

## Pengaruh ENSO Dan IOD Terhadap Suhu Permukaan Laut di Perairan Pulau Enggano

Isra Amalia<sup>1</sup>, Ashar Muda Lubis<sup>1\*</sup>, Sri Yudawati Cahyarini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu  
Jl. W.R. Supratman Kandang Limun, Bengkulu, 38122 Indonesia

<sup>2</sup>Kelompok Penelitian Paleoklimatologi, Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional  
Jl. Sangkuriang Cobleng, Bandung, Jawa Barat 40135 Indonesia  
Email: asharm1@unib.ac.id

### Abstract

#### *The Effect of ENSO and IOD on Sea Surface Temperature in Island Waters Enggano*

Enggano Island, located in the Indonesia Ocean, about 178 km away south-west from Bengkulu city, experiences Sea Surface Temperature (SST) variability that may be influenced by global climate phenomena such as the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Indian Ocean Dipole (IOD). This study aims to analyze the influence of ENSO and IOD on SST surrounding Enggano Island using monthly and annual data during the period 1993-2023. The research was carried out descriptively-analytically including temporal patterns of SPL, seasonal anomalies, and correlations between SPL and the NINO 3.4 index and Dipole Mode Index (DMI). The results showed a significant relationship between ENSO and SPL, where El Niño causes an increasing in SST, while La Niña decreases it with a moderate positive correlation ( $r = 0.5$ ,  $p = 0.0042$ ). IOD also affects SST with a weaker positive correlation ( $r = 0.352$ ,  $p = 0.0523$ ), where positive phases of IOD could increase SST at the region. Seasonally, the highest SST yearly occurred in March-May and the lowest in June-August. In addition, an increasing SST of 0.5°C can be found over the past 31 years, which may contribute to sea level rise with trend of 4.6-4.7 mm/year, higher than the global average. This research emphasizes the importance of understanding the complex interactions between ENSO, IOD and SPL, which impact oceanographic dynamics and coastal ecosystem management.

**Keywords:** ENSO; IOD; Sea Surface Temperature (SST); Enggano Island; Sea Level Trend; Climate Change

### Abstrak

Pulau Enggano yang terletak di Samudera Indonesia, sekitar 178 km arah barat daya dari kota Bengkulu, mengalami variabilitas Suhu Permukaan Laut (SPL) yang dapat dipengaruhi oleh fenomena iklim global seperti *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ENSO dan IOD terhadap SPL di sekitar Pulau Enggano dengan menggunakan data bulanan dan tahunan selama periode 1993-2023. Penelitian dilakukan secara deskriptif-analitik meliputi pola temporal SPL, anomali musiman, dan korelasi antara SPL dengan indeks NINO 3.4 dan Dipole Mode Index (DMI). Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan yang signifikan antara ENSO dan SPL, dimana El Niño menyebabkan peningkatan SST, sedangkan La Niña menurunkannya dengan korelasi positif sedang ( $r = 0.5$ ,  $p = 0.0042$ ). IOD juga mempengaruhi SST dengan korelasi positif yang lebih lemah ( $r = 0.352$ ,  $p = 0.0523$ ), di mana fase positif IOD dapat meningkatkan SST di wilayah tersebut. Secara musiman, SST tertinggi tahunan terjadi pada bulan Maret-Mei dan terendah pada bulan Juni-Agustus. Selain itu, peningkatan SST sebesar 0,5°C dapat ditemukan selama 31 tahun terakhir, yang dapat berkontribusi pada kenaikan permukaan laut dengan tren 4,6-4,7 mm/tahun, lebih tinggi dari rata-rata global. Penelitian ini menekankan pentingnya memahami interaksi yang kompleks antara ENSO, IOD dan SPL, yang berdampak pada dinamika oseanografi dan pengelolaan ekosistem pesisir.

**Kata Kunci:** ENSO; IOD; Suhu Permukaan Laut (SPL); Pulau Enggano; Sea Level Trend; Perubahan Iklim

### PENDAHULUAN

Pulau Enggano merupakan salah satu pulau terluar di Provinsi Bengkulu yang terletak di perairan Samudra Hindia, sekitar 178 km arah barat daya dari Kota Bengkulu. Dengan lokasi tersebut, perairan sekitar Pulau Enggano sangat dipengaruhi oleh variabilitas Suhu Permukaan Laut (SPL). SPL adalah parameter oseanografi utama yang secara langsung memengaruhi dinamika dan karakteristik perairan. Parameter ini, berperan penting dalam menentukan kondisi fisik laut, serta turut andil dalam pembentukan dan pengendalian fenomena iklim, baik di skala regional maupun global (Prihatiningsih *et al.*, 2022; Sukresno *et al.*, 2021; Khan *et al.*, 2021; Dong *et al.*, 2018).

Fenomena iklim utama yang berpengaruh terhadap variabilitas SPL adalah El Niño Southern Oscillation (ENSO) dan Indian Ocean Dipole (IOD) (Khan *et al.*, 2021). ENSO terjadi akibat interaksi kompleks antara laut dan atmosfer di kawasan Pasifik tropis yang memiliki dua fase utama, yakni El Niño dan La Niña (Purjayati *et al.*, 2021). El Niño adalah pemanasan, sedangkan La Niña adalah fase pendinginan SPL di Pasifik tropis (Kumar *et al.*, 2024; Bhavani *et al.*, 2017). Sementara itu, IOD merupakan anomali SPL bipolar yang terjadi di Samudera Hindia (Zhang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2020; Nur'utami & Hidayat, 2016). Fase IOD positif menyebabkan pemanasan di bagian barat dan pendinginan di bagian timur, meningkatkan curah hujan di barat. Sebaliknya, fase IOD negatif ditandai dengan pendinginan di barat dan pemanasan di timur, yang memicu kekeringan di Australia dan Indonesia (Devi *et al.*, 2017; Polonsky & Torbinsky., 2021).

Variabilitas SPL yang dipengaruhi oleh ENSO dan IOD positif memiliki implikasi luas terhadap kondisi oseanografi dan iklim, khususnya di wilayah pesisir yang rentan terhadap perubahan iklim. Peningkatan SPL akibat El Niño dan IOD berkontribusi pada pemanasan termal air laut, yang dapat mempercepat kenaikan muka air laut (*sea level trend*) (Wisha *et al.*, 2023). Fenomena ini berpotensi memperburuk dampak lingkungan seperti erosi pantai, intrusi air asin, dan kerusakan habitat pesisir yang penting bagi ekosistem laut dan masyarakat pesisir (Al-mutairi *et al.*, 2021). Beberapa penelitian sebelumnya mengenai ENSO dan IOD telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir, dengan banyak studi yang berfokus pada dampaknya terhadap SPL dan pola cuaca global (Li *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2024). Studi Zhang *et al.*, (2020), telah menunjukkan bahwa ENSO dan IOD memiliki pengaruh signifikan terhadap pola SPL di berbagai wilayah Samudra Hindia. Studi Lu *et al.*, (2020), mengungkapkan bahwa peristiwa IOD positif ekstrem pada 2019 menyebabkan melemahnya El Niño. Penelitian lain, merekonstruksi pengaruh IOD dan ENSO terhadap SPL melalui catatan Sr/Ca karang di Pulau Enggano, yang berkorelasi kuat dengan Niño3.4 dan IOD (Cahyarini *et al.*, 2021; 2022). Selain itu, beberapa penelitian terbaru bahwa perubahan SPL akibat ENSO dan IOD berkontribusi terhadap percepatan kenaikan muka air laut di beberapa wilayah pesisir Asia Tenggara, termasuk Indonesia (Triana & Janottama, 2021). Namun, meskipun banyak penelitian telah dilakukan di berbagai wilayah, studi yang secara spesifik membahas dampak kedua fenomena ini terhadap SPL dan implikasinya terhadap *sea level trend* di perairan Pulau Enggano masih terbatas.

Keterkaitan antara ENSO, IOD, dan SPL di Samudra Hindia dapat memperkuat atau melemahkan pengaruhnya terhadap SPL, tergantung pada fase masing-masing. Permasalahan ini semakin relevan mengingat Pulau Enggano merupakan kawasan strategis dan ekologisnya yang unik, dipengaruhi langsung oleh dinamika atmosfer-laut Samudera Hindia dan Samudera Pasifik. Pulau ini berada di pertemuan sirkulasi Walker dan monsun (Tang *et al.*, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ENSO dan IOD terhadap variabilitas SPL di perairan Pulau Enggano menggunakan data jangka panjang dari model iklim *Climate Explorer*.

## MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di perairan Pulau Enggano, Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu, yang terletak di Samudra Hindia (Gambar 1). Rentang koordinat data yang digunakan berbentuk grid dengan latitude  $-5^{\circ}$  –  $-6^{\circ}$  dan longitude  $101^{\circ}\text{E}$ – $103^{\circ}\text{E}$ . Penelitian ini memanfaatkan data SPL dalam rentang waktu 1993–2023, berupa data bulanan dan tahunan yang diambil dari database NOAA ([https://climexp.knmi.nl/select.cgi?sstoiv2\\_monthly\\_mean](https://climexp.knmi.nl/select.cgi?sstoiv2_monthly_mean)) melalui *Climate Explorer* dengan resolusi spasial longitude  $0,2^{\circ}$ . Selain itu, data *Dipole Mode Index* (DMI) digunakan sebagai indikator IOD (<https://climexp.knmi.nl/select.cgi?hadisst1>), data *sea level trend* diperoleh dari data satelit altimeter, dan indeks NINO 3.4 digunakan untuk analisis ENSO ([https://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?NCDCCData/ersst\\_nino3.4a\\_rel](https://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?NCDCCData/ersst_nino3.4a_rel)).

Tahapan pengolahan data SPL, DMI, *sea level trend*, dan ENSO diproses sesuai grid lokasi penelitian. Data diunduh dalam format NetCDF (.nc), dikonversi ke Microsoft Excel, dan analisis

perbandingan SPL terhadap DMI serta ENSO dilakukan menggunakan Python. Anomali SPL dihitung setiap bulan menggunakan persamaan:

$$\text{Anomali SPL} = T_i - T_{\text{mean}}$$

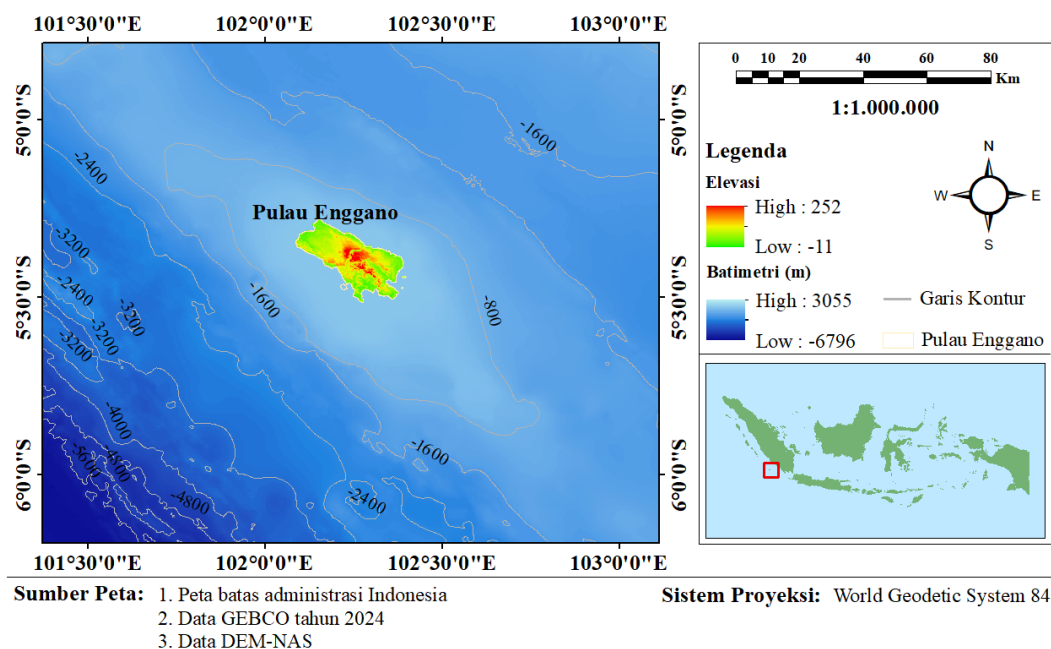
Dimana  $T_i$  sebagai suhu permukaan laut bulanan ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan  $T_{\text{mean}}$  sebagai rata-rata bulanan periode tertentu ( $^{\circ}\text{C}$ ). Hasil analisis temporal divisualisasikan dalam rata-rata musiman: musim barat (Desember–Januari–Februari/DJF), peralihan pertama (Maret–April–Mei/MAM), musim timur (Juni–Juli–Agustus/JJA), dan peralihan kedua (September–Oktober–November/SON). Analisis korelasi dilakukan untuk melihat hubungan antara dua variabel (Wang *et al.*, 2018), menggunakan persamaan berikut:

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

Dimana  $r$  sebagai koefisien korelasi antara  $x$ ,  $y$ .  $n$  sebagai jumlah data,  $x$  dan  $y$  masing-masing mewakili indeks NINO 3.4/DMI dan SPL. Peta sea level trend diolah menggunakan software Ocean Data View. Analisis SPL dalam penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitis. Pola perubahan SPL periode 1993–2023 dianalisis secara temporal melalui grafik deret waktu (*time series*). Hubungan variabilitas SPL dengan fenomena ENSO dan IOD dievaluasi menggunakan analisis korelasi. Selain itu, perubahan sea level trend dianalisis secara spasial.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Variabilitas SPL dan anomali SPL secara temporal di wilayah Pulau Enggano periode 1993–2023 ditunjukkan dalam (Gambar 2). Grafik *time series* (Gambar 2A) menunjukkan adanya peningkatan SPL tahunan secara gradual. SPL tahunan bergerak dari rata-rata sekitar  $28,7^{\circ}\text{C}$  pada awal periode



**Gambar 1.** Lokasi Penelitian sekitar Pulau Enggano, dilengkapi dengan informasi batimetri dan ketinggian. Inset peta: peta Indonesia menampilkan area penelitian yang ditandai dengan kotak merah.

dan meningkat hingga mencapai puncak 29,8°C pada tahun 2016. Peningkatan ini mengindikasikan adanya tren pemanasan perairan laut di sekitar Pulau Enggano, yang selaras dengan fenomena pemanasan global akibat perubahan iklim yang terjadi di wilayah perairan tropis (Yu *et al.*, 2023). Sedangkan anomali SPL tahunan (Gambar 2B), yang merupakan penyimpangan SPL dari nilai rata-rata tahunan. Anomali ini memperlihatkan fluktuasi yang signifikan dengan nilai positif dominan setelah tahun 2000. Pola ini menandakan adanya frekuensi tahun-tahun yang lebih hangat dibandingkan dengan rata-rata historis. Hal ini dapat dikaitkan dengan peningkatan emisi gas rumah kaca dan perubahan pola sirkulasi atmosfer, terutama tekanan angin (Byju *et al.*, 2018).

Variabilitas SPL bulanan (Gambar 2C), memperlihatkan pola fluktuasi yang lebih tinggi dibandingkan variabilitas tahunan, dengan nilai SPL berkisar antara 24°C hingga 31°C. Hal ini menunjukkan adanya pola atau dinamika musiman yang kuat di wilayah ini. Sementara itu, untuk anomali SPL bulanan (Gambar 2D) memperkuat adanya variabilitas intra-tahunan dengan pola yang cenderung berulang, mencerminkan dampak siklus musiman serta pengaruh eksternal lainnya, seperti perubahan angin monsun dan arus laut regional (Khan *et al.*, 2021).

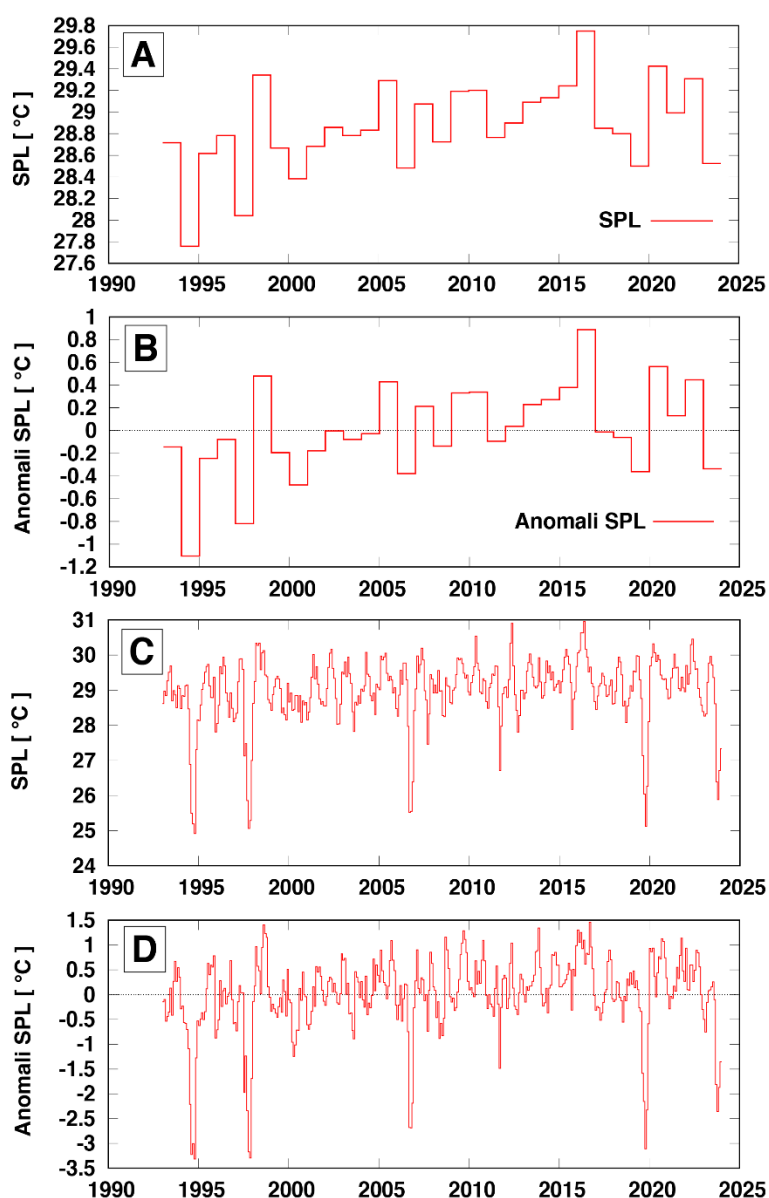
Pulau Enggano menunjukkan pola musiman SPL yang jelas, dengan nilai maksimum sekitar 30,5°C pada Maret–Mei dan minimum sekitar 28°C pada September–Oktober. Hal ini mencerminkan pengaruh siklus tahunan radiasi matahari (insolation) dan dinamika angin muson dalam proses pendinginan atau pemanasan laut (Isa *et al.*, 2020). Pada siklus Januari–Desember (Gambar 3A), SPL menunjukkan variasi yang lebih tinggi pada bulan-bulan transisi musim, sedangkan pada siklus Juli–Juni (Gambar 3B), SPL meningkat secara bertahap dari Agustus hingga puncaknya pada April, kemudian menurun perlahan dari Mei hingga Agustus. Variabilitas antar-tahunan SPL, terlihat dari rentang persentil (2.5%, 17%, 83%, dan 97.5%), menunjukkan fluktuasi signifikan yang dipengaruhi oleh ENSO dan IOD, terutama pada bulan-bulan seperti Maret dan Agustus yang mencatat anomali iklim regional lebih besar. Hasil penelitian ini sesuai dengan studi Mondal & Lee., (2023), di Teluk Mannar yang menunjukkan bahwa SPL meningkat hingga mencapai puncaknya pada bulan April, kemudian menurun hingga bulan Agustus, yang menjadi bulan terdingin dalam setahun.

Variabilitas musiman SPL lebih lanjut dianalisis dalam (Gambar 4). SPL di Pulau Enggano menunjukkan karakteristik musiman yang khas, dengan tren jangka panjang yang bervariasi pada setiap musim. ). Pada musim DJF (Desember–Februari), SPL memperlihatkan tren peningkatan dari tahun 1993 hingga sekitar 2010, diikuti oleh fluktuasi yang lebih stabil hingga 2023. Rentang SPL selama musim ini berada antara 28,6°C hingga 29,8°C, mencerminkan periode dengan suhu yang relatif tinggi tetapi masih di bawah puncak tahunan. Sebaliknya, musim MAM (Maret–Mei) menunjukkan SPL yang lebih tinggi dibandingkan DJF, dengan rata-rata yang mendekati atau bahkan melebihi 30°C pada beberapa tahun, menandai puncak pemanasan tahunan. Tren kenaikan SPL pada musim ini lebih jelas, mengindikasikan dampak penguatan radiasi matahari dan penurunan aktivitas angin pendingin. Musim JJA (Juni–Agustus) memiliki SPL yang lebih rendah dibandingkan DJF dan MAM, dengan rentang sekitar 27,5°C hingga 29,5°C. Penurunan SPL pada musim ini dapat dikaitkan dengan pengaruh angin muson tenggara yang membawa udara dingin dan memperkuat proses upwelling di perairan sekitar Indonesia. Pada musim SON (September–November), SPL mencerminkan pola transisi dari kondisi dingin pada JJA menuju kondisi hangat pada DJF, dengan rentang suhu yang serupa dengan musim JJA. Meskipun ada fluktuasi antar-tahunan, tren jangka panjang SPL selama musim ini cenderung stabil, mengindikasikan bahwa musim SON berperan sebagai periode peralihan dalam siklus tahunan SPL di Pulau Enggano.

Hubungan antara anomali SPL Pulau Enggano dengan indeks ENSO (NINO 3.4) pada (Gambar 5A) menunjukkan bahwa saat NINO 3.4 bernilai positif (fase El Niño), SPL di Pulau Enggano cenderung meningkat, seperti yang terlihat pada tahun 1997/1998 dan 2015/2016, sejalan dengan indeks NINO 3.4 yang mencapai puncak positifnya. Sebaliknya, saat NINO 3.4 negatif (fase La Niña), SPL cenderung menurun. Fenomena ini mencerminkan pengaruh El Niño yang menyebabkan melemahnya upwelling di Samudra Hindia bagian timur, sementara La Niña menguatkan upwelling (Mukherjee *et al.*, 2019). Meski demikian, pengaruh ENSO pada SPL di Pulau Enggano bervariasi,

tergantung pada intensitas fenomena ENSO dan interaksinya dengan faktor lain. Sehingga hubungan antara SPL Pulau Enggano dan NINO 3.4 dengan nilai korelasi positif sedang ( $r = 0,500$ ) (Gambar 6A). Korelasi ini signifikan secara statistik ( $p = 0,0042$ ), yang menunjukkan adanya hubungan nyata pada tingkat kepercayaan 95% (rentang interval kepercayaan: 0,15–0,76). Hasil ini menunjukkan bahwa kenaikan nilai NINO 3.4, yang mengindikasikan bahwa intensitas El Niño berkorelasi dengan peningkatan SPL di Pulau Enggano.

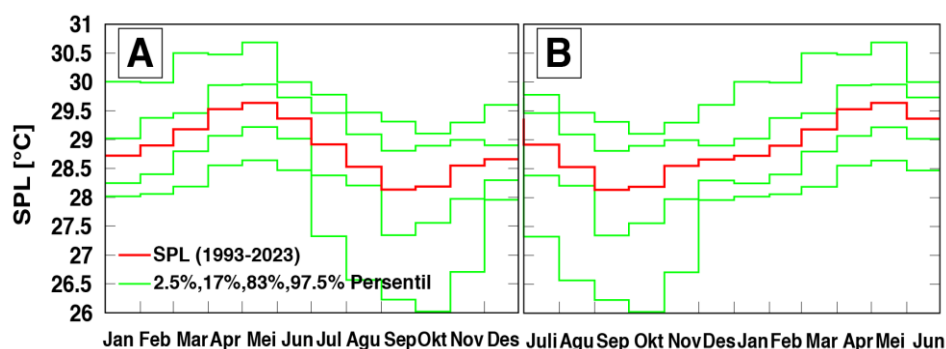
Pengaruh IOD terhadap SPL di Pulau Enggano juga diamati, meskipun korelasinya lebih lemah ( $r = 0,352$ ,  $p = 0,0523$ ) (Gambar 6B). Meskipun demikian, nilai korelasi positif ini mengindikasikan bahwa fase positif DMI, yang ditandai dengan suhu yang lebih hangat di Samudera Hindia bagian barat, dapat meningkatkan SPL di Pulau Enggano. Fase positif IOD, seperti yang terjadi pada tahun 1994, 1997, 2019, dan 2023, berkontribusi pada peningkatan SPL di wilayah tersebut (Gambar 5B). Hasil ini konsisten dengan temuan Iskandar *et al.* (2022), yang menunjukkan bahwa IOD positif yang



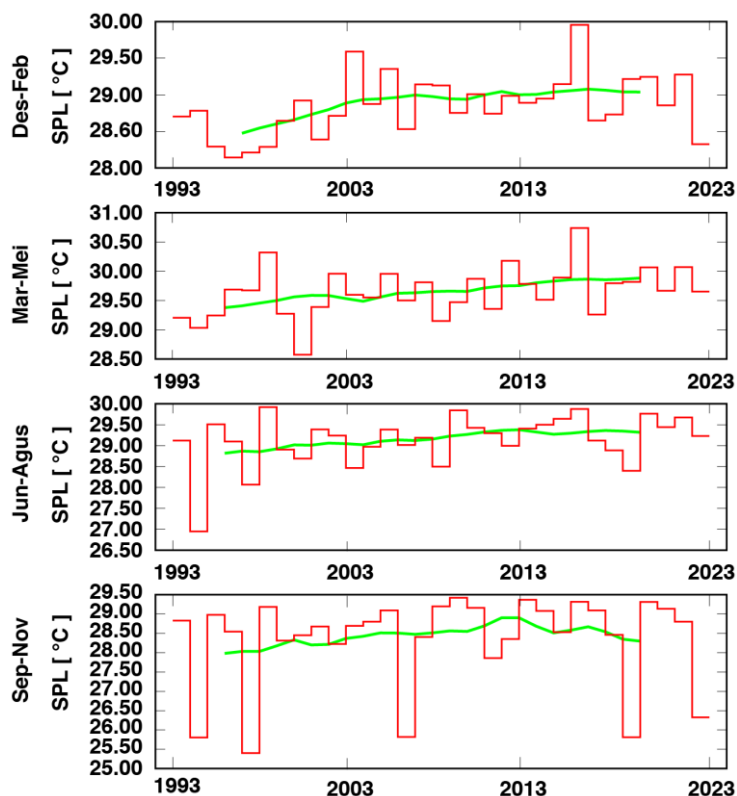
**Gambar 2.** Variabilitas SPL secara temporal: A). Variabilitas SPL tahunan; B). Anomali SPL tahunan; C). Variabilitas SPL bulanan; D). Anomali SPL bulanan, di wilayah pulau Enggano (Latitude:  $-5^{\circ}\text{N}$  -  $-6^{\circ}\text{N}$ , dan Longitude:  $101^{\circ}\text{E}$  -  $103^{\circ}\text{E}$ ) periode 1993-2023.

ekstrem pada tahun 2019, dan temuan Isa *et al.*, (2020) bahwa Selama kejadian El-Niño kuat pada tahun 1997, NINO 3.4 tidak menunjukkan korelasi dengan tren SPL, sedangkan pada IOD positif tahun 1994, DMI juga tidak menunjukkan korelasi dengan tren SPL. Peristiwa IOD positif ekstrem sering dikaitkan dengan upwelling yang intens di sepanjang pantai selatan Jawa dan Sumatra, yang meningkatkan konsentrasi klorofil-a di permukaan laut akibat melimpahnya nutrisi dari lapisan bawah (Sari *et al.*, 2020).

Fenomena ENSO dan IOD memengaruhi SPL di Pulau Enggano melalui perubahan sirkulasi atmosfer dan laut. Selama El Niño, tekanan atmosfer di Samudra Pasifik barat meningkat, melemahkan angin pasat, dan mengurangi upwelling di timur Samudra Hindia, sehingga SPL meningkat. Sebaliknya, La Niña memperkuat angin pasat, meningkatkan upwelling, dan menurunkan SPL. Fase IOD positif memperkuat angin timuran, mendorong upwelling, memperkaya



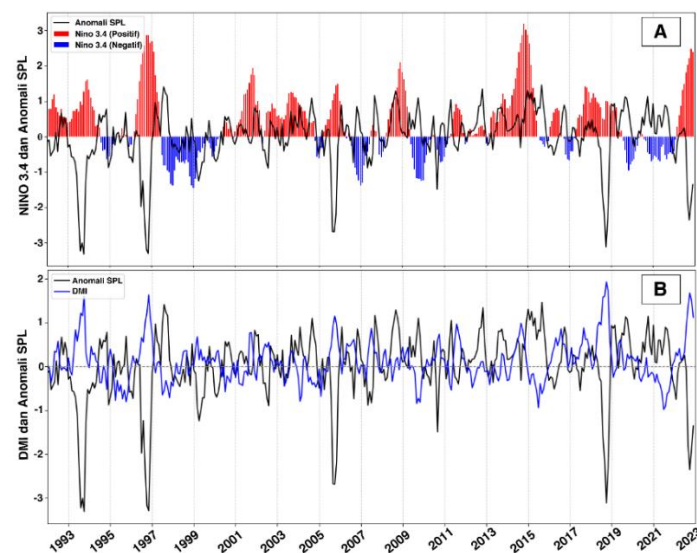
**Gambar 3.** Rata-rata bulan klimatologi SPL: A). Bulan Januari - Desember; B). Bulan Juli – Juni, di Pulau Enggano periode 1993-2023.



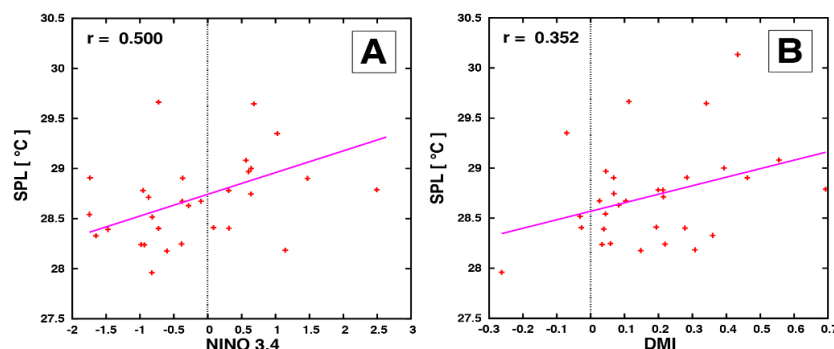
**Gambar 4.** Variabilitas musiman SPL di Pulau Enggano selama periode 1993-2023.

nutrien, dan sering menyebabkan kekeringan di Indonesia akibat pergeseran pola presipitasi (Iskandar *et al.*, 2021). Hubungan SPL dengan ENSO dan IOD bergantung pada musim (Cahyarini *et al.*, 2021), dipengaruhi oleh variasi angin monsun (Wisetya *et al.*, 2020). Variabilitas ini memengaruhi oseanografi, ekosistem, pola presipitasi, dan risiko kekeringan.

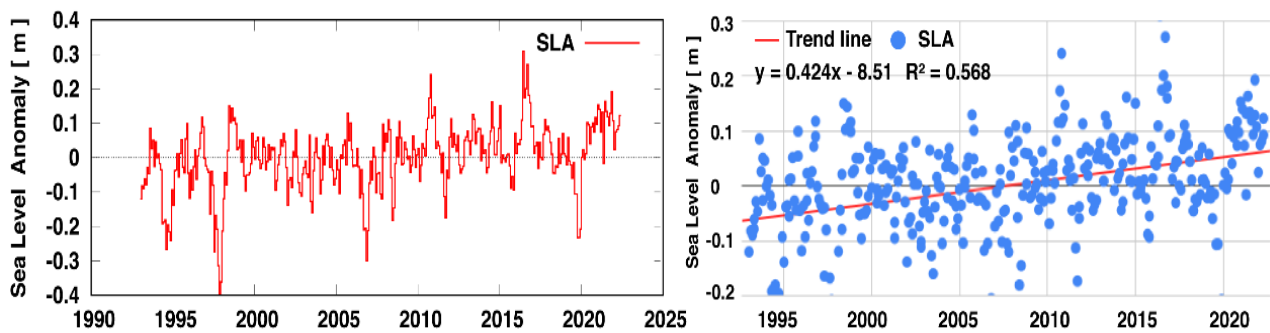
Perubahan SPL, yang dipengaruhi oleh fenomena atmosfer dan laut, dapat memicu ekspansi termal air laut, yang berkontribusi langsung pada fluktuasi *sea level trend*. Memahami hubungan ini sangat penting untuk mengevaluasi dampak perubahan iklim terhadap ekosistem pesisir (Aral & Guan, 2016). Gambar 7 menunjukkan anomali tren permukaan laut (Sea Level Anomaly (SLA) di Pulau Enggano untuk periode 1993–2023. Panel kiri menggambarkan variasi waktu dari anomali SLA, yang menunjukkan fluktuasi signifikan sepanjang periode tersebut dengan kecenderungan peningkatan dari tahun ke tahun. Perubahan ini menunjukkan dinamika regional laut yang dipengaruhi oleh fenomena iklim seperti ENSO dan IOD, serta tren kenaikan permukaan laut secara global akibat pemanasan iklim (Uppara *et al.*, 2023). Panel kanan menampilkan analisis regresi linier dari anomali SLA, dengan persamaan tren  $y=0.424x-8.51y$  dan koefisien determinasi  $R^2=0.568$ , yang menunjukkan hubungan positif yang cukup kuat.



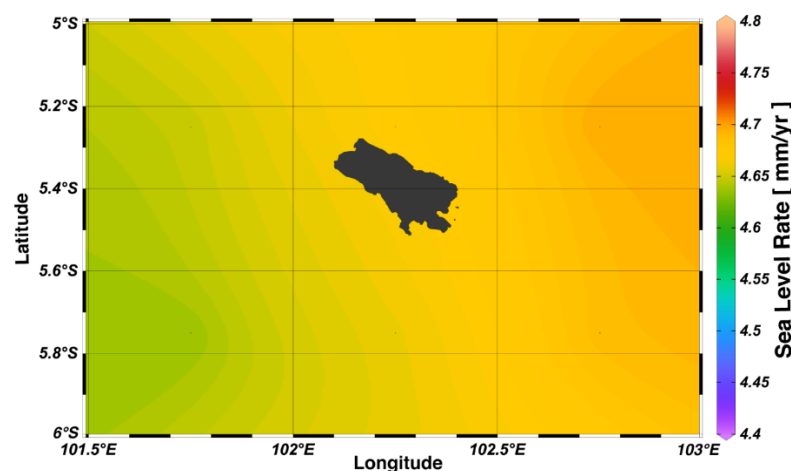
**Gambar 5.** A). Perbandingan anomali SPL Pulau Enggano (garis hitam) dengan index El Niño Southern Oscillation (NINO 3.4) (Grafik bar); B). Perbandingan anomali SPL Pulau Enggano (garis hitam) dengan Dipole Mode Index (garis biru).



**Gambar 6.** Scatter plot diagram: A). Korelasi SPL Pulau Enggano dengan NINO 3.4 ( $r=0.5$ ,  $n=31$ ,  $p=0.0042$ ,  $95\%=0.15$ ,  $ci=0.76$ ); B). korelasi SPL Pulau Enggano dengan Dipole Mode Index ( $r=0.352$ ,  $n=31$ ,  $p=0.0523$ ,  $95\%=0.04$ ,  $ci=0.64$ ).



**Gambar 7.** Anomali sea level trend Pulau Enggano (Latitude: -5 °N - -6 °N, dan Longitude: 101 °E - 103 °E) periode 1993-2023.



**Gambar 8.** Peta sea level trend Pulau Enggano periode 1993-2023. Tren ini dihitung dari data altimetri dengan satuan mm/tahun.

Secara keseluruhan, SPL meningkat 0,5°C dalam 31 tahun terakhir, berkontribusi pada sea level trend yang seragam di sekitar Pulau Enggano sebesar 4,6–4,7 mm/tahun (Gambar 8), lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata global  $3,3 \pm 0,5$  mm/tahun selama periode yang sama (Abdulla & Al-Subhi, 2021; Wang *et al.*, 2023). Tren ini konsisten dengan pola regional di Samudera Hindia bagian timur, yang mengalami kenaikan permukaan laut lebih tinggi akibat perubahan sirkulasi laut dan dampak fenomena iklim (Han *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2015; Huang *et al.*, 2024). Hal ini sejalan dengan tren global peningkatan permukaan laut yang dipicu oleh pemanasan global, ekspansi termal air laut, dan pencairan es kutub (Navarro *et al.*, 2020). Pulau Enggano, sebagai wilayah pesisir, perlu mempertimbangkan dampak jangka panjang dari kenaikan permukaan laut terhadap ekosistem dan aktivitas manusia. Dengan demikian, pemahaman terhadap variabilitas SPL dan hubungannya dengan fenomena iklim sangat penting untuk mitigasi dampak perubahan iklim di wilayah pesisir.

## KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan bahwa ENSO memiliki pengaruh signifikan terhadap variabilitas Suhu Permukaan Laut (SPL) di perairan Pulau Enggano, dengan SPL meningkat selama El Niño dan menurun selama La Niña ( $r = 0,5$ ,  $p = 0,0042$ ). IOD juga memengaruhi SPL, meskipun lebih lemah ( $r = 0,352$ ,  $p = 0,0523$ ), dimana fase positif IOD cenderung meningkatkan SPL dan fase negatif menurunkannya. Kombinasi antara ENSO dan IOD dapat memperkuat atau melemahkan dampaknya terhadap SPL, yang menegaskan pentingnya dinamika iklim global dan regional dalam mengontrol variabilitas SPL di wilayah studi. Selama 31 tahun terakhir, SPL meningkat 0,5°C,

berkontribusi pada kenaikan muka laut sebesar 4,6–4,7 mm/tahun. Penelitian ini menggunakan data jangka panjang dan analisis statistik mendalam, tetapi kurangnya data lapangan menjadi keterbatasan. Studi lanjutan disarankan mencakup pengukuran in situ, pola angin, dan arus laut untuk meningkatkan akurasi serta memahami dampak SPL pada ekosistem pesisir.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Laboratorium KST Samaun Samadikun Bandung di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas dukungan ilmiah melalui program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) pada kelompok Riset Iklim dan Lingkungan Masa Lampau di Pusat Riset Iklim dan Atmosfer tahun 2024 dengan nomor kontrak: 112/II/HK/2024. Terima kasih disampaikan kepada Copernicus, altimeter satelit (<https://sealevel.colorado.edu/data/sea-level-trends-satellite-altimeters>), database NOAA, dan *Climate Explorer* (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>) yang telah menyediakan data yang digunakan dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdulla, C.P., & Al-Subhi, A.M. (2021). Is the Red Sea sea-level rising at a faster rate than the global average? An analysis based on satellite altimetry data. *Remote Sensing*, 13(17), 3489.
- Aral, M.M., & Guan, J. (2016). Global sea surface temperature and sea level rise estimation with optimal historical time lag data. *Water*, 8(11), 519.
- Bhavani, T.S.D., Chowdary, J.S., Bharathi, G., Srinivas, G., Prasad, K.V.S.R., Deshpande, A., ... & Gnanaseelan, C. (2017). Response of the tropical Indian Ocean SST to decay phase of La Niña and associated processes. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 80, 110-123.
- Byju, P., Dommengot, D., & Alexander, M.A. (2018). Widespread reemergence of sea surface temperature anomalies in the global oceans, including tropical regions forced by reemerging winds. *Geophysical Research Letters*, 45(15), 7683-7691.
- Cahyarini, S.Y., Pfeiffer, M., Reuning, L., Liebetrau, V., Dullo, W.C., Takayanagi, H., ... & Eisenhauer, A. (2021). Modern and sub-fossil corals suggest reduced temperature variability in the eastern pole of the Indian Ocean Dipole during the medieval climate anomaly. *Scientific reports*, 11(1), 14952.
- Cahyarini, S.Y., Hendrizan, M., & Utami, D.A. (2022). Warming trend during Medieval Climate Anomaly in Tropical Maritim Indonesia: Records from Porites Corals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1047(1), p. 012024.
- Chen, Y., Zhao, C., & Zhi, H. (2024). Analysis of ENSO Event Intensity Changes and Time-Frequency Characteristic Since 1875. *Atmosphere*, 15(12), 1428.
- Devi, K.N., & Sarangi, R.K. (2017). Time-series analysis of chlorophyll-a, sea surface temperature, and sea surface height anomalies during 2003–2014 with special reference to El Niño, La Niña, and Indian Ocean Dipole (IOD) Years. *International Journal of Remote Sensing*, 38(20), 5626-5639.
- Dong, L., & McPhaden, M.J. (2018). Unusually warm Indian Ocean sea surface temperatures help to arrest development of El Niño in 2014. *Scientific reports*, 8(1), 2249.
- Han, W., Stammer, D., Meehl, G.A., Hu, A., Sienz, F., & Zhang, L. (2018). Multi-decadal trend and decadal variability of the regional sea level over the Indian Ocean since the 1960s: Roles of climate modes and external forcing. *Climate*, 6(2), p.51.
- Huang, L., Zhuang, W., Lu, W., Zhang, Y., Edwing, D., & Yan, X.H. (2024). Rapid sea level rise in the tropical Southwest Indian Ocean in the recent two decades. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106011. doi: 10.1029/2023GL106011
- Isa, N.S., Akhir, M.F., Kok, P.H., Daud, N.R., Khalil, I. & Roseli, N.H., 2020. Spatial and temporal variability of sea surface temperature during El-Niño Southern Oscillation and Indian Ocean Dipole in the Strait of Malacca and Andaman Sea. *Regional Studies in Marine Science*, 39, p.101402.
- Iskandar, I., Lestari, D.O., Saputra, A.D., Setiawan, R.Y., Wirasatriya, A., Susanto, R.D., ... & Kunarso. (2022). Extreme positive Indian Ocean Dipole in 2019 and its impact on Indonesia. *Sustainability*, 14(22), 15155.

- Khan, S., Piao, S., Khan, I. U., Xu, B., Khan, S., Ismail, M.A., & Song, Y. (2021). Variability of SST and ILD in the Arabian Sea and Sea of Oman in Association with the Monsoon Cycle. *Mathematical problems in Engineering*, 2021(1), 9958257.
- Khan, S., Piao, S., Zheng, G., Khan, I.U., Bradley, D., Khan, S., & Song, Y. (2021). Sea surface temperature variability over the tropical Indian Ocean during the ENSO and IOD events in 2016 and 2017. *Atmosphere*, 12(5), 587.
- Kumar, V., Chu, H.J., & Anand, A. (2024). Impacts of Sea Surface Temperature Variability in the Indian Ocean on Drought Conditions over India during ENSO and IOD Events. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 136.
- Lee, S. K., Park, W., Baringer, M. O., Gordon, A. L., Huber, B., & Liu, Y. (2015). Pacific origin of the abrupt increase in Indian Ocean heat content during the warming hiatus. *Nature geoscience*, 8(6), 445-449.
- Li, C., Feng, Y., Sun, T., & Zhang, X. (2022). Long term Indian Ocean Dipole (IOD) index prediction used deep learning by convLSTM. *Remote Sensing*, 14(3), 523.
- Lu, B., & Ren, H.L. (2020). What Caused the Extreme Indian Ocean Dipole Event in 2019? *Geophysical Research Letters*, 47(11), 1–8. doi: 10.1029/2020GL087768
- Mondal, S., & Lee, M.A. (2023). Long-Term Observations of Sea Surface Temperature Variability in the Gulf of Mannar. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), p.102. doi: 10.3390/jmse11010102
- Mukherjee, A., & Kalita, B. K. (2019). Signature of La Niña in interannual variations of the East India Coastal Current during spring. *Climate Dynamics*, 53, 551-568.
- Navarro, F.J. (2021). Sea-level rise: Which is the role of glaciers and polar ice sheets?. *Metode Science Studies Journal*, 11, 173-181.
- Nur'utami, M.N., & Hidayat, R. (2016). Influences of IOD and ENSO to Indonesian rainfall variability: role of atmosphere-ocean interaction in the Indo-Pacific sector. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 196-203.
- Polonsky, A., & Torbinsky, A. (2021). The IOD–ENSO interaction: The role of the Indian Ocean current's system. *Atmosphere*, 12(12), 1662.
- Prihatiningsih, I., Hidayat, R.R., Amron, A., & Husni, I. A. (2022). Variabilitas Salinitas Permukaan Laut Perairan Selatan Kebumen. *Jurnal Kelautan dan Perikanan Terapan*, 5(2), 151-158.
- Puryajati, A. D., Wirasatriya, A., Maslukah, L., Sugianto, D.N., Ramdani, F., Jalil, A.R., & Andrawina, Y.O. (2021). The effect of ENSO and IOD on the variability of sea surface temperature and rainfall in The Natuna Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 750(1), p. 012020
- Sari, Q.W., Utari, P.A., Setiabudidaya, D., Yustian, I., Siswanto, E., & Iskandar, I. (2020). Surface chlorophyll-a variations in the Southeastern Tropical Indian Ocean during various types of the positive Indian Ocean Dipole events. *International Journal of Remote Sensing*, 41(1), 171-184.
- Sukresno, B., Jatisworo, D. & Hanintyo, R., 2021. Validation of sea surface temperature from GCOM-C satellite using iQuam datasets and MUR-SST in Indonesian waters. *The Indonesian Journal of Geography*, 53(1), 136-143.
- Tang, C., Hao, D., Wei, Y., Zhao, F., Lin, H., & Wu, X. (2022). Analysis of influencing factors of SST in tropical West Indian Ocean based on COBE satellite data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), p.1057.
- Triana, K., & Janottama, S. . (2021). The Projection of Sea Level Rise in Southeast Asia's Coastal Cities using Satellite Altimetry Data (1992-2020). *Proceedings of National Colloquium Research and Community Service*, 5, 14-18.
- Uppara, U., Moon, J.H., Jang, C.J., & Jo, Y.H. (2023). Interannual modulations in sea level rise over tropical Northwest Pacific in satellite altimeter measurements. *Frontiers in Marine Science*, 10, p.1071333.
- Wang, J., Li, X., Han, X., Zhang, Y., Chen, X., & Tan, J. (2023). Analysis of Diurnal Sea Surface Temperature Variability in the Tropical Indian Ocean. *Atmosphere*, 14(12), p.1754. doi: 10.3390/atmos14121754
- Wang, X., Zhang, K., Wu, S., Li, Z., Cheng, Y., Li, L., & Yuan, H. (2018). The correlation between GNSS-derived precipitable water vapor and sea surface temperature and its responses to El Niño–Southern Oscillation. *Remote sensing of environment*, 216, 1-12.

- Wisetya Dewi, Y., Wirasatriya, A., Nugroho Sugianto, D., Helmi, M., Marwoto, J., & Maslukah, L. (2020). Effect of ENSO and IOD on the Variability of Sea Surface Temperature (SST) in Java Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 530(1), p.012007. doi: 10.1088/1755-1315/530/1/012007
- Wisha, U.J., Wijaya, Y.J., & Hisaki, Y. (2023). Sea Level Variability in the Equatorial Malacca Strait: The Influence of Climatic–Oceanographic Factors and Its Implications for Tidal Properties in the Estuarine Zone. *Climate*, 11(3), p.70.
- Yu, J., Lv, H., Tan, S., & Wang, Y. (2023). Tropical Cyclone-Induced Sea Surface Temperature Responses in the Northern Indian Ocean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), p.2196.
- Zhang, W., Wang, Y., Jin, F.F., Stuecker, M. F., & Turner, A.G. (2015). Impact of different El Niño types on the El Niño/IOD relationship. *Geophysical Research Letters*, 42(20), 8570-8576.
- Zhang, Y., Li, J., Zhao, S., Zheng, F., Feng, J., Li, Y., & Xu, Y. (2020). Indian Ocean tripole mode and its associated atmospheric and oceanic processes. *Climate Dynamics*, 55(5–6), 1367–1383. doi: 10.1007/s00382-020-05331-1