

## Pengaruh ENSO dan IOD Terhadap Variabilitas Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a di Laut Sawu

Ajeng Maharani Putri Ardiana, Lilik Maslukah, Yusuf Jati Wijaya\*

Departemen Oseanografi Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Jacob Rais. Tembalang Semarang Jawa Tengah 50275, Indonesia  
Email: \*yusufjatiwijaya@lecturer.undip.ac.id

### Abstrak

Laut Sawu merupakan salah satu perairan di Indonesia yang memiliki karakteristik oseanografi kompleks karena dipengaruhi oleh sistem angin muson dan fenomena iklim global. Variabilitas iklim *El-Niño Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) berpengaruh terhadap perubahan suhu permukaan laut (SPL) dan klorofil-a di wilayah ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui variabilitas SPL, klorofil-a, dan angin, serta menganalisis pengaruh ENSO dan IOD terhadap variabilitas SPL dan klorofil-a di Laut Sawu. Data yang digunakan meliputi SPL dari OSTIA, klorofil-a dari OC-CCI, angin dari ASCAT, indeks ONI sebagai indikator ENSO, dan indeks DMI sebagai indikator IOD selama periode 2015–2024. Analisis dilakukan menggunakan metode komposit, korelasi Pearson, dan interpretasi spasial berdasarkan peta anomali bulanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SPL tertinggi terjadi pada musim barat (Desember–Februari) dan terendah pada musim timur (Juni–Agustus), sedangkan klorofil-a menunjukkan pola sebaliknya. Pada fase *El-Niño* dan IOD positif, terjadi pendinginan SPL antara  $-0,8^{\circ}\text{C}$  hingga  $-1,5^{\circ}\text{C}$  dan peningkatan klorofil-a sebesar  $+0,2$  hingga  $+0,4$   $\text{mg}/\text{m}^3$ . Sebaliknya, pada fase *La-Niña* dan IOD negatif terjadi pemanasan SPL dan penurunan klorofil-a. Hasil korelasi menunjukkan bahwa IOD memiliki pengaruh yang lebih kuat dibandingkan ENSO terhadap variabilitas SPL dan klorofil-a di Laut Sawu.

**Kata kunci :** Laut Sawu, Suhu Permukaan Laut, Klorofil-a, ENSO, IOD.

### Abstract

#### *The Influence of ENSO and IOD on SST and Chlorophyll-a Variability in the Sawu Sea*

*The Sawu Sea is one of Indonesia's waters with complex oceanographic conditions influenced by the monsoon wind system and global climate variations. Changes in the El-Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Indian Ocean Dipole (IOD) affect sea surface temperature (SST) and chlorophyll-a in this region. This study aims to examine seasonal variations in SST, chlorophyll-a, and wind, as well as analyze the influence of ENSO and IOD on their variability in the Sawu Sea. The datasets used include SST from OSTIA, chlorophyll-a from OC-CCI, wind from ASCAT, and the ONI and DMI indices as ENSO and IOD indicators for the period 2015-2024. Data were analyzed using composite methods, Pearson correlation, and spatial interpretation from monthly anomaly maps. The results show that SST is highest during the west monsoon (December-February) and lowest during the east monsoon (June-August), while chlorophyll-a shows the opposite pattern. During El-Niño and positive IOD, SST decreases by  $-0.8^{\circ}\text{C}$  to  $-1.5^{\circ}\text{C}$  and chlorophyll-a increases by  $+0.2$  to  $+0.4$   $\text{mg}/\text{m}^3$ . In contrast, La-Niña and negative IOD cause SST warming and reduced chlorophyll-a. Correlation results indicate that IOD has a stronger influence than ENSO on SST and chlorophyll-a variability in the Sawu Sea.*

**Keywords :** Sawu Sea, Sea Surface Temperature, Chlorophyll-a, ENSO, IOD.

### PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak di antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik serta berada di antara dua benua, yaitu Asia dan Australia. Letak geografis tersebut mengakibatkan dinamika oseanografi perairan Indonesia sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti angin muson, arus laut, dan variabilitas iklim global yang berdampak langsung terhadap perubahan suhu permukaan laut (SPL) dan produktivitas primer yang ditunjukkan oleh konsentrasi klorofil-a (Azuga *et al.*, 2020; Munandar *et al.*, 2021).

SPL menggambarkan kondisi termal perairan, sedangkan klorofil-a merupakan indikator produktivitas primer yang berkaitan dengan kelimpahan fitoplankton (Dwiyanti *et al.*, 2022).

Salah satu perairan yang memiliki peran penting dalam ekosistem laut Indonesia adalah Laut Sawu. Perairan ini dikelilingi oleh Pulau Sumba, Pulau Sawu, Pulau Rote, Pulau Timor, dan Pulau Flores, serta berbatasan langsung dengan Samudra Hindia. Laut Sawu memiliki keanekaragaman hayati yang tinggi dan menjadi wilayah penting bagi perikanan (Muskananfola *et al.*, 2021). Selain itu, Laut Sawu merupakan salah satu wilayah yang dipengaruhi oleh aktivitas *upwelling*, yang dapat meningkatkan produktivitas primer di permukaan laut. *Upwelling* merupakan proses naiknya massa air laut yang lebih dingin dan kaya akan nutrisi dari lapisan bawah ke permukaan, sehingga menyebabkan SPL menurun dan konsentrasi klorofil-a meningkat (Rachman *et al.*, 2024). Mekanisme ini memiliki peran penting dalam mendukung kesuburan perairan dan keberlangsungan ekosistem laut.

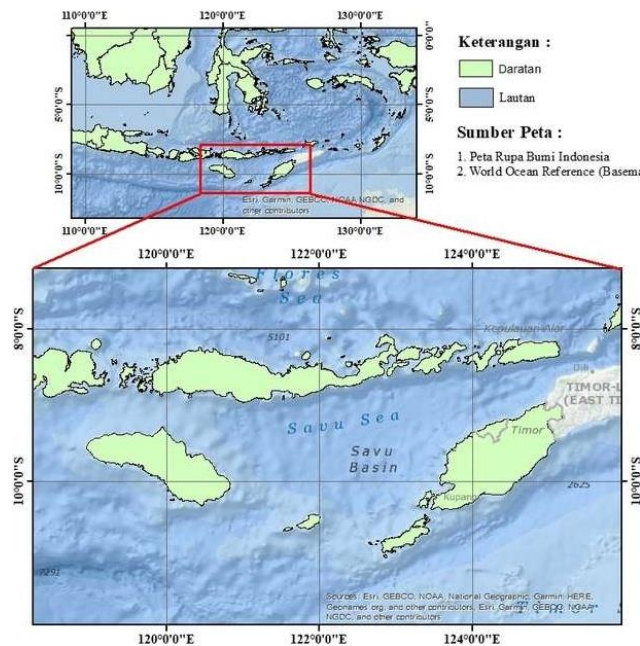
Selain dipengaruhi oleh angin muson, dinamika oseanografi di Laut Sawu juga sangat erat kaitannya dengan variabilitas iklim global seperti *El-Niño-Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD). ENSO ditandai oleh fluktuasi SPL di wilayah Pasifik yang terdiri dari fase *El-Niño* dan *La-Niña* (Nurafifah *et al.*, 2022). Sementara itu, IOD memiliki dua fase, yaitu IOD positif yang ditandai dengan pemanasan di bagian barat Samudra Hindia dan pendinginan di bagian timur Samudra Hindia, serta IOD negatif yang memiliki pola sebaliknya. Kedua fenomena tersebut dapat memengaruhi pola angin, sirkulasi arus, SPL, dan klorofil-a di wilayah Indonesia (Rachman *et al.*, 2024).

Sejumlah penelitian telah menganalisis pengaruh ENSO dan IOD terhadap SPL dan klorofil-a di Indonesia. Studi di wilayah Indonesia bagian timur seperti Laut Banda menunjukkan bahwa kombinasi *El-Niño* dan IOD positif dapat menurunkan SPL dan meningkatkan klorofil-a, sedangkan fase *La-Niña* dan IOD negatif memberikan dampak sebaliknya (Marpaung *et al.*, 2020). Di Laut Sawu sendiri, penelitian mengenai pengaruh ENSO dan IOD terhadap klorofil-a pernah dilakukan oleh penelitian terdahulu menggunakan data sampai tahun 2020 (Aziis *et al.*, 2025; Sie *et al.*, 2025), namun penggunaan data terbaru untuk pengamatan belum dilakukan. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh ENSO dan IOD terhadap variabilitas SPL dan klorofil-a di Laut Sawu pada periode 2015-2024 sebagai upaya memahami dinamika oseanografi regional dan mendukung pengelolaan sumber daya perairan.

## MATERI DAN METODE

### Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 10 tahun dari Januari 2015 sampai Desember 2024 di Laut Sawu ( $8^{\circ}$  LS sampai  $11^{\circ}$  LS dan  $118^{\circ}$  BT sampai  $126^{\circ}$  BT). Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data suhu permukaan laut yang diolah menggunakan citra OSTIA (*Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis*) dari *Marine Copernicus* (0.05°x0.05°). Data klorofil-a menggunakan citra OC-CCI (0.04°x0.04°) yang diunduh dari <http://marine.copernicus.eu>. Penelitian ini juga menggunakan data angin ASCAT (*Advanced Scatterometer*) yang diunduh melalui <http://marine.copernicus.eu> (0.125°x0.125°). Data angin ini sebagai data pendukung untuk mengetahui kecepatan dan arah angin. Variabilitas iklim yang digunakan yaitu ENSO dan IOD. Data *Ocean Nino Indeks* (ONI) dari NOAA digunakan untuk mengidentifikasi ENSO. Data *Dipole Mode Indeks* (DMI) diunduh dari <https://stateoftheocean.osmc.noaa.gov/sur/ind/dmi.php> untuk mengidentifikasi IOD. Semua data yang digunakan memiliki resolusi temporal bulanan.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode kuantitatif. Menurut Sugiyono (2011), metode kuantitatif digunakan untuk penelitian yang menggunakan data-data berupa angka dan analisisnya berupa grafik, tabel, dan peta yang kemudian dapat dianalisa secara statistik dan sistematis untuk mendapatkan pembahasan yang sesuai. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder meliputi SPL, klorofil-a, data variabilitas iklim (ENSO dan IOD). Data-data tersebut yang nantinya akan dianalisa korelasinya sehingga akan terlihat pengaruh dari variabilitas iklim terhadap variabilitas SPL dan klorofil-a.

### Pengolahan Data Suhu Permukaan Laut, Klorofil-a, dan Angin

Data Suhu Permukaan Laut, klorofil-a, dan angin yang digunakan yaitu data rata-rata harian (*daily*) selama 10 tahun (2015-2024). Data yang diunduh dalam data (\*.nc), dari data nc tersebut dilakukan *extract* nilai menggunakan *software* IDL untuk mendapatkan nilai klorofil-a dan SPL serta koordinat longitude-latitude secara spasial. Hasil *extract* kemudian disimpan dalam bentuk file *binary* (\*.bin) agar mudah diolah pada tahapan selanjutnya. Data harian kemudian diolah menjadi data bulanan dan kemudian diolah menjadi data klimatologi bulanan menggunakan rumus berikut (Wirasatriya *et al.*, 2017).

$$\bar{X}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi(x, y, t)$$

Keterangan:  $\bar{X}(x, y)$  = rata-rata bulanan atau klimatologi;  $xi(x, y, t)$  = data harian atau bulanan ke  $i$ ;  $n$  = jumlah jam, hari, atau bulan dalam hari, bulan atau tahun;  $i = 1$  = hari atau bulan ke  $i$ .

Jika  $xi$  adalah Nan, data tersebut tidak mempunyai nilai dan tidak dimasukkan dalam perhitungan rata-rata.

Setelah diperoleh data komposit bulanan dan klimatologi, dilakukan perhitungan anomali pada SPL dan klorofil-a. Perhitungan anomali dilakukan dengan cara mengurangi nilai data bulanan terhadap nilai data klimatologi. Analisis anomali difokuskan pada musim timur yaitu Juni, Juli, dan Agustus (JJA), karena pada periode ini angin muson tenggara bertiup paling kuat dan memicu pendinginan SPL serta peningkatan klorofil-a akibat aktivitas *upwelling*. Kondisi ini dianggap paling representatif untuk menggambarkan respon maksimum Laut Sawu terhadap pengaruh fenomena global ENSO dan IOD. Implementasi data hasil olahan berupa gambar peta klimatologi dan peta anomali.

### Pengolahan Data EMT dan EPV

*Ekman Mass Transport* (EMT) dan *Ekman Pumping Velocity* (EPV) dihitung dari *wind stress*, dengan asumsi bahwa komponen angin sumbu x dengan arah sejajar pantai dan komponen angin sumbu y dengan arah tegak lurus pantai. Menurut Wirasatriya *et al.* (2020), EMT dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} EMT &= \frac{\tau}{\rho_w f} \\ \tau &= \rho_a C_d U_{10}^2 \\ f &= 2 \Omega \sin \varphi \end{aligned}$$

Keterangan:  $\tau$  = vektor *wind stress*;  $\rho_w$  = densitas air laut ( $1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ );  $\rho_a$  = densitas udara ( $1.25 \text{ kg/m}^3$ );  $f$  = parameter Coriolis;  $C_d$  = koefisien drag ( $1.6 \times 10^3$ );  $U_{10}$  = kecepatan angin 10 meter di atas permukaan laut;  $\varphi$  = latitude (dalam radian); u dan v = komponen *zonal* dan *meridional* angin

*Ekman Pumping Velocity* (EPV) dapat dihitung dari *wind stress curl*, dengan asumsi jika komponen angin sumbu x dengan arah sejajar pantai dan komponen angin sumbu y dengan arah tegak lurus pantai. EPV dihitung mengikuti yang dilakukan oleh Wirasatriya *et al.* (2020), seperti persamaan berikut:

$$EPV = -\frac{curl}{\rho_w f}$$

$$curl = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y}$$

Keterangan: *curl*= vektor *wind stress curl*;  $\tau$  = vektor *wind stress*;  $\rho_w$ = densitas air laut ( $1.025 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ );  $f$ = parameter Coriolis

### Pengolahan Data Indeks ENSO

Data *Ocean Nino Indeks* (ONI) dari NOAA digunakan untuk mengidentifikasi pengaruh ENSO terhadap SPL dan klorofil-a. Berdasarkan Nino 3.4 periode dan kekuatan *El-Niño* dan *La-Niña*, dan kondisi normal anomali SPL  $> +0,5^{\circ}\text{C}$  dianggap sebagai *El-Niño*, anomali SPL  $< -0,5^{\circ}\text{C}$  dianggap sebagai *La-Niña*.

### Pengolahan Data Indeks IOD

Nilai indeks IOD didapatkan dari data *Dipole Mode Indeks* (DMI) dengan data bulanan. Setelah mendapatkan data bulanan lalu dikelompokkan berdasarkan nilai anomali SPL. Kemudian diidentifikasi menjadi IOD positif dan IOD negatif. Berdasarkan Saji *et al.*, (1999), DMI  $> +0,4^{\circ}\text{C}$  dianggap sebagai IOD Positif, DMI  $< -0,4^{\circ}\text{C}$  dianggap sebagai IOD Negatif.

### Analisis Korelasi

Menurut Rahayu *et al.* (2023), menggunakan korelasi Pearson untuk mencari hubungan antara dua variabel. Penelitian ini menggunakan analisis korelasi Pearson untuk mengetahui keterkaitan antara ENSO dan IOD terhadap suhu permukaan laut (SPL) dan klorofil-a. Korelasi dapat dihitung dengan rumus persamaan *Pearson Correlation* (Sugiyono, 2011):

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\{n \sum X^2 - (\sum X)^2\} \{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}}$$

Keterangan:  $r$  = nilai koefisien korelasi; X = variabel bebas; Y = variabel terikat; n = jumlah data

Nilai korelasi Pearson ( $r$ ) berkisar pada interval  $-1 \leq r \leq 1$ . Jika korelasi bernilai positif, maka hubungan dua variabel bersifat searah yaitu antara 0 sampai +1. Sebaliknya, jika korelasi bernilai negatif, maka hubungan antara dua variabel bersifat berlawanan arah yaitu antara -1 sampai 0. Nilai kekuatan hubungan antar parameter terdapat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Nilai Korelasi Pearson (Sumber: Jabnabillah & Margina, 2022)

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Lemah
0,20 – 0,399	Lemah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,000	Sangat Kuat

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Variabilitas Suhu Permukaan Laut (SPL), Klorofil-a dan Angin di Laut Sawu

Analisis data klimatologi suhu permukaan laut (SPL), klorofil-a, dan angin yang disajikan pada Tabel 2. menunjukkan adanya variasi yang cukup jelas sepanjang tahun. Nilai SPL di Laut Sawu berkisar antara 27,32°C hingga 29,97°C, dengan suhu tertinggi terjadi pada musim barat (Desember-Februari) dengan puncak pada bulan Desember sebesar 29,97°C. Suhu terendah terjadi pada musim timur (Juni-Agustus), yaitu 27,32°C pada bulan Agustus setelah mengalami penurunan bertahap sejak April. Pada Tabel 2. menunjukkan bahwa SPL mulai meningkat kembali pada bulan September hingga puncaknya pada Desember. Sebaliknya, konsentrasi klorofil-a menunjukkan pola berlawanan dengan kisaran 0,18-0,47 mg/m<sup>3</sup>. Nilai terendah terjadi pada Januari-Februari (0,18 mg/m<sup>3</sup>), sedangkan nilai tertinggi mencapai 0,47 mg/m<sup>3</sup> pada Agustus, sejalan dengan peningkatan produktivitas primer saat SPL menurun akibat *upwelling* musiman (Oktaviani *et al.*, 2021). Kecepatan angin berkisar 1,49-5,28 m/s dengan puncak pada Juli, bertepatan dengan SPL minimum dan klorofil-a maksimum, menunjukkan peran penting angin muson tenggara dalam pengendalian dinamika permukaan laut. Pola ini sesuai dengan hasil penelitian Aziis *et al.* (2025), yang menyatakan bahwa fluktuasi SPL di Laut Sawu dikendalikan oleh perubahan intensitas angin muson.

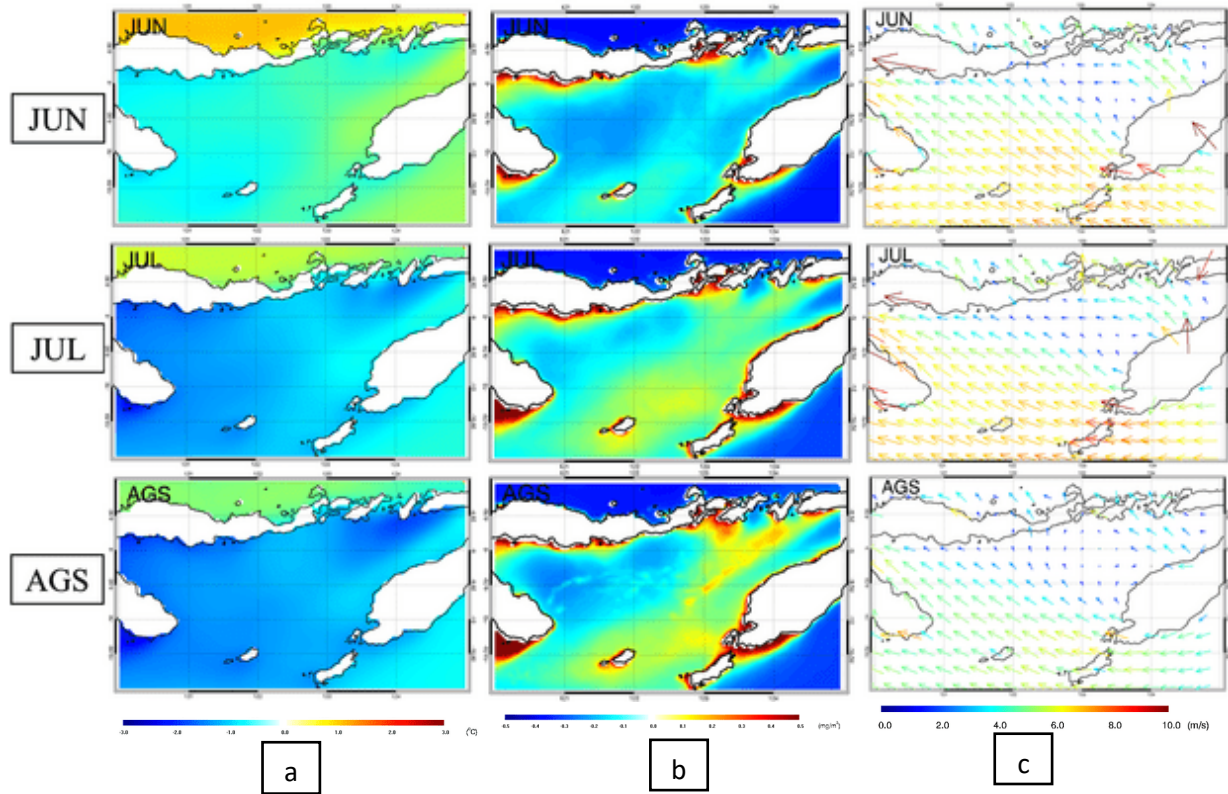
Secara spasial (Gambar 2), SPL pada musim timur didominasi nilai rendah 27,3-28,7°C, dengan pendinginan maksimum pada Agustus. Sebaliknya, klorofil-a menunjukkan peningkatan signifikan mencapai 0,4–0,47 mg/m<sup>3</sup> terutama di pesisir selatan Flores, Rote, dan Sawu, mengindikasikan kuatnya proses *upwelling* yang mengangkat air bersuhu rendah dan kaya nutrisi ke permukaan. Variasi ini konsisten dengan Nurafifah *et al.* (2022), yang menyatakan bahwa penguatan angin tenggara meningkatkan suplai nutrisi melalui pengadukan vertikal, serta dengan Wirasatriya *et al.* (2017), yang menunjukkan bahwa angin kuat mempercepat pelepasan panas dari laut sehingga memperkuat pendinginan SPL. Angin klimatologi pada musim timur bertiup dominan dari tenggara dengan kecepatan 3–6 m/s dan mencapai maksimum pada Juli, memicu divergensi massa air permukaan dan memperjelas pola hubungan musiman antara SPL, klorofil-a, dan angin.

### Pengaruh ENSO dan IOD Terhadap Variabilitas SPL dan Klorofil-a di Laut Sawu

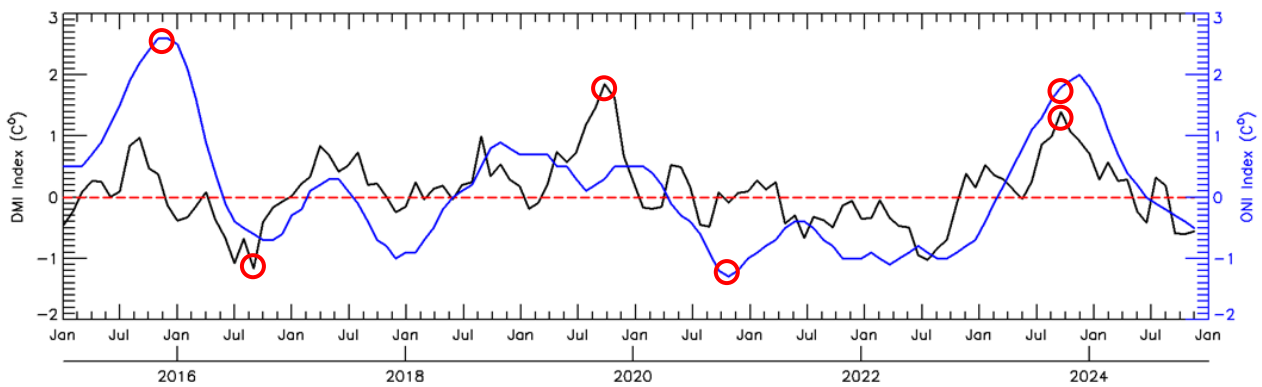
Variabilitas iklim ENSO dan IOD pada periode 2015-2024 (Gambar 3) menunjukkan beberapa kejadian penting yang mempengaruhi dinamika laut di wilayah Indonesia. *El-Niño* kuat 2015 (ONI +2,6°C) identik dengan pergeseran massa air hangat ke Pasifik tengah sehingga memicu pendinginan di wilayah Indonesia (Hidayat *et al.*, 2018; Asyam *et al.*, 2024). IOD negatif 2016 (DMI -1,16°C) menyebabkan pemanasan di timur Samudra Hindia yang berdampak melemahkan pendinginan muson tenggara (Azuga *et al.*, 2020). IOD positif kuat pada 2019 (DMI +1,85°C) dikenal meningkatkan *upwelling* di selatan Indonesia akibat gradien tekanan dari barat ke timur (Oktaviani *et al.*, 2021; Almunawir *et al.*, 2024). *La-Niña* 2020 (ONI -1,3°C) secara umum meningkatkan SPL di Indonesia, namun beberapa wilayah selatan seperti Sawu-Timor tetap mengalami pendinginan akibat dominasi angin muson tenggara (Destyano *et al.*, 2025). Kombinasi *El-Niño* dan IOD positif tahun 2023 kembali memperlihatkan pendinginan kuat sebagaimana dijelaskan Aziis *et al.* (2025), yang menyebut fenomena ganda ini mampu memperkuat anomali SPL negatif di perairan selatan Indonesia.

**Tabel 2.** Klimatologi SPL, Klorofil-a, dan Angin 2015-2024 Laut Sawu

Bulan	SPL (°C)	Klorofil-a (mg/m <sup>3</sup> )	Angin (m/s)
1	29,54	0,18	4,80
2	29,33	0,18	3,65
3	29,51	0,19	3,01
4	29,86	0,22	3,47
5	29,41	0,31	4,40
6	28,76	0,37	5,21
7	27,42	0,46	5,28
8	27,32	0,47	3,88
9	28,07	0,38	2,88
10	29,24	0,28	1,49
11	29,92	0,21	2,05
12	29,97	0,19	3,35



**Gambar 2.** Klimatologi Juni, Juli, Agustus periode 2015-2024 Laut Sawu (a) SPL (b) klorofil-a (c) angin

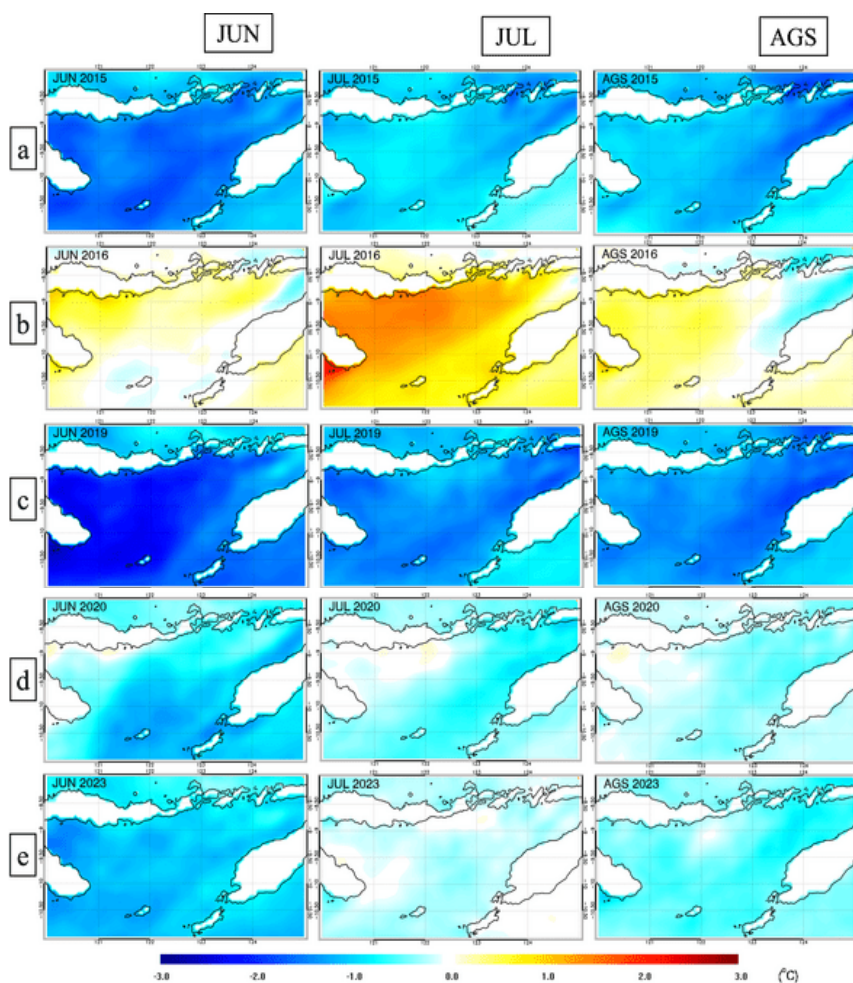


**Gambar 3.** Grafik *timeseries* ENSO dan IOD periode 2015-2024

Pola anomali suhu permukaan laut (SPL) di Laut Sawu selama musim timur (Juni-Agustus) disajikan pada Gambar 4. yang memperlihatkan respon berbeda pada setiap kejadian ENSO dan IOD. Pada periode *El-Niño* 2015, pendinginan yang kuat terjadi di hampir seluruh wilayah Laut Sawu dengan anomali mencapai  $-1,5^{\circ}\text{C}$  hingga  $-2,5^{\circ}\text{C}$  terutama di selatan Pulau Alor, Pulau Timor, dan Pulau Rote, hal tersebut terjadi akibat penguatan angin tenggara yang meningkatkan divergensi permukaan dan menurunkan SPL (Hidayat *et al.*, 2018; Setiawan *et al.*, 2020). IOD negatif 2016 menunjukkan pemanasan  $+1,5^{\circ}\text{C}$  pada Juli yang menandakan melemahnya pendinginan musiman. Kondisi ini sesuai dengan temuan Azuga *et al.* (2020) bahwa fase IOD negatif melemahkan angin muson, sehingga menghambat *upwelling* dan menyebabkan perairan menghangat di timur Samudra Hindia. IOD positif 2019 menghasilkan pendinginan sangat kuat ( $-1,5$  hingga  $-3,0^{\circ}\text{C}$ ), konsisten dengan mekanisme peningkatan *upwelling* yang disebutkan oleh Oktaviani *et al.* (2021). Pendinginan ini diperkuat oleh gelombang *Rossby* dari barat yang menurunkan tinggi muka laut di selatan

Indonesia (Almunawir *et al.*, 2024). Fenomena *La-Niña* 2020 memperlihatkan respon yang lebih lemah, terlihat pendinginan SPL hanya terjadi secara terbatas dengan anomali  $-0,5^{\circ}\text{C}$  hingga  $-1,5^{\circ}\text{C}$ , yang menunjukkan bahwa angin muson tenggara masih cukup kuat sebagaimana dijelaskan Destyano *et al.* (2025) yang menjaga pendinginan meskipun secara global *La-Niña* identik dengan pemanasan di wilayah Indonesia. Pada kombinasi *El-Niño* dan IOD positif tahun 2023, pendinginan SPL kembali terlihat jelas dengan anomali  $-0,8^{\circ}\text{C}$  hingga  $-1,5^{\circ}\text{C}$  pada Juni, meskipun melemah pada Juli sebelum kembali menguat pada Agustus. Perbedaan intensitas pendinginan ini menunjukkan bahwa ENSO dan IOD memiliki pengaruh yang signifikan terhadap SPL di Laut Sawu. *El-Niño* kuat dan IOD positif cenderung memperkuat pendinginan musiman dan meningkatkan intensitas *upwelling*, sesuai dengan sifat kedua fenomena yang sama-sama menurunkan SPL regional (Aziis *et al.*, 2025).

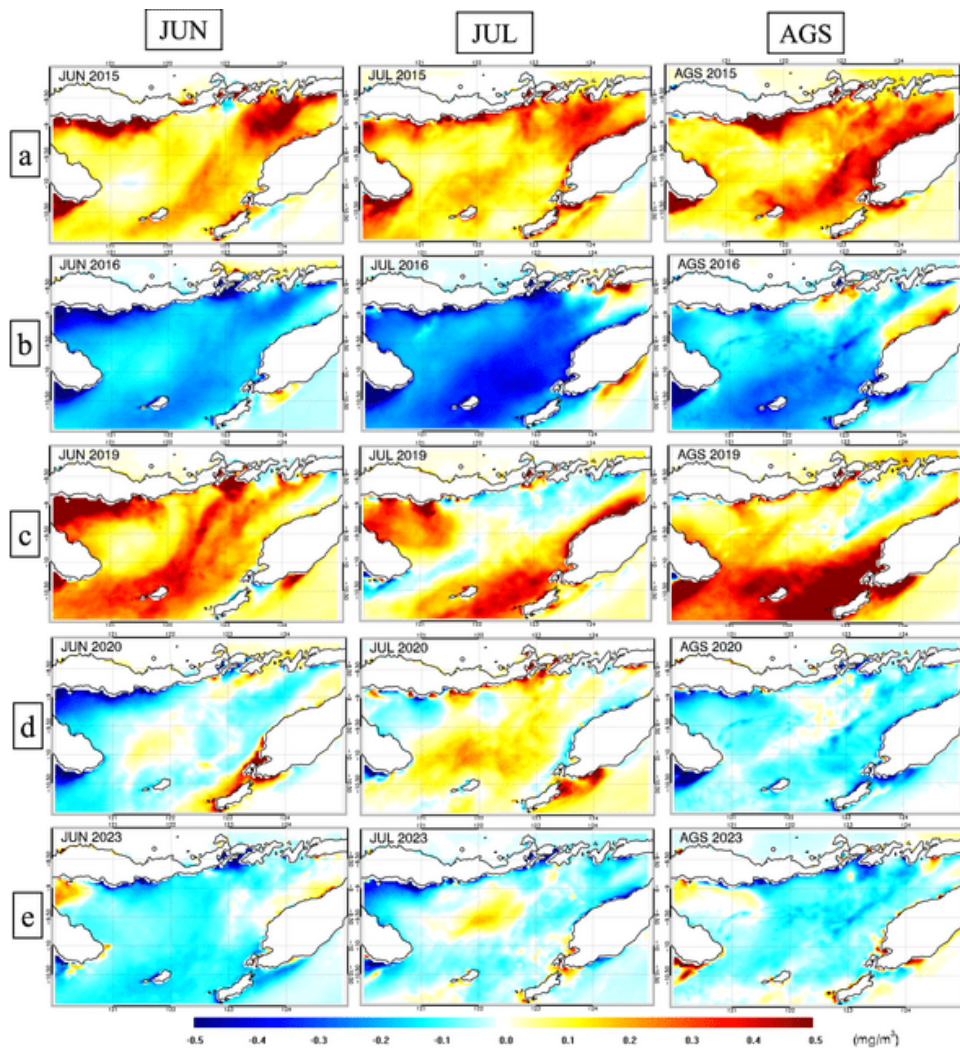
Anomali klorofil-a di Laut Sawu selama musim timur (Juni–Agustus) menunjukkan respon yang konsisten dengan proses *upwelling*. Pada *El-Niño* 2015, konsentrasi klorofil-a meningkat signifikan dengan anomali positif  $+0,1$  hingga  $+0,5 \text{ mg/m}^3$ , terutama di pesisir Pulau Alor, Pulau Timor, dan Pulau Flores, yang mencerminkan penguatan *upwelling* musiman yang selaras dengan pendinginan SPL dan suplai nutrisi dari bawah (Hidayat *et al.*, 2018). Sebaliknya, pada IOD negatif 2016 terjadi penurunan klorofil-a yang luas dengan anomali  $-0,1$  hingga  $-0,5 \text{ mg/m}^3$ , karena lemahnya suplai nutrisi akibat berkurangnya intensitas *upwelling* (Oktaviani *et al.*, 2021). IOD positif 2019 meningkatkan produktivitas perairan dengan anomali positif  $+0,1$  hingga  $+0,5 \text{ mg/m}^3$ , terutama di pesisir selatan Laut Sawu, konsisten dengan pendinginan SPL yang kuat pada periode ini. Fase ini dikenal memperkuat gradien tekanan permukaan dan meningkatkan *upwelling*



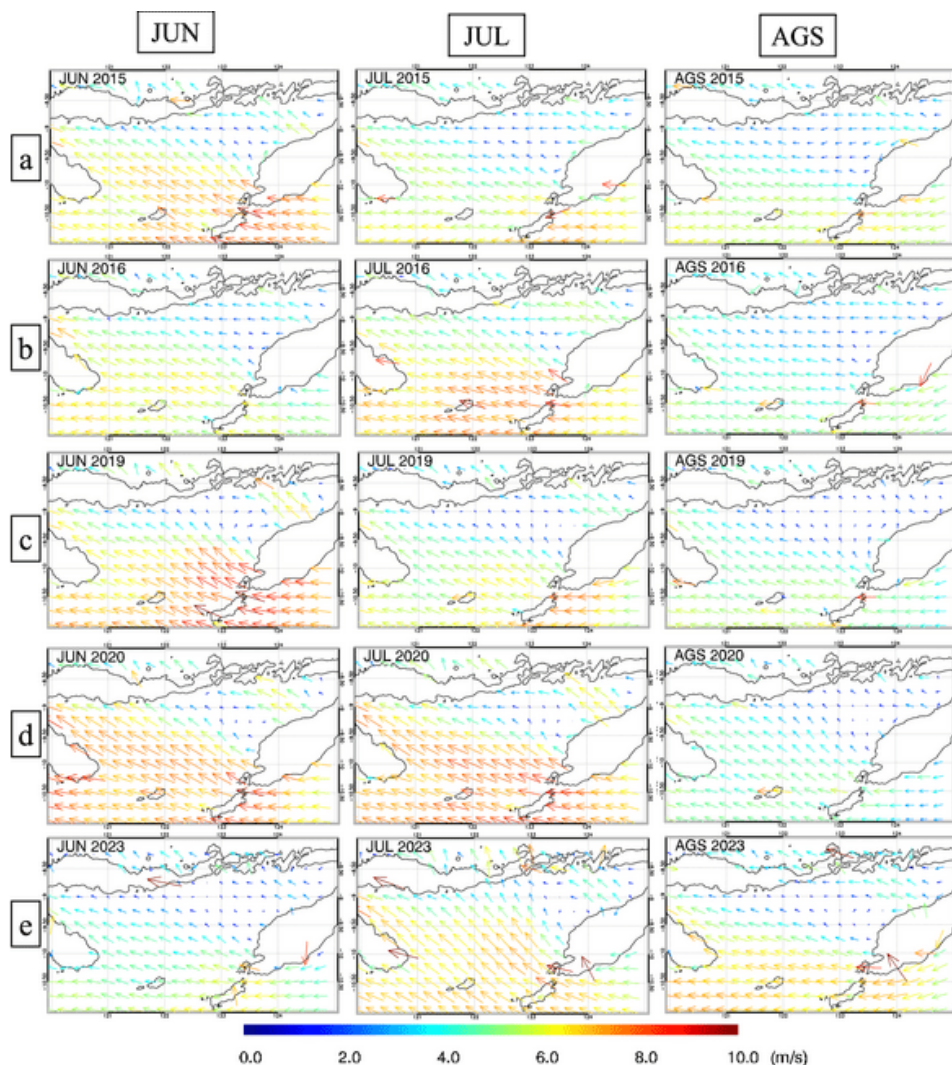
**Gambar 4.** Anomali SPL (Juni, Juli, Agustus) di Laut Sawu a) *El-Niño* 2015, b) IOD Negatif 2016, c) IOD Positif 2019, d) *La-Niña* 2020, e) *El-Niño* + IOD Positif 2023

(Almunawir *et al.*, 2024). Sementara itu, *La-Niña* 2020 menunjukkan pola campuran, dengan anomali positif lemah pada Juni-Juli (+0,1 hingga +0,25 mg/m<sup>3</sup>) yang kemudian melemah kembali pada Agustus. Hal ini sejalan dengan penelitian Wirasatriya *et al.* (2020) dan Rachman *et al.* (2024) yang menyebutkan bahwa *upwelling* di selatan Indonesia bersifat lokal dan sangat tergantung divergensi horizontal. Pada kombinasi *El-Niño* dan IOD positif tahun 2023, anomali klorofil-a didominasi nilai negatif pada Juni (-0,1 hingga -0,3 mg/m<sup>3</sup>), disertai peningkatan terbatas pada Juli (+0,1 hingga +0,15 mg/m<sup>3</sup>) namun tidak meluas akibat distribusi nutrisi yang kurang efektif. Variasi ini menunjukkan bahwa peningkatan klorofil-a paling kuat terjadi pada *El-Niño* dan IOD positif, sedangkan penurunan terbesar terjadi pada IOD negatif yang menekan proses *upwelling* di Laut Sawu.

Pola angin selama periode ENSO dan IOD (Gambar 6) menunjukkan dinamika muson tenggara berperan penting dalam mempengaruhi variabilitas SPL dan klorofil-a di Laut Sawu. Saat *El-Niño* 2015, angin bertiup konsisten dari tenggara menuju barat laut dengan kecepatan tinggi pada bulan Juni-Juli (6-10 m/s) yang memperkuat *upwelling* (Setiawan *et al.*, 2020), kemudian melemah pada Agustus menjadi sekitar 4-6 m/s. Pada IOD negatif 2016, pola angin tetap berasal dari tenggara, namun intensitasnya tidak stabil. Pada bulan Juni menunjukkan kecepatan sedang (4-6 m/s), meningkat pada Juli (7-9 m/s), lalu melemah tajam pada Agustus hingga <4 m/s. Hal tersebut menunjukkan ketidakstabilan kekuatan angin, sehingga tidak mampu mempertahankan pendinginan dan suplai nutrisi, pola tersebut sesuai dengan mekanisme IOD negatif yang



**Gambar 5.** Anomali Klorofil-a (Juni, Juli, Agustus) di Laut Sawu a) *El-Niño* 2015, b) IOD Negatif 2016, c) IOD Positif 2019, d) *La-Niña* 2020, e) *El-Niño* + IOD Positif 2023



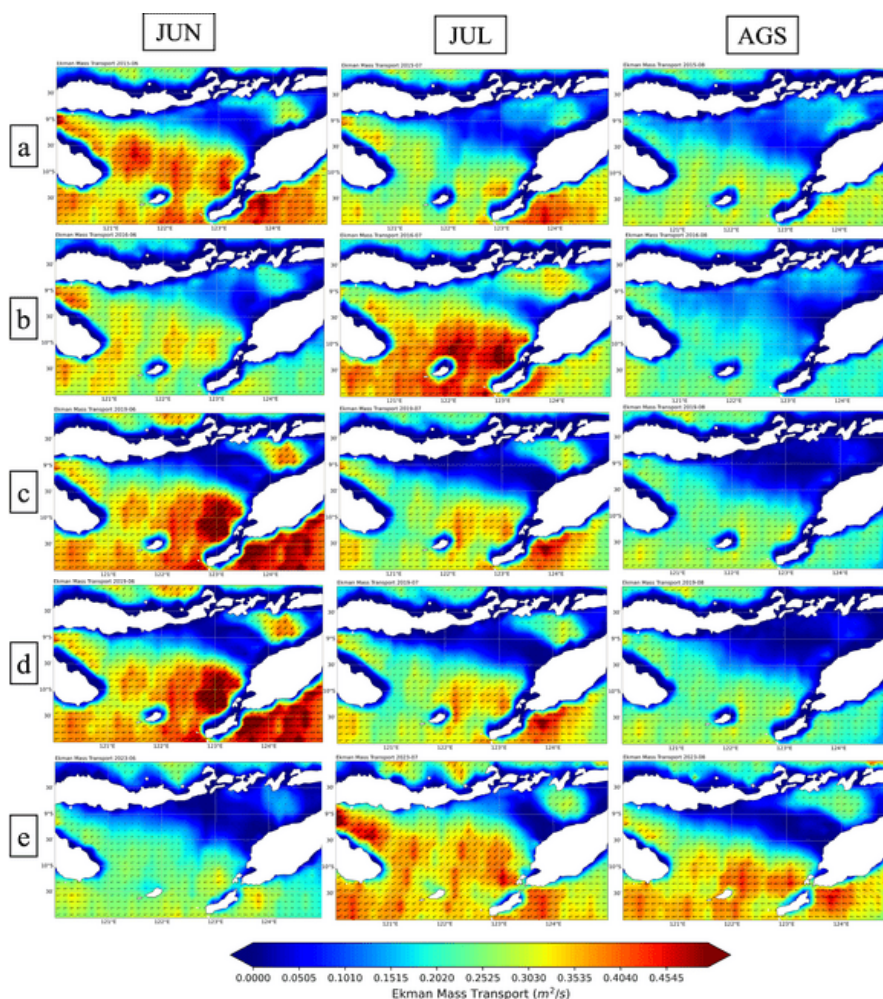
**Gambar 6.** Kecepatan dan Arah Angin (Juni, Juli, Agustus) di Laut Sawu a) *El-Niño* 2015, b) IOD Negatif 2016, c) IOD Positif 2019, d) *La-Niña* 2020, e) *El-Niño* + IOD Positif 2023

melemahkan gradien tekanan atmosfer (Azuga *et al.*, 2020). Sebaliknya, pada IOD positif 2019 terjadi penguatan angin muson pada Juni dengan kecepatan mencapai 8–10 m/s, sebelum kembali melemah pada Juli-Agustus menjadi sekitar 4–6 m/s. Pola yang hampir sama terjadi pada *La-Niña* 2020, di mana Juni-Juli ditandai angin kuat (8–10 m/s) dan melemah pada Agustus. Pada kombinasi *El-Niño* dan IOD positif 2023, angin menunjukkan variasi yang lebih fluktuatif, penguatan terjadi pada Juli (7–9 m/s), sementara Juni dan Agustus menunjukkan kecepatan lebih rendah (4–7 m/s). Variasi kekuatan angin ini berkaitan erat dengan perubahan intensitas divergensi permukaan yang mengatur muncul atau melemahnya *upwelling* pada masing-masing fenomena iklim tersebut. Wirasatriya *et al.* (2017) menegaskan bahwa perubahan kecepatan angin langsung mengatur pelepasan panas laut dan penguatan *upwelling*.

Variasi *Ekman Mass Transport* (EMT) di Laut Sawu memperlihatkan respon yang berbeda setiap kejadian ENSO dan IOD (Gambar 7). Pada *El-Niño* 2015, EMT kuat pada bulan Juni (0,35–0,45 m<sup>2</sup>/s), menandakan divergensi permukaan yang intens dan memicu *upwelling*, sesuai konsep bahwa hembusan angin sejajar pantai dapat mendorong massa air menjauhi garis pantai sehingga digantikan air dari lapisan bawah (Putri *et al.*, 2023). Nilai EMT melemah pada Juli-Agustus (0,05–0,30 m<sup>2</sup>/s), sejalan dengan berkurangnya pendinginan SPL dan stabilnya klorofil-a di akhir musim timur. Pada IOD negatif 2016, EMT masih kuat pada Juni-Juli (0,25–0,45 m<sup>2</sup>/s), namun melemah drastis pada Agustus ( $\leq 0,10$  m<sup>2</sup>/s), yang konsisten dengan pemanasan SPL dan penurunan klorofil-a akibat divergensi permukaan yang melemah sehingga suplai nutrisi

akibat angin muson yang tidak stabil (Wirasatriya *et al.*, 2020). Hal ini sejalan dengan temuan Bernades *et al.* (2021) bahwa variabilitas *upwelling* di wilayah Indonesia sangat sensitif terhadap perubahan angin musiman. Pada IOD positif 2019 EMT menguat pada awal musim dengan nilai 0,30-0,45 m<sup>2</sup>/s dan mendukung pendinginan SPL serta peningkatan klorofil-a. IOD positif 2019 menunjukkan EMT kuat pada Juni (0,30-0,45 m<sup>2</sup>/s), mendukung pendinginan SPL dan peningkatan klorofil-a, tetapi kembali melemah pada akhir musim. Pada *La-Niña* 2020, EMT kuat pada Juni-Juli (0,25-0,45 m<sup>2</sup>/s) namun melemah pada Agustus, sehingga *upwelling* hanya dominan di pesisir. Sementara pada kombinasi *El-Niño* + IOD positif 2023, EMT cenderung lemah dan tidak stabil sepanjang musim, yang menjelaskan mengapa peningkatan klorofil-a hanya terjadi secara lokal. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa EMT yang kuat didukung angin muson tenggara menjadi pemicu utama terbentuknya *upwelling* musiman di Laut Sawu, sesuai dengan mekanisme yang dijelaskan oleh Taufikurahman & Hidayat (2017).

Variasi *Ekman Pumping Velocity* (EPV) di Laut Sawu disajikan pada Gambar 8. Pada *El-Niño* 2015, nilai EPV negatif mencapai -1,0 hingga  $-2,5 \times 10^{-5}$  m/s di pesisir Rote-Timor pada bulan Juni, mencerminkan *upwelling* intens yang dipicu oleh *curl* angin siklonik, sesuai penjelasan Kok *et al.* (2017) bahwa *wind stress curl* dapat menghasilkan gerakan vertikal air laut. Namun, aktivitas ini melemah pada Juli dan hampir netral pada Agustus, seiring menurunnya intensitas angin dan EMT serta berkurangnya pendinginan SPL di akhir musim timur. Pada IOD negatif 2016, EPV cenderung negatif hingga positif (-0,2 hingga  $+1,0 \times 10^{-5}$  m/s), menandakan adanya *downwelling* dan lemahnya *upwelling*, dengan nilai negatif hanya muncul secara lokal di pesisir Sumba dan Sawu pada Juni-Juli, tetapi ikut melemah pada Agustus. Pola ini sejalan dengan

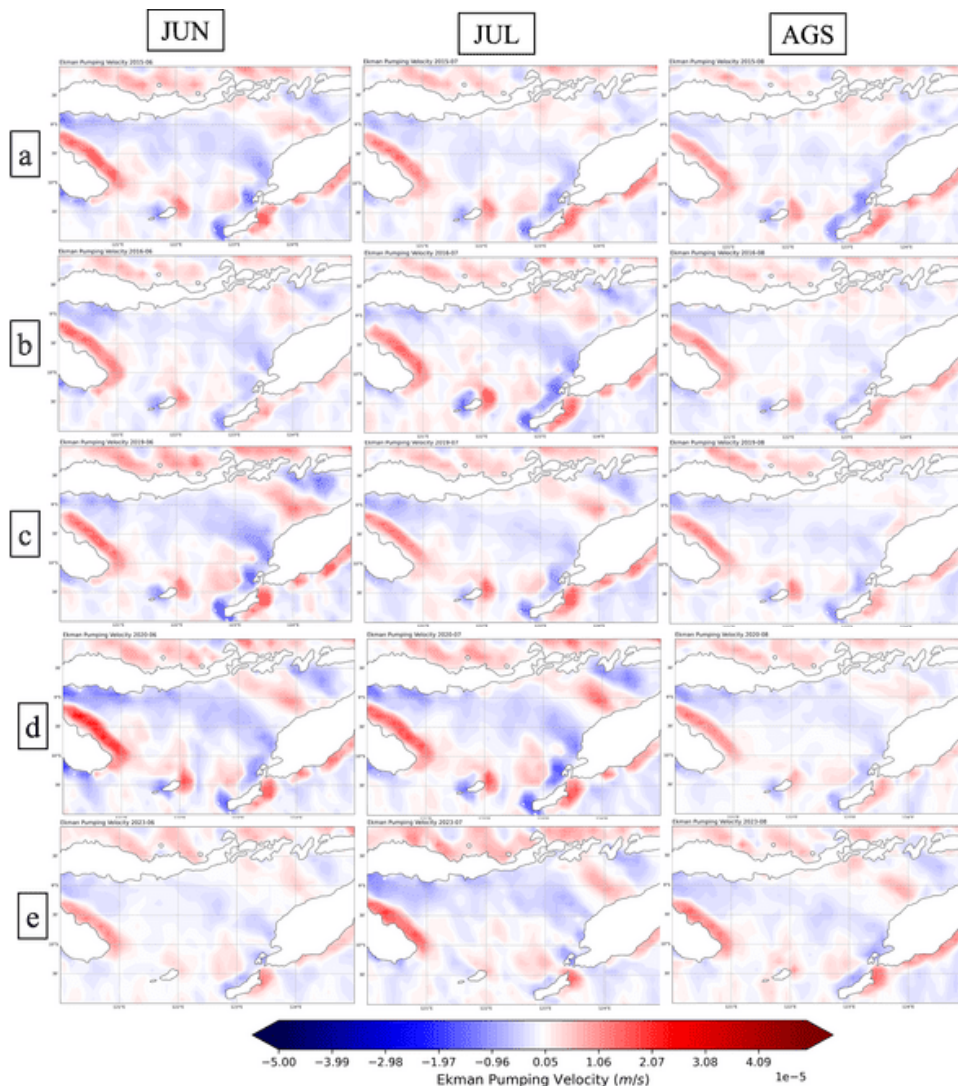


**Gambar 7.** EMT (Juni, Juli, Agustus) di Laut Sawu a) *El-Niño* 2015, b) IOD Negatif 2016, c) IOD Positif 2019, d) *La-Niña* 2020, e) *El-Niño* + IOD Positif 2023

mekanisme yang dijelaskan oleh Sanson *et al.* (2023) bahwa *curl* antisiklonik menghasilkan *pumping* ke bawah sehingga menghambat suplai nutrisi. Sebaliknya, IOD positif 2019 memperlihatkan EPV negatif kuat ( $-1,0$  hingga  $-2,0 \times 10^{-5}$  m/s) pada Juni-Juli, mendukung pendinginan SPL dan tingginya klorofil-a. Pada *La-Niña* 2020, *upwelling* lokal juga muncul kuat di pesisir Rote-Timor, sedangkan bagian tengah Laut Sawu mengalami *downwelling* lemah. Pada kombinasi *El-Niño* + IOD positif 2023, EPV menunjukkan variabilitas spasial tinggi, dengan *upwelling* lokal yang menguat pada Juli namun melemah kembali pada Agustus. Variasi ini memperkuat temuan Kim *et al.* (2017) bahwa EPV berperan penting dalam mengatur suplai nutrisi ke lapisan permukaan dan sangat sensitif terhadap perubahan *curl* angin.

**Tabel 3.** Hasil Korelasi Pearson

Pasangan Variabel	Koefisien r	p-value
Anomali SPL - ONI	-0,236	0,05
Anomali SPL - DMI	-0,561	0,05
Anomali Klorofil-a - ONI	0,456	0,05
Anomali Klorofil-a - DMI	0,534	0,05



**Gambar 8.** EPV (Juni, Juli, Agustus) di Laut Sawu a) *El-Niño* 2015, b) IOD Negatif 2016, c) IOD Positif 2019, d) *La-Niña* 2020, e) *El-Niño* + IOD Positif 2023. Nilai negatif (positif) menunjukkan adanya *upwelling* (*downwelling*)

Hasil analisis korelasi Pearson pada Tabel 3. menunjukkan bahwa variabilitas SPL dan klorofil-a di Laut Sawu dipengaruhi oleh ENSO dan IOD dengan kekuatan hubungan yang berbeda. Anomali SPL memiliki korelasi negatif lemah terhadap ONI ( $r = -0,236$ ), menandakan bahwa *El-Niño* cenderung menurunkan SPL meskipun pengaruhnya tidak terlalu besar, hal ini konsisten dengan karakter ENSO yang bervariasi antar wilayah (Asyam *et al.*, 2024). Sebaliknya, korelasi SPL terhadap DMI jauh lebih kuat ( $r = -0,561$ ), menunjukkan bahwa fase IOD positif memiliki dampak lebih signifikan dalam memperkuat pendinginan SPL di Indonesia bagian selatan, sejalan dengan penjelasan Azuga *et al.* (2020). Untuk klorofil-a, korelasi terhadap ONI bersifat positif sedang ( $r = 0,456$ ), mengindikasikan bahwa *El-Niño* dapat meningkatkan produktivitas primer pada beberapa wilayah Indonesia (Nurafifah *et al.*, 2022), meskipun tidak dominan di semua lokasi. Korelasi terkuat terlihat pada hubungan klorofil-a terhadap DMI ( $r = 0,634$ ), yang menunjukkan bahwa IOD positif meningkatkan suplai nutrisi melalui penguatan *upwelling* (Oktaviani *et al.*, 2021). Secara keseluruhan, korelasi ini menegaskan bahwa IOD memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan ENSO terhadap SPL dan klorofil-a di Laut Sawu.

## KESIMPULAN

Fenomena ENSO dan IOD terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap dinamika oseanografi di wilayah Laut Sawu. *El-Niño* 2015 dan 2023 serta IOD positif 2019 memperkuat pendinginan SPL dan meningkatkan klorofil-a melalui penguatan angin muson dan intensitas *upwelling*. Sebaliknya, *La-Niña* 2020 dan IOD negatif 2016 menghasilkan respon yang berbeda. *La-Niña* memang secara umum menyebabkan penghangatan di wilayah perairan Indonesia, namun di Laut Sawu efeknya lebih lemah dan bersifat lokal karena pengaruh dominan angin muson timur yang sudah kuat secara klimatologis. Sementara itu, IOD negatif menyebabkan pemanasan SPL yang lebih luas serta penurunan klorofil-a akibat melemahnya angin muson, divergensi massa air, dan meningkatnya kecenderungan *downwelling*.

Hasil korelasi Pearson memperlihatkan hubungan negatif antara SPL dan DMI serta hubungan positif antara klorofil-a dan DMI dengan nilai korelasi lebih besar DMI yang menegaskan bahwa IOD memiliki pengaruh lebih dominan dibanding ENSO terhadap variabilitas SPL dan klorofil-a di Laut Sawu. Secara keseluruhan, dinamika perairan Laut Sawu dikendalikan oleh kombinasi fenomena global (ENSO–IOD), kekuatan angin muson tenggara, serta kondisi topografi lokal yang mendukung terjadinya *upwelling* musiman.

## DAFTAR PUSTAKA

- Almunawir, M. F. K., A. Wirasatriya, dan R. Widiaratih. 2024. Pengaruh IOD Positif Kuat 2019 terhadap Karakteristik Upwelling di Perairan Nusa Tenggara. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6:72–83.
- Asyam, A. M. D., Rochaddi, B. & Widiaratih, R. 2024. Hubungan ENSO dan IOD terhadap Suhu Permukaan laut dan Curah Hujan di Selatan Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(2): 165–172.
- Aziis, D. M., Wirasatriya, A. & Setiyono, H., 2025. Pengaruh El Nino Kuat 2023 Terhadap Variabilitas Suhu Permukaan Laut Dan Curah Hujan Di Laut Sawu. *Indonesian Journal of Oceanography*, 7(1):32–41.
- Azuga, N. A., M. Galib, dan Elizal. 2020. Analyzing The Effect of Indian Ocean Dipole Phenomenon to The Anomalies Distribution of Sea Surface Temperature in West Sumatera. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 3(3):260–270.
- Bernades, H., Suryoputro, A. A. D., Wirasatriya, A., Handoyo, G., Rifai, A., Maslukah, L. & Sugianto, D. N. 2021. The Effect of Ekman Mass Transport and Ekman Pumping Velocity on the Variability of Sea Surface Temperature in the Arafura Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 919(1):1-10.
- Destyano, G. D., A. Wirasatriya, M. Zainuri, Y. J. Wijaya, B. Munandar, dan M. Helmi. 2025. Comparison of Triple-Dip La Niña in 2020-2023 with Strong and Weak La Niña Events on Indonesian Rainfall and SST. *Geographia Technica*, 20(2):319-335.
- Dwiyanti, A., Maslukah, L. & Rifai, A., 2022. Pengaruh Suhu Permukaan Laut (SPL) dan Klorofil-a Terhadap Hasil Tangkapan Ikan Layang (*Decapterus macrosoma*) di Perairan Kabupaten Rembang, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(4):109-119.
- Hidayat, A. M., U. Efendi, L. Agustina, P. A. Winarso. 2018. Korelasi Indeks Nino 3.4 Dan Southern Oscillation Index (SOI) dengan Variasi Curah Hujan di Semarang. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*. 19(2): 75–81.

- Jabnabillah, F., & Margina, N. 2022. Analisis Korelasi Pearson Dalam Menentukan Hubungan Antara Motivasi Belajar Dengan Kemandirian Belajar Pada Pembelajaran Daring. *Jurnal Sintak*, 1(1).
- Kim, T. W., Ha, H. K., Wahlin, A. K., Lee, S. H., Kim, C. S., Lee, J. H. & Cho, Y. K. 2017. Is Ekman Pumping Responsible for The Seasonal Variation of Warm Circumpolar Deep Water in The Amundsen Sea?. *Continental Shelf Research*, 132:38-48
- Kok, P. H., Akhir, M. F. M., Tangang, F. & Husain, M. L. 2017. Spatiotemporal Trends in The Southwest Monsoon Wind-Driven Upwelling in The Southwestern Part of The South China Sea. *PLoS ONE*. 12(2): 122.
- Marpaung, S., Faristyawan, R., Purwanto, A. D., Asriningrum, W., Suhada, A. G., Prayogo, T. & Sitorus, J. 2020. Analysis of Water Productivity in The Banda Sea Based on Remote Sensing Satellite Data. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 17(1):25.
- Munandar, B., Wirasatriya, A., Sugianto, D. N., Ambariyanto, A. & Sunaryo, S. 2021. Respon Kecepatan Angin Terhadap Variabilitas Klorofil-a di Laut Filipina dan Maluku Bagian Utara. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(3):269-276.
- Muskananfolo, M. R., Jumsar & Wirasatriya, A. 2021. Spatio-Temporal Distribution of Chlorophyll-a Concentration, Sea Surface Temperature and Wind Speed using Aqua-Modis Satellite Imagery over the Savu Sea, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22:1-9.
- Nurafifah, U. O., Zainuri, M. & Wirasatriya, A. 2022. Pengaruh ENSO dan IOD Terhadap Distribusi Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a Pada Periode Upwelling di Laut Banda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(3):74-85.
- Oktaviani, D., G. Handoyo, M. Helmi, Kunarso dan A. Wirasatriya. 2021. Karakteristik Upwelling pada Periode Indian Ocean Dipole (IOD) Positif di Perairan Selatan Jawa Barat. *Indonesian Journal of Oceanography*. 3(4): 23-30.
- Putri, E. M. J., Wirasatriya, A. & Marwoto, J. 2023. Pengaruh Ekman Mass Transport dan Ekman Pumping Velocity Terhadap Upwelling di Perairan Selatan Pulau Bali-Sumbawa. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(3):118-130.
- Rachman, H. A., Setiawati, M. D., Hidayah, Z., Syah, A. F., Nandika, M. R., Lumban-Gaol, J., As-syakur, A. R. & Syamsudin, F. 2024. Dynamic of Upwelling Variability in Southern Indonesia Region Revealed from Satellite Data: Role of ENSO and IOD. *Journal of Sea Research*, 202:1-17.
- Rahayu, P. S., Pranowo, S. W., Setiyadi, J., Sumardana, I. W. E. & Suprijanto, J. 2023. Pola Arus dan Sebaran Fosfat di Perairan Selat Sunda. *Jurnal Hidropilar*, 9(1):21–30.
- Saji, N., Goswami, B., Vinayachandran, P. & Yamagata, T. 1999. A Dipole Mode in The Tropical Indian Ocean. *Nature* 401, 360 – 363.
- Sanson L. Z., Martinez, I. M. G. & Sheinbaum, J. 2023. Nonlinear Surface Ekman Effects on Cyclonic and Anticyclonic Vortices. *Journal of Fluid Mechanics*, 971:1–24.
- Setiawan, R. Y., A. Wirasatriya, U. Hernawan, S. Leung, dan I. Iskandar. 2020. Spatio-Temporal Variability of Surface Chlorophyll-a in The Halmahera Sea and Its Relation to ENSO and The Indian Ocean Dipole. *International Journal of Remote Sensing*. 41(1):284-299.
- Sie, F.M.P., Yasunaka, S. & Wirasatriya, A. 2025. Seasonal and Interannual Variations in Local Minimum Sea Surface Temperature and Maximum Chlorophyll-a Around the Savu Sea, Indonesia. *Prog Earth Planet Sci* 12, 106.
- Sugiyono. 2011. Metodologi Penelitian Kuantitatif Kualitatif Dan R&D. Alfabeta.
- Taufikurahman, Q. & Hidayat, R. 2017. Coastal Upwelling in Southern Coast of Sumbawa Island, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 54(1).
- Wirasatriya, A., Setiawan, J. D., Sugianto, D. N., Rosyadi, I. A., Haryadi, Winarso, G, Setiawan, R. Y. & Susanto, R. D. 2020. Ekman Dynamics Variability Along The Southern Coast of Java Revealed by Satellite Data. *International Journal of Remote Sensing*, 41(21):8475–8496.
- Wirasatriya, A., Setiawan, R. Y. & Subardjo, P. 2017. The Effect of ENSO on the Variability of Chlorophyll-a and Sea Surface Temperature in the Maluku Sea. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12):5513–5518.