jika dilakukan di luar ruangan, gravimeter sebaiknya dilindungi oleh tenda, untuk mengurangi *noise* akibat angin maupun hujan. Selain itu, gravimeter A-10 dapat menggunakan sumber listrik DC maupun AC. Pada pengamatan yang dilakukan di Jakarta dan Makassar, sumber listrik yang digunakan adalah AC. Dokumentasi pengamatan gayaberat absolut dapat dilihat dalam **Gambar 2**.

HASIL DAN PEMBAHASAN

GBU018

GBU018 terletak di kawasan Bandar Udara Internasional Soekarno-Hatta, Cengkareng dengan koordinat 6,1236107° LS dan 106,6800773° BT. Pengamatan di GBU ini dilakukan pada tanggal 12 Juli 2017, atau DOY 193. Jumlah set pengukuran yang diolah adalah 10, dengan standar deviasi set sebesar 9,96 µgal. Nilai gayaberat di titik ini adalah 978140735,7 ± 11,17 µgal. Nilai ketidakpastian total tersebut dihitung menggunakan **Persamaan 3** dan **Persamaan 4**.

Hasil yang diperoleh untuk GBU018 ini sesungguhnya memiliki ketidakpastian total di luar toleransi yang diharapkan dalam pengukuran GBU, yakni 10 µgal, namun mengingat kondisi sekitar titik yang banyak gangguan akibat pembangunan, nilai ini diterima untuk dijadikan masukkan bagi pengolahan *post-mission*. Total pengukuran yang diterima adalah 1051, atau 87% dari seluruh *drop* (jatuhan) yang dilakukan. Hasil pengukuran selengkapnya disertai nilai-nilai ketidakpastiannya tersaji dalam **Tabel 2**. Sementara itu, parameter koreksi *ocean loading* pad GBU018 ditampilkan dalam **Tabel 3**.

Tabel 2. Hasil Pengolahan GBU018 beserta ketidakpastiannya.

| Hasil Pengolahan | |
|-------------------------------------|----------------------|
| <i>Date</i> | 07/12/17 |
| <i>Time</i> | 18 |
| <i>DOY</i> | 193 |
| <i>Year</i> | 2017 |
| <i>Time Offset (D h m s)</i> | 0 0 0 0 |
| <i>Gravity (µgal)</i> | 978140735,7 |
| <i>Set Scatter (µgal)</i> | 9,96 |
| <i>Measurement Precision (µgal)</i> | 3,15 |
| <i>Total Uncertainty (µgal)</i> | 11,17 |
| <i>Red/Blue Separation (µgal)</i> | 4,09 |
| <i>Number of Sets Collected</i> | 10 |
| <i>Number of Sets Processed</i> | 10 |
| <i>Set #s Processed</i> | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 |
| <i>Number of Sets NOT Processed</i> | 0 |
| <i>Set #s NOT Processed</i> | - |
| <i>Number of Drops/Set</i> | 120 |

| Hasil Pengolahan | |
|----------------------|-------|
| Total Drops Accepted | 1051 |
| Total Drops Rejected | 149 |
| Ketidakpastian | |
| Sigma Reject | 2 |
| Earth Tide Factor | 0,001 |
| Average Earth Tide | 0,14 |
| Uncertainty (μgal) | |
| Ocean Load Factor | 0,1 |
| Average Ocean Load | 0,08 |
| Uncertainty (μgal) | |
| Barometric (μgal) | 1 |
| Polar Motion (μgal) | 0,05 |
| Laser (μgal) | 0,05 |
| Clock (μgal) | 0,5 |
| System Type (μgal) | 10 |
| Tidal Swell (μgal) | 0 |
| Water Table (μgal) | 0 |
| Unmodeled (μgal) | 0 |
| System Setup (μgal) | 3 |

| Konstanta | Amplitudo (μgal) | Fase (°) |
|-----------|------------------|----------|
| Q1 | 0,235 | -60,4 |
| Mf | 0,196 | 154,8 |
| Mm | 0,165 | 177,2 |
| Ssa | 0,253 | 88,2 |

Set pengukuran yang memberikan hasil terbaik adalah set ke-9. Pada set ini, jumlah *drop* yang ditolak hanya 12. Plot simpangan baku tiap *drop* pada set ke -9, beserta grafik *fit residual*-nya dapat dilihat dalam **Gambar 3**. Grafik *fit residual* menampilkan selisih antara waktu *fringe* sesungguhnya dan estimasi kuadrat terkecil nilai posisi pada waktu tersebut (Micro-g LaCoste, 2012). Perangkat lunak g9 mengestimasi posisi benda jatuh bebas (x_i, t_i) yang bergerak dalam bentuk kurva parabola (**Persamaan 6**) dengan menggunakan estimasi kuadrat terkecil.

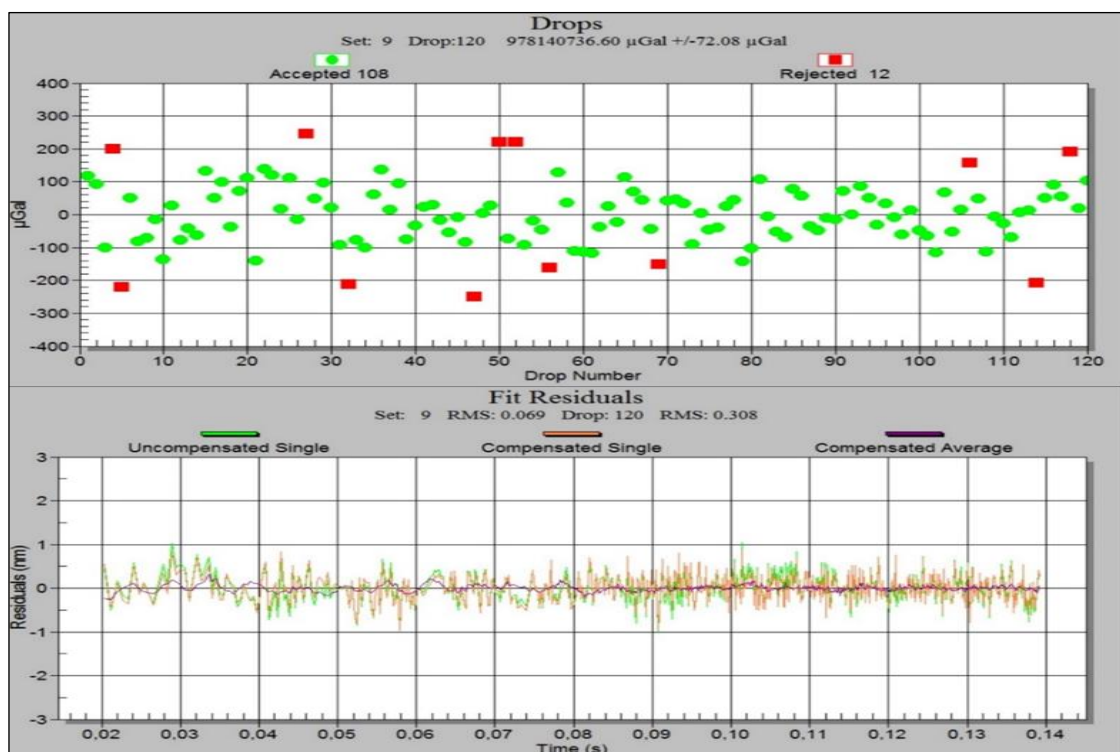
$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{g_0 \tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma x_0 \tilde{t}_i^2}{2} + \frac{1}{6} \gamma v_0 \tilde{t}_i^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 \tilde{t}_i^4$$

$$\tilde{t} = t_i - \frac{(x_i - x_0)}{c} \dots \dots \dots (6)$$

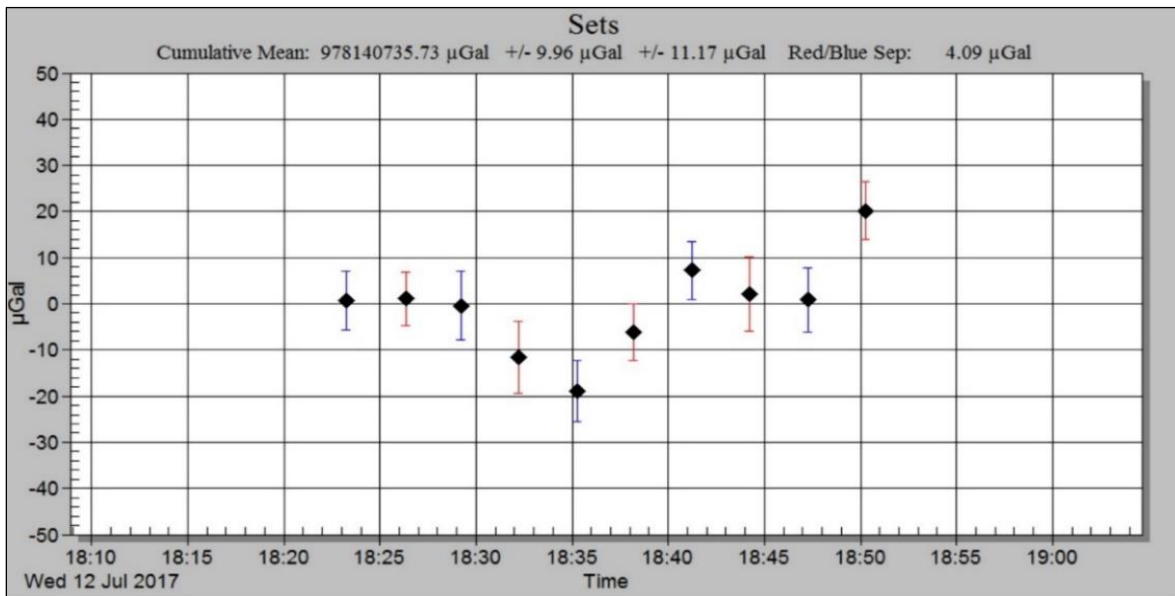
Tabel 3. Parameter koreksi *Ocean Loading* pada GBU 018.

| Konstanta | Amplitudo (μgal) | Fase (°) |
|-----------|------------------|----------|
| M2 | 2,21 | -39,3 |
| S2 | 0,665 | -110 |
| K1 | 1,664 | -79,7 |
| O1 | 1,321 | -68,8 |
| N2 | 0,436 | -18 |
| P1 | 0,544 | -82,6 |
| K2 | 0,157 | -124,1 |

Pada **Persamaan 6** tersebut, x_0 adalah posisi awal massa uji, v_0 adalah kecepatan massa uji pada $t = 0$, dan c adalah kecepatan cahaya di ruang hampa. Sementara itu, γ adalah konstanta dalam satuan s^{-2} dan g_0 adalah percepatan gayaberat. Nilai g menjadi parameter bebas yang akan dihitung setelah estimasi kuadrat terkecil dilakukan terhadap nilai x_i dan t_i (Micro-g LaCoste, 2012).



Gambar 3. Simpangan baku tiap drop pada set ke-9 (atas), dan *fit residual*-nya (bawah).



Gambar 4. Plot ketidakpastian setiap set pada GBU018.

Pada pengukuran di GBU018 ini *system response* diaktifkan, sehingga grafik *fit residual* menampilkan tiga vektor komponen *fit residual*, yaitu *uncompensated single*, *compensated single* dan *compensated average*. *System Response* merupakan sejenis *curve fitting* yang didesain untuk memfilter residu akibat kondisi lingkungan di sekitar lokasi pengukuran. *Compensated single* menggambarkan nilai gayaberat pada tiap drop setelah diberlakukan *filtering* terhadap vektor residu (menggunakan *system response*), sebaliknya, *uncompensated single* menggambarkan nilai gayaberat tiap drop jika *system response* tidak diberlakukan. Sementara itu, *compensated average* menggambarkan nilai gayaberat tiap drop pada nilai residu rata-rata.

Pada **Gambar 4** juga dapat dilihat plot berwarna merah dan biru. Plot berbeda warna tersebut menggambarkan hasil ukuran pada dua frekuensi laser yang berbeda. Pada perangkat lunak g9, pengaturan mode *dual frequency* terdapat pada kolom *Red/Blue Sequencing*. *Red/Blue Sequencing* memungkinkan pengguna dengan laser seri L untuk mengakuisi data menggunakan kedua frekuensi laser dalam interval waktu yang singkat dan tersebar merata sepanjang pengukuran (Micro-g LaCoste, 2012). Pada pengukuran GBU018 di Cengkareng selisih antara pengamatan frekuensi merah dan biru adalah 4,09 µgal.

GBU035

GBU035 terletak di kawasan Bandar Udara Internasional Sultan Hassanuddin, Makassar, dengan koordinat 5,07100° LS dan 119,55225° BT. Pengukuran dilakukan pada tanggal 22 Juli 2017 atau DOY 203. Pada GBU035 ini, seluruh set diolah dan menghasilkan nilai gayaberat 978117560,92 ± 7,16 µgal. Jumlah *drop* yang diterima adalah 1038, atau 86% dari seluruh *drop*. Nilai standar deviasi set

pengukuran adalah 1,15 µgal. Berdasarkan nilai-nilai ketidakpastian tersebut, pengukuran di GBU035 memiliki ketelitian yang lebih baik daripada di GBU018. Hasil pengolahan data ukuran GBU035 beserta ketidakpastiannya dapat dilihat dalam **Tabel 4**. Sementara itu, parameter koreksi *ocean loading* yang diberikan dapat dilihat dalam **Tabel 5**.

Tabel 4. Hasil pengolahan GBU035 beserta ketidakpastiannya.

| Hasil Pengolahan | |
|---------------------------------------|----------------------|
| <i>Date</i> | 07/22/17 |
| <i>Time</i> | 10 |
| <i>DOY</i> | 203 |
| <i>Year</i> | 2017 |
| <i>Time Offset (D h m s)</i> | 0 0 0 0 |
| <i>Gravity</i> | 978117560,92 |
| <i>Set Scatter</i> | 1,15 |
| <i>Measurement Precision</i> | 0,36 |
| <i>Total Uncertainty</i> | 7,16 |
| <i>Red/Blue Separation</i> | 27,22 |
| <i>Number of Sets Collected</i> | 10 |
| <i>Number of Sets Processed</i> | 10 |
| <i>Set #s Processed</i> | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 |
| <i>Number of Sets NOT Processed</i> | 0 |
| <i>Set #s NOT Processed</i> | - |
| <i>Number of Drops/Set</i> | 120 |
| <i>Total Drops Accepted</i> | 1038 |
| <i>Total Drops Rejected</i> | 162 |
| Ketidakpastian | |
| <i>Sigma Reject</i> | 2 |
| <i>Earth Tide Factor</i> | 0,001 |
| <i>Average Earth Tide Uncertainty</i> | 0,07 |

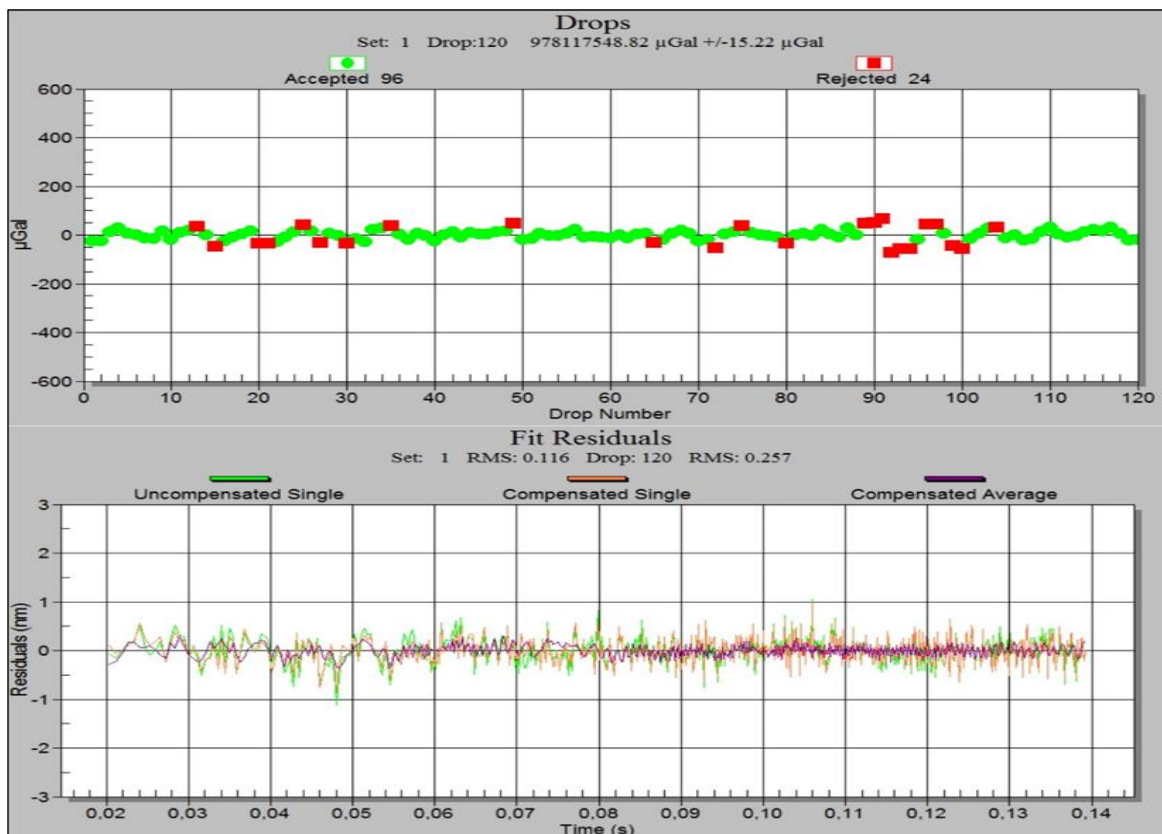
| Hasil Pengolahan | |
|---------------------------------------|------|
| <i>Ocean Load Factor</i> | 0,1 |
| <i>Average Ocean Load Uncertainty</i> | 0,62 |
| <i>Barometric</i> | 1 |
| <i>Polar Motion</i> | 0,05 |
| <i>Laser</i> | 0,05 |
| <i>Clock</i> | 0,5 |
| <i>System Type</i> | 6 |
| <i>Tidal Swell</i> | 0 |
| <i>Water Table</i> | 0 |
| <i>Unmodeled</i> | 0 |
| <i>System Setup</i> | 3 |

Pengukuran terbaik di GBU035 terjadi pada set ke-1. Pada set ini, jumlah *drop* yang ditolak adalah 24, dengan simpangan baku 15,22 μgal . Dalam **Gambar 5**, tampak terjadi penurunan kualitas pengukuran pada *drop* ke 88-94, yang ditandai oleh penolakan di rentang waktu tersebut. Hal ini disebabkan oleh gangguan sesaat akibat aktivitas di sekitar lokasi pengukuran. Secara umum, pengukuran gayaberat absolut di GBU035 menghasilkan nilai ketelitian yang lebih baik dibandingkan dengan GBU018. Hal ini menunjukkan

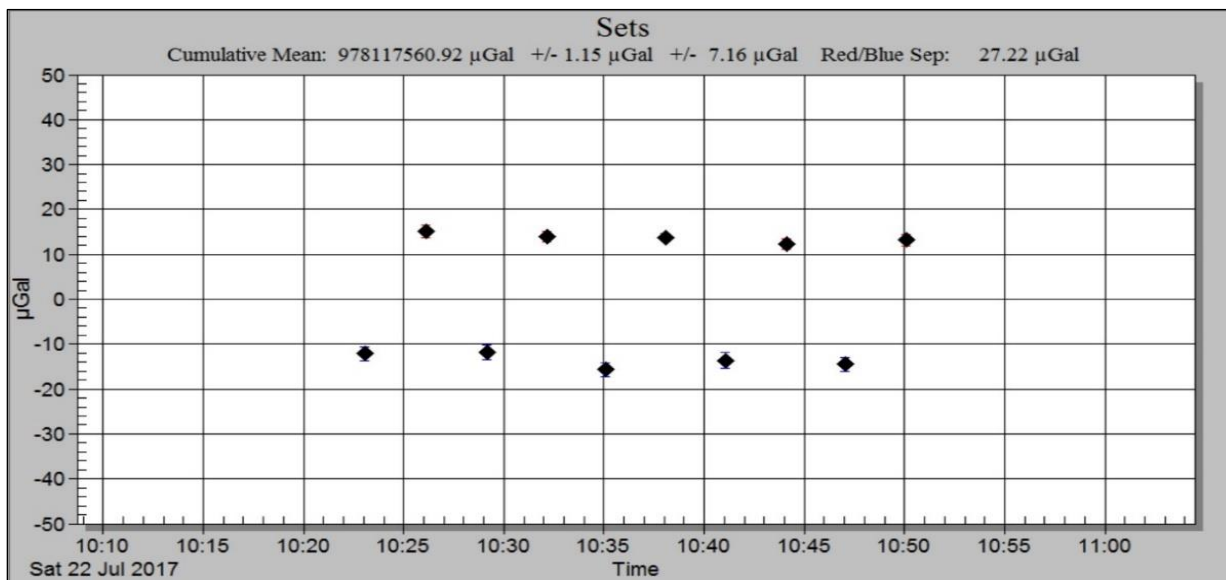
bahwa kondisi lingkungan di sekitar titik pengukuran sangat mempengaruhi kualitas nilai gayaberat yang diperoleh. Kondisi lapangan, terutama aktivitas penerbangan yang relatif lebih sibuk disertai adanya aktivitas konstruksi di sekitar GBU018 (Bandara Soekarno-Hatta), akan menurunkan tingkat ketelitian ukuran gayaberat absolut.

Tabel 5. Parameter koreksi *Ocean Loading* pada GBU 035.

| Konstanta | Amplitudo (μgal) | Fase ($^{\circ}$) |
|-----------|-------------------------------|---------------------|
| M2 | 1,207 | -121,6 |
| S2 | 0,375 | -182,9 |
| K1 | 2,924 | -109,6 |
| O1 | 2,096 | -87,9 |
| N2 | 0,212 | -114,2 |
| P1 | 0,992 | -112 |
| K2 | 0,098 | -227,2 |
| Q1 | 0,373 | -84,6 |
| Mf | 0,182 | 164,1 |
| Mm | 0,131 | -171,3 |
| Ssa | 0,181 | 101,6 |



Gambar 5. Simpangan baku tiap drop pada set ke-1 (atas) dan *fit residual*-nya (bawah).



Gambar 6. Plot ketidakpastian setiap set pada GBU035.

Seperti GBU018, pengukuran di GBU035 juga mengaktifkan filter *System Response*, di mana plot ketidakpastian tiap set dapat dilihat dalam **Gambar 6**. Selang waktu frekuensi *red/blue* pada GBU035 adalah 3 menit. Nilai interval ini menunjukkan selang waktu antara permulaan set merah (*red*) dengan permulaan set biru (*blue*) setelahnya. Selain interval *red/blue*, parameter yang dapat ditetapkan adalah *sequence interval*. *Sequence interval* yang diterapkan pada pengukuran ini adalah 6 menit, yang menunjukkan selang waktu antara permulaan dua set merah (Micro-g LaCoste, 2012). Pada GBU035 ini selisih nilai gayaberat absolut pada frekuensi *red* dan *blue* adalah 27,22 µgal.

KESIMPULAN

Nilai gayaberat hasil pengukuran menggunakan gravimeter A-10 di GBU018 adalah 978140735,73 ± 11,17 µgal, dan untuk GBU035 adalah 978117560,92 ± 7,16 µgal. Nilai-nilai tersebut diperoleh setelah dilakukan beberapa koreksi, termasuk koreksi gradien gayaberat menggunakan gravimeter CG-6 dengan besaran -296,30 µgal/m untuk GBU018 dan -324,14 µgal/m untuk GBU035. Nilai ketidakpastian di GBU018 menunjukkan adanya *noise* akibat aktivitas penerbangan dan kegiatan konstruksi bangunan di sekitar lokasi pengukuran. Aktivitas yang terjadi di lingkungan sekitar pengukuran memang tidak mempengaruhi gerakan massa uji, namun dapat berpengaruh terhadap kevertikalan laser (yang digunakan untuk mengukur waktu jatuhnya massa uji) yang secara tidak langsung mempengaruhi hasil akhir pengukuran. Untuk meningkatkan ketelitian hasil penelitian perlu dilakukan pengolahan *post mission*. Ketelitian (statistik) yang diharapkan adalah lebih rendah daripada kesalahan sistematis instrumen, yakni

sekitar 10 µgal. Perbaikan yang dapat dilakukan pada pengolahan *post mission* antara lain penggunaan model alternatif dalam koreksi pasut bumi padat dan *ocean loading*. Selain itu pemberian nilai-nilai koreksi yang lebih teliti untuk koreksi pergerakan kutub, tekanan barometrik, perubahan panjang gelombang laser, difraksi, dan *self attraction* dapat meningkatkan kualitas estimasi nilai gayaberat absolut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Jaring Kontrol Geodesi dan Geodinamika (PJKGG) dan Kepala Bidang Jaring Kontrol Gayaberat dan Pasang Surut (JKGPS) yang telah menyediakan data utama maupun pendukung dalam penulisan makalah ini. Selain itu, ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Kepala Bidang Penelitian yang telah memberikan masukan untuk menyempurnakan penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ager, C. A., & Liard, J. O. (1982). Vertical gravity gradient surveys: Field results and interpretations in British Columbia, Canada. *GEOPHYSICS*, 47(6), 919–925. <http://doi.org/10.1190/1.1441358>

Agnew, D. C. (2015). Earth Tides. In G. Schubert (Ed.), *Treatise on Geophysics* (2nd ed., pp. 151–178). San Diego: Elsevier. <http://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00058-0>

Ayhan, M. E., Al-Muslmani, B. S. A., Kanney, J., & Al-Kherayef, O. A. I. (2015). Absolute gravity measurements by using FG5 and A10 absolute gravimeters in the Kingdom of Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8), 6199–6209. <http://doi.org/10.1007/s12517-014-1593-6>

Clarke, P. J., & Penna, N. T. (2010). Ocean Tide Loading And Relative Gns In The British Isles. *Survey Review*, 42(317), 212–228. <http://doi.org/10.1179/003962610X12572516251844>

- Dykowski, P., Krynski, J., & Sekowski, M. (2014). Testing the Suitability of the A10-020 Absolute Gravimeter for the Establishment of New Gravity Control in Poland BT - Gravity, Geoid and Height Systems. In U. Marti (Ed.), (pp. 11–17). Cham: Springer International Publishing.
- Fukuda, Y., Higashi, T., Takemoto, S., Abe, M., Dwipa, S., Kusuma, D. S., ... Arduino, G. (2004). The first absolute gravity measurements in Indonesia. *Journal of Geodynamics*, 38(3–5 SPEC.ISS.), 489–501. <http://doi.org/10.1016/j.jog.2004.07.009>
- Fukuda, Y., Nishijima, J., Sofyan, Y., Taniguchi, M., Yusuf, M., & Abidin, H. Z. (2016). Application of A10 Absolute Gravimeter for Monitoring Land Subsidence in Jakarta, Indonesia. In *International Association of Geodesy Symposia* (Vol. 145, pp. 127–134). http://doi.org/10.1007/1345_2016_221
- Fukuda, Y., Nishijima, J., Sofyan, Y., Taniguchi, M., Yusuf, M., & Abidin, H. Z. (2017). Application of A10 absolute gravimeter for monitoring land subsidence in Jakarta, Indonesia. In *International Association of Geodesy Symposia* (Vol. 145, pp. 127–134). http://doi.org/10.1007/1345_2016_221
- Hwang, C., Cheng, T.-C., Cheng, C. C., & Hung, W. C. (2010). Land subsidence using absolute and relative gravimetry: a case study in central Taiwan. *Survey Review*, 42(315), 27–39. <http://doi.org/10.1179/003962609X451672>
- Kazama, T., Hayakawa, H., Higashi, T., Ohsono, S., Iwanami, S., Hanyu, T., ... Shibuya, K. (2013). Gravity measurements with a portable absolute gravimeter A10 in Syowa Station and Langhovde, East Antarctica. *Polar Science*, 7(3–4), 260–277. <http://doi.org/10.1016/j.polar.2013.07.001>
- Mäkinen, J., Sekowski, M., & Kryński, J. (2010). The Use of the A10-020 Gravimeter for the Modernization of the Finnish First Order Gravity Network. *Geoinformation Issues*, 2(12), 5–17.
- Micro-g LaCoste. (2008a). *A-10 Portable Gravimeter User's Manual*. Lafayette, Colorado.
- Micro-g LaCoste. (2008b). *FG5 Absolute Gravimeter User's Manual*. Lafayette, Colorado.
- Micro-g LaCoste. (2012). *g9 User's Manual, April 2012 version*. Lafayette, Colorado.
- Nishijima, J., Fukuda, Y., Sofyan, Y., Itakura, M., Wahyudi, E. J., & Matsuoka, T. (2015). Repeat micro-gravity measurements using A10 absolute gravimeter for CO2 injection monitoring in Gundih gas field, Central Java, Indonesia. In *Proceedings of the 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, Japan, 18-20 November 2015* (pp. 177–180). Society of Exploration Geophysicists and Society of Exploration Geophysicists of Japan. <http://doi.org/10.1190/segj122015-061>
- Schwiderski, E. W., Department, N. S. W. C. S. S., Laboratory, D., & Naval Ordnance Laboratory (White Oak, M. . (1978). *Global Ocean Tides*. Naval Surface Weapons Center, Strategic Systems Department. Retrieved from https://books.google.co.id/books?id=d_oHAQAAIAAJ
- Scintrex Limited. (2016). CG-6 Autograv Survey Gravity Meter. Concord, ON. Retrieved from [http://www.scintrexltd.com/dat/content/file/CG-6_Brochure_R15\(1\).pdf](http://www.scintrexltd.com/dat/content/file/CG-6_Brochure_R15(1).pdf)
- Setyawan, A., Fukuda, Y., Nishijima, J., & Kazama, T. (2015). Detecting Land Subsidence Using Gravity Method in Jakarta and Bandung Area , Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 23(Ictcred 2014), 17–26. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.01.004>
- Sneeuw, N. (2006). *Physical Geodesy*. University Stuttgart. Stuttgart. Retrieved from <https://www.gis.uni-stuttgart.de/lehre/campus-docs/LNErdm.pdf>
- Van Camp, M. (2003). Efficiency of tidal corrections on absolute gravity measurements at the Membach station. In *Proceedings of the Workshop: IMG-2002: Instrumentation and Metrology in Gravimetry, October 28–30, 2002, Müchsbach Castle, Münsbach, Grand-Duchy of Luxembourg, Cah. Cent. Eur. Géodyn. Séismol* (Vol. 22, pp. 99–103).
- Wang, L. S., Chen, C., Kaban, M. K., Du, J. S., Liang, Q., & Thomas, M. (2014). The use of the A10-022 absolute gravimeter to construct the relative gravimeter calibration baselines in China. *Metrologia*, 51(3), 203–211. <http://doi.org/10.1088/0026-1394/51/3/203>
- Wenzel, H.-G. (1996a). Accuracy assessment for tidal potential catalogues. *Marées Terrestres*, 124, 9394–9416.
- Wenzel, H.-G. (1996b). The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30. *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 124, 9425–9439.

Halaman ini sengaja kami kosongkan