Volume 18, No. 3, 2025

ISSN: 1907-9931 (print), 2476-9991 (online)

EVALUASI KOMPONEN HARMONIK PASANG SURUT DENGAN DATA ALTIMETRI PESISIR DAN TIDE GAUGE DI PESISIR BARAT DAYA SUMATERA

EVALUATION OF TIDAL HARMONIC CONSTITUENTS USING COASTAL ALTIMETRY AND TIDE GAUGE DATA ON THE SOUTHWEST COAST OF SUMATRA

Devianti Natalia Lase, Zulfikar Adlan Nadzir*

Program Studi Teknik Geomatika, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan,
Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu 35365, Lampung Selatan, Lampung, Indonesia

*Corresponding author email: zulfikar.nadzir@gt.itera.ac.id

Submitted: 19 May 2024 / Revised: 24 September 2025 / Accepted: 14 November 2025

http://doi.org/10.21107/jk.v18i3.25780

ABSTRAK

Perkembangan teknologi akuisisi data menghasilkan alternatif dalam pengamatan pasang surut (pasut) selain menggunakan stasiun lapangan (tide gauge) yaitu satelit altimetri. Peningkatan ketelitian dari sistem retracker di pesisir menjadi parameter untuk meninjau tingkat kebaikan penggunaan satelit altimetri dalam pengamatan pasut sebagai pelengkap data tide gauge. Penelitian ini melakukan analisis harmonik dengan metode least square, menghasilkan nilai konstituen pasut utama yang digunakan dalam analisis kesesuaian data altimetri dibanding dengan tide gauge. Menggunakan dua stasiun di barat daya Sumatera, stasiun Krui menghasilkan amplitudo konstituen dominan K2 sebesar 0,034 m dan stasiun pasut Seblat dengan konstituen dominan K1 sebesar 0,035 m. Data altimetri Jason-1, Jason-2 dan Jason-3 pada pass 153 untuk data ALES dan GDR menghasilkan komponen pasut dominan P1 sebesar 0,283 m dan 0,354 m. Pass 077 data ALES dan GDR menghasilkan komponen pasut dominan P1 sebesar 0,532 m dan 0,313 m. Hasil analisis kesesuaian data antara satelit altimetri dan stasiun pasang surut diperoleh bahwa data ALES lebih baik di pesisir dengan jarak < 10 km dari garis pantai. Sedangkan data GDR lebih baik untuk pesisir berjarak > 10 km dari garis pantai. Disamping itu, apabila pengamatan dilakukan pada jarak yang lebih besar dari pesisir dapat menggunakan kombinasi dari kedua data tersebut.

Kata Kunci: *analisis harmonik, muka air laut, pesisir, satelit altimetri, stasiun pasut*

ABSTRACT

The advancement of data acquisition technology has provided alternatives to tide gauge observations for sea-level monitoring, namely satellite altimetry. The accuracy improvement of retracking systems in coastal regions is a key parameter for evaluating the effectiveness of satellite altimetry as a complement to tide gauge data. This study applied harmonic analysis using the least squares method to obtain tidal constituents, which were then used to assess the consistency of altimetry data compared with tide gauges. Two tide gauge stations on the west coast of Sumatra were analyzed: Krui, where the dominant tidal constituent was K2 with an amplitude of 0.034 m, and Seblat, where the dominant constituent was K1 with an amplitude of 0.035 m. Altimetry data from Jason-1, Jason-2, and Jason-3 along pass 153 produced dominant P1 constituent with an amplitudes of 0.283 m (ALES) and 0.354 m (GDR), while pass 077 yielded P1 with amplitudes of 0.532 m (ALES) and 0.313 m (GDR). The results indicate that ALES data are more reliable within 10 km of the coastline, whereas GDR data perform better beyond 10 km. Furthermore, a combination of both datasets is recommended for improved tidal representation in the coastal zone of West Sumatra.

Keywords*: altimetry satellite, coastal zone, harmonic analysis, sea level, tide gauge*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki jumlah penduduk yang besar, tercatat sebanyak 279 juta jiwa pada awal tahun 2023 (Kementerian Dalam Negeri Indonesia, 2023). Sebanyak 60% dari jumlah penduduknya mendiami wilayah pesisir yang didefinisikan

sebagai tempat dengan jarak kurang dari 20 km dari garis pantai (Jamika *et al.,* 2023). Salah satu fenomena yang terjadi di wilayah pesisir adalah pasang surut (pasut). Pasut sendiri merupakan salah satu aspek dominan dalam pemantauan dan pengelolaan kegiatan di wilayah pesisir (Aristi *et al.,* 2020).

Pasut dibentuk dari gelombang harmonik superposisi akibat dari interaksi bumi – bulan dan bumi – matahari. Pengaruh gravitasi bulan utamanya disebabkan oleh jarak bulan ke bumi lebih dekat dibanding jarak dari matahari ke bumi, walau ukuran matahari lebih besar dari bulan (Nadzir & Adil, 2024). Pasut dapat diamati menggunakan stasiun pasut (*tide gauge*) yang menghasilkan data tinggi muka laut dengan akurasi yang baik. Tetapi, ketersediaan dari stasiun pasut belum memadai serta ruang lingkup pengamatannya terbatas (Gumelar *et al.,* 2016). Sampai pada tahun 2023, terdapat 271 unit stasiun pasut yang sudah dibangun dan dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG), tersebar di seluruh wilayah Indonesia (Windupranata *et al.,* 2024).

Adanya perkembangan teknologi dalam melakukan akuisisi data dapat membantu mengamati dinamika lautan, salah satunya adalah pemantauan tinggi muka air laut (*sea surface height*) dengan menggunakan teknologi satelit altimetri untuk cakupan wilayah yang lebih luas (Hariyadi *et al.,* 2017). Bentuk gelombang yang dihasilkan oleh sensor altimetri ketika mendekati pesisir tidak menyerupai bentuk ideal sebuah gelombang hamburan (*ideal waveform*) (Nadzir & Hasan, 2025). Hal ini menunjukkan bahwa ketika pengamatan semakin mendekati garis pantai, estimasi pengambilan data yang dihasilkan menjadi kurang akurat (Hakim *et al.,* 2015). Hal ini terjadi karena adanya efek daratan yang mempengaruhi sinyal gelombang altimetri sehingga mengakibatkan kesulitan dalam melakukan beberapa koreksi secara akurat (Sinurat *et al.,* 2021). Oleh karena itu, perkembangan satelit altimetri masih terus dilakukan secara berkelanjutan untuk menyediakan data pengukuran dengan akurasi yang baik khususnya di pesisir dengan pemrosesan *waveform* secara mandiri (Le Traon *et al.,* 2025).

Saat ini satelit altimetri sudah umum digunakan sebagai metode alternatif dalam pengamatan tinggi muka laut selain menggunakan stasiun pasut, khususnya di laut lepas (Stammer & Cazenave, 2017; Vignudelli *et al.,* 2019). Sehubungan dengan itu, maka perlu melihat apakah data tinggi muka laut dari satelit altimetri di pesisir cukup baik atau tidak dalam membantu pengamatan pasut secara global. Sebagai upaya mengatasi masalah ini, Passaro *et al.,* (2014) melakukan penelitian yang menghasilkan perkembangan terbaru terhadap retracker di pesisir. Hasilnya, data retracker tersebut memiliki ketelitian yang meningkat dibandingkan data altimetri konvensional. Penelitian yang dilakukan Gómez-Enri *et al.* (2016) dan Passaro *et al.,* (2016) juga menunjukkan hasil yang sama terkait perkembangan terbaru dari retracker di pesisir, sehingga cakupan wilayah pesisir yang memiliki ketersediaan data dengan kualitas yang meningkat akan semakin luas.

Peningkatan ketelitian data dari perkembangan terbaru *retracker* di pesisir menjadi parameter untuk meninjau penggunaan satelit altimetri dalam pengamatan pasut (Liu *et al.,* 2023; Piccioni *et al.,* 2018; Ryanto *et al.,* 2022). Berkaitan dengan hal itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan mengevaluasi kesesuaian data hasil perkembangan *retracker* di pesisir terhadap data pasut, salah satunya adalah penelitian yang dijelaskan dalam laporan ini. Penelitian ini memanfaatkan data tinggi muka laut dari *retracker* tersebut untuk diproses menjadi komponen pasut, selanjutnya dibandingkan dengan komponen pasut dari data altimetri konvensional dan data *tide gauge* digunakan sebagai data validasi. Data altimetri yang digunakan adalah data *Adaptive Leading Edge Subwaveform* (ALES) dan *Geophysical Data Record* (GDR) dari satelit Jason-1 (J1), Jason-2 (J2), dan Jason-3 (J3) sebagai sumber data verifikasi. Penelitian ini diharapkan dapat membantu upaya berbagai instansi yang berkaitan dengan penyediaan data geodetik serta pengguna umum untuk menyediakan data pengamatan pasut lebih banyak, khususnya di Indonesia. Selain itu, penelitian ini mendemonstrasikan bahwa data konstituen pasut dan prediksinya dapat diperoleh dengan cepat tanpa harus melakukan pengamatan secara langsung menggunakan instrumen manual maupun otomatis. Hal ini memungkinkan aktivitas-aktivitas kelautan dan pesisir yang membutuhkan catatan tentang pasut dapat diselesaikan dengan optimal dan efektif.

MATERI DAN METODE

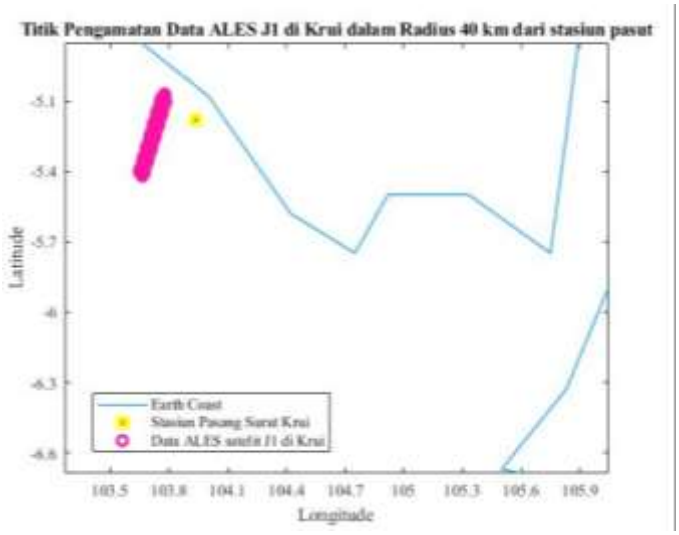
Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilalui lintasan dari ketiga satelit altimetri Jason yang jaraknya berdekatan dengan stasiun pasut Krui dan Seblat. Secara administratif stasiun pasut Krui terletak di Pelabuhan Perikanan Krui, Kecamatan Pesisir Tengah, Kabupaten Pesisir

Barat, Provinsi Lampung, dengan koordinat 103° 55' 55" BT dan 05° 11' 2" LS. Stasiun pasut Seblat terletak di Dermaga Seblat, Provinsi Bengkulu, dengan koordinat 101° 36' 6" BT dan 03° 13' 16" LS **(Gambar 1)**.



Gambar 1. Lokasi penelitian berada di perairan Pesisir Barat Pulau Sumatra bagian Selatan. Garis kuning merupakan lintasan satelit di stasiun pasut Seblat dan merah di stasiun pasut Krui.



Gambar 2. Data satelit pada jarak 40 km dari pesisir

Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data *tide gauge* dari stasiun pasut Krui (tahun 2011–2020) dan Seblat (2016–2020) dalam frekuensi pengamatan per-jam yang bersumber dari BIG. Data ALES (Tahun 2002–2019) dan GDR (Tahun 2002–2020) dari satelit altimetri J1, J2, dan J3 pada *pass* 153 dan *pass* 077 didapatkan dari portal OpenADB (https://openadb.dgfi.tum.de) dan portal NCEI (https://www.ncei.noaa.gov). Data altimetri yang diunduh disesuaikan dengan lintasan satelit yang berdekatan dengan stasiun pasang surut.

Seleksi parameter

Data ALES dan GDR memiliki kriteria validasi yang digunakan untuk menghasilkan data yang baik pada wilayah yang berdekatan dengan pesisir. SSH GDR masih mengandung efek pasut (*tide effect*) serta koreksi data DAC (*dynamic atmospheric correction*). Tetapi, SSH ALES sudah melakukan reduksi terhadap parameter - parameter tersebut. Oleh karena itu, data SSH ALES dan GDR perlu dilakukan penyamaan parameter koreksi terlebih dahulu, sehingga kedua data dapat dibandingkan atau sering disebut sebagai proses harmonisasi dari dataset yang berbeda. Rumus 1 dan 2 (Mangini *et al.,* 2022) menunjukkan cara data ALES dan GDR disamakan parameternya.

SSH ALES penyamaan = SSH ALES TUM + *tide effect* (*ocean tide correction* + *ocean load tide correction*)……..……(1)

SSH GDR penyamaan = *Altitude – corrected range*……..(2)

Penggunaan data pada jarak 40 km dari pesisir

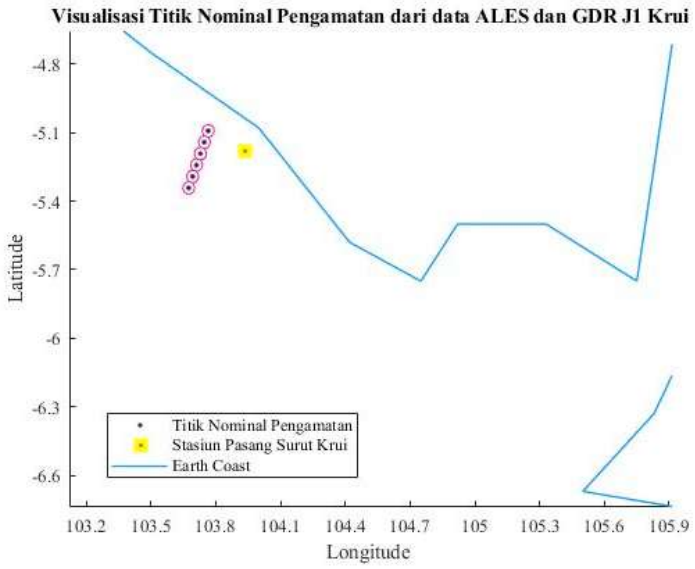
Penelitian yang telah dilakukan oleh Nadzir & Hasan (2025) menemukan bahwa jarak lintasan altimetri yang dapat digunakan pada wilayah pesisir berjarak maksimal 40 km dari stasiun pasang surut. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, data yang digunakan adalah data dengan jarak kurang dari 40 km dari garis pantai pada kedua stasiun pasang surut. Data yang terdapat pada jarak 40 km dari stasiun Krui terdapat pada **Gambar 2**.

Titik nominal pengamatan

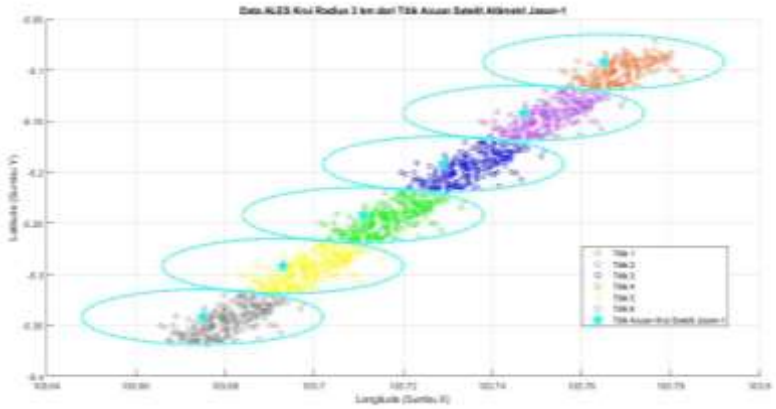
Titik nominal yang digunakan adalah titik pada *cycle* (perputaran orbit) pertama dari masing – masing satelit. Penggunaan titik tersebut sebagai titik nominal bertujuan untuk menjaga konsistensi posisi titik-titik pengamatan dari setiap satelit dengan jarak < 11 km, sehingga persebaran data altimetri lebih terfokus. Data ALES dan GDR di wilayah Krui dan Seblat menghasilkan masing-masing 6 titik nominal pengamatan yang mewakili 6 titik dari jarak 0 sampai 40 km dari garis pantai.

Radius titik nominal dan jumlah data pengamatan

Penentuan radius titik nominal pengamatan dilakukan secara sengaja (*fit-for-purpose sampling*) dengan radius sejauh 3 km (0,027˚) yang tergambar pada **Gambar 3**. Ketentuan radius tersebut berdasarkan pertimbangan dan perhitungan bahwa titik-titik pengamatan yang terdapat pada radius terpilih tidak mengalami pertampalan data secara spasial dan temporal, dan meminimalisir jumlah data yang tidak tercakup di setiap titik nominal penelitian, tergambar oleh **Gambar 4**.



Gambar 3. Titik nominal dalam radius 3 km



Gambar 4. Titik pengamatan di setiap titik nominal

Analisis harmonik metode *least square* data altimetri

Perhitungan nilai amplitudo dan fase menggunakan metode hitung perataan kuadrat terkecil (*least-square*) yang tertulis pada Rumus 3, dengan memerlukan bantuan *tool* T_TIDE (Pawlowicz *et al.,* 2002) yang diproses menggunakan perangkat lunak pemprograman.

$$h(t_n) = A_0 + \sum_{i=1}^{k} B_i \, Cos\,(\omega_i t_n - C_i) \quad \text{..... (3)}$$

$h(t_n)$ adalah kedudukan permukaan air pada waktu ke-n (m), A_0 merupakan kedudukan rata – rata permukaan air laut (MSL) (m), B_i merupakan amplitudo (m), ω_i adalah frekuensi angular (rad/jam), dan C_i adalah fase (°) dari komponen pasut ke-i, t_n adalah waktu pengamatan ke-n (jam), k jumlah komponen pasang surut, dan i merupakan indeks komponen pasang surut i = 1,2,….k (Yu *et al.,* 2021).

Frekuensi *de-aliased*

Pengamatan dari satelit altimetri terjadi dalam interval 9,156 hari sehingga mengakibatkan terjadinya *aliasing* data terhadap pengamatan pasang surut umumnya. Oleh karena itu, dilakukan proses *de-aliasing* untuk merekonstruksi amplitudo dan fase satelit sehingga sesuai dengan amplitudo dan fase *tide gauge*. Nilai frekuensi *de-aliased* dihitung dengan menggunakan metode folding melalui perhitungan Nyquist serta membutuhkan nilai frekuensi asli data *tide gauge* yang tertulis pada Rumus 4 (Lyard *et al.,* 2021).

$$T_a = min\left[\frac{1}{2\,n\,f_N \pm f}\right] \quad \text{..... (4)}$$

f_N adalah frekuensi Nyquist, △t adalah interval pengambilan sampel (9,9156 hari), T_a merupakan periode *de-aliased*, f_a adalah frekuensi *de-aliased*, n adalah bilangan bulat, serta f adalah frekuensi asli dari konstituen pasang surut.

Analisis harmonik metode *least square* data *tide gauge*

Proses analisis harmonik yang dilakukan mirip dengan proses pengolahan dari data satelit, menggunakan metode *least-square* dengan bantuan t_tide pada perangkat pemrograman. Penelitian ini menentukan amplitudo dan fase terhadap 8 komponen pasut utama (Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, dan K2). Nilai dari masing–masing komponen pasut *tide gauge* digunakan sebagai data validasi dari hasil analisis harmonik data satelit. Nilai komponen pasut tersebut juga digunakan dalam perhitungan bilangan *Formzahl* untuk menentukan jenis pola pasut pada lokasi tersebut yang tergambar menjadi Rumus 5 (Kusuma *et al.,* 2021).

$$F = \frac{X_{(O_1)} + X_{(K_1)}}{X_{(M_2)} + X_{(S_2)}} \quad \text{..... (5)}$$

Dimana, F: Bilangan *Formzahl*; $X_{(O_1)}$: Amplitudo komponen harmonik O_1; $X_{(K_1)}$: Amplitudo komponen harmonik K_1; $X_{(M_2)}$: Amplitudo komponen harmonik M_2; $X_{(S_2)}$: Amplitudo komponen harmonik S_2

Analisis kesesuaian data

Analisis data dilakukan dengan membandingkan nilai amplitudo dan fase komponen pasut hasil analisis harmonik dari data altimetri terhadap data *tide gauge*. Hasil dari analisis harmonik *tide gauge* dan data satelit memiliki nilai kesalahan pengukuran dengan nilai tertentu pada masing-masing datanya yang diwakili oleh nilai standar deviasi. Ketika hasil dari selisih pengukuran *tide gauge* dengan satelit kurang dari nilai kesalahan pengukuran satelit, maka data satelit pada komponen yang dianalisis tersebut dikategorikan sesuai. Sebaliknya, apabila hasil selisih perbandingan pengukuran *tide gauge* dengan satelit lebih besar dari nilai kesalahan pengukuran satelit, maka data satelit pada komponen tersebut tidak sesuai. Secara matematis, kedua pernyataan di atas diekspresikan sebagai Rumus 6 dan Rumus 7,

$$\left|\frac{amplitudo}{fase}\right| \leq \sum STD\ Alt = sesuai \quad \text{..... (6)}$$

$$\left|\frac{amplitudo}{fase}\right| \geq \sum STD\ Alt = tidak\ sesuai \quad \text{... (7)}$$

Nilai komponen pasut data satelit dan tide gauge digunakan untuk menganalisis jenis pasang surut dari masing-masing data di lokasi penelitian berdasarkan besar nilai bilangan *Formzahl* data tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis harmonik data *tide geuge*

Nilai amplitudo komponen utama pasut di Stasiun Pasang Surut Krui dan Stasiun Pasang Surut Seblat memiliki nilai < 1 m dengan *error* pengukuran yang dihasilkan < 1 m. Masing-masing stasiun pasut menghasilkan komponen pasut dominan yang berbeda, seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**. Perbedaan ini terjadi

karena kedua stasiun menggunakan data yang berbeda serta terletak di lokasi yang berbeda pula. Komponen pasut dominan di Stasiun Pasang Surut Krui adalah komponen K2 dengan nilai 0,034 m. K2 merupakan komponen akibat perubahan jarak dari matahari ke bumi karena bentuk orbit yang elips. Pada Stasiun Pasang Surut Seblat, komponen pasut dominan yang dihasilkan adalah komponen K1. Konstituen K1 terjadi akibat deklinasi sistem matahari dan bulan, dengan nilai amplitudo sebesar 0,035 m.

Tabel 1. Amplitudo dan tingkat kesalahannya dari setiap komponen pasang surut di Krui dan Seblat

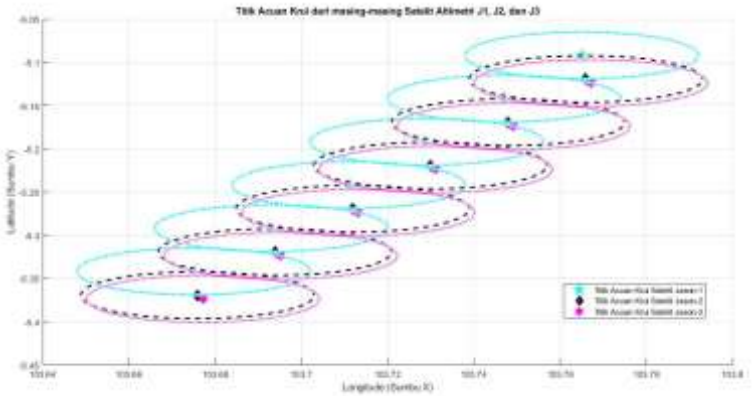
Komponen Pasut	Stasiun Pasut	Amplitudo (m)	Kesalahanan Amplitudo (m)
Q_1	Krui	0,003	0,007
	Seblat	0,010	0,011
O_1	Krui	0,010	0,008
	Seblat	0,030	0,010
P_1	Krui	0,001	0,005
	Seblat	0,011	0,009
K_1	Krui	0,032	0,009
	Seblat	0,035	0,012
N_2	Krui	0,010	0,014
	Seblat	0,016	0,018
M_2	Krui	0,009	0,014
	Seblat	0,014	0,021
S_2	Krui	0,012	0,015
	Seblat	0,009	0,019
K_2	Krui	0,034	0,026
	Seblat	0,022	0,024

Nilai amplitudo komponen pasut digunakan untuk menentukan jenis pasang surut di wilayah tersebut dengan menghitung nilai bilangan *Formzahl*-nya sesuai dengan Rumus 5. Stasiun Pasang Surut Krui memiliki nilai bilangan *Formzahl* sebesar 2 dan Stasiun Pasang Surut Seblat sebesar 2,826. Oleh karena itu, berdasarkan kategori jenis pasang surut sesuai nilai bilangan *Formzahl*, maka kedua stasiun tersebut teridentifikasi memiliki jenis pasut campuran harian tunggal (*mixed, mainly diurnal*). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun nilai dari komponen pasut di Krui dan Seblat berbeda, jenis pasang surutnya masih sama, karena berada di lokasi yang kondisinya kurang lebih sama dan mirip. Hasil yang sama ditemukan oleh Julianto *et al.* (2021) yang menemukan bahwa jenis pasang surut di Krui dan Seblat dari data satelit altimetri sama, yaitu campuran dengan kecenderungan memiliki siklus harian tunggal.

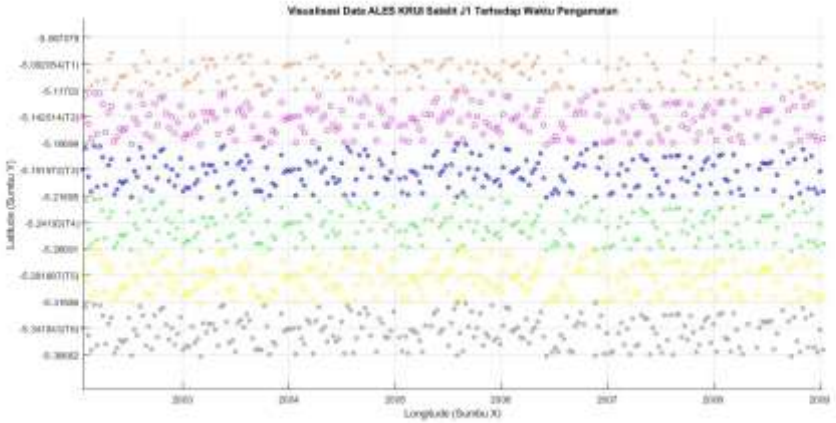
Analisis harmonik data satelit

Data altimetri yang digunakan berada pada *pass* 077 dan *pass* 153, sebagai lintasan satelit yang dekat dengan lokasi stasiun pasang surut Seblat dan Krui. Akan tetapi data yang digunakan bukan keseluruhan data pass tersebut melainkan data *pass* sejauh 40 km dari Stasiun Pasang Surut Krui dan Seblat.

Pengamatan yang dilakukan oleh satelit altimetri tidak sama persis akan mengulang pada titik yang sama walaupun melintas pada orbit yang selalu sama, sehingga diperlukan titik nominal untuk mengelompokkan seluruh data akuisisi di sepanjang lintasan, untuk menjaga tingkat konsistensi dari posisi titik-titik pengamatan. Titik nominal yang dihasilkan sebanyak 6 titik nominal dengan radius 3 km (0,027°), tergambar pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**.



Gambar 5. Visualisasi titik nominal dari satelit Jason-1, Jason-2, dan Jason-3



Gambar 6. Titik pengamatan dari masing – masing titik nominal berdasarkan waktu pengamatannya

Nilai periode de-aliased dan frekuensi *de-aliased* dari data satelit menggunakan perhitungan Nyquist sesuai dengan Rumus 4 terdaftar pada **Tabel 2**. Analisis harmonik data ALES di titik 1, sebagai titik terdekat dengan Stasiun Pasang Surut Krui memperlihatkan bahwa nilai amplitudo dan *error* data ALES dan GDR memiliki nilai < 1 m. Hal yang sama juga terjadi pada titik nominal 2 hingga 6 untuk data ALES maupun GDR. Komponen pasut dominan dari data ALES dan GDR di setiap titik nominal adalah komponen P1, yang terjadi akibat deklinasi matahari, dengan rata – rata nilai amplitudo sebesar 0,283 m untuk data ALES dan 0,355 m untuk data GDR. Hasil dari analisis harmonik ini juga mengidentifikasi jenis pasang surut dari data ALES dan GDR di 6 titik nominal pengamatan. Secara keseluruhan, baik data ALES dan GDR, jenis pasut yang dihasilkan adalah campuran harian ganda (*mixed, mainly semidiurnal*) dengan rata – rata nilai *Formzahl* di 6 titik nominal tersebut sebesar 0,705 untuk data ALES dan 0,718 untuk data GDR.

Nilai amplitudo ALES dan GDR di semua titik nominal pada stasiun pasut Seblat memiliki nilai < 1 m dengan nilai *error* di semua titik memiliki nilai < 1 m. Terdapat beberapa komponen harmonik dengan amplitudo yang sangat besar, yaitu komponen Q1, P1, dan K2 data GDR di titik nominal 1 dan komponen P1 data ALES di titik nominal 1. Hal ini disebabkan pada saat pendefinisian dari masing – masing komponen tersebut saat proses terjadinya pasang surut terjadi gangguan sehingga nilai amplitudo yang dihasilkan komponen tersebut memiliki nilai yang sangat besar. Komponen pasut dominan data satelit di Stasiun Pasang Surut Seblat hampir seluruhnya menunjukkan komponen pasut P1, komponen yang terjadi akibat deklinasi matahari, dengan rata – rata nilai amplitudo komponen tersebut sebesar 0,533 m untuk data ALES dan 0,314 m untuk data GDR. Jenis pasang surut yang teridentifikasi hampir di seluruh titik nominal adalah campuran harian ganda (*mixed, mainly semidiurnal*), dengan rata – rata nilai bilangan *Formzahl* sebesar 0,867 untuk data ALES dan 0,830 untuk data GDR.

Tabel 2. Nilai periode dan frekuensi asli serta *de-aliased*

Komponen pasut	T asli (Jam)	f asli (Jam)	T *de-aliased* (Jam)	f *de-aliased* (Jam)
Q_1	26,87	0,037	1664,748	0,0006
O_1	25,82	0,039	1097,140	0,0009
P_1	24,07	0,042	2133,381	0,0005
K_1	23,93	0,042	4156,613	0,0002
N_2	12,66	0,079	1188,676	0,0008
M_2	12,42	0,081	1490,579	0,0007
S_2	12	0,083	1409,801	0,0007
K_2	11,97	0,084	2078,307	0,0005

Analisis kesesuaian

Jumlah data sesuai dan nilai bilangan *Formzahl*

Kesesuaian data ALES dan GDR terhadap data tide gauge ditinjau dari jumlah amplitudo dan fase dari data ALES dan GDR yang sesuai dengan hitungan pada Rumus 6 dan Rumus 7 berserta nilai bilangan *Formzahl*nya. Selain itu, parameter jarak data ke stasiun pasut digunakan sebagai parameter tambahan. Kesesuaian data ALES dan GDR terhadap kondisi pasang surut ditentukan dengan melakukan perbandingan data amplitudo dan

fase dari data satelit dan data tide gauge. Nilai hasil perbandingan digunakan sebagai data yang akan dilakukan pengecekan kesesuaian terhadap nilai kesalahan amplitudo dan kesalahan fase altimetri berdasarkan rumus pada sub-bab analisis kesesuaian yang terwakili **Tabel 3** dan **Tabel 4**.

Tabel 3. Jumlah kesesuaian data di stasiun pasut Krui

Jenis Data	**Data sesuai di Krui**		**Jumlah**
	Amplitudo	**Fase**	
ALES	26 data	22 data	48 data
GDR	35 data	12 data	47 data

Tabel 4. Jumlah kesesuaian data di stasiun pasut Seblat

Jenis Data	Data sesuai di Seblat		Jumlah
	Amplitudo	Fase	
ALES	27 data	13 data	40 data
GDR	30 data	12 data	42 data

Tabel 3 dan **Tabel 4** menggambarkan bahwa kemampuan data ALES dan GDR untuk pengamatan pasut di wilayah pesisir memiliki kemampuan yang mirip, dibuktikan dengan jumlah data sesuai yang hampir sama untuk kedua jenis data pada kedua lokasi. Hasil tersebut juga memperlihatkan bahwa kesesuaian fase dari data ALES memiliki jumlah yang lebih banyak dari data GDR dan kesesuaian data amplitudo data GDR memiliki jumlah yang lebih banyak dari data ALES. Sistem pemrosesan data ALES pada perangkat yang terdapat pada satelit altimetri mampu memperbaiki ketelitian data yang terganggu oleh daratan, sehingga dapat mengoptimalkan kelengkapan dan keakuratan data SSH dari ALES di wilayah dekat garis pantai. Hal tersebut memungkinkan data ALES untuk melakukan analisis lebih dekat lagi ke *tide gauge* dibandingkan dengan data GDR. Kemampuan untuk lebih dekat dengan *tide gauge* mempengaruhi kebaikan dari fase data ALES. Gelombang di sepanjang lintasan data ALES, yakni dari posisi awal data ALES hingga data tersebut mendekati *tide gauge* akan terdefinisikan seluruhnya. Hal ini yang mengakibatkan kesesuaian fase data ALES dalam jumlah yang lebih banyak daripada data GDR.

Sebaliknya, data GDR ditemukan memiliki kemampuan estimasi data amplitudo lebih baik dari data ALES. Hal ini disebabkan karena data ALES belum memiliki data DAC yang sudah dikurangkan dalam perhitungan SSH, yaitu respon permukaan laut yang diukur akibat perubahan dari tekanan atmosfer, sementara data GDR memiliki data tersebut. Adanya data DAC inilah yang menyebabkan data GDR lebih mendekati kondisi nyata dalam melakukan estimasi amplitudo, sehingga data amplitudo GDR memiliki kesesuaian data dalam jumlah yang lebih banyak dari kesesuaian data amplitudo ALES.

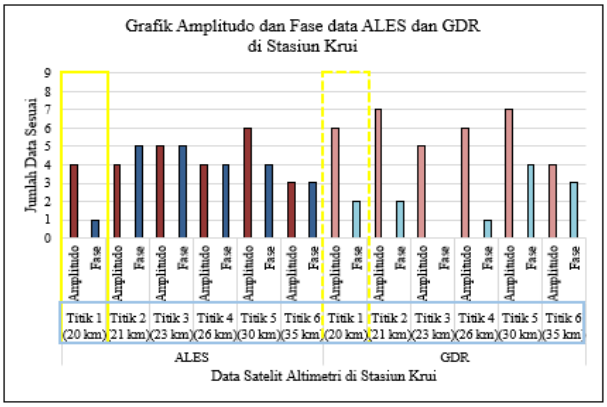
Nilai bilangan *Formzahl* yang dihasilkan data *tide gauge* dan data satelit mengidentifikasi jenis pasang surut yang berbeda. Nilai bilangan *Formzahl* data *tide gauge* di stasiun pasut Krui dan Seblat masing – masing sebesar 2 dan 2,826, sehingga berdasarkan nilai tersebut maka jenis pasang surut di stasiun Krui dan Seblat adalah jenis pasut campuran harian tunggal (*mixed, mainly diurnal*). Secara keseluruhan, dari data di titik nominal 1 hingga 6, data ALES dan GDR di stasiun pasut Krui dan Seblat teridentifikasi memiliki jenis pasut campuran harian ganda (*mixed, mainly semidiurnal*). Rata – rata nilai bilangan *Formzahl* masing - masing data di setiap lokasi yaitu 0,705 untuk data ALES di Krui, 0,718 untuk data GDR di Krui, 0,86 untuk data ALES di Seblat, serta 0,83 untuk data GDR di Seblat. Perbedaan ini, berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya yang berfokus pada pemodelan konstanta pasang surut dari data satelit altimetri (Hart-Davis *et al.,* 2021; Michel Lionel *et al.,* 2023), menunjukkan kecenderungan bahwa hasil yang didapatkan dari aplikasi T_TIDE harus dikonfirmasi menggunakan aplikasi pengolah data lainnya.

Perbedaan jenis pasut yang dihasilkan dari data *tide gauge* dan satelit dipengaruhi oleh besarnya nilai amplitudo komponen pasut O1, K1, M2, dan S2, sebagai komponen penentu besar nilai bilangan *Formzahl*. Nilai amplitudo dari komponen tersebut dipengaruhi oleh gaya pembangkit pasut di lokasi stasiun Krui dan Seblat saat pengamatan data tide gauge dan data satelit dilakukan. Selain itu, panjang pengamatan serta interval data pengamatan mempengaruhi informasi dari hasil pengamatan pasut, yang mana mempengaruhi kemunculan suatu komponen pasut dapat diamati, sehingga dihasilkan komponen pasut untuk menghitung nilai bilangan *Formzahl* tersebut. Akan tetapi, kedua data tersebut sama-sama memberikan informasi bahwa

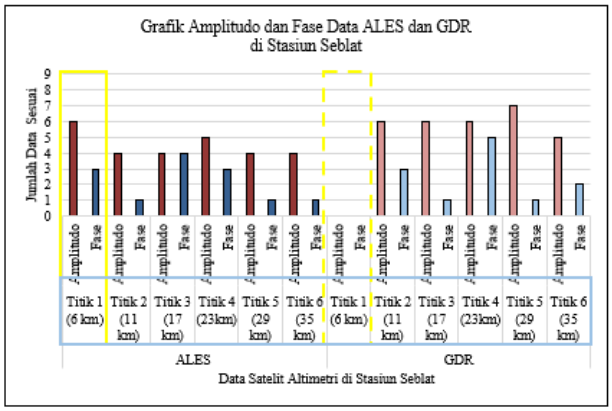
terdapat ketidaksetaraan ketinggian dan waktu dari jenis pasut di stasiun pasut Krui dan Seblat, walaupun data *tide gauge* adalah pasut diurnal dan data satelit adalah pasut semidiurnal.

Jarak data ke stasiun pasut

Jarak terdekat titik nominal ke stasiun Krui dan Seblat adalah 19,567 km dan jarak titik terjauh 33,608 km. Jarak tersebut menjadi fokus dari analisis yang dilakukan, memperhatikan jumlah data yang dianggap sesuai dari masing-masing titik nominal pada kedua lokasi, yang tergambar pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**. Pada jarak kurang dari 10 km, data GDR menghasilkan kesesuaian amplitudo dan fase dalam jumlah yang sedikit. Hal tersebut dapat dilihat pada data GDR di titik nominal 1 stasiun Seblat dengan jarak 6 km ke stasiun pasut pada garis kuning putus-putus. Dapat dilihat bahwa tidak ada konstanta pasang surut yang sesuai antara data ALES dan GDR terhadap data stasiun pasang surut. Tingkat kesesuaian amplitudo dan fase untuk semua konstanta pasang surut ditemukan naik secara proporsional dengan jarak titik nominal dari stasiun pasang surut, seperti yang tergambar pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**. Hal ini berdasarkan penjelasan sebelumnya terkait kemampuan dari masing-masing data untuk melakukan pengamatan mendekati wilayah pesisir, seperti yang dilaporkan pada Birol *et al.* (2021) yang menemukan bahwa data dari hasil pengolahan *waveform* yang spesifik untuk pesisir (< 20 km dari garis pantai) seperti ALES dan X-TRACK memiliki performa yang lebih baik daripada data altimetri konvensional seperti GDR. Seperti yang terlihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8** bahwa secara total, 13 konstanta pasang surut dari ALES di jarak < 10 km dari garis pantai memiliki kesesuaian dengan data pasang surut, dibandingkan dengan 8 konstanta dari GDR. Sebaliknya, untuk data dengan jarak > 10 km, GDR terhitung memiliki kesesuaian sejumlah 83 konstanta dibandingkan dengan 74 konstanta pada ALES. Dengan demikian, data ALES ditemukan memiliki performa yang lebih baik untuk jarak < 10 km. Sedangkan, data GDR lebih baik digunakan untuk data pesisir dengan jarak > 10 km (dimulai dari suatu titik yang jaraknya 10 km dari pesisir) sampai 40 km dari garis pantai. Sehingga, kedua data dapat dikombinasikan dalam pemrosesan data pada pesisir, dari 0 sampai 40 km ataupun pada laut lepas.



Gambar 7. Grafik amplitudo dan fase yang sesuai dari data ALES dan GDR di setiap titik stasiun Krui



Gambar 8. Grafik amplitudo dan fase yang sesuai dari data ALES dan GDR di setiap titik stasiun Seblat

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesesuaian data altimetri dipengaruhi oleh nilai hasil perbandingan komponen pasut *tide gauge* dengan komponen pasut altimetri, serta nilai kesalahan dari komponen pasut altimetri. Jumlah data yang sesuai memperlihatkan bahwa data ALES memiliki jumlah data fase yang sesuai lebih banyak. Hal ini terjadi karena ALES mampu memperluas cakupan data secara spasial sehingga data tersebut dapat mengoptimalkan pengamatan data lebih dekat ke pesisir. Data GDR memiliki jumlah data amplitudo yang sesuai dalam jumlah yang lebih banyak. Hal ini karena data GDR memiliki parameter DAC, merupakan parameter koreksi data yang menyebabkan data GDR dapat melakukan estimasi amplitudo lebih mendekati kondisi nyata, untuk menghitung nilai SSH data tersebut. Perbandingan antara bilangan *Formzahl* dari data stasiun pasang surut dan satelit altimetri menunjukkan ketidaksesuaian yang bisa diatributkan pada aplikasi pengolahan data. valuasi kesesuaian data altimetri dalam pengamatan pasut dengan menggunakan data tide gauge sebagai data validasi menunjukkan bahwa untuk jarak < 10 km penggunaan data ALES lebih optimal karena memiliki ketelitian data yang lebih baik dibandingkan data GDR yang optimal jika digunakan pada jarak > 10 km. Namun, untuk melakukan pengamatan di pesisir dengan jarak yang lebih besar dapat menggunakan kombinasi dari kedua data tersebut sehingga hasil pengamatannya menjadi lebih optimal. Selain itu, nilai bilangan *Formzahl* dari data tide gauge dan data satelit mengidentifikasi jenis pasut yang berbeda. Data tide gauge di kedua stasiun pasut mengidentifikasi jenis pasut campuran harian tunggal (mixed, mainly diurnal), sedangkan data ALES dan GDR setiap stasiun pasut mengidentifikasi jenis pasut campuran harian ganda (mixed, mainly semidiurnal). Perbedaan ini dipengaruhi oleh gaya pembangkit pasut saat pengamatan data – data tersebut, panjang data pengamatan, serta interval pengamatan datanya. Hal ini berkaitan dengan kemunculan komponen pasut yang digunakan dalam perhitungan bilangan *Formzahl*.

DAFTAR PUSTAKA

Aristi, S., Sutikno, S., & Fauzi, M. (2020). Analisis Pola Arus Akibat Pasang Surut Di Pantai Selat Baru, Kabupaten Bengkalis. *Selodang Mayang: Jurnal Ilmiah Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Indragiri Hilir*, *6*(3), 171–177. https://doi.org/10.47521/selodangmayang.v6i3.183

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. https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.049

Gómez-Enri, J., Cipollini, P., Passaro, M., Vignudelli, S., Tejedor, B., & Coca, J. (2016). Coastal Altimetry Products in the Strait of Gibraltar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *54*(9), 5455–5466. https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2565472

Gumelar, J., Sasmito, B., & Amarrohman, F. J. (2016). Analisis Harmonik Dengan Menggunakan Teknik Kuadrat Terkecil Untuk Penentuan Komponen-Komponen Pasut Di Wilayah Laut Selatan Pulau Jawa Dari Satelit Altimetri Topex/Poseidon Dan Jason-1. *Jurnal Geodesi Undip*, *5*(1), 194–203. https://doi.org/10.14710/jgundip.2016.10590

Hariyadi, H., Marwoto, J., & Yulihandoko, E. (2017). Kombinasi Data Altimetri Satelit Jason-1 & Envisat Untuk Memantau Perubahan Permukaan Laut Di Indonesia. *Buletin Oseanografi Marina*, *6*(1), 24–28. https://doi.org/10.14710/buloma.v6i1.15738

Hart-Davis, M. G., Piccioni, G., Dettmering, D., Schwatke, C., Passaro, M., & Seitz, F. (2021). EOT20: A global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. *Earth System Science Data*, *13*(8), 3869–3884. https://doi.org/10.5194/essd-13-3869-2021

Jamika, F. I., Monica, F., Razak, A., & Kamal, E. (2023). Pengelolaan Pesisir Dan Kelautan Dalam Studi Kasus Dampak Reklamasi Pantai Dan Tambang Pasir Terhadap Ekosistem Laut Dan Masyarakat Pesisir. *Journal Of Indonesian Tropical Fisheries (Joint-Fish) : Jurnal Akuakultur, Teknologi Dan Manajemen Perikanan Tangkap Dan Ilmu Kelautan*, *6*(1), 99–109. https://doi.org/10.33096/joint-fish.v6i1.162

Julianto, R., Nadzir, Z. A., & Prijatna, K. (2021). Analisis Harmonik Pasang Surut Laut

Menggunakan Data Satelit Altimetri Jason-2 dan Data Stasiun Pasut (Studi Kasus: Perairan Pesisir Barat Lampung). *Seminar Nasional Geomatika*, 679. https://doi.org/10.24895/SNG.2020.0-0.1182

Kementerian Dalam Negeri Indonesia. (2023). *Data Kependudukan Provinsi Per Juli 2023*. https://pelita.kemendagri.go.id/kemendagri/dataset/1102/tabel-data

Kusuma, H. A., Lubis, M. Z., Oktaviani, N., & Setyono, D. E. D. (2021). Tides Measurement and Tidal Analysis at Jakarta Bay. *Journal of Applied Geospatial Information*, *5*(2), Article 2. https://doi.org/10.30871/jagi.v5i2.2779

Le Traon, P.-Y., Dibarboure, G., Lellouche, J.-M., Pujol, M.-I., Benkiran, M., Drevillon, M., Drillet, Y., Faugère, Y., & Remy, E. (2025). Satellite altimetry and operational oceanography: From Jason-1 to SWOT. *Ocean Science*, *21*(4), 1329–1347. https://doi.org/10.5194/os-21-1329-2025

Liu, Z., Jiao, S., Liu, X., & Lv, X. (2023). Two-Dimensional Numerical Simulation of Tide and Tidal Current of Eight Major Tidal Constituents in the Bohai, Yellow, and East China Seas. *Remote Sensing*, *15*(15), 3735. https://doi.org/10.3390/rs15153735

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

Mangini, F., Chafik, L., Bonaduce, A., Bertino, L., & Nilsen, J. E. Ø. (2022). Sea-level variability and change along the Norwegian coast between 2003 and 2018 from satellite altimetry, tide gauges, and hydrography. *Ocean Science*, *18*(2), 331–359. https://doi.org/10.5194/os-18-331-2022

Michel Lionel, T., Florent, L., Loren, C., Mathilde, C., Damien, A., Ergane, F., Mei-ling, D., Ramiro, F., Yannice, F., Gerald, D., & Nicolas, P. (2023, Mei 15). *The new FES2022 tidal atlas.* https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9008

Nadzir, Z. A., & Adil, I. (2024). Assessment of Low-Cost Tide Gauges to Meet GLOSS 1-cm Precision and Accuracy Standards: A Case Study on Pramuka Island, Indonesia. *Forum Geografi*, *38*(2), 222–230. https://doi.org/10.23917/forgeo.v38i2.5182

Nadzir, Z. A., & Hasan, M. A. (2025). Studi Waveform Retracking Jason-2 di Pesisir Barat Daya Sumatera. *Jurnal Kelautan Tropis*, *28*(2), 223–234. https://doi.org/10.14710/jkt.v28i2.26228

Passaro, M., Cipollini, P., Vignudelli, S., Quartly, G. D., & Snaith, H. M. (2014). ALES: A multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry. *Remote Sensing of Environment*, *145*, 173–189. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.008

Passaro, M., Dinardo, S., Quartly, G. D., Snaith, H. M., Benveniste, J., Cipollini, P., & Lucas, B. (2016). Cross-calibrating ALES Envisat and CryoSat-2 Delay–Doppler: A coastal altimetry study in the Indonesian Seas. *Advances in Space Research*, *58*(3), 289–303. https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.04.011

Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, *28*(8), 929–937. https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4

Piccioni, G., Dettmering, D., Passaro, M., Schwatke, C., Bosch, W., & Seitz, F. (2018). Coastal Improvements for Tide Models: The Impact of ALES Retracker. *Remote Sensing*, *10*(5), 700. https://doi.org/10.3390/rs10050700

Ryanto, N. A., Agung Wiyono, R. U., & Hidayah, E. (2022). Studi Peramalan Pasang Surut Di Pesisir Pantai Pancer Kecamatan Puger, Kabupaten Jember. *Maspari Journal : Marine Science Research*, *14*(1), 1–13. https://doi.org/10.56064/maspari.v14i1.13653

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

Windupranata, W., Nusantara, C. A. D. S., & Nuraghnia, A. (2024). Variasi Spasial Karakteristik Pasang Surut di Laut Jawa Berbasiskan Model Pasut Global TPXO9v5. *Buletin Oseanografi Marina*, *13*(2), 239–249. https://doi.org/10.14710/buloma.v13i2.59689

Yu, Q., Pan, H., Gao, Y., & Lv, X. (2021). The Impact of the Mesoscale Ocean Variability on the Estimation of Tidal Harmonic Constants Based on Satellite Altimeter Data in the South China Sea. *Remote Sensing*, *13*(14), 2736. https://doi.org/10.3390/rs13142736