Studi *Waveform Retracking* Jason-2 di Pesisir Barat Daya Sumatera

Zulfikar Adlan Nadzir* dan Muhammad Akmal Hasan

Teknik Geomatika, Fakultas Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu, Lampung Selatan, 35365
Email: zulfikar.nadzir@gt.itera.ac.id

Abstract

Waveform Retracking for Jason-2 Satellite on the Southwest Coast of Sumatra

Monitoring sea level changes in coastal areas is critical to understand ocean dynamics and their impact on the environment and human activities. Satellite altimetry has been the main tool in these studies, but its use in coastal areas still faces obstacles, especially due to variations in waveforms reflected from the sea surface. This study evaluates the accuracy of several altimetry waveform retracking methods (OCOG, Threshold 10%, and Threshold 30%) on the southwest coast of Sumatra. The analysis was conducted using Jason-2 data on two passes, namely pass 077 and pass 153, with validation against two tide gauge stations nearby. Results showed that the Threshold 30% method provided a more accurate estimation of the Leading Edge Point (LEP) position than the other methods, with an average difference of only 0.1 gates (0.32%) from the reference value. Meanwhile, the OCOG method has the worst performance with a difference of 6.27 gates (20.22%), indicating its inability to handle coastal waveform variations on the location. Validation of the tide gauge data shows that retracking with a 10% Threshold improves the precision of Sea Surface Height (SSH) data with the highest IMP improvement value of 65.2% and the smallest standard deviation on the Threshold 30%. This finding confirms that choosing the right retracking method plays a crucial role in improving the accuracy of satellite altimetry in coastal areas. Therefore, the Threshold method is recommended for further analysis to improve the quality of altimetry data in coastal Indonesia.

Keyword: *Altimetry; Coast; Retracking; Sumatra; Validation*

Abstrak

Pemantauan perubahan muka air laut di wilayah pesisir sangat penting untuk memahami dinamika laut dan dampaknya terhadap lingkungan serta aktivitas manusia. Satelit Altimetri telah menjadi alat utama dalam studi ini, tetapi penggunaannya di wilayah pesisir masih menghadapi tantangan, terutama akibat variasi bentuk waveform yang dipantulkan dari permukaan laut. Studi ini mengevaluasi keakuratan metode *waveform retracking* altimetri OCOG, Threshold 10%, dan Threshold 30% di pesisir barat daya Sumatra. Analisis dilakukan menggunakan data Jason-2 pada dua jalur lintasan, yaitu *pass* 077 dan *pass* 153, dengan validasi terhadap data pasang surut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Threshold 30% memberikan estimasi posisi *Leading Edge Point* (LEP) yang lebih akurat dibandingkan metode lainnya, dengan selisih rata-rata hanya 0,1 gate (0,32%) dari nilai referensi. Sementara itu, metode OCOG memiliki performa paling tidak akurat dengan selisih sebesar 6,27 gate (20,22%), yang mengindikasikan ketidakmampuannya dalam menangani variasi *waveform* di pesisir. Validasi terhadap data pasang surut menunjukkan bahwa retracking dengan Threshold 10% meningkatkan presisi data *Sea Surface Height* (SSH) dengan nilai peningkatan IMP tertinggi sebesar 65,2% dan standar deviasi terkecil pada metode Threshold 30%. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan metode retracking yang tepat berperan krusial dalam meningkatkan akurasi satelit altimetri di wilayah pesisir. Oleh karena itu, metode Threshold direkomendasikan untuk analisis lebih lanjut guna meningkatkan kualitas data altimetri di kawasan pesisir Indonesia.

Kata kunci: altimetri; pesisir; retracking; Sumatera; validasi

PENDAHULUAN

Perubahan iklim di seluruh dunia adalah salah satu isu utama yang mempengaruhi banyak aspek kehidupan, salah satunya adalah kenaikan muka air laut (*sea level rise* – SLR) (Calvin *et al*., 2023). Kenaikan ini diakibatkan oleh kombinasi dari ekspansi termal air laut akibat pemanasan global dan pencairan es di kutub dan gletser (Church & White, 2011). Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia, menghadapi risiko cukup besar akibat fenomena ini, dengan kenaikan sebesar 5,48 mm/tahun (Nababan *et al*., 2015). Pesisir barat daya Sumatera, khususnya di Lampung dan Bengkulu, merupakan salah satu daerah yang rentan terhadap dampaknya, terlebih untuk sektor wisata (Widiyarti & Nopianti, 2021). Beberapa risiko

*) Corresponding author
www.ejournal2.undip.ac.id/index.php/jkt
Diterima/Received : 17-03-2025, Disetujui/Accepted : 03-05-2025
DOI: https://doi.org/10.14710/jkt.v28i2.26228

yang dapat terjadi meliputi banjir rob yang semakin sering dan intens, erosi pantai yang mengancam pemukiman dan infrastruktur pesisir (Atmojo *et al*., 2021), serta degradasi ekosistem pesisir seperti mangrove dan terumbu karang (Karlina & Johan, 2020; Zikra *et al*., 2015).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk memantau perubahan muka air laut sebagai awalan untuk memahami risiko-risiko adalah satelit altimetri, yang menggunakan gelombang radar untuk mengukur ketinggian permukaan laut relatif terhadap referensi elipsoida bumi. Teknik ini memiliki kemampuan untuk memberikan data yang luas dan konsisten, serta cakupan global yang memungkinkan pemantauan muka air laut dengan akurasi tinggi sejak tahun 1992 (Fu & Cazenave, 2000; Stammer & Cazenave, 2017). Misalnya, data dari satelit Jason-2 yang beroperasi pada tahun 2008 sampai 2019 telah digunakan untuk memantau fluktuasi muka air laut dengan ketelitian hingga milimeter di beberapa lokasi (Cazenave *et al*., 2022; Wenzel & Schröter, 2014). Namun, penerapan teknologi satelit altimetri di wilayah pesisir menghadapi tantangan yang signifikan. Salah satu masalah utama adalah kualitas *waveform* yang lebih terdistorsi (dikenal sebagai *non-Brown waveform*) dibandingkan dengan area laut terbuka, akibat adanya interferensi daratan dan kondisi laut dangkal (Birol *et al*., 2025). Distorsi ini menyebabkan pengukuran yang lebih kompleks dan berisiko kurang akurat di daerah pesisir, yang mengarah pada kesalahan estimasi tinggi muka laut yang lebih besar jika dibandingkan dengan wilayah laut terbuka (Vignudelli *et al*., 2019). Oleh karena itu, untuk meningkatkan akurasi pengukuran di daerah pesisir, perlu dilakukan upaya untuk memperbaiki kualitas data satelit altimetri, salah satunya melalui teknik *waveform retracking*.

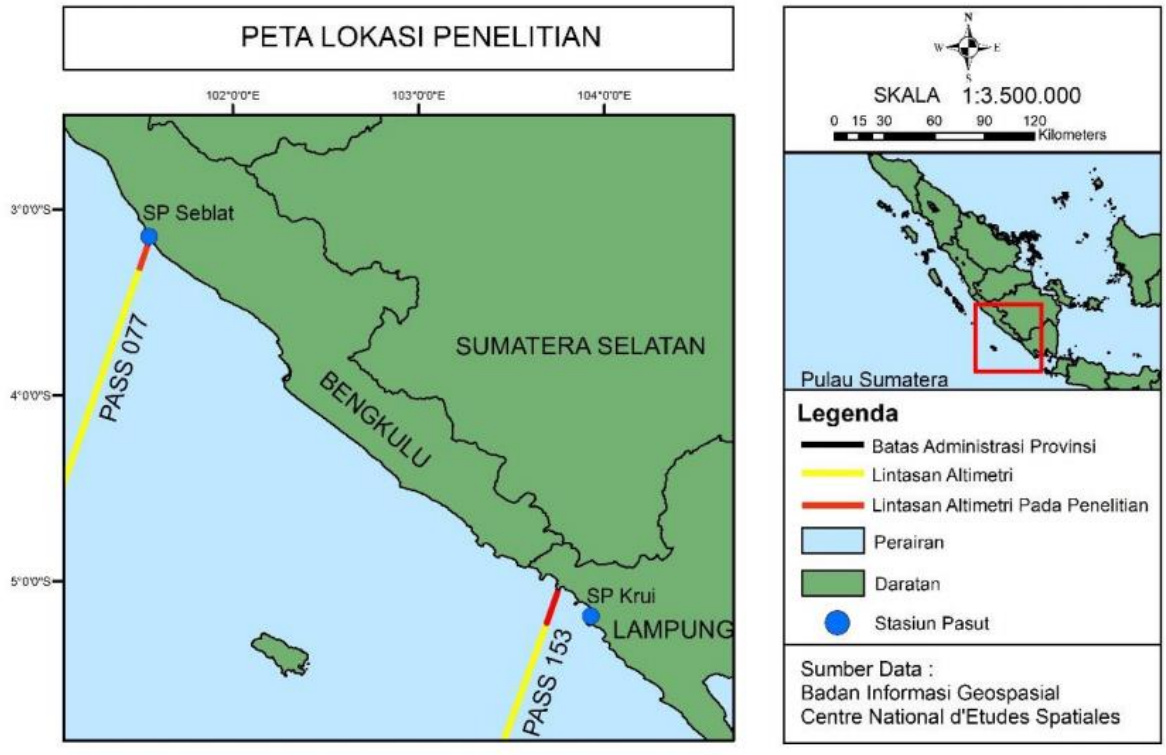
Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan akurasi pengukuran satelit altimetri di daerah pesisir menggunakan *waveform retracking*. Teknik ini bertujuan untuk mengidentifikasi kembali titik maksimum dari sinyal radar yang terdistorsi, dengan memperbaiki estimasi ketinggian permukaan laut di daerah pesisir (Hong *et al*., 2022). Beberapa metode *retracking* telah dikembangkan, termasuk algoritma yang berbasis pada model gelombang radar, seperti OCOG (*Offset Center of Gravity*) yang menggunakan pusat gravitasi sinyal gelombang radar untuk menentukan titik puncak dan *Threshold retracking*, yang telah terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi di wilayah laut terbuka, meskipun tantangan tetap ada di daerah pesisir (Deng & Featherstone, 2006). Di Asia, khususnya Indonesia, penelitian *waveform retracking*, khususnya yang menggunakan metode OCOG dan Threshold, sudah dilakukan di beberapa wilayah, namun penerapannya masih terbatas pada daerah-daerah tertentu dengan kondisi pesisir yang bervariasi. Misalnya di Malaysia (Idris & Vignudelli, 2023), perairan pulau Jawa (Hakim *et al*., 2016; Nababan *et al*., 2018), Natuna (Permana *et al*., 2020) dan kepulauan Maluku (M. E. Sinurat *et al*., 2021). Namun, pesisir barat daya Sumatera, khususnya daerah Lampung dan Bengkulu, belum banyak diteliti terkait penerapan teknologi satelit altimetri, meskipun daerah ini menghadapi tantangan serupa. Penelitian ini diharapkan dapat mengisi kekosongan pengetahuan tersebut, memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kondisi pesisir yang unik ini dan bagaimana penerapan teknologi satelit altimetri dapat dilakukan dengan lebih akurat.

Mengacu pada tantangan yang ada, tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan beberapa metode *retracker* (OCOG dan Threshold) yang telah terbukti efektif di wilayah lain di Indonesia dan Asia dengan dua stasiun pasang surut dalam meningkatkan akurasi estimasi tinggi muka laut di pesisir barat daya Sumatera, tepatnya di pesisir barat Lampung dan Bengkulu dengan batas 0 sampai 20 km dari pesisir untuk mengetahui metode *retracking* terbaik untuk diterapkan di daerah penelitian. Wilayah ini dipilih karena memiliki kondisi pesisir yang unik, seperti pengaruh arus yang kuat dan variabilitas kedalaman yang tinggi, serta keberadaan banyak pulau kecil yang mempengaruhi kualitas data satelit altimetri. Dengan membandingkan hasil estimasi dari berbagai metode *retracker*, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru mengenai metode terbaik untuk diterapkan di daerah pesisir Barat Daya Sumatera. Selain itu, data dari beberapa stasiun pasang surut yang ada di wilayah tersebut akan digunakan sebagai referensi untuk menilai akurasi estimasi tinggi muka laut yang dihasilkan oleh satelit altimetri.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di pesisir barat provinsi Lampung dan Bengkulu dengan batas 20 kilometer dari pesisir pantai yang ditampilkan pada Gambar 1. Lokasi ini berbasis pada lintasan satelit altimetri pada *pass* 077 dan 153. Koordinat awal - akhir *pass* 077 adalah 100°10'21'' - 100°15'40'' Bujur Timur dan 3°17'39'' - 3°2'48'' Lintang Selatan, sedangkan untuk *pass* 153 adalah 103°43'1'' - 103°47'18'' Bujur Timur dan 5°14'43'' - 5°2'53''Lintang Selatan. *Pass* adalah jalur satelit di permukaan Bumi yang diberikan indeks, dengan ganjil mewakili jalur yang mengarah dari selatan ke utara dan genap sebaliknya. Daerah ini dipilih karena kondisi pesisir yang unik: 1) pengaruh arus lautnya kuat dan 2) variabilitas kedalamannya tinggi, yang keduanya berpengaruh terhadap kualitas data altimetri di wilayah pesisir.

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah satelit altimetri OSTM/Jason-2 pada *pass* 077 dan 153 (keduanya merupakan *ascending pass*), tersedia pada www.aviso.altimetry.fr/en/data/tools/pass-locator.html dan data *Science Geosphysical Data Record* (SGDR) versi D dengan frekuensi data sebesar 20 Hz yang didapatkan dari ftp://avisoftp.cnes.fr/AVISO/pub/OSTM/Jason-2/sgdr_d dengan 12 *cycle* untuk *pass* 077 (309-320; dari November 2016 sampai Maret 2017) dan 28 cycle untuk *pass* 153 (276-303; dari Januari 2016 sampai September 2016). Jangka waktu ini dipilih sebagai usaha untuk memastikan kebaikan data yang digunakan, juga sebagai langkah sinkronisasi dengan data dari sumber lainnya. Data pembanding yang digunakan adalah dari stasiun pasang surut Seblat untuk *pass* 077 dan Krui untuk *pass* 153, keduanya didapatkan dari Badan Informasi Geospasial. Kedua lokasi stasiun ditampilkan pada Gambar 1, dengan koordinat 3°13'26.61" Lintang Selatan (LS) dan 101°35'58.31" Bujur Timur (BT) untuk Seblat dan 5°11'0.71" LS dan 103°55'59.18" BT untuk Krui. Pemilihan kedua stasiun didasarkan pada kedekatannya dengan kedua pass, yaitu 0,5 km untuk seblat dan 25 km untuk Krui. Selanjutnya, data tambahan yang digunakan adalah data *mean tide* dari EGM2008 sebagai masukan untuk undulasi geoid pada perhitungan dan validasi SSH, yang diakses pada http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Proses awal dimulai dengan melakukan seleksi dari data satelit altimetri agar menyisakan data dengan jarak 0 sampai 20 kilometer dari garis pantai (Nadzir, 2017). Hal ini dilakukan menggunakan dua *flag* (parameter dalam setiap bagian dari data satelit altimetri): 1) jenis dari permukaan (*rad_surf_type*) yaitu dekat dengan pesisir (*near_coast*), 2) jarak dari garis pantai (*rad_distance_to_land*) dengan nilai 20.000 meter sebagai batas. Data satelit altimetri yang sudah diseleksi lalu menjalani perhitungan *waveform retracking* menggunakan OCOG dan 2 varian dari Threshold (10% dan 30%). Proses ini bertujuan untuk mendapatkan posisi baru dari *leading edge* sebagai titik dasar dalam menghitung tinggi muka air laut dan parameter penting lain dari data satelit altimetri.

Algoritma OCOG merupakan pengembangan dari metode *Center of Gravity* (COG) yang diawali dengan perhitungan W. Nilai W dihitung dengan menentukan jumlah *gate* yang mengalami distorsi dan mengaitkannya dengan total jumlah *gate* (berjumlah 104 untuk satelit Jason-2) dan daya dari gelombang elektromagnetik yang digunakan pada satelit Jason-2, ditunjukkan pada rumus di bawah ini:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)\right)^2}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^4(t)}$$

dengan W adalah lebar *gate* (jumlah data dalam satu *waveform*) dan P_i sebagai *thermal noise* yang mewakili amplitudo (A) dari *waveform*. Nilai ini diasumsikan menjadi sebuah persegi panjang, sehingga posisi *leading edge* berada tepat di tengah persegi panjang tersebut. Pada metode OCOG, lokasi *leading edge* digeser secara proporsional dengan besar W dengan asumsi bahwa besar persegi panjang dari *waveform* ini tidak mewakili kondisi yang sebenarnya karena adanya gangguan pada perekaman data oleh daratan. Kemudian, nilai COG dihitung menggunakan rumus berikut:

$$COG = \frac{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} iP_i^2}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)}$$

dimana secara sekilas tampak serupa dengan rumus sebelumnya kecuali pada nilai pangkat pada bagian pembilang dan penyebut yang sama-sama 2 kali lipat lebih besar, dikarenakan bahwa secara mendasar COG adalah nilai tengah dari W. Setelah itu, perbedaan OCOG dan COG yaitu pergeseran (*offset*) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$LEP_{OCOG} = COG - \frac{W}{2}$$

Dengan COG sebagai hasil dari perhitungan *Center of Gravity* dan *W* adalah hasil estimasi lebar *gate*. Hasil dari metodologi OCOG ini adalah *leading edge position* (LEP) sebagai penentu nilai *sea surface height* (SSH).

Metode selanjutnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah Threshold, yang sama-sama menggunakan pendekatan secara statistik dan mengasumsikan bahwa *waveform* itu berbentuk persegi panjang, seperti COG dan OCOG. Keunikan dari metode Threshold adalah menggunakan ambang batas sesuai dengan yang ditentukan, tidak seperti COG dan OCOG yang menggunakan titik tengah dari lebar *gate* W. Langkah pertama dalam algoritma Threshold adalah menghitung nilai amplitudo (A) yang serupa dengan proses perhitungan W, ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_l^4}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2}}$$

Setelah itu, nilai *thermal noise* (P_N) dihitung sebagai bentuk dari nilai kekuatan sinyal dari lima *gate* awal, tertulis pada rumus berikut:

$$P_N = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i$$

dengan N dan n sebagai representasi dari jumlah *waveform*. Setelah itu, penentuan nilai ambang batas digunakan sesuai dengan kebutuhan, yaitu 10% dan 30% dalam penelitian ini, diwakili oleh nilai q pada rumus di bawah ini:

$$T_h = P_N + q.(A - P_N)$$

dimana T_h adalah nilai setelah dikoreksi oleh *Thermal Noise* (P_N). Kemudian proses diakhiri dengan menghitung LEP dengan nilai *gate* yang lebih dari ambang batas (k), digambarkan pada persamaan berikut:

$$LEP_{Threshold} = G_{k-1} + \frac{T_h - P_{k-1}}{P_h - P_{k-1}}$$

Hasil dari proses *retracking* adalah LEP yang berbeda dari LEP hitungan sebelumnya. Proses selanjutnya adalah mengolah LEP tersebut menjadi nilai tinggi muka air laut (*Sea Surface Height – SSH*). Langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung jarak koreksi hasil *retracking* (d_r) dari LEP setelah *retracking* ($LEP_{Threshold}$ atau LEP_{OCOG}) dan LEP sebelumnya. Angka konstanta cepat rambat gelombang sebesar 299.792.458 m/s dengan interval waktu antara *gate* sebesar 3,125 ns (Gommenginger *et al*., 2011) juga digunakan dalam perhitungan ini, yang ditampilkan pada persamaan di bawah ini:

$$d_r = \frac{C, \Delta G_0}{2}(G_r - G_0)$$

Setelah itu, menentukan jarak hasil *retracking* yang berdasar pada jarak sebelumnya ditambah dengan jarak koreksi hasil *retracking*, ditunjukkan di rumus berikut:

$$R_r = R_{obs} + d_r$$

Selanjutnya adalah menentukan nilai SSH dari jarak yang sudah dikoreksi yang disesuaikan lebih lanjut dengan beberapa parameter koreksi geofisik dan atmosfer di rumus berikut:

$$SSH_{retracking} = H - R_r - \Delta R_{dry} - \Delta R_{wet} - \Delta R_{ion} - \Delta R_{ssb}$$

dengan seperti bagian basah (ΔR_{wet}) dan kering (ΔR_{dry}) dari troposfer, ionosfer (ΔR_{ion}) dan *sea state bias* (ΔR_{ssb}). Nilai SSH ini menggunakan resolusi 20 Hz yang lalu disesuaikan dengan data awal dari satelit altimetri yaitu SSH dari Ocean *retracker* dengan resolusi 1 Hz menggunakan metode *nearest neighbor* sesuai dengan penelitian sebelumnya (Passaro *et al*., 2018).

Perbandingan antara SSH sebelum dan sesudah *retracking* dengan data EGM2008 menggunakan parameter *Improvement Percentage* (IMP). Parameter ini mewakili kuantifikasi perbaikan yang dihasilkan oleh SSH setelah *retracking*. Proses tersebut dilakukan dengan membandingkan standar deviasi sebelum dan sesudah *retracking* dibandingkan dengan undulasi geoid. IMP ini digunakan sebagai parameter presisi yang ditampilkan pada rumus berikut:

$$IMP = \frac{\sigma_{raw} - \sigma_{retracking}}{\sigma_{raw}} * 100\%$$

Proses penelitian diakhiri dengan validasi data menggunakan data pasang surut sebagai pembanding. Agar nilai dari hasil *retracking* dan data pasang surut bisa dibandingkan, perlu dihitung menjadi SLA (*Sea Level Anomaly*) yang ditampilkan di rumus berikut ini:

$$SSH = H - R_{obs} - \Delta R_{dry} - \Delta R_{wet} - \Delta R_{ion} - \Delta R_{ssb}$$

dan TWLE (*Total Water Level Envelope*) yang dijelaskan pada persamaan berikut:

$$TWLE = SSH - MSS$$

Tujuan dari perhitungan dua parameter ini adalah agar seluruh data memiliki referensi yang sama, yaitu dikurangi dengan rerata muka air laut selama waktu tertentu (*Mean Sea Surface – MSS*) (Cazenave *et al*., 2024). Setelah mendapatkan SLA dan TWLE, dilakukan perhitungan standar deviasi untuk menunjukkan tingkat kebaikan antara hasil *retracking* dengan data dari stasiun pasang surut. Pada penelitian ini, data pasang surut tidak dilakukan penyesuaian sama sekali untuk menjaga kualitas dari data validator tersebut.

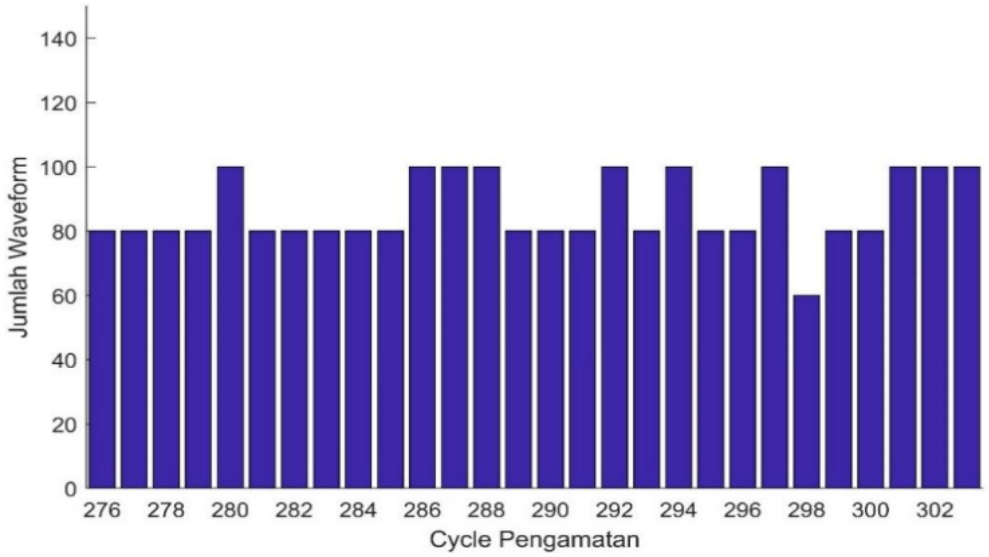
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari proses seleksi *waveform* pada jarak 0 sampai 20 km di kedua *pass* menunjukkan pola yang sama, yaitu memiliki jumlah yang fluktuatif dengan minimum sebesar 60 buah, maksimum 100 buah dan rerata 80 buah, tergambar pada Gambar 2. Angka 80 ini senada dengan penelitian sebelumnya di Indonesia dan belahan dunia lain (Deng & Featherstone, 2006; Khaki *et al*., 2014; M. E. B. Sinurat *et al*., 2019) yang dipengaruhi oleh kemampuan sensor pada satelit altimetri. Nilai tersebut merupakan efek dari beberapa faktor penentu seperti kemampuan dari sensor dan keadaan topografis serta batimetris di area penelitian. Selain itu, fluktuasi angka *waveform* yang terseleksi dari satu *cycle* ke *cycle* lain menunjukkan bahwa dalam penelitian mengenai *waveform*, tidak disarankan untuk menggunakan data dari satu *cycle* saja, perlu menggunakan banyak *cycle* untuk mewakili keadaan sebenarnya. Secara rerata, ditemukan bahwa jarak antar *waveform* di lokasi penelitian hasil seleksi adalah ± 231 meter.

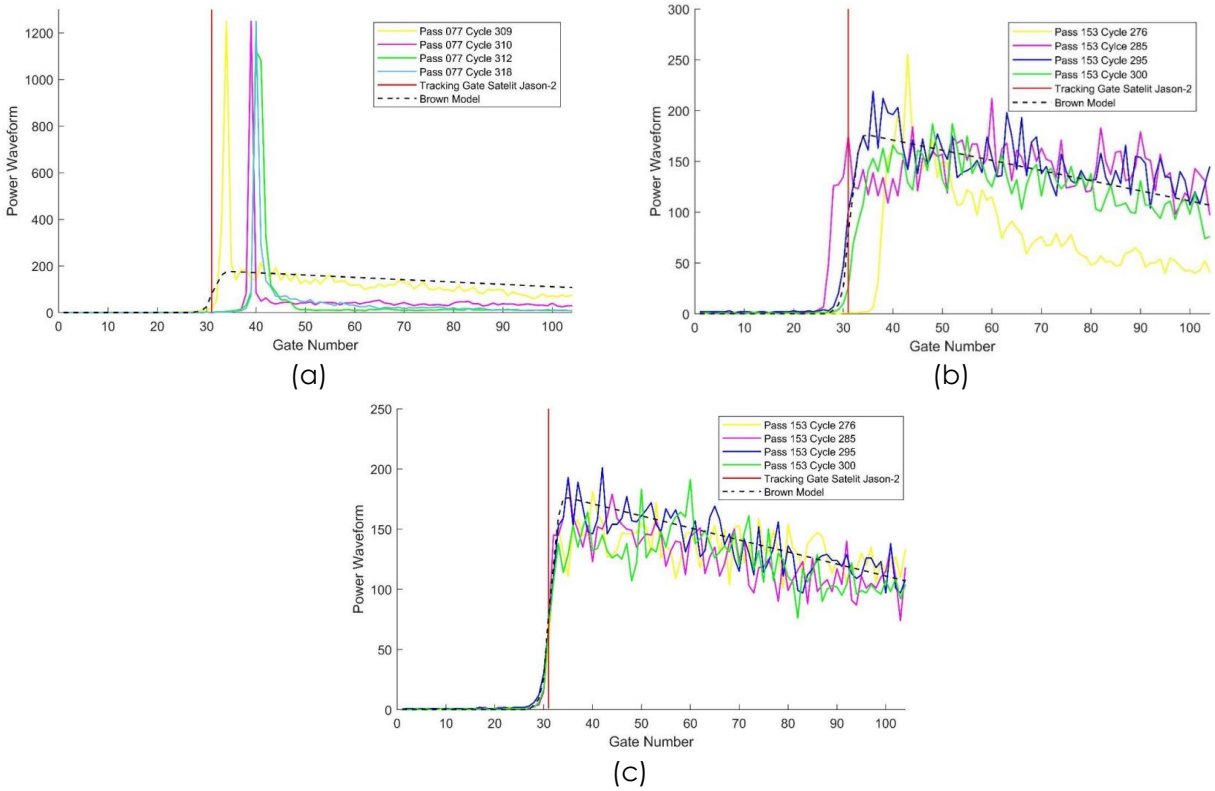
Identifikasi dari bentuk *waveform* yang sudah terseleksi pada jarak 0 sampai 20 km menunjukkan hasil yang digambarkan pada Gambar 3. Pada jarak 0 sampai 5 km (Gambar 3(a)) di kedua lokasi ditemukan bahwa bentuk *waveform* didominasi oleh *peak waveform* tanpa adanya *Brown-model waveform* sama sekali. Hal ini senada dengan temuan di penelitian sebelumnya (Benveniste *et al*., 2019; Zheng *et al*., 2023) khususnya pada jarak 4 -5 km, di mana keberadaan *peak waveform* ini menandakan adanya gangguan terhadap gelombang pantul karena pengaruh daratan, membuat *waveform* memiliki satu puncak dengan power yang sangat tinggi. Selanjutnya pada jarak 5 – 10 km yang tersedia di Gambar 3(b), kedua lokasi sama-sama menunjukkan bahwa bentuk *waveform* didominasi oleh *Brown+peaky echos* yang mana juga ditemui pada penelitian sebelumnya di jarak yang sama. *Waveform* jenis ini berbentuk cenderung *Brown* dengan beberapa puncak di *trailing edge*. Hasil dari *waveform* pada jarak 10 sampai 20 km sudah didominasi oleh *Brown model* dengan jumlah 95%, hampir sama dengan temuan di penelitian sebelumnya yaitu 94% (Agar *et al*., 2023; Idris & Vignudelli, 2023). *Brown model* merupakan bentuk ideal dari pantulan di lautan, dengan nilai yang konsisten sebelum lokasi *leading edge* yang lalu turun secara konsisten di *trailing edge*. Namun, ditemukan pula bahwa walau bentuknya sudah mewakili *brown model*, lokasi *tracking gate* secara *default* dari satelit altimetri belum berimpit dengan lokasi *leading edge* di setiap *waveform*. Temuan-temuan ini menunjukkan kebutuhan yang tinggi untuk melakukan *retracking* dalam rangka mendapatkan SSH yang lebih akurat.

Waveform retracking menggunakan 3 metode dilakukan untuk menghitung ulang posisi LEP. Sebuah *waveform* disebut akurat jika LEP berimpit dengan *tracking gate* dari satelit yaitu *gate* nomor 31 (Chen *et al*., 2023). Metode Threshold 10% dan 30% mengestimasi LEP berdasarkan persentase maksimum power waveform, sementara OCOG bekerja dengan pendekatan statistik centroid. Hal ini menyebabkan perbedaan dalam sensitivitas terhadap bentuk waveform di area pesisir. Selisih *gate* digunakan sebagai parameter dikarenakan kesalahan estimasi LEP membuat perhitungan SSH menjadi tidak baik. Perhitungan LEP menggunakan metode OCOG untuk kedua

lokasi menunjukkan nilai selisih *gate* sebesar 6,27 atau 20,22% dibandingkan dengan nilai *default* (31). Hasil ini cukup buruk, yang mana menjadi indikator bahwa hasil dari OCOG kurang mampu memperbaiki nilai LEP, khususnya pada *waveform* di *pass* 077 dengan jarak 0 sampai 10 km, dengan data pada jarak 10 – 20 km cenderung stabil dan baik hasilnya. Sedangkan hasil di *pass* 153 tidak baik di jarak 0 – 5 km, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Alasan lain buruknya performa OCOG ini adalah karena metode OCOG mengasumsikan kondisi lokasi secara seragam, mengakibatkan perbedaan di setiap lokasi menjadi sumber kesalahan utama seperti yang ditemukan di penelitian sebelumnya (Nilsson & Nielsen, 2024; Niño *et al*., 2022).



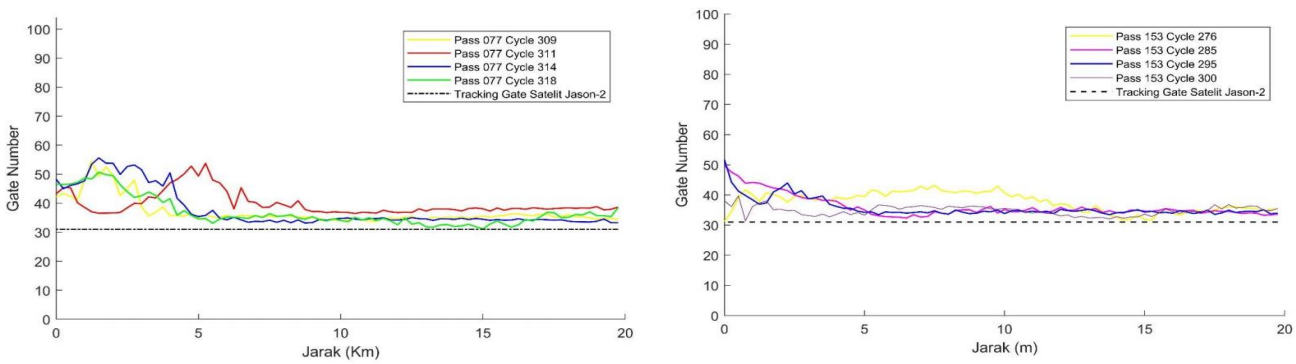
Gambar 2. Jumlah *Waveform* hasil seleksi pada *pass* 153



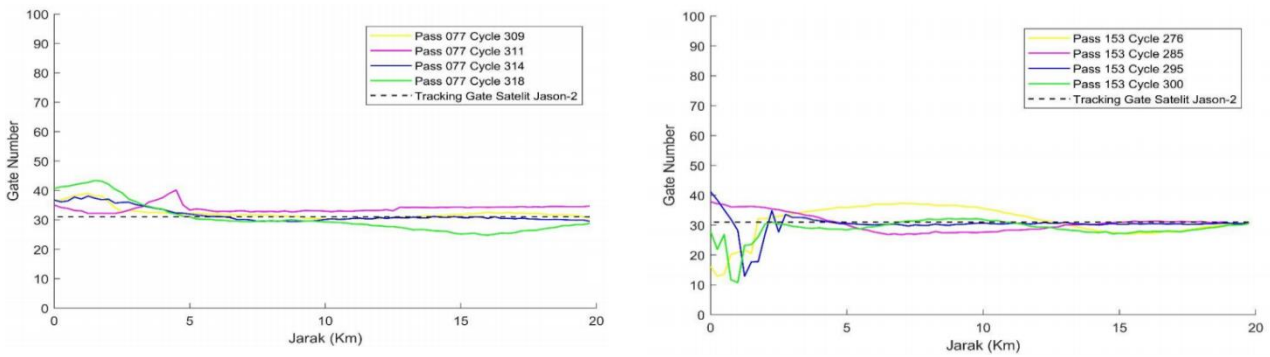
Gambar 3. Bentuk *Waveform* pada (a) jarak 0-5 km; (b) 5-10 km; (c) 10-20 km

Perhitungan menggunakan Threshold *retracker* dengan parameter 10% dan 30% menunjukkan bahwa rerata selisih LEP pada parameter ambang batas 10% dengan *default gate* sebesar 1,08 (3,48%) dan untuk parameter ambang batas 30% selisihnya sebesar 0,1 (0,32%). Keduanya bernilai jauh lebih kecil dibandingkan dengan hasil menggunakan OCOG yang ditemukan sebesar 20%, seperti penelitian-penelitian sebelumnya (Hakim *et al*., 2016; Nababan *et al*., 2018). Selanjutnya, untuk parameter ambang batas 10% cenderung stabil pada jarak 5 – 20 km dan mulai fluktuatif pada jarak 0 sampai 5 km, dengan kecenderungan bernilai negatif untuk *pass* 153 dan positif untuk *pass* 077, ditampilkan pada Gambar 5. Hal yang sama juga ditemukan pada ambang batas 30% dengan kecenderungan yang sama pada *pass* 077 dan *pass* 153, yang berarti bahwa metode Threshold, selain memiliki performa yang lebih baik daripada metode OCOG, juga lebih stabil sampai pada jarak yang lebih dekat ke pesisir.

Proses selanjutnya yang dilakukan adalah menghitung IMP dari SSH sebelum dan sesudah *retracking*, dengan hasil yang ditampilkan pada Tabel 1. Dapat dilihat bahwa untuk kedua *pass*, metode yang memiliki nilai IMP tertinggi adalah metode Threshold 10% dengan nilai 65,2% dan 54,1%. Selanjutnya diikuti oleh Threshold 30% dengan nilai IMP sebesar 37% dan 53,5%. Hasil menarik ada di OCOG, yang mana lebih rendah nilai IMPnya daripada nilai awal data satelit altimetri dengan metode Ocean, yaitu -207,5% dan -17,5% dibanding dengan 35,4% dan 40,3%. Sehingga terindikasi bahwa metode Threshold berhasil memperbaiki nilai SSH dibanding dengan OCOG, dengan ambang batas 10% sebagai yang paling memperbaiki hasil. Nilai IMP sendiri dipengaruhi oleh beberapa hal seperti kesesuaian bentuk *waveform* terhadap kondisi ideal, kebaikan dari estimasi LEP setelah *retracking* dan juga kesamaannya dengan profil undulasi geoid yang digunakan. Sesuai dengan penelitian sebelumnya (Birol *et al*., 2021; Passaro *et al*., 2022; Schlembach *et al*., 2022), metode Threshold bekerja lebih optimal pada *waveform* berbentuk *peak* dan *peaky*, seperti yang terjadi pada jarak 0 sampai 10 km dari garis pantai di lokasi penelitian karena lebih adaptif dalam metode statistiknya. Selanjutnya, kemampuan Ocean *retracker* tidak



Gambar 4. Lokasi LEP OCOG pada (a) *Pass* 077; (b) *Pass* 153



Gambar 5. Lokasi LEP Threshold pada (a) *Pass* 077; (b) *Pass* 153

Tabel 1. Statistik IMP dari *Waveform Retracking*

Pass	*Retracker*	Jumlah *Cycle*	STD (m)	IMP (%)
077	Ocean	12	0,22	35,4
077	OCOG	12	1,34	-207,5
077	Threshold 10%	12	0,11	65,2
077	Threshold 30%	12	0,17	37
153	Ocean	28	0,28	40,3
153	OCOG	28	0,51	-17,5
153	Threshold 10%	28	0,15	54,1
153	Threshold 30%	28	0,16	53,5

Tabel 2. Statistik STD dari *Waveform Retracking*

Pass	*Retracker*	Parameter	STD (m)
077	Ocean	SLA	0,11
077	OCOG	SLA	0,58
077	Threshold 10%	SLA	0,21
077	Threshold 30%	SLA	0,17
153	Ocean	SLA	0,20
153	OCOG	SLA	0,43
153	Threshold 10%	SLA	0,25
153	Threshold 30%	SLA	0,20
077	Ocean	TWLE	0,19
077	OCOG	TWLE	0,67
077	Threshold 10%	TWLE	0,25
077	Threshold 30%	TWLE	0,22
153	Ocean	TWLE	0,21
153	OCOG	TWLE	0,40
153	Threshold 10%	TWLE	0,29
153	Threshold 30%	TWLE	0,23

optimal dikarenakan tidak sesuainya bentuk *waveform* yang diasumsikan dengan yang sebenarnya (*Brown-like* dengan *peaky*). Metode OCOG memiliki performa yang paling buruk karena estimasi LEPnya ditemukan memiliki nilai selisih yang paling besar.

Estimasi dari standar deviasi pada nilai SLA dan TWLE sebelum dan setelah *retracking* ditampilkan pada Tabel 2, sebagai parameter untuk mengukur tingkat kebaikan dari proses *retracking*. Asumsi yang digunakan pada perhitungan ini bahwa bidang referensi dari data satelit altimetri dan stasiun pasang surut adalah sama. Pada parameter SLA untuk kedua *pass*, ditemukan bahwa metode Threshold memiliki nilai standar deviasi yang paling kecil, diikuti oleh *Ocean* dan OCOG, senada dengan temuan pada parameter IMP sebelumnya. Perbedaan kecilnya adalah bahwa metode Threshold yang paling baik STDnya adalah 30%, bukan 10%. Hasil serupa ditemukan pada parameter TWLE untuk kedua *pass*, yaitu metode Threshold dengan ambang batas 30% memiliki nilai STD yang paling kecil dibandingkan dengan metode *retracking* lainnya. Dari tahap validasi data ini ditemukan bahwa proses *retracking* berhasil memperbaiki profil dan kebaikan data SSH dibandingkan dengan data sebelumnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini menemukan bahwa bentuk *waveform* pada *Pass* 077 (Pesisir Laut Bengkulu) dan *Pass* 153 (Pesisir Laut Lampung) menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh jarak dari garis

pantai. Pada Pass 077, *waveform* berjenis *peak* ditemukan pada jarak 0-5 km, *peak+noise* pada 5-10 km, dan *brown echos* pada 10-20 km. Sementara itu, pada Pass 153, *waveform* didominasi oleh *peak+noise* pada 0-5 km, *brown+peaky* pada 5-10 km, dan *brown echos* pada 10-20 km. Secara keseluruhan, tidak ditemukan *waveform* yang ideal dalam rentang 0-20 km dari garis pantai di Pesisir Barat Sumatera Bagian Selatan, sehingga diperlukan *waveform retracking* untuk meningkatkan keakuratan estimasi SSH, terutama di wilayah pesisir. Selanjutnya, dari hasil analisis *retracking*, metode Threshold 10% terbukti paling optimal dalam meningkatkan akurasi estimasi SSH, dengan nilai *Improvement Percentage* (IMP) tertinggi sebesar 65,2% pada Pass 077 dan 54,1% pada *Pass* 153. Keberhasilan ini dikaitkan dengan kesesuaian bentuk *waveform* dengan metode yang digunakan, estimasi leading edge position yang lebih akurat terhadap *tracking gate* satelit, serta kesesuaian profil estimasi SSH terhadap undulasi geoid EGM2008. Selain itu, uji korelasi menunjukkan bahwa penggunaan TWLE lebih efektif dalam meningkatkan hubungan korelasi terhadap data pasut di wilayah pesisir, dibandingkan SLA. STD terkecil untuk SLA diperoleh melalui Threshold 30% (0,17 m) pada *Pass* 077 dan Threshold 30% Retracker (0,20) pada *Pass* 153, sedangkan untuk TWLE, Threshold 30% menunjukkan STD terkecil pada Pass 077 (0,22) dan Threshold 30% pada Pass 153 (0,23). Untuk meningkatkan akurasi estimasi SSH di wilayah pesisir, diperlukan penggunaan *cycle* pengamatan yang lebih banyak agar metode *waveform retracking* yang optimal dapat ditentukan secara lebih akurat. Selain itu, pengamatan *descending pass* diperlukan untuk memahami perbedaan hasil antara lintasan naik dan turun, yang dapat memengaruhi bentuk *waveform* yang dihasilkan. Pengembangan metode retracking terbaru seperti *Improved Threshold Retracker* dan *Adaptive Leading-Edge Subwaveform* (ALES) *Retracker* juga perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan akurasi data.

DAFTAR PUSTAKA

Agar, P., Roohi, S., Voosoghi, B., Amini, A., & Poreh, D. (2023). Sea Surface Height Estimation from Improved Modified, and Decontaminated Sub-Waveform Retracking Methods over Coastal Areas. *Remote Sensing*, *15*(3), 804. doi: 10.3390/rs15030804

Atmojo, A.T., Welly, T.K., Simbolon, K., & Nadzir, Z.A. (2021). Studi Perubahan Garis Pantai Pesisir Kota Bandar Lampung Menggunakan Data Penginderaan Jauh. *Journal of Science, Technology, and Visual Culture*, *1*(3), Article 3.

Benveniste, J., Cazenave, A., Vignudelli, S., Fenoglio-Marc, L., Shah, R., Almar, R., Andersen, O., Birol, F., Bonnefond, P., Bouffard, J., Calafat, F., Cardellach, E., Cipollini, P., Le Cozannet, G., Dufau, C., Fernandes, M. J., Frappart, F., Garrison, J., Gommenginger, C., … Wöppelmann, G. (2019). Requirements for a Coastal Hazards Observing System. *Frontiers in Marine Science*, *6*, 348. doi: 10.3389/fmars.2019.00348

Birol, F., Bignalet-Cazalet, F., Cancet, M., Daguze, J.A., Fkaier, W., Fouchet, E., Léger, F., Maraldi, C., Niño, F., Pujol, M.I., & Tran, N. (2025). Understanding uncertainties in the satellite altimeter measurement of coastal sea level: Insights from a round-robin analysis. *Ocean Science*, *21*(1), 133–150. doi: 10.5194/os-21-133-2025

Birol, F., Léger, F., Passaro, M., Cazenave, A., Niño, F., Calafat, F. M., Shaw, A., Legeais, J.-F., Gouzenes, Y., Schwatke, C., & Benveniste, J. (2021). The X-TRACK/ALES multi-mission processing system: New advances in altimetry towards the coast. *Advances in Space Research*, *67*(8), 2398–2415. doi: 10.1016/j.asr.2021.01.049

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P.W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W.W.L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., … Péan, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth* Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Cazenave, A., Gouzenes, Y., Birol, F., Leger, F., Passaro, M., Calafat, F. M., Shaw, A., Nino, F., Legeais, J. F., Oelsmann, J., Restano, M., & Benveniste, J. (2022). Sea level along the world's coastlines can be measured by a network of virtual altimetry stations. *Communications Earth & Environment*, *3*(1), 117. doi: 10.1038/s43247-022-00448-z

Cazenave, A., Gouzenes, Y., Lancelot, L., Birol, F., Legér, F., Passaro, M., Calafat, F. M., Shaw, A., Niño, F., Legeais, J. F., Oelsmann, J., & Benveniste, J. (2024). New network of virtual altimetry stations for measuring sea level along the world coastlines. *SEOANE*.

Chen, J., Fenoglio, L., Kusche, J., Liao, J., Uyanik, H., Nadzir, Z. A., & Lou, Y. (2023). Evaluation of Sentinel-3A altimetry over Songhua river Basin. *Journal of Hydrology*, *618*, 129197. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129197

Church, J.A., & White, N.J. (2011). Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, *32*(4–5), 585–602. doi: 10.1007/s10712-011-9119-1

Deng, X., & Featherstone, W.E. (2006). A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: Application to ERS-2 around Australia. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *111*(C6), 2005JC003039. doi: 10.1029/2005JC003039

Fu, L.L., & Cazenave, A. (2000). Satellite altimetry and earth sciences: A handbook of techniques and applications. Elsevier.

Gommenginger, C., Thibaut, P., Fenoglio-Marc, L., Quartly, G., Deng, X., Gómez-Enri, J., Challenor, P., & Gao, Y. (2011). Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts: A Review of Retracking Methods and Some Applications to Coastal Waveforms. Dalam S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, & J. Benveniste (Ed.), *Coastal Altimetry* (hlm. 61–101). Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0_4

Hakim, M.R., Nababan, B., & Panjaitan, J.P. (2016). Accuracy Improvement On Sea Surface Height Estimation Based On Waveform Retracking Analyses Of Jason-2 Satellite In Java Sea. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, *7*(2), 771-790. doi: 10.29244/jitkt.v7i2.11254

Hong, Z., Yang, J., Liu, S., Jia, Y., Fan, C., & Cui, W. (2022). Coastal Waveform Retracking for HY-2B Altimeter Data by Determining the Effective Trailing Edge and the Low Noise Leading Edge. *Remote Sensing*, *14*(19), 5026. doi: 10.3390/rs14195026

Idris, N.H., & Vignudelli, S. (2023). The technical progress and achievements of coastal altimetry waveform retracking over the Asia seas. Dalam *Coastal Altimetry* (hlm. 21–40). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-323-91708-7.00009-2

Karlina, T., & Johan, W.A. (2020). Sea Level Rise in Indonesia: The Drivers and the Combined Impacts from Land Subsidence. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, *37*(3), p3. doi: 10.29037/ajstd.627

Khaki, M., Forootan, E., & Sharifi, M.A. (2014). Satellite radar altimetry waveform retracking over the Caspian Sea. *International Journal of Remote Sensing*, *35*(17), 6329–6356. doi: 10.1080/01431161.2014.951741

Nababan, B., Hadianti, S., & Natih, N.M.N. (2015). Dynamic Of Sea Level Anomaly Of Indonesian Waters. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, *7*(1), 259-272. doi: 10.29244/jitkt.v7i1.9943

Nababan, B., Hakim, R.M., & Panjaitan, P,J. (2018). Waveform identification and retracking analyses of Jason-2 altimeter satellite data for improving sea surface height estimation in Southern Java Island Waters and Java Sea, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *149*(1), 012057. doi: 10.1088/1755-1315/149/1/012057

Nadzir, Z.A. (2017). Coastal Sea State Bias: Correcting Coastal Sea Level by Studying the Relation between Wind, Waves, and the Radar Signals. [Master Thesis]. Technische Universität München.

Nilsson, B., & Nielsen, K. (2024). Validation of Sentinel-6MF based lake levels – An assessment with in situ data and other satellite altimetry data. *Advances in Space Research*, *73*(12), 5806–5821. doi: 10.1016/j.asr.2024.04.006

Niño, F., Coggiola, C., Blumstein, D., Lasson, L., & Calmant, S. (2022). Monitoring of Inland Water Levels by Satellite Altimetry and Deep Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *60*, 1–14. doi: 10.1109/TGRS.2021.3138329

Passaro, M., Nadzir, Z.A., & Quartly, G.D. (2018). Improving the precision of sea level data from satellite altimetry with high-frequency and regional sea state bias corrections. *Remote Sensing of Environment*, *218*, 245–254. doi: 10.1016/j.rse.2018.09.007

Passaro, M., Rautiainen, L., Dettmering, D., Restano, M., Hart-Davis, M.G., Schlembach, F., Särkkä, J., Müller, F.L., Schwatke, C., & Benveniste, J. (2022). Validation of an Empirical Subwaveform Retracking Strategy for SAR Altimetry. *Remote Sensing*, *14*(16), Article 16. doi: 10.3390/rs14164122

Permana, R.D., Nababan, B., & Panjaitan, J.P. (2020). Waveform re-tracking analyses with Fuzzy Logic on altimetry satellite data in Natuna Waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *429*(1), 012042. doi: 10.1088/1755-1315/429/1/012042

Schlembach, F., Passaro, M., Dettmering, D., Bidlot, J., & Seitz, F. (2022). Interference-sensitive coastal SAR altimetry retracking strategy for measuring significant wave height. *Remote Sensing of Environment*, *274*, 112968. doi: 10.1016/j.rse.2022.112968

Sinurat, M.E.B., Nababan, B., & Lumban, G.J. (2019). Analisis Retracking Waveform Data Satelit Altimeter Pada Teluk, Perairan Pulau-Pulau Kecil, Dan Laut Dalam Di Laut Halmahera. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, *11*(3), 793–807. doi: 10.29244/jitkt.v11i3.27101

Sinurat, M.E., Nababan, B., Gaol, J.L., Manik, H.M., & Idris, N.H. (2021). Waveform Classification And Retracking Of Jason-2 And Jason-3 In Halmahera Sea. *Jurnal Teknologi*, *83*(3), 107–117. doi: 10.11113/jurnalteknologi.v83.15125

Stammer, D., & Cazenave, A. (2017). Satellite Altimetry over Oceans and Land Surfaces (D. Stammer & A. Cazenave, Ed.; 1 ed.). CRC Press. doi: 10.1201/9781315151779

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. doi: 10.1007/s10712-019-09569-1

Wenzel, M., & Schröter, J. (2014). Global and regional sea level change during the 20th century. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *119*(11), 7493–7508. doi: 10.1002/2014JC009900

Widiyarti, D., & Nopianti, H. (2021). Identifikasi Strategi Kesiapsiagaan Bencana Dalam Kelompok Masyarakat (Studi Kasus Desa Kungkai Baru Kecamatan Air Periukan Kabupaten Seluma). *Jurnal Georafflesia: Artikel Ilmiah Pendidikan Geografi*, *6*(2), 12. doi: 10.32663/georaf.v6i2.2253

Zheng, J., Xu, X.Y., Xu, Y., & Guo, C. (2023). Coastal Waveform Retracking for Synthetic Aperture Altimeters Using a Multiple Optimization Parabolic Cylinder Algorithm. *Remote Sensing*, *15*(19), 4665. doi: 10.3390/rs15194665

Zikra, M., Suntoyo, & Lukijanto. (2015). Climate Change Impacts on Indonesian Coastal Areas. *Procedia Earth and Planetary Science*, *14*, 57–63. doi: 10.1016/j.proeps.2015.07.085