

Analisis Anomali Kenaikan Muka Air Laut Perairan Selatan Utara Jawa Tahun 1993-2022

Yiyi Muhidin Sarip Hamdani^{1*}, Ayang Armelita Rosalia¹, Suaydhi²

¹Program Studi Sistem Informasi Kelautan, Universitas Pendidikan Indonesia
Jl. Dr. Setiabudi No.229, Isola, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40154 Indonesia

²Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Jl. Sangkuriang, Dago, Kec. Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40135 Indonesia
Corresponding author, e-mail: yiyihamdani@upi.edu

ABSTRAK: Fluktuasi muka air laut dan hubungan antara SOI dengan SLA di wilayah pesisir Indonesia, khususnya di perairan utara selatan Jawa, selama periode 1993-2022 menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Masalah yang diangkat adalah bagaimana fluktuasi SLA di pengaruhi oleh fenomena iklim, seperti El Niño dan La Niña, serta hubungan dengan SOI di wilayah tersebut. Penelitian ini menggunakan data satelit altimetri dan pendekatan statistik untuk mengevaluasi korelasi antara SLA dan SOI. Hasil penelitian menunjukkan fluktuasi SLA lebih ekstrem di perairan selatan Jawa, dengan tren penurunan SLA tahunan di Pangandaran (-8,70 cm/tahun) dan Yogyakarta (-11,61 cm/tahun), sedangkan di Jakarta dan Semarang terdapat tren kenaikan SLA masing-masing sebesar 4,33 cm/tahun dan 1,08 cm/tahun. Fenomena El Niño menyebabkan penurunan SLA, terutama di perairan selatan Jawa, sedangkan La Niña meningkatkan SLA di seluruh lokasi yang diteliti. Korelasi antara SOI dan SLA bervariasi, dengan nilai korelasi 0,44 di Pangandaran; 0,43 di Yogyakarta; 0,32 di Jakarta dan 0,30 di Semarang. Signifikansi statistik dari hubungan ini menunjukkan p-value sebesar 0,00 yang berarti hubungan antara SOI dan SLA tidak terjadi secara kebetulan.

Kata kunci: ENSO; Pulau Jawa; Satelit Altimetri; Sea Level Anomaly

Analysis of Sea Level Rise Anomalies in the Southern and Northern Waters of Java (1993-2022)

ABSTRACT: level fluctuations and the relation between the Southern Oscillation Index (SOI) and SLA in coastal areas of Indonesia, especially in the waters north and south of Java, during the period 1993-2022 are the main focus of this study. The problem raised is how SLA fluctuations are affected by climate phenomena, such as El Niño and La Niña, and the relationship with SOI in the region. This study uses altimetry satellite data and statistical approaches to evaluate the correlation between SLA and SOI. The results show that SLA fluctuations are more extreme in the southern waters of Java, with a downward trend in annual SLA in Pangandaran (-8.70 cm/year) and Yogyakarta (-11.61 cm/year), while in Jakarta and Semarang there is an upward trend in SLA of 4.33 cm/year and 1.08 cm/year, respectively. The El Niño phenomenon causes a decrease in SLA, especially in the southern waters of Java, while La Niña increases SLA in all locations studied. The correlation between SOI and SLA varied, with correlation values of 0.44 in Pangandaran, 0.43 in Yogyakarta, 0.32 in Jakarta, and 0.30 in Semarang. The statistical significance of this relationship shows a p-value of 0.00, which means that the relation between SOI and SLA does not occur by chance.

Keywords: Altimetry Satellite; ENSO; Java Island; Sea Level Anomaly

PENDAHULUAN

Pemanasan global merupakan salah satu isu lingkungan signifikan yang dihadapi secara global, yang ditandai oleh peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan sebagai gejala dari perubahan iklim (Suryantoro, 2009). Perubahan iklim ini mempengaruhi berbagai aspek kehidupan,

termasuk kondisi lingkungan di wilayah pesisir Indonesia yang sangat rentan terhadap dampaknya (Triana & Wahyudi, 2020). Indonesia, sebagai negara kepulauan yang memiliki 70% wilayah laut, menghadapi ancaman nyata berupa kenaikan muka air laut, yang berpotensi merusak ekosistem pesisir dan mempengaruhi kehidupan masyarakat yang bergantung pada sumber daya alam pesisir (Nadya & Salim, 2023).

Data terbaru menunjukkan bahwa antara 15 Januari 1993 hingga 16 Januari 2024, permukaan laut global telah meningkat sekitar 0,1 meter, dengan rata-rata kenaikan sebesar 3,3 mm per tahun (Houston, 2024). Kenaikan suhu air laut yang signifikan juga mempengaruhi sektor perikanan, meningkatkan intensitas badai, serta memicu pergeseran ekosistem yang merugikan (Kaczan *et al.*, 2024). Wilayah pesisir, yang memiliki peran penting dalam kehidupan manusia, menghadapi ancaman serius akibat perubahan ini (Humana *et al.*, 2018; Ahmad *et al.*, 2021). Dampaknya meliputi banjir rob, erosi, sedimentasi, serta kerusakan ekosistem mangrove (Marfai, 2012). Selain itu, penurunan muka tanah menjadi faktor signifikan yang semakin memperbesar ancaman kenaikan muka air laut (Nadya & Salim, 2023).

Salah satu indikator yang digunakan dalam mengukur perubahan muka air laut adalah *Sea Level Anomaly* (SLA), yaitu penyimpangan tinggi permukaan laut yang terjadi di atas rata-rata normalnya (Marpaung & Harsanugraha 2014). Penelitian mengenai kenaikan muka air laut di perairan Indonesia telah banyak dilakukan dengan berbagai metode dan periode pengamatan. Handoko *et al.* (2019b) mencatat bahwa pada periode 1993–2018, terjadi kenaikan rata-rata muka air laut di perairan Indonesia sebesar 4,6 mm/tahun atau setara dengan 0,46 cm/tahun. Penelitian lain oleh Cahyadi *et al.* (2016) mengamati variasi SLA di perairan Semarang dan menemukan nilai SLA tertinggi sebesar 0,38 m, dengan rata-rata kenaikan muka air laut sebesar 12,83 mm/tahun selama periode 2009–2011.

Sulaiha *et al.* (2020) mencatat tren kenaikan SLA di Laut Jawa bagian utara dan selatan sebesar 4,1 mm/tahun selama periode 2002–2019. Penelitian Khasanah *et al.* (2019) menemukan variasi anomali muka air laut di perairan selatan Jawa sebesar 13,1 cm, sedangkan di perairan utara Jawa sebesar 14,68 cm. Selain itu, Nurlatifah *et al.* (2021) menganalisis pola musiman muka permukaan laut di perairan selatan Jawa pada periode 1993–2018, dengan permukaan laut mencapai maksimum hingga 0,93 m. Penelitian yang sama menunjukkan adanya hubungan antara *Southern Oscillation Index* (SOI) dan SLA di perairan selatan Jawa, dengan nilai korelasi yang menunjukkan hubungan positif meskipun dengan intensitas yang lemah tetapi signifikan secara statistik.

Salah satu faktor yang mempengaruhi fluktuasi muka air laut adalah fenomena El Niño dan La Niña yang tercermin dalam perubahan tekanan atmosfer, yang dikenal dengan *Southern Oscillation Index* (SOI). Variabilitas SOI mempengaruhi pola cuaca regional yang pada gilirannya berkontribusi pada fluktuasi muka air laut. Namun, banyak penelitian yang telah mengkaji hubungan antara SOI dan fenomena El Niño dan La Niña, masih jarang ditemukan studi yang menghubungkan SOI dengan perubahan muka air laut di kawasan pesisir Indonesia dalam jangka panjang. Sebagian besar studi sebelumnya berfokus pada analisis global atau pendekatan bersifat jangka pendek. Dalam konteks Indonesia, meskipun beberapa penelitian di wilayah utara dan selatan Jawa, data masih terbatas dalam cakupan waktu analisis.

Seiring dengan kemajuan teknologi satelit, data altimetri telah memungkinkan pengukuran kenaikan muka air laut dengan tingkat presisi yang lebih tinggi dan cakupan waktu yang lebih luas. Era satelit telah menyediakan data yang memungkinkan pemantauan perubahan permukaan laut secara lebih akurat selama beberapa dekade terakhir (Nerem *et al.*, 2010). Selain itu, data altimetri menunjukkan bahwa variasi permukaan laut tahunan serta peristiwa besar seperti El Niño dan La Niña menyebabkan penyimpangan positif atau negatif, dimana di Asia Tenggara dapat mencapai 40 cm (Bott *et al.*, 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fluktuasi muka air laut serta hubungan antara SOI dan *Sea Level Anomaly* (SLA) wilayah pesisir Indonesia, khususnya perairan utara dan selatan Jawa, selama periode 1993–2022 dalam jangka panjang menggunakan satelit altimetri, serta penggunaan pendekatan statistika untuk mengevaluasi korelasi dan signifikansi antara SOI dan SLA. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap

pemahaman yang lebih baik mengenai dinamika kenaikan muka air laut dan dampaknya terhadap wilayah pesisir Indonesia, serta mendukung upaya mitigasi dan adaptasi dalam menghadapi perubahan iklim.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di perairan pesisir utara dan selatan Jawa, dengan sembilan titik koordinat pengambilan sampel yang tersebar di empat lokasi. Lokasi penelitian di perairan utara mencakup Jakarta dan Semarang, sedangkan perairan selatan mencakup Pangandaran dan Yogyakarta. Setiap kota di pilih berdasarkan representasi masing-masing pesisir, dengan titik-titik koordinat spesifik untuk memastikan cakupan data. Gambar 1 menggambarkan lokasi penelitian dengan titik koordinat sampel yang tersebar di perairan utara dan selatan Jawa.

Dalam penelitian data yang digunakan yaitu data anomali permukaan laut untuk lokasi penelitian di ekstrak dari kumpulan data global berasal dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (ECMWF), berupa data berkisi (*data gridded*) dengan resolusi spasial $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ dalam interval bulanan. Data ini mencakup periode dari tahun 1933 sampai 2022 dan dapat di akses melalui laman (<https://cds.climate.copernicus.eu/>). Data *Southern Oscillation Index* (SOI) dalam skala bulanan digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari *Physical Science Laboratory* (PSL) *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), yang tersedia secara terbuka di laman (<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/month/SOI>).

Peralatan untuk mendukung pengumpulan, pengolahan dan analisis data meliputi perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat lunak yang digunakan meliputi Python dan Spreadsheet, dimana Python digunakan untuk membaca, mengolah dan menganalisis data dalam format NetCDF serta membuat visualisasi menggunakan pustaka Pandas, Numpy, Mathplotlib, dan Cartopy. Sementara itu, Spreadsheet digunakan untuk pengolahan data awal, penyusunan tabel dan analisis sederhana yang mempermudah integrasi data sebelum diolah lebih lanjut. Data anomali permukaan laut yang telah di peroleh dan dihitung berdasarkan selisih antara tinggi muka air laut dan permukaan rata rata dengan persamaan (1).

$$SLA_N = SSH - MSS_N \quad (1)$$

Keterangan: SLA_N = Anomali permukaan laut; SSH = Tinggi muka air laut; MSS_N = Permukaan laut rata-rata

Pengolahan data dilakukan dalam berbagai tahapan; pertama, data masing-masing titik koordinat yang telah dilakukan dibersihkan (*cleansing*) untuk memastikan kualitas data yang akan digunakan; kedua, dilakukan perhitungan rata-rata SLA untuk setiap koordinat secara terpisah; terakhir, hasil rata-rata sembilan titik koordinat tersebut digabungkan dengan menghitung rata-rata keseluruhan untuk mendapatkan representasi rata-rata SLA gabungan. Dalam analisis ini, tingkat kesalahan (*error*) dihitung menggunakan persamaan yang menggambarkan selisih antara nilai hasil perhitungan dengan nilai referensi atau data sebenarnya (Lee *et al.*, 2015). Analisis korelasi antara SOI dan SLA dihitung dengan menggunakan persamaan (4) (Wedangga *et al.*, 2022). Interpretasi koefisien korelasi didasarkan pada Tabel 1 interpretasi koefisien korelasi.

$$\text{Standard Deviasi (SD)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (2)$$

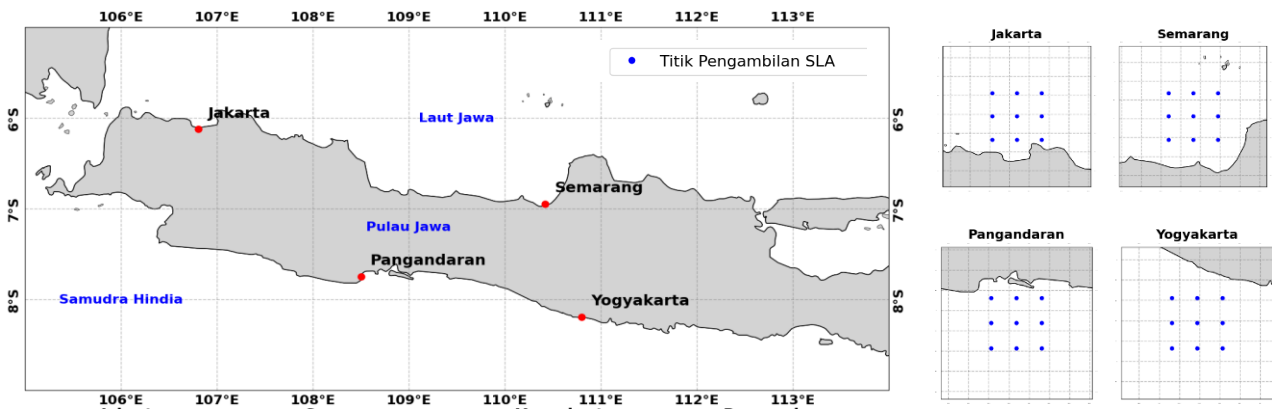
Keterangan: $\bar{x}$ = nilai rata-rata SLA; x_i = nilai SLA dari data satelit pada waktu tertentu; n = jumlah variabel SLA; $n-1$ = koreksi bias pada data sampel

$$\text{Standard Error} = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Keterangan: SD = Standard Deviasi SLA; n = jumlah variabel SLA.

Tabel 1. Interpretasi Koefisien Korelasi (Prasetyo *et al.*, 2021)

Interval Koefisien Korelasi		Keterangan
Positif	Negatif	
0,000 s.d 0,199	-0,199 s.d -0,000	Sangat Lemah
0,200 s.d 0,399	-0,399 s.d -0,200	Lemah
0,400 s.d 0,599	-0,599 s.d -0,400	Cukup Kuat
0,600 s.d 0,799	-0,799 s.d -0,600	Kuat
0,800 s.d 1,000	-1,000 s.d -0,800	Sangat Kuat

**Gambar 1.** Peta Lokasi Penelitian

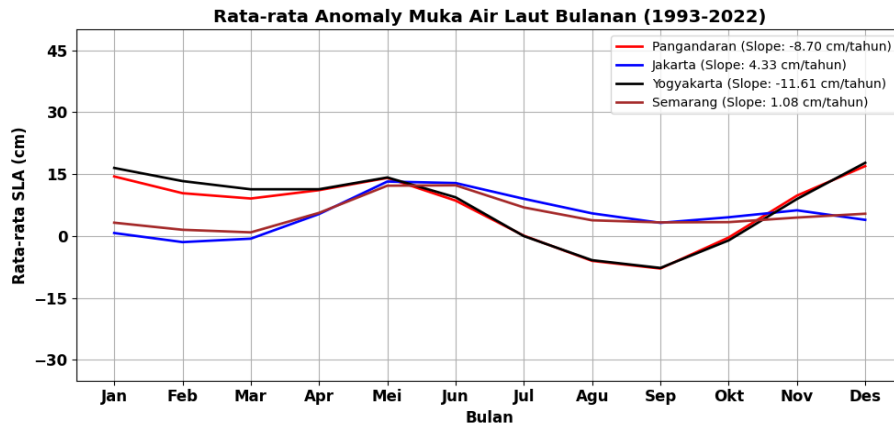
$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sqrt{(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n})(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n})}} \quad (4)$$

Keterangan: x = nilai variabel SLA; y = nilai variabel SOI; n = jumlah variabel

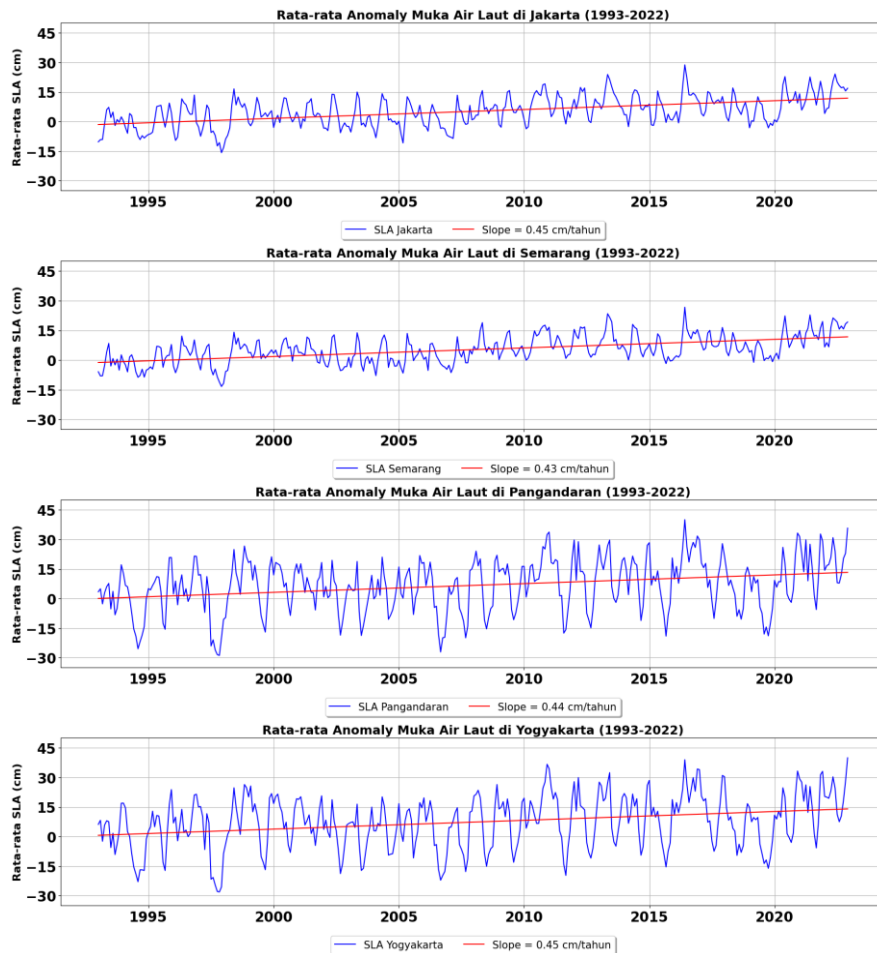
Penelitian ini dibatasi pada analisis anomali kenaikan muka air laut di Perairan Utara dan Selatan Pulau Jawa berdasarkan data altimetri dari tahun 1993 hingga 2022. Fokus analisis hanya mencakup *Sea Level Anomaly* (SLA) di lokasi yang telah ditentukan, yaitu Jakarta, Semarang, Yogyakarta, dan Pangandaran, dengan memperhatikan tren kenaikan tahunan serta nilai SLA tertinggi dan terendah pada periode tersebut. Penelitian ini tidak mencakup analisis faktor meteorologis, oseanografi, atau antropogenik lain yang mungkin memengaruhi kenaikan muka air laut, serta tidak dilakukan uji statistik normalitas untuk data trend.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Permukaan laut di berbagai dunia menunjukkan siklus musiman, dan besarnya variasi musiman dapat sangat bervariasi berdasarkan dinamika pesisir dan faktor atmosfer lainnya (Akhter *et al.*, 2021). Fluktuasi musiman SLA terlihat di semua lokasi penelitian (Jakarta, Semarang, Pangandaran dan Yogyakarta) selama periode 1993-2022. Tren penurunan SLA tahunan ditemukan di perairan selatan Jawa, yaitu Pangandaran (-8,70 cm/tahun) dan Yogyakarta (-11,61 cm/tahun). Sebaliknya, perairan utara Jawa, seperti Jakarta dan Semarang menunjukkan tren kenaikan SLA masing-masing sebesar 4,33 cm/tahun dan 1,08 cm/tahun.



Gambar 2. Rata-rata Anomlay Muka Air Laut Bulanan (1993-2022)



Gambar 3. Rata-rata Anomlay Muka Air Laut (1993-2022); (a) Jakarta; (b) Semarang; (c) Pangandaran; (d) Yogyakarta

Fluktuasi musiman memperlihatkan pola konsisten di kedua perairan. Perairan utara Jawa (Jakarta, Semarang) menunjukkan minimum SLA terjadi pada Agustus/September, sementara maksimum SLA tercatat pada Desember/Januari. Penelitian Khasanah *et al.* (2019) menunjukkan

bahwa pada bulan Mei-Oktober, anomali ketinggian permukaan laut di wilayah pesisir utara Jawa lebih tinggi dibandingkan daerah lepas pantai akibat dominasi angin timur. Sebaliknya, pada bulan November-April, anomali ketinggian permukaan laut di daerah lepas pantai lebih tinggi dibandingkan wilayah pesisir, mencerminkan adanya pola sirkulasi musiman yang khas.

Perairan selatan Jawa (Pangandaran, Yogyakarta) memperlihatkan adanya pola *semi-annual* lebih dominan, dengan dua titik minimum pada Februari/Maret dan Agustus/September, serta puncak maksimum pada Mei/Juni dan November/Desember. Pola ini konsisten dengan temuan Nababan *et al.* (2015), yang mengamati fluktuasi ganda tahunan di perairan ini. Mekanisme lokal, seperti arus Samudera Hindia dan *upwelling* di selatan Jawa, serta musim dan arah angin yang membawa massa air, berkontribusi signifikan pada fluktuasi anomali ketinggian permukaan laut di bagian selatan Jawa (Khasanah *et al.*, 2019). Fluktuasi ini terutama terjadi selama musim JJA (Juni-Agustus) dan SON (September-November), ketika pengaruh angin muson timur memperkuat proses *upwelling*. Hasil ini mendukung temuan Nurlatifah *et al.* (2021), yang mencatat bahwa pesisir selatan Jawa lebih sensitif terhadap dinamika oseanografi dibandingkan dengan pesisir utara. Selain itu, penelitian Nababan *et al.* (2015) mencatat anomali SLA pada Oktober 1997 dengan penurunan minimum sebesar -30,27 cm di selatan Jawa. Gambar 3 memperlihatkan rata-rata SLA bulanan, mengkonfirmasi pola yang serupa di semua lokasi.

Kenaikan rata-rata SLA di lokasi penelitian sebesar 0,43-0,45 cm/tahun sejalan dengan temuan Gaol *et al.* (2021), yang melaporkan kenaikan muka air laut di perairan Indonesia sebesar 4,3 mm/tahun (0,43 cm/tahun) untuk periode 1993-2018. Selain itu, temuan Sulaiha *et al.* (2022) selama periode 2002-2019 menunjukkan bahwa SLA naik di pesisir utara dan selatan Jawa sebesar 4,1 mm/tahun. Perairan selatan Jawa, yang lebih dekat dengan Samudera Hindia, mengalami fluktuasi SLA yang lebih ekstrim, sebagaimana tercermin dari standar deviasi SLA tertinggi di Pangandaran (13,31 cm) dan Yogyakarta (15,53 cm). Sebaliknya, stabilitas relatif terlihat di perairan utara Jawa, dengan standar deviasi lebih rendah di Semarang (6,97 cm) dan Jakarta (7,65 cm). Dinamika ini menunjukkan bahwa perairan selatan lebih dipengaruhi oleh proses oseanografi besar, sementara perairan utara cenderung lebih stabil akibat lokasinya yang terlindung dari pengaruh langsung Samudra Hindia. Tabel 3 merangkum nilai maksimum-minimum SLA di empat lokasi serta nilai standar deviasi.

Variabilitas iklim internal, seperti El Niño *Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD), memainkan peran signifikan dalam fluktuasi SLA di perairan Jawa. Pada tahun-tahun dengan peristiwa ENSO/IOD kuat, seperti 1997-1998 (El Niño kuat) dan 2016 (La Niña cukup kuat), pengaruh fenomena ini tercermin jelas pada SLA. Pada November 1997, yang bertepatan dengan fase IOD negatif, terjadi SLA negatif di seluruh perairan, terutama di selatan Jawa, dengan nilai minimum di Pangandaran (-28,83 cm) dan Yogyakarta (-28,08 cm), sebagaimana ditunjukkan oleh Tabel 3. Gambar 4 visualisasi SLA untuk November 1997 menunjukkan dominasi warna biru di perairan selatan Jawa, mencerminkan penurunan permukaan laut yang signifikan akibat *upwelling* yang dipicu oleh dinamika El Niño dan IOD. Penelitian Idris (2002) dalam penelitian Mujadida *et al.* (2021), mencatat akibat terjadinya El Niño adanya penurunan muka air Laut Jawa akibat pergerakan arus dari Samudera Pasifik bagian Barat ke Timur mengakibatkan elevasi muka laut Samudera Pasifik bagian barat akan menurun. Pada tahun La Niña 2016, terjadi peningkatan SLA maksimum di seluruh lokasi. Pangandaran mencatat SLA tertinggi sebesar +40,04 cm, diikuti Yogyakarta (+39,00 cm), Jakarta (+28,78 cm), dan Semarang (+26,71 cm). Visualisasi SLA untuk Juni 2016 memperlihatkan dominasi warna merah di perairan selatan Jawa, mencerminkan peningkatan permukaan laut yang signifikan. Kenaikan ini kemungkinan dipengaruhi oleh peningkatan curah hujan, pelemahan arus *upwelling*, serta mekanisme regional yang menahan massa air di perairan selatan selama fase La Niña.

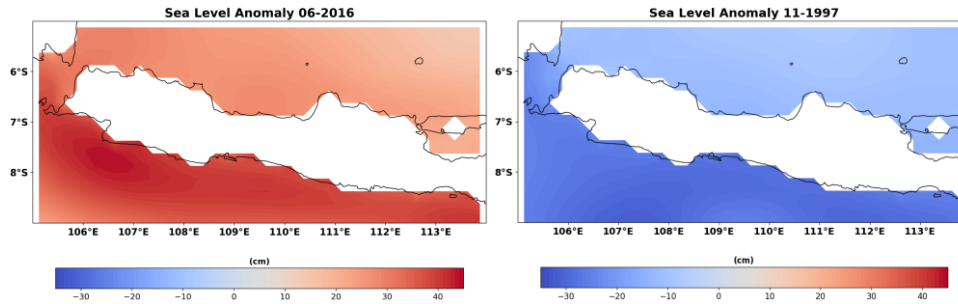
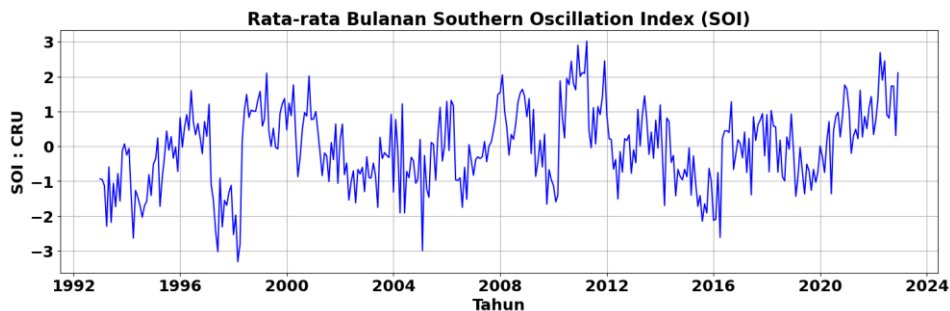
Rata-rata bulanan SOI selama periode 1993–2022 menunjukkan fluktuasi, mencerminkan variabilitas tekanan atmosfer di kawasan tropis. Nilai SOI negatif (SOI-) mengindikasikan fenomena El Niño, sedangkan nilai SOI positif (SOI+) merepresentasikan La Niña. Fluktuasi bulanan SOI memperlihatkan pola musiman yang konsisten. Nilai SOI minimum terjadi pada periode Mei hingga Juli, sementara maksimum cenderung tercatat pada Desember hingga Februari.

Tabel 2. Tahun kejadian ENSO/IOD 1990-2018

	El Niño	ENSO	La Niña
+IOD	1992	1996	1998; 2010; 2016
Tidak ada IOD	1991; 2022, 2004	1990; 1995; 2001; 2003; 2005	1999; 2000
-IOD	1994; 1997; 2006; 2015		2007; 2008

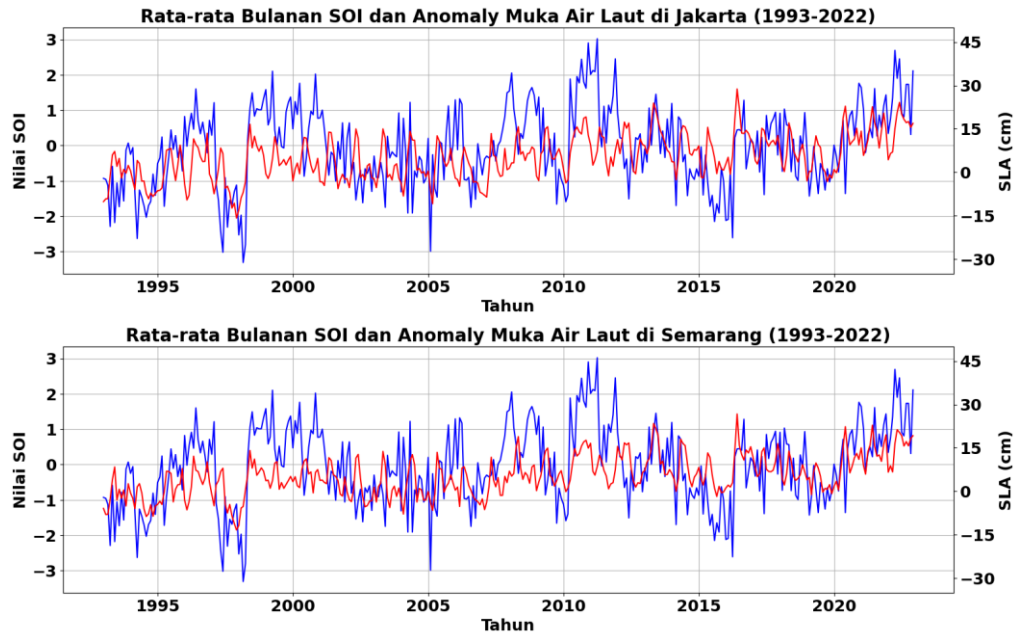
Keterangan : Tahun El-Nino dan La-Nina kuat ditunjukkan dengan huruf “**Tebal**”

Sumber : *Golden Gate Weather Service* dan Akhter *et al.* (2021).

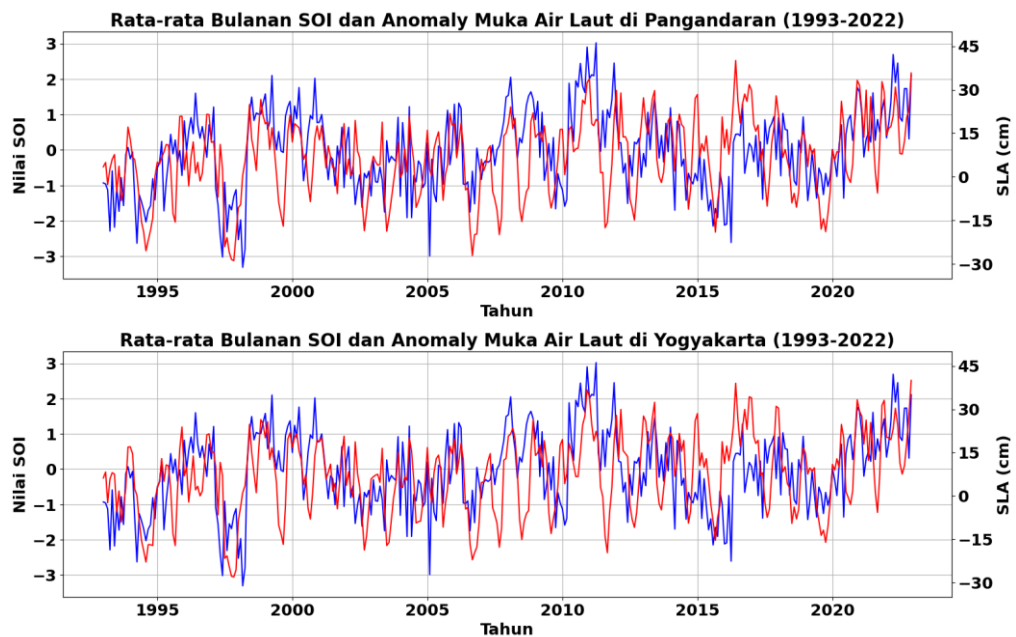
**Gambar 4.** Visualisasi Spasial *Sea Level Anomaly* Jawa; (a) Juni 2016; (b) November 1997**Gambar 5.** Rata-rata Bulanan Southern Oscillation Index (SOI)

Pada tahun-tahun El Niño kuat, seperti 1994, 1997, dan 2006, di mana nilai SOI berada di bawah -1, SLA menunjukkan penurunan signifikan dibandingkan dengan tahun-tahun normal. Sebaliknya, pada tahun-tahun La Niña kuat, seperti 2010–2011, nilai SOI positif maksimum (di atas +2) berkontribusi pada peningkatan SLA yang signifikan. Pola fluktuasi SOI ini secara langsung mempengaruhi SLA di perairan Jawa. Fenomena SOI negatif biasanya menyebabkan penurunan SLA (1997–1998), sedangkan SOI positif mendorong peningkatan SLA (2010–2011). Hal ini menguatkan pengaruh SOI terhadap variabilitas SLA regional, terutama di perairan utara dan selatan Jawa. Gambar 5 memperlihatkan fluktuasi rata-rata bulanan SOI dari 1993 hingga 2022, dengan nilai minimum terjadi pada periode El Niño kuat (1997-1998) dan nilai maksimum pada periode La Niña (2010-2011).

Secara umum, terdapat pola yang menunjukkan hubungan yang erat antara nilai SOI dan SLA. Ketika SOI mencapai nilai positif tinggi (La Niña), SLA di Jakarta dan Semarang cenderung meningkat. Sebaliknya, ketika SOI bernilai negatif (El Niño), SLA di kedua lokasi mengalami penurunan. Di Jakarta, SLA berfluktuasi dalam rentang -20 cm hingga +35 cm. Pada tahun 2016, SLA mencapai puncak sekitar +28,78 cm, yang bertepatan dengan nilai SOI tinggi selama La Niña.



Gambar 6. Rata-rata Bulanan SOI dan SLA 1993-2022; (a) Jakarta; (b) Semarang



Gambar 7. Rata-rata Bulanan SOI dan SLA 1993-2022; (a) Pangandaran; (b) Yogyakarta

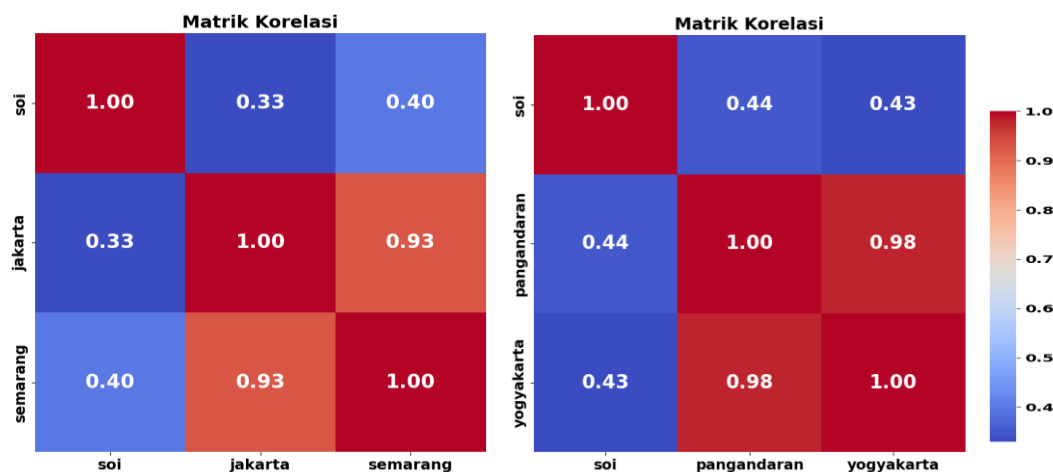
Sebaliknya, penurunan SLA ekstrem terjadi pada tahun 1997–1998, dengan nilai -20 cm, bersamaan dengan SOI negatif ekstrem selama El Niño. Fluktuasi SLA di Semarang menunjukkan pola yang mirip dengan Jakarta, tetapi dengan rentang yang sedikit lebih kecil (-15 cm hingga +30 cm). Pada tahun 2016, SLA di Semarang mencapai puncaknya sebesar +26,71 cm, sedikit lebih rendah dibandingkan Jakarta. Selama El Niño 1997–1998, SLA di Semarang menurun tajam hingga -15 cm. Pada periode El Niño kuat 1997–1998, SOI mencapai nilai negatif ekstrem (-3 hingga -2), mencerminkan tekanan atmosfer yang tinggi di Pasifik barat. Kondisi ini mendorong massa air laut menjauh dari kawasan Jakarta dan Semarang, menyebabkan penurunan SLA yang signifikan.

Sebaliknya, selama periode La Niña kuat 2010–2011, SOI menunjukkan puncak positif tinggi (+2 hingga +3). Tekanan atmosfer yang rendah di Pasifik barat menyebabkan peningkatan massa air laut di kawasan pesisir, menghasilkan SLA maksimum sekitar +20 cm di Jakarta dan +18 cm di Semarang.

Selama periode El Niño kuat 1997–1998, nilai SOI mencapai kisaran -3 hingga -2, mencerminkan tekanan atmosfer rendah di Pasifik timur dan tinggi di Pasifik barat. Di Pangandaran, SLA turun hingga mendekati -15 cm, sementara di Yogyakarta, SLA menurun ke kisaran -10 cm hingga -15 cm. Sebaliknya, pada periode La Niña kuat 2010–2011, nilai SOI mencatat puncak positif sekitar +2 hingga +3. Tekanan atmosfer yang lebih rendah di Pasifik barat, menghasilkan peningkatan SLA. SLA di Pangandaran mencapai +20 cm, sementara di Yogyakarta meningkat ke kisaran +18 hingga +20 cm. Fenomena ini sejalan dengan pola umum yang ditandai oleh hubungan antara SOI dan SLA selama periode El Niño dan La Niña ketika El Niño ditandai dengan SOI negatif, sedangkan La Niña dengan SOI positif. Selama El Niño, tekanan di Pasifik timur lebih rendah, menyebabkan penurunan muka air laut di Pasifik barat. Sebaliknya, pada La Niña, tekanan lebih tinggi di Pasifik barat, menyebabkan kenaikan muka air laut. (Handoko *et al.*, 2019a). Pola ini menegaskan pesisir selatan Jawa menerima dampak langsung dari variabilitas atmosfer global, dengan penurunan SLA selama El Niño dan peningkatan SLA selama La Niña.

Hubungan antara *Southern Oscillation Index* (SOI) dan *Sea Level Anomaly* (SLA) di empat lokasi pesisir Jawa divisualisasikan dalam bentuk matriks korelasi pada Gambar 8 berikut. *Heatmap* ini menunjukkan intensitas hubungan antara SOI dan SLA, dengan nilai korelasi yang bervariasi di setiap lokasi. Hasil korelasi antara SLA dan SOI di empat lokasi wilayah pesisir Jawa cukup bervariasi, dengan intensitas hubungan lemah dan cukup kuat, namun menunjukkan hubungan yang signifikan secara statistika. Korelasi antara SOI dan SLA di Jakarta menunjukkan hubungan positif namun dengan intensitas yang lemah yaitu sebesar 0,33, artinya pengaruh SOI terhadap SLA di perairan ini tidak terlalu dominan, meskipun signifikan. Nilai korelasi sebesar 0,40 untuk Semarang menunjukkan hubungan yang cukup kuat dibandingkan Jakarta.

Pada penelitian ini menunjukkan bahwa nilai korelasi antara SOI dan SLA di perairan selatan Jawa cenderung lebih kuat dibandingkan penelitian sebelumnya. Nilai korelasi sebesar 0,44 di Pangandaran dan 0,43 di Yogyakarta pada Gambar 8 menunjukkan hubungan yang cukup kuat, yang mengindikasikan bahwa dinamika SOI memiliki pengaruh yang signifikan terhadap SLA di perairan selatan Jawa. Sebaliknya, penelitian Nurlatifah *et al.* (2021) pada periode 1993-2018 menemukan korelasi yang lebih rendah, yaitu 0,31 di Jawa Tengah dan 0,28 di Jawa Barat, menunjukkan hubungan yang lemah hingga sedang. Pada penelitian Handoko *et al.* (2019a) periode pengamatan 1993-2018 menunjukkan korelasi SLA dengan SOI sebesar 0,6985 yang dapat dikatakan bahwa indeks SOI kuat pengaruhnya terhadap nilai SLA.



Gambar 8. Matrik Korelasi SOI dan SLA

Tabel 3. Statistika Perubahan Muka Air Laut (Jakarta, Semarang, Pangandaran dan Yogyakarta)

	Jakarta	Semarang	Pangandaran	Yogyakarta
Min (cm)	-15,78 (Des-97)	-13,33 (Des-97)	-28,83 (Nov-97)	-28,08 (Nov-97)
Maks (cm)	+ 28,78 (Jun-16)	+26,71 (Jun-16)	+40,04 (Jun-16)	+39,98 (Jun-16)
Rata-rata (cm)	5,15	5,25	6,69	7,34
Laju Kenaikan (cm/tahun)	0,45	0,43	0,44	0,45
Standard Error	0,40	0,36	0,70	0,71
Standard Deviasi	7,65	6,97	13,31	13,53
Koefisien Korelasi	0,33	0,30	0,44	0,43
Nilai Signifikansi	0,00	0,00	0,00	0,00

Secara signifikansi statistika (p-value 0,00) di seluruh perairan menunjukkan bahwa hubungan ini tidak terjadi secara kebetulan dan memiliki relevansi kuat. Secara keseluruhan, pengaruh SOI terhadap SLA lebih dominan di perairan selatan Jawa, yang diduga disebabkan oleh kedekatan dengan Samudera Hindia yang lebih langsung terpengaruh oleh dinamika atmosfer dan lautan. Variasi SLA regional mencerminkan pengaruh mekanisme lokal, seperti topografi pesisir dan arus laut. Perairan selatan Jawa, yang lebih dekat dengan Samudra Hindia, mengalami fluktuasi SLA yang lebih ekstrim, sebagaimana tercermin dari standar deviasi SLA tertinggi di Pangandaran (13,31 cm) dan Yogyakarta (13,53 cm). Sebaliknya, stabilitas relatif terlihat di perairan utara Jawa, dengan standar deviasi lebih rendah di Semarang (6,97 cm) dan Jakarta (7,65 cm). Tabel 3 merangkum nilai maksimum-minimum SLA di empat lokasi serta nilai standar deviasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, terdapat beberapa hal yang menjadi perhatian, fluktuasi SLA lebih ekstrem di perairan selatan Jawa dibandingkan utara; Pangandaran (13,30 cm) dan Yogyakarta (13,53 cm) dibandingkan Jakarta (7,65 cm) dan Semarang (6,97 cm). Tren penurunan SLA tahunan ditemukan di perairan selatan Jawa, yaitu Pangandaran -8,70 cm/tahun dan Yogyakarta -11,61 cm/tahun. Sebaliknya, perairan utara Jawa seperti Jakarta dan Semarang menunjukkan tren kenaikan SLA masing-masing sebesar 4,33 cm/tahun dan 1,08 cm/tahun. Fenomena ENSO dan IOD mempengaruhi SLA; Ketika El Niño kuat SLA menurun terutama di perairan selatan, sedangkan La Niña meningkat diikuti dengan meningkatnya SLA di semua lokasi. Hubungan antara SLA dengan SOI menunjukkan pola, SOI positif (La Niña) SLA meningkat sedangkan SOI negatif (El Niño) menurunkan SLA. Nilai korelasi sebesar 0,44 di Pangandaran, 0,43 Yogyakarta, 0,32 di Jakarta, dan 0,30 di Semarang menunjukkan hubungan yang bervariasi antara SOI dan SLA, dengan p-value sebesar 0,00 di seluruh lokasi, hubungan ini terbukti signifikan secara statistik.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhter, S., Qiao, F., Wu, K., Yin, X., Chowdhury, K.M.A., & Chowdhury, N.U.M.K., 2021. Seasonal and long-term sea-level variations and their forcing factors in the northern Bay of Bengal: A statistical analysis of temperature, salinity, wind stress curl, and regional climate index data. *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, 95: p.101239. DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2021.101239
- Bott, L.M., Schone, T., Illigner, J., Haghighi, M.H., Gisevius, K., & Braun, B., 2021. Land subsidence in Jakarta and Semarang Bay – The relationship between physical processes, risk perception, and household adaptation. *Ocean & Coastal Management*, 211: p.105775. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105775

- Cahyadi, M.N., Jaelani, L.M., & Aryasandah, H.D., 2016. Studi Kenaikan Muka Air Laut Menggunakan Data Satelit Altimetri Jason-1 (Studi Kasus: Perairan Semarang). *Geoid*, 11(2): 176-183. DOI: 10.12962/j24423998.v11i2.1263
- Handoko, E.Y., Filaili, R.B., & Yuwono., 2019a. Analisa Fenomena ENSO di Perairan Indonesia Menggunakan Data Altimetri Topex/Poseidon dan Jason Series Tahun 1993-2018. *Geoid*, 14(2): 43-50. DOI: 10.12962/j24423998.v14i2.3892
- Handoko, E.Y., Yuwono, & Ariani, R., 2019b. Analisis Kenaikan Muka Air Laut Indonesia Tahun 1993-2018 Menggunakan Data Altimetri. *Geoid*, 15(1): 58-64. DOI: 10.12962/J24423998.v15i1.3958
- Houston, J.R., 2024. The latest sea level rise projections of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Shore & Beach*, 92(3): 56–58. DOI: 10.34237/1009234
- Humana, B., Sari, A.N., & Alianto., 2018. Kajian Kerentanan Wilayah Pesisir Ditinjau dari Geomorfologi dan Elevasi Pesisir Kota dan Kabupaten Jayapura, Provinsi Papua. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 6(1): 1-14. DOI: 10.14710/jwl.6.1.1-14
- Kaczan, D., Nurhabni, F., & Cheung, W., 2024. Peningkatan Suhu Air Laut: Dampak Perubahan Iklim terhadap Sektor Perikanan (dan Apa yang Harus Dilakukan untuk Mengatasinya). *World Bank Blogs*. Retrieved Juli, 2024,
- Khasanah, U.N., Suprijanto, J., & Wirasatriya, A., 2019. The Variability of Sea Surface Height Anomaly in The Seas Along The Northern And Southern Coast of Java Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 246(1): 1-7. DOI: 10.1088/1755-1315/246/1/012049
- Lee, D.K., In, J., & Lee, S., 2015. Standard Deviation and Standard Error of The Mean. *Korean Journal of Anesthesiology*, 68(3): 220-223. DOI: 10.4097/kjae.2015.68.3.220
- Gaol, L.J., Vignudelli, S., Nurjaya, I.W., Natih, N.M.N., Sinurat, M.E., Arhatin, R.E. & Kusumaningrum, E.E., 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): p.012041. DOI: 10.1088/1755-1315/944/1/012041
- Marfai, M.A., 2012. Preliminary Assessment of Coastal Erosion and Local Community Adaptation In Sayung Coastal Area, Central Java - Indonesia. *Quaestiones Geographic*, 31(3): 47-55. DOI: 10.2478/v10117-012-0028-2
- Marpaung, S. & Harsanugraha, W.K. 2014. Karakteristik Sebaran Anomali Tinggi Muka Laut di Perairan Bagian Selatan dan Utara Pulau Jawa. *Seminar Nasional Penginderaan Jauh, Prosiding Sinasindraja, LAPAN*, pp. 569–575.
- Mujadida, Z., Setiono, H., Handoyo, G., Hariyadi, & Marwoto, J., 2021. Analisis Dinamika Permukaan Laut di Laut Jawa dengan Recurrent Neural Network Periode 1993 sampai 2019. *Indonesian Journal of Oceanography*, 03(1): 100-110. DOI: 10.14710/ijoce.v3i1.10661
- Nababan, B., Hadiati, S., & Natih, N.M.N., 2015. Dinamika Anomali Paras Laut Perairan Indonesia. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(1): 259-272. DOI: 10.29244/jitkt.v7i1.9943
- Nadya, & Salim, A., 2023. Pengaruh Sea Level Rise di Wilayah Perkotaan Indonesia. *Riset Sains dan Teknologi Kelautan*, 6(1): 52-55. DOI: 10.62012/sensistek.v6i1.24248
- Nerem, R.S., Chambers, D.P., Choe, C., & Mutchum, G.T., 2010. Estimating Mean Sea Level Change from the Topex and Jason Altimeter Missions. *Marie Geodesy*, 33(S1): 435-446. DOI: 10.1080/01490419.2010.491031
- NOAA., n.d. El Niño & La Niña (El Niño-Southern Oscillation). Retrieved Desember 07, 2024, from <https://www.climate.gov/enso>
- Nurlatifah, A., Martono, Susanti, I., & Suhermat, M., 2021. Variability and trend of sea level in southern waters of Java, Indonesia. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 71(3): 272-283. DOI: 10.1071/ES21004
- Prasetyo, S., Hidayat, U., Haryanto, Y.D., & Riama, N.F., 2021. Karakteristik Suhu Udara di Pulau Jawa Kaitannya Dengan Kelembapan Udara, Curah Hujan, SOI, dan DMI. *Jurnal Geografi, Edukasi dan Lingkungan*, 5(1): 15-26. DOI: 10.22236/jgel.v5i1.5971
- Sulaiha, F., Handoko, E.Y., & Yuwono., 2020. Studi Variasi Permukaan Laut Jawa dan Laut Cina Selatan Tahun 2002-2019 Menggunakan Data Altimetri Jason. *Geoid*, 15(2): 172-178. DOI: 10.12962/J24423998.V15I2.6953

- Suryantoro, A., 2009. Pemanasan Global dan Hubungannya Dengan Siklon Tropis Observasi Radar Satelit TRMM. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta*, 525-533.
- Triana, K., & Wahyudi, A.J., 2020. Sea Level Rise in Indonesia: The Drivers and the Combined Impacts from Land Subsidence. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 37(3): 115-121. DOI: 10.29037/ajstd.627.
- Wedangga, I.G.P.A., Dharma, I.G.B.S., & Putra, I.D.N.N. 2022. Trend dan Variabilitas Sea Level Anomaly di Perairan Indonesia Berdasarkan Data Multi Satelit Altimetri. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(1): 118-130. 10.24843/jmas.2022.v08.i01.p14.