

EVALUASI DAN KOMPARASI DARI MODEL ANOMALI GAYA BERAT di LAUTAN INDONESIA*Evaluation and Comparison of Gravity Anomaly Models in The Indonesia Seas*Zulfikar Adlan Nadzir^{1*}, Nina Rahmadhani¹¹Program Studi Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, IndonesiaEmail Korespondensi: zulfikar.nadzir@gt.itera.ac.id

Received: 22/05/2024 | Revised: 14/10/2024 | Accepted: 20/10/2024

DOI: <https://dx.doi.org/10.31314/jsig.v7i2.3073>

Abstract - Gravity is the total value of the various forces acting on any stationary body on the Earth's surface. This gravity is related to the Geoid, an important parameter in Geodesy. The Geoid is commonly used as a vertical reference for geospatial reference systems in many countries, including Indonesia. Another derived parameter of gravity is gravity anomaly, which is the difference between the gravity vector on the geoid and the normal gravity vector on the ellipsoid. The measurement of gravity at sea has several disadvantages compared to that on land, due to the high level of difficulty and risk of the measurement. Technological developments have facilitated the observation of gravity at sea both regionally and globally, one of which is using altimetry. The output of gravity observations using altimetry satellites is called combined Global Geopotential Model (GGM). Indonesia has had a regional geoid model since 1981, and the latest is INAGEOID2020 v2.0. The accuracy of INAGEOID2020 needs to be improved to realize the one-map policy and large-scale mapping based on the Master Plan for the Implementation of the National Vertical Geospatial Reference System. Therefore, this research aims to analyze the comparison of gravity anomalies of several MGGs in Indonesian seas by comparing them to Shipborne gravity anomalies. The Global Geopotential Models used are EGM2008, EIGEN6C4, XGM2019e, DTU17 and Sandwell Model v.31.1. The results of this study are XGM2019e is the best Combination Global Model in Indonesia and DTU17 is the best Global Altimetry Model in Indonesia, and both models have good performance in various sea conditions in Indonesia.

Keywords: Gravity anomaly; Global Geopotential Model; XGM2019e; DTU17; Altimetry

Abstrak – Gayaberat adalah resultan dari berbagai gaya yang bekerja pada setiap benda diam di permukaan Bumi. Gayaberat ini berkaitan dengan Geoid, sebuah parameter penting dalam ilmu Geodesi. Geoid jamak digunakan sebagai acuan vertikal sistem referensi geospasial di banyak negara, salah satunya Indonesia. Parameter turunan lain dari gayaberat adalah anomali gayaberat, yaitu perbedaan vektor gayaberat di geoid dan vektor gayaberat normal di ellipsoid. Pengukuran gayaberat di laut memiliki kekurangan dibandingkan dengan di darat, karena tingginya tingkat kesulitan dan risiko dari pengukuran. Perkembangan teknologi telah memudahkan pengamatan gayaberat di laut baik secara regional maupun global, salah satunya adalah menggunakan teknologi satelit altimetri. Produk luaran dari pengamatan gayaberat menggunakan satelit altimetri adalah Model Geopotensial Global (MGG) yang bersifat kombinasi. Indonesia sudah memiliki model geoid regional sejak tahun 1981, dan yang terbaru adalah INAGEOID2020 v2.0. Ketelitian INAGEOID2020 perlu ditingkatkan untuk mewujudkan kebijakan satu peta dan pemetaan skala besar berdasarkan Rencana Induk Penyelenggaraan Sistem Referensi Geospasial Vertikal Nasional. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan anomali gayaberat beberapa MGG di laut Indonesia dengan cara mengkomparasikannya terhadap anomali gayaberat Shipborne. Model Geopotensial Global yang digunakan yaitu EGM2008, EIGEN6C4, XGM2019e, DTU17 dan Model Sandwell v.31.1. Hasil dari penelitian ini yaitu XGM2019e merupakan Model Global Kombinasi terbaik di Indonesia dan DTU17 merupakan Model Global Altimetri terbaik di Indonesia, serta kedua model tersebut memiliki performa yang baik di berbagai kondisi laut di Indonesia.

Kata kunci: Anomali gayaberat; Model Geopotensial Global; XGM2019e; DTU17; Altimetri

PENDAHULUAN

Penentuan gayaberat adalah salah satu dari tiga pilar disiplin ilmu Geodesi yang terus-menerus dikembangkan agar mencapai tingkat ketelitian yang baik. Berdasarkan teori Newton, gayaberat adalah gaya total yang bekerja pada benda diam di permukaan Bumi (Gupta, 2021; Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006). Secara teknis dan praktis, pengukuran gayaberat dapat dilakukan dengan beberapa metode. Metode yang pertama adalah metode teristris, yaitu pengukuran gayaberat di lapangan menggunakan alat gravimetri (Yusuf, 2015). Metode kedua adalah pengukuran di laut yang bernama metode *shipborne* (Wessel & Chandler, 2007). Ketiga adalah pengukuran menggunakan satelit altimetri (Andersen dkk., 2010, 2021), pesawat terbang (*airborne*) (X. Li dkk., 2022; Tziavos dkk., 2005) dan terakhir adalah pengukuran dengan menggunakan satelit gayaberat (Förste dkk., 2014).

Parameter penting dalam ilmu Geodesi yang diturunkan dari nilai gayaberat ialah Geoid. Geoid merupakan sebuah bidang ekuipotensial, artinya semua nilai potensial pada bidang geoid bernilai normal, dengan asumsi bidang tersebut berimpit pada muka laut rata-rata tanpa terganggu dengan gaya dan tenaga apapun (Torge dkk., 2023; Torge & Müller, 2012). Geoid sering disebut sebagai representasi dari bentuk Bumi yang asli. Geoid sering digunakan sebagai acuan referensi vertikal di berbagai negara. Salah satunya adalah di Indonesia, yang mana mengacu pada Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2013 tentang Sistem Informasi Geospasial Nasional, mendefinisikan bahwa Geoid adalah sistem referensi geospasial vertikal yang digunakan di Indonesia. Selain itu, parameter turunan lain dari gayaberat adalah anomalinnya (Δg), dengan definisi sebagai perbedaan vektor gayaberat di geoid (g_P) dan vektor gayaberat normal di ellipsoid (γ_Q) (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006).

Pengukuran gayaberat Bumi di lautan memiliki kekurangan pada hal tingkat akurasi dan presisi. Hal ini terjadi karena tingginya kesulitan dan risiko pengukuran di laut serta sulitnya medan untuk dijangkau dibandingkan dengan pengukuran di daratan. Namun, di sisi lain, pada saat ini perkembangan teknologi semakin maju telah memudahkan pengamatan gayaberat di laut, baik secara regional maupun global dengan menggunakan teknologi satelit altimetri. Salah satu produk keluaran dari pengamatan gayaberat menggunakan satelit altimetri adalah Model Geopotensial Global (MGG) yang bersifat kombinasi.

MGG adalah kumpulan koefisien harmonik bola yang mewakili medan gayaberat bumi pada tiga komponen panjang gelombang; gelombang pendek yang mewakili nilai gayaberat dari pengukuran teristris dan model topografi, gelombang menengah dari pengukuran pesawat terbang, dan gelombang panjang dari satelit. Sumber data MGG berasal dari beberapa metode pengukuran; altimetri, satelit gayaberat, survey gayaberat (teristris, *shipborne* dan *airborne*) serta data ketinggian yaitu *Digital Elevation Model* (DEM) (Förste dkk., 2014; Pavlis dkk., 2012; Zingerle dkk., 2020). Pada saat ini tersedia banyak model MGG dan memiliki ketelitian beragam, tergantung pada metode dan sumber data penyusun masing-masing MGG. Beberapa contoh MGG yang jamak digunakan diantaranya EGM2008 dan EIGEN-6C4 dengan tingkat ketelitian sebesar 5 menit busur (*arc-minutes*), XGM2019e memiliki tingkat ketelitian 2 menit busur, DTU17 (Andersen & Knudsen, 2019) dan Sandwell versi 31.1 (Sandwell dkk., 2014) adalah contoh model MGG dari satelit altimetri dengan tingkat ketelitian 1 menit busur.

Indonesia sudah memiliki MGG regional sejak tahun 1981, yaitu Geoid Indonesia 1981, INDGED96, INAGEOID2020 dan yang terbaru INAGEOID2020 v2.0 pada tahun 2022. Komponen data INAGEOID2020 v2.0 adalah data gayaberat teristris maupun *airborne*, EGM2008 untuk wilayah daratan kosong, DTU17 untuk wilayah perairan, dan data topografi dari *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) dengan resolusi 30 meter (Bramanto dkk., 2022). INAGEOID2020 v2.0 memiliki rentang ketelitian pada 28,58 cm sampai 5,88 cm yang dibagi berdasarkan beberapa wilayah, yaitu Jawa, Bali, Sumatera, Sulawesi, Kalimantan Barat, dan Kalimantan Timur.

Berdasarkan Rencana Induk Penyelenggaraan Sistem Referensi Geospasial Vertikal Nasional Tahun 2020 sampai dengan 2024 mengenai peta jalan dari BIG untuk mewujudkan kebijakan satu peta dan pemetaan skala besar, ketelitian INAGEOID2020 perlu ditingkatkan hingga mencapai 5 cm untuk seluruh wilayah Indonesia. Dalam rangka meningkatkan ketelitian model geoid lokal di Indonesia, sebuah usaha membandingkan beberapa MGG dari berbagai metode pengukuran gayaberat untuk mendapatkan komponen model yang memiliki performa paling baik perlu dilakukan. Salah satu dari penelitian yang berfokus pada lautan menunjukkan

bahwa DTU17 dan Sandwell model memiliki ketelitian yang mirip di beberapa lokasi selain Indonesia (Zhang dkk., 2021). Selain itu, penelitian-penelitian yang berlokasi di Indonesia berfokus pada daratan dan pulau tertentu, seperti Kalimantan-Sulawesi (Hartanto dkk., 2018), Yogyakarta (Lestari dkk., 2023), Bali (Udama dkk., 2023), dan Sumatera (Pahlevi dkk., 2019). Penelitian ini dilakukan untuk mencari model terbaik antara EGM2008, EIGEN-6C4, XGM2019e, DTU17 dan Sandwell v.31.1 dengan cara membandingkannya terhadap anomali gayaberat *Shipborne*, yang digunakan karena pengukuran *Shipborne*, yang dilakukan secara langsung di atas permukaan laut, dianggap paling mendekati dengan bentuk bumi asli. Penelitian ini menerapkan metode interpolasi *Inverse Distance Weight* (IDW) untuk membuat koordinat dan resolusi dari MGG yang digunakan setara dan sama dengan koordinat dan resolusi dari pengamatan *Shipborne*. Dari kelima anomali gayaberat tersebut yang memiliki *Root Mean Square Error* (RMSE) paling kecil dianggap model geopotensial yang paling baik. Penelitian ini berkontribusi untuk menentukan MGG yang lebih tepat digunakan dalam perhitungan geoid lokal Indonesia, serta mendukung usaha BIG dalam pemenuhan Rencana Induk Referensi Vertikal Nasional 2020-2024.

METODE DAN DATA

Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi pada perairan di seluruh Indonesia dengan koordinat 8° LU - 13° LS dan 92,5° BT - 142° BT, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Secara khusus, tujuh zona laut di Indonesia digunakan dengan visualisasi pada Gambar 2 dan karakteristiknya tertulis di Tabel 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (Sumber: Hasil Analisis)



Gambar 2. Lokasi Penelitian yang dibagi menjadi tujuh zona (Sumber: Hasil Analisis)

Tabel 1. Karakteristik dari tujuh zona laut (Sumber: Hasil Analisis)

Lokasi	Jenis Batimetri	Kemiringan Dasar Laut	Tinggi Gelombang Signifikan
Selat Malaka	Air Dangkal	Landai	Rendah
Laut Jawa	Air Dangkal	Landai	Rendah
Samudera Hindia 1	Air Dalam	Curam	Sedang
Samudera Hindia 2	Air Dalam	Curam	Tinggi
Selat Makassar	Air Dalam	Curam	Rendah
Laut Sulawesi	Air Dalam	Curam	Sedang
Laut Maluku	Air Dalam	Curam	Sedang

Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data anomali gayaberat *Shipborne* yang dapat diakses pada <https://www.ncei.noaa.gov/maps/trackline-geophysics/>, anomali gayaberat Model Global Kombinasi EGM2008, EIGEN-6C4 dan XGM2019e dengan derajat/orde 2159 dari situs ICGEM (<https://icgem.gfz-potsdam.de>), dan resolusi 5 *arc-minute*, anomali gayaberat Model Global Altimetri DTU17 (<ftp.space.dtu.dk/pub/DTU17/>) dan Sandwell v31.1 dengan resolusi 1 *arc-minute*, dapat diakses pada ftp://topex.ucsd.edu/pub/global_grav_1min/geotiff/.

Tahapan Penelitian

Pendekatan yang dilakukan oleh penelitian ini adalah metode kuantitatif, memanfaatkan data *shipborne* sebagai validator dari beberapa model geopotensial global yang digunakan. Tahapan pertama yang dilakukan adalah proses interpolasi untuk data model geopotensial global dengan tujuan untuk mendapatkan koordinat yang sedekat mungkin dengan koordinat pengamatan *shipborne*. Metode yang digunakan untuk interpolasi ini adalah *inverse distance weighting* (IDW) pada Rumus 1 di bawah ini (Chen dkk., 2023).

$$w_k(x) = \left(\frac{\max(0, R - d(x, x_k))}{R_d(x, x_k)} \right)^2 \quad (1)$$

Selanjutnya, dilakukan proses penyamaan resolusi atau disebut *rescaling* dari data yang digunakan untuk memastikan bahwa setiap data memiliki konteks yang sama. Proses ini menggunakan interpolasi dengan metode *nearest neighbor* yang tertulis pada Rumus 2 (Nadzir dkk., 2020).

$$x = z_i \text{ di mana } |x_i - x| \approx \text{minimum} \quad (2)$$

Hasil dari proses *rescaling* lalu di-interpolasi menggunakan metode Bilinear untuk mendapatkan nilai pada koordinat pengamatan *Shipborne* yang tertulis di Rumus 3.

$$f(x, y) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f(Q_{21}) \quad (3)$$

Setelah itu, dilakukan proses eksklusi menggunakan beberapa nilai batas (*threshold*) yaitu 20 mgal, 1 sigma dan 2 sigma (Q. Li dkk., 2021). Tujuan dari penggunaan tiga nilai batas tersebut adalah untuk menghilangkan kesalahan sistematis dan untuk mencari parameter batas yang pas untuk diaplikasikan pada data secara dinamis. Metode eksklusi data *outlier* 20 mgal, 1 Sigma dan 2 Sigma dilakukan melalui perbandingan dengan EGM2008. Selisih nilai anomali gayaberat *Shipborne* dengan EGM2008 yang berada di atas 20 mgal dan di bawah -20 mgal dianggap *outlier*, sedangkan metode penghapusan *outlier* 1 Sigma dihitung dengan Rumus 4 dan 2 Sigma dihitung dengan Rumus 5.

$$\mu - 1\sigma \leq x \leq \mu + 1\sigma \quad (4)$$

$$\mu - 2\sigma \leq x \leq \mu + 2\sigma \quad (5)$$

Proses lanjutan dari penelitian ini adalah melakukan komparasi data. Komparasi data bertujuan untuk melihat tingkat kebaikan data anomali gayaberat dari beberapa MGG yang digunakan terhadap data anomali gayaberat *Shipborne*. Komparasi data dilakukan dengan cara menghitung selisih antara satu Model Geopotensial Global dengan data yang dianggap benar yaitu anomali gayaberat *Shipborne*. Komparasi data selanjutnya menggunakan metode perhitungan *Root Mean Square Error* (RMSE) pada Rumus 6.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\Delta g_{obs} - \Delta g_{pred})^2}{n}} \quad (6)$$

Nilai rata-rata, minimum dan maksimum juga diperhitungkan dari hasil selisih yang didapatkan. Hasil dengan nilai rata-rata negatif menunjukkan bahwa Model Global Geopotensial mengalami *under-estimation* karena nilai anomali gayaberat Model Global Geopotensial lebih besar dari anomali gayaberat *Shipborne*, begitu pun sebaliknya. Nilai rata-rata positif menunjukkan bahwa Model Global Geopotensial mengalami *over-estimation* karena nilai anomali gayaberat Model Global Geopotensial lebih kecil dari anomali gayaberat *Shipborne*. Penjelasan mengenai *under-estimation* dan *over-estimation* dituliskan pada Rumus 7 dan Rumus 8 di bawah ini.

$$x_i - y_i < 0 \cong \text{under} - \text{estimation} \quad (7)$$

$$x_i - y_i > 0 \cong \text{over} - \text{estimation} \quad (8)$$

Dalam proses analisis data, terdapat tiga proses; hasil eksklusi, hasil komparasi data model geopotensial global di Indonesia secara umum dan hasil komparasi di tujuh zona laut secara khusus untuk model geopotensial global yang digunakan. Analisis anomali gayaberat *Shipborne* setelah di filter outlier 20 mgal, 1 Sigma dan 2 Sigma dengan membandingkan banyaknya data yang dianggap outlier, kecenderungan lokasi dan titik-titik atau jalur-jalur pengamatan yang dianggap outlier. Analisis hasil komparasi data Model Geopotensial Global terhadap anomali gayaberat *Shipborne* di laut Indonesia dilakukan dengan membandingkan RMSE antara satu model dengan model lain yang sudah dikomparasikan dengan anomali gayaberat *Shipborne*. Nilai RMSE yang paling kecil dianggap Model Geopotensial yang paling baik diantara keseluruhan data yang digunakan di penelitian ini.

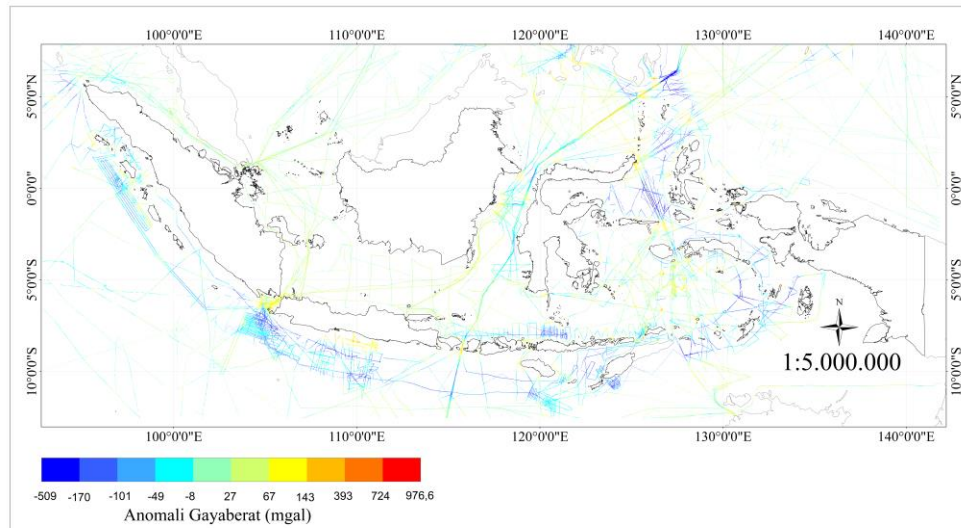
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pre-processing Anomali Gayaberat *Shipborne*

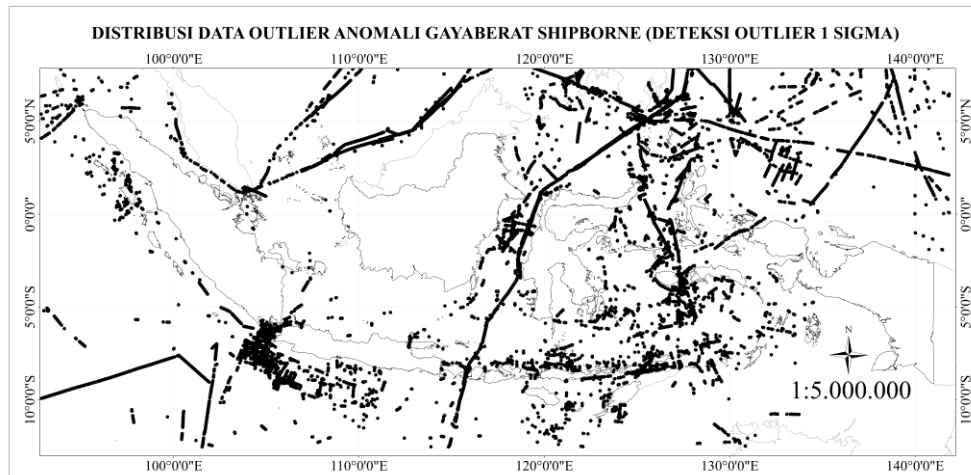
Data *Shipborne* yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari National Center for Environmental Information (NCEI) dengan total 667.614 titik pengamatan yang terbagi menjadi 40 pengamatan, namun dari data hasil pengunduhan tersebut masih terdapat nilai NaN yang berarti tanpa data (*no Data*), sehingga perlu dilakukan seleksi untuk nilai anomali gayaberat tersebut. Jumlah data anomali gayaberat *Shipborne* setelah diseleksi sebanyak 507.924 titik pengamatan atau sebesar 91% dari total titik pengamatan. Nilai anomali gayaberat *Shipborne* ini berada di rentang -509 mgal sampai 979,6 mgal yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Eksklusi outlier 20 mgal, 1-sigma dan 2-sigma

Distribusi data yang dianggap outlier untuk outlier 1-sigma ditampilkan pada Gambar 4. Selain itu, Tabel 2 menunjukkan besar presentase data yang terseleksi. Dapat dilihat bahwasanya outlier 20 mgal dan 1σ lebih ketat dalam penghapusan kesalahan sistematis dibandingkan dengan outlier 2σ karena lebih banyak jalur pengamatan yang dihapus secara penuh, seperti di daerah samudera Pasifik, Selat Makassar, Laut Sulawesi, Selat Malaka dan di Laut China Selatan. Namun, apabila dibandingkan lebih jauh, eksklusi outlier 1σ memiliki performa lebih baik daripada eksklusi outlier 20 mgal dalam menyeleksi kesalahan sistematis karena menggunakan parameter yang dapat berubah secara dinamis, atau dalam kata lain, menyesuaikan sebaran dari data yang digunakan.



Gambar 3. Data *Shipborne* setelah *pre-processing* (Sumber: Hasil Analisis)



Gambar 4. Data *Shipborne* setelah eksklusi *outlier* 1-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

Tabel 2. Perbandingan hasil eksklusi *outlier* 20 mgal, 2-sigma dan 1-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

<i>Outlier</i>	Batas Atas (mgal)	Batas Bawah (mgal)	n <i>Outlier</i>	Persen n <i>Outlier</i>
20 mgal	20	-20	32.672	6,43%
2 σ	36,54	-36,02	8.872	1,75%
1 σ	18,21	-17,55	47.533	9,36%

Komparasi Anomali Gayaberat Model Global dengan *Shipborne*

Hasil dari komparasi antara model global kombinasi dengan anomali gayaberat *Shipborne* setelah proses eksklusi *outlier* tergambar di bawah yang terbagi menjadi tiga metode eksklusi *outlier*. Komparasi dari hasil pertama (*outlier* 20 mgal) pada Tabel 3 menunjukkan bahwa model XGM2019e menunjukkan nilai RMSE terkecil di antara 3 model geopotensial global yang digunakan dengan nilai 8,14 mgal. Secara spasial, nilai selisih anomali gayaberat yang besar terdapat di area pesisir, Selat Sunda, Selat Makassar, Selat Malaka, Laut Cina Selatan dan perairan timur Indonesia. Sedangkan nilai selisih yang kecil banyak terdapat di area Samudera Pasifik, Laut Cina Selatan, Laut Sulawesi dan Samudera Hindia. Hasil yang hampir identik tergambar dari metode eksklusi *outlier* kedua dan ketiga (2-sigma dan 1-sigma). Pada metode 2-sigma yang tergambar pada Tabel 4, XGM2019e masih menjadi model dengan RMSE terkecil (9,75 mgal), begitu pula pada metode 1-sigma di Tabel 5 dengan nilai RMSE 7,73 mgal. Selain itu, dapat dilihat dari ketiga tabel di atas bahwa performa EGM2008 tidak terlalu berbeda dengan XGM2019e. Melihat hasil pada Gambar 5, Selat Sunda, Selat Makassar dan laut bagian

timur Indonesia memiliki selisih yang cukup besar untuk semua model geopotensial global, menunjukkan kebutuhan akan analisis dengan lebih rinci pada masing-masing zona laut. Ketiga metode eksklusi *outlier* menunjukkan bahwa ketiga MGG mengalami *over-estimation*.

Tabel 3. Perbandingan dari MGG dan *shipborne* dari eksklusi *outlier* 20 mgal (Sumber: Hasil Analisis)

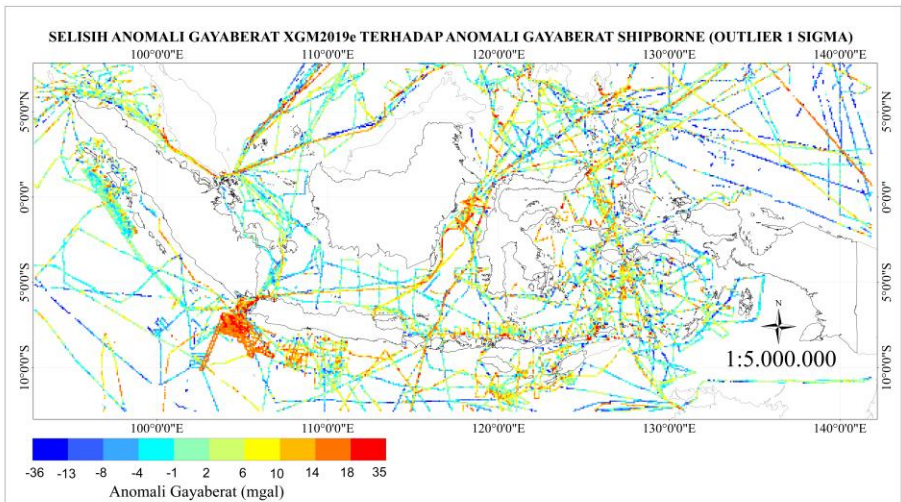
Model Global	MEAN (mgal)	RMSE (mgal)	MIN (mgal)	MAX (mgal)
EGM2008	-0,19	8,21	-20,00	20,00
EIGEN-6C4	-0,28	10,60	-76,91	71,59
XGM2019e	-0,18	8,14	-38,19	35,96

Tabel 4. Perbandingan dari MGG dan *shipborne* dari eksklusi *outlier* 2-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

Model Global	MEAN (mgal)	RMSE	MIN (mgal)	MAX (mgal)
EGM2008	-0,25	9,98	-36,02	36,54
EIGEN-6C4	-0,36	12,08	-89,00	86,39
XGM2019e	-0,20	9,75	-47,85	50,65

Tabel 5. Perbandingan dari MGG dan *shipborne* dari eksklusi *outlier* 1-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

Model Global	MEAN (mgal)	RMSE	MIN (mgal)	MAX (mgal)
EGM2008	-0,20	7,76	-17,89	18,41
EIGEN-6C4	-0,28	10,20	-75,36	71,59
XGM2019e	-0,20	7,73	-36,82	35,96



Gambar 5. Selisih antara data *Shipborne* dan MGG eksklusi *outlier* 1-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

Komparasi Anomali Gayaberat Model Altimetri dengan *Shipborne*

Perbandingan antara model geopotensial altimetri dengan data *Shipborne* dengan tiga metode eksklusi *outlier* menunjukkan bahwa model DTU17 unggul dibandingkan dengan model Sandwell v31.1 melalui nilai RMSE yang lebih kecil (7,31 mgal, 8,53 mgal, dan 6,89 mgal). Tetapi, performa Sandwell v31.1 sendiri tidak terlalu berbeda seperti yang tergambar pada Tabel 6, Tabel 7 dan Tabel 8. Pada Gambar 6, seperti yang terlihat dari hasil perbandingan GGM, Laut Jawa, Selat Makassar dan laut timur Indonesia menunjukkan hasil selisih yang lebih besar dibandingkan dengan data lainnya. Hal ini selain mengonfirmasi kebutuhan akan analisis detail setiap zona laut, juga menunjukkan bahwa perhatian lebih lanjut perlu diberikan kepada data *Shipborne*. Selain itu, kedua model altimetri menunjukkan sifat *under-estimation*, yang berbeda dengan tiga MGG pada bagian hasil dan analisis sebelumnya.

Tabel 6. Perbandingan dari Model Altimetri dan *shipborne* dari eksklusi *outlier* 20 mgal (Sumber: Hasil Analisis)

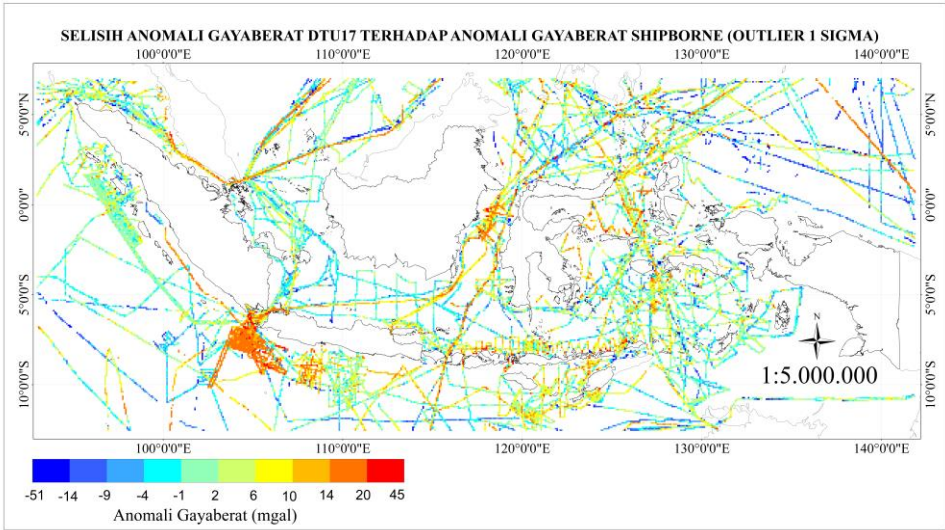
Model Global	MEAN (mgal)	RMSE (mgal)	MIN (mgal)	MAX (mgal)
DTU17	0,29	7,31	-53,77	45,53
Sandwell v31.1	0,80	7,61	-70,14	66,72

Tabel 7. Perbandingan dari Model Altimetri dan *shipborne* dari eksklusi *outlier* 2-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

Model Global	MEAN (mgal)	RMSE (mgal)	MIN (mgal)	MAX (mgal)
DTU17	0,23	8,53	-64,38	62,36
Sandwell v31.1	0,80	8,61	-70,14	66,72

Tabel 8. Perbandingan dari Model Altimetri dan *shipborne* dari eksklusi *outlier* 1-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

Model Global	MEAN (mgal)	RMSE (mgal)	MIN (mgal)	MAX (mgal)
DTU17	0,26	6,89	-51,30	45,53
Sandwell v31.1	0,75	7,24	-63,11	66,72



Gambar 6. Selisih antara data *Shipborne* dan Model Altimetri eksklusi *outlier* 1-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

Analisis Detail untuk Tujuh Zona Laut

Berdasarkan ketiga bagian hasil sebelumnya, metode eksklusi *outlier* 1-sigma merupakan hasil dengan RMSE terkecil, baik untuk MGG ataupun model gayaberat altimetri. Oleh karena itu, pada bagian ini akan berfokus pada metode tersebut yang terdaftar pada Tabel 9 dan Gambar 7. Dapat terlihat dari Tabel 9 bahwa XGM2019e masih menjadi MGG yang paling baik diantara tiga MGG di enam zona: Selat Malaka, Samudera Hindia 1 dan 2, Selat Makassar, Laut Sulawesi dan Laut Maluku. Sedangkan di Laut Jawa, Model Global Kombinasi terbaiknya adalah EGM2008. Hasil menarik tergambar untuk model altimetri, di mana empat dari tujuh lokasi menunjukkan bahwa DTU17 lebih baik daripada model Sandwell v31.1. Jika dilihat lebih jauh dan mengaitkannya dengan kondisi oseanografi dari ketujuh zona laut di Tabel 10, hasil yang sedikit berbeda dengan penelitian sebelumnya (Zhang dkk., 2021) terlihat pada model Altimetri. Pada penelitian sebelumnya, DTU17 lebih baik untuk laut dangkal dan Sandwell model baik untuk laut dalam. Tetapi, dalam penelitian ini terlihat bahwa kedua model memiliki performa yang hampir sama untuk laut dalam dan dangkal serta kondisi kemiringan dasar laut yang crum dan landai seperti di Selat Malaka + Laut Jawa dan Selat Makassar + Laut Sulawesi. Jika ditinjau dari tinggi gelombang signifikan, DTU17 memiliki performa yang lebih baik di laut-laut yang lebih bergelombang.

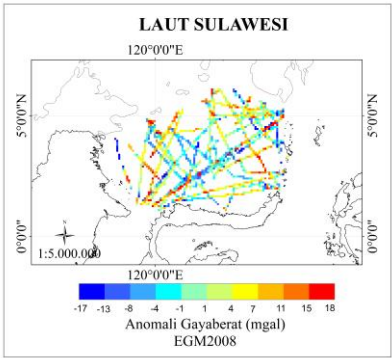
Tabel 9. Perbandingan dari tujuh zona laut dari eksklusi *outlier* 1-sigma (Sumber: Hasil Analisis)

Lokasi	Model Global Kombinasi			Model Global Altimetri	
	EGM2008	EIGEN-6C4	XGM2019e	DTU17	Sandwell v31.1
RMSE (mgal)					
Selat Malaka	6,07	6,52	5,84	5,93	6,04
Laut Jawa	7,88	8,16	8,24	7,71	7,65

Lokasi	Model Global Kombinasi			Model Global Altimetri	
	EGM2008	EIGEN-6C4	XGM2019e	DTU17	Sandwell v31.1
	RMSE (mgal)				
Samudera Hindia 1	5,72	7,67	5,56	4,03	3,84
Samudera Hindia 2	8,24	10,16	8,12	7,44	7,82
Selat Makassar	9,67	13,75	9,54	9,34	8,9
Laut Sulawesi	7,88	9,76	7,78	7,45	7,7
Laut Maluku	7,72	10,17	7,48	7,23	10,79

Tabel 10. Perbandingan dari tujuh zona laut dari eksklusi outlier 1-sigma berdasarkan kondisi laut (Sumber: Hasil Analisis)

Lokasi	Model Global Kombinasi	Model Global Altimetri	Jenis Batimetri	Kemiringan Dasar Laut	Tinggi Gelombang Signifikan
Indonesia	XGM2019e	DTU17	Kombinasi	Kombinasi	Kombinasi
Selat Malaka	XGM2019e	DTU17	Air Dangkal	Landai	Rendah
Laut Jawa	EGM2008	Sandwell v.31.1	Air Dangkal	Landai	Rendah
Samudera Hindia 1	XGM2019e	Sandwell v.31.1	Air Dalam	Curam	Sedang
Samudera Hindia 2	XGM2019e	DTU17	Air Dalam	Curam	Tinggi
Selat Makassar	XGM2019e	Sandwell v.31.1	Air Dalam	Curam	Rendah
Laut Sulawesi	XGM2019e	DTU17	Air Dalam	Curam	Sedang
Laut Maluku	XGM2019e	DTU17	Air Dalam	Curam	Sedang



Gambar 7. Selisih antara data Shipborne dan Model Altimetri eksklusi outlier 1-sigma di Laut Sulawesi (Sumber: Hasil Analisis)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari ketiga outlier yang diaplikasikan pada anomali gayaberat Shipborne, filter outlier 1-sigma menunjukkan hasil yang paling baik dalam menghilangkan kesalahan sistematis. Hasil komparasi anomali gayaberat Model Global Kombinasi terhadap anomali gayaberat Shipborne menunjukkan bahwa XGM2019e memiliki nilai RMSE yang paling kecil untuk laut Indonesia dan XGM2019e pula memiliki performa yang lebih baik secara keseluruhan diberbagai jenis kondisi laut. Untuk hasil komparasi anomali gayaberat Model Global Altimetri terhadap anomali gayaberat Shipborne, DTU17 memiliki nilai RMSE yang paling kecil untuk laut Indonesia serta DTU17 memiliki performa yang lebih baik secara keseluruhan di berbagai jenis kondisi laut. Hasil di atas dapat menjadi perhatian untuk proses pembaruan model gayaberat regional Indonesia di masa depan (INAGEOID2020 v3.0).

DAFTAR PUSTAKA

- Andersen, O. B., & Knudsen, P. (2019). The DTU17 Global Marine Gravity Field: First Validation Results. Dalam S. P. Mertikas & R. Pail (Ed.), *Fiducial Reference Measurements for Altimetry* (Vol. 150, hlm. 83–87). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/1345_2019_65
- Andersen, O. B., Knudsen, P., & Berry, P. A. M. (2010). The DNSC08GRA global marine gravity field from double retracked satellite altimetry. *Journal of Geodesy*, 84(3), 191–199. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0355-9>
- Andersen, O. B., Zhang, S., Sandwell, D. T., Dibarboure, G., Smith, W. H. F., & Abulaitijiang, A. (2021). The Unique Role of the Jason Geodetic Missions for high Resolution Gravity Field and Mean Sea Surface Modelling. *Remote Sensing*, 13(4), 646. <https://doi.org/10.3390/rs13040646>
- Bramanto, B., Prijatna, K., Fathulhuda, M. S., & Pahlevi, A. M. (2022). Gravimetric Geoid Modeling by Stokes and Second Helmert's Condensation Method in Yogyakarta, Indonesia. Dalam J. T. Freymueller & L. Sánchez (Ed.), *Geodesy for a Sustainable Earth* (Vol. 154, hlm. 147–153). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/1345_2022_149
- Chen, J., Fenoglio, L., Kusche, J., Liao, J., Uyanik, H., Nadzir, Z. A., & Lou, Y. (2023). Evaluation of Sentinel-3A altimetry over Songhua river Basin. *Journal of Hydrology*, 618, 129197. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129197>
- Förste, C., Bruinsma, Sean. L., Abrikosov, O., Lemoine, J.-M., Marty, J. C., Flechtner, F., Balmino, G., Barthelmes, F., & Biancale, R. (2014). *EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse*. <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2015.1>
- Gupta, H. K. (Ed.). (2021). *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58631-7>
- Hartanto, P., Huda, S., Putra, W., Variandy, E. D., Triarahmadhana, B., Pangastuti, D., Pahlevi, A. M., & Hwang, C. (2018). Estimation of marine gravity anomaly model from satellite altimetry data (Case Study: Kalimantan and Sulawesi Waters-Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 162, 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/162/1/012038>
- Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy*. Springer Vienna. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-33545-1>
- Lestari, R., Bramanto, B., Prijatna, K., Pahlevi, A. M., Putra, W., Muntaha, R. I. S., & Ladivanov, F. (2023). Local geoid modeling in the central part of Java, Indonesia, using terrestrial-based gravity observations. *Geodesy and Geodynamics*, 14(3), 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.11.007>
- Li, Q., Bao, L., & Wang, Y. (2021). Accuracy Evaluation of Altimeter-Derived Gravity Field Models in Offshore and Coastal Regions of China. *Frontiers in Earth Science*, 9, 722019. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.722019>
- Li, X., Huang, J., Klees, R., Forsberg, R., Willberg, M., Slobbe, D. C., Hwang, C., & Pail, R. (2022). Characterization and stabilization of the downward continuation problem for airborne gravity data. *Journal of Geodesy*, 96(4), 18. <https://doi.org/10.1007/s00190-022-01607-y>
- Nadzir, Z. A., Simarmata, N., & Aliffia, A. (2020). PENGEMBANGAN ALGORITMA IDENTIFIKASI SAWAH PADI BERDASARKAN SPEKTRA FASE PADI (STUDI KASUS: LAMPUNG SELATAN) (Paddy Field Identification Algorithm Development Using Spectral Value of Paddy Field (Case Study: South Lampung)). *JURNAL SAINS INFORMASI GEOGRAFIS*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.31314/jsig.v3i1.537>
- Pahlevi, A. M., Bramanto, B., Triarahmadhana, B., Huda, S., Pangastuti, D., Nur, A., Wijaya, D. D., Prijatna, K., Julianto, M., & Wijanarto, A. B. (2019). Airborne gravity survey, towards a precise Indonesian geoid model (case study: Sumatera Island). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 389(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/389/1/012050>
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical*

- Research: *Solid Earth*, 117(B4), 2011JB008916. <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>
- Sandwell, D. T., Müller, R. D., Smith, W. H. F., Garcia, E., & Francis, R. (2014). New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure. *Science*, 346(6205), 65–67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>
- Torge, W., & Müller, J. (2012). *Geodesy*. DE GRUYTER. <https://doi.org/10.1515/9783110250008>
- Torge, W., Müller, J., & Pail, R. (2023). *Geodesy*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110723304>
- Tziavos, I. N., Andritsanos, V. D., Forsberg, R., & Olesen, A. V. (2005). Numerical investigation of downward continuation methods for airborne gravity data. Dalam C. Jekeli, L. Bastos, & J. Fernandes (Ed.), *Gravity, Geoid and Space Missions* (Vol. 129, hlm. 119–124). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-26932-0_21
- Udama, Z. A., Claessens, S., Anjasmara, I. M., & Syafarianty, A. N. (2023). Analysis of different combinations of gravity data types in gravimetric geoid determination over Bali. *Journal of Applied Geodesy*, 0(0). <https://doi.org/10.1515/jag-2023-0042>
- Wessel, P., & Chandler, M. T. (2007). The mgd77 supplement to the generic mapping tools. *Computers & Geosciences*, 33(1), 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.006>
- Yusuf, M. (2015). ANALISIS DATA GAYABERAT KOMBINASI DENGAN MENGGUNAKAN GRAVIMETER ABSOLUT (A10) DAN GRAVIMETER RELATIF (LACOSTE ROMBERG).
- Zhang, S., Abulaitijiang, A., Andersen, O. B., Sandwell, D. T., & Beale, J. R. (2021). Comparison and evaluation of high-resolution marine gravity recovery via sea surface heights or sea surface slopes. *Journal of Geodesy*, 95(6), 66. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01506-8>
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., & Oikonomidou, X. (2020). The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94(7), 66. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>