

## Karakteristik Elevasi Muka Air Laut di Selat Madura

Sofyana Ashari<sup>1</sup>, Ashari Wicaksono<sup>1,2\*</sup>, Nike Ika Nuzula<sup>1,3</sup>, Aries Dwi Siswanto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Trunojoyo Madura, Jl. Raya Telang, PO.Box.2 Kamal, Bangkalan-Jawa Timur, 69162.

<sup>2</sup>Laboratorium Oseanografi, Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Trunojoyo Madura, Jl. Raya Telang, PO.Box.2 Kamal, Bangkalan-Jawa Timur, 69162.

<sup>3</sup>SainsTek Pergaraman, Program Studi Ilmu Kelautan, Universitas Trunojoyo Madura, Jl. Raya Telang, PO.Box.2 Kamal, Bangkalan-Jawa Timur, 69162.

Email koresponden: ashari.wicaksono@trunojoyo.ac.id

Submitted: 2024-02-28 Revisions: 2024-09-11 Accepted: 2024-09-25 Published: 2024-09-25  
©2024 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

©2024 by the authors. Majalah Geografi Indonesia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

**Abstrak.** Penelitian ini bertujuan untuk memahami karakteristik elevasi muka air laut di Selat Madura dengan memanfaatkan data altimetri dan divalidasi menggunakan data *tide gauges*. Data pengukuran diambil pada bulan Agustus 2022. Metode analisa menggunakan statistik dan FFT untuk memperoleh nilai komponen pasang surut dan elevasi air laut rata-rata. Hasil penelitian menunjukkan variasi nilai SSH di wilayah perairan Indonesia berkisar 0.4 - 0.8 m dan  $\pm 0.6$  m di Selat Madura, sedangkan hasil analisa *tide gauge* menunjukkan 1.2 - 1.4 m. Ada perbedaan signifikan dan ditunjukkan oleh nilai RMSE pada stasiun Surabaya 0.81; Kalianget 0.98; dan Probolinggo 0.94. Data *tide gauges* diolah lebih lanjut menggunakan metode admiralty sehingga diperoleh 15 komponen harmonik pasang surut, terdiri atas komponen diurnal [ $M_1, K_1, O_1, P_1, Q_1, J_1, OO_1$ ], semidiurnal [ $M_2, S_2, K_2, N_2, L_2, 2N_2$ ], dan *shallow water* [ $M_4$  dan  $MS_4$ ], sehingga diketahui dominasi komponen diurnal ( $P_1$  dan  $K_1$ ) di stasiun pengukuran Surabaya dan Kalianget maupun komponen semidiurnal ( $N_2$  dan  $L_2$ ) di stasiun pengukuran Probolinggo. Hasil analisis FFT menunjukkan tipe pasang surut di Selat Madura tergolong tipe pasang surut campuran condong ganda/semidiurnal dengan nilai elevasi muka air laut tidak jauh berbeda pada tiga lokasi pengukuran. Nilai HHWL tertinggi di stasiun Probolinggo (3.3455 m), nilai LLWL terendah di stasiun Kalianget (0.5493 m). Nilai MSL masing-masing stasiun Surabaya, stasiun Kalianget, dan stasiun Probolinggo secara berturut-turut 1.4262 m; 1.2616 m; dan 1.8541 m. Perbedaan nilai MSL sesuai hasil analisa data altimetri dan tide gauge berkaitan dengan lokasi penelitian yang berada di wilayah pantai. Diharapkan bahwa penggunaan metode FFT dapat digunakan sebagai salah satu alternatif dalam mengetahui karakteristik pasang surut dari stasiun pengukuran yang tersebar di Selat Madura.

**Kata kunci:** Pasang Surut; FFT; Selat Madura

**Abstract** This study aims to understand the characteristics of sea level elevation in the Madura Strait by tide gauges and SSH data at three stations around the Madura Strait. Measurement was taken in August 2022. The analysis used statistics and FFT approach. The variation of SSH in Indonesian waters ranges from 0.4 - 0.8 m and  $\pm 0.6$  m in the Madura Strait, while the results of tide gauge analysis show 1.2 - 1.4 m. There is a significant difference and is shown by the RMSE value at Surabaya station 0.81; Kalianget 0.98; and Probolinggo 0.94. The tide gauge data were also further processed using the admiralty method to obtain 15 tidal harmonic components, consisting of diurnal component [ $M_1, K_1, O_1, P_1, Q_1, J_1, OO_1$ ], semidiurnal [ $M_2, S_2, K_2, N_2, L_2, 2N_2$ ], and shallow water [ $M_4$  and  $MS_4$ ], so that the dominance of diurnal components ( $P_1$  and  $K_1$ ) at Surabaya and Kalianget measurement stations and semidiurnal components ( $N_2$  and  $L_2$ ) at Probolinggo measurement station is known. Meanwhile, the results of the FFT analysis show that the tidal type in the Madura Strait is classified as a mixed double-semidiurnal tidal type with sea level elevation values not much different at the three measurement locations. The highest HHWL value at Probolinggo station (3.3455 m), the lowest LLWL value at Kalianget station (0.5493 m). The MSL values of Surabaya station, Kalianget station, and Probolinggo station are 1.4262 m; 1.2616 m; and 1.8541 m, respectively. The difference in MSL values between altimetry and tide gauge data is caused by the location which is a coastal area, where SSH altimetry data is loss data in the area. It is expected that the use of the FFT method can be used as an alternative in knowing the tidal characteristics of measurement stations spread in the Madura Straits.

**Keywords:** Tide; FFT; Madura Straits

### PENDAHULUAN

Selat Madura merupakan salah satu selat dengan aktivitas cukup padat, khususnya kegiatan transportasi laut, sehingga informasi akurat tentang fluktuasi muka air laut

menjadi penting (Manikin & Prabowo, 2021). Karakteristik pasang surut dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti letak geografis, morfologi pantai, maupun kedalaman perairan (batimetri) (Rahmadeni et al., 2017). Penggunaan data satelit

dalam memantau perubahan muka air laut telah berkembang dengan pesat. Salah satu contoh satelit yang dapat digunakan adalah satelit altimetri, salah satu instrumen untuk memantau dinamika tinggi muka air laut secara periodik (Khasanah & Yenni, 2017). Satelit altimetri juga dapat digunakan untuk mengukur perubahan ketinggian permukaan laut relatif terhadap referensi elipsoida bumi (Peacock & Laxon, 2004).

Metode analisis spasial dan temporal telah banyak diaplikasikan pada beragam bidang kajian, salah satunya dibidang kelautan (Wicaksono & Nuzula, 2021). Penggunaan analisa spasiotemporal memerlukan model statistik dalam intepretasi data, khususnya data penginderaan jauh dalam bidang kelautan, seperti ketinggian permukaan laut (*Sea Surface Height*, SSH). Oleh karena itu, model statistika dapat digunakan untuk melakukan estimasi SSH pada titik pengukuran satelit yang berdekatan dengan titik pengukuran pasang surut untuk mengetahui nilai perbedaan ketinggian muka air laut (Madsen et al., 2007). Model SSH akan memudahkan dalam mengidentifikasi, mengetahui karakteristik, arus eddy, maupun karakteristik laut lainnya, sebagai upaya memahami dinamika lautan (Archer, 2020). SSH merupakan salah satu indikator penting dalam iklim laut global meskipun belum banyak dilakukan pengukuran pasang surut dalam skala ruang dan waktu (Armitage et al., 2016). Adanya data SSH dari satelit altimetri memungkinkan perhitungan skala global SSH dengan kerapatan spektral pada bilangan gelombang yang kemiringannya dapat digunakan untuk mendiagnosa dinamika frekuensi permukaan laut (Savage et al., 2017; Richman et al., 2012; Sasaki & Klein, 2012; Xu & Fu, 2012; Traon et al., 2008; Stammer, 1997).

Pengolahan data pasang surut menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) didapatkan dengan cara menghitung nilai *Discrete Fourier Transform* (DFT). Metode FFT digunakan untuk menghitung elevasi muka air laut dan karakteristik pasang surut. Metode FFT memanfaatkan sinyal pasang surut dalam domain waktu (s) yang ditransformasikan menjadi sinyal pasang surut dalam domain frekuensi (Hz) (Sipasulta et al., 2014). DFT diperlukan untuk mengkonversi sinyal domain waktu diskrit menjadi domain frekuensi (Hanggarsari et al., 2012, Zuhaira et al., 2020). Transformasi Fourier banyak digunakan dalam berbagai bidang guna mengekstraksi informasi frekuensi tentang suatu proses yang tidak mudah diakses dalam domain waktu (Schweizer et al., 2021)"type":"article-journal","volume":"53"},"uris":["http://www.mendeley.com/documents/?uuiid=fad81559-2106-4dc9-b1c5-8bdc4822dbdd","http://www.mendeley.com/documents/?uuiid=ca502181-24f0-4034-9fb8-c14d56dfc53f"]}],mendeley":{"formattedCitation":"(Schweizer et al., 2021). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk memahami karakteristik elevasi muka air laut di Selat Madura menggunakan data altimetri dan yang kemudian dilakukan validasi menggunakan data *tide gauges* menggunakan pendekatan FFT, sehingga dapat meningkatkan kualitas informasi yang berguna bagi beragam aktifitas kelautan, khususnya keselamatan pelayaran dan transportasi di perairan Selat Madura.

## METODE PENELITIAN

SSH merupakan salah satu produk satelit altimetri yang disediakan oleh *Copernicus Marine and Environment Monitoring Service* (Nagura & Mcphaden 2021; CMEMS; Ducet et al., 2000) dan dapat diunduh melalui laman <https://data.marine.copernicus.eu/products>. Resolusi spasial data SSH

0.083° x 0.083°, sehingga cukup representatif untuk wilayah Indonesia dengan resolusi temporal harian selama 1 bulan (Agustus 2022). Data SSH sesuai dengan lokasi penelitian di analisis lebih lanjut untuk mendapatkan model hasil elevasi permukaan laut yang kemudian di interpretasi.

Pengukuran pasang surut secara *real-time* dilakukan menggunakan instrument *Tide gauges* (TG), dengan panjang data selama 1 bulan (tepatnya mulai 1 Agustus 2022 pukul 00:00 WIB hingga 31 Agustus 2022 pukul 23:59 WIB) dengan interval waktu perekaman setiap menit. Data pasang surut diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG) melalui laman <https://srgi.big.go.id> dan digunakan untuk validasi dengan stasiun pengukuran di Selat Madura, yaitu Surabaya, Kalianget, dan Probolinggo (**Gambar 1**).

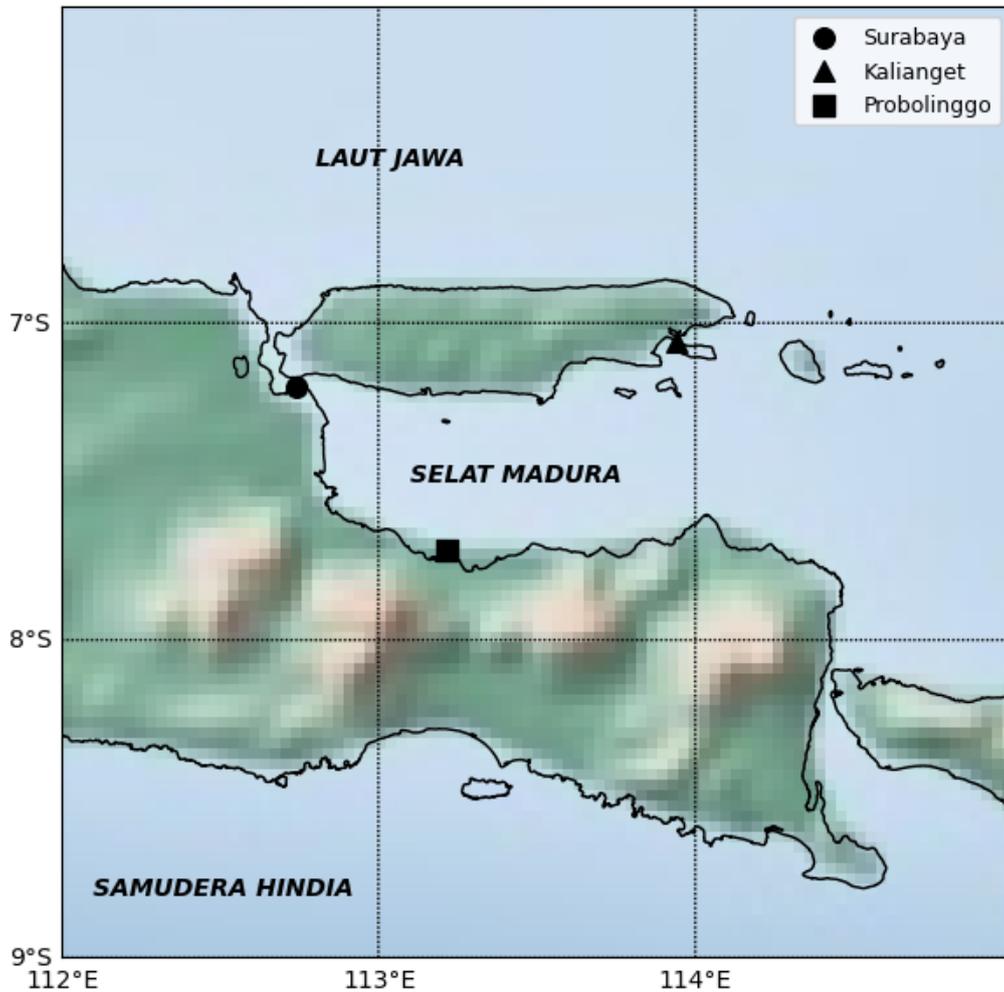
Stasiun pengukuran di Surabaya berada di PT PAL Indonesia, dengan koordinat -7.20006°LS dan 112.7406°BT. Stasiun pengukuran di Kalianget terletak di DITJEN HUBDAT - UPT Pelabuhan Kalianget, dengan koordinat -7.05756°LS dan 113.943°BT. Stasiun pengukuran di Probolinggo terletak di Pelabuhan Probolinggo, dengan koordinat -7.71494°LS dan 113.21569°BT.

Pengolahan data altimetri untuk memperoleh profil SSH dengan lokasi lebih luas (Indonesia) bertujuan untuk mendapatkan informasi berkaitan kondisi mengenai pola SSH di perairan Indonesia. Kemudian, profil SSH difokuskan pada lokasi penelitian untuk kemudian dilakukan validasi menggunakan data TG.

Data pasang surut yang diperoleh dari TG diolah menggunakan metode Admiralty dengan rentang waktu (piantan) 29 hari dan metode FFT (Ichsari et al., 2020). Metode FFT memungkinkan untuk mengubah sistem berupa fungsi yang lebih kompleks menjadi penjumlahan dari sistem yang lebih sederhana, sehingga pengolahan data pasang surut menjadi penjumlahan fungsi sinusoidal (Ichsari et al., 2020). Pengolahan elevasi pasang surut menggunakan metode FFT menekankan pada transformasi data dalam bentuk periode (waktu) menjadi frekuensi (Zuhaira et al., 2020) pada data TG di perairan Selat Madura.

Data TG dinyatakan sebagai gelombang sederhana dengan frekuensi dan amplitudo (A) tertentu. Sinyal frekuensi pasang surut yang dihasilkan pada ketiga stasiun pengukuran memiliki beberapa puncak sinyal. Frekuensi yang dihasilkan dipengaruhi oleh panjang data yang digunakan. Metode pengolahan FFT menghasilkan nilai amplitudo (A) dan fase (g) komponen harmonik pasang surut yang dipengaruhi oleh reaksi pasang surut setimbang terhadap kondisi laut setempat. Nilai amplitudo yang didapatkan dari metode FFT kemudian digunakan dalam perhitungan untuk mengetahui nilai Formzhal dan dapat diketahui untuk tipe pasang surut (Yuwono et al., 2016; Ichasari et al., 2020). Pada penelitian ini metode FFT menggunakan modul *scipy* yang dijalankan menggunakan bahasa pemrograman python.

Hasil pengolahan data TG dipilih untuk tiga lokasi dan hanya diambil yang bersesuaian dengan ketersediaan data altimetri serta melakukan validasi data elevasi pasang surut menggunakan nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) pada persamaan (1) (Chai and Draxler, 2014), dan menghitung koefisien korelasi menggunakan persamaan (2) (Mendenhall et al. 2012), berdasarkan **Tabel 1**. Akurasi pada hasil pengolahan dari data lapang dapat diketahui dengan mendapatkan nilai persentase. Semakin kecil nilai persentase maka perbandingan dengan hasil pengolahan akan semakin akurat.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Tabel 1. Rentang Koefisien Korelasi

Interval	Tingkat Hubungan
$0.80 \leq xy \leq 1.00$	Sangat Kuat
$0.60 \leq xy \leq 0.80$	Kuat
$0.40 \leq xy < 0.60$	Cukup Kuat
$0.20 \leq xy < 0.40$	Lemah
$< 0.20$	Sangat Lemah

Sumber: (Richasari & Handoko, 2020; Evans, 1996)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \tag{1}$$

Dimana  $n$  merupakan jumlah data yang diprediksi,  $i$  adalah urutan data, dan  $e$  adalah galat antara nilai aktual dan prediksi.

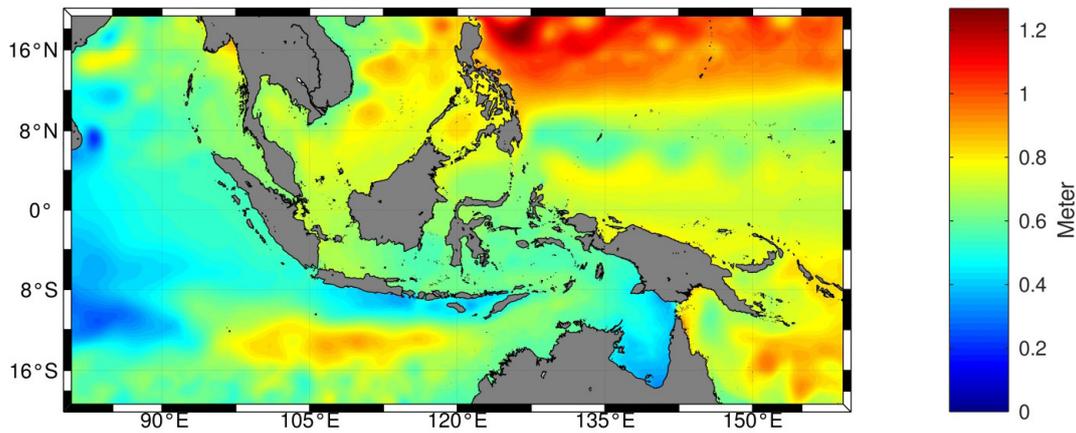
$$R = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \tag{2}$$

Dengan  $S_{xy}$  adalah kovarian antara nilai aktual dan prediksi,  $S_x$  merupakan standar deviasi nilai aktual, dan  $S_y$  adalah standar deviasi nilai prediksi.

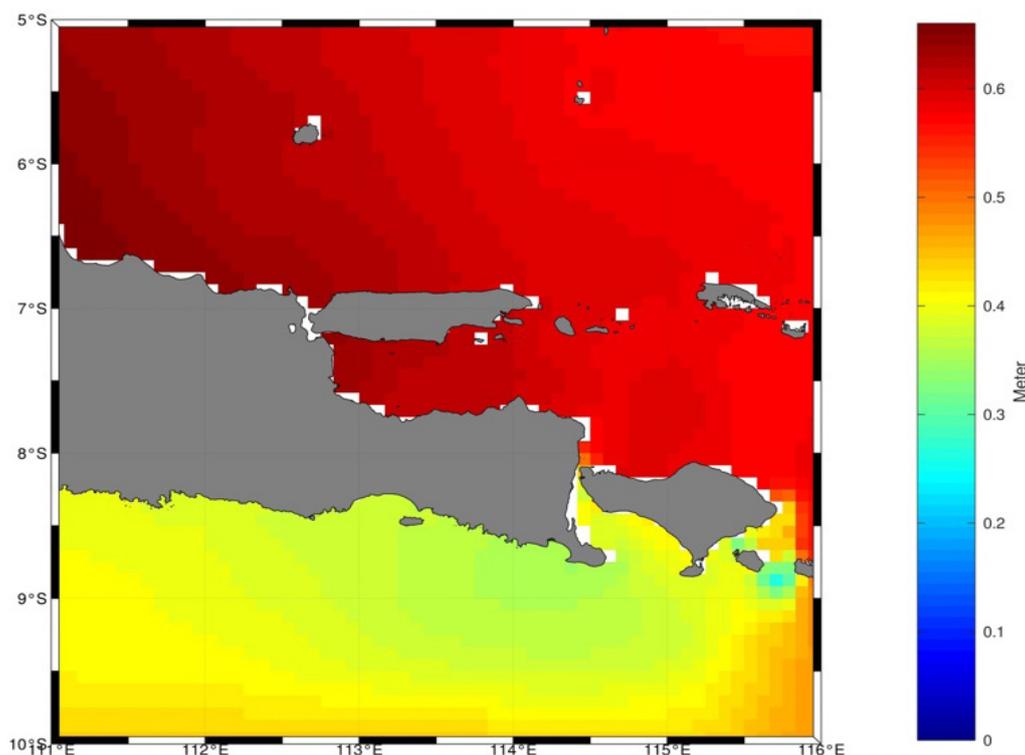
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengolahan data altimetri di wilayah perairan Indonesia (Gambar 2) menunjukkan kisaran elevasi memiliki rentang nilai 0.3 – 0.8 m. Jika dibandingkan dengan kisaran nilai SSH bulan Agustus 2017 menggunakan data *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM) sebesar 0.1 - 0.9 m, maka nilai SSH selama tahun 2017 berkisar 0.19 - 1.06 m (Purba et al., 2020) maupun hasil pengolahan (Gambar 2) masih dalam kategori normal.

Hasil pengolahan data SSH di Selat Madura memiliki nilai  $\pm 0.6$  m dan relatif homogen dengan perbedaan sangat kecil (Gambar 3) karena Selat Madura merupakan perairan semitertutup (Siswanto & Nugraha, 2014). Perairan Selat Madura pada sisi barat dengan lintang 113.8°BT sampai 112.5°BT dan bujur -6.8°LS sampai -8°LS cenderung memiliki nilai SSH lebih tinggi dibandingkan perairan pada sisi timur.



Gambar 2. Model SSH di perairan Indonesia



Gambar 3. Model SSH di perairan Selat Madura

Bagian perairan Selat Madura yang berwarna putih pada model SSH (**Gambar 3**) merupakan salah satu kekurangan data altimetri yang berupa nilai bias pada wilayah perairan disekitar pantai. Sehingga menandakan bahwa hasil pengolahan untuk SSH perlu ditingkatkan, karena hasil yang sekarang belum menjangkau area pesisir dan pantai. Hal ini senada dengan penelitian Team (2020) yang mengemukakan validitas data altimetri permukaan laut akan berkurang dalam jarak 10 sampai 15 km dari pantai, sehingga data SSH hasil satelit altimetri tidak dapat diandalkan pada pengukuran 25 - 50 km ke wilayah pantai (Saraceno et al., 2008).

Selat Madura terhubung dengan Laut dan Selat Bali maupun Laut Jawa, sehingga karakteristik fisik maupun biologi juga akan mempunyai kemiripan (Hasyim, 2014). Perairan utara Jawa memiliki nilai SSH lebih tinggi dibandingkan perairan selatan Jawa diduga berkaitan dengan pola angin (dari arah barat Pasifik) yang berpengaruh terhadap massa air (di wilayah Pasifik Barat) selama bulan Juni-Desember. Meskipun mempunyai kisaran nilai SSH relatif homogen untuk hampir sebagian besar wilayahnya, namun masih

dikategorikan normal jika dibandingkan dengan nilai SSH di wilayah perairan Indonesia (Purba et al., 2020).

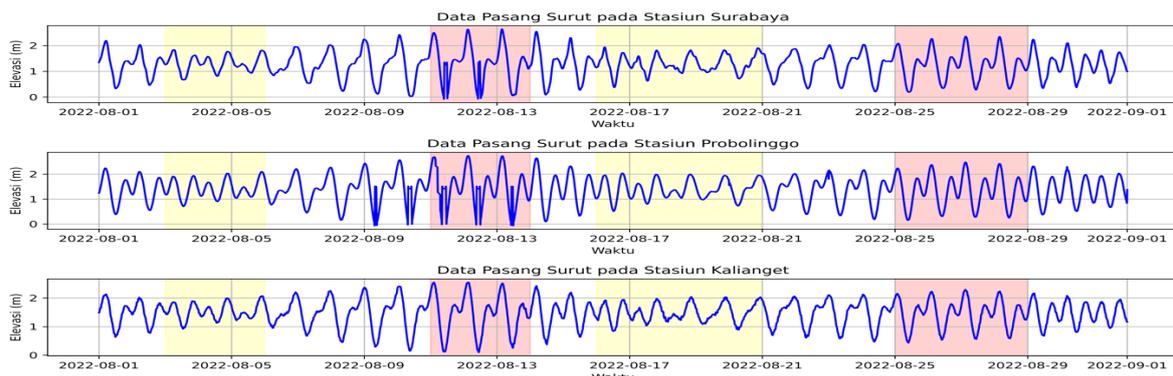
Kelemahan data SSH hasil satelit altimetri pada daerah pantai disebabkan oleh 1) kesulitan intrinsik akan mempengaruhi koreksi pada data altimetri dekat pantai, seperti komponen troposfer basah, sinyal oseanografi frekuensi tinggi, koreksi pasang surut, dan lain-lain; 2) interpolasi sepanjang jalur data yang digunakan hanya dilakukan oleh satu atau dua satelit, akan memberikan resolusi marginal struktur skala meso dan skala kecil dalam sirkulasi laut (Chelton & Schlax, 2003; Le Traon & Dibarboure, 2002; Leeuwenburgh & Stammer, 2002) yang dominan di wilayah pesisir (Saraceno et al., 2008). Kelemahan model SSH dapat mengurangi kualitas informasi bagi beragam kegiatan pesisir dan laut, khususnya aktivitas transportasi laut (Manikin & Prabowo, 2021).

Hasil pengolahan data pasang surut menunjukkan tipe campuran condong ke harian ganda dengan karakteristik dua kali pasang dan dua kali surut dengan ketinggian dan periode yang berbeda pada tiga lokasi penelitian (**Gambar 4**) (Ardiansyah et al., 2017; Saputra et al., 2017; Siswanto &

Nugraha, 2014) dengan fluktuasi ketinggian muka air laut yang hampir sama dan dengan perbedaan nilai kecil. Fluktuasi pasang surut tertinggi terjadi pada pertengahan bulan, dilanjutkan dengan fluktuasi pasang surut terendah yang juga terjadi setelah pertengahan bulan dan menuju akhir bulan. Hal tersebut terjadi karena adanya pasang purnama (*spring tide*/ latar belakang merah pada **Gambar 4**) dan pasang perbani (*neap tide*/ latar belakang kuning pada **Gambar 4**) yang biasa terjadi pada awal dan pertengahan bulan, serta terjadi ketika pasang tinggi dengan nilai yang sangat tinggi dan pasang rendah dengan nilai yang sangat rendah, dikarenakan pada saat fenomena tersebut posisi bumi, bulan, dan matahari berada dalam suatu garis lurus. Sementara pasang perbani biasanya terjadi pada 1/2 dan 3/4 bulan, serta terjadi ketika

pasang tinggi dengan nilai yang rendah dan pasang rendah dengan nilai yang tinggi (Musrifin, 2011).

Perbandingan nilai elevasi pasang surut menggunakan data altimetri dan pengukuran TG pada tiga lokasi stasiun pengukuran di Selat Madura (**Gambar 5**) menunjukkan perbedaan signifikan. Elevasi pasang surut menggunakan data altimetri bernilai konstan sekitar 0.6 m, sepanjang waktu pengukuran insitu menggunakan TG. Perbedaan nilai yang sangat jauh pada data altimetri kemungkinan dapat disebabkan karena pada stasiun pengukuran merupakan wilayah pantai sehingga nilai yang dihasilkan tidak cukup bagus atau dapat dikatakan bias (Team, 2020). Sebaliknya, elevasi pasang surut hasil pengukuran TG menunjukkan nilai lebih logis. Penelitian Kusmanto et al., (2016) menunjukkan fluktuasi yang sama

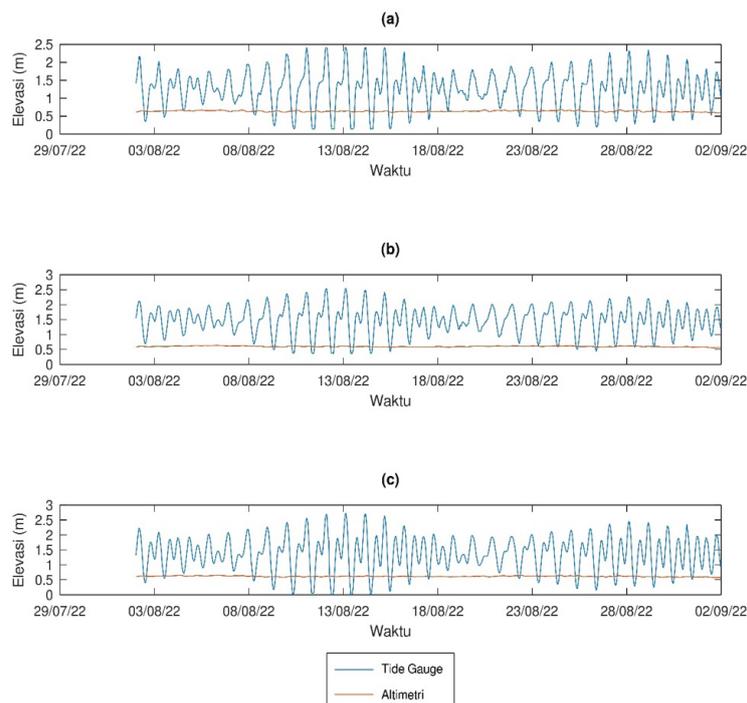


**Gambar 4.** Grafik pasang surut pada tiga stasiun [Surabaya, Probolinggo, Kalianget] pengukuran di Selat Madura

**Tabel 2.** Nilai RMSE dan Korelasi di stasiun Surabaya

Stasiun Pengukuran	Parameter		Keterangan
	RMSE	Korelasi	
Surabaya	0.81	0.12	Kurang akurat; korelasi sangat lemah
Kalianget	0.98	0.10	
Probolinggo	0.94	0.03	

Sumber: Hasil Pengukuran, 2023



**Gambar 5.** Perbandingan grafik elevasi pasang surut pada tiga stasiun [(a) Surabaya, (b) Kalianget, (c) Probolinggo] pengukuran di Selat Madura.

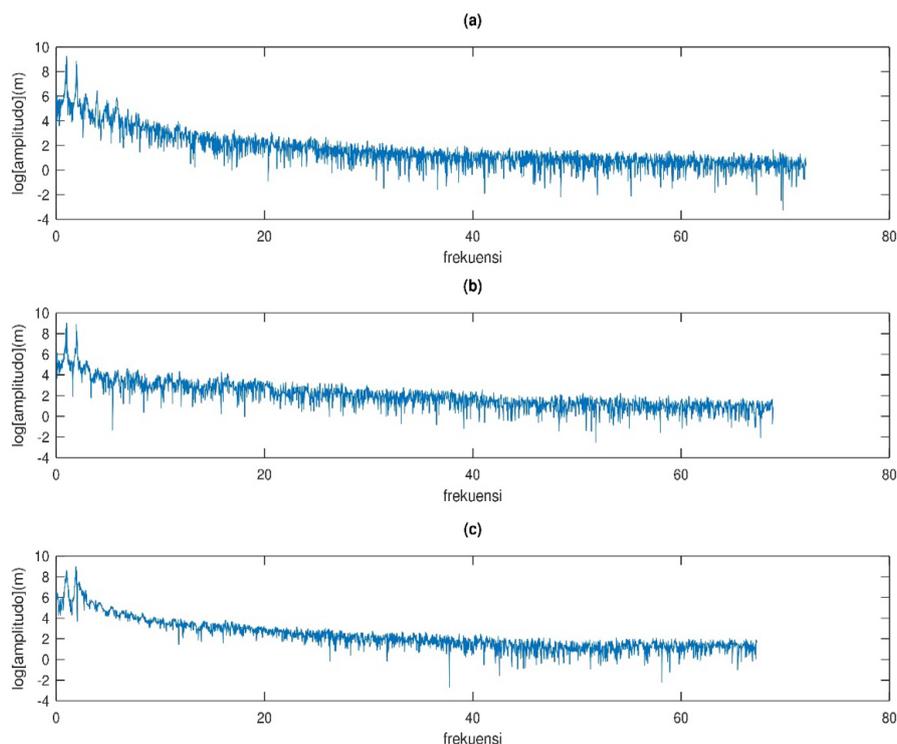
pada tiga lokasi penelitian di Selat Madura, khususnya stasiun Surabaya dan Probolinggo; serta stasiun Kalianget (Prayogo, 2021). Validasi data elevasi pasang surut menggunakan nilai korelasi dan RMSE (**Tabel 2**) menunjukkan korelasi sangat lemah dengan tingkat akurasi yang kurang.

Nilai korelasi ( $R^2$ , **Tabel 2**) tiga lokasi stasiun tergolong sangat kecil (Richasari & Handoko, 2020; Evans, 1996) menunjukkan hubungan data altimetri dan data *in situ* (hasil pengukuran TG) sangat rendah. Perbedaan elevasi pasang surut yang sangat signifikan menggunakan data altimetri dan pengukuran *in situ* dengan TG (**Gambar 5**) direpresentasikan oleh nilai RMSE (**Tabel 2**). Nilai RMSE tiga stasiun penelitian menunjukkan nilai yang besar (nilai terbaik bila mendekati nol (0)) (Chaidir & Tuharea, 2022), sehingga menggambarkan *error* atau selisih antara data altimetri dengan data *in situ* (hasil pengukuran TG) yang juga besar maupun sebaliknya. Penelitian serupa dan dilakukan di perairan berbeda menunjukkan nilai RMSE sebesar 0.8441 (Cilacap) dan 0.90803 (Prigi) (Rachman et al., 2019). Besarnya nilai RMSE dikarenakan data altimetri kurang bagus untuk wilayah pantai, sehingga selisih yang dihasilkan akan cukup besar. Oleh karena itu, nilai korelasi yang rendah dan RMSE yang cukup tinggi, dapat disebabkan oleh lokasi penelitian yang merupakan wilayah pantai sehingga data altimetri memberikan nilai yang tidak cukup valid (Team, 2020; Saraceno et al., 2008). Berdasarkan hasil perhitungan nilai korelasi dan RMSE (**Tabel 2**) diketahui hasil model altimetri belum mampu memberikan prediksi nilai pasang surut secara akurat pada wilayah pantai, yang dibuktikan dengan perbedaan signifikan elevasi pasang surut menggunakan data altimetri dibandingkan dengan data TG.

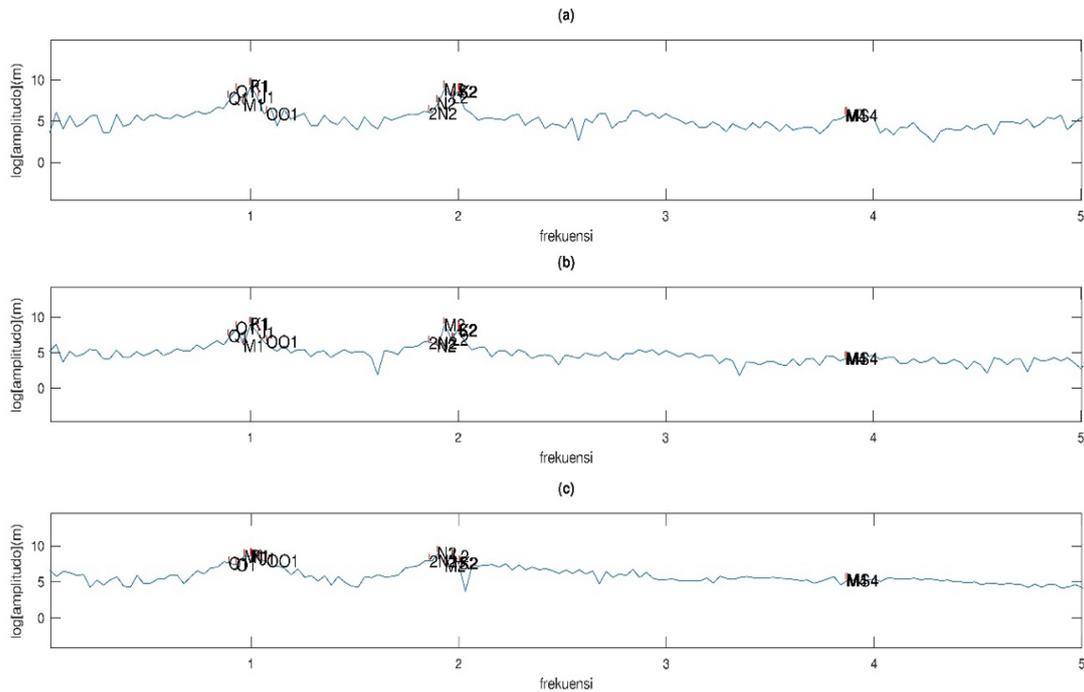
Untuk mengatasi kelemahan tersebut, Saraceno et al., (2008) melakukan interpolasi pada kumpulan data *in situ* (hasil pengukuran TG) di sepanjang pantai dengan kumpulan data SSH grid yang dihasilkan oleh AVISO di wilayah lepas pantai, sehingga dapat meningkatkan akurasi data SSH dalam jarak 40 sampai 50 km dari wilayah pantai.

Nilai elevasi pasang surut menggunakan metode FFT (Zuhaira et al., 2020) pada data *tide gauges* di perairan Selat Madura berupa sinyal frekuensi (**Gambar 6**). Signifikansi nilai puncak frekuensi berkorelasi linear dengan representasi dominasi komponen harmonik terhadap karakteristik pasang surut. Puncak frekuensi yang dominan berpengaruh terhadap kontribusi pasang surut (Zuhaira et al., 2020). Grafik periodogram merupakan visualisasi nilai yang merepresentasikan komponen harmonik pasang surut menggunakan metode FFT pada lokasi penelitian (**Gambar 7**) dan memperlihatkan bahwa frekuensi setiap komponen harmonik menunjukkan seluruh distribusi data yang mempengaruhi pembentukan pasang surut pada ketiga stasiun pengukuran (Ichsari et al., 2020). Ada 15 komponen harmonik pasang surut yang diidentifikasi dan dibedakan menjadi komponen diurnal, semidiurnal, dan *shallow water*, meliputi: M2, K1, S2, O1, P1, K2, M1, N2, Q1, L2, 2N2, J1, OO1, M4, dan MS4. Secara umum, dominansi komponen harmonik pada perairan Surabaya dan Kalianget adalah komponen diurnal (P1 dan K1), sedangkan perairan Probolinggo di dominansi komponen semidiurnal (N2 dan L2). Hasil perhitungan bilangan Formzahl menggunakan metode FFT (**Tabel 3**) juga menunjukkan tipe yang sama dengan hasil klasifikasi tipe pasang surut pada grafik periodogram komponen harmonik (**Gambar 7**).

Selat Madura merupakan perairan dangkal dan semiterutup, hanya terbuka pada sisi barat laut dan berhubungan langsung dengan beberapa perairan, seperti Selat Bali, Laut Bali, dan Laut Jawa pada bagian timur (Saputra et al., 2017; Sugianto, 2009), sementara pada sisi utara berhubungan dengan Pulau Madura, serta sisi barat dan selatan berhubungan dengan Pulau Jawa (Ardiansyah et al., 2017). Kondisi geografis tersebut dapat mempengaruhi tipe pasang surut di Selat Madura. Sesuai **Gambar 7** dan **Tabel 4**, maka dapat disimpulkan bahwa tipe pasang surut di Perairan Selat Madura adalah tipe campuran condong



**Gambar 6.** Sinyal frekuensi pasang surut pada tiga stasiun [(a) Surabaya, (b) Kalianget, (c) Probolinggo pengukuran di Selat Madura



**Gambar 7.** Komponen Harmonik pasang surut pada tiga stasiun [(a) Surabaya, (b) Kalianget, (c) Probolinggo] pengukuran di Selat Madura

**Tabel 3.** Hasil perhitungan bilangan Formzahl dan nilai HHWL, MSL, dan LLWL

Parameter	Stasiun		
	Surabaya	Kalianget	Probolinggo
Komponen Harmonik Pasang Surut			
K1	0.491	0.432	0.462
O1	0.3	0.278	0.298
M2	0.353	0.357	0.518
S2	0.197	0.143	0.212
Bilangan Formzahl	1.4394	1.4225	1.0413
HHWL (m)	2.7667	2.4712	3.3455
MSL (m)	1.4262	1.2616	1.8541
LLWL (m)	0.6045	0.5493	0.8037

Sumber: Hasil Pengukuran, 2023

harian ganda (*Mixed Tide, Prevailing Semi Diurnal*). Tipe pasang surut ini memiliki dua kali pasang dan dua kali surut dalam sehari, namun terkadang terjadi satu kali pasang dan satu kali surut pada waktu dan ketinggian yang berbeda. Tipe ini juga memiliki bentuk gelombang pasang pertama yang tidak sama dengan gelombang kedua (asimetris), yang berbentuk condong semi diurnal (Pasomba<sup>3</sup> et al., 2019). Elevasi muka air laut senantiasa berubah yang disebabkan oleh faktor astronomis (berkaitan dengan kedudukan bumi terhadap benda-benda langit), khususnya perubahan secara periodik yang terjadi pada bulan dan matahari. Kedudukan bumi, bulan, dan matahari menimbulkan gaya tarik menarik didalamnya dan mengakibatkan perubahan muka air laut (Hamuna et al., 2018).

Nilai elevasi muka air laut pada ketiga lokasi stasiun pengukuran di Selat Madura memiliki nilai yang tidak jauh berbeda (**Tabel 3**) dan berkaitan dengan kondisi lingkungan pada ketiga perairan yang hampir sama. Nilai HHWL (kedudukan muka air tertinggi pada saat pasang dalam satu siklus pasang surut) tertinggi di stasiun Probolinggo sebesar 3.3455 m. Nilai LLWL (kedudukan muka air terendah pada

saat surut dalam satu siklus pasang surut) terendah di stasiun Kalianget sebesar 0.5493 m. Sedangkan nilai MSL (ketinggian air rerata antara muka air tinggi rerata dan muka air rendah rerata) pada stasiun Surabaya, stasiun Kalianget, dan stasiun Probolinggo secara berturut-turut ialah sebesar 1.4262 m; 1.2616 m; dan 1.8541 m. Nilai MSL pada lokasi penelitian berbeda signifikan dengan nilai MSL hasil model SSH sebesar 0.6 m yang diperkuat dengan hasil analisa korelasi dan RMSE yang diperoleh sebagaimana beberapa penelitian serupa (Team, 2020; Saraceno et al., 2008).

**KESIMPULAN**

Hasil pengolahan data SSH di sekitar perairan Selat Madura didapatkan nilai elevasi ± 0.6 m. Elevasi dari nilai SSH tersebut belum dapat mencakup area Selat Madura bagian barat yang berbatasan dengan Kabupaten Gresik dan Kota Surabaya serta pantai. Pengolahan TG yang berada di daerah pantai didapatkan nilai MSL pada masing-masing lokasi yaitu Surabaya 1.4262 m; Probolinggo 1.8541 m; dan Kalianget 1.2616 m. Nilai RMSE terendah terdapat pada stasiun Surabaya sebesar 0,81; kemudian stasiun Probolinggo sebesar

0,94; dan stasiun Kalianget sebesar 0,98. Nilai RMSE dapat menggambarkan seberapa besar error atau selisih antara data altimetri dengan data *in situ* (hasil pengukuran *tide gauges*). Nilai RMSE dikatakan paling baik apabila nilai yang dihasilkan adalah 0 (nol), maka dari itu nilai RMSE yang dihasilkan pada masing-masing stasiun pengukuran di Selat Madura terbilang kurang akurat. Berdasarkan hasil perhitungan nilai korelasi dan RMSE tersebut menunjukkan bahwa data model altimetri belum mampu dalam memprediksi nilai pasang surut secara akurat, terlihat pada data altimetri yang memiliki perbedaan yang cukup jauh dengan data *tide gauges*. Nilai korelasi atau R<sup>2</sup> terbesar dari ketiga lokasi stasiun tersebut terdapat pada stasiun Surabaya 0,12; kemudian stasiun Kalianget sebesar 0,10, dan stasiun Probolinggo sebesar 0,03. Ketiganya memiliki nilai korelasi yang tergolong sangat rendah, hal ini menunjukkan bahwa adanya korelasi antara data altimetri dengan data *in situ* (hasil pengukuran *tide gauges*) namun data tersebut tidak dapat dipercaya. Komponen harmonik yang mendominasi pada stasiun Surabaya dan Kalianget tergolong sama yaitu komponen diurnal (P1 dan K1), berbeda dengan stasiun Probolinggo yang memiliki dominansi komponen harmonik semidiurnal (N2 dan L2). Tipe pasang surut di Selat Madura termasuk dalam tipe pasang surut campuran condong ganda/semidiurnal (*Mixed Tide Prevailing Semidiurnal*). Nilai elevasi muka air laut pada ketiga lokasi stasiun pengukuran di Selat Madura memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Nilai HHWL atau kedudukan muka air tertinggi terjadi di stasiun Probolinggo yakni sebesar 3.3455 m. Begitupun dengan nilai LLWL atau kedudukan muka air terendah terjadi di stasiun Kalianget sebesar 0.5493 m. Dengan model dan validasi yang telah dilakukan maka perlu untuk meningkatkan akurasi data SSH di wilayah pantai maupun selat dengan berbagai model dan validasi data *in situ*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh DIPA Universitas Trunojoyo Madura melalui LPPM dengan skema Penelitian Pemula dengan nomor SK 391/UN46.4.1/PT.01.03/2022.

#### KONTRIBUSI PENULIS

**Penulis Pertama** coding program, melakukan analisis data dan interpretasi hasil, dan membuat naskah publikasi; **Penulis Kedua** mendisain metode penelitian, melakukan analisis data dan interpretasi hasil, membuat naskah publikasi, review naskah publikasi; **Penulis Ketiga** review naskah publikasi dan **Penulis Keempat** review naskah publikasi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Archer, M. R. (2020). Increasing the Space – Time Resolution of Mapped Sea Surface Height From Altimetry *Journal of Geophysical Research : Oceans*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 1–18. <https://doi.org/10.1029/2019JC015878>
- Ardiansyah, Y., Syah, A. F., & Hidayah, Z. (2017). Pemodelan Genangan Kenaikan Muka Air Laut (Sea Level Rise) Menggunakan Data Penginderaan Jauh Dan Sistem Informasi. *Prosiding Seminar Nasional Kelautan Dan Perikanan, III*, 203–214.
- Armitage, T. W., Bacon, S., Ridout, A. L., Thomas, S. F., Aksenov, Y., & Wingham, D. J. (2016). Arctic sea surface height variability and change from satellite radar altimetry and GRACE, 2003–2014. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 4303–4322. <https://doi.org/10.1002/2015JC011579>.
- Chaidir, F. A., & Tuharea, N. D. (2022). *Analisa Perbandingan Data Pasang Surut Dengan Metode Koefisien Korelasi Dan Rmse*

*Antara Data Ioc Sea Level Monitoring Dan Data Program NAOITIDE. SENSISTEK: Riset Sains dan Teknologi Kelautan.*

- Chelton, D. B., & Schlax, M. G. (2003). *The accuracies of smoothed sea surface height fields constructed from tandem satellite altimeter datasets*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(9), 1276–1302.
- Ducet, N., Le Traon, P. Y., & Reverdin, G. (2000). *Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and-2*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C8), 19477–19498.
- Evans, J. D. (1996). *Straightforward Statistics For The Behavioral Sciences*. Pacific Grove : Brooks/Cole Pub. F
- Hamuna, B., Tanjung, R. H. R., Kalor, J. D., Dimara, L., Indrayani, E., Kelautan, I., & Cenderawasih, F. U. (2018). Studi karakteristik pasang surut perairan laut mimika, provinsi papua. *Jurnal Acropora Ilmu Kelautan Dan Perikanan Papua*, 1(1), 19–28.
- Hanggarsari, P. N., Fitriawan, H., & Yuniati, Y. (2012). Simulasi Sistem Pengacakan Sinyal Suara Secara Realtime Berbasis Fast Fourier Transform ( FFT ). *Jurnal Rekayasa Dan Teknologi Elektro*, 6(3), 192–198.
- Hasyim, B. (2014). Madura Waktu Terjadi El Nino Berdasarkan Data. *Seminar Nasional Penginderaan Jauh*, 769–781.
- Ichsari, L. F., Handoyo, G., Setiyono, H., Ismanto, A., Marwoto, J., & Yusuf, M. (2020). Studi Komparasi Hasil Pengolahan Pasang Surut Dengan 3 Metode ( Admiralty , Least Square dan Fast Fourier Transform ) di Pelabuhan Malahayati, Banda Aceh. *Indonesian Journal of Oceanography*, 02, 3–6.
- Khasanah, I. U., & Yenni, J. N. (2017). Kenaikan Muka Air Laut Perairan Sumatera Barat Berdasarkan Data Satelit Altimetri Jason-2. *Geomatika*, 23, 1–8.
- Kusmanto, E., Hasanudin, M., & Setyawan, W. B. (2016). Amplifikasi pasang surut dan dampaknya terhadap Perairan Probolinggo. *OLDI (Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia)*, 1(3), 69. <https://doi.org/10.14203/oldi.2016.v1i3.72>
- Le Traon, P. Y., & Dibarboure, G. (2002). Velocity mapping capabilities of present and future altimeter missions: The role of high-frequency signals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(12), 2077–2088. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<2077:vmcopa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<2077:vmcopa>2.0.co;2)
- Leeuwenburgh, O., & Stammer, D. (2002). Uncertainties in altimetry-based velocity estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(10). <https://doi.org/10.1029/2001jc000937>
- Madsen, K. S., Høyer, J. L., & Tscherning, C. C. (2007). Near-coastal satellite altimetry : Sea surface height variability in the North Sea – Baltic Sea area. *Geophysical Research Letters*, 34, 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL029965>
- Manikin, P. M. G., & Prabowo, I. A. (2021). Identifikasi Fluktuasi Muka Air Laut dengan Menggunakan Pendekatan Penginderaan Jauh Daerah Tegal, Jawa Tengah. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi XIII Tahun 2020 (ReTII)*, 2020(November), 451–457. <http://journal.itny.ac.id/online/index.php/ReTII>
- Manikin, P. M., & Prabowo, I. A. (2021). Identifikasi Fluktuasi Muka Air Laut dengan Menggunakan. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi XIII TAHUN 2020 (ReTII)*, 2020(November), 451–457.
- Musrifin. (2011). Analisis Pasang Surut Perairan Muara Sungai Mesjid Dumai. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan*, 1(April), 48–55.
- Nagura, M., & McPhaden, M. J. (2021). *Interannual variability in sea surface height at southern midlatitudes of the Indian Ocean*. *Journal of Physical Oceanography*, 51(5), 1595–1609.
- Pasomba, T., Jasin, M. I., & Jansen, T. (2019). Analisis pasang surut pada daerah pantai tobololo kelurahan tobololo kota ternate provinsi maluku utara. *Jurnal Sipil Statik*, 7(11), 1515–1526.
- Peacock, N. R., & Laxon, S. W. (2004). Sea surface height determination in the Arctic Ocean from ERS altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 109, 1–14. <https://doi.org/10.1029/2001JC001026>

- Prayogo, L. M. (2021). Analisis Kenaikan Muka Air Laut Di Perairan Kalianget Kabupaten Sumenep Tahun 2000-2020. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan*, 2(1), 61–68. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v2i1.10035>
- Purba, N. P., Faizal, I., Damanik, F. S., Rachim, F. R., & Mulyani, P. G. (2020). Overview of Oceanic Eddies in Indonesia Seas Based on the Sea Surface Temperature and Sea Surface Height. *World Scientific News*, 147(July), 166–178.
- Rachman, H. A., Gaol, J. L., & Syamsudin, F. (2019). Variasi Data Suhu Permukaan Laut, Tinggi Paras Laut, Klorofil-a, dan Upwelling di Perairan Selatan Jawa serta Korelasinya Dengan Data Lapangan. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 5(2), 289. <https://doi.org/10.24843/jmas.2019.v05.i02.p17>
- Rahmadeni, H. A., Setiyono, H., & Widada, S. (2017). Studi Karakteristik Pasang Surut Di Perairan Pulau Biawak Kabupaten Indramayu, Jawa Barat. *Jurnal Oseanografi*, 6, 666–671.
- Richasari, D. S., & Handoko, E. Y. (2020). Analisis Pemodelan Arus Geostropik di Perairan Indonesia menggunakan Data Satelit Altimetri. *Geoid*, 16(1), 93. <https://doi.org/10.12962/j24423998.v16i1.8564>
- Richman, J. G., Arbic, B. K., Shriver, J. F., Metzger, E. J., & Wallcraft, A. J. (2012). Inferring dynamics from the wavenumber spectra of an eddying global ocean model with embedded tides. *Journal Of Geophysical Research*, 117, 1–11. <https://doi.org/10.1029/2012JC008364>
- Saputra, V. H., Rifai, A., & Kunarso. (2017). Variabilitas musiman pola arus di perairan surabaya jawa timur. *Journal of Oceanography*, 6, 439–448. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/20203>
- Saraceno, M., Strub, P. T., & Kosro, P. M. (2008). Estimates of sea surface height and near-surface alongshore coastal currents from combinations of altimeters and tide gauges. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(11), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2008JC004756>
- Sasaki, H., & Klein, P. (2012). SSH Wavenumber Spectra in the North Pacific from a High-Resolution Realistic Simulation. *Journal Of Physical Oceanography*, 42(2005), 1233–1241. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-0180.1>
- Savage, A. C., Arbic, B. K., Alford, M. H., Ansong, J. K., Farrar, J. T., Menemenlis, D., Rourke, A. K. O., Richman, J. G., Shriver, J. F., Voet, G., Wallcraft, A. J., & Zamudio, L. (2017). Spectral decomposition of internal gravity wave sea surface height in global models. *Journal of Gephysical Research: Oceans*, 122, 7803–7821. <https://doi.org/10.1002/2017JC013009>
- Schweizer, D., Ried, V., Rau, G. C., Tuck, J. E., & Stoica, P. (2021). Comparing Methods and Defining Practical Requirements for Extracting Harmonic Tidal Components from Groundwater Level Measurements. *Mathematical Geosciences*, 53(6), 1147–1169. <https://doi.org/10.1007/s11004-020-09915-9>
- Sipasulta, R. Y., St, A. S. M. L., & Sompie, S. R. U. A. (2014). Simulasi Sistem Pengacak Sinyal Dengan Metode FFT ( Fast Fourier Transform ). *E-Journal Teknik Elektro Dan Komputer*, 1–9.
- Siswanto, A. D., & Nugraha, W. A. (2014). Studi Parameter Oseanografi Di Perairan Selat Madura Kabupaten Bangkalan. *Jurnal Kelautan*, 7(1), 45–49.
- Stammer, D. (1997). Global Characteristics of Ocean Variability Estimated from Regional TOPEX / POSEIDON Altimeter Measurements. *Journal Of Physical Oceanography*, 27, 1743–1769.
- Sugianto, D. N. (2009). *Kajian Kondisi Hidrodinamika ( Pasang Surut , Arus , Dan Gelombang ) Di Perairan Grati Pasuruan , Jawa Timur*. 14(2), 66–75.
- Team, T. C. C. I. C. S. L. (2020). Coastal sea level anomalies and associated trends from Jason satellite altimetry over 2002-2018. *Scientific Data*, 7(1), 357. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00694-w>
- Traon, P. Y. Le, Klein, P., & Hua, B. L. (2008). Do Altimeter Wavenumber Spectra Agree with the Interior or Surface Quasigeostrophic Theory? *JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY*, 38(2001), 1137–1142. <https://doi.org/10.1175/2007JPO3806.1>
- Wicaksono, A., & Nuzula, N. I. (2021). Model Sla Dan Adt Di Perairan Indonesia Selama Badai Siklon Surigae. *Jurnal Inovasi Sains Dan Teknologi Kelautan*, 2(2), 40–44.
- Xu, Y., & Fu, L.-L. (2012). The Effects of Altimeter Instrument Noise on the Estimation of the Wavenumber Spectrum of Sea Surface Height. *JOURNAL OF PHYSICAL OCEANOGRAPHY*, 42, 2229–2233. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-0106.1>
- Yuwono, Kurniawan, D., & Faisal, N. (2016). Analisis Komponen Harmonik Pengamatan Pasang Surut Menggunakan Alat Pengamat Pasang Surut Berbasis Sensor Ultrasonik (Studi Kasus : Desa Ujung Alang , Kampung Laut , Cilacap). *GEOID*, 12, 48–51.
- Zuhaira, H., Handoyo, G., Anugroho, A., Suryo, D., & Yulina, S. (2020). Kajian Perbandingan Analisis Pasang Surut dengan Menggunakan Metode Least Square dan Fourier di Perairan Barat Sumatera. *Indonesian Journal of Oceanography*, 02.