

Penentuan *Mean Dynamic Topography* di Indonesia dengan Menggunakan Satelit Altimetri

Determination of Mean Dynamic Topography In Indonesia Using Altimetry Satellite

Muhammad Syahrullah Fathulhuda^{1*}, Dudy Darmawan Wijaya², Maulana Yudinugroho¹, dan Lysa Dora Ayu Nugraini¹

¹Program Studi Teknik Geomatika, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Yogyakarta 55283.

²Kelompok Keahlian Sains Geodesi, Rekayasa, dan Inovasi, Departemen Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung, Indonesia.

*Corresponding Author: muhammadsyahrullah.fathulhuda@upnyk.ac.id

Article Info:

Received: 30 – 04 - 2026

Accepted: 12 – 06 - 2026

Published: 25 – 07 - 2026

Kata kunci: Satelit Altimetri, Mean Sea Surface, Undulasi Geoid, Mean Dynamic Topography

Keywords: Altimetry Satellite, Mean Sea Surface, Geoid Undulation, Mean Dynamic Topography

Abstrak: Mean Dynamic Topography (MDT) telah lama dipahami sebagai salah satu parameter penting dalam kajian oseanografi maupun dalam penentuan datum vertikal. Kondisi perairan Indonesia yang unik, karena terletak di antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, serta belum tersedianya datum vertikal pada Sistem Referensi Geospasial Indonesia (SRGI 2013), menjadikan keberadaan MDT sangat relevan untuk memenuhi kebutuhan tersebut. Oleh karena itu, MDT diusulkan sebagai salah satu solusi yang dapat digunakan. Pada penelitian ini, MDT diturunkan dari Mean Sea Surface (MSS) dan undulasi geoid. Nilai undulasi geoid di wilayah Indonesia dapat diperoleh dengan cukup baik menggunakan model EGM2008, sedangkan MSS ditentukan berdasarkan pengamatan pasang surut jangka panjang yang direkam oleh satelit altimetri multi-misi. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan MDT di wilayah Indonesia. MDT diperoleh melalui selisih antara Mean Sea Surface (MSS), yang dibentuk dari hasil asimilasi data satelit Topex, Poseidon, Jason-1, GFO-1, dan Envisat, dengan model undulasi geoid EGM2008. Untuk menghasilkan MSS yang akurat, data altimetri terlebih dahulu dikoreksi terhadap berbagai kemungkinan kesalahan, kemudian dilakukan proses collinear dan filtering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MDT yang dihasilkan memiliki tingkat konsistensi yang baik terhadap model MDT pembandingan, dengan nilai RMS deviasi masing-masing sebesar 2,27 cm terhadap MDT-DTU10 dan 7,48 cm terhadap MDT-CNESCLS13. Selain itu, evaluasi awal menggunakan data in-situ menunjukkan bahwa model MDT yang dihasilkan memiliki residu yang lebih kecil dibandingkan MDT-DTU10 dan MDT-CNESCLS13 pada lokasi pengamatan. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa pendekatan yang digunakan berpotensi mempertahankan komponen gelombang pendek MDT pada wilayah perairan dangkal.

Abstract: It has been widely understood that Mean Dynamic Topography (MDT) is an important parameter for conducting oceanographic studies and determination of vertical datum. The unique condition of Indonesian sea (located between the Pacific and Indian Oceans) and the unavailability of the vertical datum in Indonesia's Geospatial Information System (SRGI 2013) relevant to the usefulness of MDT. Therefore, MDT is proposed to meet those needs. Here, MDT is derived through Mean Sea Surface (MSS) and geoid undulation. While accurate values of geoid undulation over the Indonesian region can be derived from EGM2008 model, the MSS has to be determined from long-term tidal observations as recorded by multi-mission Altimetry satellite. The purpose of this study is to determining MDT in Indonesia. The MDT is produced by subtracting the Mean Sea Surface (MSS), as derived from assimilation of Topex, Poseidon, Jason-1, GFO-1 and Envisat satellites, and geoid undulation model (EGM2008). In order to get accurate MSS, the altimetry data are corrected from any possible errors, and then they are co-lineared and filtered. The results show that the developed MDT model exhibits a high level of consistency with existing global MDT models, with RMS differences of approximately 2.27 cm and 7.48 cm relative to MDT-DTU10 and MDT-CNESCLS13, respectively. In addition, a preliminary evaluation using in-situ observations indicates that the developed MDT model yields smaller residuals than MDT-DTU10 and MDT-CNESCLS13 at the observation site. These results suggest that the proposed approach has the potential to preserve short-wavelength MDT signals in shallow-water environments.

How to Cite:

Fathulhuda, M. S., Wijaya, D. D., Yudinugroho, M., Nugraini, L. D. A. (2026). Penentuan Mean Dynamic Topography di Indonesia dengan Menggunakan Satelit Altimetri. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 6(1), 143-157. <https://doi.org/10.31315/imagi.v6i1.16908>.

1. PENDAHULUAN

Mean Dynamic Topography (MDT) merupakan deviasi antara Mean Sea Surface (MSS) dan geoid (Bingham, Haines, & Lea, 2014). Meskipun deviasi tersebut relatif kecil (± 2 meter), MDT merupakan parameter penting dalam berbagai kajian geodesi, oseanografi, maupun ilmu kebumihian lainnya (Bingham, Haines, & Hughes, 2008; Featherstone & Filmer, 2012). Oleh karena itu, pengembangan model MDT, baik dalam skala global maupun regional, menjadi hal yang penting untuk berbagai kebutuhan ilmiah dan praktis.

Dalam konteks Indonesia, MDT menjadi semakin penting karena beberapa alasan. Pertama, Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik aktif. Kondisi geologi tersebut menimbulkan berbagai permasalahan dalam kegiatan survei dan pemetaan di wilayah Indonesia. Hingga saat ini, datum vertikal darat dan laut di Indonesia masih belum terdefinisi secara nasional. Menurut Featherstone & Filmer (2012), model MDT regional yang akurat dapat digunakan untuk mendukung penentuan datum vertikal laut secara nasional. Kedua, Indonesia juga berada di antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, dimana sirkulasi dan transport massa air laut terjadi dalam kondisi yang cukup kompleks. Menurut Bingham dkk. (2008), MDT memiliki peranan penting dalam merepresentasikan sirkulasi geostropik dan transport massa air laut di permukaan laut.

Model MDT, baik dalam skala global maupun regional, dapat ditentukan menggunakan data satelit altimetri. Secara prinsip, satelit altimetri telah melakukan pengamatan Sea Surface Height (SSH) secara global dengan akurasi hingga tingkat sentimeter selama lebih dari 20 tahun (Chelton dkk., 2001). SSH merupakan tinggi muka air laut sesaat terhadap ellipsoid yang terdiri atas komponen dinamis laut yang bergantung terhadap waktu, komponen statik sirkulasi laut global, serta tinggi geoid (Woodworth dkk., 2015). Dengan merata-ratakan data SSH dalam periode pengamatan jangka panjang, maka akan diperoleh Mean Sea Surface (MSS) yang hanya terdiri atas komponen statik sirkulasi laut dan geoid. Komponen statik dari sirkulasi laut tersebut dikenal sebagai Mean Dynamic Topography (MDT). Dalam hal ini, komponen sirkulasi laut yang bergantung terhadap waktu diasumsikan tereliminasi melalui proses perataan. Oleh karena itu, MSS merepresentasikan superposisi antara MDT dan geoid (Woodworth dkk., 2015). Jika model MSS dari data altimetri dan model geoid yang akurat dapat diperoleh, maka MDT dapat dihitung dengan mengurangkan geoid dari MSS (Sansò & Sideris, 2013).

Pemodelan MDT dalam skala global telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Beberapa model MDT global yang telah dipublikasikan secara resmi antara lain MDT-DTU10 (Knudsen dkk., 2011) dan MDT-CNES-CLS13 (Rio, Mulet, & Picot, 2013; Rio, Mulet, & Picot, 2014). Kedua model tersebut memiliki akurasi yang cukup baik di perairan dalam, namun kurang optimal di wilayah perairan dangkal. Disisi lain, perkembangan penelitian MDT dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan adanya perhatian yang semakin besar terhadap peningkatan kualitas MDT pada wilayah pesisir dan perairan dangkal. Wu dkk. (2022) menunjukkan bahwa pemanfaatan data altimetri *Synthetic Aperture Radar* (SAR) mampu meningkatkan kualitas MSS dan menghasilkan estimasi MDT pesisir yang lebih akurat dibandingkan pendekatan konvensional. Sementara itu, pengembangan model MDT global generasi terbaru, seperti DTU22MDT dan CNES-CLS22, dilakukan melalui pemanfaatan MSS dan model geoid yang lebih mutakhir, penyempurnaan proses filtering, serta integrasi berbagai data oseanografi *in-situ* seperti drifter, profil hidrografi, dan *high-frequency radar* untuk meningkatkan representasi sirkulasi laut dan arus geostropik (Jousset dkk., 2025; Knudsen dkk., 2022).

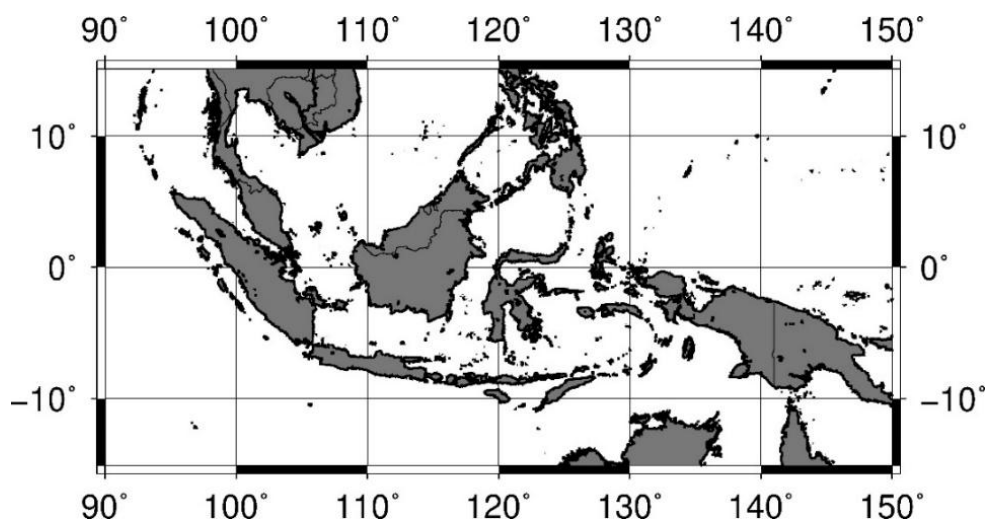
Berbagai penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kualitas MDT sangat bergantung pada kemampuan model dalam merepresentasikan dinamika laut pada skala spasial yang semakin rinci. Namun demikian, wilayah pesisir, *continental shelf*, dan perairan dangkal masih menjadi tantangan utama dalam pengembangan MDT karena kualitas MSS dan model geoid pada wilayah tersebut umumnya lebih rendah dibandingkan perairan dalam serta memerlukan strategi pemrosesan yang lebih khusus (Jousset dkk., 2025; Wu dkk., 2022). Kondisi ini menjadi sangat relevan bagi Indonesia yang didominasi oleh perairan dangkal dan wilayah kepulauan yang kompleks.

Berbeda dengan model MDT global yang umumnya dioptimalkan untuk perairan dalam dan menerapkan pendekatan filtering yang seragam secara global, penelitian ini mengembangkan model MDT regional Indonesia berbasis data multi-mission satelit altimetri dengan pendekatan filtering yang dirancang untuk mempertahankan komponen gelombang pendek (*short wavelength*) pada wilayah perairan dangkal. Pendekatan tersebut diterapkan dengan mempertimbangkan karakteristik oseanografi Indonesia yang kompleks serta dominasi wilayah laut dangkal yang berpotensi mengandung variasi MDT pada skala spasial yang lebih kecil dibandingkan perairan samudra terbuka. Dengan pendekatan tersebut, model MDT yang dihasilkan diharapkan mampu merepresentasikan karakteristik spasial lokal secara lebih baik dibandingkan model MDT global, sekaligus mendukung berbagai kebutuhan geodesi dan oseanografi di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di wilayah Indonesia dengan batas koordinat 15°LU – 15°LS dan 90°BT – 150°BT (lihat Gambar 1). Dalam penelitian ini, MDT ditentukan dengan mengurangi model geoid EGM2008 dari Mean Sea Surface (MSS), yang diperoleh dari asimilasi data satelit Topex, Poseidon, Jason-1, GFO-1, dan Envisat. Untuk memperoleh model MSS yang akurat, data altimetri terlebih dahulu dikoreksi dari berbagai kemungkinan kesalahan, kemudian dilakukan proses collinear adjustment dan filtering.

Proses collinear adjustment dilakukan untuk mengidentifikasi kesalahan orbit radial yang disebabkan oleh keterbatasan informasi medan gravitasi dan gaya non-gravitasi (Van Gysen dkk., 1992). MDT hasil perhitungan masih terkontaminasi oleh kesalahan kecil yang berasal dari geoid omission error dan residual geophysical errors. Oleh karena itu, Gaussian filter digunakan untuk mengeliminasi kesalahan-kesalahan tersebut. Pemilihan filter ini didasarkan pada beberapa penelitian sebelumnya yang berhasil mengurangi kesalahan kecil pada model MDT (Andersen, Knudsen, & Stenseng, 2016; Bingham dkk., 2008; Bosch & Savcenko, 2010; Knudsen dkk., 2011). Dalam penelitian ini perlu ditekankan bahwa, untuk mempertahankan komponen panjang gelombang pendek pada MDT, proses filtering dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi batimetri di wilayah Indonesia. Oleh karena itu, data batimetri tambahan juga digunakan dalam proses pemodelan.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.1 Data

Berdasarkan metode pemodelan MDT yang digunakan dalam penelitian ini, maka diperlukan dua data masukan, yaitu SSH untuk menghitung MSS dan undulasi geoid.

Sea Surface Height dan Mean Sea Surface

Data SSH diperoleh dari Radar Altimeter Database System (RADS) versi 4.2.11 (Scharroo, 2018; Scharroo dkk., 2012). Dalam penelitian ini, nilai SSH dihitung berdasarkan pengamatan altimetri yang telah dikoreksi terhadap berbagai sumber kesalahan geofisik dan instrumental yang tersedia pada basis data RADS. Koreksi yang diterapkan meliputi koreksi *dry tropospheric refraction*, *wet tropospheric refraction*, *ionospheric refraction*, *sea-state bias*, *atmospheric pressure loading (inverse barometer correction)*, koreksi pasang surut laut (*ocean tide*), koreksi pasang surut bumi padat (*solid earth tide*), *pole tide*, serta koreksi orbit presisi. Penerapan koreksi-koreksi tersebut bertujuan untuk menghilangkan pengaruh atmosfer, kondisi permukaan laut, gaya pasang surut, dan kesalahan orbit terhadap pengukuran tinggi muka laut sehingga nilai SSH yang diperoleh merepresentasikan kondisi muka laut yang sebenarnya. Proses quality control dilakukan menggunakan kriteria bawaan RADS (*default quality control*) (Scharroo, 2018; Scharroo dkk., 2012). Pada proses ini, data yang memiliki nilai range RMS, jumlah echo valid (*range_numval*), *significant wave height* (SWH), sigma0, maupun *engineering flags* dan *geophysical flags* di luar batas yang ditentukan oleh masing-masing misi satelit akan ditandai sebagai data tidak valid dan tidak digunakan dalam proses pengolahan selanjutnya. Dengan pendekatan tersebut, pengamatan yang terindikasi mengandung kesalahan instrumental, kehilangan jejak pengamatan (*tracker loss*), maupun gangguan kualitas pengamatan lainnya dapat dieliminasi secara otomatis.

Selain *quality control* bawaan RADS, proses penyaringan data dilakukan melalui analisis collinear untuk mengidentifikasi dan menghilangkan data penciran (*outlier*) yang masih tersisa pada setiap lintasan satelit. Pada wilayah pesisir dan dekat daratan, penanganan data dilakukan melalui penerapan *quality flag* RADS yang secara otomatis menolak pengamatan yang terindikasi mengalami *land contamination*. Kondisi tersebut terjadi ketika jejak pengamatan (*footprint*) radar altimetri tidak sepenuhnya berada di atas permukaan laut sehingga waveform yang diterima tidak lagi mengikuti bentuk ideal *Brown ocean waveform* (Chelton dkk., 2001). Akibatnya, proses retracking dapat menghasilkan estimasi jarak satelit–permukaan laut yang kurang akurat. Oleh karena itu, pengamatan yang terindikasi mengalami *land contamination* tidak digunakan dalam pembentukan model MSS dan MDT.

Selain *quality control* tersebut, dilakukan analisis collinear untuk memastikan konsistensi spasial data antar siklus pengamatan. Dalam pendekatan ini, hanya data SSH 1 Hz yang memiliki posisi footprint pengamatan yang berimpit pada lintasan yang sama antar siklus pengamatan yang digunakan dalam proses perataan. Data yang tidak memenuhi kriteria kolokasi tersebut tidak digunakan dalam pembentukan MSS. Seluruh data SSH direferensikan terhadap ellipsoid WGS84 sehingga MSS yang dihasilkan berada pada sistem referensi yang sama dengan model geoid yang digunakan dalam penelitian ini. Dalam hal ini, MSS diperoleh dengan merata-ratakan nilai *Sea Surface Height* (SSH) hasil pengamatan satelit altimetri *Exact Repeat Mission* (ERM), yang diunduh dari Radar Altimeter Database System (RADS) versi 4.2.11. RADS (Scharroo dkk., 2012) merupakan basis data satelit altimetri yang dikembangkan oleh Delft University of Technology, NOAA Laboratory for Satellite Altimetry, dan EUMETSAT, yang menyediakan berbagai produk altimetri beserta koreksi geofisik dan fasilitas pengolahan data yang seragam untuk berbagai misi satelit altimetri.

Pada penelitian ini digunakan data dari empat misi satelit altimetri, yaitu TOPEX/Poseidon, Jason-1, GFO-1, dan Envisat. Data SSH yang digunakan merupakan data sepanjang lintasan (*along-track*) 1 Hz dengan resolusi spasial sekitar 6–7 km antar titik pengamatan. Untuk misi TOPEX/Poseidon, Jason-1, dan GFO-1, resolusi spasial data berkisar 6–7 km, sedangkan untuk Envisat sekitar 7 km. Misi TOPEX/Poseidon menggunakan orbit *Exact Repeat Mission* dengan resolusi temporal 9,9156 hari dan terdiri atas 49 lintasan (*pass*) per siklus. Data TOPEX digunakan pada periode 25 September 1992 hingga 11 Agustus 2002 sebanyak 364 siklus, sedangkan data Poseidon digunakan pada periode 1 Oktober 1992 hingga 12 Juli 2002 sebanyak 361 siklus. Satelit Jason-1 memiliki resolusi temporal 9,9156 hari dengan 49 lintasan per siklus dan digunakan pada periode 15 Januari 2002 hingga 26 Januari 2009 sebanyak 260 siklus. Satelit GFO-1 memiliki resolusi temporal 17 hari dengan 96 lintasan per siklus dan digunakan pada periode 7 Januari 2000 hingga 17 September 2008 sebanyak 186 siklus. Sementara itu, satelit Envisat memiliki resolusi temporal 35 hari dengan 193 lintasan per siklus dan digunakan pada periode 14 Mei 2002 hingga 22 Oktober 2010 sebanyak 88 siklus. Kombinasi berbagai misi satelit tersebut menghasilkan

cakupan temporal yang melebihi 18 tahun serta cakupan spasial yang lebih baik untuk pembentukan model MSS dan MDT di wilayah Indonesia.

Modul Undulasi Geoid

Data undulasi geoid diperoleh dari International Center for Global Earth Model (ICGEM). ICGEM merupakan layanan basis data daring yang menyediakan berbagai model undulasi geoid hasil koordinasi International Gravity Field Service (IGFS) dan International Association of Geodesy (IAG). Model undulasi geoid yang digunakan dalam penelitian ini adalah EGM2008 dalam bentuk grid dengan resolusi spasial 1 menit $\times$ 1 menit. Model EGM2008 yang digunakan berada pada sistem referensi ellipsoid WGS84 dengan tide system mean tide, sehingga konsisten dengan referensi yang digunakan pada data MSS. Konsistensi sistem referensi dan tide system diperlukan untuk menghindari munculnya bias sistematis pada proses pengurangan MSS dan undulasi geoid dalam pembentukan model MDT. Pemilihan model EGM2008 didasarkan pada resolusi spasialnya yang tinggi serta mendekati resolusi spasial satelit altimetri, yaitu sekitar 7 km.

Model Batimetri

Data batimetri yang digunakan dalam penelitian ini adalah model batimetri global General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). Model batimetri GEBCO merupakan hasil integrasi data batimetri in-situ, data gravitasi berbasis satelit, GEBCO digital atlas, satelit altimetri, dan Globe Land One-km Elevation Base (GLOBE). Model batimetri ini tersedia dalam bentuk grid dengan resolusi spasial 1 menit $\times$ 1 menit.

2.2 Metode

Perhitungan SSH

Dalam Penelitian ini, SSH yang digunakan telah melewati proses koreksi geofisik yang merupakan standar dari penggunaan data altimetri dari RADS (Scharroo dkk., 2012). SSH yang dihitung merupakan fungsi dari lokasi, waktu pengamatan, jalur pengamatan satelit, dan jenis satelit altimetri (lihat persamaan 1).

$$SSH(\lambda, \phi, t, j_s, e_\lambda, e_t, n_p) = \hat{h} - \hat{R} \quad (1)$$

dengan *SSH* merupakan tinggi muka air laut sesaat terhadap bidang ellipsoid WGS84 yang diperoleh dari selisih antara tinggi orbit satelit altimetri terkoreksi $\hat{h}$ dan jarak terkoreksi antara satelit dengan permukaan laut $\hat{R}$. Nilai SSH tidak hanya bergantung pada posisi pengamatan yang dinyatakan oleh koordinat bujur λ dan lintang ϕ , tetapi juga dipengaruhi oleh waktu pengamatan t , jenis satelit altimetri j_s , identitas/nomor jalur perekaman satelit n_p , lokasi perpotongan jalur perekaman dengan ekuator e_λ , waktu lintasan satelit pada ekuator e_t , serta identitas jalur perekaman satelit n_p . Parameter-parameter tersebut diperlukan untuk mengidentifikasi karakteristik setiap lintasan satelit dan menjadi dasar dalam proses *collinear adjustment*.

Setiap nilai SSH pada titik pengamatan satelit memiliki koordinat (bujur dan lintang), waktu pengamatan (dimulai dari tahun 1985 dalam detik), dan identitas jalur perekaman untuk masing-masing jenis satelit altimetri. Berdasarkan identitasnya, untuk masing-masing jalur perekaman satelit, setiap titik pengamatan memiliki bujur koordinat dan waktu pengamatan pada saat jalur perekaman berpotongan dengan ekuator. Kedua variabel tersebut merupakan data masukkan untuk melakukan *collinear adjustment*, sehingga SSH terhadap waktu pengamatan untuk setiap titik didapatkan untuk menghitung MSS.

Perhitungan MSS

Hasil dari perhitungan SSH, merupakan SSH untuk setiap titik pengukuran dan satelit altimetri pada waktu pengamatan tertentu. Disisi lain, secara praktis, MSS dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2. MSS tersebut merupakan fungsi dari lokasi dan jenis satelit yang digunakan. Oleh karena itu, diperlukan

nilai SSH dengan lokasi yang identik dan jenis satelit yang sama untuk dapat menghitung MSS dengan merata-ratakan SSH tersebut. Rata-rata dilakukan berdasarkan jumlah data yang terekam dari awal pengukuran ($t=1$) sampai periode pengamatan satelit berakhir untuk lokasi yang identik dan jenis satelit yang sama

$$MSS(\lambda, \varphi, j_s) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n SSH(\lambda, \varphi, t, j_s, e_\lambda, e_t) \quad (2)$$

dengan *MSS* merupakan *Mean Sea Surface* atau tinggi muka laut rata-rata terhadap bidang ellipsoid WGS84 yang diperoleh melalui perataan temporal data *SSH* pada lokasi yang identik. Nilai *MSS* dihitung dari rata-rata seluruh pengamatan *SSH* pada berbagai waktu pengamatan t untuk setiap jalur perekaman satelit altimetri j_s setelah dilakukan proses *collinear adjustment*. Dalam hal ini, informasi posisi lintasan satelit pada ekuator e_λ dan waktu lintasan satelit pada ekuator e_t digunakan untuk mengidentifikasi jalur perekaman yang sama sehingga variasi temporal *SSH* dapat dihitung pada lokasi yang identik.

Jumlah data yang terekam tersebut direpresentasikan oleh jumlah perekaman pada satu titik yang identik selama perputarannya/*cycle* (periode pengamatan satelit terhadap resolusi temporal satelit). Namun, titik tersebut tidak dapat langsung diidentifikasi akibat kesalahan pada radial orbit satelit. Kesalahan orbit pada satelit tersebut disebabkan oleh informasi *gravity field* dan *non-gravitational forces* yang kurang memadai (Van Gysen dkk., 1992). Hal ini berakibat pada pergeseran lokasi titik pada identitas jalur perekaman yang sama setiap perputarannya/*cycle*. Oleh karena itu, *collinear adjustment* perlu dilakukan untuk mengidentifikasi setiap titik yang berada pada jalur perekaman yang sama, sehingga *SSH* terhadap periode pengamatannya dan nilai *MSS* pada titik tersebut dapat diketahui (Van Gysen dkk., 1992).

Secara praktis, *collinear adjustment* dapat dilakukan dengan menggunakan bujur koordinat dan waktu pengamatan pada saat jalur perekaman satelit berpotongan dengan ekuator. Selanjutnya, pergeseran titik pengamatan akibat kesalahan radial orbit satelit dapat diidentifikasi berdasarkan jarak dan selisih waktu dari bujur koordinat dan waktu pengamatan pada saat berpotongan dengan ekuator. Titik yang bergeser tersebut berada pada rentang 1 Hz atau 1 detik atau 6000 s/d 7000 meter (Kim, 2015). Dengan kata lain, variasi *SSH* terhadap waktu pengamatannya di setiap titik pengamatan diasumsikan identik pada rentang tersebut. Variasi *SSH* tersebut yang digunakan untuk menghitung *MSS* di setiap titik.

Pemodelan Mean Dynamic Topography (MDT)

Mean Dynamic Topography (MDT) merupakan selisih antara *Mean Sea Surface* (*MSS*) dan undulasi geoid (Andersen & Knudsen, 2009; Sansò & Sideris, 2013). Oleh karena itu, MDT dapat dihitung dengan mengurangkan model geoid dari *MSS* yang berada pada sistem referensi dan domain spasial yang sama (Bingham dkk., 2008), yaitu:

$$MDT(\lambda, \varphi) = MSS(\lambda, \varphi) - N(\lambda, \varphi) \quad (3)$$

dengan MDT adalah *Mean Dynamic Topography*, *MSS* adalah *Mean Sea Surface*, *N* adalah undulasi geoid, sedangkan λ dan φ masing-masing menyatakan koordinat bujur dan lintang.

Dalam penelitian ini, model undulasi geoid EGM2008 digunakan untuk menghitung MDT. Pemilihan EGM2008 didasarkan pada resolusi spasialnya yang tinggi sehingga mampu mengurangi pengaruh *geoid omission error* pada model MDT (Bingham dkk., 2008). Karena *MSS* hasil pengamatan satelit altimetri tidak tersedia dalam bentuk grid, maka nilai undulasi geoid pada setiap titik pengamatan altimetri diperoleh melalui interpolasi *bicubic spline*. Selanjutnya, MDT dihitung dengan mengurangkan nilai geoid hasil interpolasi dari *MSS* pada setiap titik pengamatan.

Model MDT yang diperoleh dari Persamaan (3) masih mengandung *geoid omission error* yang dapat menimbulkan osilasi Gibbs pada permukaan MDT. Oleh karena itu, proses filtering diperlukan untuk mengurangi pengaruh kesalahan tersebut. Dalam penelitian ini digunakan *Gaussian Filter* karena telah terbukti efektif dalam mengurangi *geoid omission error* pada model MDT (Andersen dkk., 2016; Bingham

dkk., 2008; Bosch & Savcenko, 2010; Knudsen dkk., 2011). Fungsi *Gaussian Filter* satu dimensi yang digunakan dapat dinyatakan sebagai:

$$G_{1D}(r) = \frac{\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (4)$$

dengan r adalah jarak terhadap pusat filter dan σ merupakan standar deviasi Gaussian Filter. Nilai σ dihitung berdasarkan radius filter menggunakan hubungan:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{2}\right)^2}{2 \ln(2)}} \quad (5)$$

Pada penelitian ini, filtering dilakukan pada setiap jalur perekaman satelit altimetri. Untuk mengurangi pengaruh kesalahan sistematik antarjalur perekaman (*orange skin effect*), model MDT hasil filtering satu dimensi dikoreksi menggunakan residual hasil perbedaan antara model MDT hasil filtering dua dimensi dan model MDT hasil filtering satu dimensi. Residual tersebut selanjutnya difilter menggunakan Gaussian Filter untuk mempertahankan komponen yang merepresentasikan orange skin effect sebelum ditambahkan kembali ke model MDT hasil filtering satu dimensi (Bosch & Savcenko, 2010). Dengan demikian, model MDT terkoreksi dihitung menggunakan persamaan:

$$MDT_{\{ITBSW\}} = MDT_{\{1D\}} + R_f \quad (6)$$

dengan,

$$R_f = Filter(MDT_{\{2D\}} - MDT_{\{1D\}}) \quad (7)$$

dengan $MDT_{\{ITBSW\}}$ adalah model MDT hasil koreksi, $MDT_{\{1D\}}$ adalah model MDT hasil filtering satu dimensi, $MDT_{\{2D\}}$ adalah model MDT hasil filtering dua dimensi, dan R_f adalah residual yang telah melalui proses filtering untuk merepresentasikan komponen kesalahan sistematik antarjalur perekaman.

Berbeda dengan pendekatan MDT global yang umumnya menerapkan radius filter besar untuk seluruh wilayah, penelitian ini menerapkan radius filter sebesar 80 km pada jalur perekaman yang berada di perairan dangkal dengan kedalaman kurang dari 1000 meter. Pemilihan radius tersebut didasarkan pada hasil penelitian Bingham dkk. (2014) yang menunjukkan bahwa komponen gelombang pendek MDT berada pada skala spasial tersebut. Penerapan filter pada wilayah perairan dangkal dilakukan dengan mempertimbangkan bahwa variasi muka laut pada wilayah tersebut cenderung lebih fluktuatif akibat pengaruh *bottom friction* (Tierney, Kantha, & Born, 2000). Skema ini disesuaikan dengan kondisi wilayah Indonesia yang didominasi oleh perairan dangkal. Data kedalaman yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari model batimetri GEBCO. Dengan pendekatan ini, proses filtering tidak hanya mengurangi *geoid omission error*, tetapi juga mempertahankan komponen gelombang pendek MDT yang penting untuk merepresentasikan karakteristik oseanografi lokal pada wilayah perairan dangkal Indonesia. Model MDT yang dihasilkan melalui pendekatan tersebut selanjutnya disebut sebagai MDT-ITBSW (*Mean Dynamic Topography – Institut Teknologi Bandung Short Wavelength*).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

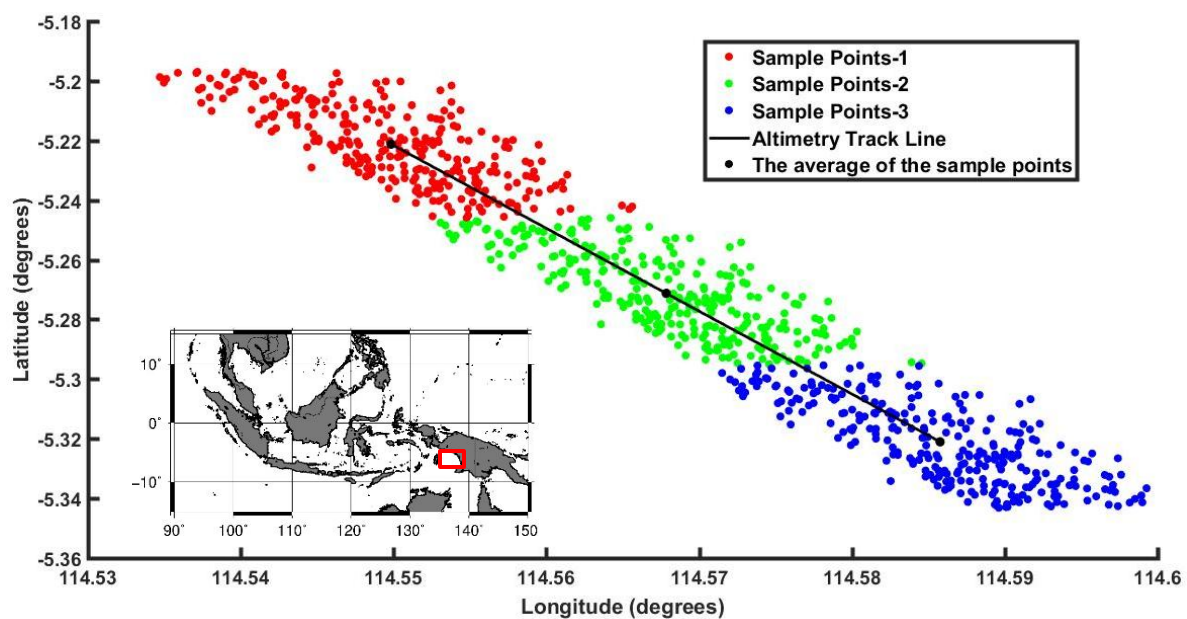
Dalam penentuan model MDT global, proses filtering umumnya dilakukan menggunakan Gauss Filter dengan tujuan untuk mengeliminasi Geoid Omission Error. Namun, proses filtering tersebut juga

berdampak pada hilangnya komponen gelombang pendek MDT. Disisi lain, komponen gelombang pendek MDT merupakan informasi yang penting, terutama pada wilayah perairan dangkal yang memiliki variasi spasial relatif tinggi.

Dalam penelitian ini, proses filtering dimodifikasi untuk mempertahankan komponen gelombang pendek pada model MDT yang dihasilkan. Modifikasi dilakukan dengan mengurangi radius filter dan menerapkannya secara khusus pada wilayah perairan dangkal. Pendekatan ini dimaksudkan agar model MDT yang dihasilkan lebih sesuai dengan karakteristik perairan Indonesia yang didominasi oleh perairan dangkal. Dalam penelitian ini, model MDT yang mampu mempertahankan komponen gelombang pendek tersebut selanjutnya disebut sebagai MDT-ITBSW.

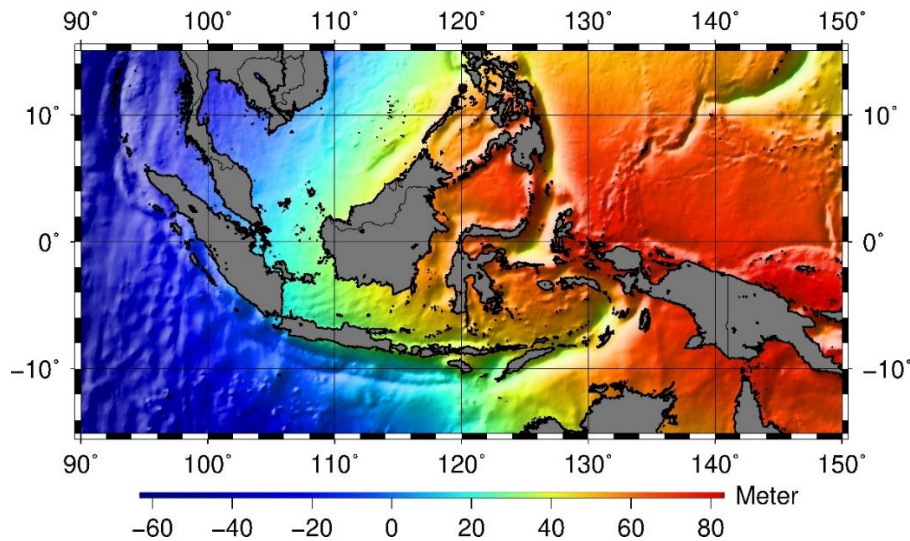
Mean Sea Surface (MSS) Determination

MSS dapat dihitung apabila variasi SSH pada setiap titik pengamatan terhadap waktu pengamatan diketahui. Namun, lokasi titik pengamatan yang secara teoritis identik pada setiap periode pengamatan mengalami pergeseran akibat radial orbit error satelit (lihat Gambar 2). Oleh karena itu, variasi SSH pada suatu titik pengamatan tidak dapat diperoleh secara langsung dari data hasil observasi. Proses koreksi dan penyesuaian posisi titik pengamatan perlu dilakukan terlebih dahulu agar variasi SSH yang dihitung benar-benar merepresentasikan perubahan muka laut pada lokasi yang sama selama periode pengamatan.



Gambar 2. Distribusi sampel titik pengamatan satelit sebelum proses *collinear adjustment*.

Berdasarkan Gambar 2, dengan menggunakan tiga sampel titik pengamatan yang berbeda, pergeseran titik akibat radial orbit error satelit berkisar hingga $\pm 0,05^\circ$ pada arah lintang dan $\pm 0,04^\circ$ pada arah bujur. Oleh karena itu, proses *collinear adjustment* perlu dilakukan agar variasi temporal SSH pada lokasi yang identik dapat diketahui dengan lebih baik. Dalam penelitian ini, lokasi yang dianggap identik ditentukan berdasarkan nilai rata-rata koordinat pada area pergeseran tersebut. Selanjutnya, variasi SSH diasumsikan terjadi pada koordinat rata-rata tersebut. Dengan kata lain, variasi spasial SSH pada area pergeseran diasumsikan bersifat homogen. Model MSS yang dihasilkan dari proses *collinear adjustment* dapat dilihat pada Gambar 3.



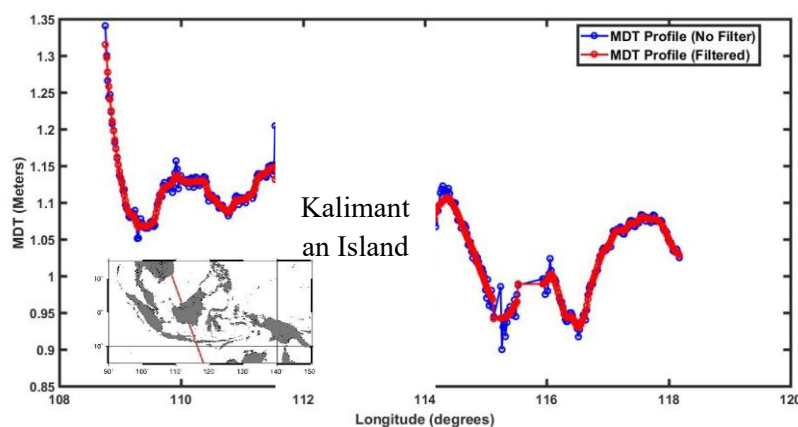
Gambar 3. Model MSS.

Berdasarkan Gambar 3, nilai MSS di wilayah Indonesia berkisar antara -60 meter hingga 80 meter. Secara umum, permukaan MSS menunjukkan kecenderungan meningkat dari wilayah barat menuju timur Indonesia. Selanjutnya, model MDT ditentukan dengan mengurangi model undulasi geoid EGM2008 dari model MSS yang telah diperoleh.

Mean Dynamic Topography (MDT)

MDT-ITBSW merupakan model MDT akhir yang telah melalui proses filtering menggunakan *Gauss Filter*. Performa *Gauss Filter* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan profil MDT pada Gambar 5, terlihat adanya fenomena Gibbs yang disebabkan oleh *geoid omission error* pada model MDT. Profil yang ditampilkan merupakan profil MDT pada wilayah perairan dangkal dengan kedalaman rata-rata kurang dari 1000 meter. Pada wilayah tersebut, permukaan MDT menunjukkan fluktuasi yang relatif tinggi akibat pengaruh *bottom friction*.

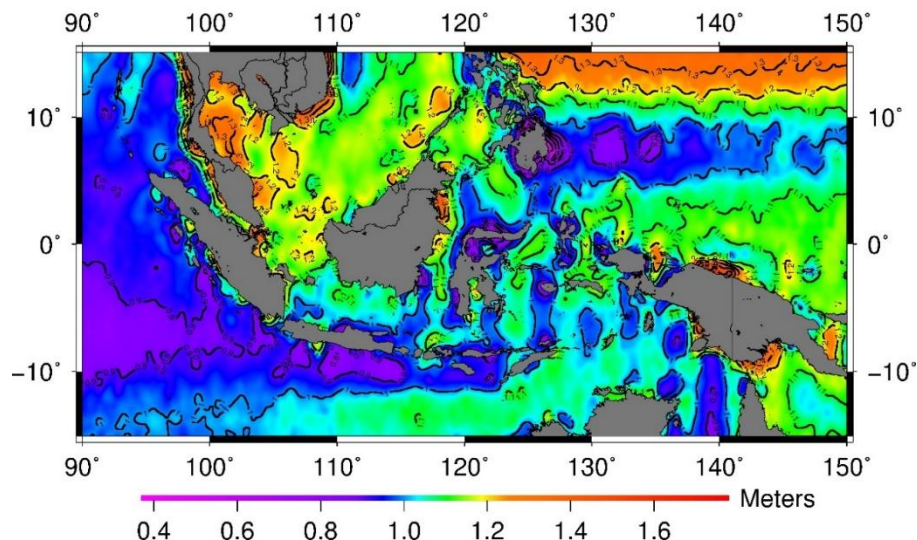
Hasil filtering menunjukkan bahwa penggunaan *Gauss Filter* efektif dalam mengurangi pengaruh *geoid omission error* tanpa menghilangkan karakteristik utama profil MDT pada perairan dangkal. Dengan demikian, komponen gelombang pendek MDT yang berkaitan dengan kondisi oseanografi lokal masih dapat dipertahankan. Model MDT-ITBSW yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Performa *Gauss Filter* pada profil MDT di wilayah perairan dangkal.

Model MDT-ITBSW yang dihasilkan (Gambar 5) memiliki rentang nilai antara 0,4 meter hingga 1,8 meter. Rentang nilai tersebut masih berada dalam kisaran teoritis MDT, yaitu sekitar ± 2 meter (Vaniček, Kingdon, & Santos, 2012). Hal ini menunjukkan bahwa model MDT yang dihasilkan memiliki karakteristik yang sesuai dengan kondisi fisik permukaan laut secara umum.

Berdasarkan model MDT pada Gambar 5, wilayah perairan utara Papua, Kalimantan, dan Jawa, serta kawasan Samudra Pasifik dan Samudra Hindia, menunjukkan nilai MDT yang relatif lebih tinggi. Disisi lain, wilayah perairan selatan Jawa dan barat daya Sumatra memiliki nilai MDT yang relatif lebih rendah. Perbedaan elevasi permukaan MDT tersebut mengindikasikan adanya variasi distribusi massa air laut dan karakteristik sirkulasi laut yang berbeda di wilayah Indonesia.



Gambar 5. Model MDT-ITBSW.

MDT terbentuk akibat adanya sirkulasi laut yang menyebabkan deviasi antara Mean Sea Level (MSL) dan geoid (Vaniček, Kingdon, & Santos, 2012). Semakin besar nilai MDT pada suatu lokasi, maka semakin besar pula pengaruh sirkulasi laut yang bekerja di wilayah tersebut. Salah satu komponen utama yang membentuk MDT adalah sirkulasi massa air laut global (Chelton dkk., 2001). Oleh karena itu, fenomena oseanografi berskala besar seperti El Niño akan terekam dan direpresentasikan dalam model MDT, khususnya pada wilayah Samudra Pasifik.

Sirkulasi massa air laut global, termasuk fenomena El Niño, merupakan konsekuensi dari *Geostrophic Force Balance*, yaitu kondisi keseimbangan antara gaya Coriolis dan gradien tekanan pada permukaan laut. Dengan kata lain, arus geostropik direpresentasikan oleh gradien permukaan yang terbentuk pada model MDT. Jika pengaruh percepatan arus laut dan gradien tekanan atmosfer diabaikan, maka arus geostropik dapat dihitung dan dimodelkan menggunakan informasi MDT (Knudsen dkk., 2011). Selanjutnya, informasi arus geostropik tersebut dapat dimanfaatkan untuk berbagai kajian oseanografi, terutama yang berkaitan dengan dinamika dan sirkulasi laut regional maupun global.

Evaluasi Model Mean Dynamic Topography (MDT)

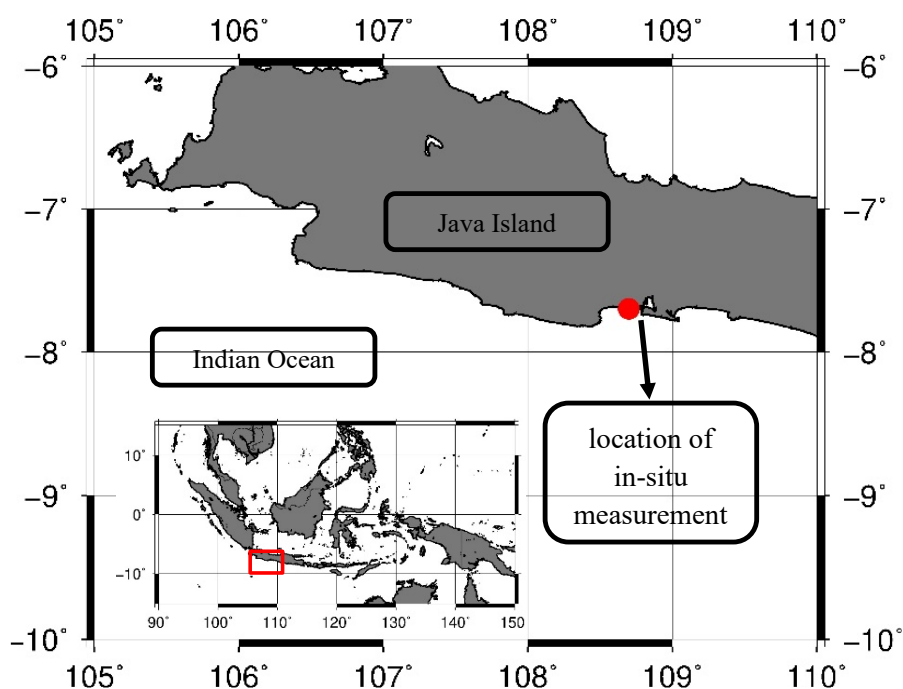
Model MDT-ITBSW dievaluasi melalui perbandingan terhadap dua model MDT global yang telah banyak digunakan, yaitu MDT-DTU10 dan MDT-CNESCLS13. Berdasarkan nilai RMS yang diperoleh (Tabel 1), model MDT-ITBSW memiliki nilai RMS sebesar 0,0227 meter terhadap MDT-DTU10 dan 0,0748 meter terhadap MDT-CNESCLS13. Nilai RMS tersebut menunjukkan bahwa model MDT-ITBSW memiliki tingkat konsistensi yang baik terhadap kedua model MDT global. Namun demikian, perbandingan ini tidak dimaksudkan sebagai validasi independen, melainkan sebagai evaluasi tingkat kesesuaian model MDT-ITBSW terhadap model MDT global yang telah tersedia.

Disisi lain, model MDT-ITBSW dikembangkan dengan mempertahankan komponen gelombang pendek MDT yang umumnya tereduksi pada model MDT global akibat proses filtering. Oleh karena itu, perbandingan terhadap data *in-situ* dilakukan sebagai evaluasi awal untuk menilai apakah komponen gelombang pendek yang dipertahankan dalam model MDT-ITBSW memberikan representasi yang lebih dekat terhadap kondisi lapangan dibandingkan model MDT global pembeding.

Tabel 1. Total RMS pada MDT-ITBSW model (meter).

Model MDT Global	Nilai RMS (meter)
MDT_CNES-CLS13	0,0748
MDT-DTU10	0,0227

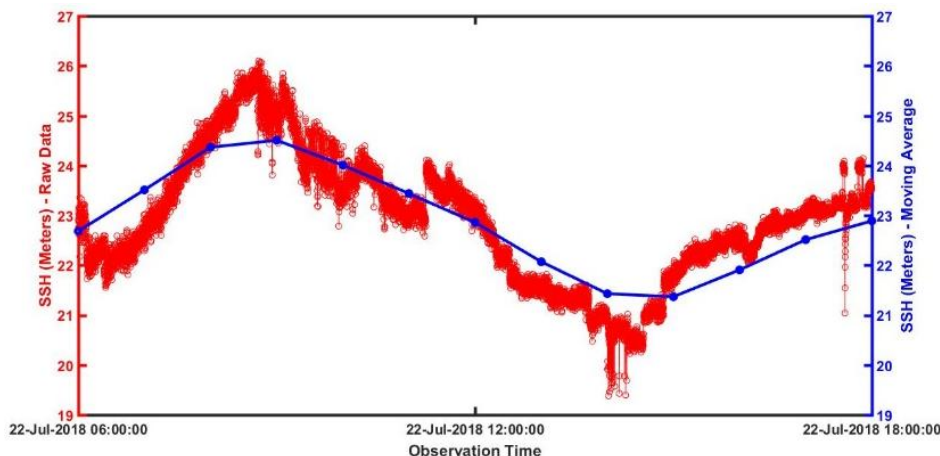
Pengukuran *in-situ* dilakukan di wilayah pesisir Pangandaran yang berada pada koordinat 7,6992°LS dan 108,6992°BT (Gambar 6). Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada karakteristiknya yang berada di wilayah pesisir dan perairan dangkal. Kondisi ini dipilih untuk menguji keandalan model MDT-ITBSW pada lingkungan yang relatif kompleks, mengingat satelit altimetri memiliki keterbatasan dalam melakukan pengamatan pada wilayah perairan dangkal dan kawasan pesisir. Oleh karena itu, hasil evaluasi pada lokasi tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai performa model MDT-ITBSW dalam merepresentasikan kondisi permukaan laut di wilayah pesisir Indonesia.



Gambar 6. Lokasi pengukuran *in-situ*.

Nilai MDT *in-situ* diperoleh dengan mengurangkan model undulasi geoid EGM2008 dari nilai MSS pada lokasi pengukuran. Nilai SSH diperoleh dari hasil pengamatan GPS *Real Time Precise Point Positioning* (RT-PPP) yang dipasang di atas kapal. Pengamatan SSH dilakukan selama 12 jam dengan interval perekaman data setiap satu detik (lihat Gambar 7).

Nilai SSH yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil *resampling* data menjadi interval satu jam menggunakan metode *moving average* (Gambar 7). Selanjutnya, nilai rata-rata SSH yang telah dikoreksi terhadap pengaruh pasang surut laut dianggap sebagai nilai MSS pada lokasi pengukuran *in-situ*. Nilai MSS tersebut kemudian digunakan dalam proses penentuan MDT *in-situ* sebagai data pembeding untuk validasi model MDT-ITBSW.



Gambar 7. Nilai SSH hasil pengukuran *in-situ* (data mentah dan *moving average*).

Konstituen pasang surut yang digunakan untuk melakukan koreksi pasang surut, nilai MSS, undulasi geoid, dan MDT pada lokasi pengukuran *in-situ* dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2, data pengamatan berhasil menghasilkan dua konstituen pasang surut utama, yaitu M2 dan MS4. Namun, amplitudo dan fase kedua konstituen tersebut menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan apabila dibandingkan dengan nilai teoritisnya.

Kondisi tersebut diduga terjadi karena panjang data pengamatan yang digunakan belum memadai untuk memisahkan konstituen pasang surut yang memiliki periode berdekatan. Dengan kata lain, data pengamatan yang tersedia belum memenuhi kriteria Rayleigh (*Rayleigh criterion*) yang diperlukan untuk melakukan pemisahan konstituen pasang surut secara optimal. Akibatnya, hasil estimasi amplitudo dan fase konstituen pasang surut yang diperoleh masih mengandung pengaruh dari konstituen lain yang memiliki periode serupa.

Keterbatasan panjang data pengamatan tersebut juga perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil evaluasi model MDT terhadap data *in-situ*. Evaluasi pada penelitian ini masih bersifat awal karena hanya dilakukan pada satu lokasi pengamatan dengan durasi observasi selama 12 jam. Durasi pengamatan tersebut belum memadai untuk memperoleh estimasi MSS dan konstituen pasang surut yang optimal. Oleh karena itu, hasil perbandingan terhadap data *in-situ* belum dapat dianggap sebagai validasi absolut model MDT, melainkan sebagai indikasi awal bahwa model MDT-ITBSW memiliki kecenderungan yang lebih dekat terhadap kondisi lapangan dibandingkan model MDT global dibanding pada wilayah pesisir dan perairan dangkal.

Tabel 2. Nilai MDT pada lokasi pengukuran *in-situ*.

Konstituen Pasut	M2	MS4
Amplitudo (m)	1.387	0.162
Fase (Derajat Desimal)	34.8	8.86
Periode (Jam)	12.42	6.2
Deskripsi	Nilai	
MSS (m)	22.9	
Undulasi Geoid (m)	21.345	
MDT (m)	1.555	

Perbandingan nilai MDT *in-situ* terhadap model MDT-ITBSW, MDT-DTU10, dan MDT-CNESCLS13 dapat dilihat pada Tabel 3. Secara umum, nilai MDT *in-situ* menunjukkan orde besaran yang sebanding dengan ketiga model MDT yang dibandingkan.. Hal ini mengindikasikan bahwa model MDT yang dihasilkan mampu merepresentasikan kondisi permukaan laut pada lokasi pengukuran dengan baik.

Namun, apabila ditinjau berdasarkan nilai residunya, model MDT-ITBSW memberikan hasil yang paling mendekati data *in-situ*. Model tersebut memiliki nilai residu sebesar 0,405 meter, yang merupakan nilai residu terkecil dibandingkan dengan model MDT-DTU10 dan MDT-CNESCLS13. Hasil ini mengindikasikan bahwa pendekatan yang digunakan dalam pengembangan MDT-ITBSW, khususnya dalam mempertahankan komponen gelombang pendek MDT pada wilayah perairan dangkal, berpotensi menghasilkan representasi MDT yang lebih dekat terhadap pengamatan lapangan dibandingkan model MDT global yang digunakan sebagai pembanding.

Tabel 3. Nilai MDT dan residu terhadap data *in-situ* pada lokasi pengukuran Pangandaran..

Model MDT	Nilai MDT (Meter)	Residu terhadap <i>In-situ</i> (m)
MDT-ITBSW	1.150	0.405
MDT-DTU10	1.005	0.550
MDT-CNESCLS13	0.822	0.733
In-situ MDT	1.555	

Nilai residu yang masih tersisa tersebut juga dipengaruhi oleh ketelitian vertikal pengamatan GPS RT-PPP yang tidak diperhitungkan dalam proses perhitungan MDT *in-situ*. Meskipun demikian, hasil validasi menunjukkan bahwa komponen gelombang pendek MDT berhasil dipertahankan pada model MDT-ITBSW. Hal ini ditunjukkan oleh tingkat kedekatan model MDT-ITBSW terhadap data *in-situ* yang lebih baik dibandingkan dengan model MDT global yang digunakan sebagai pembanding.

Dengan kata lain, pertimbangan kondisi batimetri pada saat proses filtering MDT perlu dilakukan, khususnya di wilayah Indonesia yang didominasi oleh perairan dangkal. Pendekatan tersebut terbukti mampu mempertahankan karakteristik spasial MDT pada skala yang lebih rinci, sehingga model yang dihasilkan lebih representatif dalam menggambarkan kondisi dinamika laut di wilayah Indonesia.

4. KESIMPULAN

MDT ditentukan dengan mengurangi undulasi geoid dari Mean Sea Surface (MSS). MSS dapat dihitung apabila variasi temporal SSH pada setiap titik pengamatan diketahui. Namun, adanya kesalahan orbit radial satelit menyebabkan tingkat presisi posisi titik pengamatan berkurang sehingga terjadi pergeseran lokasi pengamatan. Oleh karena itu, proses *collinear adjustment* perlu dilakukan untuk memperoleh variasi temporal SSH pada lokasi yang identik. Selanjutnya, model MDT dapat ditentukan berdasarkan MSS hasil *collinear adjustment* tersebut. Disisi lain, pemodelan MDT tanpa melalui proses filtering masih menghasilkan osilasi Gibbs yang mengindikasikan adanya *geoid omission error* pada model MDT. Oleh karena itu, proses filtering menggunakan *Gauss Filter* diperlukan untuk mengurangi pengaruh kesalahan tersebut sehingga model MDT yang dihasilkan menjadi lebih representatif.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model MDT yang dihasilkan memiliki tingkat konsistensi yang baik terhadap model MDT global. Berdasarkan hasil evaluasi, model MDT yang dikembangkan memiliki nilai RMS sebesar 2,27 cm terhadap MDT-DTU10 dan 7,48 cm terhadap MDT-CNESCLS13. Selain itu, evaluasi awal menggunakan data *in-situ* di Pangandaran menunjukkan bahwa model MDT-ITBSW memiliki residu yang lebih kecil dibandingkan MDT-DTU10 maupun MDT-CNESCLS13. Meskipun evaluasi *in-situ* tersebut masih terbatas pada satu lokasi pengamatan dengan durasi observasi selama 12 jam, hasil yang diperoleh mengindikasikan bahwa pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini berpotensi mempertahankan komponen gelombang pendek MDT pada wilayah perairan dangkal. Dengan demikian, model MDT-ITBSW dapat menjadi alternatif model MDT regional yang lebih representatif untuk wilayah Indonesia dibandingkan model MDT global pada lokasi dan kondisi pengamatan yang dievaluasi dalam penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Dalam pembuatan paper ini banyak pihak yang membantu penulis sehingga dapat menyelesaikan paper ini, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Kepakaran Geodesi dan Geomatika ITB yang telah mendanai dan memfasilitasi penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan untuk TUDelft dan NOAA yang telah menyediakan data altimetri melalui *Radar Altimetry Database System* (RADS).

Daftar Pustaka

- Andersen, O. B., & Knudsen, P. (2009). DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(11). <https://doi.org/10.1029/2008JC005179>
- Andersen, O., Knudsen, P., & Stenseng, L. (2016). The DTU13 MSS (mean sea surface) and MDT (mean dynamic topography) from 20 years of satellite altimetry. *International Association of Geodesy Symposia*. https://doi.org/10.1007/1345_2015_182
- Bingham, R. J., Haines, K., & Lea, D. J. (2014). How well can we measure the ocean's mean dynamic topography from space? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(6), 3336–3356. <https://doi.org/10.1002/2013JC009354>
- Bingham, Rory J., Haines, K., & Hughes, C. W. (2008). Calculating the ocean's mean dynamic topography from a mean sea surface and a geoid. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(10), 1808–1822. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO568.1>
- Bosch, W., & Savcenko, R. (2010). On Estimating the Dynamic Ocean Topography - A Profile Approach. *International Association of Geodesy Symposia*, 135, 263–269. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10634-7_34
- Chelton, D. B., Ries, J. C., Haines, B. J., Fu, L.-L., & Callahan, P. S. (2001). Satellite altimetry. In *International geophysics* (Vol. 69, hal. 1--ii). Elsevier.
- Featherstone, W. E., & Filmer, M. S. (2012). The north-south tilt in the Australian Height Datum is explained by the ocean's mean dynamic topography. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(8), 8035. <https://doi.org/10.1029/2012JC007974>
- Jousset, S., Mulet, S., Greiner, E., Wilkin, J., Vidar, L., Chafik, L., ... Dibarboure, G. (2025). New Global Mean Dynamic Topography CNES-CLS-22 Combining Drifters, Hydrography Profiles and High Frequency Radar Data. *Earth System Science Data Discussions*, 1–32. Diambil dari <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2025-429/>
- Kim, H. J. (2015). *A new approach to the determination of a mean sea surface model using multi-satellite altimeter data* (The University of Texas Austin). The University of Texas Austin. Diambil dari <http://hdl.handle.net/2152/30272>
- Knudsen, P., Bingham, R., Andersen, O., & Rio, M. H. (2011). A global mean dynamic topography and ocean circulation estimation using a preliminary GOCE gravity model. *Journal of Geodesy*, 85(11), 861–879. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0485-8>
- Per Knudsen, Ole Andersen, Nikolai Maximenko, & Jan Hafner. (2022). A new combined mean dynamic topography model - DTUHH22MDT. *ESA Living Planet Symposium*. Diambil dari https://ostst.avisio.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/OSTST2022/Presentations/GEO2022-A_new_combined_mean_dynamic_topography_model_-_DTUHH22MDT.pdf
- Rio, M.-H., Mulet, S., & Picot, N. (2013). New global mean dynamic topography from a goce geoid model, altimeter measurements and oceanographic in-situ data. *ESA Living Planet Symposium, Proceedings of the conference held on 9-13 September 2013 at Edinburgh in United Kingdom*. ESA SP-722. 2-13, p.27.
- Rio, M. H., Mulet, S., & Picot, N. (2014). Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8918–8925. <https://doi.org/10.1002/2014GL061773>
- Sansò, F., & Sideris, M. (2013). *Geoid determination: theory and methods*. Diambil dari <https://books.google.com/books?hl=id&lr=&id=7fJDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=Geoid+determination:+theory+and+methods&ots=fyAMFBZldH&sig=qEjPzQBEDI5sPQK1ugGMCZgt5xU>
- Scharroo, R. (2018, Maret). *RADS Data Manual* (Version 4.2.11). Version 4.2.11.
- Scharroo, R., Leuliette, E. W., Lillibridge, J. L., Byrne, D., Naeije, M. C., & Mitchum, G. T. (2012). RADS:

- Consistent multi-mission products. *Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry*.
- Tierney, C. C., Kantha, L. H., & Born, G. H. (2000). Shallow and deep water global ocean tides from altimetry and numerical modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C5), 11259–11277. <https://doi.org/10.1029/1999jc900314>
- Van Gysen, H., Coleman, R., Morrow, R., Hirsch, B., & Rizos, C. (1992). Analysis of collinear passes of satellite altimeter data. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/91JC02451>
- Vaníček, P., Kingdon, R., & Santos, M. (2012). Geoid versus quasigeoid: A case of physics versus geometry. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. <https://doi.org/10.2478/v10126-012-0004-9>
- Woodworth, P. L., Gravelle, M., Marcos, M., Wöppelmann, G., & Hughes, C. W. (2015). The status of measurement of the Mediterranean mean dynamic topography by geodetic techniques. *Journal of Geodesy*, 89(8), 811–827. <https://doi.org/10.1007/S00190-015-0817-1>
- Wu, Y., Huang, J., He, X., Luo, Z., & Wang, H. (2022). Coastal Mean Dynamic Topography Recovery Based on Multivariate Objective Analysis by Combining Data from Synthetic Aperture Radar Altimeter. *Remote Sensing*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/rs14010240>