Indonesian Journal of Oceanography
November 2026, Vol 8 No 4: 410 - 424
ISSN: 2714-8726

Pengembangan Model *Mean Sea Surface* Berdasarkan Konfigurasi Multi-misi Satelit Altimetri di Indonesia

Muhammad Syahrullah Fathulhuda[1]*, Dudy Darmawan Wijaya[2], Ririn Wuri Rahayu[1], Anugerah Satria Pradana Budiyono[1], Adistina Lailia Fajar Dewi[1], Arizal Bawasir[1], S R Bening Pratiwi Kusnadi[1], Wening Aisyah Fauziana Koman[1]

[1]Program Studi Teknik Geomatika, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi,
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta
Jalan Padjadjaran (Lingkar Utara) No. 104, Condongcatur, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283, Indonesia.
[2]Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian,
Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha No. 10, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia
Email: *muhammadsyahrullah.fathulhuda@upnyk.ac.id

Abstrak

Mean Sea Surface (MSS) merupakan komponen fundamental dalam penyediaan referensi vertikal serta berbagai aplikasi geodesi dan oseanografi. Selama lebih dari dua dekade, pengembangan model MSS umumnya dilakukan melalui integrasi multi-misi satelit altimetri untuk meningkatkan resolusi spasial dan akurasi model. Namun, pengaruh konfigurasi satelit terhadap kualitas model belum banyak dievaluasi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model MSS di perairan Indonesia berdasarkan konfigurasi multi-misi satelit altimetri. Model dibangun menggunakan data *Sea Surface Height* (SSH) dari TOPEX/Jason *series*, ERS-2, *Geosat Follow-On* (GFO), ENVISAT, SENTINEL-3A, dan SENTINEL-3B melalui evaluasi karakteristik kesalahan setiap satelit sebelum proses integrasi data. TOPEX/Jason *series* digunakan sebagai kelompok referensi berdasarkan kesinambungan lintasan dan karakteristik spasial yang relatif konsisten. Model divalidasi terhadap 108 stasiun pasang surut menggunakan interpolasi *nearest neighbor*. Hasil validasi menunjukkan bahwa kombinasi TOPEX/Jason *series*, ERS-2, GFO, SENTINEL-3A, dan SENTINEL-3B (KS6) merupakan konfigurasi terbaik dari delapan skenario yang diuji, dengan nilai *Root Mean Square* (RMS) sebesar 0,909 m. Pada skenario yang diuji, penambahan jumlah satelit tidak selalu meningkatkan akurasi model. Temuan ini menunjukkan bahwa karakteristik kesalahan satelit merupakan pertimbangan penting dalam menentukan konfigurasi multi-misi untuk meningkatkan kualitas model MSS.

Kata kunci: *Mean Sea Surface*, Satelit Altimetri, Konfigurasi Multi-Misi

Abstract

Development of a Mean Sea Surface Model Based on a Multi-Mission Satellite Altimetry Configuration in Indonesia

Mean Sea Surface (MSS) is fundamental for providing vertical references and supporting geodetic and oceanographic applications. Over two decades, MSS models have been developed through multi-mission satellite altimetry to improve spatial resolution and model accuracy. However, the influence of satellite configuration on model quality has received limited attention. This study aims to develop an MSS model for Indonesian waters based on a multi-mission satellite altimetry configuration. The model was developed using Sea Surface Height (SSH) data from the TOPEX/Jason series, ERS-2, Geosat Follow-On (GFO), ENVISAT, SENTINEL-3A, and SENTINEL-3B after evaluating satellite error characteristics. The TOPEX/Jason series was used as the reference group based on track continuity and relatively consistent spatial characteristics. The model was validated against 108 tide-gauge stations using nearest-neighbor interpolation. Validation showed that the combination of the TOPEX/Jason series, ERS-2, GFO, SENTINEL-3A, and SENTINEL-3B (KS6) was the best among eight scenarios, with an RMS of 0.909 m. Within the tested scenarios, increasing the number of satellites did not always improve model accuracy. These findings indicate that satellite error characteristics are an important consideration in determining multi-mission configurations for MSS development.

Keywords: *Mean Sea Surface, Satellite Altimetry, Multi-Mission Configuration*

https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce
DOI: 10.14710/ijoce.v8i4.34037
Diterima/Received: 04-08-2026
Disetujui/Accepted: 28-10-2026

 ISSN: 2714-8726

PENDAHULUAN

Rerata permukaan laut (*Mean Sea Surface* – MSS) didefinisikan sebagai rata-rata ketinggian permukaan laut sesaat (*Sea Surface Height* – SSH) relatif terhadap ellipsoid referensi pada periode waktu tertentu, yang secara konseptual merepresentasikan geoid dan *Mean Dynamic Topography* (MDT) (Andersen & Knudsen, 2009). MSS merupakan salah satu parameter fundamental dalam bidang geodesi dan oseanografi, yang banyak dimanfaatkan dalam perhitungan gayaberat laut, studi dinamika dan sirkulasi laut, serta deteksi kedalaman laut (Guo *et al.*, 2016; Qiu & Jin, 2020; Zhu *et al.*, 2020; Hamden *et al.*, 2021; Yuan *et al.*, 2023). Selain itu, MSS juga dapat digunakan dalam penentuan datum pasut, yang menjadi kebutuhan utama dalam berbagai aplikasi rekayasa kelautan dan pesisir, seperti keselamatan navigasi, survei batimetri, dan pembangunan pelabuhan (Ke *et al.*, 2020). Di sisi lain, Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki wilayah laut yang sangat luas, yaitu sekitar 6,4 juta km², serta wilayah pesisir yang memiliki peran strategis dalam kehidupan dan pembangunan nasional (Badan Pusat Statistik, 2025; Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia, 2025). Mengingat karakteristik wilayah perairan Indonesia tersebut, pemodelan MSS di Indonesia menjadi sangat penting.

Secara tradisional, MSS dapat ditentukan dengan mengintegrasikan hasil pengamatan stasiun pasang surut, sipat datar, dan *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Namun, cakupan pengamatan tersebut terutama terkonsentrasi di wilayah pesisir. Satelit altimetri kemudian menyediakan pengamatan SSH dengan cakupan spasial yang luas hingga wilayah laut terbuka. Perkembangan teknologi altimetri dimulai dari misi seperti GEOS-3, SEASAT, dan GEOSAT, kemudian berkembang melalui TOPEX/Poseidon, ERS-1, ERS-2, GFO, Envisat, Jason-1, Jason-2, Jason-3, CryoSat-2, SARAL/AltiKa, Sentinel-3A, Sentinel-3B, hingga Sentinel-6A (Naeije *et al.*, 2006; Scharroo *et al.*, 2013; Scharroo, 2026b, 2026a). Perkembangan berbagai misi tersebut menghasilkan data altimetri dengan karakteristik temporal, spasial, dan kesalahan yang berbeda, sehingga integrasi multi-misi menjadi salah satu aspek penting dalam pembentukan MSS. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan kombinasi misi yang digunakan dalam pembentukan MSS dapat memengaruhi kerapatan observasi sekaligus konsistensi data yang dihasilkan. Oleh karena itu, penggunaan banyak misi satelit tidak serta-merta menjamin peningkatan kualitas model, sehingga pemilihan konfigurasi satelit perlu dievaluasi berdasarkan karakteristik kesalahan dan distribusi spasial data.

Selama lebih dari dua dekade terakhir, pengembangan model MSS global menunjukkan kecenderungan integrasi data dari berbagai misi satelit altimetri untuk meningkatkan cakupan, resolusi spasial, dan akurasi model. Model-model seperti WHU2000, DNSC08, CNES CLS11, DTU15, CNES CLS15, DTU18, DTU21, SDUST2020, CNES CLS2022, hingga DTU25 dikembangkan melalui penyempurnaan crossover adjustment, retracking, filtering, koreksi geofisik, serta integrasi data dari *Exact Repeat Mission* (ERM), *interleaved mission*, dan *Geodetic Mission* (GM) (Jiang *et al.*, 2002; Andersen & Knudsen, 2009; Schaeffer *et al.*, 2012, 2023; Andersen *et al.*, 2016, 2018, 2023; Pujol *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2023; Nilsson *et al.*, 2026). Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kualitas MSS tidak hanya dilakukan melalui penambahan jumlah data, tetapi juga melalui peningkatan kerapatan observasi dan pemanfaatan data beresolusi lebih tinggi. DTU21, misalnya, memanfaatkan kombinasi ERM dan GM, sedangkan CNES CLS2022 memanfaatkan data CryoSat-2 dan SARAL/AltiKa untuk memperbaiki representasi panjang gelombang pendek (Andersen *et al.*, 2023; Schaeffer *et al.*, 2023). Perkembangan terbaru melalui DTU25 juga memanfaatkan data wide-swath SWOT untuk meningkatkan representasi skala pendek dan resolusi spasial MSS (Nilsson *et al.*, 2026).

Meskipun demikian, kualitas MSS sangat dipengaruhi oleh kualitas SSH sebagai data masukan. Setiap misi satelit memiliki karakteristik kesalahan yang berbeda akibat perbedaan instrumen, orbit, koreksi geofisik, dan karakteristik pengamatan, sehingga konsistensi antar-misi menjadi aspek penting dalam pembentukan MSS (Jiang *et al.*, 2002; Andersen & Knudsen, 2009; Schaeffer *et al.*, 2012). Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengurangi ketidakkonsistenan tersebut, antara lain *crossover adjustment*, koreksi bias antar-misi, *filtering*, *retracking*, dan integrasi data multi-resolusi (Andersen & Knudsen, 2009; Pujol *et al.*, 2018; Yuan *et al.*, 2023). Namun, pengembangan MSS terdahulu umumnya berfokus pada homogenisasi dan integrasi data multi-misi, sedangkan pengaruh konfigurasi kombinasi satelit terhadap kualitas model belum banyak dievaluasi secara empiris. Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi konfigurasi multi-misi dengan menggunakan karakteristik kesalahan masing-masing satelit sebagai dasar penyusunan skenario yang diuji. Pendekatan berbasis seleksi satelit juga telah diterapkan pada pemodelan pasut di Indonesia dan menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik misi dapat memengaruhi ketelitian model (Fathulhuda *et al.*, 2024). Namun,

 ISSN: 2714-8726

evaluasi konfigurasi satelit pada penelitian tersebut ditujukan untuk pemodelan pasut, sedangkan penelitian ini memfokuskan evaluasi pada pembentukan MSS.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh konfigurasi multi-misi satelit altimetri terhadap kualitas model MSS di Indonesia. Berbeda dengan pendekatan pengembangan MSS yang berfokus pada homogenisasi dan integrasi seluruh data multi-misi, penelitian ini menempatkan konfigurasi kombinasi satelit sebagai faktor yang dievaluasi dalam pembentukan model, dengan karakteristik kesalahan masing-masing misi digunakan sebagai dasar penyusunan konfigurasi yang diuji. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan bukti empiris mengenai pengaruh konfigurasi satelit terhadap kualitas model MSS, serta menjadi salah satu dasar pertimbangan dalam pemilihan kombinasi satelit pada pengembangan model MSS regional.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini membangun model MSS menggunakan data altimetri multi-satelit melalui tahapan pengolahan SSH, analisis *collinear*, koreksi bias orbit, pembentukan MSS, seleksi konfigurasi satelit, interpolasi spasial, dan validasi model.

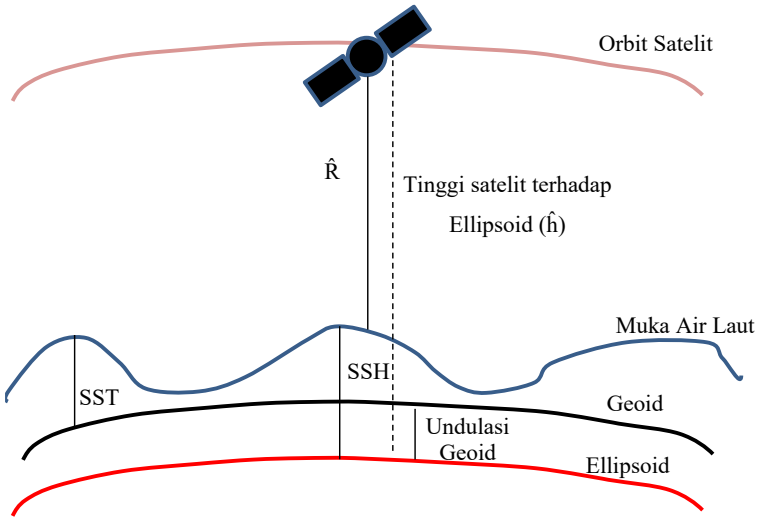
Pemodelan *Mean Sea Surface* (MSS)

Dalam penelitian ini, SSH dihitung menggunakan data altimetri multi-satelit yang terdiri atas TOPEX/Jason *series* (TOPEX, Jason-1, Jason-2, Jason-3, dan Sentinel-6A), Geosat Follow-On (GFO), ERS-2, ENVISAT, SENTINEL-3A, dan SENTINEL-3B. TOPEX/Jason series menyediakan data pengamatan terpanjang, mulai dari TOPEX pada tahun 1993 hingga Sentinel-6A pada tahun 2022, dengan siklus ulang pengamatan 9,9156 hari. Data tersebut dilengkapi oleh GFO yang beroperasi pada periode 2000–2008 dengan siklus ulang 17 hari, ERS-2 pada periode 1995–2011 dan ENVISAT pada periode 2002–2010 dengan siklus ulang masing-masing 35 hari, serta SENTINEL-3A dan SENTINEL-3B yang beroperasi sejak tahun 2016 dan 2018 hingga 2022 dengan siklus ulang 27 hari. Kombinasi berbagai misi tersebut memberikan cakupan observasi yang saling melengkapi baik secara temporal maupun spasial dalam pembentukan model MSS. Seluruh data altimetri beserta parameter koreksinya diperoleh dari *Radar Altimeter Database System* (RADS) versi 4.8.1 (Naeije *et al.*, 2000; Scharroo *et al.*, 2013; Scharroo, 2026b, 2026a). RADS menyediakan data observasi dari berbagai misi satelit altimetri beserta parameter koreksi dan prosedur pengolahan yang telah distandardisasi untuk mendukung konsistensi pengolahan data multi-misi. Data SSH dalam penelitian ini direferensikan terhadap elipsoid *World Geodetic System* 1984 (WGS84). Data diperoleh dari server RADS dengan tanggal pengunduhan 31 Oktober 2022. Wilayah penelitian yang digunakan mencakup koordinat 90°–150° BT dan 15° LS–15° LU. Batas wilayah tersebut ditetapkan untuk mencakup wilayah perairan Indonesia dan sekitarnya sebagai cakupan pengolahan data dan pemodelan MSS. Wilayah ini digunakan secara konsisten dalam tahapan pengolahan data dan pembentukan model MSS.

Pengukuran altimetri pada dasarnya merupakan estimasi jarak antara satelit dan permukaan laut berdasarkan waktu tempuh pulsa radar. Untuk memperoleh nilai SSH, tinggi orbit satelit dikombinasikan dengan nilai *range* yang telah disesuaikan melalui penerapan koreksi *range* dan koreksi geofisik (Chelton *et al.*, 2001; Fok, 2012) . Koreksi *range* meliputi koreksi ionosfer ($\varepsilon_{\mathrm{ion}}$), troposfer kering ($\varepsilon_{\mathrm{dry}}$), troposfer basah ($\varepsilon_{\mathrm{wet}}$), dan *sea state bias* ($\varepsilon_{\mathrm{ssb}}$). Sementara itu, koreksi geofisik meliputi *solid earth tide* ($\varepsilon_{\mathrm{sol}}$), *ocean tidal loading* ($\varepsilon_{\mathrm{ol}}$), *pole tide* ($\varepsilon_{\mathrm{pole}}$), pasang surut laut ($\zeta$), dan *inverse barometer* ($\varepsilon_{\mathrm{ib}}$).

RADS juga menerapkan proses *retracking* sesuai dengan karakteristik masing-masing misi satelit. Pengamatan altimetri konvensional menggunakan *standard ocean retracker* MLE4, sedangkan pengamatan dengan mode SAR menggunakan *standard SAR retracker*. Apabila algoritma *retracking* tertentu tidak tersedia untuk suatu misi, digunakan produk standar yang tersedia pada basis data RADS (Scharroo *et al.*, 2013; Abele *et al.*, 2023; Scharroo, 2026b, 2026a). Konsistensi antar-misi selanjutnya didukung melalui proses *multi-mission cross-calibration*. Dalam kerangka pengolahan RADS, perbedaan referensi antar-misi diperhitungkan melalui *reference frame offset* (RFO), yaitu koreksi bias antar-misi yang digunakan untuk menempatkan data SSH dari berbagai misi dalam kerangka referensi yang konsisten (Naeije *et al.*, 2006; Scharroo *et al.*, 2013; Veng & Andersen, 2021). Sementara itu, koreksi pasut laut (ζ) mengacu pada model FES2014 (Lyard *et al.*, 2021) yang tersedia dalam parameter koreksi RADS. Dengan mempertimbangkan seluruh komponen koreksi tersebut, jarak altimetri terkoreksi dapat dinyatakan sebagai:

 ISSN: 2714-8726



Gambar 1. Hubungan antara satelit altimetri, muka air laut, dan elipsoid

$$\hat{R} = R_0 + \varepsilon_{ion} + \varepsilon_{dry} + \varepsilon_{wet} + \varepsilon_{ssb} + \varepsilon_{sol} + \varepsilon_{ol} + \zeta + \varepsilon_{pole} + \varepsilon_{ib}$$

Berdasarkan jarak altimetri yang telah dikoreksi, nilai SSH dihitung sebagai selisih antara tinggi orbit satelit terhadap elipsoid (h_{orb}) dan R̂, yaitu:

$$SSH = h_{orb} - \hat{R}$$

Dalam konvensi pengolahan RADS, seluruh parameter koreksi tersebut dinyatakan sebagai koreksi terhadap nilai *range* hasil pengukuran. Oleh karena itu, koreksi dituliskan sebagai penjumlahan aljabar pada pembentukan jarak terkoreksi $\hat{R}$, sedangkan nilai $\hat{R}$ selanjutnya dikurangkan dari tinggi orbit satelit untuk memperoleh SSH. Tanda positif pada operator penjumlahan tidak menunjukkan bahwa seluruh koreksi selalu bernilai positif, karena nilai masing-masing parameter koreksi dapat memiliki tanda positif atau negatif sesuai dengan kondisi pengamatan dan konvensi koreksi RADS. Dengan demikian, persamaan tersebut mengikuti konvensi RADS untuk pembentukan SSH dari tinggi orbit dan range yang telah dikoreksi (Scharroo, 2026b, 2026a).

Sebelum digunakan dalam proses pembentukan MSS, data hasil pengamatan terlebih dahulu melalui proses *quality control* menggunakan kriteria bawaan RADS (*default quality control*) (Scharroo *et al.*, 2013; Scharroo, 2026b, 2026a). Pada proses ini, data yang memiliki nilai *range RMS*, jumlah *valid echoes* (*range_numval*), *significant wave height* (SWH), sigma0, maupun *engineering flags* dan *geophysical flags* di luar batas yang ditentukan untuk masing-masing misi satelit 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.

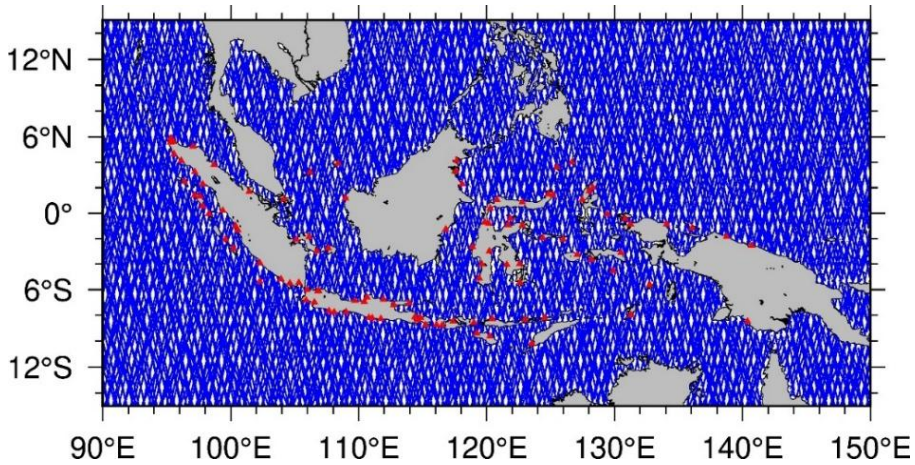
Pada wilayah pesisir dan dekat daratan, penanganan data dilakukan melalui penerapan *quality flag* RADS yang menolak pengamatan yang terindikasi mengalami *land contamination*. Kondisi tersebut dapat terjadi ketika footprint radar altimetri tidak sepenuhnya berada di atas permukaan laut sehingga waveform yang diterima tidak lagi mengikuti karakteristik ideal *Brown ocean waveform* (Chelton *et al.*, 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. Dengan demikian, penghapusan pengamatan yang tidak memenuhi kualitas data dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan kriteria *default quality control* dan *quality flag* bawaan RADS, tanpa menerapkan metode penyaringan statistik tambahan.

Secara geometrik, SSH merepresentasikan ketinggian muka laut terhadap ellipsoid sebagai kombinasi *Sea Surface Topography* dan undulasi geoid (Calman, 1987; Molines *et al.*, 1994), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Setelah melalui proses koreksi dan *quality control*, pembentukan deret waktu SSH dilakukan pada lokasi pengamatan yang identik untuk menjamin konsistensi spasial antar-siklus pengamatan. Proses tersebut dilakukan melalui analisis *collinear* dengan mengidentifikasi data SSH beresolusi 1 Hz yang memiliki posisi *footprint* pengamatan berimpit pada lintasan yang sama antar-siklus pengamatan. Data yang digunakan

 ISSN: 2714-8726

Tabel 1. Statistik Data Pengamatan Setelah Quality Control Bawaan RADS dan Analisis Collinear

Satelit Altimetri	Jumlah Data Pengamatan	Rata-rata Periode Pengamatan (tahun)
SENTINEL-3A	107707	6,289
SENTINEL-3B	107129	3,717
ERS-2	123970	6,447
Geosat Follow-On (GFO)	69407	5,682
ENVISAT	118795	6,679
TOPEX/Jason *series*	42654	26,382
Jumlah	569662	8,565



Gambar 2. Sebaran footprint satelit altimetri (titik biru) dan stasiun pasang surut di Indonesia yang dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (segitiga merah).

dalam proses perataan temporal merupakan data yang telah memenuhi kriteria *quality control* bawaan RADS dan memenuhi kriteria kolokasi berdasarkan hasil analisis *collinear*. Data yang tidak memenuhi kriteria tersebut tidak digunakan dalam pembentukan MSS. Dalam formulasi ini, SSH dinyatakan sebagai fungsi lokasi, waktu, jalur pengamatan, dan jenis satelit:

$$\mathrm{SSH}(\lambda, \varphi, \mathrm{t}, \mathrm{js}, \mathrm{e}\lambda, \mathrm{et}, \mathrm{np}) = h_{orb} - \hat{\mathrm{R}}$$

dengan λ dan φ masing-masing menyatakan koordinat bujur dan lintang titik pengamatan, t menyatakan waktu pengamatan, js menunjukkan jenis satelit, eλ dan et merepresentasikan parameter koreksi terkait posisi dan waktu pengamatan, serta np menyatakan nomor lintasan atau siklus pengamatan. Formulasi ini menunjukkan bahwa nilai SSH bergantung pada dimensi spasial, temporal, serta karakteristik lintasan satelit.

Identifikasi titik *collinear* dilakukan menggunakan parameter bujur dan waktu pengamatan pada saat lintasan satelit berpotongan dengan ekuator. Pendekatan ini memungkinkan penelusuran kesesuaian lokasi pengamatan antar siklus serta pengendalian pergeseran posisi akibat kesalahan orbit satelit (Van Gysen *et al.*, 1992). Jumlah data yang disajikan pada Tabel 1 merupakan jumlah data pengamatan yang digunakan setelah melalui proses *default quality control* RADS dan analisis *collinear*. Jumlah data sebelum penerapan *quality control* bawaan RADS tidak tersedia secara terpisah karena proses penyaringan tersebut merupakan bagian dari prosedur standar pengolahan pada data yang diperoleh dari server RADS. Distribusi spasial titik pengamatan yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.

Meskipun analisis *collinear* telah menghasilkan konsistensi spasial untuk setiap satelit, data SSH masih mengandung komponen kesalahan sistematik akibat bias orbit. Kesalahan ini berkaitan dengan keterbatasan dalam pemodelan medan gravitasi dan gaya non-gravitasi yang mempengaruhi penentuan orbit (Van Gysen *et al.*, 1992). Selain itu, bias orbit dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap kesalahan sistematik dalam efek koreksi pasang surut laut, dengan pengaruh yang dilaporkan mencapai 30–60% (Bettadpur & Eanes, 1994; Chelton *et al.*, 2001). Untuk mengurangi pengaruh tersebut, dilakukan koreksi bias orbit yang dimodelkan sebagai fungsi harmonik terhadap waktu relatif lintasan satelit, sebagaimana dirumuskan oleh Andersen

 ISSN: 2714-8726

(1995). Model bias orbit yang digunakan terdiri atas suku konstan, harmonik pertama, dan harmonik kedua. Bentuk matematis model bias orbit dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon_o = A_0 + A_1 \cos[\Omega(t - t_0)] + B_1 \sin[\Omega(t - t_0)] + A_2(t - t_0)\cos[2\Omega(t - t_0)] + B_2(t - t_0)\sin[2\Omega(t - t_0)]$$

Pada persamaan diatas, ε_o merupakan koreksi bias orbit, Ω merupakan frekuensi sudut orbit satelit yang dihitung berdasarkan $\Omega = 2\pi/FPO$, dan FPO merupakan periode orbit satelit dalam detik. Nilai FPO diperoleh dari spesifikasi periode orbit masing-masing misi satelit pada *Earth Observation Portal* (EO Portal), sedangkan nilai FPO untuk ERS-2 mengacu pada Andersen (1995). Parameter $(t - t_0)$ menyatakan waktu relatif terhadap pusat lintasan, dengan t_0 sebagai waktu pusat lintasan. Koefisien A_0, A_1, B_1, A_2, dan B_2 merupakan parameter yang ditentukan untuk pemodelan bias orbit pada masing-masing lintasan satelit. Dengan demikian, formulasi tersebut menggunakan lima parameter model yang terdiri atas satu suku konstan, dua parameter harmonik pertama (A_1, B_1), dan dua parameter harmonik kedua (A_2, B_2).

$$SSH(\lambda, \varphi, t) = h_{orb} - \hat{R} - \varepsilon_o$$

Nilai SSH setelah koreksi bias orbit kemudian dihitung dengan mengurangkan nilai bias orbit ε_o dari SSH yang diperoleh berdasarkan tinggi orbit satelit h_{orb} dan jarak altimetri terkoreksi $\hat{R}$ (lihat persamaan diatas). Untuk setiap lintasan, periode orbit satelit digunakan untuk menentukan frekuensi sudut orbit Ω, sedangkan waktu pengamatan dinyatakan relatif terhadap pusat lintasan melalui $(t - t_0)$. Selanjutnya, parameter A_0, A_1, B_1, A_2, dan B_2 diestimasi menggunakan metode *least squares* berdasarkan data pengamatan SSH pada masing-masing lintasan. Parameter hasil estimasi digunakan untuk menghitung nilai koreksi bias orbit ε_o pada setiap titik pengamatan. Nilai koreksi tersebut kemudian diterapkan pada SSH sesuai persamaan model bias orbit di atas. Koreksi bias orbit dilakukan secara independen untuk setiap satelit setelah proses analisis *collinear*.

Dengan tersedianya data SSH yang telah terkoreksi dan konsisten untuk masing-masing satelit, tahap selanjutnya adalah pembentukan model MSS melalui perataan temporal pada lokasi yang identik. Secara matematis, MSS dinyatakan sebagai

$$\mathrm{MSS}(\lambda, \varphi, \mathrm{js}) = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} SSH(\lambda, \varphi, \mathrm{t}, \mathrm{js}, \mathrm{e}\lambda, \mathrm{et})$$

dengan λ dan φ menyatakan posisi geografis titik pengamatan, js menunjukkan jenis satelit, dan n merupakan jumlah data pengamatan pada lokasi yang sama sepanjang periode pengamatan. Notasi t, eλ, dan et tetap merepresentasikan dimensi temporal dan parameter koreksi sebagaimana pada formulasi SSH. Persamaan ini menunjukkan bahwa MSS diperoleh sebagai nilai rata-rata temporal dari SSH pada lokasi yang identik.

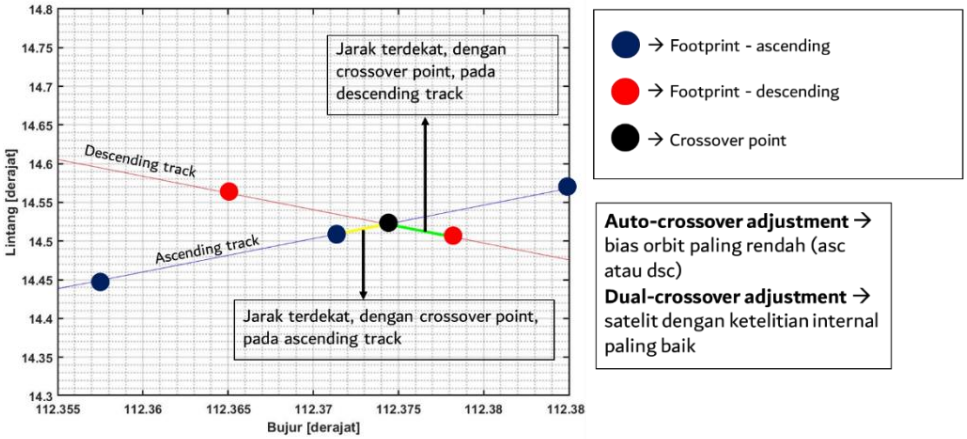
Jumlah data yang digunakan dalam proses perataan merepresentasikan banyaknya perekaman pada satu titik identik selama periode pengamatan satelit. Identifikasi titik identik tersebut bergantung pada hasil analisis *collinear*, yang memperhitungkan kemungkinan pergeseran posisi akibat kesalahan orbit dalam rentang spasial tertentu (Kim, 2015).

Hasil perhitungan MSS dari setiap konfigurasi masih berupa titik diskrit mengikuti jalur pengamatan satelit sehingga diperlukan interpolasi spasial untuk membentuk *grid* kontinu. Resolusi grid ditentukan berdasarkan rata-rata kerapatan footprint pada masing-masing konfigurasi, sehingga setiap konfigurasi dapat memiliki resolusi berbeda sesuai distribusi spasial datanya. Seluruh konfigurasi dievaluasi pada domain spasial yang sama, sedangkan wilayah dengan cakupan observasi yang tidak memadai untuk interpolasi tidak digunakan untuk mengurangi pengaruh ekstrapolasi. Nilai MSS dari satelit dalam setiap konfigurasi kemudian digabungkan dan diinterpolasi menggunakan metode *minimum curvature spline tension*, yang efektif dalam menangani distribusi data yang tidak homogen serta mampu mengurangi terjadinya osilasi berlebih pada hasil interpolasi (Smith & Wessel, 1990).

Pemilihan Satelit Altimetri

Pemilihan satelit altimetri dilakukan berdasarkan evaluasi ketelitian internal dan kesesuaian relatif antar-satelit menggunakan analisis *crossover* pada domain MSS. *Auto-crossover* digunakan untuk mengevaluasi konsistensi internal masing-masing satelit dengan membandingkan nilai MSS pada lintasan *ascending* dan *descending* pada titik perpotongan lintasan. Dual-crossover dilakukan pada tahap berikutnya untuk mengevaluasi kesesuaian relatif terhadap kelompok satelit referensi. Karena analisis *crossover* dilakukan pada domain MSS, nilai yang dibandingkan merupakan nilai MSS yang telah diperoleh melalui

 ISSN: 2714-8726



Gambar 3. Ilustrasi untuk pendekatan crossover altimetri (auto-crossover dan dual-crossover).

perataan temporal SSH pada lokasi pengamatan yang identik. Dengan demikian, perbedaan waktu antar-pengamatan tidak menjadi parameter dalam analisis *crossover*. Ilustrasi konsep crossover ditunjukkan pada Gambar 3.

Dalam penelitian ini, TOPEX/Jason *series* diperlakukan sebagai kelompok misi referensi, bukan sebagai satu satelit tunggal. Kelompok tersebut terdiri atas TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Jason-3, dan Sentinel-6A yang membentuk rangkaian misi altimetri berkesinambungan pada jalur referensi TOPEX/Poseidon. Jason-1, Jason-2, dan Jason-3 mempertahankan jalur pengamatan yang sama dengan TOPEX/Poseidon, sehingga rangkaian tersebut menyediakan kesinambungan pengamatan dengan karakteristik spasial yang relatif konsisten (Veng & Andersen, 2021). Kelanjutan rangkaian ini hingga Sentinel-6A juga mencakup lima misi inti yang digunakan dalam pengembangan orbit presisi untuk rekaman altimetri jangka panjang (Lemoine *et al.*, 2026).

Meskipun demikian, masing-masing misi memiliki karakteristik instrumen dan orbit yang berbeda sehingga nilai SSH antar-misi tidak diasumsikan identik. Perbedaan tersebut telah ditunjukkan melalui analisis fase tandem, yang memungkinkan estimasi bias antar-misi melalui perbandingan pengamatan pada lintasan yang sama (Beckley *et al.*, 2010; Lemoine *et al.*, 2026). Dalam pengolahan berbasis RADS, perbedaan antar-misi diperhitungkan dan dikoreksi melalui *reference frame offset* (RFO) sebagai bagian dari proses *inter-mission calibration*, dengan TOPEX/Poseidon digunakan sebagai referensi dalam pembentukan kerangka konsisten antar-misi (Veng & Andersen, 2021). Berdasarkan pertimbangan tersebut, dalam penelitian ini TOPEX/Jason series digunakan sebagai kelompok referensi pada analisis dual-crossover untuk mengevaluasi kesesuaian relatif satelit lainnya terhadap rangkaian referensi yang telah dikonsolidasikan.

Berdasarkan konsep tersebut, selisih nilai MSS pada titik crossover digunakan sebagai indikator perbedaan pengamatan pada lokasi yang sama. Semakin kecil perbedaan yang dihasilkan, semakin tinggi tingkat konsistensi data altimetri. Untuk mengkuantifikasi hal ini, ketelitian internal setiap satelit dihitung menggunakan *root mean square* (RMS) dari selisih MSS pada seluruh titik *crossover*, yang dirumuskan sebagai:

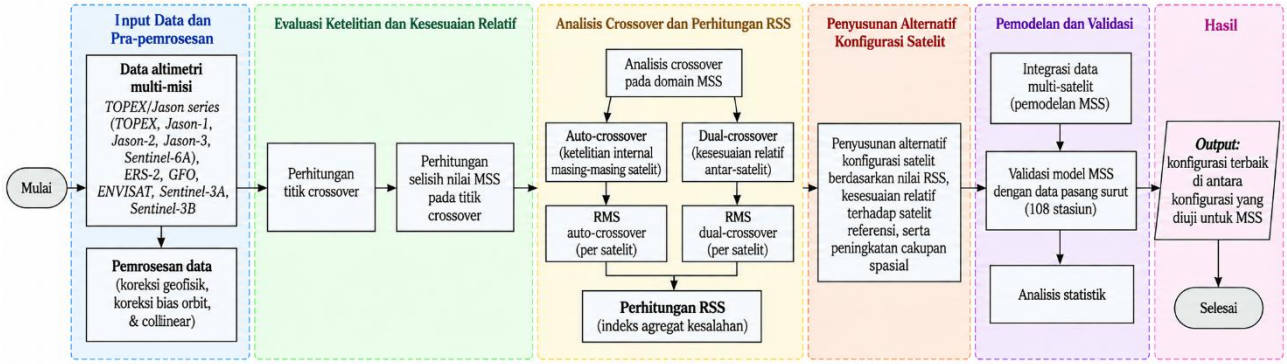
$$RMS_j = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(MSS_i^{\text{asc}} - MSS_i^{\text{desc}}\right)^2}$$

dengan MSS_i^{asc} dan MSS_i^{desc}, masing-masing merupakan nilai MSS pada lintasan *ascending* dan *descending* pada titik *crossover* ke-i, serta Nadalah jumlah titik crossover yang digunakan dalam perhitungan RMS auto-crossover. RMS *auto-crossover* digunakan untuk mengevaluasi konsistensi internal masing-masing satelit. Analisis *dual-crossover* dilakukan setelah kelompok satelit referensi ditetapkan, sedangkan hasil RMS *dual-crossover* disajikan pada bagian Hasil dan Pembahasan.

 ISSN: 2714-8726

Tabel 2. Jarak antara titik auto-crossover dan collinear footprints serta jumlah titik crossover yang digunakan dalam analisis.

Satelit Altimetri	Jarak terpendek [m]	Jarak terjauh [m]	Jarak rata-rata [m]	Jumlah titik *crossover*
SENTINEL-3A	5,68	4367,69	1690,80	755
SENTINEL-3B	1,84	3431,06	1694,17	732
ERS-2	1,54	4996,24	1623,78	1026
GFO	3,29	4131,26	1714,96	477
ENVISAT	0,96	4995,94	1769,17	974
TOPEX/Jason *series*	5,19	4215,55	1360,51	126



Gambar 4. Diagram alir pemilihan satelit altimetri untuk pemodelan MSS

Dalam implementasinya, analisis *auto-crossover* dan *dual-crossover* menggunakan kriteria kedekatan spasial antara titik *crossover* dan *collinear footprint* dengan batas maksimum 5 km. Batas tersebut ditetapkan dengan mempertimbangkan jarak rata-rata antar titik pengamatan sepanjang jalur altimetri yang berada pada kisaran 6–7 km (Van Gysen *et al.*, 1992; Tierney *et al.*, 1998). Batas 5 km digunakan untuk mempertahankan kedekatan spasial titik-titik yang dibandingkan dan menghindari penggabungan pengamatan yang berasal dari lokasi yang berbeda secara signifikan. Dengan demikian, pasangan *crossover* yang digunakan tetap merepresentasikan pengamatan pada lokasi spasial yang berdekatan. Hasil analisis jarak antara titik *auto-crossover* dan *collinear footprint* serta jumlah titik *crossover* yang digunakan untuk masing-masing satelit disajikan pada Tabel 2 sebagai dasar pemeriksaan kriteria kedekatan spasial dalam analisis *crossover*. Sementara itu, alur lengkap proses pemilihan satelit ditunjukkan pada Gambar 4.

Hasil analisis *auto-crossover* dan *dual-crossover* selanjutnya dinyatakan dalam bentuk RMS sebagai ukuran tingkat kesalahan masing-masing satelit. RMS *auto-crossover* digunakan untuk merepresentasikan konsistensi internal satelit, sedangkan RMS *dual-crossover* digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian relatif terhadap satelit referensi. Kedua parameter tersebut selanjutnya digunakan dalam proses pemilihan dan penyusunan konfigurasi satelit.

Nilai RMS yang diperoleh dari analisis *auto-crossover* dan *dual-crossover* selanjutnya dirangkum dalam bentuk *Root Sum Square* (RSS) sebagai indeks agregat kesalahan untuk mendukung proses pemilihan satelit. RSS dirumuskan sebagai:

$$RSS_j = \sqrt{RMS_{auto,j}^2 + RMS_{dual,j}^2}$$

dengan RSS_j merupakan indeks agregat kesalahan satelit ke-j, $RMS_{auto,j}$merupakan RMS *auto-crossover* satelit ke-j, dan $RMS_{dual,j}$ merupakan RMS *dual-crossover* satelit ke-j. RSS digunakan untuk merangkum kedua indikator tersebut dalam satu ukuran yang selanjutnya menjadi salah satu dasar dalam membandingkan performa relatif antar-satelit. Penggabungan dilakukan menggunakan norma *Euclidean* karena kedua RMS merupakan ukuran kesalahan dengan satuan yang sama, sehingga besarnya kedua komponen dapat dirangkum secara simultan tanpa memberikan bobot berbeda pada salah satu indikator. Secara statistik, kedua RMS

 ISSN: 2714-8726

merupakan ukuran ringkasan berbasis kuadrat dari residual *crossover*, sedangkan RSS digunakan sebagai fungsi agregasi deterministik terhadap kedua ukuran tersebut, bukan sebagai propagasi varians. Dalam penelitian ini, RSS diposisikan sebagai indeks agregat untuk keperluan seleksi, bukan sebagai estimasi ketidakpastian gabungan, sehingga tidak digunakan untuk menyatakan bahwa RMS *auto-crossover* dan RMS *dual-crossover* merupakan komponen kesalahan yang independen secara statistik.

Berdasarkan hasil evaluasi crossover dan nilai RSS, satelit yang digunakan dalam konfigurasi dipilih dengan mempertimbangkan tingkat kesalahan serta kesesuaian relatif terhadap satelit referensi. Penyusunan konfigurasi dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara kualitas data dan peningkatan cakupan spasial. Dalam penelitian ini, proses seleksi diterapkan pada beberapa skenario konfigurasi satelit yang diuji, sehingga hasil seleksi digunakan untuk mengidentifikasi konfigurasi terbaik di antara konfigurasi yang diuji, bukan sebagai konfigurasi yang mencakup seluruh kemungkinan kombinasi satelit.

Validasi Model *Mean Sea Surface* (MSS)

Validasi model MSS dilakukan menggunakan 108 stasiun pasut BIG dengan resolusi temporal 1 jam dan periode pengamatan 2010–2022. Durasi pengamatan antarstasiun berkisar 1,08–12,00 tahun, dengan rata-rata 6,45 tahun dan median 6,00 tahun. Data pasut dipraproses dengan menghilangkan pencilan, perubahan level, kecenderungan linear, dan data kosong, kemudian dilakukan penyaringan deret waktu dan analisis respons untuk mengestimasi *Mean Sea Level* (MSL) serta mengurangi pengaruh periodik pasut (Munk & Cartwright, 1966; Fathulhuda *et al.*, 2024). MSL yang semula direferensikan terhadap nol palem ditransformasikan ke sistem ellipsoid WGS84 menggunakan data GNSS levelling dari Direktorat Sistem Referensi Geospasial (DSRG), BIG, serta dimensi palem. Ketidakpastian proses GNSS *levelling* dan pengikatan tinggi berada pada orde sentimeter, dengan estimasi sekitar 1–2 cm (Afrasteh *et al.*, 2023), sedangkan pergerakan vertikal daratan (VLM) merupakan salah satu sumber ketidakpastian dalam perbandingan data pasut dan MSS (Kleinherenbrink *et al.*, 2018).

Perbedaan posisi antara stasiun pasut dan grid MSS dapat memengaruhi hasil validasi, terutama di wilayah pesisir yang memiliki keterbatasan observasi altimetri akibat kontaminasi daratan (Vignudelli *et al.*, 2019). Batas daratan ditentukan menggunakan *Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography* (GSHHG) untuk membedakan wilayah darat dan laut (Wessel & Smith, 1996). Nilai MSS model pada lokasi stasiun yang berada di wilayah laut kemudian diambil menggunakan metode nearest neighbor, sehingga nilai yang dibandingkan merupakan nilai grid terdekat tanpa modifikasi tambahan melalui interpolasi (Rukundo & Cao, 2012; Fathulhuda *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2025). Selanjutnya, residual validasi dihitung dari perbedaan antara MSS stasiun dan MSS model dan dievaluasi menggunakan RMS, mean, standar deviasi, median, serta nilai minimum dan maksimum residual. RMS dirumuskan sebagai:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(MSS_i^{obs} - MSS_i^{model}\right)^2}$$

dengan $MSS_{\mathrm{model},i}$ adalah nilai MSS hasil pemodelan altimetri pada stasiun ke-i, $MSS_{\mathrm{pasut},i}$ adalah nilai MSS dari stasiun pasut yang telah direferensikan ke elipsoid, dan N adalah jumlah stasiun pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Kesalahan dan Penyusunan Kombinasi Satelit

Karakteristik kesalahan masing-masing satelit altimetri dievaluasi menggunakan RMS *auto-crossover* dan RMS *dual-crossover* (lihat Tabel 4). Data *dual-crossover* yang digunakan dalam analisis dirangkum pada Tabel 3, yang memuat jarak antara titik *dual-crossover* dan *collinear footprints* serta jumlah titik *crossover* untuk masing-masing satelit. Jarak disajikan dalam bentuk nilai terpendek, terjauh, dan rata-rata, sedangkan jumlah titik *crossover* menunjukkan titik *crossover* yang terbentuk dari pasangan pengamatan lintasan naik (*ascending*) dan turun (*descending*). Selanjutnya, RMS *auto-crossover* merepresentasikan konsistensi internal satelit, sedangkan RMS *dual-crossover* mencerminkan kesesuaian relatif terhadap satelit referensi, yaitu TOPEX/Jason *series*. Kedua parameter tersebut dirangkum dalam bentuk *Root Sum Square* (RSS) sebagai indeks agregat yang mempertimbangkan kedua aspek tersebut secara bersamaan. Dalam penelitian ini, RSS digunakan sebagai kriteria agregat untuk mendukung proses seleksi konfigurasi dan tidak dimaksudkan

 ISSN: 2714-8726

sebagai estimasi ketidakpastian gabungan yang mengasumsikan independensi antara RMS *auto-crossover* dan RMS *dual-crossover*.

Hasil evaluasi menunjukkan adanya perbedaan yang jelas pada karakteristik kesalahan antar satelit. ERS-2 memiliki nilai RSS terkecil sebesar 13,23 cm, yang mengindikasikan keseimbangan yang baik antara kesalahan internal dan eksternal. Sebaliknya, ENVISAT menunjukkan nilai RSS terbesar sebesar 14,97 cm, yang mencerminkan kontribusi kesalahan yang relatif lebih tinggi. GFO memperlihatkan nilai dual-crossover paling kecil, namun nilai auto-crossover yang relatif besar menyebabkan nilai RSS tetap relatif besar. Pola ini menegaskan bahwa kualitas satelit tidak dapat dinilai secara parsial, melainkan harus dilihat sebagai kombinasi dari konsistensi internal dan eksternal.

Tabel 3. Jarak antara titik dual-crossover dan collinear footprints serta jumlah titik crossover yang digunakan dalam analisis.

Satelit Altimetri	Jarak terpendek [m]	Jarak terjauh [m]	Jarak rata-rata [m]	Jumlah titik *crossover*
SENTINEL-3A	67,27	4517,40	2292,33	772
SENTINEL-3B	146,18	4780,02	2463,10	764
ERS-2	26,66	4784,81	2405,73	861
GFO	118,86	4791,71	2455,29	522
ENVISAT	65,10	4891,43	2478,26	839

Tabel 4. Nilai RMS Auto-Crossover, Dual-Crossover, dan Kombinasi (RSS) Satelit Altimetri terhadap Satelit Referensi.

Satelit altimetri	RMS Auto-*crossover* altimetri (cm)	RMS *Dual-crossover* altimetri (cm)	RSS (*Root Sum Square*) (cm)
SENTINEL-3A	4,69	13,88	14,65
SENTINEL-3B	4,92	13,73	14,59
ERS-2	5,37	12,10	13,23
ENVISAT	7,02	13,22	14,97
GFO	11,29	8,71	14,25
TOPEX/Jason *series*	2,09	Satelit Referensi	Satelit Referensi

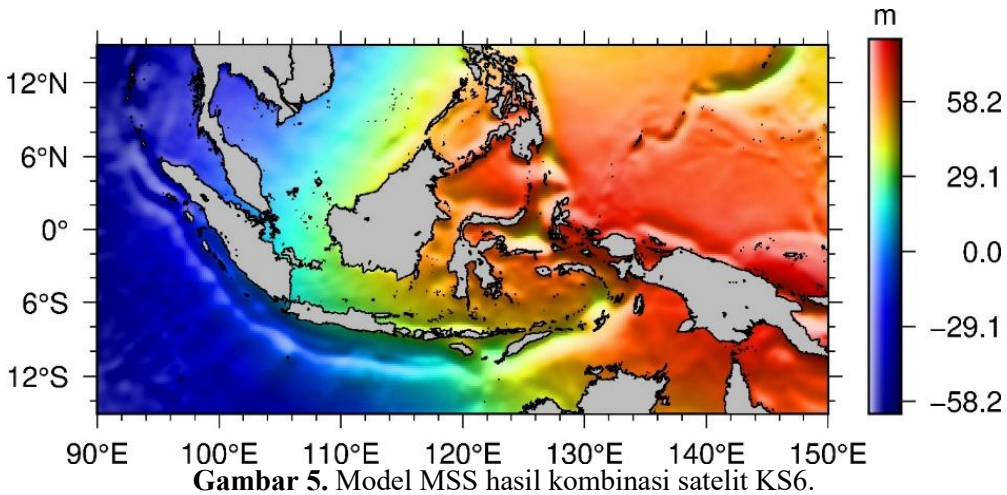
Tabel 5. Skema Kombinasi Satelit yang Diuji dalam Pemodelan MSS

No	Kombinasi Satelit	Dasar Pemilihan	Kelompok Satelit	Resolusi spasial
1	KS1	Satelit referensi + ERS-2	RSS minimum	$0{,}2980° \times 0{,}2980°$
2	KS2	Satelit referensi + GFO	Dual-crossover minimum	$0{,}3583° \times 0{,}3583°$
3	KS3	Satelit referensi + ERS-2 + GFO	Kombinasi error rendah	$0{,}2495° \times 0{,}2495°$
4	KS4	Satelit referensi + ERS-2 + GFO + SENTINEL-3B	Penambahan SENTINEL-3B berdasarkan RSS	$0{,}2058° \times 0{,}2058°$
5	KS5	Satelit referensi + GFO + ERS-2 + ENVISAT	Penggantian SENTINEL-3B dengan ENVISAT	$0{,}2050° \times 0{,}2050°$
6	KS6	Satelit referensi + ERS-2 + GFO + SENTINEL-3B + SENTINEL-3A	Penambahan SENTINEL-3A berdasarkan keseimbangan error	$0{,}1790° \times 0{,}1790°$
7	KS7	Satelit referensi + GFO + ERS-2 + ENVISAT + SENTINEL-3B	Penggantian SENTINEL-3A dengan ENVISAT	$0{,}1787° \times 0{,}1787°$
8	KS8	Satelit referensi + ERS-2 + GFO + SENTINEL-3B + SENTINEL-3A + ENVISAT	Seluruh satelit	$0{,}1603° \times 0{,}1603°$

 ISSN: 2714-8726

Tabel 6. Statistik Evaluasi Akurasi Kombinasi Satelit Altimetri

Kelompok Satelit	RMS (m)	*Mean* (m)	Standar Deviasi (m)	Median (m)	Minimum Residual (m)	Maksimum Residual (m)
KS1	2,002	1,329	1,505	1,145	-2,027	4,773
KS2	1,624	0,910	1,351	0,699	-1,859	4,514
KS3	1,464	0,864	1,188	0,746	-1,554	4,133
KS4	1,011	0,546	0,855	0,494	-1,696	3,123
KS5	1,291	0,841	0,984	0,745	-1,088	3,602
KS6	0,909	0,480	0,776	0,399	-1,016	2,812
KS7	1,082	0,608	0,898	0,490	-2,086	2,908
KS8	1,011	0,506	0,880	0,403	-2,130	2,904



Gambar 5. Model MSS hasil kombinasi satelit KS6.

Atas dasar kriteria tersebut, delapan konfigurasi (KS1–KS8) disusun sebagai skenario terpilih untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi satelit terhadap kualitas model MSS. Pemilihan setiap konfigurasi mempertimbangkan nilai RSS, kesesuaian relatif terhadap satelit referensi, dan peningkatan cakupan spasial. Delapan konfigurasi tersebut tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan seluruh kemungkinan kombinasi dari enam kelompok satelit.

Resolusi spasial ditentukan berdasarkan rata-rata kerapatan distribusi *footprint*. KS1 dan KS2 merupakan skenario alternatif dengan kriteria pemilihan berbeda, masing-masing berdasarkan RSS minimum dan *dual-crossover* minimum, sehingga urutan KS1–KS8 tidak secara langsung menunjukkan peningkatan resolusi. Pada konfigurasi berikutnya, ukuran grid secara umum semakin kecil hingga 0,1603° × 0,1603° pada KS8. Pengaruh perubahan resolusi terhadap kualitas model selanjutnya dievaluasi melalui validasi.

Evaluasi Akurasi Model MSS dan Hubungannya dengan Resolusi Spasial

Hasil validasi (Tabel 6) menunjukkan bahwa RMS menurun dari 2,002 m pada KS1 menjadi 0,909 m pada KS6. Penurunan RMS tersebut disertai penurunan standar deviasi dari 1,505 m menjadi 0,776 m, serta penurunan mean dan median. Setelah KS6, RMS kembali meningkat menjadi 1,082 m pada KS7 dan 1,011 m pada KS8. Pola tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan observasi tidak selalu menghasilkan peningkatan akurasi model.

Hubungan antara resolusi spasial dan RMS dievaluasi menggunakan korelasi Pearson berdasarkan delapan konfigurasi (n = 8), dengan koefisien korelasi r = 0,837 dan p = 0,0095. Korelasi positif menunjukkan bahwa nilai resolusi dalam satuan derajat yang lebih besar cenderung disertai RMS yang lebih besar, sehingga resolusi yang lebih tinggi (nilai derajat lebih kecil) cenderung berkaitan dengan RMS yang lebih rendah. Dari KS2 hingga KS6, ukuran grid mengecil dari 0,3583° menjadi 0,1790° dan RMS menurun dari 1,624 m menjadi 0,909 m, sedangkan pada KS7 dan KS8 RMS kembali meningkat meskipun ukuran grid semakin kecil. Model MSS hasil konfigurasi KS6 ditunjukkan pada Gambar 5. Pola tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara

 ISSN: 2714-8726

Tabel 7. Perbandingan Statistik Validasi Model MSS Global dan Model Hasil Penelitian.

Model MSS	RMS (m)	*Mean* (m)	Standar Deviasi (m)	Median (m)	Minimum Residual (m)	Maksimum Residual (m)
DTU21MSS	0,442	0,273	0,349	0,207	-0,446	1,394
DTU25MSS	0,354	0,182	0,305	0,111	-0,607	0,986
KS6	0,909	0,480	0,776	0,399	-1,016	2,812
SDUST2020	0,716	-0,677	0,232	-0,602	-1,150	0,12
CNESCLS22	0,631	-0,573	0,265	-0,690	-1,190	0,015

resolusi dan akurasi pada penelitian ini merupakan kecenderungan pada konfigurasi yang diuji dan perlu dipertimbangkan bersama komposisi serta karakteristik kesalahan satelit.

Kontribusi Satelit dan Perbandingan dengan Model MSS Global

Perubahan konfigurasi satelit menghasilkan respons RMS yang berbeda. Penambahan GFO pada KS1–KS2, ERS-2 pada KS2–KS3, SENTINEL-3B pada KS3–KS4, dan SENTINEL-3A pada KS4–KS6 menurunkan RMS masing-masing sebesar 0,378 m, 0,160 m, 0,453 m, dan 0,102 m. Sebaliknya, penggantian SENTINEL-3B dengan ENVISAT pada KS4–KS5 dan SENTINEL-3A dengan ENVISAT pada KS6–KS7 meningkatkan RMS masing-masing sebesar 0,280 m dan 0,173 m. Penambahan ENVISAT pada KS6–KS8 juga meningkatkan RMS sebesar 0,102 m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi satelit tidak selalu meningkatkan kualitas model, sehingga jumlah satelit perlu dipertimbangkan bersama karakteristik kesalahan masing-masing misi.

Perbandingan dengan model MSS global dilakukan menggunakan 108 stasiun pasut, periode pengamatan, datum, metode interpolasi nearest neighbor, dan parameter statistik yang sama. *Grid native* masing-masing model tetap dipertahankan sesuai karakteristiknya. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 7.

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa DTU21MSS, DTU25MSS, SDUST2020, dan CNESCLS22 menghasilkan RMS masing-masing sebesar 0,442 m, 0,354 m, 0,716 m, dan 0,631 m, sedangkan KS6 menghasilkan RMS sebesar 0,909 m. Selain RMS, distribusi residual menunjukkan bahwa KS6 memiliki penyebaran residual yang lebih besar dibandingkan model MSS global, yang tercermin dari standar deviasi dan rentang residual yang lebih lebar. Perbedaan tersebut berkaitan dengan karakteristik data dan strategi pembentukan masing-masing model. DTU21MSS memanfaatkan kombinasi *Exact Repeat Mission* (ERM) dan *Geodetic Mission* (GM), sedangkan DTU25MSS memanfaatkan data SWOT untuk meningkatkan representasi panjang gelombang pendek (Andersen *et al.*, 2023; Nilsson *et al.*, 2026).

KS6 dibangun hanya menggunakan data ERM, tanpa integrasi GM maupun data altimetri resolusi tinggi. Oleh karena itu, perbedaan hasil validasi perlu dipertimbangkan dalam konteks karakteristik data yang digunakan. Meskipun menghasilkan RMS yang lebih besar dibandingkan model MSS global, KS6 menunjukkan tingkat kesesuaian yang cukup kompetitif dengan mempertimbangkan keterbatasan komposisi dan karakteristik data yang digunakan dalam pembentukannya. Hasil ini menunjukkan bahwa evaluasi konfigurasi multi-satelit perlu mempertimbangkan tidak hanya kerapatan observasi, tetapi juga karakteristik dan konsistensi data antar-misi.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan pendekatan seleksi dan kombinasi satelit altimetri berdasarkan karakteristik *auto-crossover*, *dual-crossover*, dan *Root Sum Square* (RSS) untuk menyusun delapan skenario konfigurasi MSS. Hasil validasi menunjukkan bahwa KS6 merupakan konfigurasi terbaik dari skenario yang diuji, dengan RMS sebesar 0,909 m. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan observasi tidak selalu meningkatkan akurasi, karena perubahan komposisi satelit setelah KS6 justru meningkatkan RMS. Dengan demikian, konfigurasi multi-satelit perlu mempertimbangkan karakteristik kesalahan dan konsistensi antar-misi selain jumlah satelit dan kerapatan observasi. Temuan pada skenario yang diuji menunjukkan bahwa peningkatan kualitas model MSS memerlukan penentuan komposisi observasi yang sesuai, di mana penambahan data hanya memberikan manfaat apabila kontribusinya terhadap cakupan dan resolusi spasial tetap sejalan dengan karakteristik kesalahan serta konsistensi antar-misi.Penelitian ini masih terbatas pada

 ISSN: 2714-8726

delapan skenario terpilih, penggunaan data *Exact Repeat Mission* (ERM), serta TOPEX/Jason *series* sebagai kelompok referensi dalam analisis *dual-crossover* dan stasiun pasut sebagai data validasi. Perbedaan karakteristik antara MSS altimetri dan pengamatan muka laut pada stasiun pasut juga perlu dipertimbangkan dalam interpretasi residual validasi. Perbandingan dengan model MSS global dilakukan menggunakan basis validasi yang sama, meliputi stasiun, periode pengamatan, datum, metode interpolasi, dan parameter statistik, dengan *native grid* masing-masing model tetap dipertahankan. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa model yang dikembangkan masih memiliki keterbatasan, terutama dalam hal keragaman dan kelengkapan data altimetri. Model ini masih berada dalam tahap pengembangan dan belum memanfaatkan integrasi *Geodetic Mission* (GM) maupun data altimetri beresolusi tinggi seperti SWOT yang telah digunakan dalam pengembangan DTU21MSS dan DTU25MSS. Oleh karena itu, pengembangan selanjutnya perlu diarahkan pada integrasi sumber data altimetri yang lebih beragam, penyempurnaan strategi pengolahan untuk meningkatkan konsistensi dan akurasi model, serta pengujian kombinasi satelit yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

Abele, A., Royston, S., & Bamber, J. 2023. The Impact of Altimetry Corrections of Sentinel-3A Sea Surface Height in the Coastal Zone of the Northwest Atlantic. *Remote Sensing*, 15(4). https://doi.org/10.3390/rs15041132

Afrasteh, Y., Slobbe, D. C., Verlaan, M., Klees, R., Guarneri, H., Keyzer, L., Pietrzak, J., & Sacher, M. 2023. An Empirical Noise Model for the Benefit of Model-Based Hydrodynamic Leveling. *Journal of Geodesy*, 97(1): 1–21. https://doi.org/10.1007/s00190-022-01694-x

Andersen, O. B. 1995. Global Ocean Tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON Altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 100(C12): 25249–25259. https://doi.org/10.1029/95jc01389

Andersen, O. B., & Knudsen, P. 2009. DNSC08 Mean Sea Surface and Mean Dynamic Topography Models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C11). https://doi.org/10.1029/2008JC005179

Andersen, O. B., Stenseng, L., Piccioni, G., & Knudsen, P. 2016. The DTU15 MSS (Mean Sea Surface) and DTU15LAT (Lowest Astronomical Tide) Reference Surface. *ESA Living Planet Symposium*, European Space Agency (ESA), Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016: 1.

Andersen, O. B., Knudsen, P., & Stenseng, L. 2018. A New DTU18 MSS Mean Sea Surface – Improvement from SAR Altimetry. *25 Years of Progress in Radar Altimetry Symposium*, European Space Agency (ESA), Portugal, 24–29 September 2018: 172.

Andersen, O. B., Rose, S. K., Abulaitijiang, A., Zhang, S., & Fleury, S. 2023. The DTU21 Global Mean Sea Surface and First Evaluation. *Earth System Science Data*, 15(9): 4065–4075. https://doi.org/10.5194/essd-15-4065-2023

Badan Pusat Statistik. 2025. Statistik Sumber Daya Laut dan Pesisir 2025. Jakarta: Badan Pusat Statistik.

Beckley, B. D., Zelensky, N. P., Holmes, S. A., Lemoine, F. G., Ray, R. D., Mitchum, G. T., Desai, S. D., & Brown, S. T. 2010. Assessment of the Jason-2 Extension to the Topex/Poseidon, Jason-1 Sea-Surface Height Time Series for Global Mean Sea Level Monitoring. *Marine Geodesy*, 33(Suppl. 1): 447–471. https://doi.org/10.1080/01490419.2010.491029

Bettadpur, S. V., & Eanes, R. J. 1994. Geographical Representation of Radial Orbit Perturbations Due to Ocean Tides: Implications for Satellite Altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 99(C12): 24883–24894. https://doi.org/10.1029/94JC02080

Calman, J. 1987. Introduction to Sea-Surface Topography from Satellite Altimetry. *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*, 8(2): 206–211.

Chelton, D. B., Ries, J. C., Haines, B. J., Fu, L.-L., & Callahan, P. S. 2001. Satellite Altimetry. In L.-L. Fu & A. Cazenave (Eds.), *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications* (pp. 1–131). San Diego: Academic Press.

Fathulhuda, M. S., Wijaya, D. D., Prijatna, K., & Abidin, H. Z. 2024. On the Selection of Multi-Satellite Altimetry for Empirical Tide Modelling over Indonesia. *International Journal of Remote Sensing*, 45(9): 3149–3171. https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2343135

Fok, H. S. 2012. Ocean Tides Modeling Using Satellite Altimetry (Doctoral dissertation). The Ohio State University.

 ISSN: 2714-8726

Guo, J., Wang, J., Hu, Z., Liu, X., Kong, Q., & Zhao, C. 2016. Vertical Land Movement over China Coasts Determined by Tide Gauge and Satellite Altimetric Data. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3): 1–12. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2219-3

Van Gysen, H., Coleman, R., Morrow, R., Hirsch, B., & Rizos, C. 1992. Analysis of Collinear Passes of Satellite Altimeter Data. *Journal of Geophysical Research*, 97(C2): 2265–2277. https://doi.org/10.1029/91JC02451

Hamden, M. H., Din, A. H. M., Wijaya, D. D., Yusoff, M. Y. M., & Pa'suya, M. F. 2021. Regional Mean Sea Surface and Mean Dynamic Topography Models around Malaysian Seas Developed from 27 Years of Along-Track Multi-Mission Satellite Altimetry Data. *Frontiers in Earth Science*, 9. https://doi.org/ 10.3389/feart.2021.665876

Jiang, W., Li, J., & Wang, Z. 2002. Determination of Global Mean Sea Surface WHU2000 Using Multi-Satellite Altimetric Data. *Chinese Science Bulletin*, 47(19): 1664–1668. https://doi.org/10.1360/02tb 9365

Ke, H., Li, F., Ai, S., Lei, J., Wang, Z., & Zhang, S. 2020. Establishment of Chart Datum and Vertical Datum Transformation for Hydrography in the Chinese Great Wall Bay, Antarctic Peninsula. *Journal of Surveying Engineering*, 146(2): 1–12. https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000312

Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia. 2025. Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2025 tentang Rencana Strategis Kementerian Kelautan dan Perikanan Tahun 2025–2029.

Kim, H. J. 2015. A New Approach to the Determination of a Mean Sea Surface Model Using Multi-Satellite Altimeter Data (Doctoral dissertation). The University of Texas at Austin.

Kleinherenbrink, M., Riva, R., & Frederikse, T. 2018. A Comparison of Methods to Estimate Vertical Land Motion Trends from GNSS and Altimetry at Tide Gauge Stations. *Ocean Science*, 14(2): 187–204. https://doi.org/10.5194/os-14-187-2018

Lee, S. J., Kim, H. S., Yun, H. S., & Lee, S. H. 2025. Satellite-Derived Bathymetry Using Sentinel-2 and Airborne Hyperspectral Data: A Deep Learning Approach with Adaptive Interpolation. *Remote Sensing*, 17(15): 1–31. https://doi.org/10.3390/rs17152594

Lemoine, F. G., Zelensky, N. P., Beckley, B. D., Mitchum, G. T., Yang, X., & Nicholas, J. B. 2026. Precise Orbit Determination for TOPEX/Poseidon, Jasons 1, 2, 3 and Sentinel-6A and the std2400 Series of Orbits. *Advances in Space Research*, 77(5): 5910–5940. https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.12.112

Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrère, L., & Picot, N. 2021. FES2014 Global Ocean Tide Atlas: Design and Performance. *Ocean Science*, 17(3): 615–649. https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021

Molines, J. M., Le Provost, C., Lyard, F., Ray, R. D., Shum, C. K., & Eanes, R. J. 1994. Tidal Corrections in the TOPEX/POSEIDON Geophysical Data Records. *Journal of Geophysical Research*, 99(C12). https://doi.org/10.1029/94jc01959

Munk, W. H., & Cartwright, D. E. 1966. Tidal Spectroscopy and Prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 259(1105): 533–581. https://doi.org/10.1098/rsta.1966.0024 (nomor terbitan pada sumber tertulis dua kali "259(1105), 259(1105)" — disederhanakan menjadi satu, cek ulang)

Naeije, M., Schrama, E., & Scharroo, R. 2000. The Radar Altimeter Database System Project RADS. *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment, Proceedings*, 2: 487–490. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2000.861605

Naeije, M., Schrama, E., Doornbos, E., & Scharroo, R. 2006. The Role of RADS in Building the 15-Year Altimeter Record. In D. Danesy (Ed.), *Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry*, European Space Agency, Venice, Italy, 13–18 March 2006: 1–6.

Nilsson, B., Andersen, O. B., & Knudsen, P. 2026. The DTU25 Mean Sea Surface: From and for SWOT. *Earth System Science Data*, 18(7): 5027–5051. https://doi.org/10.5194/essd-18-5027-2026

Pujol, M. I., Schaeffer, P., Faugère, Y., Raynal, M., Dibarboure, G., & Picot, N. 2018. Gauging the Improvement of Recent Mean Sea Surface Models: A New Approach for Identifying and Quantifying Their Errors. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8): 5889–5911. https://doi.org/10.1029/2017JC013503

 ISSN: 2714-8726

Qiu, H., & Jin, S. 2020. Global Mean Sea Surface Height Estimated from Spaceborne Cyclone-GNSS Reflectometry. *Remote Sensing*, 12(3). https://doi.org/10.3390/rs12030356

Rukundo, O., & Cao, H. 2012. Nearest Neighbor Value Interpolation. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3(4): 25–30. https://doi.org/10.14569/ijacsa.2012.030405 (urutan entri ini pada sumber tertukar dengan entri Pujol dkk. — dibetulkan sesuai alfabet)

Schaeffer, P., Faugère, Y., Legeais, J. F., Ollivier, A., Guinle, T., & Picot, N. 2012. The CNES_CLS11 Global Mean Sea Surface Computed from 16 Years of Satellite Altimeter Data. *Marine Geodesy*, 35(Suppl. 1): 3–19. https://doi.org/10.1080/01490419.2012.718231

Schaeffer, P., Pujol, M. I., Veillard, P., Faugere, Y., Dagneaux, Q., Dibarboure, G., & Picot, N. 2023. The CNES CLS 2022 Mean Sea Surface: Short Wavelength Improvements from CryoSat-2 and SARAL/AltiKa High-Sampled Altimeter Data. *Remote Sensing*, 15(11): 2910. https://doi.org/10.3390/rs15112910

Scharroo, R., Leuliette, E. W., Lillibridge, J. L., Byrne, D., Naeije, M. C., & Mitchum, G. T. 2013. RADS: Consistent Multi-Mission Products. *Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry*, Venice, Italy, 20–28 September 2012. ESA Special Publication, ESA SP-710: 4. https://doi.org/10.5270/esa.sp-710.altimetry2012

Scharroo, R. 2026a. RADS Data Manual. Version 49.

Scharroo, R. 2026b. RADS User Manual. Version 64.

Smith, W. H. F., & Wessel, P. 1990. Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension. *Geophysics*, 55(3): 293–305. https://doi.org/10.1190/1.1442837

Tierney, C. C., Parke, M. E., & Born, G. H. 1998. An Investigation of Ocean Tides Derived from Along-Track Altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C5): 10273–10287. https://doi.org/10.1029/98jc00448

Veng, T., & Andersen, O. B. 2021. Consolidating Sea Level Acceleration Estimates from Satellite Altimetry. *Advances in Space Research*, 68(2): 496–503. https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.016

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

Wessel, P., & Smith, W. H. F. 1996. A Global, Self-Consistent, Hierarchical, High-Resolution Shoreline Database. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(4): 8741–8743. https://doi.org/10.1029/96jb00104

Yuan, J., Guo, J., Zhu, C., Li, Z., Liu, X., & Gao, J. 2023. SDUST2020 MSS: A Global 1'×1' Mean Sea Surface Model Determined from Multi-Satellite Altimetry Data. *Earth System Science Data*, 15(1): 155–169. https://doi.org/10.5194/essd-15-155-2023

Zhu, C., Guo, J., Gao, J., Liu, X., Hwang, C., Yu, S., Yuan, J., & Ji, B. 2020. Marine Gravity Determined from Multi-Satellite GM/ERM Altimeter Data over the South China Sea: SCSGA V1.0. *Journal of Geodesy*, 94(5). https://doi.org/10.1007/s00190-020-01378-4