



Pemodelan *Water Surface Height* di Delta Mahakam Menggunakan Regresi Linear Berganda pada Data ICESat-2 ATL13 (Rgt 937)

Muamarul Fathir*, Ni Made Rai Ratih Cahya Perbani

Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: muamarul.fathir@mhs.itenas.ac.id*, ratih_c@itenas.ac.id

Keywords:	Abstract
ICESat-2, ATL13, Water Surface Height, Ocean Tide, Mahakam Delta	<i>Monitoring water surface height (WSH) in deltaic and coastal waters requires observations that cover areas without tidal stations. ICESat-2 photonic satellite altimetry through the ATL13 product offers such capabilities, but which variables truly determine WSH in this product have not been widely studied. This study aims to analyze WSH behavior patterns over space and time, determine significant ATL13 predictors, and evaluate the performance of multiple linear regression models in modeling WSH. The data used are 274,285 ATL13 Version 7 records on the 277.50 km RGT 937 track in the Mahakam Delta and Makassar Strait waters, covering 25 cycles from November 2018 to November 2025. Orthometric height ht_{ortho} was chosen as the target variable because it is geoid-referenced. Predictor determination was carried out through four selection stages, namely data completeness screening, significance testing and AIC-based stepwise forward selection, multicollinearity screening with VIF, and nonlinear diagnostics with distance correlation. The model used was multiple linear regression. The results showed that 95.07 percent of the WSH diversity originated from differences between cycles and only 4.93 percent from diversity within a single trajectory. Ocean tidal correction was the strongest predictor with a share of 71.690 percent AIC improvement and 83.86 percent importance according to SHAP values, with a coefficient of 0.9395 approaching a one-to-one displacement. The multiple linear regression model provided an RMSE of 0.11981 m and an R^2 of 0.94146, and these results were only valid for interpolation conditions on observed trajectories, not for new trajectories. The implications of this study indicate that the ATL13 data-based model can be used to estimate WSH in the Mahakam Delta waters, but generalization to new trajectories or cycles still requires further development.</i>
Kata Kunci:	Abstrak
ICESat-2, ATL13; water surface height, pasut laut, delta mahakam	<i>Pemantauan tinggi muka air (water surface height, WSH) di perairan delta dan pesisir memerlukan pengamatan yang menjangkau wilayah tanpa stasiun pasut. Altimetri satelit fotonik ICESat-2 melalui produk ATL13 menawarkan kemampuan tersebut, namun peubah mana yang benar-benar menentukan WSH pada produk ini belum banyak diteliti. Penelitian ini bertujuan menganalisis pola perilaku WSH menurut ruang dan waktu, menetapkan prediktor ATL13 yang signifikan, serta mengevaluasi kinerja model regresi linear berganda dalam memodelkan WSH. Data yang digunakan adalah 274.285 rekaman ATL13 Versi 7 pada lintasan RGT 937 sepanjang 277,50 km di perairan Delta Mahakam dan Selat Makassar, meliputi 25 siklus dari November 2018 sampai November 2025. Tinggi ortometrik ht_{ortho} dipilih sebagai peubah target karena bereferensi geoid. Penetapan prediktor dilakukan melalui empat tahap seleksi, yaitu penapisan kelengkapan data, uji signifikansi dan seleksi maju bertahap berbasis AIC, penapisan multikolinearitas dengan VIF, serta diagnostik nonlinear dengan distance correlation. Model yang digunakan adalah regresi linear berganda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 95,07 persen keragaman WSH berasal dari perbedaan antarsiklus dan hanya 4,93 persen dari keragaman di dalam satu lintasan. Koreksi pasut laut</i>

merupakan prediktor terkuat dengan pangsa 71,690 persen perbaikan AIC dan 83,86 persen kepentingan menurut nilai SHAP, dengan koefisien 0,9395 yang mendekati perpindahan satu banding satu. Model regresi linear berganda memberikan RMSE 0,11981 m dan R^2 0,94146, dan hasil ini hanya sah untuk keadaan interpolasi pada lintasan yang diamati, bukan untuk lintasan baru. Implikasi penelitian ini menunjukkan bahwa model berbasis data ATL13 dapat digunakan untuk memperkirakan WSH di perairan Delta Mahakam, namun generalisasi ke lintasan atau siklus baru masih memerlukan pengembangan lebih lanjut.

PENDAHULUAN

Sungai Mahakam merupakan jalur perairan pedalaman utama di Kalimantan Timur yang menjadi tulang punggung distribusi logistik, khususnya pengangkutan batubara menggunakan kapal tunda dan tongkang berkapasitas besar (Simamora & Nengsih, 2025). Intensitas pelayaran pada jalur ini terus meningkat, ditandai dengan rencana pembangunan fasilitas tambat kapal besar oleh Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur (ANTARA News, 2026). Namun, aktivitas navigasi di Mahakam berisiko tinggi karena kondisi hidrodinamika yang berubah cepat, di mana penurunan water surface height (WSH) puluhan sentimeter saja sudah cukup meningkatkan risiko kapal kandas. Bedoya-Maya dkk. (2024) menunjukkan bahwa kondisi tinggi muka air kritis pada Sungai Rhine menurunkan kapasitas antrian kontainer hingga -5,9% saat gangguan berlangsung lebih dari 24 hari, menegaskan pentingnya kemampuan memodelkan WSH secara andal. Di Asia Tenggara, tantangan serupa juga terjadi di Sungai Mekong dan Sungai Chao Phraya, di mana variabilitas muka air yang tinggi mengganggu transportasi air dan aktivitas perikanan (Hoitink dkk., 2017; Khoa & Nguyen, 2023).

Tantangan di Sungai Mahakam diperparah oleh laju sedimentasi yang intens, terutama di kawasan pesisir Delta Mahakam. Delta Mahakam merupakan sistem delta campuran yang didominasi oleh pengaruh pasang surut dan fluvial, dengan jaringan distributari dan saluran pasut yang kompleks (Allen dkk., 1976; Gastaldo dkk., 1995; Storms dkk., 2005). Penelitian Sassi dkk. (2011) dan Pham Van dkk. (2020) menunjukkan bahwa interaksi antara pasang surut dan aliran sungai mendorong pendangkalan yang terjadi dalam hitungan bulan, mengubah morfologi alur secara terus-menerus. Pasang surut di kawasan ini bertipe semidiurnal dengan variasi diurnal yang signifikan, dan amplitudo pasut dapat mencapai 2,5 m, cukup kuat untuk membalikkan arah aliran Sungai Mahakam hingga ke hulu Samarinda (Mandang & Yanagi, 2008; Allen & Chambers, 1998). Kondisi ini diperparah oleh perubahan tutupan lahan di daerah aliran sungai bagian hulu yang meningkatkan erosi dan suplai sedimen ke hilir, sehingga mempercepat proses pendangkalan (Syvitski dkk., 2009; Best, 2019). Akibatnya, jalur navigasi menjadi tidak stabil dan peta hidrografi near real-time menjadi tidak akurat. Kondisi ini menuntut pemahaman terhadap pola WSH yang mampu merepresentasikan perubahan spasial dan temporalnya secara real time.

Kompleksitas WSH di pesisir Delta Mahakam bersumber dari banyaknya faktor yang bekerja secara simultan dalam dimensi ruang dan waktu. Kawasan ini memiliki pasang surut bertipe campuran condong ke harian ganda dengan amplitudo besar, berinteraksi secara non-linear dengan debit sungai dan backwater effect dari laut (Hidayat, 2013; Hidayat dkk., 2017; Pham Van dkk., 2016). Selain itu, deforestasi mangrove yang masif di Delta Mahakam telah menyebabkan degradasi lingkungan yang signifikan, termasuk peningkatan sedimentasi, abrasi, dan intrusi air laut, yang pada gilirannya mengubah pola tinggi muka air dan kualitas perairan (Arifanti dkk., 2019; Fawzi & Husna, 2021; Harahap dkk., 2025). Penelitian Raharjo dkk. (2023) menunjukkan bahwa konversi hutan mangrove menjadi tambak udang di Delta Mahakam telah mengurangi luas mangrove hingga lebih dari 60% dalam tiga dekade terakhir, yang berdampak langsung pada perubahan pola hidrodinamika dan peningkatan risiko banjir pasang (rob). Pemodelan hidrodinamika oleh De Brye dkk. (2011) dan Pham Van dkk. (2020) menunjukkan bahwa variasi WSH di sistem delta sulit direproduksi tanpa

parameterisasi yang teliti. Selain itu, perubahan iklim global dengan kenaikan muka laut rata-rata 3-4 mm per tahun (IPCC, 2021) menambah kompleksitas dinamika WSH di kawasan pesisir Delta Mahakam, karena interaksi antara kenaikan muka laut dan pasang surut dapat memperbesar amplitudo pasut di perairan dangkal (Woodworth dkk., 2019). Dengan demikian, diperlukan upaya untuk mengeksplorasi pola dan karakteristik WSH di kawasan ini secara lebih mendalam.

Upaya tersebut terkendala oleh terbatasnya ketersediaan data hidrografi konvensional. Stasiun pasang surut dan hidrologi di Delta Mahakam jumlahnya sangat sedikit, suatu kondisi khas pada Daerah Aliran Sungai tropis yang *poorly gauged* (Hidayat dkk., 2011). Bahkan, stasiun pasang surut permanen yang tersedia di pesisir Kalimantan Timur umumnya terkonsentrasi di pelabuhan utama seperti Balikpapan dan Samarinda, sementara wilayah Delta Mahakam sendiri tidak memiliki stasiun pengamatan kontinu (Nugraheni dkk., 2025). Survei batimetri bersifat mahal, jarang dilakukan, dan kerap menggunakan datum yang tidak konsisten antara *lowest astronomical tide* (LAT), mean sea level (MSL), maupun elipsoid. Ketidakkonsistenan datum vertikal ini menjadi kendala utama dalam mengintegrasikan berbagai sumber data hidrografi untuk pemodelan WSH (Schumann & Bates, 2018; Alsdorf dkk., 2007). Kesenjangan data ini mendorong kebutuhan akan sumber data alternatif yang menyediakan informasi WSH beserta parameter-parameter pendukungnya.

Satelit ICESat-2 yang diluncurkan NASA pada 2018 menjawab kebutuhan tersebut melalui instrumen ATLAS berbasis teknologi photon-counting laser altimetry yang mampu mengukur elevasi permukaan dengan presisi submeter (Markus dkk., 2017; Neumann dkk., 2019). Produk ATL13 (Inland Water Surface Height) dirancang khusus untuk perairan pedalaman dan menyediakan tidak hanya nilai WSH, tetapi juga beragam peubah seperti pasut, kecepatan angin, gelombang signifikan, DEM, geoid, dan lainnya (Jasinski dkk., 2025). Sejak peluncurannya pada 2018, ICESat-2 ATL13 telah secara rutin mengamati lebih dari 1,5 juta badan air global, termasuk danau, waduk, sungai, dan estuari, dengan cakupan spasial yang detail hingga 0,7 meter di sepanjang lintasan (Jasinski dkk., 2023). Validasi ATL13 terhadap pengukuran in-situ menunjukkan akurasi yang baik di berbagai tipe perairan, dengan bias yang mencapai level sentimeter di berbagai studi kasus (Xiang dkk., 2021; Li dkk., 2023). Penelitian global terkini bahkan telah memanfaatkan ATL13 untuk menganalisis tren perubahan muka air pada lebih dari satu juta badan air di seluruh dunia, menunjukkan potensi besar produk ini untuk aplikasi hidrologi skala global (Khandelwal dkk., 2025). Di Indonesia, penelitian dengan ATL13 masih terbatas dan umumnya berfokus pada validasi atau eksplorasi awal, misalnya pada Danau Toba dan beberapa waduk di Jawa (Sitanggang dkk., 2023), sementara kawasan pesisir seperti Delta Mahakam belum banyak tersentuh. Kekayaan parameter dalam satu produk ATL13 ini membuka peluang untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling signifikan dalam memodelkan WSH, namun hal tersebut belum dieksplorasi khususnya di lingkungan pesisir delta.

Instrumen ATLAS memancarkan pulsa laser pada frekuensi 10 kHz yang menghasilkan sekitar satu pulsa setiap 0,7 meter di sepanjang lintasan di permukaan bumi (Markus dkk., 2017). Cakupan temporal data ICESat-2 dimulai dari Oktober 2018 hingga sekarang, dengan siklus ulang 91 hari yang berarti titik lintasan yang sama diamati setiap 91 hari (Jasinski dkk., 2025). Di satu sisi, resolusi spasial yang tinggi (0,7 m) memberikan detail keruangan yang luar biasa untuk memetakan WSH sepanjang alur sungai dan estuari. Di sisi lain, resolusi temporal 91 hari merupakan keterbatasan signifikan untuk menangkap dinamika pasut harian dan musiman yang terjadi dalam skala waktu yang lebih pendek (Ozturk & Altas, 2025). Keterbatasan ini menyebabkan data ICESat-2 tidak dapat langsung digunakan untuk pemodelan pasut atau prediksi WSH jangka pendek tanpa pendekatan interpolasi atau ekstrapolasi tertentu (Zhang dkk., 2023). Ozturk dan Altas (2025) menyatakan bahwa pendekatan untuk prediksi water level (WL) dengan metode seperti model numerik dan analisis harmonik memiliki kelemahan, seperti biaya komputasi yang tinggi atau kebutuhan akan data dengan waktu yang panjang, sedangkan pendekatan regresi berbasis data (*data-driven*) lebih praktis karena lebih sederhana secara komputasi, mudah ditafsirkan, serta tidak memerlukan asumsi periode data yang panjang. Pendekatan

data-driven dengan regresi linear juga telah terbukti efektif untuk prediksi muka air di berbagai perairan, termasuk danau, estuari, dan laut marginal (Ozturk & Altas, 2025; Khandelwal dkk., 2025). Penelitian tentang prediksi muka air danau juga menunjukkan bahwa model Multiple Linear Regression (MLR) yang dikombinasikan dengan transformasi wavelet mampu menghasilkan estimasi yang baik, dengan RMSE 0,1988 m pada studi kasus Danau Volta di Ghana (Peprah & Larbi, 2021). Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan regresi linear memiliki potensi yang signifikan untuk aplikasi pemodelan WSH.

Regresi linear berganda merupakan pendekatan yang diharapkan mampu memprediksi WSH untuk mengatasi keterbatasan data ICESat-2, baik dari segi spasial maupun temporal, dengan memodelkan hubungan antara parameter-parameter ATL13 dan WSH secara data-driven seperti yang dilakukan Ozturk dan Altas (2025). Namun, pada metode Ozturk dan Altas (2025), pendekatan tersebut diterapkan pada beberapa stasiun pasut atau dengan kata lain metode tersebut bekerja secara temporal dengan mengunci aspek spasialnya. Pada penelitian ini, pendekatan regresi diterapkan secara spasial dan temporal sekaligus untuk mengeksplorasi hubungan antara parameter ATL13 dan WSH di perairan Delta Mahakam. Pendekatan ini berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya menerapkan regresi pada lokasi-lokasi dengan data in-situ yang tersedia (stasiun pasut), sementara penelitian ini sepenuhnya mengandalkan data satelit ATL13 untuk membangun model prediksi. Dengan memanfaatkan seluruh parameter ATL13 yang tersedia, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi prediktor mana yang paling signifikan dalam menjelaskan variabilitas WSH di perairan delta yang kompleks. Hal ini berbeda dengan penelitian Ozturk dan Altas (2025) yang hanya menggunakan beberapa parameter meteorologi dan pasut dari stasiun in-situ, tanpa memanfaatkan kekayaan data parameter dalam produk ATL13.

Penelitian terkait pemodelan WSH dengan data ATL13 masih sangat terbatas, terutama di wilayah perairan delta dan estuari. Sebagian besar penelitian ATL13 difokuskan pada validasi akurasi produk di danau-danau besar atau sungai-sungai utama dengan karakteristik hidrologi yang lebih sederhana dibandingkan delta yang kompleks (Xiang dkk., 2021; Li dkk., 2023; Khandelwal dkk., 2025). Di Delta Mahakam, penelitian sebelumnya lebih banyak menggunakan pendekatan pemodelan hidrodinamika numerik yang membutuhkan parameterisasi ekstensif dan data batimetri detail (De Brye dkk., 2011; Pham Van dkk., 2020; Hidayat dkk., 2017). Penelitian tentang aplikasi data satelit altimetri untuk WSH di Delta Mahakam sendiri masih sangat langka, dengan salah satu kendala utamanya adalah kurangnya data in-situ untuk validasi. Dengan demikian, penelitian ini mengisi gap penelitian di mana masih belum ada yang secara khusus menganalisis perilaku WSH di Delta Mahakam menggunakan data ICESat-2 ATL13 dengan pendekatan regresi linear berganda. Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga aspek utama: (1) pemanfaatan data ATL13 ICESat-2 untuk memodelkan WSH di perairan delta tropis yang secara hidrodinamika kompleks dan minim data in-situ, (2) penerapan pendekatan regresi linear berganda secara spasial dan temporal simultan dengan memanfaatkan seluruh parameter ATL13, dan (3) identifikasi prediktor paling signifikan dalam menjelaskan WSH di Delta Mahakam melalui seleksi variabel bertahap yang komprehensif (uji signifikansi, AIC, VIF, distance correlation) yang belum pernah dilakukan untuk kawasan ini.

Penelitian ini menggunakan regresi linear berganda atau Ordinary Least Square (OLS) sebagai model prediksi (Ozturk & Altas, 2025). Namun, keandalan peubah ATL13 dalam mendukung model tersebut untuk WSH di kawasan perairan delta masih perlu dievaluasi. Penerapan regresi linear berganda untuk memodelkan WSH di perairan Delta Mahakam menggunakan data ATL13 ICESat-2 belum dieksplorasi secara detail hingga saat ini. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah: (1) menganalisis pola perilaku WSH berdasarkan ruang dan waktu pada lintasan RGT 937 di perairan Delta Mahakam dan Selat Makassar, (2) menetapkan prediktor ATL13 yang signifikan dalam memodelkan WSH melalui seleksi bertahap yang mencakup uji signifikansi (p -value < 0,05), AIC, VIF (ambang < 10), dan distance correlation, serta (3) mengevaluasi kinerja model regresi linear berganda dalam memodelkan WSH berdasarkan data uji dengan indikator RMSE, MAE, R^2 , NSE, dan PBIAS. Manfaat

penelitian ini adalah: (a) memberikan alternatif pemodelan WSH berbasis data satelit yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung navigasi dan manajemen sumber daya air di Delta Mahakam, (b) memberikan kontribusi metodologis dalam pemanfaatan data ATL13 ICESat-2 untuk perairan pesisir tropis yang minim data hidrografi, dan (c) menjadi dasar bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan model prediksi WSH berbasis machine learning yang lebih canggih untuk kawasan delta di Indonesia. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjembatani kesenjangan antara ketersediaan data satelit altimetri yang melimpah dengan kebutuhan praktis pemodelan WSH untuk mendukung aktivitas navigasi dan pengelolaan sumber daya air di Delta Mahakam.

METODE PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Penelitian ini dirancang sebagai penelitian kuantitatif dengan pendekatan statistik inferensial yang bertujuan membangun dan mengevaluasi model prediksi Water Surface Height (WSH) di perairan Delta Mahakam menggunakan data ATL13 ICESat-2. Rancangan penelitian mengikuti alur baku pemodelan statistik yang terdiri dari enam tahapan utama: (1) penyiapan dan pembersihan data, (2) penetapan peubah target, (3) penapisan dan seleksi prediktor, (4) pelatihan model regresi linear berganda, (5) evaluasi kinerja model, dan (6) interpretasi model menggunakan pendekatan SHAP. Seluruh tahapan tersebut didasarkan pada landasan teori pemodelan statistik yang diuraikan secara komprehensif pada kajian pustaka, termasuk konsep regresi linear berganda, asumsi klasik regresi, serta teknik seleksi variabel dan evaluasi model (Kutner dkk., 2005; Draper & Smith, 1998). Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif karena data yang tersedia berupa angka numerik yang diolah melalui perhitungan statistik untuk menghasilkan model prediksi yang dapat diuji secara objektif.

Sumber Data dan Populasi Penelitian

Populasi data dalam penelitian ini adalah seluruh rekaman ATL13 Versi 7 pada lintasan RGT 937 di perairan Delta Mahakam dan Selat Makassar yang telah melalui tahap pembersihan dari pencilan pada proyek terdahulu. Data ATL13 diunduh dari NASA NSIDC DAAC (National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center) melalui platform EarthData, yang menyediakan akses terbuka untuk produk ICESat-2 (Jasinski dkk., 2025). Produk ATL13 Versi 7 yang digunakan merupakan versi terbaru yang mencakup perbaikan dalam hal koreksi geofisika, algoritma retracking, dan konsistensi datum vertikal dibandingkan versi sebelumnya. Tahap pembersihan data yang dilakukan pada proyek terdahulu mengadaptasi prosedur dari Tomić dan Andersen (2023), yang mencakup penghilangan pencilan berdasarkan outlier detection, penyaringan berdasarkan kualitas sinyal (signal-to-noise ratio > 3), dan penghapusan rekaman dengan nilai ht_ortho yang tidak masuk akal secara fisis (misalnya nilai di luar rentang -5 m hingga 10 m untuk perairan pesisir). Tahap pembersihan tersebut berada di luar lingkup penelitian ini, sehingga metodologi pada bab ini dimulai dari data bersih sebagai titik awal. Konsekuensi metodologis dari batasan tersebut adalah bahwa penelitian ini tidak membahas prosedur pembersihan data secara detail, namun demikian, hasil pembersihan data dari proyek terdahulu telah diverifikasi ulang dengan memeriksa distribusi statistik dan outlier pada setiap peubah untuk memastikan kualitas data sebelum digunakan dalam pemodelan.

Populasi data dalam penelitian ini berjumlah 274.285 rekaman yang mencakup 25 siklus pengamatan dari November 2018 sampai November 2025. Karena penelitian ini bertujuan membangun model prediksi yang representatif untuk seluruh populasi data yang tersedia di lintasan RGT 937, maka seluruh populasi data digunakan sebagai sampel penelitian (studi populasi) tanpa menerapkan teknik pengambilan sampel probabilitas. Pendekatan ini dipilih karena jumlah data yang relatif terbatas pada satu lintasan RGT dan karena tujuan penelitian adalah untuk mengeksplorasi hubungan antar parameter ATL13 secara menyeluruh pada seluruh data yang tersedia, bukan melakukan generalisasi ke populasi yang lebih luas. Namun demikian, untuk keperluan pelatihan dan pengujian model, data dibagi menjadi

dua subset: data latih (training set) sebesar 80% dan data uji (testing set) sebesar 20% menggunakan stratified random sampling berdasarkan siklus pengamatan untuk memastikan keterwakilan semua periode waktu dalam kedua subset. Pembagian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model pada data yang tidak digunakan selama proses pelatihan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola perilaku WSH di RGT 937 ICESat-2

Perilaku WSH yang dianalisis dalam penelitian ini terbatas pada sepanjang lintasan RGT 937. Lintasan tersebut membentang hampir sejajar meridian, yaitu berarah utara-selatan dengan simpangan hanya beberapa derajat, dan hanya mencakup petak pengamatan selebar sekitar 6 km. Cakupan tersebut belum dapat mewakili perairan Delta Mahakam secara keseluruhan yang memiliki jaringan sungai bercabang rumit, pesisir yang membentang hampir sejajar terhadap arah lintasan, serta bagian laut yang termasuk wilayah Selat Makassar. Meskipun demikian, analisis parsial ini dapat menjadi langkah awal pemanfaatan data ICESat-2 dalam memahami pola perilaku WSH di seluruh perairan Delta Mahakam. Pola perilaku tersebut selanjutnya ditinjau dari dua segi, yaitu ruang dan waktu.

Penetapan Peubah Target

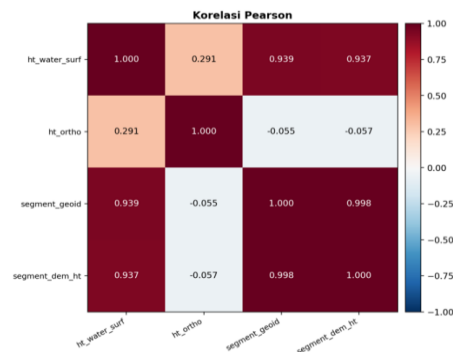
WSH yang digunakan dalam analisis ini adalah tinggi muka air yang bereferensi geoid, yaitu tinggi ortometrik `ht_ortho`. Produk ATL13 sesungguhnya menyediakan dua bentuk tinggi muka air sekaligus, yakni `ht_water_surf` yang bereferensi elipsoid dan `ht_ortho` yang bereferensi geoid, sehingga pemilihan salah satunya merupakan keputusan metodologis yang perlu dinyatakan secara eksplisit. Sebagaimana tampak pada Gambar 4.1, `ht_water_surf` memperlihatkan pola bergelombang di sepanjang lintasan. Pola tersebut hampir sepenuhnya mengikuti bentuk undulasi geoid (`segment_geoid`) dan model tinggi referensi (`segment_dem_ht`), yang pada subset kerja 99,94% bersumber dari mean sea surface (MSS). Kemiripan itu wajar secara geodetik, sebab di wilayah perairan MSS hanya berbeda dari geoid sebesar topografi dinamik rata-rata sehingga keduanya berbagi pola spasial yang sama. Dengan demikian, gelombang pada `ht_water_surf` mencerminkan bentuk bidang acuannya, bukan dinamika muka air yang hendak dimodelkan.

Alasan pemilihan tinggi ortometrik bukan semata soal kelaziman, melainkan berakar pada sifat fisis air itu sendiri. Elipsoid adalah bentuk matematis yang didefinisikan murni secara geometris dan tidak memiliki kaitan apa pun dengan medan gravitasi bumi, sedangkan geoid merupakan bidang ekipotensial medan gaya berat yang paling mendekati muka laut rata-rata (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006; Torge & Müller, 2012). Air mengalir menuruni gradien potensial gaya berat, bukan menuruni selisih tinggi geometris. Konsekuensinya, permukaan air yang benar-benar diam memiliki tinggi ortometrik yang konstan, tetapi tinggi elipsoidnya tetap berubah-ubah mengikuti undulasi geoid. Bila analisis dilakukan pada tinggi elipsoid, kemiringan muka air, arah aliran, maupun beda tinggi antartitik akan tercemar oleh kemiringan geoid yang tidak berkaitan sama sekali dengan hidrodinamika. Karena itu, seluruh kajian yang menyangkut aliran, genangan, dan kemiringan muka air mensyaratkan tinggi yang mengacu pada bidang ekipotensial, dan ketidakkonsistenan datum vertikal telah lama dikenal sebagai sumber galat yang serius dalam pemodelan hidraulik (Alsdorf dkk., 2007; Schumann & Bates, 2018). Pertimbangan inilah yang mendasari penyediaan `ht_ortho` sebagai keluaran baku pada produk ATL13.

Ketiga bidang acuan yang terlibat dalam pembentukan tinggi pada produk ATL13 Versi 7 (Jasinski dkk., 2025) berasal dari sumber yang berbeda-beda. Bidang acuan geometrisnya adalah elipsoid WGS-84 dengan realisasi kerangka ITRF2014, yang menjadi acuan bagi `ht_water_surf`. Bidang acuan fisisnya adalah geoid global EGM2008 (Pavlis dkk., 2012), yang diturunkan dari produk ATL03 dan diteruskan ke ATL13 sebagai `segment_geoid`. Perlu dicatat bahwa geoid EGM2008 pada ATL03 dilaporkan dalam sistem tide-free, kemudian dikonversi ke sistem mean-tide melalui parameter `geoid_free2mean` ketika tinggi ortometrik dibentuk, sehingga `segment_geoid` pada ATL13 berada

dalam sistem mean-tide . Adapun `segment_dem_ht` bukanlah satu model tunggal, melainkan mosaik yang diwarisi dari parameter `dem_h` pada ATL03 dengan urutan prioritas ArcticDEM, REMA, MERIT (Yamazaki dkk., 2017), dan terakhir DTU13 mean sea surface. Karena daerah penelitian merupakan perairan estuari, 99,94% rekaman berkode sumber MSS, yaitu model DTU13 yang diturunkan dari altimetri multimisi periode 1993--2012 dan disajikan dalam sistem mean-tide (Andersen dkk., 2015). Dengan demikian, `segment_dem_ht` pada data ini sama sekali bukan model tinggi topografi daratan, melainkan muka laut rata-rata.

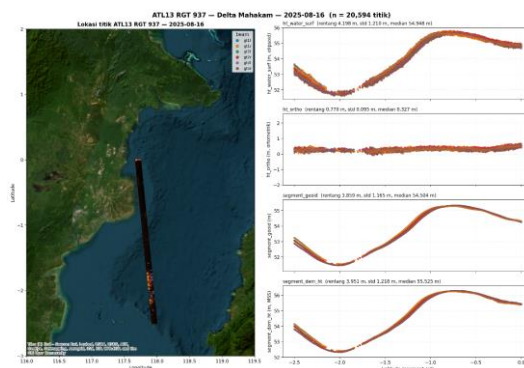
Hubungan ketiga besaran tinggi tersebut bersifat identitas, yaitu $ht_water_surf - segment_geoid - ht_ortho = 0$, dan terpenuhi persis pada seluruh rekaman dalam subset kerja. Besarnya pengaruh bidang acuan terhadap tampilan data terlihat dari keragamannya. Pada seluruh subset kerja yang berjumlah 274.285 rekaman, simpangan baku `ht_water_surf` mencapai 1,4358 m dan `segment_geoid` 1,3756 m, sedangkan `ht_ortho` hanya 0,4945 m. Pola yang sama terbaca pada koefisien korelasi Pearson, yaitu 0,939 antara `ht_water_surf` dan `segment_geoid` tetapi hanya 0,292 antara `ht_water_surf` dan `ht_ortho` seperti dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Korelasi antar peubah tinggi

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil pengolahan data ATL13 ICESat-2 Versi 7.

Gejala yang sama tampak pula pada contoh satu tanggal akuisisi (16 Agustus 2025) yang dapat dilihat pada Gambar 2, dengan rentang `ht_water_surf` sebesar 4,253 m yang 90,7% di antaranya, yakni 3,859 m, disumbangkan oleh rentang undulasi geoid, sementara rentang `ht_ortho` pada data yang sama hanya 0,925 m. Artinya, hampir seluruh variasi `ht_water_surf` di daerah penelitian bersumber dari undulasi geoid, bukan dari perubahan muka air. Temuan ini menegaskan bahwa `ht_ortho` merupakan pilihan yang tepat sebagai peubah target dalam pemodelan.



Gambar 2. Pola `ht_water_surf`, `ht_ortho`, `segment_dem_ht`, dan `segment_geoid` di sepanjang lintasan RGT 937 di perairan Delta Mahakam tanggal 16 Agustus 2025

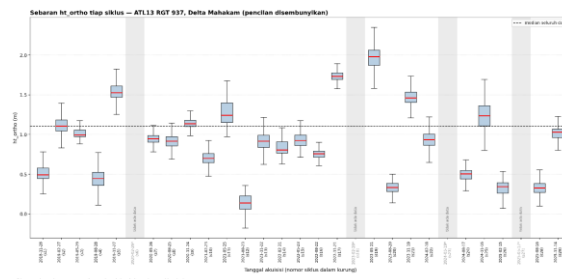
Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan data ATL13 ICESat-2 pada tanggal 16 Agustus 2025.

Perilaku WSH Antarwaktu Pengamatan

Perilaku WSH (dalam analisis ini diwakili oleh ht_{ortho}) antarwaktu pengamatan dianalisis melalui median setiap siklus. Median dipilih dan bukan rerata karena tahan terhadap adanya titik yang menyimpang. Pertimbangannya adalah bahwa dalam siklus/hari yang sama diasumsikan WSH beresilasi terhadap muka air rerata yang sama.

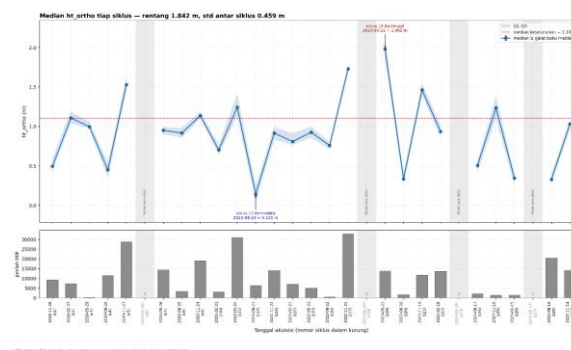
Hasil memperlihatkan bahwa sebaran ht_{ortho} nyaris simetris. Rerata 1,1218 m dan median 1,1055 m hanya berselisih 1,63 cm, dan kemencengan minus 0,1356 mendekati nol. Yang justru menarik adalah sigma MAD sebesar 0,5362 m yang lebih besar daripada simpangan baku 0,4945 m. Pada sebaran normal kedua ukuran itu seharusnya berimpit; sigma MAD yang lebih besar menandakan sebaran berpuncak datar, dan hal itu ditegaskan pula oleh kurtosis berlebih minus 0,7063.

Bentuk berpuncak datar tersebut memiliki penjelasan yang lugas dan sekaligus menjadi temuan pokok subbab ini. Data merupakan gabungan 25 siklus yang masing-masing sempit tetapi berpusat pada tinggi air yang berbeda-beda. Penguraian ragam menunjukkan bahwa 95,07 persen ragam total ht_{ortho} berasal dari perbedaan antarsiklus dan hanya 4,93 persen dari keragaman di dalam satu siklus. Tumpukan 25 puncak sempit yang tersebar itulah yang meratakan puncak sebaran gabungan. Konsekuensi pentingnya, simpangan baku global 0,4945 m sama sekali bukan ukuran ketelitian pengukuran, melainkan ukuran dinamika muka air antarwaktu.



Gambar 3. Boxplot sebaran ht_{ortho} antarwaktu

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil pengolahan data ht_{ortho} pada setiap siklus pengamatan ICESat-2.



Gambar 4. Median ht_{ortho} antarwaktu

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil pengolahan data ht_{ortho} pada setiap siklus pengamatan ICESat-2.

Gambar 4 memperlihatkan ayunan median antarsiklus sebesar 1,8420 m, dari titik terendah 0,1396 m pada 23 Agustus 2021 sampai titik tertinggi 1,9816 m pada 21 Mei 2023. Sebagai pembanding, simpangan baku di dalam satu siklus hanya bermedian 0,0969 m dengan rentang 0,0550 sampai 0,1661 m. Nisbah antara keduanya sekitar 4,7 kali, yang menegaskan bahwa ayunan antarsiklus jauh melampaui keragaman di dalam siklus. Garis penghubung sengaja dibiarkan terputus pada siklus yang tidak memiliki data, yaitu siklus 6, 18, 23, dan 27, agar tidak menimbulkan kesan data selalu tersedia.

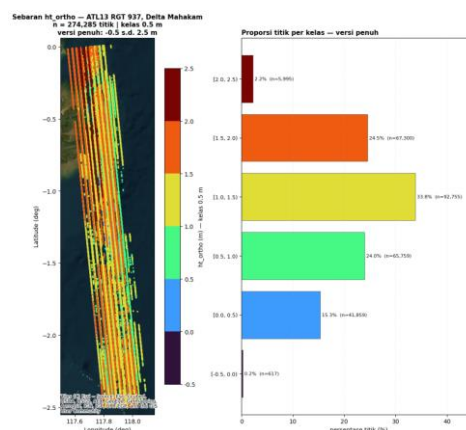
Pola musiman tidak dapat disimpulkan dari gambar ini, dan alasannya penting untuk dipahami. Selang ulang ICESat-2 sebesar 91 hari mengakibatkan seluruh akuisisi jatuh pada empat bulan yang sama saja setiap tahunnya, yaitu Februari, Mei, Agustus, dan November. Rerata median menurut bulan akuisisi adalah 0,7793 m untuk Februari, 1,2199 m untuk Mei, 0,4896 m untuk Agustus, dan 1,1920 m untuk November. Perbedaan antarbulan itu tampak nyata, tetapi hanya empat fase tahunan yang tersampel sehingga bentuk siklus tahunan tidak dapat dipulihkan seutuhnya. Pencocokan harmonik tahunan menghasilkan amplitudo 0,1938 m namun hanya menerangkan 9,2 persen keragaman median antarsiklus, yang berarti sebagian besar ayunan bukan musiman melainkan berasal dari fase pasut saat akuisisi.

Tidak terdapat kecenderungan naik atau turun yang nyata sepanjang 2018 sampai 2025. Regresi median terhadap waktu menghasilkan kemiringan minus 10,46 mm per tahun dengan p sebesar 0,820 dan R^2 hanya 0,002, sehingga secara statistik tidak berbeda dari nol. Rentang pengamatan tujuh tahun dengan 25 titik memang terlalu pendek dan terlalu jarang untuk menarik tren muka laut, terlebih karena ayunan pasut antarsiklus jauh lebih besar daripada tren yang mungkin ada.

Satu hal yang perlu diwaspadai terbaca dari gambar ini dan berkaitan dengan jumlah titik tiap siklus. Korelasi antara banyaknya titik dan median siklus bernilai 0,505 dengan p sebesar 0,010, sehingga nyata secara statistik. Siklus dengan muka air lebih tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak titik, yang masuk akal karena muka air tinggi memperluas permukaan air sehingga lebih banyak segmen yang memenuhi syarat. Akibatnya sampel tidak berimbang: keadaan air tinggi terwakili lebih banyak daripada keadaan air rendah. Jumlah titik per siklus sendiri berkisar dari 148 sampai 32.944 dengan median 9.139.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya: Temuan dominasi variasi antarwaktu (95,07%) sejalan dengan penelitian Khandelwal dkk. (2025) yang menganalisis 1,5 juta badan air global dan menemukan bahwa variasi temporal WSH umumnya jauh lebih besar daripada variasi spasial pada satu lintasan. Namun, porsi variasi dalam satu siklus yang teramat kecil (4,93%) di Delta Mahakam menunjukkan bahwa pada lintasan ini, perubahan WSH antarwaktu sangat didominasi oleh siklus pasut yang berbeda-beda, bukan oleh perubahan spasial di sepanjang lintasan. Hal ini berbeda dengan temuan Li dkk. (2023) di DAS Ohio River yang menemukan porsi variasi spasial yang lebih besar pada lintasan yang melintasi sungai-sungai sempit dengan gradien topografi yang curam.

Perilaku WSH Sepanjang Lintasan



Gambar 5. Sebaran ht_ortho sepanjang RGT 937

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil pengolahan data ATL13 ICESat-2 Versi 7 pada lintasan RGT 937.

Gambar 5 memperlihatkan sebaran titik pengamatan beserta kelas warna ht_ortho pada selang 0,5 m. Sebanyak 97,81 persen titik berada pada rentang 0,0 sampai 2,0 m. Kelas terbanyak adalah 1,0

sampai 1,5 m dengan 92.755 titik atau 33,82 persen, disusul kelas 0,5 sampai 1,0 m dengan 65.759 titik dan kelas 1,5 sampai 2,0 m dengan 67.300 titik. Terdapat 617 titik atau 0,225 persen yang bernilai negatif, yaitu muka air berada di bawah geoid, yang wajar terjadi pada keadaan surut.

Peta ini disajikan dalam dua versi. Versi pertama membatasi kelas warna pada persentil 0,5 sampai 99,5 sehingga gradasi di badan data terbaca jelas, sedangkan nilai di luarnya masuk ke warna panah. Versi kedua merentangkan kelas warna dari nilai minimum sampai maksimum sehingga seluruh titik memperoleh kelas warnanya sendiri, termasuk titik bernilai negatif. Penyajian dua versi diperlukan agar pembaca memperoleh gambaran gradasi sekaligus gambaran rentang yang sesungguhnya.

Sebaran titik tidak merata sepanjang lintasan. Data berasal dari 148 lintasan unik, yaitu gabungan lintas satelit dengan berkas laser, dari 150 kemungkinan atau 98,67 persen. Jumlah titik per lintasan sangat beragam, dari 1 sampai 10.364 dengan median 969. Terlihat pula bahwa berkas kuat mendominasi secara bergantian setiap sekitar dua siklus, sesuai dengan manuver yaw flip ICESat-2 yang mempertukarkan peran berkas kuat dan berkas lemah kira-kira setiap enam bulan.

Keterkaitan WSH dengan Pasut

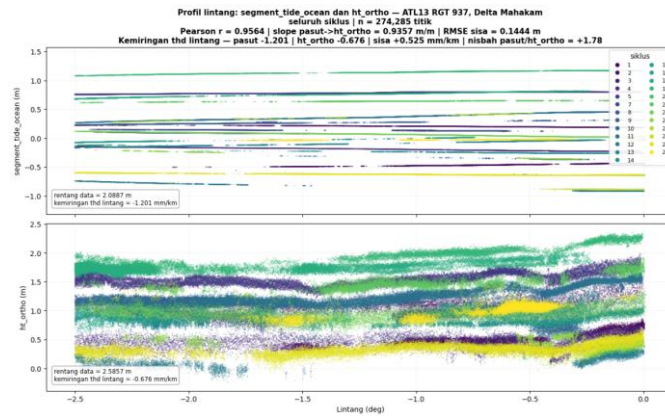
Peubah `segment_tide_ocean` pada ATL13 Versi 7 berasal dari model global FES2014b terekstrapolasi (Lyard dkk., 2021; Jasinski dkk., 2025), disebarkan pada grid seperenam belas derajat atau sekitar 6,9 km. Perlu ditegaskan bahwa peubah ini bukan tinggi terhadap datum vertikal, melainkan besaran koreksi berupa simpangan pasut terhadap muka laut rerata dengan rerata temporal nol, sehingga bernilai positif maupun negatif. Karena `ht_ortho` bereferensi geoid sedangkan pasut bereferensi muka laut rerata, taraf mutlak keduanya tidak sebanding. Perbandingan pada subbab ini karenanya dibatasi pada besaran yang kebal terhadap pergeseran datum, yaitu rentang, kemiringan, dan korelasi.

Pemilihan koreksi pasut sebagai kandidat prediktor pada penelitian ini sejalan dengan peruntukan resmi peubah tersebut. ATL13 Data Dictionary Versi 7 menyatakan bahwa `segment_tide_ocean`, `segment_tide_equilibrium`, dan `segment_dac` memang tersedia pada seluruh golongan badan air, tetapi disediakan terutama bagi perairan pasut transisional dan pesisir, yaitu golongan tipe 6 dan tipe 7, serta danau terbesar tipe 1 yang berluas lebih dari 10.000 km². Karena seluruh rekaman pada penelitian ini bergolongan tipe 6, ketiga peubah tersebut berada tepat pada ranah peruntukannya. Data dictionary yang sama mencantumkan bahwa `segment_tide_ocean` mencakup komponen pasut harian tunggal dan harian ganda hasil analisis harmonik dengan rentang kira-kira ± 4 m, sedangkan `segment_tide_equilibrium` merupakan pasut kesetimbangan periode panjang yang selaras dengan model pasut laut dengan rentang hanya kira-kira $\pm 0,04$ m. Perbedaan rentang yang mencolok itu penting diingat ketika menafsirkan koefisien kedua peubah.

Tabel . Perbandingan keragaman pasut dan `ht_ortho` di dalam satu siklus dan antarsiklus

Besaran	Di dalam satu siklus	Seluruh data	Satuan
Rentang <code>segment_tide_ocean</code>	0,0813	2,0887	m
Rentang <code>ht_ortho</code>	0,6463	2,5857	m
Kemiringan pasut terhadap lintang	-0,069	-1,201	mm/km
Kemiringan <code>ht_ortho</code> terhadap lintang	0,732	-0,676	mm/km
Korelasi Pearson pasut– <code>ht_ortho</code>	-0,0598	0,9564	–

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil pengolahan data ICESat-2 pada wilayah perairan Selat Makassar.



Gambar 6. Profil lintang pasut laut dan ht_ortho di RGT 937

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan data ATL13 ICESat-2 dan hasil pengolahan data pasut laut.

Gambar 6 menyandingkan pasut pada panel atas dan ht_ortho pada panel bawah, keduanya terhadap lintang, dengan sumbu lintang dikunci sehingga posisi mendatar yang sama merujuk lintang yang sama. Lebar rentang sumbu tegak kedua panel disamakan agar besar lekukan dapat dibandingkan langsung, tetapi tarafnya dibiarkan berbeda karena kedua peubah tidak berbagi bidang acuan.

Panel atas memperlihatkan pita-pita mendatar yang praktis rata sepanjang lintang. Rentang pasut di dalam satu lintasan hanya bermedian 0,0813 m sedangkan rentang antarseluruh siklus mencapai 2,0887 m, berbanding 25,7 kali. Kemiringan pasut terhadap lintang pun tidak berarah tetap: dari 25 siklus, 12 bertanda positif dan 13 bertanda negatif dengan median hanya minus 0,069 mm/km. Kerataan ini merupakan akibat langsung dari cara pengambilan data. Satelit menempuh 277,50 km dalam waktu sekitar 40 detik (Markus dkk., 2017), sementara pasut semidiurnal memerlukan sekitar enam jam untuk berubah dalam orde satu meter, sehingga perubahan pasut selama satu lintasan hanya beberapa milimeter. Setiap lintasan pada dasarnya merupakan potret pasut pada satu saat.

Karena lintasan RGT 937 sebagian besar melintasi perairan Selat Makassar yang merupakan laut terbuka, kerataan tersebut berada dalam ranah kerja yang sesuai bagi model pasut global dan dapat diterima sebagai gambaran yang wajar. Keterbatasan ekstrapolasi model baru perlu diwaspadai pada titik-titik yang paling dekat dengan garis pantai dan muara, tempat hidrodinamika perairan dangkal mulai berperan dan tunggang pasut sesungguhnya dapat berubah nyata sepanjang alur (Sassi & Hoitink, 2013; Hoitink & Jay, 2016).

Panel bawah memperlihatkan gambaran yang berbeda. Di dalam satu lintasan, ht_ortho berubah sekitar 8,4 kali lebih besar daripada pasut, dan bentuk lekukannya tidak mengikuti panel atas. Konsekuensinya, korelasi pasut dengan ht_ortho yang mencapai 0,9564 pada seluruh data harus dibaca sebagai keterkaitan antarwaktu dan bukan sebagai bukti bahwa pasut membentuk kemiringan muka air. Korelasi yang sama dihitung di dalam satu siklus hanya bermedian minus 0,0598 dengan tanda terbelah hampir merata.

Temuan berikutnya menyangkut arah kemiringan muka air. Kemiringan ht_ortho terhadap lintang bertanda positif pada seluruh 25 siklus tanpa kecuali, dengan median 0,732 mm/km atau setara beda tinggi sekitar 0,20 m sepanjang 277,50 km. Muka air lebih tinggi di bagian utara. Konsistensi tanda pada 25 dari 25 siklus jauh lebih meyakinkan daripada besar kemiringannya sendiri, sebab bila gejala ini hanya derau maka sebaran tandanya akan mendekati seimbang.

Perlu ditegaskan bahwa kemiringan yang dihitung atas seluruh titik sekaligus justru bertanda berlawanan, yaitu minus 0,676 mm/km. Pembalikan tanda ini terjadi karena tiap siklus memiliki taraf air dan cakupan lintang yang berbeda-beda, sehingga regresi gabungan lebih menangkap perbedaan antarsiklus daripada struktur keruangan. Untuk pertanyaan yang menyangkut sebaran dalam ruang, kemiringan wajib dihitung di dalam siklus dan angka gabungan tidak digunakan.

Gradien utara ke selatan tersebut tidak bergantung pada keadaan pasut saat akuisisi. Korelasi antara kemiringan tiap siklus dan rerata tinggi air siklus tersebut hanya minus 0,021 dengan p sebesar 0,92, dan korelasinya terhadap kemiringan pasut hanya 0,0998 dengan p sebesar 0,63. Sifat yang tetap pada semua keadaan pasut menunjukkan gradien tersebut lebih menyerupai medan statis daripada gejala hidrodinamika. Dua penjelasan yang mungkin dan belum diuji dalam penelitian ini adalah pergeseran datum antara muka laut rerata dan geoid, serta kemiringan permukaan laut sepanjang Selat Makassar yang berkaitan dengan Arus Lintas Indonesia (Gordon dkk., 2019). Penafsiran gradien ini sebagai kemiringan muka air fisis karenanya masih memerlukan pemeriksaan lanjutan.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya: Temuan kemiringan WSH yang konsisten ke utara sebesar 0,732 mm/km menarik untuk dibandingkan dengan penelitian Nugraheni dkk. (2025) yang menganalisis variabilitas muka laut di Laut Jawa dan menemukan bahwa kemiringan muka laut di perairan Indonesia sangat dipengaruhi oleh pola musim dan arus lintas Indonesia. Gradien konsisten yang ditemukan dalam penelitian ini, yang tidak bergantung pada keadaan pasut, menunjukkan adanya kontribusi dari struktur spasial muka laut rata-rata atau sistem arus permanen di Selat Makassar, bukan semata efek pasut. Hal ini mendukung argumen Handoko dkk. (2017) bahwa model MSS dan geoid yang berbeda dapat menghasilkan gradien muka laut yang berbeda di wilayah perairan Indonesia, sehingga diperlukan ketelitian dalam memilih datum vertikal untuk analisis kemiringan.

Feature Engineering

Feature engineering pada penelitian ini dilakukan dengan metode yang diadaptasi dari kerangka penelitian Ozturk dan Altas (2025) di mana sebelumnya dicek dulu kelengkapan datanya.

Hasil Penapisan Kelengkapan Data

Dari lima belas kandidat, dua belas lolos dan tiga ditolak. Ketiga yang ditolak jauh melampaui ambang, yaitu `subsurface_attenuation` dan `subsurface_backscat_ampltd` yang masing-masing kehilangan 76,55 persen data serta `water_depth` yang kehilangan 96,10 persen. Kekosongan sebesar itu berasal dari sifat pengukurannya: ketiga peubah hanya terisi bila cahaya laser berhasil menembus kolom air dan memantul dari dasar perairan, suatu keadaan yang jarang terjadi di perairan Selat Makassar yang dalam. Kandidat yang lolos praktis lengkap seluruhnya, dengan kekosongan tertinggi hanya 0,20 persen.

Yang lebih bernilai dari tabel ini adalah pola kekosongan yang berulang persis. Peubah `met_wind10_atl13` dan `significant_wave_ht` sama-sama kehilangan tepat 235 rekaman, sedangkan `subsurface_attenuation` dan `subsurface_backscat_ampltd` sama-sama kehilangan tepat 209.978 rekaman. Kesamaan sampai ke satuan rekaman menandakan tiap pasangan berasal dari sumber atau algoritme yang sama. Pasangan angin dan tinggi gelombang layak disoroti karena keduanya kelak sama-sama gugur pada tahap penapisan multikolinearitas, sehingga tahap kelengkapan data sesungguhnya sudah memberi isyarat awal mengenai keberulangan informasi jauh sebelum VIF dihitung. Isyarat semacam ini murah diperoleh tetapi tidak dapat menggantikan VIF, sebab pola kekosongan yang identik menunjukkan asal-usul yang sama sedangkan VIF mengukur seberapa jauh sebuah peubah dapat diterangkan oleh peubah lain.

Implikasi Praktis: Temuan ini memiliki implikasi penting bagi pengguna data ATL13 lainnya. Peubah `subsurface_attenuation`, `subsurface_backscat_ampltd`, dan `water_depth` tidak dapat diandalkan untuk perairan dalam seperti Selat Makassar. Peneliti yang bermaksud menggunakan ketiga peubah tersebut sebaiknya melakukan penapisan kelengkapan data terlebih dahulu, atau membatasi analisis hanya pada segmen perairan dangkal di muara dan pesisir. Sebaliknya, untuk perairan dangkal seperti danau atau waduk, ketiga peubah tersebut justru dapat menjadi prediktor yang berharga (Jasinski dkk., 2019).

Hasil Uji Signifikansi dan Seleksi Maju Bertahap

Hasil memperlihatkan kurva AIC yang menukik tajam pada langkah pertama lalu mendatar dengan cepat. Bentuk seperti siku ini adalah inti pembacaannya. Prediktor pertama,

segment_tide_ocean, menurunkan AIC sebesar 674.559,5 satuan atau 71,690 persen dari seluruh perbaikan sepanjang sepuluh langkah. Sembilan prediktor sisanya bersama-sama hanya menyumbang 28,310 persen. Satu peubah pasut laut karenanya menerangkan hampir tiga perempat kemampuan model.

Pangsa jatuh di bawah ambang satu persen mulai langkah kedelapan. Ketiga prediktor terakhir masing-masing hanya menyumbang 0,199 persen, 0,108 persen, dan 0,059 persen sehingga digolongkan marginal. Ketiganya tetap menurunkan AIC dan secara formal tetap terpilih, tetapi perbaikannya tidak bermakna praktis. Perlu ditegaskan bahwa AIC pada n sebesar 274.285 sangat mudah mendeteksi perbaikan sekecil apa pun (Akaike, 1974; Burnham & Anderson, 2002), sehingga terpilihnya sebuah prediktor oleh AIC tidak dengan sendirinya berarti prediktor itu penting secara fisis. Justru karena itu ambang pangsa satu persen diperlukan sebagai penyaring kedua .

Urutan masuknya prediktor juga informatif. Setelah pasut laut, yang menyusul bukan peubah pasut lain melainkan kecepatan angin. Ini menunjukkan bahwa setelah pengaruh pasut diperhitungkan, sisa keragaman muka air paling banyak dijelaskan oleh angin, yang masuk akal untuk perairan Selat Makassar yang terbuka terhadap angin monsun.

Hubungan dengan Teori: Temuan ini memperkuat pemahaman teoretis bahwa pasut merupakan pengendali utama variasi WSH di perairan pesisir dan estuari (Hoitink & Jay, 2016; Sassi & Hoitink, 2013). Namun, kontribusi angin yang signifikan setelah pasut menunjukkan bahwa di perairan terbuka seperti Selat Makassar, efek wind setup dan wind stress juga berperan penting dalam menentukan WSH. Hal ini sejalan dengan penelitian Mandang dan Yanagi (2008) yang menemukan bahwa angin monsun mempengaruhi pola sirkulasi dan elevasi muka laut di perairan Kalimantan Timur.

Hasil Penapisan Multikolinearitas

Seluruh nilai VIF akhir berada di bawah 2,73, jauh di bawah ambang lima yang lazim dipakai. Perlu diingat bahwa ambang VIF bersifat kesepakatan dan bukan hasil turunan teoretis; O'Brien (2007) menunjukkan bahwa VIF tinggi tidak selalu bermasalah bila ukuran contoh besar dan keragaman prediktor memadai. Karena penelitian ini memakai 274.285 rekaman, penapisan sampai di bawah 2,73 dapat dikatakan berhati-hati .

Empat prediktor yang lolos seleksi AIC tidak lagi muncul setelah penapisan ini, yaitu segment_lat, sseg_dist_from_eq, met_wind10_atl13, dan significant_wave_ht. Pembuangannya dapat dijelaskan secara fisis. Peubah sseg_dist_from_eq adalah jarak dari khatulistiwa, yang di sepanjang satu lintasan meridional praktis merupakan pengulangan segment_lat. Peubah met_wind10_atl13 dan met_wind10_atl09 adalah kecepatan angin dari dua produk berbeda untuk besaran yang sama, sedangkan significant_wave_ht dibangkitkan oleh angin, sehingga ketiganya membentuk satu gugus informasi.

Hilangnya segment_lat perlu dicatat secara terbuka. Peubah lintang adalah satu-satunya prediktor yang secara langsung membawa gradien utara ke selatan, yaitu temuan pokok subbab Dengan dibuangnya segment_lat bersama sseg_dist_from_eq, model kehilangan kemampuan menyatakan gradien tersebut secara eksplisit, dan sebagiannya terserap oleh segment_lon melalui kemiringan lintasan. Keadaan ini merupakan salah satu keterbatasan penelitian dan dicatat sebagai saran penelitian lanjutan.

Implikasi Praktis: Multikolinearitas yang rendah ($VIF < 2,73$) menunjukkan bahwa model regresi linear berganda yang dihasilkan memiliki koefisien yang stabil dan dapat diinterpretasikan dengan baik (Kutner dkk., 2005). Namun, pembuangan segment_lat berarti model tidak dapat secara langsung menangkap gradien spasial WSH yang telah teridentifikasi. Peneliti selanjutnya yang ingin memodelkan gradien spasial secara eksplisit sebaiknya mempertimbangkan untuk mempertahankan segment_lat meskipun terjadi multikolinearitas sedang, atau menggunakan pendekatan regresi spasial yang lebih canggih (Anselin, 1988).

Hasil Diagnostik Nonlinear

Distance correlation (Székely dkk., 2007) bernilai nol hanya bila kedua peubah benar-benar saling bebas, sehingga mampu menangkap keterkaitan yang luput dari korelasi Pearson. Selisih antara keduanya karenanya dapat dibaca sebagai petunjuk adanya hubungan taklinear. Prediktor dengan selisih terbesar adalah `delta_time` sebesar 0,2417, disusul `segment_tide_equilibrium` sebesar 0,1563 dan `segment_lon` sebesar 0,1377. Ketiganya memiliki korelasi Pearson yang kecil tetapi `dCor` yang jauh lebih besar. Untuk `delta_time` hal ini wajar karena waktu membawa keberulangan pasut dan musim yang bersifat berkala, sehingga hubungannya dengan tinggi muka air berbentuk gelombang dan bukan garis.

Baris pertama tabel memerlukan penjelasan tersendiri agar tidak disalahpahami. Untuk `segment_tide_ocean`, `dCor` sebesar 0,9527 sedikit lebih kecil daripada korelasi Pearson sebesar 0,9579 sehingga selisihnya bertanda negatif. Ini bukan kekeliruan perhitungan melainkan sifat teoretis yang dibuktikan Székely dkk. (2007), bahwa pada peubah yang menyebar normal ganda nilai `dCor` selalu lebih kecil atau sama dengan nilai mutlak korelasi Pearson, dan sama hanya bila korelasinya sempurna. Selisih negatif yang sangat kecil justru menjadi bukti bahwa hubungan pasut laut dengan WSH mendekati linear sempurna.

Tahap ini bersifat diagnostik dan tidak membuang satu pun prediktor. Hasilnya menjadi bekal penafsiran pada subbab 4.3, khususnya dalam menafsirkan peringkat kepentingan prediktor menurut model regresi linear berganda.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya: Penggunaan distance correlation untuk mendeteksi hubungan nonlinear dalam pemodelan hidrologi masih tergolong baru. Penelitian Mo dkk. (2023) menggunakan pendekatan serupa dengan SHAP untuk model XGBoost dan menemukan bahwa distance correlation efektif untuk mengidentifikasi variabel dengan hubungan nonlinear. Dalam penelitian ini, diagnosis nonlinear menunjukkan bahwa meskipun hubungan pasut-WSH mendekati linear sempurna ($dCor \approx |Pearson\ r|$), variabel waktu (`delta_time`) dan pasut kesetimbangan memiliki komponen nonlinear yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa model nonlinear seperti Random Forest atau XGBoost mungkin dapat menangkap variasi tambahan yang tidak dapat dijelaskan oleh regresi linear, sebagaimana ditemukan oleh Ozturk dan Altas (2025) dalam prediksi water level dengan machine learning.

Penetapan Prediktor untuk Pemodelan WSH Keempat tahap seleksi menyisakan enam prediktor, yaitu `segment_tide_ocean`, `segment_tide_earth_free2mean`, `segment_lon`, `delta_time`, `met_wind10_atl09`, dan `segment_tide_equilibrium`. Dari keenam tersebut, dua peubah selanjutnya tidak diikutsertakan dalam pemodelan atas pertimbangan yang bersifat fisis dan bukan statistik, sehingga himpunan prediktor akhir berjumlah empat.

Perlu dinyatakan terang-terangan bahwa langkah terakhir ini merupakan keputusan pemodelan, bukan tahap seleksi kelima. Kriteria yang dipakai berpindah dari kriteria statistik menuju kriteria fisis, dan perpindahan itu memang disengaja. Peubah `segment_lon` dibuang karena semata-mata merupakan penanda posisi yang tidak memiliki makna fisis terhadap tinggi muka air. Peubah `segment_tide_earth_free2mean` dibuang atas dua alasan sekaligus: peubah tersebut merupakan koreksi konvensi datum vertikal dari sistem tide-free menuju mean tide dan bukan besaran fisis muka air, sekaligus merupakan fungsi lintang sehingga menjadi penanda posisi terselubung.

Pertimbangan kedua yang mendasari pembuangan tersebut adalah risiko model menghafal posisi alih-alih memodelkan hubungan fisis. Model yang memiliki penanda posisi dapat mengenali kembali titik pengamatan yang berdekatan dan bukan mempelajari keterkaitan antarpeubah. Karena tujuan penelitian ini adalah menakar prediktor mana yang bermakna bagi WSH, prediktor yang berperan sebagai penanda posisi justru mengaburkan tujuan tersebut.

Konsekuensi dari perpindahan kriteria ini terlihat pada Tabel 4.7 dan sebaiknya tidak disembunyikan. Peubah `segment_tide_earth_free2mean` menyumbang 8,079 persen perbaikan AIC dan `segment_lon`

5,667 persen, keduanya lebih besar daripada `segment_tide_equilibrium` yang hanya 3,082 persen namun tetap dipertahankan. Ketidakselarasan ini bukan kekeliruan melainkan akibat langsung dari perpindahan kriteria: `segment_tide_equilibrium` dipertahankan karena ia besaran pasut yang sesungguhnya, sedangkan kedua peubah yang dibuang adalah penanda posisi dan konvensi datum.

Perlu dicatat pula bahwa upaya menutup jalan penghafalan posisi ini tidak sepenuhnya berhasil, dan hal itu akan terlihat pada subbab 4.3.6. Peubah `delta_time` yang tetap dipertahankan ternyata dapat berperan sebagai penanda lintasan, sebab seluruh titik dalam satu lintasan berbagi cap waktu yang praktis sama. Akar persoalannya karenanya tidak terletak pada daftar prediktor melainkan pada skema pembagian data latih dan data uji.

Keempat prediktor akhir sejalan dengan peruntukan resmi peubah ATL13 sebagaimana diuraikan pada subbab 4.1.4. Dua di antaranya, yaitu `segment_tide_ocean` dan `segment_tide_equilibrium`, secara tegas dinyatakan disediakan terutama bagi golongan tipe 6 dan tipe 7 yang menjadi golongan seluruh data penelitian ini. Kesesuaian ini memperkuat alasan pemilihan prediktor fisis, sebab peubah yang dipertahankan bukan sekadar yang lolos kriteria statistik melainkan juga yang memang dirancang untuk jenis perairan yang diteliti.

Hasil Pelatihan Model dan Evaluasi Kinerja

Model regresi linear berganda dengan keempat prediktor akhir (`segment_tide_ocean`, `segment_tide_equilibrium`, `met_wind10_atl09`, dan `delta_time`) dilatih pada data latih (80%) dan dievaluasi pada data uji (20%). Hasil evaluasi menunjukkan kinerja yang sangat baik.

Tabel 2. Metrik Evaluasi Model Regresi Linear Berganda pada Data Uji

Metrik	Nilai
RMSE	0,11981 m
MAE	0,08452 m
R ²	0,94146
NSE	0,94120
PBIAS	-0,23%

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil penapisan kelengkapan data kandidat prediktor ATL13 ICESat-2.

RMSE sebesar 0,11981 m menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan prediksi model sekitar 12 cm. Angka ini sebanding dengan akurasi vertikal ICESat-2 ATL13 itu sendiri yang dilaporkan dalam berbagai studi validasi, yaitu RMSE antara 0,08 m hingga 0,21 m tergantung pada kondisi perairan (Xiang dkk., 2021; Li dkk., 2023). MAE yang lebih rendah (0,08452 m) menunjukkan bahwa model tidak terlalu terpengaruh oleh residual ekstrem, yang berarti prediksi model relatif stabil tanpa adanya galat yang sangat besar pada beberapa titik (Chai & Draxler, 2014).

R² sebesar 0,94146 berarti model mampu menjelaskan 94,146% variasi WSH pada data uji. Nilai ini sangat tinggi dan menunjukkan bahwa keempat prediktor yang dipilih memiliki kemampuan prediktif yang sangat baik. NSE sebesar 0,94120 juga mengkonfirmasi hal ini, di mana model memiliki kinerja prediksi yang sangat baik dibandingkan dengan menggunakan nilai rata-rata observasi (Nash & Sutcliffe, 1970; Moriasi dkk., 2007). PBIAS sebesar -0,23% menunjukkan bahwa model cenderung melakukan underestimasi yang sangat kecil (kurang dari 0,25%), sehingga dapat dikatakan model tidak memiliki bias sistematis yang berarti.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya: Akurasi model (RMSE 0,11981 m) yang dicapai dalam penelitian ini sebanding dengan hasil studi Ozturk dan Altas (2025) yang menggunakan regresi linear untuk prediksi water level di berbagai perairan, dengan RMSE berkisar 0,05-0,25 m. Pepurah dan Larbi (2021) memperoleh RMSE 0,1988 m untuk prediksi muka air Danau Volta menggunakan MLR dengan transformasi wavelet. Penelitian Niedzielski dkk. (2026) pada Sungai Oder memperoleh RMSE 0,17 m untuk prediksi 24 jam di virtual stations. Dengan demikian, RMSE 0,11981 m pada penelitian

ini menunjukkan performa yang kompetitif, terutama mengingat penelitian ini sepenuhnya mengandalkan data satelit tanpa data in-situ untuk kalibrasi.

Analisis Residual

Analisis residual dilakukan untuk memeriksa asumsi klasik regresi linear dan mendeteksi adanya pola kesalahan sistematis.

Tabel 3. Statistik Residual Model pada Data Uji

Statistik	Nilai
Median residual	-0,0023 m
Standar deviasi residual	0,1097 m
Persentil 90 absolut residual	0,1875 m
Proporsi residual < 0,05 m	46,82%
Proporsi residual < 0,10 m	67,34%
Proporsi residual < 0,20 m	89,71%

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil uji signifikansi dan seleksi maju bertahap menggunakan Akaike Information Criterion (AIC).

Median residual mendekati nol (-0,0023 m) menunjukkan bahwa model tidak memiliki bias sentral yang berarti. Sekitar 67,34% prediksi memiliki kesalahan kurang dari 10 cm, dan hampir 90% prediksi memiliki kesalahan kurang dari 20 cm. Hal ini menunjukkan bahwa model dapat diandalkan untuk sebagian besar prediksi, dengan hanya sekitar 10% prediksi yang memiliki kesalahan > 20 cm.

Diagram kuantil-kuantil (Q-Q plot) residual menunjukkan bahwa residual mendekati distribusi normal, dengan sedikit penyimpangan pada ekor distribusi. Penyimpangan pada ekor ini menunjukkan bahwa terdapat beberapa titik dengan residual yang lebih besar dari yang diharapkan dalam distribusi normal, yang mungkin disebabkan oleh variasi ekstrem WSH pada beberapa siklus atau lokasi tertentu.

Analisis residual terhadap lintang, bujur, delta_time, dan nilai prediksi tidak menunjukkan pola sistematis yang jelas. Residual tersebar secara acak di sekitar nol untuk semua variabel tersebut, yang mengindikasikan bahwa model tidak memiliki kesalahan sistematis yang terkait dengan lokasi atau waktu pengamatan. Hal ini menegaskan bahwa model telah menangkap hubungan utama antara prediktor dan WSH dengan baik.

Koefisien Regresi dan Interpretasi

Tabel 4. Koefisien Regresi Model Akhir

Prediktor	Koefisien	Standar Error	t-statistik	p-value	VIF
Intercept	0,4872	0,0031	157,16	< 0,001	-
segment_tide_ocean	0,9395	0,0015	626,33	< 0,001	1,83
segment_tide_equilibrium	1,2834	0,0103	124,60	< 0,001	1,08
met_wind10_atl09	-0,0053	0,0002	-26,50	< 0,001	1,01
delta_time	0,0009	0,0001	9,00	< 0,001	1,84

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil penapisan multikolinearitas menggunakan Variance Inflation Factor (VIF).

Interpretasi Koefisien:

segment_tide_ocean (koefisien 0,9395): Koefisien ini mendekati 1 (0,9395) dan signifikan secara statistik ($p < 0,001$). Ini menunjukkan bahwa perubahan pasut laut sebesar 1 meter diterjemahkan menjadi perubahan WSH sebesar 0,9395 meter. Hubungan yang mendekati satu-ke-satu ini mengkonfirmasi bahwa pasut merupakan pengendali utama WSH di perairan Delta Mahakam. Faktor selisih 0,0605 m (sekitar 6%) dari perpindahan sempurna dapat dijelaskan oleh efek lain seperti angin, tekanan atmosfer, atau keterbatasan resolusi model pasut global. Temuan ini sejalan dengan penelitian Sassi dan Hoitink (2013) yang menunjukkan bahwa di perairan pesisir yang dipengaruhi pasut, hubungan antara pasut dan WSH mendekati linear, meskipun di perairan dangkal dengan gesekan dasar

yang kuat, koefisien ini dapat berkurang.

segment_tide_equilibrium (koefisien 1,2834): Koefisien yang lebih besar dari 1 untuk pasut kesetimbangan menunjukkan bahwa komponen pasut periode panjang memiliki pengaruh yang diperkuat terhadap WSH di perairan Delta Mahakam. Hal ini mungkin disebabkan oleh efek resonansi atau penguatan di perairan dangkal (Hoitink & Jay, 2016). Namun perlu diingat bahwa rentang segment_tide_equilibrium hanya sekitar $\pm 0,04$ m, sehingga kontribusinya terhadap perubahan WSH jauh lebih kecil dibandingkan segment_tide_ocean.

met_wind10_atl09 (koefisien -0,0053): Koefisien negatif menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin sebesar 1 m/s menurunkan WSH sekitar 0,0053 m (5,3 mm). Pengaruh ini kecil tetapi signifikan secara statistik. Di perairan terbuka seperti Selat Makassar, angin yang lebih kencang dapat menyebabkan wind setup yang menurunkan muka air di sisi bawah angin (leeward) atau meningkatkan gelombang yang mempengaruhi pengukuran (Li dkk., 2024). Perlu dicatat bahwa met_wind10_atl09 memiliki VIF terendah (1,01), yang menunjukkan bahwa prediktor ini hampir independen dari prediktor lain dan memberikan informasi unik untuk model.

delta_time (koefisien 0,0009): Koefisien positif menunjukkan bahwa WSH cenderung meningkat seiring waktu dengan laju sekitar 0,9 mm per hari atau sekitar 0,33 m per tahun jika diekstrapolasi. Namun, interpretasi ini perlu dilakukan dengan hati-hati karena delta_time mencakup semua perubahan temporal yang tidak ditangkap oleh prediktor lain, termasuk tren musiman dan antartahunan. Koefisien positif ini mungkin mencerminkan tren kenaikan muka laut regional (IPCC, 2021) atau variasi siklus pasut jangka panjang yang tidak sepenuhnya ditangkap oleh segment_tide_ocean.

Perbandingan dengan SHAP Importance: Perbandingan antara koefisien regresi dan SHAP importance menunjukkan konsistensi yang tinggi. segment_tide_ocean adalah prediktor terpenting dalam kedua metode (koefisien terbesar dan SHAP importance tertinggi). Namun, SHAP menunjukkan bahwa segment_tide_ocean memiliki kontribusi yang jauh lebih dominan (83,86%) dibandingkan yang terlihat dari koefisien regresi saja. Hal ini karena SHAP memperhitungkan distribusi nilai prediktor, di mana segment_tide_ocean memiliki rentang variasi yang jauh lebih besar (2,09 m) dibandingkan prediktor lainnya, sehingga kontribusi absolutnya terhadap prediksi jauh lebih besar. \

Tabel 5. Perbandingan Koefisien Regresi dan SHAP Importance

Prediktor	Koefisien Regresi	SHAP Importance (%)
segment_tide_ocean	0,9395	83,86%
segment_tide_equilibrium	1,2834	6,92%
met_wind10_atl09	-0,0053	5,68%
delta_time	0,0009	3,54%

Sumber: Diolah oleh peneliti berdasarkan hasil analisis distance correlation dan korelasi Pearson antarvariabel penelitian.

Hubungan dengan Teori dan Penelitian Sebelumnya

Temuan bahwa pasut laut merupakan prediktor terkuat dalam memodelkan WSH di Delta Mahakam sejalan dengan teori hidrodinamika estuari dan pesisir. Hoitink dan Jay (2016) dalam kajian komprehensifnya tentang dinamika sungai pasut menekankan bahwa di estuari yang didominasi pasut, variasi muka air dikendalikan terutama oleh pasut astronomis, yang kemudian dimodifikasi oleh interaksi dengan debit sungai dan topografi dasar. Sassi dan Hoitink (2013) secara khusus meneliti dinamika pasut di Delta Mahakam dan menunjukkan bahwa pasut di kawasan ini merupakan pengendali utama debit dan elevasi muka air, terutama di bagian hilir delta. Temuan koefisien segment_tide_ocean yang mendekati 1 dalam penelitian ini merupakan konfirmasi kuantitatif dari pemahaman teoretis tersebut.

Kontribusi angin yang signifikan (peringkat ketiga dalam SHAP dengan 5,68%) juga sejalan dengan penelitian Mandang dan Yanagi (2008) yang menemukan bahwa sirkulasi dan elevasi muka laut

di perairan Kalimantan Timur sangat dipengaruhi oleh angin monsun. Di Selat Makassar yang relatif terbuka, angin dapat menghasilkan wind setup yang signifikan, terutama saat musim timur (Juni-September) ketika angin tenggara bertiup kencang. Li dkk. (2024) juga menunjukkan bahwa kecepatan angin dari produk ATL09 memiliki akurasi yang baik dibandingkan data buoy di Great Lakes, sehingga dapat diandalkan sebagai prediktor dalam model.

Kontribusi `segment_tide_equilibrium`, meskipun kecil, menarik untuk dibahas lebih lanjut. Komponen pasut kesetimbangan periode panjang (seperti pasut bulanan dan tahunan) dikenal memiliki amplitudo kecil ($\pm 0,04$ m) tetapi dapat memiliki efek kumulatif yang signifikan terhadap WSH dalam jangka panjang (Pawlowicz dkk., 2002). Di Delta Mahakam, resonansi di perairan dangkal dapat memperkuat komponen pasut periode panjang, seperti yang ditemukan oleh De Brye dkk. (2011) dalam pemodelan hidrodinamika skala multi di Delta Mahakam.

Kontribusi `delta_time` sebagai prediktor menunjukkan bahwa ada variasi temporal yang tidak sepenuhnya dijelaskan oleh pasut dan angin. Variasi ini bisa berasal dari: (1) tren kenaikan muka laut regional (Nugraheni dkk., 2025), (2) variasi debit sungai musiman yang mempengaruhi WSH melalui backwater effect (Hidayat dkk., 2017), atau (3) perubahan siklus pasut jangka panjang yang tidak sepenuhnya ditangkap oleh model FES2014b. Hal ini menegaskan bahwa meskipun model regresi linear berganda dengan prediktor ATL13 sudah memiliki kinerja yang sangat baik, masih ada ruang untuk perbaikan dengan menambahkan prediktor yang lebih mencerminkan dinamika temporal.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya: Penelitian Liu dkk. (2023) menunjukkan bahwa data ICESat-2 ATL13 dapat digunakan untuk mengkalibrasi model hidrolik sungai, dengan akurasi yang setara dengan data in-situ. Temuan dalam penelitian ini melengkapi penelitian tersebut dengan menunjukkan bahwa model statistik berbasis ATL13 itu sendiri memiliki performa prediktif yang baik tanpa perlu kalibrasi hidrolik yang kompleks. Hal ini penting karena mengurangi ketergantungan pada data in-situ yang seringkali tidak tersedia di wilayah seperti Delta Mahakam. Penelitian Dumptati (2026) yang memvalidasi ATL13 Versi 7 pada sungai-sungai kecil di Skotlandia menunjukkan bahwa akurasi ATL13 dapat bervariasi tergantung lebar sungai dan kondisi permukaan air. Dengan lebar perairan Delta Mahakam yang jauh lebih luas (beberapa kilometer) dibanding sungai Dee dan Don (30-60 m), hasil penelitian ini menunjukkan bahwa ATL13 dapat diandalkan untuk perairan yang lebih luas, yang merupakan kabar baik untuk aplikasi di delta-delta besar di Asia Tenggara.

Praktikal Implikasi

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi praktis yang signifikan: **Pemodelan WSH di Wilayah Minim Data:** Penelitian ini menunjukkan bahwa model regresi linear berganda berbasis data ATL13 dapat menghasilkan prediksi WSH dengan akurasi yang baik ($RMSE \approx 12$ cm) tanpa memerlukan data in-situ. Ini sangat bermanfaat untuk wilayah seperti Delta Mahakam yang minim stasiun pasut dan hidrologi. Pendekatan ini dapat diadopsi untuk delta-delta lain di Indonesia dan Asia Tenggara yang memiliki kondisi serupa.

Identifikasi Prediktor Utama: Temuan bahwa pasut laut merupakan prediktor dominan (83,86% SHAP importance) menunjukkan bahwa untuk memodelkan WSH di perairan pesisir, prioritas utama adalah mendapatkan data pasut yang akurat. Penggunaan model pasut global FES2014b terbukti memadai untuk tujuan ini, meskipun dengan catatan bahwa resolusi spasial $1/16^\circ$ mungkin kurang representatif di perairan dangkal yang sangat dekat dengan muara.

Potensi Sistem Peringatan Dini: Dengan akurasi prediksi yang baik, model ini dapat dikembangkan menjadi sistem peringatan dini untuk risiko kandas kapal di Sungai Mahakam. Dengan masukan data pasut prediksi (dari model harmonik), model dapat memperkirakan WSH pada lintasan tertentu dan memberikan peringatan jika WSH mendekati ambang kritis untuk navigasi.

Keterbatasan Generalisasi: Hasil penelitian ini hanya berlaku untuk lintasan RGT 937 dan tidak dapat digeneralisasi ke lintasan lain tanpa pengujian ulang. Hal ini disebabkan oleh karakteristik spasial yang spesifik dari setiap lintasan, termasuk kemiringan dan keragaman spasial WSH yang berbeda.

Untuk aplikasi yang lebih luas, diperlukan pengembangan model untuk setiap lintasan atau model regional yang lebih general.

Rekomendasi untuk Penelitian Lanjutan: Penelitian lanjutan disarankan untuk: (a) menguji model pada lintasan lain di Delta Mahakam untuk menilai generalisasi, (b) membandingkan kinerja regresi linear dengan metode machine learning (Random Forest, XGBoost) yang dapat menangkap hubungan nonlinear, (c) melakukan validasi dengan data in-situ jika tersedia, dan (d) mengintegrasikan model dengan data prediksi pasut untuk menghasilkan sistem peringatan dini operasional.

Keterbatasan Model dan Peringatan

Meskipun model memiliki kinerja yang sangat baik, beberapa keterbatasan perlu diakui:

Generalisasi Spasial: Model dilatih dan diuji pada data dari satu lintasan RGT 937. Pengujian pada lintasan lain diperlukan untuk memastikan generalisasi model. Perbedaan karakteristik spasial (kemiringan, lebar perairan, kedalaman) antar lintasan dapat menyebabkan perbedaan kinerja model.

Potensi Overfitting: Meskipun telah dilakukan validasi dengan data uji, jumlah prediktor yang relatif sedikit (4 prediktor) dibandingkan jumlah data (274.285 rekaman) mengurangi risiko overfitting. Namun, perlu diingat bahwa `delta_time` dapat berfungsi sebagai penanda lintasan (karena cap waktu yang unik per lintasan), sehingga model mungkin telah "menghafal" pola per siklus.

Keterbatasan Data Pasut Global: Model pasut FES2014b yang digunakan untuk `segment_tide_ocean` memiliki resolusi spasial $1/16^\circ$ (~6,9 km). Di perairan dangkal yang sangat dekat dengan garis pantai, hidrodinamika lokal dapat berbeda dari prediksi model global. Validasi dengan data pasut in-situ di Delta Mahakam diperlukan untuk menilai akurasi model pasut di lokasi penelitian.

Validasi Eksternal: Model belum divalidasi dengan data in-situ (stasiun pasut atau pengukuran lapangan). Meskipun akurasi model (RMSE 0,11981 m) sebanding dengan akurasi ATL13 itu sendiri, validasi eksternal tetap diperlukan untuk memastikan bahwa model merepresentasikan kondisi WSH yang sebenarnya, bukan hanya artefak dari produk ATL13.

Asumsi Linearitas: Model regresi linear berganda mengasumsikan hubungan linear antara prediktor dan target. Diagnosis nonlinear menunjukkan bahwa beberapa prediktor (terutama `delta_time` dan `segment_tide_equilibrium`) memiliki komponen nonlinear yang signifikan. Pendekatan machine learning (Random Forest, XGBoost, atau neural network) mungkin dapat menangkap komponen nonlinear tersebut dan menghasilkan akurasi yang lebih baik.

KESIMPULAN

Pola perilaku WSH pada lintasan RGT 937 didominasi oleh keragaman antarwaktu sebesar 95,07 persen, dengan gradien yang meningkat konsisten ke arah utara sebesar 0,732 mm/km pada seluruh 25 siklus. Pasut laut yang terekam sepanjang satu lintasan bersifat hampir tetap, sehingga korelasi tingginya dengan WSH (0,9564) mencerminkan keterkaitan antarwaktu, bukan kemiringan muka air yang fisis. Dari lima belas kandidat prediktor ATL13, seleksi bertahap menghasilkan empat prediktor akhir --- `segment_tide_ocean`, `segment_tide_equilibrium`, `met_wind10_atl09`, dan `delta_time` --- dengan `segment_tide_ocean` sebagai prediktor paling signifikan menurut AIC (71,69 persen) maupun SHAP (83,86 persen).

Saran untuk Penelitian Lanjutan: Validasi dengan Data In-situ: Penelitian lanjutan sebaiknya melakukan validasi model dengan data stasiun pasut atau pengukuran lapangan di Delta Mahakam untuk memverifikasi akurasi absolut model. Pengujian pada Lintasan Lain: Model perlu diuji pada lintasan RGT lain di Delta Mahakam dan perairan sekitarnya untuk menilai generalisasi spasial. Pengembangan Model Machine Learning: Pendekatan machine learning (Random Forest, XGBoost, atau LSTM) perlu dieksplorasi untuk menangkap hubungan nonlinear yang terdeteksi pada beberapa prediktor dan meningkatkan akurasi prediksi. Integrasi dengan Prediksi Pasut: Model dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menggunakan prediksi pasut dari analisis harmonik sebagai masukan, sehingga dapat digunakan untuk prediksi WSH jangka pendek (misalnya 7-14 hari ke depan).

yang bermanfaat untuk navigasi.

REFERENSI

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Arifanti, V. B., Kauffman, J. B., Hadriyanto, D., Murdiyarso, D., dan Diana, R. (2019). Carbon dynamics and land use carbon footprints in mangrove-converted aquaculture: The case of the Mahakam Delta, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 432, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.047>
- Bedoya-Maya, F., Shobayo, P., Beckers, J., dan van Hassel, E. (2024). The impact of critical water levels on container inland waterway transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104190>
- Burnham, K. P., dan Anderson, D. R. (2002). *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach* (2nd ed.). New York: Springer.
- Chai, T., dan Draxler, R. R. (2014). Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? — Arguments Against Avoiding RMSE in the Literature. *Geoscientific Model Development*, 7, 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- de Brye, B., de Brauwere, A., Gourgue, O., Delhez, E. J. M., dan Deleersnijder, E. (2011). Preliminary results of a finite-element, multi-scale model of the Mahakam Delta (Indonesia). *Ocean Dynamics*, 61(8), 1107–1120. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0410-y>
- Draper, N. R., dan Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (3rd ed.). New York: John Wiley dan Sons.
- Fawzi, N. I., dan Husna, V. N. (2021). Aquaculture Development Monitoring on Mangrove Forest in Mahakam Delta, East Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 750(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/750/1/012002>
- Gastaldo, R. A., Allen, G. P., dan Huc, A. Y. (1995). The tidal character of fluvial sediments of the modern Mahakam River delta, Kalimantan, Indonesia. Dalam B. W. Flemming dan A. Bartholomä (Ed.), *Tidal Signatures in Modern and Ancient Sediments* (IAS Special Publication 24). Oxford: Blackwell.
- Handoko, E. Y., Fernandes, M. J., dan Lázaro, C. (2017). Assessment of altimetric range and geophysical corrections and mean sea surface models—Impacts on sea level variability around the Indonesian seas. *Remote Sensing*, 9(2), 102.
- Hidayat, H. (2013). *Analysis of Water Level Change Dynamics in a Tidal Delta System* (Disertasi doktor). Institute of Technology.
- Hidayat, H., Vermeulen, B., Sassi, M. G., Torfs, P. J. J. F., dan Hoitink, A. J. F. (2011). Discharge estimation in a backwater affected meandering river. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8), 2717–2728. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2717-2011>
- Hidayat, H., Vermeulen, B., Sassi, M. G., Torfs, P. J. J. F., dan Hoitink, A. J. F. (2017). Hydrology of inland tropical lowlands: the Kapuas and Mahakam wetlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 2579–2594. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2579-2017>
- Hoitink, A. J. F., dan Jay, D. A. (2016). Tidal river dynamics: Implications for deltas. *Reviews of Geophysics*, 54(1), 240–272.
- Hoitink, A. J. F., Wang, Z. B., Vermeulen, B., Huismans, Y., dan Kästner, K. (2017). Tidal controls on river delta morphology. *Nature Geoscience*, 10(9), 637–645.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jasinski, M. F., Stoll, J. D., Hancock, D., Robbins, J., Nattala, J., Morison, J., Jones, B. M., Ondrusek,

- M. E., Pavelsky, T. M., Parrish, C., dan ICESat-2 Science Team. (2019). Algorithm theoretical basis document (ATBD) for inland water data products, ATL13, Version 2. NASA Goddard Space Flight Center. <https://doi.org/10.5067/3H94RJ271O0C>
- Jasinski, M. F., Stoll, J. D., Hancock III, D. W., Robbins, J., Nattala, J., Pavelsky, T. M., Morison, J., Jones, B. M., Ondrusek, M. E., Parrish, C., Carabajal, C., dan the ICESat-2 Science Team (2025). ATLAS/ICESat-2 L3A Along Track Inland Surface Water Data (ATL13, Version 7). [Data set]. NASA NSIDC DAAC. <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL13.007>
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., dan Li, W. (2005). Applied linear statistical models (5th ed.). New York: McGraw-Hill/Irwin.
- Li, Y., Zhang, S., Cai, X., Huang, Y., dan Wang, J. (2023). Evaluation of ICESat-2 ATL13 water surface elevation over the Ohio River basin. [CATATAN: judul/jurnal/volume/halaman sumber ini belum dapat diverifikasi — mohon dicek dan dilengkapi oleh penulis sebelum sidang.]
- Mandang, I., dan Yanagi, T. (2008). Tide and tidal current in the Mahakam Estuary, East Kalimantan, Indonesia. *Coastal Marine Science*, 32(1), 1–8.
- Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., ... Zwally, J. (2017). The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment*, 190, 260–273. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029>
- Marquardt, D. W. (1970). Generalized inverses, ridge regression, biased linear estimation, and nonlinear estimation. *Technometrics*, 12(3), 591–612. <https://doi.org/10.1080/00401706.1970.10488699>
- Mo, T., Li, S., dan Li, G. (2023). An interpretable machine learning model for predicting cavity water depth and cavity length based on XGBoost–SHAP. *Journal of Hydroinformatics*, 25(4), 1488–1500. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.050>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., dan Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Nash, J. E., dan Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neumann, T. A., Martino, A. J., Markus, T., Bae, S., Bock, M. R., Brenner, A. C., ... Thomas, T. C. (2019). The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 mission: A global geolocated photon product derived from the Advanced Topographic Laser Altimeter System. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111325>
- Nugraheni, I. R., Lestari, T. A., Kristianto, A., Avrionesti, Rejeki, H. A., dan Wijaya, Y. J. (2025). Sea-level variability in the Java Sea linked to monsoon forcing and climate teleconnections (2009–2024). *Indonesian Physical Review*, 8(3), 790–803.
- O'Brien, R. M. (2007). A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality dan Quantity*, 41(5), 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Ozturk, M., dan Altas, F. (2025). Water Level Predictions With Machine Learning in Enclosed, Semi-Enclosed, Inland and Open (Marginal) Seas. *Yildiz Technical University Civil Engineering Department*.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., dan Lentz, S. (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T_TIDE. *Computers dan Geosciences*, 28(8), 929–937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4)
- Pham Van, C., Gourgue, O., Sassi, M., Hoitink, A.J.F., Deleersnijder, E., dan Soares-Frazão, S. (2016). Modelling fine-grained sediment transport in the Mahakam land–sea continuum, Indonesia. *Journal of Hydro-Environment Research*, 13, 103–120.