

PERHITUNGAN GAYABERAT LAUT RESOLUSI TINGGI DI PERAIRAN SUMATERA DARI SATELIT ALTIMETRI

Zulfikar Adlan Nadzir¹, Satrio Muhammad Alif¹, dan Anita Eka Jayanti¹

¹Program Studi Teknik Geomatika, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera
e-mail : zulfikar.nadzir@gt.itera.ac.id

Abstrak. Gayaberat dan anomalnya, sebagai parameter penting dari gaya di permukaan Bumi, merupakan hal yang erat kaitannya dengan Geoid. Geoid itu sendiri merupakan sebuah pilar dalam ilmu Geodesi dan fungsi utamanya adalah sebagai referensi vertikal di sebuah wilayah. Pengukuran gayaberat, khususnya di lautan, merupakan sebuah proses yang seringkali membutuhkan biaya yang tidak sedikit, selain itu memiliki ketelitian yang tidak cukup baik dibandingkan dengan pengukuran gayaberat di daratan. Di sisi lain, sejak tahun 1990 sebuah teknologi satelit yang disebut altimetri berkembang dengan cukup pesat dan mampu menjadi salah satu sarana untuk mendapatkan nilai gayaberat di laut lepas. Salah satu dari satelit altimetri adalah Cryosat-2 yang memiliki beberapa jenis pengamatan (misi), salah satunya adalah misi geodetik yang melintasi Bumi dengan resolusi yang lebih baik dibanding dengan misi lainnya. Indonesia sendiri sudah mengembangkan model gayaberat regional bernama INAGEOID2020 dengan 2 versi: v1.0 dan yang terbaru, v2.0. Model gayaberat ini masih bisa diperbaiki dan ditingkatkan sebagai bagian dari usaha untuk memenuhi syarat dari Kebijakan Satu Peta (KSP) sesuai amanat undang-undang. Salah satu lokasi penting dari Indonesia adalah pulau Sumatera, yang menjadi lokasi dari penelitian ini. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan estimasi anomali gayaberat dari satelit Cryosat-2 dan memvalidasinya dengan data pembandingan. Penelitian ini menggunakan data tinggi muka air laut (*sea surface height* – SSH) Cryosat-2 dengan pendekatan *remove-compute-restore* (RCR) untuk mendapatkan nilai anomali gayaberat, yang lalu dibandingkan dengan model global Sandwell v.31.1 dan beberapa data survey *shipborne*. Proses RCR ini mempermudah perhitungan secara inversi menuju anomali gayaberat, dengan hasil yang ada di rentang ± 200 mgal. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa hasil estimasi gayaberat dari Cryosat-2 di perairan Pulau Sumatera memiliki nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) ~ 11 mgal dibandingkan dengan model gayaberat global dan *shipborne*. Hal tersebut menunjukkan bahwa potensi untuk menggunakan data altimetri misi geodetik sebagai tambahan data masukan untuk pengembangan model geoid regional sebuah negara memiliki peluang yang baik. Selain itu, hasil anomali gayaberat dapat mengidentifikasi keberadaan sesar yang kemungkinan berpotensi menimbulkan gempa di perairan Sumatera.

Kata Kunci: altimetri; anomali gayaberat; cryosat-2; model geoid; *shipborne*

Abstract. Gravity and its anomalies, as important parameters of the force on the Earth's surface, are closely related to the Geoid. The Geoid itself is a pillar in Geodesy and its main function is as a vertical reference in an area on the surface of the Earth. Measuring gravity itself, especially in the ocean, is a process that often requires a lot of money, and also has insufficient accuracy compared to similar measurement on land. On the other hand, since 1990 a satellite technology called altimetry has developed quite rapidly and is able to become one of the means to obtain gravity values in the open sea. One of the altimetry satellites is Cryosat-2 which has several types of mode of observations (missions), one of which is a geodetic mission that crosses the Earth with a very good resolution compared to other missions. Indonesia itself has developed a regional gravity model called INAGEOID2020 with 2 versions: v1.0 and the latest, v2.0. This gravity model can still be improved and enhanced as part of an effort to meet the requirements of the One Map Policy as mandated by law. One of the important locations in Indonesia is the island of Sumatra, which is the location of this research. The main purpose of this study is to estimate the gravity anomaly from Cryosat-2 data and to validate it with a reference data. This study uses Cryosat-2 sea surface height (SSH) data with RCR approach to obtain gravity anomaly values, which are then compared with the Sandwell v.31.1 global model and several shipborne survey data. This RCR process facilitates inversion calculations towards gravity anomalies, with results in the range of ± 200 mgal. The results of this study indicate that the gravity estimation results from Cryosat-2 in the waters of Sumatra Island have an root mean square error (RMSE) value of ~ 11 mgal compared to the global and shipborne gravity models. This shows that the potential to use geodetic mission altimetry data as additional input data for the development of a country's regional geoid model has good prospects. Additionally, this result could shed a light on the existence of an unknown fault which have a potential to cause an earthquake on the seas of Sumatra.

Keywords: altimetry; gravity anomaly; cryosat-2; geoid model; *shipborne*;

PENDAHULUAN

Proses penentuan bentuk Bumi menggunakan parameter fisis berupa bidang potensial atau juga disebut sebagai medan gayaberat pada sebuah titik di Bumi adalah pilar kedua dari tiga pilar dasar ilmu Geodesi (Seeber, 2003). Metode-metode yang ada dalam pilar kedua ini terus-menerus berkembang dan dimutakhirkan untuk mencapai level kebaikan yang terus meningkat. Dalam ilmu Mekanika Klasik (*Classical Mechanics*), gayaberat itu sendiri merupakan resultan dari dua gaya yang bekerja di semua titik pada permukaan Bumi: gaya gravitasi dan gaya sentrifugal (Barthelmes, 2013; Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006). Beberapa metodologi dan cara mengamati gayaberat sesuai dengan matra dan juga lokasi alatnya dibedakan menjadi tiga. Cara pertama adalah menggunakan kapal laut (*shipborne*) yang berfokus pada pengukuran di atas air dan lautan (Morrow dkk., 2023; Nadzir & Rahmadhani, 2024). Metode kedua adalah menggunakan wahana di udara yang terbagi menjadi pesawat terbang (A. M. Pahlevi dkk., 2019), satelit gayaberat (Bramanto dkk., 2022; Förste dkk., 2014) dan satelit altimetri (Andersen dkk., 2010; Andersen & Knudsen, 2019; Mayer-Gürr dkk., 2012; Sandwell dkk., 2014). Metode-metode pengukuran di atas memiliki keunggulan, kelemahan dan karakteristik masing-masing yang disesuaikan dengan tujuan dan lokasi (*fit-for-purpose*).

Selain gayaberat atau yang juga disebut sebagai gaya potensial, salah satu parameter penting dan umum dipakai dalam ilmu Geodesi sebagai turunannya adalah Geoid, juga anomali gayaberat (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006). Geoid itu sendiri adalah sebuah bidang maya di planet Bumi yang mewakili sebuah nilai potensial yang sama di seluruh permukaannya. Secara ideal dan berdasarkan teori, nilai potensial di permukaan Geoid adalah sama dengan muka air laut rata-rata (*mean sea level* – MSL) yang sudah hilang efek dari seluruh gaya yang bekerja daripadanya (Torge dkk., 2023; Torge & Müller, 2012). Penggunaan Geoid sendiri dimulai secara definisi oleh Gauss pada tahun 1828 dengan praktek pertama yang diselesaikan oleh Listing pada tahun 1871 (Vaniček & Krakiwsky, 1995). Geoid juga disebut sebagai perwujudan dari bentuk Bumi secara fisis yang asli pada orde pertama dan kedua. Hal ini menyebabkan seringnya penggunaan Geoid sebagai acuan referensi vertikal di berbagai negara, seperti Argentina (Piñón dkk., 2017), Australia (Featherstone dkk., 2012), Austria (Pail dkk., 2008), Ghana (Yakubu dkk., 2017) dan India (Goyal dkk., 2021). Model-model lokal dan regional tersebut tersedia dalam sebuah sistem secara publik (Reguzzoni dkk., 2021). Indonesia sebagai negara dengan luas sebesar 5.000 km² juga memiliki sistem referensi lokal dari Geoid, yaitu INAGEOID2020 dengan versi terbaru pada tahun 2023 (A. Pahlevi dkk., 2024). Secara definisi hukum, berdasar pada Perka Badan Informasi Geospasial (BIG) Nomor 15 tahun 2013 tentang Sistem Referensi Geospasial Nasional, Geoid merupakan referensi vertikal yang dipakai secara nasional (Nadzir & Rahmadhani, 2024).

Lautan merupakan medium wahana untuk pengukuran yang lebih menantang daripada di daratan ataupun udara, karena adanya tingkat risiko yang lebih tinggi dan biaya terkait yang lebih mahal. Selain itu, lautan juga terkenal sebagai medan yang susah untuk dijangkau dan dicapai, sehingga menambah tingkat kesulitan dari pengukuran medan gayaberat di laut secara langsung menggunakan kapal. Keberadaan metode lain yang memungkinkan untuk melakukan pengukuran gayaberat di lautan tanpa harus menggunakan kapal laut yaitu pesawat terbang (Udama dkk., 2023) ataupun satelit altimetri (Vignudelli dkk., 2019) menjadi solusi untuk menindaklanjuti kekurangan dari penggunaan kapal laut untuk mengukur potensial Bumi.

Produk luaran dari pengukuran medan gayaberat dan proses pemodelannya disebut sebagai Model Geopotensial (MG) baik secara global, regional maupun lokal. Salah dua dari model utama yang menggunakan data satelit altimetri sebagai masukan (*input*) utamanya adalah model dari Denmark yang berbasis pada selisih dari tinggi muka laut (ΔSSH) (Andersen dkk., 2021) dengan resolusi 2 *arc-minutes* dan dari Amerika Serikat (Sandwell dkk., 2021) yang berdasar pada parameter defleksi vertikal (ξ untuk sumbu-y dan η untuk sumbu-x) dengan resolusi spasial sebesar 1 *arc-minute* (S. Zhang dkk., 2021). Kedua model ini mewakili gelombang gayaberat pada panjang gelombang menengah yang diasimilasi dengan data dengan panjang gelombang panjang dari model gayaberat global dengan orde dan derajat kecil.

Secara kronologis, Indonesia memiliki 4 fase dalam pengembangan model gayaberat regional yang berlaku: 1) model yang berbasis pada data teristris pada tahun 1981; 2) basis data dari seluruh data lapangan

ditambah dengan data satelit gayaberat yang dikumpulkan pada tahun 1995 dan diasimilasi pada tahun 1996; 3 dan 4) Model gabungan dari data teristris, *airborne*, *shipborne*, model global EGM 2008 dan DTU17 serta data topografi SRTM30 dengan nama InaGeoid 2020 dalam 2 iterasi (v1.0 dan v2.0). Model terbaru ini memiliki ketelitian dalam sub-desimeter dibandingkan dengan data sipat datar (Lestari dkk., 2023).

Pembentukan model-model gayaberat regional ini merupakan usaha untuk memenuhi kebutuhan secara praktis dan holistik yang menjawab peraturan-peraturan yang terkait, seperti sebagai referensi vertikal untuk kebutuhan pengukuran teristris, pemetaan dengan skala besar (lebih besar dari 1:5.000) di seluruh Indonesia dan sebagai data masukan yang bisa digunakan untuk menghitung kedalaman laut Indonesia secara lebih teliti. Peraturan terbaru yang berkaitan dengan pembentukan model gayaberat ini adalah Rencana Induk Penyelenggaraan Sistem Referensi Geospasial Vertikal Nasional yang dimiliki oleh BIG dan dipublikasikan pada tahun 2019 menuliskan bahwa ketelitian dari model gayaberat Indonesia harus bisa mencapai 5 cm, yang mana sampai pada tahun 2024 masih belum tercapai (Heliani & Noviantara, 2024). Salah satu usaha yang bisa dilakukan dalam memperbaiki ketelitian model gayaberat regional Indonesia adalah menambah sumber data-data baik di daratan maupun di lautan agar resolusi spasial yang dimiliki juga semakin baik, mewakili kondisi fisis di permukaan Bumi dengan semakin rapat. Penelitian-penelitian sebelumnya berfokus di daratan pada pulau-pulau besar di Indonesia seperti Sulawesi (Sabri dkk., 2021; Shih dkk., 2024) dan Jawa (Lestari dkk., 2023; Ramdani dkk., 2021). Penelitian lain yang berfokus di lautan juga sudah dilakukan (Andersen dkk., 2021; S. Zhang dkk., 2021) walaupun jumlahnya sedikit, khususnya untuk lokasi Indonesia (Nadzir & Rahmadhani, 2024). Kebutuhan akan penelitian yang berfokus di lautan dan bertujuan untuk menambah data baru dalam usaha untuk menghitung geoid Indonesia dengan lebih teliti cukup besar. Tujuan utama dari penelitian ini yaitu menggunakan data estimasi gayaberat baru dari metode yang belum digunakan sebelumnya dan melakukan proses perhitungan performa dari hasil estimasi tersebut dibandingkan dengan data referensi.

Penelitian ini menggunakan data satelit altimetri Cryosat-2 pada mode *Geodetic Mission* yang lebih rapat secara spasial daripada mode normal sebagai data input utama dalam estimasi anomali gayaberat di perairan pulau Sumatera yang belum umum digunakan di perairan Indonesia. Satelit Cryosat-2 adalah sebuah misi yang dimiliki *European Space Agency* (ESA), diluncurkan pada tahun 2005 dan menggunakan sensor khusus yaitu *Synthetic Aperture Radar* (SAR). Keberadaan sensor ini membuat Cryosat-2 mampu mengamati Bumi dan lapisan esnya (Kacimi & Kwok, 2020; Landy dkk., 2022) dengan resolusi yang lebih baik dari satelit altimetri lainnya, juga untuk keperluan lain di lautan (Calafat dkk., 2017), salah satunya adalah mengukur geoid (Idžanović dkk., 2017; Ophaug dkk., 2015). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Kolokasi Kuadrat Terkecil/*Least Square Collocation* (KKT/LSC) (Abbak dkk., 2012; Moritz, 1978) sebagai algoritma untuk melakukan inversi dari data muka air laut menjadi anomali gayaberat. Hasil dari estimasi tersebut dibandingkan dengan data *shipborne* dengan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk menentukan bagaimana kebaikan dan ketelitian dari hasil estimasi tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat bertindak sebagai usaha awal dan referensi untuk menambah data-data dengan metode-metode terbaru dalam proses estimasi geoid regional di Indonesia. Selain itu, penelitian ini diharapkan untuk mendukung pihak terkait dalam memenuhi Rencana Induk Penyelenggaraan Sistem Referensi Geospasial Vertikal Nasional.

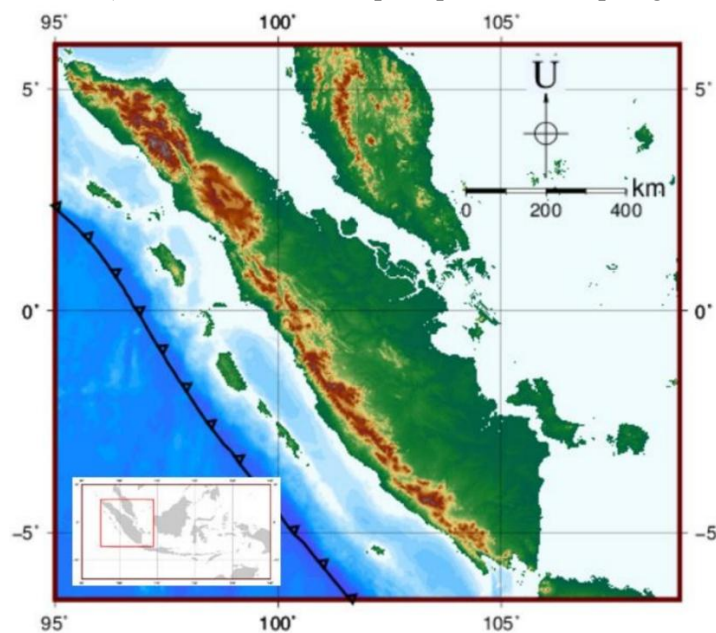
METODOLOGI

Lokasi Penelitian dan Data

Penelitian ini menggunakan perairan di sekitar Pulau Sumatera sebagai lokasi yang digunakan, dengan koordinat 95°–109° Bujur Timur dan 6° Lintang Utara sampai 6,5° Lintang Selatan. Lokasi dari penelitian ini tergambar pada **Gambar 1**. Perairan di sekitar pulau Sumatera ini dipilih dikarenakan memiliki kondisi batimetris yang berbeda secara signifikan dari sisi barat dan timurnya, yang mana di sisi barat terdapat pertemuan akan 2 lempeng tektonik besar (Eurasia dan Indo-Australia), mengakibatkan adanya perubahan kedalaman (*slope*) yang cukup drastis (Hutchings & Mooney, 2021). Sedangkan di sisi timurnya cenderung

landai dengan kedalaman yang lebih dangkal (Wang dkk., 2022). Selain itu, ketelitian dari INAGEOID terbaru di pulau Sumatera sebesar 21,9 cm yang masih jauh di bawah kebutuhan 5 cm.

Data-data yang digunakan dalam penelitian ini adalah informasi tinggi muka laut dan tambahannya dari Cryosat-2 mode *Geodetic Mission* pada tahun 2011 sampai 2017 secara kontinu yang dapat diakses pada <https://earth.esa.int/eogateway/missions/cryosat>. Penggunaan data tersebut berfokus pada gayaberat tetap yang tidak berubah seiring dengan waktu (*time-invariant gravity*). Selain itu, data anomali gayaberat global EGM2008 dari kombinasi data berbagai wahana dengan derajat dan orde 360 pada resolusi 5 *arc-minutes* didapatkan dari situs <https://icgem.gfz-potsdam.de/home>. Data ketiga yang digunakan adalah *Sea Surface Topography* (SST) yang mewakili tinggi muka air laut secara dinamis hasil olahan BIG. Selanjutnya, data anomali gayaberat di perairan sekitar pulau Sumatera pada tahun 1963 sampai 2008 diambil dari <https://www.ncei.noaa.gov/maps/trackline-geophysics/>. Data terakhir yang digunakan adalah data anomali gayaberat Sandwell v31.1 dari kombinasi beberapa satelit altimetri yang memiliki resolusi spasial sebesar 1 *arc-minute* (Sandwell dkk., 2021) dan bisa diakses di ftp://topex.ucsd.edu/pub/global_grav_1min/geotiff/.



Gambar 1. Peta dari Lokasi Penelitian

Perhitungan *Sea Surface Height* (SSH) dan *Geoid Height* dari Altimetri

Data altimetri yang didapatkan merupakan data mentah yang mewakili nilai pantulan akan gelombang elektromagnetik di permukaan lautan (*range* atau h). Informasi ini perlu dikoreksi dan disesuaikan dengan kebutuhan untuk nantinya mewakili parameter yang diinginkan yaitu tinggi muka air laut dari sebuah referensi yaitu ellipsoid. Informasi pada Persamaan 1 mewakili hubungan antara tinggi muka laut (SSH) dengan Alt (*Altitude*, tinggi satelit di atas elipsoid referensi) dan h . Sebelum memasukkan h , karena pantulan yang dihasilkan oleh sensor mengalami gangguan selama perjalanan di atmosfer dan di permukaan laut, maka perlu dikoreksi terlebih dahulu, seperti tertulis pada Persamaan 2. Koreksi yang dimasukkan adalah koreksi atmosfer yang terdiri dari perlambatan di ionosfer (*iono*) dan percepatan di troposfer (*trop*). Selain itu, di permukaan laut juga dikoreksi dengan kondisi dari kelengkungan gelombang (*sea state bias – ssb*), pengaruh tekanan atmosfer (*inverse barometric effect – iB*) dan energi pasang surut yang terbagi menjadi 3: pasang surut laut (*ocean tide – t_o*), pasang surut dari bentuk Bumi (*solid earth tide – t_s*), dan pasang surut dari pergerakan kutub (*pole tide – t_p*). Proses ini menghasilkan tinggi muka air laut di atas referensi yang sudah terbebas dari kesalahan (SSH).

$$SSH = Alt - h' \quad (1)$$

$$h' = h - \text{iono} - \text{trop} - \text{ssb} - iB - t_o - t_s - t_p \quad (2)$$

Informasi tinggi di permukaan air laut ini dilanjutkan dengan proses untuk mendapatkan tinggi Geoid (N) yang berbasis dari informasi lain yaitu SST sebagai masukannya. Informasi yang didapatkan dari SST adalah tinggi muka laut yang dipengaruhi gaya-gaya non gayaberat, yang mana jika dikurangkan oleh SSH yang mewakili tinggi muka laut dari energi gayaberat dan non-gayaberat, tersisa tinggi dari energi gayaberat, atau sering disebut tinggi geoid atau undulasi geoid (*Geoid Height* – N). Pendekatan ini sering disebut sebagai pendekatan inversif dan digambarkan pada Persamaan 3.

$$SSH = SST - N \quad (3)$$

Estimasi dan Aproksimasi Anomali Gayaberat

Informasi undulasi geoid yang didapatkan dari data altimetri mewakili seluruh spektrum dari panjang gelombang yang ada (pendek, menengah dan panjang) (Flury, 2006; Hirt dkk., 2014; Reusen dkk., 2020) seperti yang tergambar di Persamaan 4. Proses selanjutnya yang dilakukan terhadap *full-wavelength* data ini adalah dengan mengurangi informasi gelombang panjangnya, yang diwakili oleh data EGM2008 pada derajat dan orde 360. Hal ini jamak disebut sebagai proses *remove*, yang merupakan bagian tak terpisahkan dari sebuah metode yang disebut RCR (Hirt & Claessens, 2011; Kalu dkk., 2022; Sjöberg, 2005). Hasil dari operasi tersebut adalah undulasi geoid residu yang berisikan informasi gelombang pendek dan menengah dari undulasi geoid, dengan gelombang pendek mewakili informasi topografi sedangkan gelombang menengah mewakili data diantaranya, seperti altimetri dan *airborne*.

$$N = N_{long} + N_{medium} + N_{short} \quad (4)$$

Hasil perhitungan undulasi geoid residu lalu ditransformasikan menjadi kemiringan geoid residu, yang mewakili selisih dari tinggi/undulasi geoid dari dua titik yang disebut *crossover point*. Penggunaan *crossover point* ini dikarenakan bahwa informasi yang digunakan sudah melalui proses untuk meminimalisir kesalahan yang belum hilang pada data undulasi geoid residu, membuat nilainya mendekati nol secara ideal. *Crossover point* sendiri didapatkan dengan cara mencari titik-titik yang berimpitan secara spasial dari waktu pengukuran yang berbeda (*ascending* dan *descending pass*), diwakili oleh Persamaan 5. Menggunakan data dari 2 *crossover point* atau lebih, kemiringan daripadanya dihitung untuk mendapatkan *geoid gradient*. Informasi *geoid gradient* ini mewakili perbedaan vertikal dari permukaan laut ke elipsoid referensi yang digambarkan oleh **Persamaan 6**. Data ini digunakan nanti sebagai masukan untuk perhitungan defleksi vertikal dan azimuth yang merupakan basis untuk mencari nilai anomali gayaberat. Defleksi vertikal ini mewakili selisih tinggi pada sumbu x (meridian) dan sumbu y (zonal).

$$N_CP_{x,y,asc} = N_{x,y,asc} - N_{x,y,desc} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = \xi_i \cos \alpha_{ij} + \eta_i \cos \alpha_{ij} \quad (6)$$

Pendekatan menggunakan inversi dari Vening-Meinesz (*Inverse Vening-Meinesz* – *IVM*) (Eshagh, 2016; Hwang, 1998; Hwang dkk., 2002; X. Zhang dkk., 2023) digunakan untuk menghitung anomali gayaberat pada sebuah titik dari defleksi vertikal total pada sebuah titik, seperti dijelaskan pada Persamaan 7. Proses IVM ini menggunakan asumsi bahwa Bumi berbentuk silinder pejal dan memiliki densitas yang sama di seluruh bagiannya. Selain itu, defleksi vertikal yang digunakan diasumsikan untuk mewakili sudut spasial antara vektor gayaberat di bidang elipsoid yang sering disebut gayaberat normal dengan vektor gayaberat pada bidang geoid, yang mana secara praktis merupakan perbedaan antara sudut yang dibentuk oleh unting-unting yang tenang dengan garis maya yang ditarik secara tegak lurus di permukaan Bumi. Pengolahan anomali gayaberat residual juga dilakukan menggunakan metode KKT/LSC (Heitz & Tscherning, 1972; Tscherning, 2013) yang menggunakan defleksi vertikal residu sebagai masukan bersamaan dengan matriks kovariansi dari medan gayaberat model dan defleksi vertikal serta matriks kesalahan dari medan gayaberat model pada Persamaan 8.

Selain itu, di persamaan tersebut, juga digunakan matriks kovariansi gabungan dari medan gayaberat model dan defleksi vertikal residu, baik pada permukaan yang dihitung, juga pada permukaan normal yaitu di permukaan elipsoid referensi. Perhatian juga perlu diberikan dalam proses perhitungan ini dalam konteks lokasi secara lintang dan bujur, dikarenakan adanya kaitan antara sistem koordinat sferis dengan elipsoid. Dalam penelitian ini, model gayaberat yang digunakan adalah EGM2008 derajat dan orde 360.

$$\Delta g(p) = \frac{\gamma_0}{4\pi} \iint H' \varepsilon_{qp} d\sigma_q \quad (7)$$

$$\Delta g_{res} = C_{\Delta g \varepsilon}^S C_{\Delta g \Delta g}^S \begin{bmatrix} C_{\varepsilon \varepsilon}^0 + D_{\varepsilon} & C_{\varepsilon \Delta g}^0 \\ C_{\Delta g \varepsilon}^0 & C_{\Delta g \Delta g}^0 + D_{\Delta g} \end{bmatrix}^{-1} [\varepsilon] + \Delta g_{ref} \quad (8)$$

Proses-proses di atas adalah bagian *compute* atau perhitungan dari kesatuan RCR. Bagian terakhir dari proses estimasi anomali gayaberat adalah mengembalikan bagian gelombang panjang kepada data anomali gayaberat residu yang mana dalam konteks ini mewakili anomali gayaberat pendek dan menengah. Sesuai dengan bagian sebelumnya, model yang digunakan adalah EGM2008 derajat dan orde 360. Skema dan hubungan dari anomali gayaberat dan panjang gelombangnya dijelaskan pada Persamaan 9.

$$\Delta g = \Delta g_{long} + \Delta g_{medium} + \Delta g_{short} \quad (9)$$

Eksklusi *Outlier* dan Verifikasi/Validasi (Ver/Val) Anomali Gayaberat

Hasil dari proses sebelumnya yaitu anomali gayaberat selanjutnya masuk dalam proses pencarian dan eksklusi dari *outlier* yang menggunakan metode Gauss (*Gaussian Filter*) (Claessens & Filmer, 2020; Sansò & Sideris, 2013; Willberg dkk., 2020). Penggunaan metode Gauss ini berbasis pada dinamika akan besar dan batasan dari nilai minimum dan maksimum yang dipilih, yang mana bukan berdasar pada nilai standar deviasi tetapi berdasar pada histogram dan distribusi normal dari persebaran data yang dimaksud, tergambar pada **Persamaan 10** dalam domain frekuensi.

$$\hat{g}(f) = e^{-\pi^2 f^2 / a} \quad (10)$$

Selanjutnya, untuk melihat dan menguji tingkat kebaikan dari hasil estimasi anomali gayaberat, digunakan dua tahap: verifikasi dan validasi. Verifikasi dilakukan menggunakan data lain yang berasal dari sumber data yang sama (altimetri) sebagai usaha untuk melihat tingkat presisi dari hasil yang kita dapatkan. Dalam hal ini, model pembandingan yang digunakan adalah Model Sandwel v31.1. Selanjutnya adalah proses validasi yang menggunakan data dari sumber data lain yang diutamakan merupakan metode yang dianggap benar atau digunakan sebagai referensi. Hasil dari proses ini adalah tingkat akurasi dari hasil estimasi yang kita miliki. Data *shipborne* digunakan sebagai referensi dalam proses validasi di penelitian ini. Kedua proses di atas menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE) (Nadzir & Rahmadhani, 2024), tertulis pada Persamaan 11. Selain itu, dilakukan pula perbandingan akan selisih anomali gayaberat di lima zona laut.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\Delta g_{obs} - \Delta g_{ref})^2}{n}} \quad (11)$$

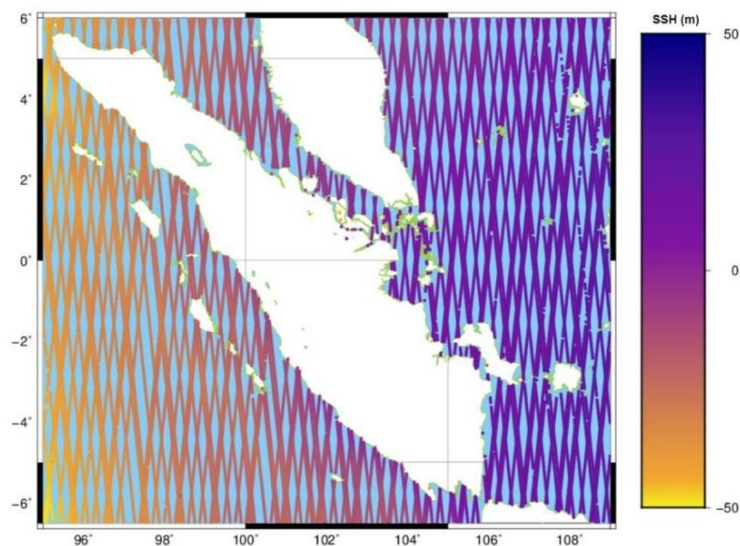
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sea Surface Height (SSH) dan Anomali Gayaberat dari Satelit Cryosat-2

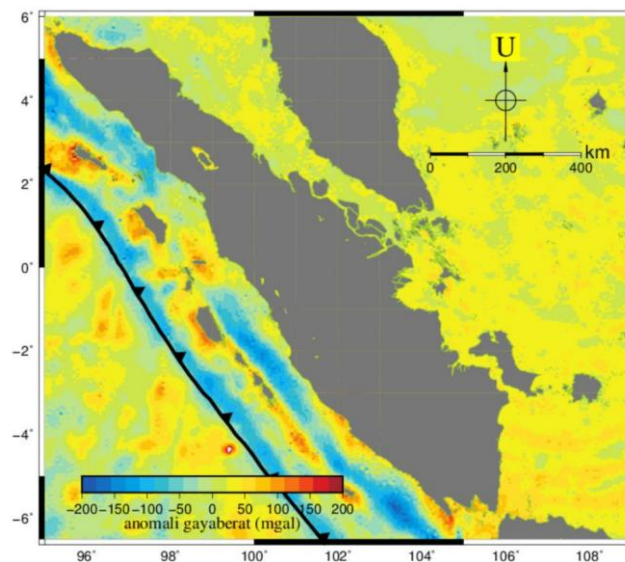
Satelit Cryosat-2 memiliki data yang terbagi dari *ascending pass* dan *descending pass* yang berarti satu data merupakan data yang mengarah ke kutub utara dan satu lagi mengarah ke kutub selatan. Pada lokasi penelitian, terdapat 143 *passes* baik *ascending* ataupun *descending* yang diolah menjadi SSH, tergambar pada Gambar 2. Rentang dari hasil perhitungan SSH di lokasi penelitian menunjukkan nilai -50 meter sampai 50 meter, menunjukkan bahwa secara nilai rentangnya cukup besar. Jika dilihat dari persebaran nilai SSH secara

spasial, dapat dilihat bahwa bagian timur yang dangkal memiliki SSH yang cenderung lebih tinggi dari bagian barat yang dalam. Selain itu, pencarian *crossover point* menemukan bahwa secara rata-rata, nilai yang didapatkan adalah 27,5 km. Nilai ini bisa digunakan sebagai informasi dasar untuk mengetahui resolusi spasial minimal yang bisa didapatkan dari sebuah data altimetri, yang mana lebih baik daripada penelitian sebelumnya yaitu 55 km (Passaro dkk., 2018).

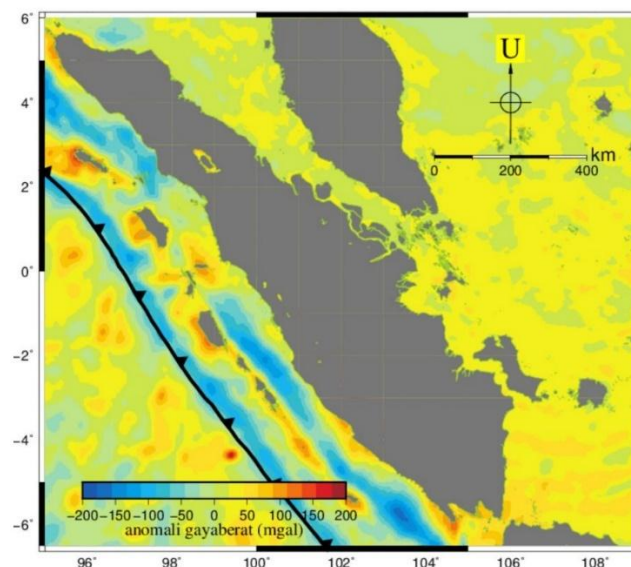
Setelah mendapatkan SSH, dilakukan proses RCR yang bertujuan untuk mendapatkan nilai anomali gayaberat dari undulasi geoid, seperti yang tergambar pada Gambar 3. Hasil menunjukkan rentang antara -200 mgal sampai 200 mgal dari anomali gayaberat pada lokasi penelitian. Untuk memastikan bahwa hasil yang didapatkan memenuhi interval kepercayaan 95%, proses eksklusi *outlier* dilakukan menggunakan *Gaussian Filter* yang mana hasilnya ditampilkan pada Gambar 4. Ditemukan bahwa proses filter tidak merubah informasi yang didapatkan terlalu banyak, terbukti dengan tidak berubahnya rentang nilai dari -200 mgal sampai 200 mgal. Hal ini menunjukkan bahwa hasil sebelum eksklusi sudah cukup baik, sesuai dengan interval kepercayaan 95%, mengindikasikan bahwa metode yang digunakan untuk melakukan estimasi anomali gayaberat memiliki performa yang baik. Kedua hasil pengolahan pada anomali gayaberat menghasilkan resolusi spasial sebesar 14,5 *arc-minutes* yang mana setara dengan rerata dari *crossover points* (27,5 km). Dapat dilihat dari dua gambar pada hasil anomali gayaberat bahwa beberapa fitur-fitur dasar laut di lokasi penelitian terwakili oleh distribusi spasial dari anomali gayaberatnya, dengan nilai minus mewakili kedalaman yang lebih dalam, salah satunya adalah palung yang lokasinya berimpit dan sejajar dengan pertemuan antara lempeng tektonik Eurasia dan Indo-Australia di Samudera Hindia dan pulau-pulau di dekat palung yang memiliki anomali gayaberat lebih besar dari lokasi sekitarnya, mewakili perairan dangkal di sekitar pulau-pulau tersebut. Senada dengan temuan sebelumnya, beberapa selat di bagian timur Sumatera seperti Selat Sunda, Selat Malaka dan Selat Karimata, memiliki nilai anomali gayaberat yang tinggi, selaras dengan kedalaman di lokasi-lokasi tersebut yang cukup dangkal, khususnya apabila dibandingkan dengan situasi di barat Sumatera. Hasil ini senada dengan penelitian sebelumnya dengan lokasi Indonesia yang menemukan rentang 80 meter sampai -60 meter (Sarsito dkk., 2019), 100 meter sampai -100 meter (Handoko dkk., 2017), menunjukkan bahwa rentang tersebut walau besar, mewakili keadaan nyata di lokasi penelitian. Perlu diperhatikan bahwa yang ditampilkan adalah SSH dan bukan anomali dari SSH yang memiliki nilai jauh lebih kecil dalam satuan centimeter, seperti hasil di Indonesia bagian timur (Shilimkar dkk., 2022).



Gambar 2. SSH dari Satelit Cryosat-2 pada lokasi penelitian



Gambar 3. Anomali Gayaberat sebelum eksklusi outlier

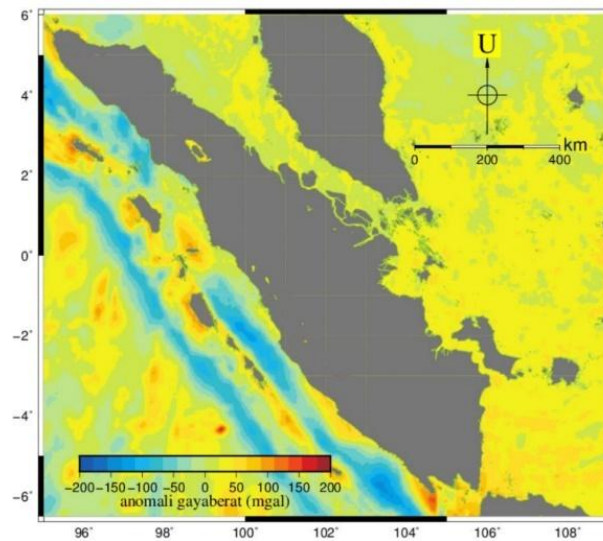


Gambar 4. Anomali Gayaberat setelah eksklusi outlier

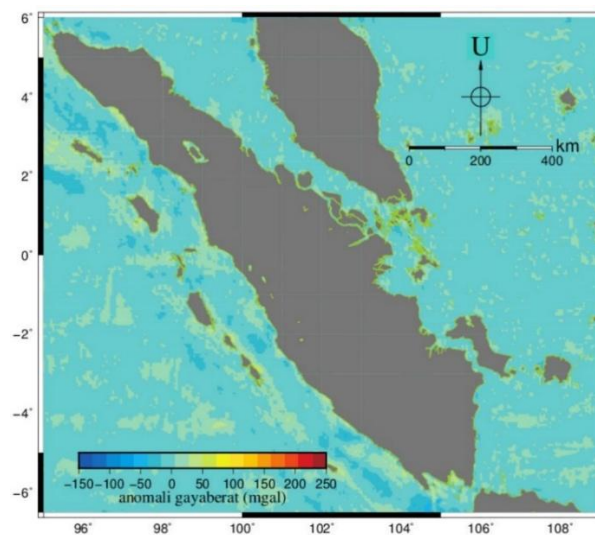
Hasil Verifikasi dan Validasi (Ver/Val) Anomali Gayaberat dengan Model Lainnya

Verifikasi anomali gayaberat dengan model Sandwell v31.1 dilakukan dengan menghitung RMSE dari keduanya, ditampilkan pada Gambar 5. Sebelumnya, dilakukan proses *downscaling* dari model Sandwell karena perbedaan resolusinya (1 arc-minutes dibanding $14,5 \text{ arc-minutes}$) agar nanti setiap titik pada data anomali gayaberat dapat dibandingkan secara langsung dengan data di lokasi yang sama dari data model Sandwell (*one-to-one comparison*). Terlihat bahwa rentang dari data model Sandwell menyerupai data anomali gayaberat, diantara -200 mgal sampai 200 mgal. Karakteristik secara visual antara kedua model juga mirip pada Gambar 4 dan Gambar 5. Selisih dari keduanya digambarkan pada Gambar 6, yang memiliki rentang antara -150 mgal sampai 250 mgal tetapi didominasi dengan warna biru muda yang mendekati nilai 0 mgal. Secara spasial, terlihat bahwa selisih cukup besar terjadi khususnya di pesisir dekat daratan dan saat kedalaman cukup dalam. Ditambah dengan hasil RMSE sebesar 8,6 mgal, ketiga temuan ini menunjukkan bahwa kedua metode memiliki kesamaan dalam data dalam rentang normal, dan mulai berbeda ketika mendekat titik-titik ekstrem seperti titik minima ataupun titik maksima, tergambar pada histogram pada Gambar 7. Analisis lebih detail untuk bagian timur dan barat perairan Sumatera pada Gambar 8 menunjukkan bahwa selisih data di timur Sumatera cenderung lebih mendekati 0 mgal dibandingkan dengan bagian barat Sumatera yang memiliki

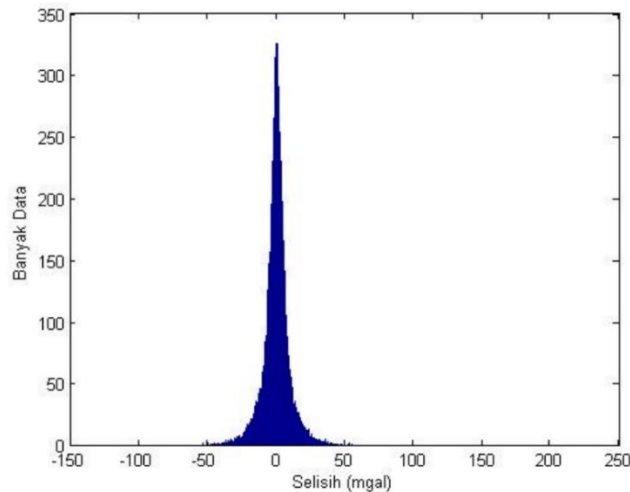
persebaran lebih dari 20 mgal dan kurang dari -20 mgal lebih banyak. Hal ini mengindikasikan bahwa metode KKT untuk altimetri baik dalam menestimasi anomali gayaberat yang tinggi tetapi kurang baik dalam estimasi di lokasi dengan batimetri yang dalam dan memiliki kemiringan yang curam, seperti penelitian (S. Zhang dkk., 2021) yang menunjukkan hasil yang sama di belahan lain dunia.



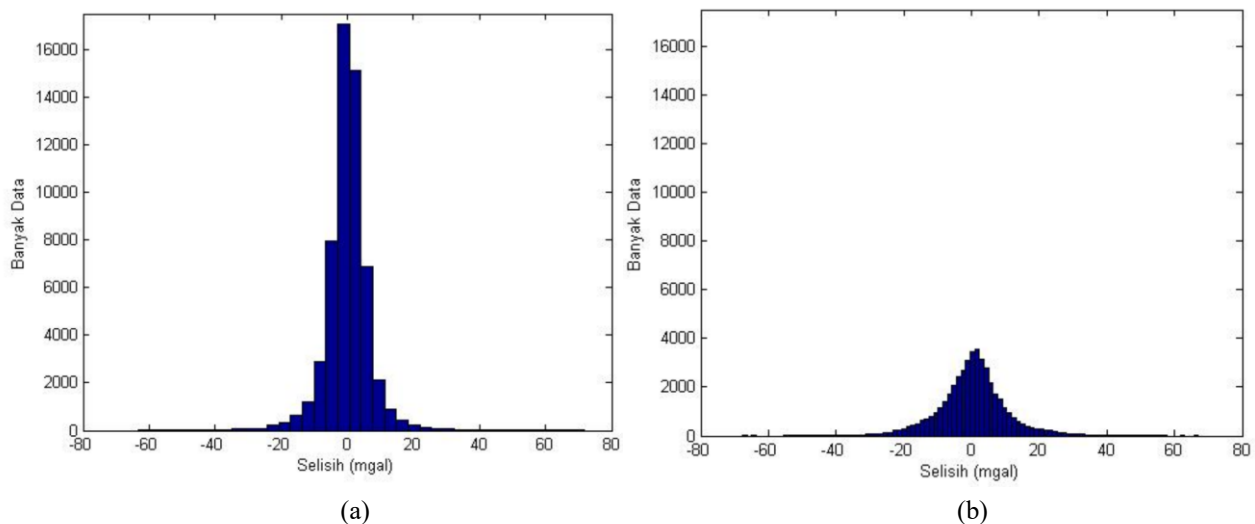
Gambar 5. Anomali Gayaberat Model Sandwell v31.1



Gambar 6. Selisih Anomali Gayaberat dengan Model Sandwell



Gambar 7. Histogram dari Selisih Anomali Gayaberat dengan Model Sandwell



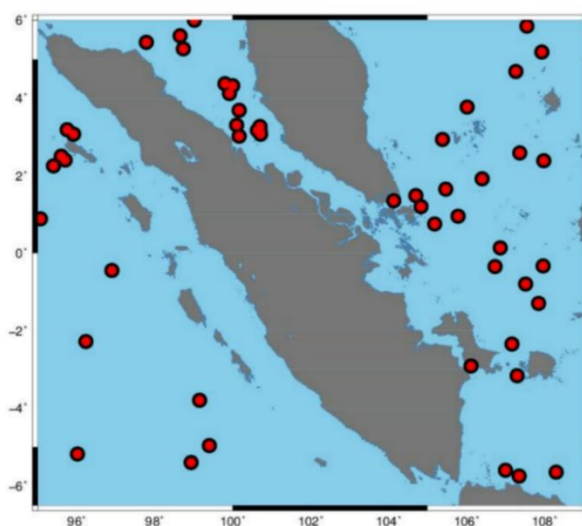
Gambar 8. Histogram dari Selisih Anomali Gayaberat dengan Model Sandwell di timur Sumatera (a) di barat Sumatera (b)

Proses selanjutnya adalah validasi yang dilakukan antara hasil anomali gayaberat dengan data *shipborne* pada lokasi penelitian. Data *shipborne* melalui proses seleksi terlebih dahulu untuk mendapatkan lokasi terdekat dengan titik dari data hasil anomali gayaberat, yang menghasilkan 51 titik secara keseluruhan yang ditampilkan pada Gambar 9 dengan rentang jarak rata-rata antara *shipborne* dengan hasil anomali gayaberat berada pada 0 sampai 50 meter, menunjukkan kedekatan secara spasial dari kedua data yang digunakan. Pemilihan 51 titik ini didasarkan pada persebaran data *shipborne* yang berdekatan dengan estimasi anomali gayaberat dan untuk memastikan pemerataan secara lokasi dan zona kedalaman laut. Hasil selisih menunjukkan rentang antara -40 sampai 20 mgal yang ditampilkan pada Gambar 10, yang mana secara spasial dapat dilihat bahwa selisih di kedalaman yang dalam (bagian barat Sumatera) lebih besar daripada selisih yang didapat di area dengan kedalaman yang dangkal (bagian timur Sumatera). Dalam parameter RMSE, didapatkan nilai 9,3 mgal dengan histogram yang ada pada Gambar 11. Hasil pada gambar tersebut mengindikasikan bahwa lebih dari 50% titik memiliki selisih antara -10 sampai 10 mgal, menunjukkan bahwa tingkat akurasi dari anomali gayaberat yang dihasilkan satu tingkat dengan tingkat presisinya, yaitu sama-sama memiliki nilai RMSE ~9 mgal. Penelitian sebelumnya di perairan Indonesia menunjukkan nilai yang hampir sama, yaitu sebesar 8,53 mgal (Nadzir & Rahmadhani, 2024). Analisis lebih detail untuk 5 zona laut yang ada di lokasi penelitian (Selat Malaka, Laut Jawa, Selat Singapura, Laut China Selatan dan Samudera Hindia) pada **Tabel 1** menunjukkan bahwa laut dangkal dengan kemiringan dasar laut landai seperti Selat Malaka, Laut Jawa dan

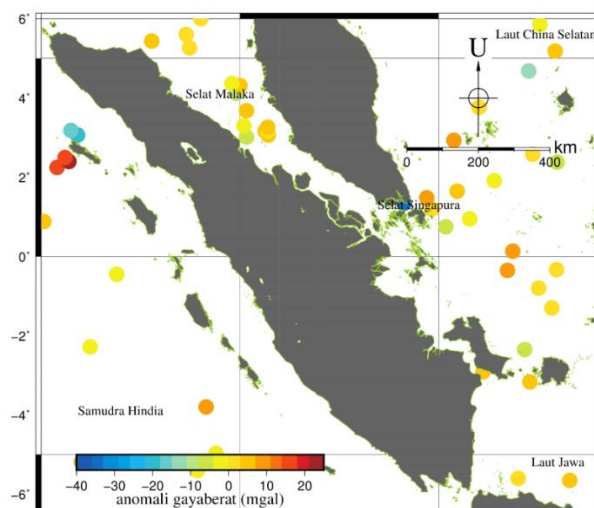
Selat Singapura dan Laut China Selatan cenderung memiliki selisih positif dibandingkan dengan Samudera Hindia yang dalam dan curam. Selain itu, kecenderungan yang sama juga ditemukan pada zona-zona laut dengan tinggi gelombang signifikan rendah dibandingkan dengan tinggi gelombang signifikan yang tinggi, yaitu selisih positif dibanding dengan selisih minus.

Tabel 1. Selisih Anomali Gayaberat sesuai dengan Zona Laut

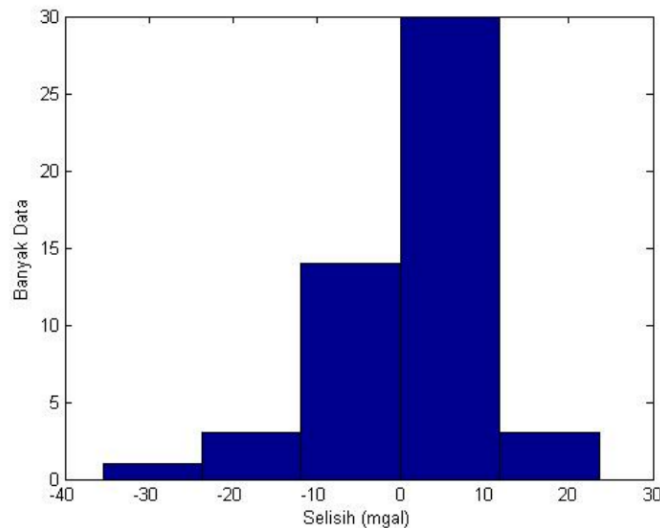
Zona Laut	Anomali Gayaberat Cryosat-2	Anomali Gayaberat <i>Shipborne</i>	Selisih
Selat Malaka	22,4	17,8	4,6
Laut Jawa	48,4	47,6	0,8
Selat Singapura	27,7	26,6	1,1
Laut China Selatan	16,4	12,9	3,5
Samudera Hindia	15,3	18	-2,8



Gambar 9. Lokasi perbandingan anomali gayaberat dengan data *shipborne*



Gambar 10. Selisih antara Anomali Gayaberat dengan Data *Shipborne*



Gambar 11. Histogram selisih antara Anomali Gayaberat dengan Data *Shipborne*

Hubungan antara Hasil Anomali Gayaberat dengan Tektonik Sumatera

Hasil anomali gayaberat dapat digunakan untuk mengidentifikasi sesar yang berpotensi menimbulkan gempa. Di Sumatera, terdapat dua sesar utama yang dapat memicu gempa: zona sesar Sumatera yang terletak di daratan utama (Alif dkk., 2020), dan zona subduksi yang terletak di perairan barat Sumatera (McCaffrey, 2009). Hasil anomali gayaberat di daerah perairan yang ditunjukkan pada **Gambar 4** mengonfirmasi adanya zona subduksi. Palung Sunda, yang menjadi lokasi awal proses subduksi Lempeng Indo-Australia ke Lempeng Sundaland (Alif dkk., 2021), terdeteksi sebagai anomali gayaberat negatif yang ditunjukkan dan berimpit dengan garis hitam pada Gambar 4. Zona sesar Sumatera yang terletak di daratan utama tidak dapat dikonfirmasi dari hasil anomali gayaberat ini karena letaknya yang tidak berada di perairan. Kedua sesar utama tersebut merupakan fokus utama dalam studi tektonik dan gempa bumi di Pulau Sumatera (Chlieh dkk., 2008). Selain itu, dari hasil anomali gayaberat yang didapatkan di penelitian ini, terdapat beberapa wilayah lain dengan anomali gayaberat yang menarik untuk diteliti lebih lanjut terkait konfirmasi keberadaan dan potensi gempa bumi yang mungkin diakibatkan oleh adanya sesar-sesar tersebut.

Pertama, di perairan antara Palung Sunda dan daratan utama Sumatera, tepatnya di selatan lintang 0° , juga terdapat anomali gayaberat negatif. Delineasi anomali gayaberat ini berimpit dengan sesar Mentawai yang jarang diteliti (Singh dkk., 2010). Kedua, di perairan antara Palung Sunda dan daratan utama Sumatera, tepatnya di utara lintang 2° , terdapat anomali gayaberat negatif. Delineasi anomali tersebut tidak berimpit dengan sesar manapun yang telah didefinisikan dalam Natawidjaja, (2018). Namun, sesar ini berkemungkinan terkait dengan sobekan besar yang terjadi akibat gempa Aceh tahun 2004 dengan magnitudo 9,2 (Alif dkk., 2024). Ketiga, di ujung selatan Pulau Sumatera, tepatnya di barat daya, terdapat anomali gayaberat dengan nilai lebih tinggi dibandingkan dengan daerah sekitarnya. Nilai yang lebih tinggi ini kemungkinan besar terkait dengan ujung zona sesar Sumatera. Zona sesar Sumatera ini kemungkinan menyambung dengan sesar-sesar di Pulau Jawa dan berpotensi menimbulkan gempa Banten tahun 2019 dengan magnitudo 6,9.

Studi tektonik yang berfokus pada kedua lokasi dengan anomali gayaberat rendah tersebut belum pernah dilakukan. Jika sesar-sesar tersebut aktif dan menimbulkan deformasi permukaan di daratan Sumatera, hasil estimasi potensi gempa di wilayah Sumatera yang berfokus pada daratan Sumatera dapat mengalami perubahan signifikan. Peningkatan fokus studi tektonik di wilayah yang diduga terdapat sesar-sesar yang berpotensi menimbulkan gempa, dapat dimulai dengan pembuatan bench mark pemantauan di ketiga lokasi tersebut

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Pencarian akan sumber data baru dan tambahan untuk menambah dan memperbaiki ketelitian model Geoid regional Indonesia khususnya di lautan dalam rangka memenuhi aturan resmi dilakukan, dalam hal ini menggunakan data satelit altimetri Cryosat-2 di perairan Sumatera. Keباikan data di area pesisir memiliki pengaruh pada kebaikan perhitungan SSH, yang juga berpengaruh pada estimasi anomali gayaberatnya. Pada seluruh lokasi penelitian ditemukan rentang -200 sampai 200 mgal dengan perbedaan signifikan pada area barat dan timur Sumatera dan resolusi sebesar 27,5 km untuk data SSH dan anomali gayaberat. Tercatat bahwa metode yang digunakan dalam proses estimasi anomali gayaberat yaitu RCR dan KKT memiliki kebaikan yang cukup dibandingkan dengan metode lain, dengan hasil eksklusi outlier yang tidak banyak merubah sebaran dan rentang nilai hasil estimasi. Ditemukan pula bahwa hasil anomali gayaberat berkaitan erat dengan batimetri di lokasi penelitian, yang mana menjadi salah satu topik lanjutan untuk melanjutkan proses inversi dari gayaberat menjadi kedalaman lautan.

Hasil verifikasi anomali gayaberat menunjukkan nilai RMSE sebesar 8,6 mgal dengan kecenderungan nilai selisih yang lebih besar di pesisir dan di area palung. Selain itu, ditemukan pula seperti pada bagian sebelumnya bahwa ada perbedaan hasil yang cukup signifikan di bagian barat dan timur Sumatera. Selanjutnya, hasil validasi menunjukkan bahwa dari 51 titik yang digunakan, mayoritas memiliki selisih dalam rentang -10 sampai 10 mgal, dengan RMSE sebesar 9,3 mgal. Analisis lebih jauh di lima lautan regional di perairan Sumatera ditemukan bahwa laut dengan kemiringan landai dan dangkal memiliki nilai selisih yang lebih baik dibandingkan dengan lautan dengan kemiringan curam dan dalam.

Temuan-temuan dalam penelitian ini dapat menjadi pertimbangan dan perhatian dalam proses perhitungan kembali model Geoid Indonesia di tahun-tahun kemudian, diawali dengan perhitungan model gayaberat/geoid di lautan Indonesia secara mandiri menggunakan kombinasi data altimetri, satelit gayaberat dan *shipborne* serta *airborne* yang tersedia. Temuan dalam penelitian ini juga berhasil mengidentifikasi keberadaan sesar yang kemungkinan berpotensi menimbulkan gempa di perairan. Keberadaan sesar yang jarang diteliti ini memerlukan studi lanjutan untuk mengonfirmasi eksistensinya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbak, R. A., Erol, B., & Ustun, A. (2012). Comparison of the KTH and remove–compute–restore techniques to geoid modelling in a mountainous area. *Computers & Geosciences*, 48, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.019>
- Alif, S. M., Anggara, O., Jihad, M. F., & Perdana, R. S. (2024). GNSS VELOCITY AND STRAIN FIELD IN THE NORTHERN SUMATRA 15 YEARS AFTER THE 2004 M9.2 SUMATRA ANDAMAN EARTHQUAKE. *Geodynamics & Tectonophysics*, 15(6), 0798. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-6-0798>
- Alif, S. M., Fattah, E. I., & Kholil, M. (2020). Geodetic slip rate and locking depth of east Semangko Fault derived from GPS measurement. *Geodesy and Geodynamics*, 11(3), 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.04.002>
- Alif, S. M., Sauri, M. S., & Perdana, R. S. (2021). Perubahan Kecepatan Subduksi Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Sundaland akibat Gempa Bumi Samudera Hindia tahun 2016. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 4(3), 159–167. <https://doi.org/10.14710/jgt.4.3.2021.159-167>
- 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>

- Barthelmes, F. (2013). Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models: Theory and formulas used by the calculation service of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM); <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>; revised edition. *Scientific Technical Report; 09/02; ISSN 1610-0956.* <https://doi.org/10.2312/GFZ.B103-0902-26>
- 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
- Calafat, F. M., Cipollini, P., Bouffard, J., Snaith, H., & Féménias, P. (2017). Evaluation of new CryoSat-2 products over the ocean. *Remote Sensing of Environment, 191*, 131–144. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.009>
- Chlieh, M., Avouac, J. P., Sieh, K., Natawidjaja, D. H., & Galetzka, J. (2008). Heterogeneous coupling of the Sumatran megathrust constrained by geodetic and paleogeodetic measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 113*(B5), 2007JB004981. <https://doi.org/10.1029/2007JB004981>
- Claessens, S. J., & Filmer, M. S. (2020). Towards an International Height Reference System: Insights from the Colorado geoid experiment using AUSGeoid computation methods. *Journal of Geodesy, 94*(5), 52. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01379-3>
- Eshagh, M. (2016). A theoretical discussion on Vening Meinesz-Moritz inverse problem of isostasy. *Geophysical Journal International, 207*(3), 1420–1431. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw344>
- Featherstone, W. E., Filmer, M. S., Claessens, S. J., Kuhn, M., Hirt, C., & Kirby, J. F. (2012). Regional geoid-model-based vertical datums – some Australian perspectives. *Journal of Geodetic Science, 2*(4), 370–376. <https://doi.org/10.2478/v10156-012-0006-6>
- Flury, J. (2006). Short-wavelength Spectral Properties of the Gravity Field from a Range of Regional Data Sets. *Journal of Geodesy, 79*(10–11), 624–640. <https://doi.org/10.1007/s00190-005-0011-y>
- 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* (hlm. 55102156 Bytes, 3 Files) [Application/octet-stream,application/octet-stream,application/zip]. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/ICGEM.2015.1>
- Goyal, R., Featherstone, W. E., Claessens, S. J., Dikshit, O., & Balasubramanian, N. (2021). *The Indian gravimetric geoid model based on the Stokes-Helmert approach with Vaníček-Kleusberg modification of the Stokes kernel: IndGG-SH2021* (Versi 1.0) [Dataset]. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/ISG.2021.009>
- Handoko, E., Fernandes, M., & Lázaro, C. (2017). Assessment of Altimetric Range and Geophysical Corrections and Mean Sea Surface Models—Impacts on Sea Level Variability around the Indonesian Seas. *Remote Sensing, 9*(2), 102. <https://doi.org/10.3390/rs9020102>
- Heitz, S., & Tscherning, C. C. (1972). Comparison of two methods of astrogeodetic geoid determination based on least squares prediction and collocation. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 24*(3), 271. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v24i3.10640>
- Heliani, L. S., & Noviantara, H. (2024). Pengaruh Densitas Topografi Terhadap Ketelitian Model Geoid: Studi kasus Pulau Sulawesi. *JGISE: Journal of Geospatial Information Science and Engineering, 7*(2), 191. <https://doi.org/10.22146/jgise.102122>
- Hirt, C., & Claessens, S. J. (2011). Ellipsoidal area mean gravity anomalies—Precise computation of gravity anomaly reference fields for remove-compute-restore geoid determination. *Studia Geophysica et Geodaetica, 55*(4), 589–607. <https://doi.org/10.1007/s11200-010-0070-2>
- Hirt, C., Kuhn, M., Claessens, S., Pail, R., Seitz, K., & Gruber, T. (2014). Study of the Earth's short-scale gravity field using the ERTM2160 gravity model. *Computers & Geosciences, 73*, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.09.001>

- Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy*. Springer Vienna. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-33545-1>
- Hutchings, S. J., & Mooney, W. D. (2021). The Seismicity of Indonesia and Tectonic Implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9), e2021GC009812. <https://doi.org/10.1029/2021GC009812>
- Hwang, C. (1998). Inverse Vening Meinesz formula and deflection-geoid formula: Applications to the predictions of gravity and geoid over the South China Sea. *Journal of Geodesy*, 72(5), 304–312. <https://doi.org/10.1007/s001900050169>
- Hwang, C., Hsu, H.-Y., & Jang, R.-J. (2002). Global mean sea surface and marine gravity anomaly from multi-satellite altimetry: Applications of deflection-geoid and inverse Vening Meinesz formulae. *Journal of Geodesy*, 76(8), 407–418. <https://doi.org/10.1007/s00190-002-0265-6>
- Idžanović, M., Ophaug, V., & Andersen, O. B. (2017). The coastal mean dynamic topography in Norway observed by CryoSat-2 and GOCE. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5609–5617. <https://doi.org/10.1002/2017GL073777>
- Kacimi, S., & Kwok, R. (2020). The Antarctic sea ice cover from ICESat-2 and CryoSat-2: Freeboard, snow depth, and ice thickness. *The Cryosphere*, 14(12), 4453–4474. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4453-2020>
- Kalu, I., Ndehedehe, C. E., Okwuashi, O., & Eyoh, A. E. (2022). Integration of satellite geodetic observations for regional geoid modeling using remove-compute-restore technique. *Earth Science Informatics*, 15(1), 233–251. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00716-0>
- Landy, J. C., Dawson, G. J., Tsamados, M., Bushuk, M., Stroeve, J. C., Howell, S. E. L., Krumpen, T., Babb, D. G., Komarov, A. S., Heorton, H. D. B. S., Belter, H. J., & Aksenov, Y. (2022). A year-round satellite sea-ice thickness record from CryoSat-2. *Nature*, 609(7927), 517–522. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05058-5>
- 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>
- Mayer-Gürr, T., Savcenko, R., Bosch, W., Daras, I., Flechtner, F., & Dahle, Ch. (2012). Ocean tides from satellite altimetry and GRACE. *Journal of Geodynamics*, 59–60, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.10.009>
- McCaffrey, R. (2009). The Tectonic Framework of the Sumatran Subduction Zone. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37(1), 345–366. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100212>
- Moritz, H. (1978). Least-squares collocation. *Reviews of Geophysics*, 16(3), 421–430. <https://doi.org/10.1029/RG016i003p00421>
- Morrow, R., Fu, L.-L., Rio, M.-H., Ray, R., Prandi, P., Le Traon, P.-Y., & Benveniste, J. (2023). Ocean Circulation from Space. *Surveys in Geophysics*, 44(5), 1243–1286. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09778-9>
- Nadzir, Z. A., & Rahmadhani, N. (2024). EVALUASI DAN KOMPARASI DARI MODEL ANOMALI GAYA BERAT di LAUTAN INDONESIA. *Jurnal Sains Informasi Geografi*, 7(2), 99. <https://doi.org/10.31314/jsig.v7i2.3073>
- Natawidjaja, D. H. (2018). Updating active fault maps and slip rates along the Sumatran Fault Zone, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118, 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012001>
- Ophaug, V., Breili, K., & Gerlach, C. (2015). A comparative assessment of coastal mean dynamic topography in Norway by geodetic and ocean approaches. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(12), 7807–7826. <https://doi.org/10.1002/2015JC011145>
- 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>
- Pahlevi, A., Syafianty, A., Susilo, S., Lumban-Gaol, Y., Putra, W., Triarahmadhana, B., Bramanto, B., Muntaha, R., El Fadhlila, K., Ladivanov, F., Amrossalma, H., Islam, L., Novianto, D., Huda, S., Wismadi, T., Efendi, J., Ramadhan,

- A., Wijaya, D., Prijatna, K., & Pramono, G. (2024). Geoid Undulation Model as Vertical Reference in Indonesia. *Scientific Data*, 11(1), 822. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03646-w>
- Pail, R., Kühtreiber, N., Wiesenhofer, B., Hofmann-Wellenhof, B., Of, G., Steinbach, O., Höggerl, N., Imrek, E., Ruess, D., & Ullrich, C. (2008). *The Austrian hybrid geoid in the ETRS89 system: Austrian Geoid 2008 (GRS80)* (Versi 1.0) [Dataset]. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/ISG.2008.001>
- Passaro, M., Nadzir, Z. A., & Quartly, G. D. (2018). Improving the precision of sea level data from satellite altimetry with high-frequency and regional sea state bias corrections. *Remote Sensing of Environment*, 218, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.007>
- Piñón, D. A., Zhang, K., Wu, S., & Cimbaro, S. R. (2017). A New Argentinean Gravimetric Geoid Model: GEOIDEAR. Dalam J. T. Freymueller & L. Sánchez (Ed.), *International Symposium on Earth and Environmental Sciences for Future Generations* (Vol. 147, hlm. 53–62). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/1345_2017_267
- Ramdani, D., Safi'i, A. N., Hartanto, P., Oktaviani, N., & Hariyono, M. I. (2021). Verification of the Jakarta Geoid Model from the Gravity Data of 2.5 km Resolution with Gravimetric Geoid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 873(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/873/1/012045>
- Reguzzoni, M., Carrion, D., De Gaetani, C. I., Albertella, A., Rossi, L., Sona, G., Batsukh, K., Toro Herrera, J. F., Elger, K., Barzaghi, R., & Sansó, F. (2021). Open access to regional geoid models: The International Service for the Geoid. *Earth System Science Data*, 13(4), 1653–1666. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1653-2021>
- Reusen, J. M., Root, B. C., Szwillus, W., Fullea, J., & Van Der Wal, W. (2020). Long-Wavelength Gravity Field Constraint on the Lower Mantle Viscosity in North America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(12), e2020JB020484. <https://doi.org/10.1029/2020JB020484>
- Sabri, L. M., Sudarsono, B., & Pahlevi, A. (2021). Geoid of South East Sulawesi from airborne gravity using Hotine approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 731(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/731/1/012014>
- Sandwell, D. T., Harper, H., Tozer, B., & Smith, W. H. F. (2021). Gravity field recovery from geodetic altimeter missions. *Advances in Space Research*, 68(2), 1059–1072. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.011>
- 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>
- Sansó, F., & Sideris, M. G. (2013). *Geoid determination: Theory and methods*. Springer.
- Sarsito, D. A., Wijaya, D. D., Syahrullah, M., Radjawane, I. M., & Trihantoro, N. F. (2019). Variability of sea surface topography in coastal area (study case: Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 339(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/339/1/012030>
- Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy* (2nd completely rev. and extended ed). Walter de Gruyter.
- Shih, H.-C., Heliani, L. S., Hsiao, Y., Hwang, C., & Pahlevi, A. M. (2024). *Advanced Geoid Modeling in Sulawesi and Accuracy Verification Strategies for Accommodating Diverse MSL Vertical Datums*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4448271/v1>
- Shilimkar, V., Abe, H., Roxy, M. K., & Tanimoto, Y. (2022). Projected future changes in the contribution of Indo-Pacific sea surface height variability to the Indonesian throughflow. *Journal of Oceanography*, 78(5), 337–352. <https://doi.org/10.1007/s10872-022-00641-w>
- Singh, S. C., Hananto, N. D., Chauhan, A. P. S., Permana, H., Denolle, M., Hendriyana, A., & Natawidjaja, D. (2010). Evidence of active backthrusting at the NE Margin of Mentawai Islands, SW Sumatra. *Geophysical Journal International*, 180(2), 703–714. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04458.x>

- Sjöberg, L. E. (2005). A discussion on the approximations made in the practical implementation of the remove–compute–restore technique in regional geoid modelling. *Journal of Geodesy*, 78(11–12), 645–653. <https://doi.org/10.1007/s00190-004-0430-1>
- 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>
- Tscherning, C. C. (2013). Geoid Determination by 3D Least-Squares Collocation. Dalam F. Sansò & M. G. Sideris (Ed.), *Geoid Determination* (Vol. 110, hlm. 311–336). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74700-0_7
- 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>
- Vaniček, P., & Krakiwsky, E. J. (1995). *Geodesy: The concepts* (2. ed., 5. print). Elsevier.
- Vignudelli, S., Birol, F., Benveniste, J., Fu, L.-L., Picot, N., Raynal, M., & Roinard, H. (2019). Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone. *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1319–1349. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09569-1>
- Wang, X., Liu, X., Zhao, D., Liu, B., Qiao, Q., Zhao, L., & Wang, X. (2022). Oceanic plate subduction and continental extrusion in Sumatra: Insight from S-wave anisotropic tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 580, 117388. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117388>
- Willberg, M., Zingerle, P., & Pail, R. (2020). Integration of airborne gravimetry data filtering into residual least-squares collocation: Example from the 1 cm geoid experiment. *Journal of Geodesy*, 94(8), 75. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01396-2>
- Yakubu, C., Ferreira, V., & Asante, C. (2017). Towards the Selection of an Optimal Global Geopotential Model for the Computation of the Long-Wavelength Contribution: A Case Study of Ghana. *Geosciences*, 7(4), 113. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040113>
- 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>
- Zhang, X., Kaban, M. K., Chen, C., & Liang, Q. (2023). An alternative method for estimating effective elastic thickness by the Vening Meinesz regional isostatic theory with application to continents. *Geophysical Journal International*, 233(2), 1444–1459. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac518>