Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764 DOI : 10.14710/jmr.v15i4.60467
EISSN: 2407-7690
https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jmr

Kenaikan Muka Laut Regional di Perairan Selatan Jawa dan Bali Berdasarkan Data Satelit Altimetri

Maya Eria Sinurat[1]*, Amir Yarkhasy Yuliardi[1], Bayu Munandar[2,3]
[1]Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Dr. Soeparno, Komplek GOR Soesilo Soedarman, Purwokerto Utara,Banyumas, Jawa Tengah 53122 Indonesia.
[2]Program Studi Teknologi dan Bisnis Perikanan dan Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Undip, Desa Teluk Awur, Kecamatan Tahunan, Kabupaten Jepara, Jawa Tengah 59427 Indonesia
[3]Atmosphere-Ocean Interaction Laboratory, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia.
Corresponding author, e-mail: maya.eria@unsoed.ac.id

ABSTRAK: Kenaikan muka laut di perairan selatan Jawa dan Bali memiliki karakteristik regional yang dipengaruhi oleh dinamika oseanografi dan variabilitas iklim Samudra Hindia. Penelitian ini bertujuan menganalisis tren kenaikan muka laut regional di Perairan Selatan Jawa dan Bali dari satelit altimeter, membandingkannya terhadap data stasiun pasang surut, serta menganalisis keterkaitannya dengan dinamika monsun, ENSO, dan IOD. Data altimetri multisatelit gridded digunakan untuk menganalisis tren kenaikan muka laut dan dibandingkan dengan data stasiun pasang surut di Cilacap, Sadeng, Prigi, dan Benoa menggunakan regresi Ordinary Least Squares dengan memperhitungkan variasi musiman dan autokorelasi lag-1. Hasil penelitian menunjukkan kenaikan muka laut regional selama periode 1993–2026 berada pada rentang 3,74 hingga 5,17 mm/tahun, dengan laju tertinggi di D.I. Yogyakarta (4,53 ± 1,10 mm/tahun) dan Jawa Tengah (4,52 ± 1,06 mm/tahun), terendah di perairan Bali (4,08 ± 0,89 mm/tahun) dan Jawa Barat (4,20 ± 1,00 mm/tahun), serta rata-rata regional mencapai 4,30 ± 1,02 mm/tahun. Pada periode 2006–2026, rentang laju kenaikan meningkat menjadi 3,71 hingga 7,09 mm/tahun, dengan laju tertinggi di Jawa Tengah (5,96 ± 2,26 mm/tahun), serta rata-rata regional 5,50 ± 2,19 mm/tahun (+1,20 mm/tahun atau akselerasi +27,9%). Perbandingan data anomali muka laut dari altimetri terhadap pasang surut menunjukkan kesesuaian tinggi (r = 0,978–0,988; RMSE = 2,99–4,65 cm). Dinamika muka laut sangat dimodulasi oleh sistem monsun, sedangkan kejadian iklim antartahunan memicu anomali ekstrem dari -21,74 cm hingga +25,14 cm. Temuan ini menegaskan adanya variasi regional dalam tren kenaikan muka laut di perairan selatan Jawa dan Bali.

Kata kunci: satelit altimeter; kenaikan muka laut; Selatan Jawa; Bali; Samudera Hindia

Regional Sea Level Rise in South Java and Bali Waters Based on Satellite Altimetry

ABSTRACT: *Sea level rise (SLR) in the waters south of Java and Bali exhibits regional characteristics influenced by oceanographic dynamics and climate variability in the Indian Ocean. This study aims to analyze regional SLR from satellite altimetry, compare them with tide-gauge (TG) observations, and examines their relationships with monsoon dynamics, the ENSO, and the IOD. Gridded multisatellite altimetry data were analyzed and compared with TG observations from Cilacap, Sadeng, Prigi, and Benoa. Ordinary Least Squares regression accounting for seasonal variations and lag-1 autocorrelation was applied. During 1993–2026, regional SLR rates ranged from 3.74 to 5.17 mm/year, with the highest rates concentrated along Yogyakarta (4.53 ± 1.10 mm/year) and Central Java (4.52 ± 1.06 mm/year), the lowest in Bali (4.08 ± 0.89 mm/year) and West Java (4.20 ± 1.00 mm/year), and a regional average of 4.30 ± 1.02 mm/year. Over 2006–2026, rates increased to 3.71–7.09 mm/year, peaking in Central Java (5.96 ± 2.26 mm/year), and a regional mean of 5.50 ± 2.19 mm/year (+1.20 mm/year or +27.9%). Satellite altimetry showed strong agreement with TG (r = 0.978–0.988; RMSE = 2.99–4.65 cm). Sea level dynamics was strongly modulated by seasonal monsoons, while interannual climate events were associated with anomalies*

Diterima : 26-08-2026 ; Diterbitkan : 20-11-2026

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

ranging from -21.74 to +25.14 cm. These findings underscore regional variations in sea-level rise trends in the waters south of Java and Bali.

Keywords: *satellite altimetry; sea level rise; South Java; Bali; Indian Ocean*

PENDAHULUAN

Kenaikan muka laut merupakan salah satu indikator biofisik paling nyata dan terukur dari perubahan iklim global yang dipicu oleh pemanasan atmosfer dan laut. Pengamatan satelit altimetri presisi tinggi menunjukkan bahwa tinggi muka laut rata-rata global telah mengalami kenaikan signifikan sejak dimulainya era altimetri modern pada tahun 1993, dengan laju yang semakin terakselerasi pada periode pengamatan terkini. Laporan penilaian keenam *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC AR6) mengonfirmasi bahwa laju kenaikan muka laut rata-rata global meningkat dari 1,9 mm/tahun pada periode 1971–2006 menjadi 3,7 mm/tahun pada periode 2006–2018. Jika ditinjau pada periode yang lebih panjang, 1971–2018, laju kenaikan muka laut rata-rata global diperkirakan mencapai 2,3 mm/tahun (Fox-Kemper *et al*., 2021). Berbagai kajian independen berbasis altimetri satelit juga membuktikan bahwa akselerasi kenaikan muka laut global berlangsung nyata akibat percepatan pencairan lapisan es kutub dan gletser serta peningkatan ekspansi termal kolom air laut (Nerem *et al*., 2018; Veng dan Andersen, 2021; Guérou *et al*., 2023). Meskipun tren global memberikan gambaran umum mengenai ancaman iklim di bumi, nilai rata-rata global tersebut tidak mencerminkan perubahan muka laut di setiap perairan regional. Faktor sirkulasi laut lokal, redistribusi massa air, gaya gesek angin musiman, dinamika termosterik, dan perturbasi iklim antartahunan menghasilkan disparitas pola kenaikan muka laut yang sangat heterogen secara spasial di berbagai belahan dunia (Hamlington *et al*., 2020).

Perairan selatan Pulau Jawa hingga Pulau Bali merupakan bagian dari Samudra Hindia timur yang termasuk dalam sistem sirkulasi laut global dan iklim kawasan Indo-Pasifik. Dinamika oseanografi fisik di kawasan ini memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi karena dipengaruhi oleh interaksi multi-skala antara hembusan angin monsun musiman, arus susur *pantai South Java Current*, penjalaran gelombang laut ekuator, serta pertukaran massa air lintas samudra melalui Arus Lintas Indonesia (Arlindo). Kajian fundamental Meyers (1996) serta Wijffels dan Meyers (2004) menunjukkan bahwa perairan selatan kepulauan Indonesia bertindak sebagai jalur persimpangan gelombang oseanik utama bagi propagasi gelombang Kelvin terperangkap pantai (*coastal trapped Kelvin waves*) yang diinisiasi oleh angin barat ekuatorial Samudra Hindia (Wyrtki Jets) serta gelombang Rossby yang merambat ke arah barat. Selain itu, dinamika massa air dan percampuran turbulen di celah-celah sempit seperti Selat Lombok turut memodulasi transpor Arlindo dan struktur lapisan termoklin perairan sekitarnya (Yuliardi *et al*., 2021). Pada skala antartahunan, dinamika muka laut di selatan Jawa dan Bali juga sangat rentan terhadap gangguan mode iklim kopel atmosfer-laut, yaitu *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) di Samudra Pasifik dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) di Samudra Hindia (Undap *et al*., 2023; Yuliardi *et al*., 2025a, 2025b). Oleh karena itu, estimasi perubahan muka laut di kawasan ini memerlukan pemahaman menyeluruh yang mengintegrasikan tren sekuler jangka panjang dengan dekomposisi variasi musiman dan osilasi ekstrem antartahunan.

Teknologi altimetri satelit radar multisatelit menyediakan data temporal muka laut yang konsisten serta memiliki cakupan spasial yang luas tanpa terkendala oleh diskontinuitas geografis daratan. Ketersediaan rekaman data altimetri yang berkesinambungan sejak Januari 1993 hingga awal 2026 kini telah melampaui rentang pengamatan 33 tahun. Panjangnya rekaman ini melampaui batas minimum klimatologi 30 tahun (World Meteorological Organization, 2017), sehingga memberikan peluang ideal untuk mengevaluasi laju tren kenaikan muka laut geosentris, menganalisis variabilitas spasialnya, serta mendeteksi ada tidaknya percepatan atau akselerasi kenaikan laju pada periode dua dekade terkini (2006–2026) dibandingkan era sebelumnya.

Penelitian kenaikan muka laut di perairan selatan Pulau Jawa dan Bali menggunakan satelit

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

altimeter telah dilakukan oleh sejumlah peneliti, namun sebagian besar studi terdahulu masih terbatas pada rentang data yang masih pendek. Wuriatmo *et al*. (2012) mengkaji kenaikan muka laut di perairan selatan Jawa (Pangandaran, Yogyakarta, dan Prigi) menggunakan tiga generasi altimeter (TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2), namun hanya mencakup periode 2000–2010 (10 tahun) dengan estimasi laju berkisar 0,71–1,30 mm/tahun. Limantara *et al*. (2013) menganalisis data Jason-2 pada periode 2008–2012 di Cilacap dan Prigi dan melaporkan laju kenaikan yang sangat tinggi (>16 mm/tahun), yang menunjukkan bias data pada jangka waktu pendek saat anomali La Niña ekstrem 2010/2011. Sasmito (2020) mengkaji dinamika pasang surut di pantai selatan Jawa dengan data 2002–2011 (9 tahun), sedangkan Mansawan *et al*. (2016) membandingkan altimetri Envisat dan pasang surut di Cilacap dan Benoa (2003–2014) dengan tren sekitar 3,5 mm/tahun. Faridatunnisa dan Heliani (2018) meneliti rekaman pasang surut Prigi (1996–2015) dan menemukan perbedaan tren yang sangat tajam antar-subperiode akibat besarnya gap data dan fluktuasi iklim. Di sisi lain, perbedaan tren antara altimetri geosentris dan stasiun pasang surut relatif sering kali dipengaruhi oleh pergerakan vertikal daratan lokal (*Vertical Land Motion*) (Hamdani *et al*., 2025; Han *et al*., 2022; Lumban-Gaol *et al*., 2024; Kamp *et al*., 2024; Busoroh dan Panuntun, 2025).

Meskipun sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji perubahan muka laut di perairan selatan Jawa dan Bali, kajian data dengan rentang waktu 30 tahun, sesuai dengan periode minimum klimatologi yang direkomendasikan oleh World Meteorological Organization (2017), belum pernah dilakukan di wilayah tersebut. Selain itu, perbandingan dengan data dari empat stasiun pasang surut serta analisis keterkaitannya dengan variabilitas iklim regional juga masih perlu dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis distribusi spasial laju kenaikan muka laut regional di perairan selatan Jawa hingga Bali selama 33 tahun dan mengevaluasi variasi spasial dan indikasi akselerasi regional; (2) mengkarakterisasi fluktuasi grafik anomali muka laut (*Sea Level Anomaly* (SLA)) bulanan pada empat lokasi pesisir representatif; (3) mengevaluasi kesesuaian dan konsistensi tren altimetri satelit terhadap data pasang surut; serta (4) menganalisis keterkaitan variabilitas muka laut dengan dinamika angin monsun musiman dan fenomena iklim antartahunan ENSO dan IOD. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran terbaru tentang perubahan muka laut di perairan selatan Jawa dan Bali serta hubungannya dengan tren jangka panjang, kondisi lokal, dan variabilitas iklim regional.

MATERI DAN METODE

Lokasi penelitian ini mencakup perairan selatan Pulau Jawa hingga Pulau Bali pada koordinat geografis 105,0°–116,5°BT dan 6,5°–11,0°LS (Gambar 1). Data satelit altimetri yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari produk Copernicus Marine Service (CMEMS) yaitu produk *Global Ocean Gridded L4 Sea Surface Heights and Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing* (*Product ID*: SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047; *dataset ID*: cmems_obs-sl_glo_phy-ssh_my_allsat-l4-duacs-0.125deg_P1M-m). Produk data altimetri ini merupakan hasil asimilasi multi-misi satelit (TOPEX/Poseidon, ERS-1/2, Jason-1/2/3, Envisat, GFO, SARAL/AltiKa, CryoSat-2, HaiYang-2A/B, Sentinel-3A/3B, dan Sentinel-6 Michael Freilich) dengan resolusi spasial grid 0,125° × 0,125°. Produk ini menggabungkan pengukuran altimetri sepanjang lintasan dari berbagai misi satelit menggunakan metode *optimal interpolation* untuk menghasilkan data SLA pada grid reguler. Pengolahan produk mencakup koreksi geofisika, termasuk koreksi pasang surut laut dan *Dynamic Atmospheric Correction* (DAC) berbasis model MOG2D untuk mengoreksi variabilitas muka laut akibat pemaksaan atmosfer. Data CMEMS yang digunakan yaitu SLA bulanan yang mencakup periode Januari 1993 hingga April 2026.

Data in-situ muka laut diperoleh dari jaringan stasiun pasang surut (*tide gauge* (TG)) *University of Hawaii Sea Level Center* (UHSLC) pada empat lokasi pesisir representatif di selatan Jawa dan Bali (Tabel 1), yaitu: (1) Stasiun Pelabuhan Tanjung Intan Cilacap, mewakili zona Jawa Tengah bagian barat; (2) Stasiun Pelabuhan Sadeng Gunungkidul, mewakili zona pesisir karst D.I. Yogyakarta; (3) Stasiun Teluk Prigi Trenggalek, mewakili zona perairan selatan Jawa Timur; dan (4) Stasiun Pelabuhan Benoa Denpasar, mewakili perairan selatan Bali dan kawasan Selat Lombok. Kategori data yang digunakan adalah *Fast Delivery* (FD). Rentang temporal data disesuaikan

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

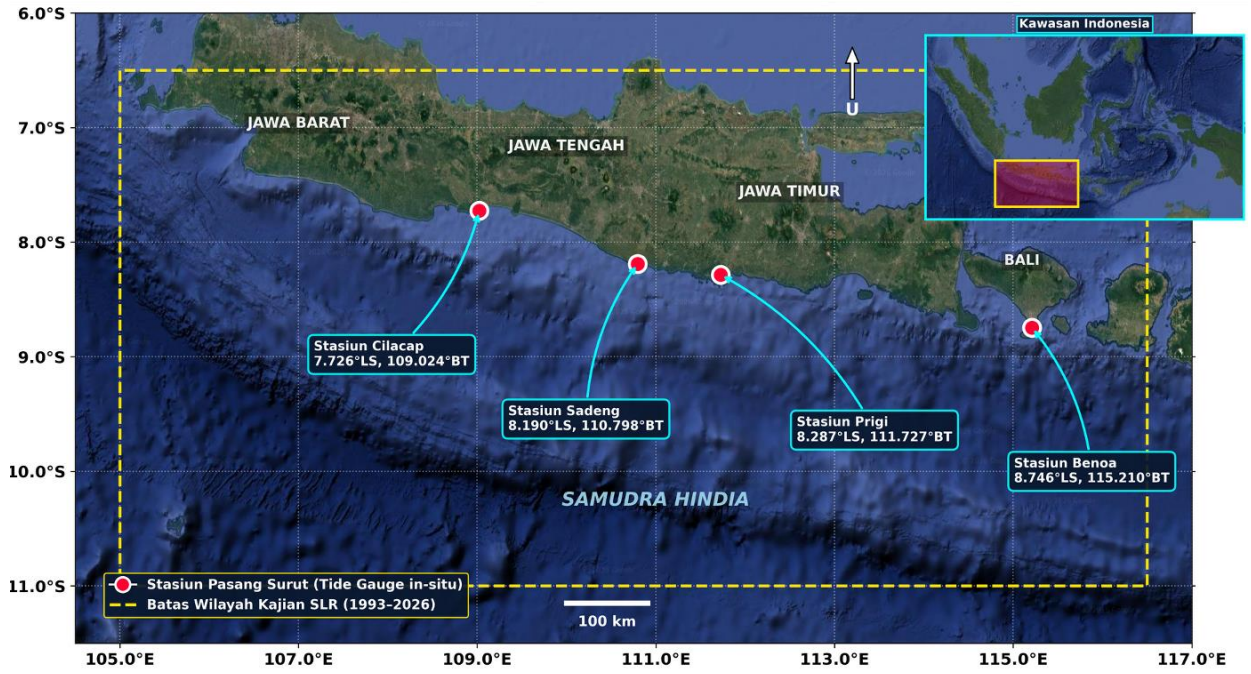
dengan ketersediaan rekaman operasional FD masing-masing stasiun: Benoa (2006–2026), Prigi (2007–2026), Cilacap (terbagi dua periode: 2007–2017 dan 2018–2026 akibat relokasi instrumen), serta Sadeng (2008–2016). Koordinat stasiun TG dan titik grid terdekat data SLA altimetri produk CMEMS dengan stasiun TG dapat dilihat pada Tabel 1.

Untuk mengevaluasi keterkaitan dinamika muka laut dengan variabilitas iklim regional dan global, digunakan data indeks iklim bulanan periode 1993–2026. Indeks ENSO direpresentasikan oleh *Oceanic Niño Index* (ONI) dari *NOAA Climate Prediction Center* (CPC) berbasis anomali suhu permukaan laut (SST) di wilayah Niño 3.4 (5°LU–5°LS, 120°–170°BB). Indeks IOD diwakili oleh *Dipole Mode Index* (DMI) yang dihitung dari anomali perbedaan gradien SST antara Samudra Hindia tropis bagian barat (50°–70°BT, 10°LS–10°LU) dan bagian tenggara (90°–110°BT, 10°LS–0° ekuator) (Saji *et al*., 1999). Variabilitas musiman monsun dikelompokkan ke dalam empat periode musim monsun Indonesia, yaitu Monsun Barat (Desember–Januari–Februari (DJF)), Peralihan 1 (Maret–April–Mei (MAM)), Monsun Timur (Juni–Juli–Agustus (JJA)), dan Peralihan 2 (September–Oktober–November (SON)).

Data satelit altimeter dari CMEMS diekstraksi menggunakan koordinat spasial grid terdekat (*nearest-neighbor grid point*) terhadap masing-masing lokasi stasiun pasang surut (Tabel 1). Pengendalian mutu data pasang surut mengacu pada protokol standar Level 1 Quality Assessment dari UHSLC yang mencakup deteksi nilai *outlier* dan verifikasi konsistensi datum stasiun.

Tabel 1. Stasiun Pasang Surut dan Koordinat Grid Data SLA CMEMS Terdekat

Stasiun Pasang Surut	Wilayah Provinsi	Koordinat Stasiun		Koordinat Grid Terdekat	
		Lintang	Bujur	Lintang	Bujur
Cilacap	Jawa Tengah	7,7265°LS	109,0236°BT	7,6875°LS	109,0625°BT
Sadeng	D.I. Yogyakarta	8,1902°LS	110,7980°BT	8,1875°LS	110,8125°BT
Prigi	Jawa Timur	8,2865°LS	111,7272°BT	8,3125°LS	111,6875°BT
Benoa	Bali	8,7464°LS	115,2099°BT	8,6875°LS	115,1875°BT



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Perairan Selatan Jawa dan Bali

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

Selanjutnya, dalam pembentukan rata-rata bulanan dari data harian, diterapkan ambang batas kelengkapan data sebesar minimal 15 hari observasi valid per bulan kalender (≥50%). Bulan yang memiliki data valid di bawah 15 hari dikeluarkan (diberi nilai *missing value* (NaN)) untuk menghindari bias representasi nilai rata-rata bulanan. Setelah melalui tahapan pengendalian mutu, data elevasi pasang surut per jam dirata-ratakan menjadi rerata bulanan. SLA dari data pasang surut dihitung dengan mengurangkan elevasi bulanan terhadap rata-rata muka laut jangka panjang pada periode observasi tumpang tindih.

Untuk menguji akurasi data altimetri satelit di kawasan pesisir selatan Jawa dan Bali, dilakukan uji kesesuaian statistik secara kuantitatif antara *time-series* SLA altimetri dan SLA stasiun pasang surut pada periode data tumpang tindih. Metrik evaluasi yang digunakan meliputi koefisien korelasi Pearson (r), galat kuadrat rerata (*Root Mean Square Error* (RMSE)), dan galat mutlak rerata (*Mean Absolute Error* (MAE)) yang dihitung melalui formulasi berikut:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(X_{\mathrm{alt},i} - \overline{X}_{\mathrm{alt}})(Y_{\mathrm{tg},i} - \overline{Y}_{\mathrm{tg}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_{\mathrm{alt},i} - \overline{X}_{\mathrm{alt}})^2 \sum_{i=1}^{N}(Y_{\mathrm{tg},i} - \overline{Y}_{\mathrm{tg}})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(X_{\mathrm{alt},i} - Y_{\mathrm{tg},i}\right)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|X_{\mathrm{alt},i} - Y_{\mathrm{tg},i}\right| \quad (3)$$

N adalah jumlah bulan observasi tumpang tindih yang valid, $X_{\mathrm{alt,i}}$ adalah nilai *SLA* altimetri pada bulan ke-*i*, $Y_{\mathrm{tg,i}}$ adalah nilai *SLA* stasiun pasang surut pada bulan ke-*i*, serta $\bar{X}_{\mathrm{alt}}$ dan $\bar{Y}_{\mathrm{tg}}$ masing-masing merepresentasikan nilai rata-rata dari kedua deret data tersebut.

Estimasi laju tren kenaikan muka laut jangka panjang dihitung menggunakan metode kuadrat terkecil biasa (*Ordinary Least Squares* (OLS)) yang dipadukan dengan dekomposisi fungsi harmonik musiman tahunan dan semesteran (*semi-annual*). Penyesuaian harmonik musiman ini dilakukan untuk mencegah terjadinya distorsi estimasi kemiringan garis tren akibat siklus musiman reguler (Nerem *et al*., 2018). Model matematis regresi harmonik dirumuskan sebagai:

$$SLA(t) = a + b \cdot t + \sum_{k=1}^{2}\left[s_k \sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) + c_k \cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right)\right] + \varepsilon(t) \quad (4)$$

SLA(t) adalah deret waktu anomali muka laut pada waktu *t* (dalam satuan tahun desimal), *a* adalah konstanta intersep (mm), *b* adalah kemiringan laju tren linier kenaikan muka laut (mm/tahun), *k* = 1 dan *k* = 2 masing-masing mewakili osilasi siklus tahunan (*T* = 1,0 tahun) dan semesteran (*T*/2 = 0,5 tahun), s_k dan c_k adalah koefisien amplitudo harmonik sinus dan kosinus, serta *ε(t)* adalah residual galat stokastik yang tidak terjelaskan oleh model regresi.

Deret waktu muka laut bulanan umumnya memiliki ketergantungan temporal atau autokorelasi serial yang signifikan. Jika autokorelasi ini diabaikan, derajat kebebasan model regresi standar akan terlampau tinggi, sehingga menghasilkan estimasi ketidakpastian galat tren yang terlalu optimis dan sempit. Untuk memperoleh interval kepercayaan statistik 95% yang valid dan realistis, derajat kebebasan efektif (N_eff) dihitung dengan mengoreksi jumlah sampel observasi (N) menggunakan koefisien autokorelasi lag-1 (r_1) dari deret residual ε(t) (Santer *et al*., 2000; Guérou *et al*., 2023):

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{N-1}\varepsilon(t) \cdot \varepsilon(t+1)}{\sum_{t=1}^{N}\varepsilon(t)^2} \quad (5)$$

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

$$N_{\text{eff}} = N\left(\frac{1-r_1}{1+r_1}\right) \quad (6)$$

Standar deviasi galat dari estimasi kemiringan tren (σ_b) dan selang batas kepercayaan 95% (*Confidence Interval* ($CI_{95\%}$)) selanjutnya dihitung berdasarkan derajat kebebasan efektif N_{eff}:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_\varepsilon}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(t_i - \bar{t})^2}} \cdot \sqrt{\frac{N-2}{N_{\text{eff}}-2}} \quad (7)$$

$$CI_{95\%} = b \pm t_{crit,95\%,N_{eff}-2} \cdot \sigma_b \approx b \pm 1{,}96 \cdot \sigma_b \quad (8)$$

σ_ε adalah standar deviasi residual regresi, t_i adalah nilai temporal waktu, $\bar{t}$ adalah nilai rata-rata waktu observasi, dan t_{crit} adalah nilai kritis distribusi *t*-Student pada taraf signifikansi α = 0,05 dengan derajat kebebasan N_{eff} - 2.

Analisis tren linier OLS harmonik diaplikasikan secara terpisah pada setiap sel grid altimetri di seluruh perairan selatan Jawa hingga Bali. Untuk menganalisis variabilitas antar wilayah secara komparatif, kawasan penelitian dibagi ke dalam lima zona berdasarkan batas bujur geografis: (1) Selatan Jawa Barat (105,0°–108,5°BT); (2) Selatan Jawa Tengah (108,5°–110,3°BT); (3) Selatan D.I. Yogyakarta (110,3°–111,0°BT); (4) Selatan Jawa Timur (111,0°–114,3°BT); dan (5) Perairan Bali dan Sekitarnya (114,3°–116,5°BT). Estimasi spasial dilakukan pada dua rentang waktu yang berbeda: (1) periode pengamatan jangka panjang penuh 33 tahun (Januari 1993 – April 2026) dan (2) periode pengamatan dua dekade terakhir 20 tahun (Januari 2006 – April 2026). Deteksi akselerasi atau perlambatan kenaikan muka laut regional dikuantifikasi dari selisih laju tren linier antarperiode (ΔTrend):

$$\Delta Trend(x,y) = Trend_{2006-2026}(x,y) - Trend_{1993-2026}(x,y) \quad (9)$$

Nilai *ΔTrend* bernilai positif mengindikasikan terjadinya percepatan (akselerasi) laju kenaikan muka laut pada era modern dibandingkan rata-rata sekuler jangka panjang, sedangkan nilai negatif mengindikasikan perlambatan laju kenaikan. Nilai laju tren dilaporkan dalam format rata-rata disertai notasi '±' merepresentasikan selang batas kepercayaan 95% dari kemiringan tren yang dihitung menggunakan derajat kebebasan efektif terkoreksi autokorelasi serial lag-1 (Persamaan 7 dan 8)

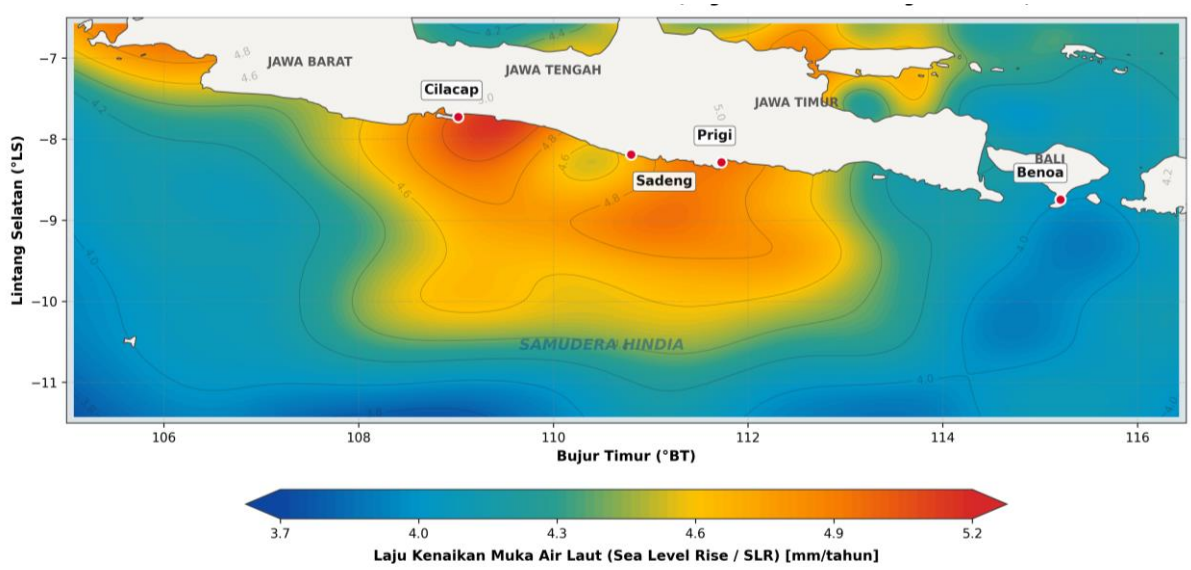
Pengaruh sistem monsun dianalisis dengan membentuk komposit spasial klimatologi rata-rata bulanan dan musiman SLA pada empat periode monsun Indonesia (DJF, MAM, JJA, SON) di seluruh domain studi. Hubungan keterkaitan antara dinamika muka laut regional dan fenomena iklim berskala basin (ENSO dan IOD) diinvestigasi melalui analisis korelasi linear kontemporer (lag-0) antara deret waktu rata-rata spasial SLA regional terhadap indeks iklim bulanan ONI (Niño 3.4) dan DMI periode 1993–2026. Selanjutnya, variabilitas antartahunan dianalisis menggunakan filter rerata bergerak 12 bulan untuk menapis siklus musiman monsun, dan respons dinamika muka laut diklasifikasikan secara kronologis berdasarkan fase puncak kejadian iklim ekstrem historis (El Niño, La Niña, dan IOD).

HASIL DAN PEMBAHASAN

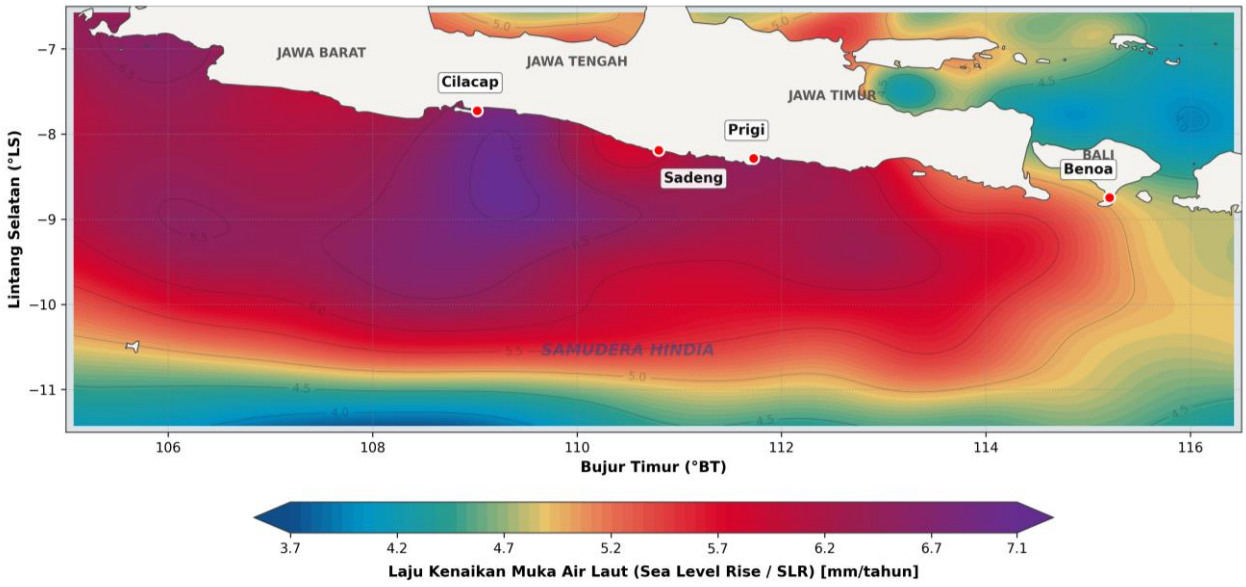
Analisis spasial altimetri satelit selama periode pengamatan 33 tahun (1993–2026) membuktikan bahwa seluruh perairan selatan Jawa hingga Bali mengalami tren kenaikan muka laut geosentris yang signifikan secara statistik ($p < 0{,}001$). Distribusi spasial laju kenaikan muka laut jangka panjang tersebut disajikan pada Gambar 2. Berdasarkan hasil analisis spasial, laju kenaikan muka laut jangka panjang (1993–2026) di sepanjang perairan selatan Jawa hingga Bali membentang pada rentang spasial antara 3,74 hingga 5,17 mm/tahun dan rata-rata laju kenaikan di

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

seluruh kawasan kajian mencapai 4,30 ± 1,02 mm/tahun. Laju kenaikan muka laut regional ini melampaui rata-rata kenaikan muka laut global sebesar 3,11–3,17 mm/tahun berdasarkan estimasi NOAA *Laboratory for Satellite Altimetry* (NOAA LSA, 2026) dari satelit altimetri pada periode pengamatan yang sama. Pola sebaran spasial menunjukkan gradien zonal yang sangat khas di sepanjang busur selatan kepulauan. Laju kenaikan tertinggi terkonsentrasi di zona perairan selatan D.I. Yogyakarta dan Jawa Bagian Tengah. Bergerak ke arah barat menuju pesisir selatan Jawa Barat, laju tren sedikit berkurang menjadi 4,20 ± 1,00 mm/tahun, sedangkan ke arah timur menuju pesisir selatan Jawa Timur dan perairan Bali masing-masing mencapai 4,42 ± 1,12 mm/tahun dan 4,08 ± 0,89 mm/tahun (Tabel 2).



Gambar 2. Distribusi Spasial Laju Kenaikan Muka Laut Geosentris di Perairan Selatan Jawa dan Bali Selama Periode 33 Tahun (1993–2026)



Gambar 3. Distribusi Spasial Laju Kenaikan Muka Laut Geosentris di Perairan Selatan Jawa dan Bali Selama Periode 20 Tahun (2006–2026)

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

Tabel 2. Perbandingan Laju Tren Kenaikan Muka Laut Spasial Berdasarkan Zona Wilayah Periode 1993–2026 dan 2006–2026

Zona Wilayah	Periode 1993-2026		Periode 2006-2026	
	Tren (mm/th)	Rentang (mm/th)	Tren (mm/th)	Rentang (mm/th)
Selatan Jawa Barat	4,20 ± 1,00	3,74 – 4,97	5,82 ± 2,14	3,71 – 6,72
Selatan Jawa Tengah	4,52 ± 1,06	3,75 – 5,17	5,96 ± 2,26	3,71 – 7,09
Selatan D.I. Yogyakarta	4,53 ± 1,10	4,00 – 4,94	5,67 ± 2,34	4,30 – 6,62
Selatan Jawa Timur	4,42 ± 1,12	3,86 – 4,96	5,47 ± 2,40	4,23 – 6,49
Perairan Bali & Sekitarnya	4,08 ± 0,89	3,89 – 4,38	4,71 ± 1,93	3,98 – 5,71
Rata-rata Seluruh Kawasan	4,30 ± 1,02	3,74 – 5,17	5,50 ± 2,19	3,71 – 7,09

Analisis tren kenaikan spasial juga dihitung untuk periode dua dekade terakhir (2006–2026) (Gambar 3 dan Tabel 2). Perbandingan komparatif antara Gambar 2 dan Gambar 3 memberikan indikasi peningkatan laju kenaikan muka laut di perairan selatan Jawa dan Bali. Pada 2006–2026, rentang laju kenaikan muka laut regional meningkat menjadi 3,71 hingga 7,09 mm/tahun, dengan rata-rata regional melonjak mencapai 5,50 ± 2,19 mm/tahun. Angka ini menunjukkan adanya penambahan laju kenaikan sebesar +1,20 mm/tahun (+27,9%) dibandingkan periode dasar 33 tahun (1993–2026). Percepatan laju kenaikan muka laut tertinggi terkonsentrasi di lepas pantai perairan Jawa Tengah dan Jawa Barat (Tabel 2).

Ditinjau dari dinamika oseanografi fisis, tingginya akselerasi kenaikan muka laut di perairan Jawa Barat dan Jawa Tengah (+1,62 dan +1,44 mm/tahun) diduga berkaitan dengan respons termosterik lapisan atas Samudra Hindia bagian timur. Akumulasi bahang di lapisan termoklin atas mengalami penguatan akibat berkurangnya frekuensi peristiwa IOD positif ekstrem pasca tahun 2019 serta berturut-turutnya fase La Niña pada 2020–2023 yang menumpuk air hangat di kawasan timur Samudra Hindia (Yuliardi *et al*., 2025b; Munandar *et al*., 2026). Sebaliknya, di perairan Bali dan sekitarnya, laju tren kenaikan muka laut jangka panjang (4,08 ± 0,89 mm/tahun) dan akselerasinya (+0,63 mm/tahun) relatif paling moderat di antara seluruh zona kajian. Kondisi ini diduga berkaitan dengan dinamika hidrografi Selat Lombok sebagai pintu keluar utama Arlindo.

Penelitian sebelumnya oleh Yuliardi *et al*. (2021) melaporkan bahwa di Selat Lombok mengalami pengadukan turbulen yang luar biasa intensif dengan koefisien difusivitas vertikal tinggi akibat interaksi arus pasut kuat dengan batimetri ambang (*sill*). Adanya transpor massa air bervolume besar (~2–4 Sv) yang dialirkan secara konstan dari Laut Flores menuju Samudra Hindia melalui Selat Lombok mempertahankan kedalaman lapisan campur (*mixed layer depth*) yang lebih stabil dan menciptakan percampuran massa air yang efektif, sehingga meredam pemanasan kolom air anomalus dan menstabilkan tren kenaikan muka laut di perairan selatan Bali dibandingkan perairan terbuka di selatan Jawa.

SLA pada keempat stasiun memperlihatkan koherensi dan sinkronisasi temporal yang sangat kuat di sepanjang pesisir selatan Jawa–Bali sejauh ±680 km. Rentang dinamika fluktuasi muka laut bulanan tercatat sangat lebar, bergerak dari nilai anomali minimum -21,74 cm hingga anomali maksimum +25,14 cm. Pola osilasi periodik mencerminkan paduan antara modulasi musiman reguler dan intervensi fenomena iklim antartahunan berintensitas tinggi.

Tren kenaikan linier muka laut jangka panjang periode 1993–2026 pada masing-masing titik koordinat stasiun menunjukkan nilai yang relatif konsisten dengan tren regional, yaitu Cilacap (+4,34 ± 0,98 mm/tahun), Sadeng (+4,51 ± 1,08 mm/tahun), Prigi (+4,36 ± 1,06 mm/tahun), dan Benoa (+4,09 ± 0,88 mm/tahun) (Gambar 4). Nilai tren tersebut dihitung berdasarkan data satelit altimeter pada titik grid terdekat dengan masing-masing stasiun. Dengan demikian, tren pada keempat lokasi merepresentasikan perubahan muka laut yang teramati oleh altimetri selama periode 1993–2026, terlepas dari perbedaan panjang rekaman data pasang surut di setiap stasiun. Keempat stasiun merekam fase penurunan muka laut ekstrem yang terjadi serempak selama episode Super El Niño dan IOD Positif kuat pada tahun 1997/1998, 2006, 2015, dan 2019. Sebaliknya, fase kenaikan muka

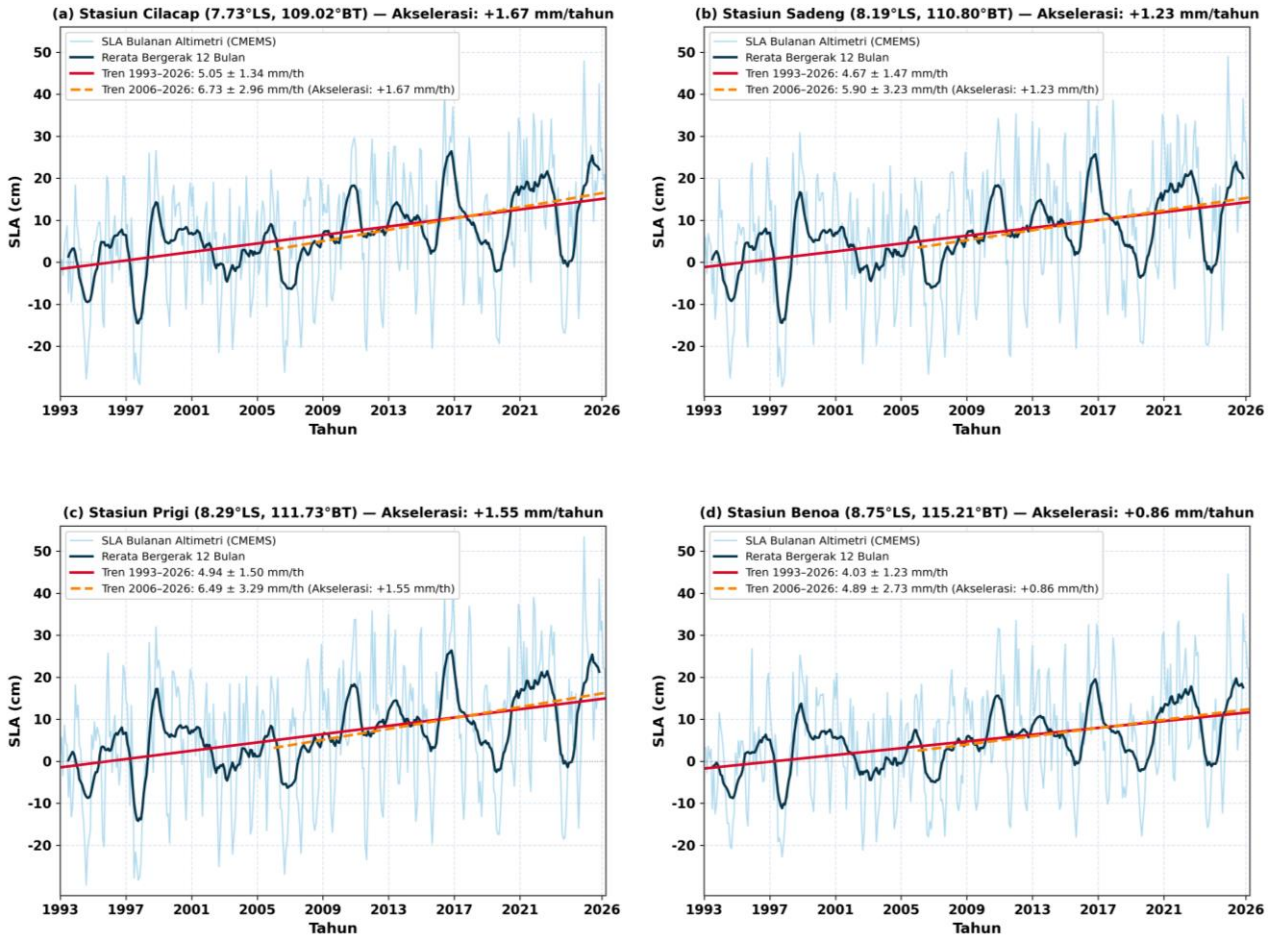
Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

laut ekstrem terekam secara sinkron pada episode La Niña kuat dan IOD Negatif tahun 2010/2011, 2016, 2021/2022, dan 2024/2025. Pola tersebut mengindikasikan bahwa variabilitas muka laut di sepanjang pantai selatan Jawa dan Bali didominasi oleh sinyal oseanografi skala basin Samudra Hindia serta interaksi atmosfer regional. Namun, pola regional ini tidak meniadakan kemungkinan adanya pengaruh lokal, seperti pergerakan vertikal daratan di sekitar stasiun pasang surut, terhadap perubahan muka laut relatif yang terukur.

Perbandingan grafik deret waktu tumpang tindih produk altimetri satelit CMEMS terhadap data stasiun pasang surut ditampilkan pada Gambar 5, sedangkan sebaran titik dan kesesuaian regresi linier (*scatter plot*) dapat dilihat pada Gambar 6.

Hasil evaluasi statistik menunjukkan derajat kesesuaian yang tinggi di seluruh stasiun pengamatan. Nilai koefisien korelasi Pearson (r) berada pada rentang 0,978 hingga 0,988 dengan signifikansi statistik yang sangat tinggi ($p < 0,0001$). Nilai RMSE berkisar antara 2,99 cm hingga 4,65 cm, dan MAE berkisar antara 2,41 cm hingga 3,69 cm. Rincian metrik validasi statistik dan komparasi tren linier disajikan pada Tabel 3.

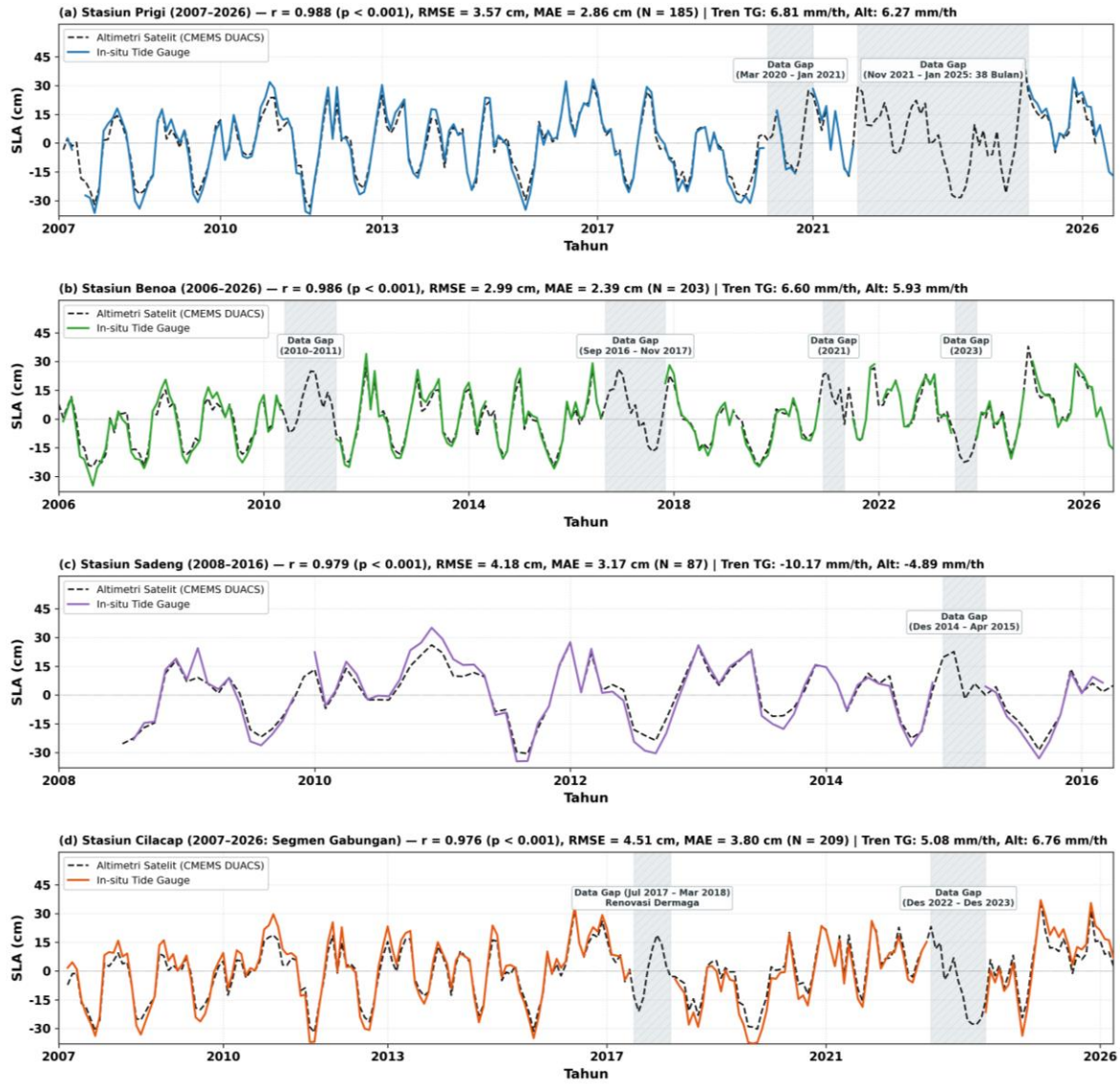
Analisis komparatif tren linier pada Tabel 3 menunjukkan karakteristik observasi kedua sistem pengukuran: (1) Di stasiun Prigi (2007–2026; N = 185 dari 230 bulan, kelengkapan data ~80,4%) dan Benoa (2006–2026; N = 203 dari 241 bulan, kelengkapan data ~84,2%) yang memiliki deret waktu panjang dan kontinu meskipun terdapat data kosong, tren pasang surut dan altimetri menunjukkan kesesuaian yang relatif baik. Selisih tren linier di Prigi hanya sebesar +0,54 mm/tahun (TG: 6,81 mm/th vs Alt: 6,27 mm/th), sedangkan di Benoa hanya sebesar +0,66 mm/tahun (TG: 6,60 mm/th vs Alt: 5,93 mm/th). Kesesuaian milimeter ini menegaskan temuan Sinurat *et al*. (2026) bahwa



Gambar 4. Fluktuasi Anomali Muka Laut Bulanan dan Tren Kenaikan Tahun 1993–2026 Berdasarkan Data Satelit Altimetri pada Titik Grid Terdekat dengan Stasiun Cilacap, Sadeng, Prigi, dan Benoa

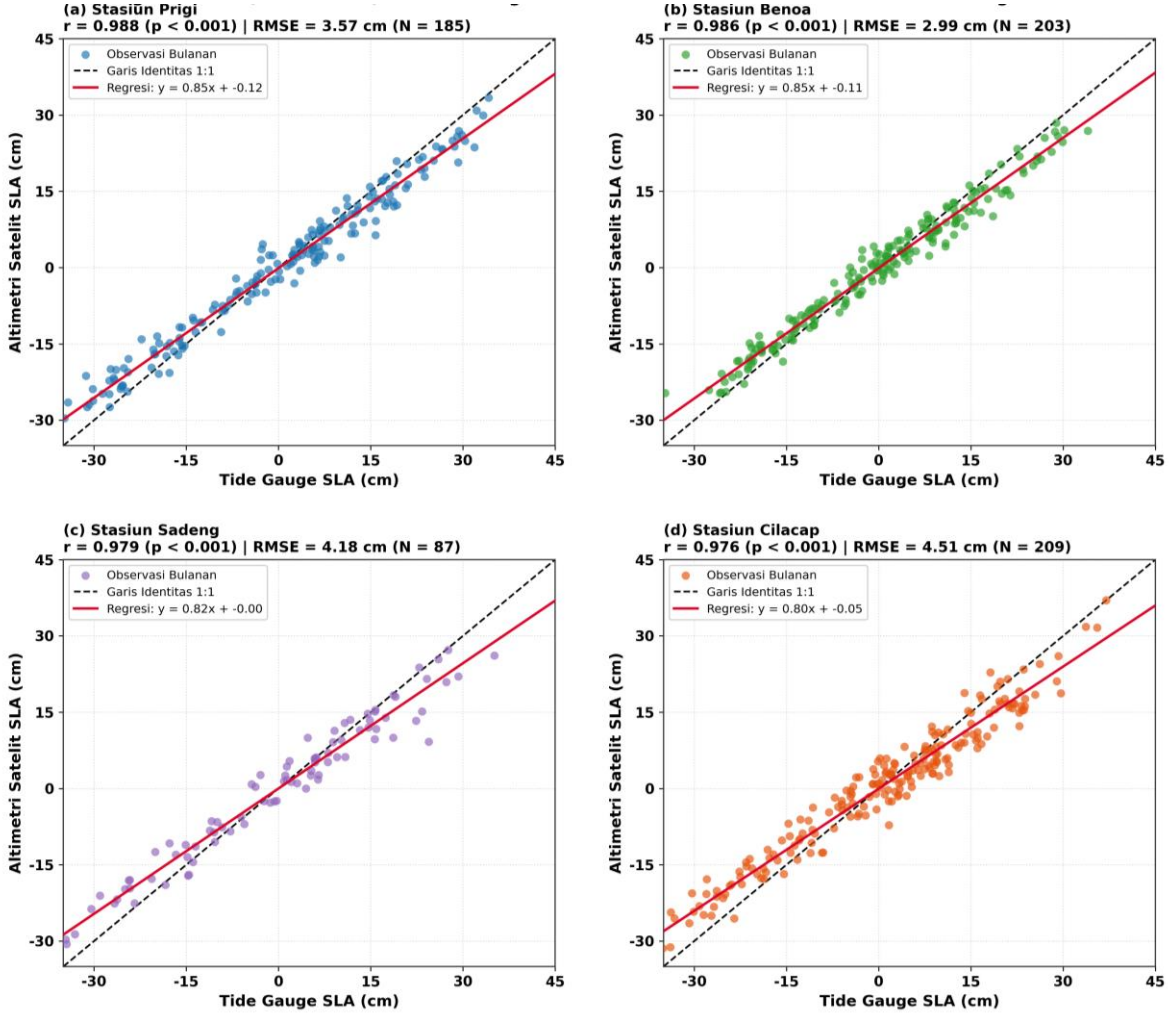
Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

data altimetri satelit terkoreksi mampu merekam tren muka laut di perairan pesisir Indonesia secara sangat akurat. (2) Di Sadeng (2008–2016), rekaman pasang surut berdurasi pendek (87 bulan) menghasilkan estimasi tren yang sama-sama bernilai negatif pada kedua sistem pengukuran (TG: -10,17 mm/th; Alt: -4,89 mm/th). Tren negatif ini merupakan bias data statistik akibat titik awal rekaman pada saat anomali positif tinggi (La Niña 2010/2011) dan berakhir tepat pada saat anomali terendah (Super El Niño 2015/2016), dengan ketidakpastian tinggi (±16,29 mm/th; p > 0,2) yang menegaskan tidak validnya rekaman berdurasi di bawah 10 tahun untuk analisis tren iklim sekuler. (3) Di Cilacap, rekaman terbagi menjadi dua segmen akibat renovasi dermaga pelabuhan pada akhir 2017. Pada segmen 2007–2017, tren pasang surut (12,15 mm/th) dan altimetri (12,87 mm/th) sangat selaras (selisih -0,72 mm/th). Namun, pada segmen 2018–2026, tren pasang surut melonjak tajam mencapai 36,62 ± 12,97 mm/tahun, jauh melampaui tren altimetri sebesar 24,28 ± 11,05 mm/tahun dengan selisih mencapai +12,34 mm/tahun. Perbedaan tren tersebut mengindikasikan kemungkinan adanya pengaruh pergerakan vertikal daratan (vertical land motion), termasuk amblesan tanah (land subsidence) di sekitar struktur dermaga tempat stasiun



Gambar 5. Perbandingan Deret Waktu Tumpang Tindih SLA Bulanan antara Data Stasiun Pasang Surut dan Satelit Altimetri di Stasiun Prigi, Benoa, Sadeng, dan Cilacap

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764



Gambar 6. Scatter Plot dan Garis Regresi Linier antara Data SLA dari Stasiun Pasang Surut dan Satelit Altimetri di Empat Stasiun Penelitian

pasang surut terpasang. Hal ini karena pasang surut mengukur muka laut relatif terhadap datum dermaga yang mengalami subsidensi, laju kenaikan terukur tampak jauh lebih tinggi daripada kenaikan muka laut geosentris absolut yang direkam altimeter satelit. Temuan ini sangat bersesuaian dengan studi deformasi geodesi CORS-GNSS dan SBAS-InSAR di pesisir dataran aluvial Cilacap yang mencatat laju amblesan berkisar antara -4,07 hingga -12,0 mm/tahun (Hamdani *et al*., 2025; Han *et al*., 2022; Busoroh dan Panuntun, 2025; Lumban-Gaol *et al*., 2024).

Variabilitas muka laut di perairan selatan Jawa hingga Bali menunjukkan interaksi dinamis yang kuat dengan siklus sirkulasi monsun dan mode osilasi iklim antartahunan Samudra Hindia–Pasifik. Karakteristik siklus musiman klimatologis dan distribusi spasial SLA per musim disajikan pada Gambar 7. Pada skala antartahunan, dinamika muka laut regional dipengaruhi oleh interaksi antara fenomena ENSO di Samudra Pasifik tropis dan IOD di Samudra Hindia. Hubungan temporal antara indeks iklim (Niño 3.4 dan DMI) terhadap variabilitas SLA disajikan pada Gambar 8.

Siklus musiman elevasi muka laut di perairan kajian dimodulasi secara dominan oleh pola hembusan angin monsun Indonesia: (1) Pada Monsun Barat (DJF), angin baratan yang berhembus kuat memicu transport massa air susur pantai ke arah timur (*South Java Current*) (Sprintall *et al*., 1999; Quadfasel dan Creswell, 1992) dan menimbulkan transpor Ekman ke arah pantai (*onshore Ekman transport*). Konvergensi massa air di garis pantai memicu *coastal downwelling*, sehingga

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

muka laut mencapai nilai anomali positif tertinggi (+4 hingga +8 cm), sebagaimana tampak pada dominasi anomali positif di peta DJF (Gambar 7). (2) Pada masa Peralihan 1 (MAM), angin baratan melemah dan elevasi muka laut berada pada fase relaksasi transisi (+2 hingga +4 cm). (3) Sebaliknya, pada Monsun Timur (JJA), angin pasat tenggara yang kering dan dingin bertiup kencang sejajar dengan garis pantai selatan Jawa hingga Bali. Tegangan gesek angin ini mendorong transpor Ekman ke arah laut lepas (*offshore Ekman transport*), menyebabkan defisit massa air di pesisir dan membangkitkan fenomena penaikan massa air dingin kaya nutrien dari kedalaman termoklin ke lapisan permukaan (*coastal upwelling*) (Undap *et al*., 2023; Yuliardi *et al*., 2025b). Pendinginan kolom air dan pendangkalan termoklin (efek termosterik negatif) mengakibatkan penurunan muka laut yang dramatis (*coastal sea level depression*), dengan anomali SLA bernilai negatif signifikan (-6 hingga -12 cm) di sepanjang pantai selatan Jawa Timur dan Bali (Gambar 7). (4) Pada masa Peralihan 2 (SON), penguatan hembusan angin barat ekuatorial di Samudra Hindia membangkitkan arus jet ekuatorial timuran (Wyrtki Jets) (Wyrtki, 1973). Tumbukan massa air Wyrtki Jets di pantai barat Sumatra memicu penjalaran gelombang Kelvin terperangkap pantai (*coastal trapped Kelvin waves*) yang merambat cepat ke arah timur menyusuri selatan Jawa dan Bali (Wijffels dan Meyers, 2004; Syamsudin *et al*., 2004), memulihkan elevasi muka laut kembali ke kondisi ekuilibrium.

Korelasi statistik menunjukkan bahwa SLA regional berkorelasi negatif signifikan dengan indeks Niño 3.4 ($r = -0,48$; $p < 0,001$) dan berkorelasi negatif sangat kuat dengan indeks DMI ($r = -0,62$; $p < 0,001$). Hubungan ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai indeks Niño 3.4 dan DMI cenderung berkaitan dengan penurunan SLA regional selama periode pengamatan. Koinsidensi kondisi El Niño dan IOD positif pada 1997/1998, serta IOD positif kuat pada 2019 yang bertepatan dengan kondisi El Niño lemah pada 2018/2019, berkaitan dengan anomali muka laut negatif. Anomali SLA minimum sebesar −21,74 cm tercatat pada periode pengamatan, sedangkan anomali positif maksimum mencapai +25,14 cm pada periode La Niña dan IOD negatif yang bertepatan. Perlu dicatat bahwa nilai ekstrem -21,74 cm dan +25,14 cm tersebut diperoleh dari deret waktu SLA bulanan yang masih mempertahankan siklus musiman (Gambar 4). Temuan ini menunjukkan bahwa variabilitas ENSO dan IOD berasosiasi dengan fluktuasi muka laut regional. Namun, hubungan tersebut tidak secara langsung membuktikan sebab-akibat, dan implikasinya terhadap risiko banjir pasang maupun abrasi pesisir perlu dikaji dengan mempertimbangkan faktor oseanografi, meteorologi, dan kondisi lokal pesisir lainnya.

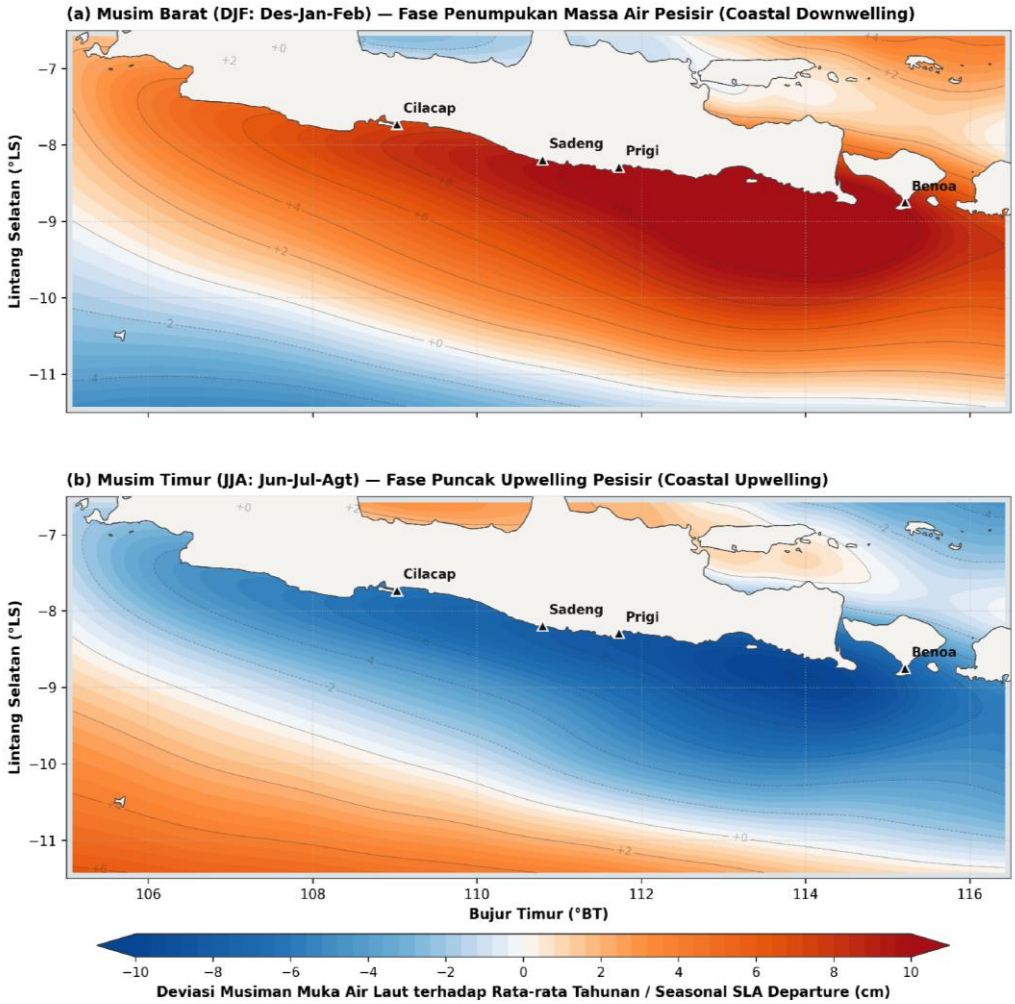
Untuk membahas temuan penelitian ini dalam konteks yang lebih luas, hasil estimasi laju kenaikan muka laut jangka panjang (4,30 ± 1,02 mm/tahun pada 1993–2026 dan 5,50 ± 2,19 mm/tahun pada 2006–2026) dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian terdahulu, baik di lokasi yang sama di sepanjang pantai selatan Jawa hingga Bali, maupun pada skala nasional Indonesia dan kawasan Asia Selatan/Samudra Hindia Utara.

Tabel 3. Parameter Statistik Komparasi Tren Kenaikan Muka Laut antara Satelit Altimetri dan Pasang Surut pada Periode Tumpang Tindih

Stasiun & Periode	N	r Pearson	RMSE (cm)	MAE (cm)	Tren TG (mm/th)	Tren Alt (mm/th)	Selisih (mm/th)
Prigi (2007–2026)	185	0,988	3,57	2,86	6,81 ± 4,96	6,27 ± 4,26	+0,54
Benoa (2006–2026)	203	0,986	2,99	2,41	6,60 ± 3,19	5,93 ± 2,76	+0,66
Sadeng (2008–2016)	87	0,979	4,18	3,17	-10,17 ± 16,29	-4,89 ± 13,74	-5,28
Cilacap (2007–2017)	124	0,986	3,86	3,17	12,15 ± 9,58	12,87 ± 7,73	-0,72
Cilacap (2018–2026)	85	0,978	4,65	3,69	36,62 ± 12,97	24,28 ± 11,05	+12,34

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

Penelitian terdahulu di selatan Pulau Jawa melaporkan nilai laju kenaikan muka laut yang sangat bervariasi bergantung pada durasi panjang data dan periode waktu pengamatan yang digunakan. Wuriatmo *et al*. (2012) mengevaluasi data altimetri TOPEX/Poseidon, Jason-1, dan Jason-2 periode 2000–2010 di Pangandaran (0,71 ± 0,33 mm/th), Yogyakarta (0,91 ± 0,38 mm/th), dan Prigi (1,30 ± 0,38 mm/th) dengan rata-rata selatan Jawa sebesar 0,97 ± 0,36 mm/tahun. Estimasi laju Wuriatmo *et al*. yang berada di bawah 1,5 mm/tahun tersebut jauh lebih rendah daripada temuan riset ini (4,30 mm/tahun). Perbedaan ini terjadi karena rentang observasi Wuriatmo *et al*. hanya mencakup 10 tahun pada era awal altimetri ketika laju akselerasi global belum mencapai puncak modernnya, serta periode tersebut diapit oleh fase relaksasi pasca-El Niño 1997/1998 yang menekan nilai kemiringan regresi. Sebaliknya, Limantara *et al*. (2013) melaporkan estimasi tren Jason-2 periode 2008–2012 di pesisir selatan Jawa sebesar +16,79 mm/tahun (Prigi +12,60 mm/th; Cilacap +23,04 mm/th) yang merupakan overestimasi ekstrem akibat rentang waktu observasi yang terlampau pendek (hanya 4 tahun). Data tersebut didominasi oleh kenaikan muka laut yang tinggi akibat anomali La Niña kuat 2010/2011. Hal ini menekankan pentingnya penggunaan data multi-dekade (>30 tahun) untuk menapis bias osilasi iklim antartahunan, sebagaimana diwujudkan dalam penelitian ini.



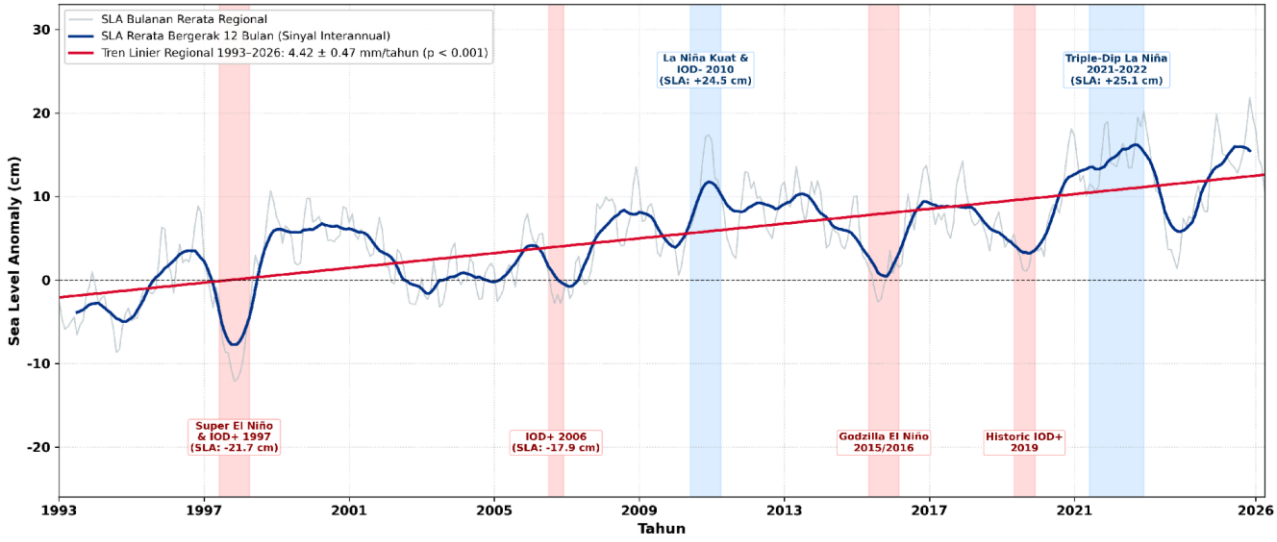
Gambar 7. Karakteristik Siklus Musiman dan Distribusi Spasial SLA Berdasarkan Musim Monsun Indonesia: Monsun Barat (DJF), Peralihan 1 (MAM), Monsun Timur (JJA), dan Peralihan 2 (SON)

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

Kajian kenaikan muka laut berbasis data stasiun pasang surut oleh Faridatunnisa dan Heliani (2018) di Prigi periode 1996–2015 melaporkan laju kenaikan gabungan sebesar 5,07 mm/tahun. Nilai ini sesuai dan berada dalam rentang estimasi altimetri jangka panjang pada penelitian ini di titik grid Prigi (4,36 ± 1,06 mm/tahun pada 1993–2026 dan 6,27 ± 4,26 mm/tahun pada periode tumpang tindih 2007–2026). Penelitian lainnya di stasiun Cilacap dan Benoa oleh Mansawan et al. (2016) menggunakan data pasang surut dan altimetri Envisat periode 2003–2014 dan menemukan tren sebesar ~3,5 mm/tahun. Nilai tren Mansawan et al. tersebut masih mencerminkan laju sekuler jangka panjang dan belum merekam penguatan laju kenaikan muka laut pada periode 2006–2026 yang teridentifikasi dalam penelitian ini, mengingat rekaman data mereka berakhir pada 2014 sebelum terjadinya kenaikan muka laut yang intensif pada paruh kedua periode dekadal tersebut. Sementara itu, kajian terkini oleh Hamdani et al. (2025) menggunakan data altimetri 1993–2022 di pesisir Pangandaran dan Yogyakarta melaporkan tren kenaikan berkisar antara 4,1 hingga 4,4 mm/tahun. Hasil Hamdani et al. tersebut menunjukkan kemiripan dengan temuan penelitian ini pada zona Jawa Barat (4,20 mm/th) dan Yogyakarta (4,53 mm/th), sekaligus mengonfirmasi stabilitas laju geosentris multi-dekade di perairan selatan Jawa.

Pada skala regional Indonesia secara umum, laju kenaikan muka laut rata-rata perairan Indonesia dilaporkan berkisar antara 3,5 hingga 4,5 mm/tahun (Sofian, 2010; Fenoglio-Marc, 2001; Lumban-Gaol *et al*., 2021). Tren jangka panjang perairan selatan Jawa hingga Bali (4,30 ± 1,02 mm/tahun) berada pada batas atas dari rentang nasional tersebut, sedangkan tren era akselerasi 2006–2026 (5,50 ± 2,19 mm/tahun) lebih tinggi daripada rata-rata perairan kepulauan Indonesia bagian dalam, seperti Laut Jawa dan Laut Flores yang umumnya berkisar 3,8–4,2 mm/tahun (Sofian, 2010; Han *et al*., 2022). Fenomena ini menegaskan bahwa perairan terbuka selatan Jawa yang berhadapan langsung dengan Samudra Hindia memiliki sensitivitas termosterik dan respons dinamis yang jauh lebih intensif terhadap redistribusi panas samudra dibandingkan perairan laut dangkal semi-tertutup di utara Jawa.

Dalam skala yang lebih luas, Han *et al*. (2022) mencatat bahwa di wilayah perairan Asia Tenggara yang dipengaruhi oleh sirkulasi monsun dan Arlindo, tren kenaikan muka laut berkisar sekitar 5,12 ± 0,17 mm/tahun pada periode 1993–2018. Selain itu, di perairan dekitar semenanjung Malaysia dan Selat Singapura tren kenaikan muka laut dilaporkan berkisar antara 3,2 hingga 4,6 mm/tahun (Luu *et al*., 2021). Untuk kawasan Samudra Hindia dan Asia Selatan, estimasi tren kenaikan muka laut jangka panjang berdasarkan altimetri dan rekonstruksi pasang surut umumnya dilaporkan berada pada kisaran 3,1 hingga 4,2 mm/tahun (Unnikrishnan *et al*., 2015; Swapna *et al*., 2017; Han *et al*., 2022).



Gambar 8. Hubungan Variabilitas Antartahunan Antara Anomali Muka Laut Regional terhadap Indeks ENSO (Niño 3.4) dan Indeks Indian Ocean Dipole (DMI) Periode 1993–2026

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

Perbandingan laju kenaikan muka laut dengan skala yang lebih besar menunjukkan perairan selatan Jawa dan Bali pada periode 2006–2026 (5,50 mm/tahun) mencerminkan kondisi regional '*hotspot*' kenaikan muka laut yang mengalami peningkatan di kawasan Indo-Pasifik. Kondisi ini memberikan peringatan bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan pesisir di sepanjang Jawa Barat, Jawa Tengah, D.I. Yogyakarta, Jawa Timur, dan Bali untuk mengantisipasi risiko genangan rob, kemunduran garis pantai akibat abrasi, dan intrusi air laut ke akuifer pesisir dalam rencana tata ruang wilayah (RTRW) pesisir 2026–2050 mendatang.

Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan pemahaman mengenai dinamika kenaikan muka laut regional yang mendukung kajian perubahan muka laut serta kerentanan pesisir. Namun, sebagaimana ditekankan oleh Lumban-Gaol *et al*. (2021), Sinurat *et al*. (2021), dan Sinurat *et al*. (2026), pemanfaatan data satelit altimetri di perairan Indonesia terutama di perairan pesisir masih menghadapi keterbatasan akurasi akibat kontaminasi sinyal daratan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengeksplorasi pemanfaatan produk altimetri pesisir untuk menghasilkan estimasi tren kenaikan muka laut jangka panjang yang lebih andal.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan empat temuan utama: (1) Laju kenaikan muka laut di sepanjang perairan selatan Jawa hingga Bali selama 33 tahun (1993–2026) bernilai positif di seluruh kawasan dengan rata-rata 4,30 ± 1,02 mm/tahun, dengan indikasi peningkatan laju pada periode 2006–2026 menjadi 5,50 ± 2,19 mm/tahun terutama di lepas pantai Jawa Tengah dan Jawa Barat; (2) Fluktuasi deret waktu SLA bulanan memperlihatkan koherensi spasial tinggi dengan rentang dinamika mencapai -21,74 cm hingga +25,14 cm; (3) Data satelit altimetri menunjukkan kesesuaian dan akurasi yang sangat tinggi terhadap stasiun pasang surut in-situ di Prigi dan Benoa ($r > 0,98$; RMSE < 3,6 cm; selisih tren < 0,7 mm/tahun), sedangkan perbedaan tren di Cilacap pasca-2017 (~12 mm/tahun) mengindikasikan adanya pengaruh *land subsidence* pada struktur dermaga pelabuhan; serta (4) Dinamika muka laut regional dikendalikan secara musiman oleh sistem angin monsun melalui mekanisme *upwelling/downwelling* susur pantai, dan secara antartahunan oleh kopel iklim ENSO dan IOD yang memicu anomali ekstrem saat kedua fenomena tersebut berada dalam fase aktif yang sefase. Temuan tingginya laju kenaikan dan kerentanan terhadap anomali iklim ekstrem ini menekankan pentingnya proyeksi dinamika muka laut regional ke dalam rencana tata ruang wilayah pesisir serta strategi adaptasi di sepanjang pesisir selatan Jawa dan Bali.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Copernicus Marine Service (CMEMS) atas penyediaan produk data altimetri multisatelit resolusi tinggi, University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC) atas penyediaan data rekaman stasiun pasang surut, serta NOAA Climate Prediction Center (CPC) atas penyediaan indeks iklim global ONI dan DMI.

DAFTAR PUSTAKA

Busoroh, M.A., & Panuntun, S. 2025. Spatial and temporal extraction of land deformation in Cilacap coastal area using Sentinel-1 SBAS-InSAR and GNSS CORS. *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 8(1): 12–23. DOI: 10.14710/elipsoida.2025.28688

Faridatunnisa, R., & Heliani, L.S. 2018. Long-term sea level trend and seasonal variation from tide gauge observation in Prigi Bay, East Java. In: *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, Yogyakarta, Indonesia, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICSTC.2018.8528668

Fenoglio-Marc, L. 2001. Analysis and representation of multi-satellite altimetry sea level data in the Mediterranean and Southeast Asian Seas. *Marine Geodesy*, 24(4): 269–286. DOI: 10.1080/014904101753361637

Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S.S., Edwards, T.L., Golledge, N.R., Hemer, M., Kopp, R.E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I.S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A.B.A., & Yu, Y. 2021. Ocean, cryosphere and sea level change. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1211–1362. DOI: 10.1017/9781009157896.011

Guérou, P., Meyssignac, B., Prandi, P., Ablain, M., & Ribes, A. 2023. Detecting the sea level rise acceleration in the presence of internal climate variability. *Ocean Science*, 19(2): 273–290. DOI: 10.5194/os-19-273-2023

Hamdani, A., Heliani, L.S., & Widjajanti, N. 2025. Spatial and temporal analysis of sea level rise and land subsidence using multi-mission satellite altimetry and continuous GNSS in Java coastal region. *Marine Geodesy*, 48(1): 45–68. DOI: 10.1080/01490419.2024.2389102

Hamlington, B.D., Gardner, A.S., Ivins, E., Lenaerts, J.T., Reager, J.T., Trossman, D.S., Zlotnicki, V., Fasullo, J.T., Swenson, F.D., Cheon, J., & Willis, J.K. 2020. Understanding of contemporary regional sea-level change and the implications for the future. *Reviews of Geophysics*, 58(3): e2019RG000672. DOI: 10.1029/2019RG000672

Han, G., Ma, Z., & Chen, N. 2022. Coastal sea level change in the Southeast Asian Seas from satellite altimetry and tide gauges. *Remote Sensing of Environment*, 274: 112993. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112993

Kamp, M., Becker, M., & Fenoglio, L. 2024. Absolute and relative sea level changes from satellite altimetry, tide gauges, and GNSS in the Indonesian Archipelago. *Journal of Geodesy*, 98(4): 32. DOI: 10.1007/s00190-024-01842-8

Limantara, B.R., Prasetyo, Y., & Haniah, H. 2013. Analisis kenaikan muka air laut di perairan Pulau Jawa menggunakan data satelit altimetri Jason-2 tahun 2008–2012. *Jurnal Geodesi UNDIP*, 2(4): 112–122. DOI: 10.14710/jgundip.2013.3703

Lumban-Gaol, J., Vignudelli, S., Nurjaya, I.W., Natih, N.M.N., Sinurat, M.E., Osawa, T., & Pasaribu, B. 2021. Evaluation of altimetry satellite data products and sea level trends in the Indonesian Maritime Continent. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 944(1): 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/944/1/012028

Lumban-Gaol, J., Sri Sumantyo, J.T., Tambunan, E., Situmorang, D., Sinurat, M.E., Suhita, N.P.A.R., Osawa, T., & Arhatin, R.E. 2024. Sea level rise, land subsidence, and flood disaster vulnerability assessment: A case study in Medan City, Indonesia. *Remote Sensing*, 16(5): 817. DOI: 10.3390/rs16050817

Luu, Q.H., Tkalich, P., & Tay, T.W. 2021. Sea level trend and variability around Peninsular Malaysia and the Singapore Strait from satellite altimetry and tide gauges. *Ocean Science*, 17(3): 699–715. DOI: 10.5194/os-17-699-2021

Mansawan, A.A., Lumban-Gaol, J., & Panjaitan, J.P. 2016. Variation and trend of sea level derived from altimetry satellite and tide gauge in Cilacap and Benoa coastal areas. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 13(1): 19–28. DOI: 10.30536/ijreses.v13i1.13889

Meyers, G. 1996. Variation of Indonesian Throughflow and the El Niño–Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12255–12263. DOI: 10.1029/95JC03729

Munandar, B., Arifa, A.N., Lukman, A.A., Wirasatriya, A., & Wijaya, Y.J. 2026. Drivers of elevated chlorophyll-a in Lumajang waters: A comparative analysis of upwelling and terrestrial runoff mechanisms. *Geographia Technica*, 21(1): 205–217. DOI: 10.21163/GT_2026.211.14

Nerem, R.S., Beckley, B.D., Fasullo, J.T., Hamlington, B.D., Masters, D., & Mitchum, G.T. 2018. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(9): 2022–2025. DOI: 10.1073/pnas.1717312115

NOAA Laboratory for Satellite Altimetry. 2026. Global mean sea level from satellite altimetry. NOAA Center for Satellite Applications and Research (STAR), Laboratory for Satellite Altimetry, dataset. Available at: https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/. Accessed 31 October 2026.

Quadfasel, D., & Creswell, G.R. 1992. A note on the seasonal variability of the South Java Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C3): 3685–3688. DOI: 10.1029/91JC03056

Saji, N.H., Goswami, B.N., Vinayachandran, P.N., & Yamagata, T. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751): 360–363. DOI: 10.1038/43854

Santer, B.D., Wigley, T.M., Boyle, J.S., Gaffen, D.J., Hnilo, J.J., Nychka, D., Parker, D.E., & Taylor, K.E. 2000. Accounting for the effects of data correlation on trend detection. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D2): 2259–2279. DOI: 10.1029/1999JD900344

Sasmito, B. 2020. Kajian dinamika pasang surut pantai selatan Pulau Jawa dengan data altimetri. *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 3(1): 80–86. DOI: 10.14710/elipsoida.2020.7751

Sinurat, M.E., Nababan, B., Lumban-Gaol, J., Manik, H.M., & Idris, N.H. 2021. Waveform classification and retracking of Jason-2 and Jason-3 in Halmahera Sea. *Jurnal Teknologi*, 83(6): 131–141. DOI: 10.11113/jurnalteknologi.v83.16782

Sinurat, M.E., Lumban-Gaol, J., Nababan, B., Manik, H.M., Idris, N.H., & Vignudelli, S. 2026. Evaluation of re-tracked coastal sea levels of Jason-2 across various Indonesian regional seas. *International Journal of Remote Sensing*, 47(3): 780–804. DOI: 10.1080/01431161.2025.2449120

Sofian, I. 2010. Fenomena kenaikan muka laut di Indonesia berdasarkan data altimetri satelit dan kaitannya dengan fenomena iklim global. *Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 6(2): 89–98. DOI: 10.24895/JGG.2010.6-2.128

Sprintall, J., Chong, J.C., Syamsudin, F., Morawitz, W., Ferrari, S., Arifin, N., & Webster, P.J. 1999. Dynamics of the South Java Current: Upper ocean heat and freshwater budgets. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C11): 25845–25860. DOI: 10.1029/1999JC900223

Swapna, P., Ravichandran, M., Nidheesh, A.G., Jyoti, J., Sandeep, N., & Deepa, J.S. 2017. Sea level rise and variability in the Indian Ocean: A review. *Earth-Science Reviews*, 171: 188–202. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.06.002

Syamsudin, F., Kaneko, A., & Haidvogel, D.B. 2004. Numerical investigation of internal Kelvin waves generated by the Wyrtki Jets in the tropical Indian Ocean. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 38(3–4): 129–147. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2004.09.001

Undap, M.W.B.W., Suryoputro, A.A.D., & Wirasatriya, A. 2023. Strong negative Indian Ocean Dipole phenomenon in 2016 reduce the upwelling intensity along the seas of Southern Java. *Journal of Marine Research*, 12(3): 412–422. DOI: 10.14710/jmr.v12i3.38912

Unnikrishnan, A.S., Nidheesh, A.G., & Lengaigne, M. 2015. Sea-level-rise trends off the Indian coasts during the last two decades. *Current Science*, 108(5): 966–971.

Veng, T., & Andersen, O.B. 2021. Consolidating sea level acceleration estimates from satellite altimetry. *Advances in Space Research*, 68(2): 496–503. DOI: 10.1016/j.asr.2020.01.016

Wijffels, S., & Meyers, G. 2004. An intersection of oceanic waveguides: Variability in the Indonesian Throughflow region. *Journal of Physical Oceanography*, 34(5): 1232–1253. DOI: 10.1175/1520-0485(2004)034<1232>2.0.CO;2

World Meteorological Organization. 2017. *WMO guidelines on the calculation of climate normals*. WMO-No. 1203. World Meteorological Organization, Geneva. ISBN: 978-92-63-11203-3.

Wuriatmo, H., Koesuma, S., & Yunianto, M. 2012. Studi penentuan tren kenaikan muka air laut di perairan selatan Pulau Jawa menggunakan data satelit altimetri TOPEX/Poseidon, Jason-1, dan Jason-2 periode 2000–2010. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 2(2): 134–142. DOI: 10.13057/ijap.v2i2.1296

Wyrtki, K. 1973. An equatorial jet in the Indian Ocean. *Science*, 181(4096): 262–264. DOI: 10.1126/science.181.4096.262

Yuliardi, A.Y., Atmadipoera, A.S., Harsono, G., Natih, N.M.N., & Ando, K. 2021. Analysis of characteristics and turbulent mixing of seawater mass in Lombok Strait. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 26(2): 95–109. DOI: 10.14710/ik.ijms.26.2.95-109

Yuliardi, A.Y., Napitupulu, G., Rachman, H.A., Prayogi, H., Joesidawati, M.I., & Prasita, V.D. 2025a. Spatiotemporal analysis of sea surface temperature and chlorophyll-a variability under ENSO-IOD influence in the Southern Madura Strait, Indonesia. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 47(4): 542–564. DOI: 10.15625/2615-9783/23665

Yuliardi, A.Y., Napitupulu, G., Heltria, S., Khaldun, M.H.I., Putra, M.G.A., & Suhanda, D. 2025b. Hydrographic responses to Indian Ocean Dipole events in a semi-enclosed tropical bay: A case

Journal of Marine Research Vol 15, No. 4 November 2026, pp. 747-764

study from Lampung Bay, Indonesia. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, 41(2): 512–526. DOI: 10.1007/s41208-025-00985-2