

Pengaruh Variabilitas Iklim ENSO dan IOD pada Upwelling Aceh Tahun 1998–2022

Afiq Mahasin^{1*}, Heryoso Setiyono¹, Rahaden Bagas Hatmaja²

¹Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacob Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia

²Pusat Riset Iklim dan Atmosfer, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Jl. Tamansari No.71, Lb. Siliwangi, Coblong, Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia
Email: mahasinafiq@gmail.com

Abstract

The Influence of ENSO and IOD on Upwelling Characteristics in North Sea Aceh During the Northern Moonsoon 1998-2022

The geographical location of the Northern Aceh Waters adjacent to the Indian Ocean, Malacca Strait, and Andaman Sea makes the conditions of ocean-atmosphere interactions in these waters very complex. Ocean-atmosphere interactions occur can also be caused by climate influences such as ENSO (El-Nino Southern Oscillation) and IOD (Indian Ocean Dipole). ENSO and IOD variability can affect the characteristics of upwelling that occur. This study aims to determine the characteristics of upwelling in the western season and the influence of ENSO and IOD on the characteristics of upwelling in North Aceh Waters in the western season. The data used in this study include sea surface temperature, chlorophyll-a, and surface winds downloaded from the Marine Copernicus website. The results of this study show that the upwelling phenomenon is indicated by the presence of high Ekman pumping, high sea surface temperature gradient, and cold sea surface temperature, which affect chlorophyll-a concentration. The correlation results also show a strong unidirectional relationship between Ekman pumping and sea surface temperature gradient with chlorophyll-a and a strong inverse relationship between sea surface temperature and chlorophyll-a. The positive IOD influence in 2019-2020 indicates an increase in upwelling characteristic anomalies with an increase in ekman pumping by 1.70 m/s-1, an increase in sea surface temperature gradient by 1.18 °C, a decrease in sea surface temperature by -0.33 °C, and an increase in chlorophyll-a by 0.36 mg/m³.

Keywords: Upwelling; El-Nino Southern Oscillation; Indian Ocean Dipole; Northern Aceh Waters.

Abstrak

Letak geografis Perairan Utara Aceh berdekatan dengan Samudra Hindia, Selat Malaka, dan Laut Andaman yang menjadikan kondisi interaksi atmosfer laut di Perairan tersebut sangat kompleks. Interaksi atmosfer laut yang terjadi dapat juga disebabkan oleh pengaruh iklim seperti ENSO (El-Nino Southern Oscillation) dan IOD (Indian Ocean Dipole). Variabilitas ENSO dan IOD dapat mempengaruhi karakteristik upwelling yang terjadi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik upwelling pada musim barat dan pengaruh dari ENSO dan IOD terhadap karakteristik upwelling di Perairan Utara Aceh pada musim barat. Data yang digunakan pada penelitian ini meliputi suhu permukaan laut, klorofil-a, dan angin permukaan yang diunduh pada website Marine Copernicus. Hasil studi ini menunjukkan fenomena upwelling diindikasikan oleh adanya ekman pumping yang tinggi dan gradient suhu permukaan laut yang tinggi serta suhu permukaan laut yang dingin dalam mempengaruhi konsentrasi klorofil-a. Hasil korelasi juga menunjukkan adanya hubungan searah yang kuat pada ekman pumping dan gradient suhu permukaan laut dengan klorofil-a dan hubungan berbanding terbalik yang kuat pada suhu permukaan laut dengan klorofil-a. Pengaruh IOD positif pada tahun 2019-2020 mengindikasikan peningkatan anomali karakteristik upwelling dengan peningkatan pada ekman pumping sebesar 1.70 m/s⁻¹, peningkatan gradient suhu permukaan laut sebesar 1.18°C, penurunan suhu permukaan laut sebesar -0.33°C, dan peningkatan klorofil-a sebesar 0.36 mg/m³.

Kata kunci : Upwelling; El-Nino Southern Oscillation; Indian Ocean Dipole; Perairan Utara Aceh

PENDAHULUAN

Perairan Utara Aceh memiliki peran penting sebagai jalur pelayaran strategis dan kawasan dengan potensi sumber daya perikanan yang signifikan. Secara geografis, wilayah ini berbatasan langsung dengan Laut Andaman dan Selat Malaka serta terhubung dengan Samudera Hindia (Imamshadiqin *et al.*, 2020). Posisi tersebut menyebabkan kompleksitas tinggi dalam interaksi atmosfer-laut yang mengendalikan siklus angin dan anomali suhu. Dinamika sirkulasi laut dan karakteristik angin di kawasan ini secara langsung memengaruhi pembentukan pola upwelling. Walaupun pengaruh fenomena iklim global seperti ENSO dan IOD terhadap parameter oseanografi

*) Corresponding author
www.ejournal2.undip.ac.id/index.php/jkt

Diterima/Received : 28-11-2025, Disetujui/Accepted : 20-02-2026
DOI: <https://doi.org/10.14710/jkt.v29i1.30205>

di Indonesia telah banyak diteliti, pemahaman spesifik mengenai dampaknya terhadap mekanisme *upwelling* di Perairan Utara Aceh masih terbatas. Penelitian oleh Pasha *et al.* (2022) menunjukkan bahwa ENSO memengaruhi suhu permukaan laut dan salinitas di wilayah ini. Namun, belum terdapat kajian komprehensif yang menganalisis bagaimana fase ENSO dan IOD memperkuat atau melemahkan intensitas *upwelling*. Anomali ini diketahui memicu variabilitas suhu permukaan laut, yang cenderung lebih dingin saat La Nina atau IOD positif dan lebih hangat saat El Nino atau IOD negatif, sehingga menjadi indikator penting dalam pendugaan lokasi *upwelling*, *front*, maupun arus *eddies* (Nurafifah *et al.*, 2022). Kurangnya pemahaman mendalam mengenai interaksi ini mempersulit dalam mengetahui kondisi kesuburan perairan selama anomali iklim, yang pada akhirnya meningkatkan ketidakpastian produktivitas sektor perikanan tangkap.

Upwelling adalah suatu proses naiknya massa air yang berasal dari lapisan dasar ke permukaan. Fenomena *upwelling* sangatlah penting pada ekosistem perairan, yang mana *upwelling* memberikan kesuburan pada suatu perairan (Utama *et al.*, 2023). *Upwelling* dapat disebabkan oleh adanya gerakan angin sejajar dengan pantai kemudian mendorong air menjauhi daerah pesisir akibat adanya gaya coriolis atau biasa disebut dengan istilah *ekman transport*. *Upwelling* juga dapat diketahui oleh adanya indikasi *ekman pumping*. Menurut Kim *et al.*, (2017) *ekman pumping* merupakan kekuatan *stress* antara atmosfer dan laut pada permukaan. Menurut Ramadani *et al.* (2022) wilayah *upwelling* umumnya juga ditandai dengan variabilitas suhu permukaan laut yang rendah daripada wilayah yang disekitarnya. Tak hanya itu indikasi suatu *upwelling* juga dapat dilihat dari adanya *thermal front*. Menurut Daulay *et al.* (2019) *Thermal front* merupakan pertemuan dua massa air dengan karakteristik suhu yang berbeda. Pertemuan ini menghasilkan gradien suhu, dan merupakan proses oseanografi yang penting. Faktor utama yang juga mempengaruhi variabilitas iklim di Perairan Utara Aceh adalah ENSO (*El Nino Southern Oscillation*) dan IOD (*Indian Ocean Dipole* yang merupakan suatu anomali iklim yang terjadi di Indonesia. Gejala ENSO dan IOD memberikan pengaruh terhadap variabilitas suhu permukaan laut di Perairan Indonesia, yaitu menjadi lebih dingin pada tahun La Niña dan lebih hangat pada El Niño. IOD positif menjadi lebih dingin, dan IOD negatif menjadi lebih hangat di Perairan Indonesia. Anomali tersebut sangat penting sebagai sarana untuk pendugaan penentuan lokasi *upwelling*, *front* ataupun *eddies current* (Nurafifah *et al.*, 2022).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ENSO berperan dalam memengaruhi variasi suhu permukaan laut dan salinitas di perairan utara Aceh yang dapat diasumsikan berdampak terhadap fenomena *upwelling*. Meskipun demikian belum ada kajian khusus mengenai pengaruh ENSO dan IOD terhadap fenomena *upwelling* di perairan utara Aceh. Oleh karena itu studi ini bertujuan untuk meneliti pengaruh ENSO dan IOD terhadap karakteristik *upwelling* dengan mengidentifikasi pada parameter oseanografi meliputi *ekman pumping*, suhu permukaan laut, dan gradien suhu permukaan laut, yang mempengaruhi konsentrasi klorofil -a di perairan utara Aceh. Pemahaman mengenai penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi atau mempermudah dalam memetakan zona potensi penangkapan ikan (*fishing ground*) yang adaptif terhadap perubahan iklim di Perairan Utara Aceh

MATERI DAN METODE

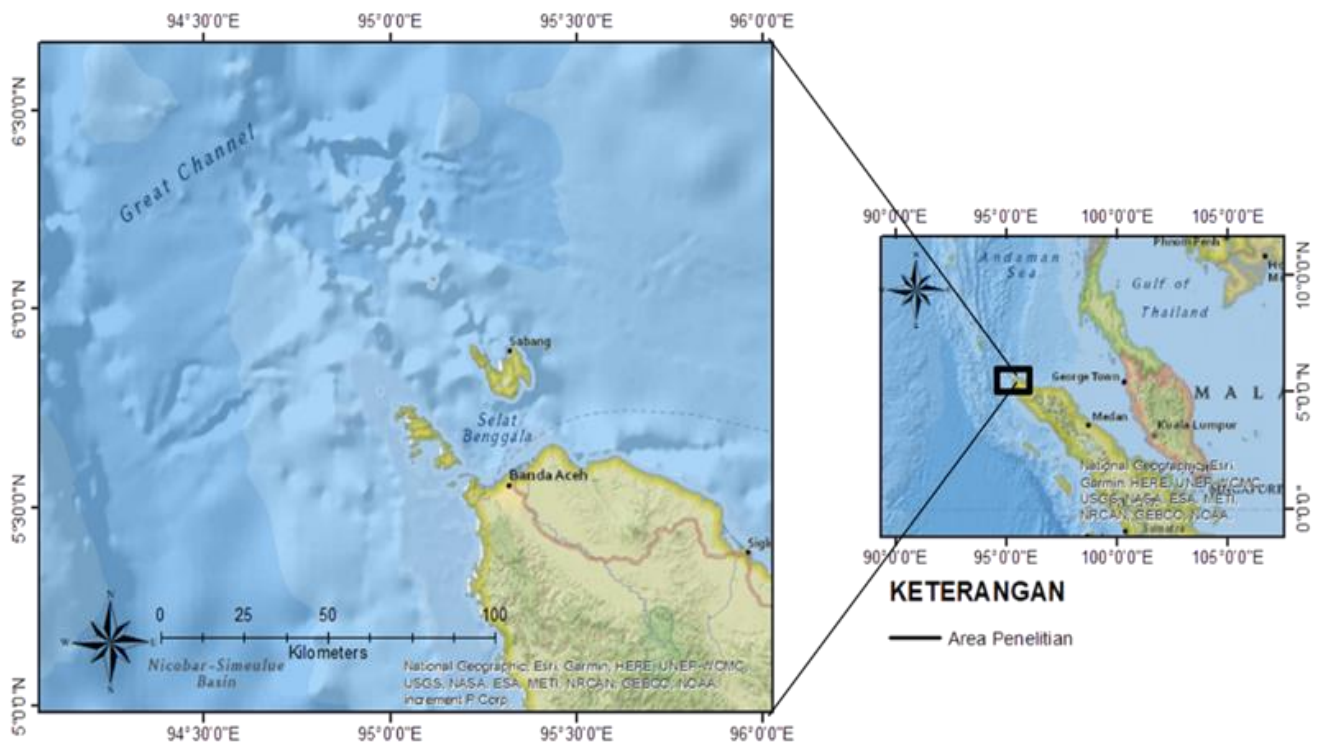
Penelitian ini menggunakan data sekunder selama 25 tahun (1998-2022) untuk menganalisis *upwelling* pada kondisi normal dan anomali di Perairan Utara Aceh yang dapat dilihat pada Gambar 1. Untuk mendapatkan gambaran mengenai kondisi perairan, penelitian ini menggunakan data parameter fisik laut (seperti angin dan suhu permukaan laut) dengan data anomali iklim. Keterangan data yang digunakan serta mengenai sumber dan spesifikasi data tersebut disajikan dalam Tabel 1.

Pada pengolahan data SPL dan klorofil-a menggunakan data rata-rata harian selama 25 (1998-2022) tahun. Pengolahan data tersebut menggunakan *software* MATLAB. Data yang diperoleh berformat (*.nc.) yang mana pada data format data tersebut kemudian diextract dan dikonversikan

untuk memperoleh kordinat longitude dan latitude secara spatial. Data yang sudah diperoleh, longitude dan latitude, kemudian dikompilasi menjadi data bulanan yang akan dikonversi kembali ke data klimatologi. Data klimatologi tersebut digunakan untuk mengetahui rerata bulanan dari Januari hingga Desember selama 25 tahun menggunakan perhitungan komposit. Persamaan (1), sebagai berikut (Wirasatriya et al., 2017).

Tabel 1. Data-Data yang digunakan untuk menganalisis upwelling

Data	Sumber	Keterangan
Angin 10m	ERA5	Data ini digunakan untuk menentukan persebaran angin yang memiliki resolusi $0.25^\circ \times 0.25^\circ$
Suhu Permukaan Laut	Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA) – Copernicus Marine Service	data ini digunakan untuk menentukan gradient suhu permukaan laut. Data ini memiliki resolusi $0.05^\circ \times 0.05^\circ$
Klorofil-a	Global Ocean Colour Plankton MY L4 Monthly Observation.	Data ini digunakan untuk menentukan konsentrasi klorofil-a. Data ini memiliki resolusi 4 km
ENSO	NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)	Data ini digunakan untuk mengetahui anomali ENSO
IOD	The State Of The Ocean Climate.	Data ini digunakan untuk mengetahui anomali IOD



Gambar 1. Lokasi Penelitian Perairan Utara Aceh Terletak Pada Koordinat 6° LU – 5° LS dan 94.5° BT – 96° BT

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

Keterangan: $\bar{X}(x, y)$ = rerata bulanan dan klimatologi; $x_i(x, y, t)$ = data harian atau bulan ke- i ; n = merupakan jumlah data jam, hari, bulan ataupun tahun; $i = 1$ = hari, bulan atau tahun ke- i ; Jika x_i = Jika nilai data NaN, maka nilai data tersebut teridentifikasi data kosong dan tidak dimasukkan dalam kalkulasi rerata.

Pada persamaan tersebut, $\bar{X}(x, y)$ merepresentasikan nilai rata-rata bulanan klimatologi, sedangkan $x_i(x, y, t)$ menunjukkan data harian ke- i . Variabel n menyatakan total jumlah data, baik dalam satuan jam, hari, bulan, maupun tahun, dengan i sebagai indeks urutan waktu ke- i . Jika terdapat nilai x_i berupa NaN, data tersebut diidentifikasi sebagai data kosong dan dikecualikan dari perhitungan rata-rata.

Pengolahan Data Angin

Data angin untuk mengetahui persebaran dari suhu permukaan laut (SPL) dan klorofil- a . Pengolahan data angin menggunakan software MATLAB. Menurut Wang *et al.* (2016), untuk mengetahui persebaran angin digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\tau = \rho \cdot C_d \cdot U^2 \dots\dots\dots 1$$

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \dots\dots\dots 2$$

$$M = \frac{\bar{\tau} \cdot \hat{t}}{pf} \dots\dots\dots 3$$

$$W = \frac{1}{pf} \nabla x \bar{\tau} \dots\dots\dots 4$$

Persamaan (1) merupakan persamaan untuk menghitung *windstress* dimana ρ (1,225 kg/m³) merupakan massa jenis angin, C_d (1,25 x 10⁻³) merupakan koefisien angin, dan U merupakan kecepatan angin di permukaan laut. Pada persamaan (2) merupakan persamaan untuk menghitung *windstrees curl*. Pada perhitungan $\tau_y - \tau_x$ sebagai komponen *windstress* kearah timur dan utara. Persamaan M(3) merupakan persamaan untuk menghitung ekman transport. Pada perhitungan $\nabla x \bar{\tau}$ merupakan tegangan angin melengkung. Pada persamaan (4) W merupakan persamaan untuk menghitung ekman *pumping*. Pada $\bar{\tau}$ merupakan kecepatan angin rata-rata bulanan. Pada $\hat{t}$ (90°) merupakan vektor tangen satuan yang bersinggungan dengan garis pantai. Pada ρ (1,025 kg/m³) merupakan massa jenis air dan f merupakan parameter Coriolis (7.2921 x 10⁻⁵ N/kg).

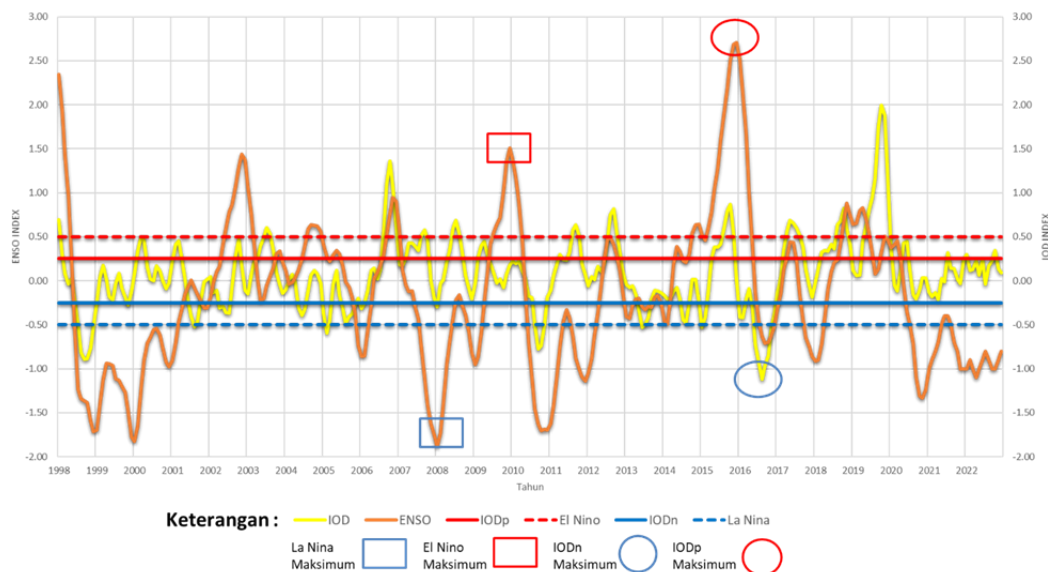
Dalam mengetahui parameter gradient suhu permukaan laut digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\nabla SST = \sqrt{\left(\frac{\partial T^2}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T^2}{\partial y}\right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}^{-1}$$

Dimana T merupakan suhu permukaan laut, kemudian x dan y merupakan kompoen horizontal dan vertikal. (Shimada *et.al*, 2005).

Pengolahan Data ENSO dan IOD

Pada data *Ocean Nino Index* (ONI) untuk mengetahui pengaruh ENSO terhadap variabilitas *ekman pumping*, SPL, gradient SPL, dan klorofil- a di Perairan Utara Aceh. Data tersebut diolah



Gambar 2. Grafik Time Series Hubungan ENSO dan IOD

menggunakan *software* Microsoft excel untuk membuat grafik. Berdasarkan hasil pengolahan periode kekuatan El Nino, La Nina dilihat dari fluktuasi paling tinggi yaitu pada El Nino 2015-2016 dan La Nina 2007-2008

Data IOD merupakan data yang diambil dari nilai anomali indeks DMI. Pengolahan data IOD digunakan untuk mengetahui pengaruh IOD pada SPL dan klorofil-a. Data IOD ini diklasifikasikan menjadi 2 fenomena yaitu IOD positif dan IOD negatif. Berdasarkan hasil pengolahan IOD di lihat pada kejadian fluktuasi paling tinggi yaitu pada IOD positif tahun 2019-2020 dan IOD negatif tahun 2016-2017.

Selanjutnya Untuk menganalisis terkait dengan pengaruh yang kuat antar parameter digunakan analisis korelasi. Dimana korelasi merupakan metode untuk mengetahui keterkaitan antar parameter data atau hubungan antar suatu parameter Ekayana *et al.* (2017). Parameter yang akan dikorelasi adalah parameter klorofil dengan suhu permukaan laut, gradient suhu permukaan laut, dan ekman *pumping*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

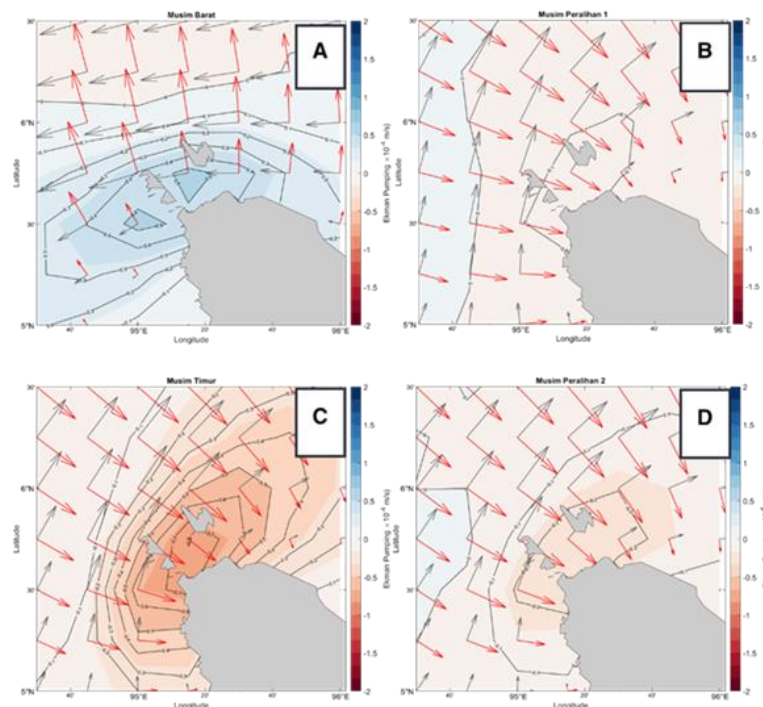
Hasil variasi Ekman *pumping* rata-rata selama 25 tahun di Perairan Utara Aceh yang ada pada Gambar 3 menunjukkan bahwa warna merah hingga biru memperlihatkan kejadian Ekman *pumping upwelling* dan *downwelling*. Pada musim barat (DJF) sekitar $1.27 \times 10^4 \text{ m/s}^{-1}$, pada musim peralihan 1 (MAM) berkisar $-0.28 \times 10^4 \text{ m/s}^{-1}$, pada musim timur (JJA) berkisar $-1.95 \times 10^4 \text{ m/s}^{-1}$, dan musim peralihan 2 (SON) berkisar $-0.61 \times 10^4 \text{ m/s}^{-1}$. Nilai ekman *pumping* menunjukkan divergensi ke permukaan perairan terjadi pada musim barat dan nilai ekman *pumping* menunjukkan konvergensi di perairan terjadi pada musim peralihan 1 hingga peralihan 2 Kondisi pada daerah divergen menyebabkan fenomena *upwelling* yang merupakan kondisi kenaikan massa air di daerah pusat dengan naiknya massa air dari dasar ke permukaan sedangkan, pada kondisi konvergen diidentifikasi sebagai fenomena *downwelling* yang merupakan kondisi turunnya massa air dari permukaan ke dasar (Otero *et al.*, 2020).

SPL yang terlihat pada Gambar 4 periode musim barat (DJF) sekitar 28.8°C diikuti dengan pergerakan angin menuju ke-arah barat, SPL pada musim barat mengalami pendinginan. Hal tersebut dikarenakan adanya, fenomena *upwelling* yang *men-transport* massa air yang dingin dari

lapisan dalam ke permukaan (Trisianto *et al.*, 2021). Pada musim peralihan 1 (MAM) berkisar 29.8°C diikuti dengan perubahan pergerakan angin menuju ke arah Tenggara. Menurut Isa *et al.* (2020) kenaikan suhu permukaan laut pada musim peralihan 1 dipengaruhi pada peningkatan radiasi gelombang pendek, fluk panas sensible, melemahnya angin permukaan, dan rendahnya jumlah total tutupan awan, serta adanya *downwelling* yang terlihat Gambar 3. pada musim timur (JJA) berkisar 29.3°C dengan pola angin ke arah timur. Perubahan suhu permukaan laut menjadi dingin diakibatkan karena adanya adveksi suhu permukaan laut dari Laut Andaman ke Perairan Utara Aceh. Pada musim peralihan 2 (SON) berkisar 28.9°C diikuti dengan pola angin menuju tenggara. Turunnya suhu permukaan laut di musim peralihan 2 disebabkan oleh adanya pelemahan angin barat daya yang hangat dan hembusan angin timur laut yang dingin membawa uap air dan curah hujan yang tinggi sehingga, daerah tersebut mengalami pendinginan yang merata (Mahmud *et al.* 2018).

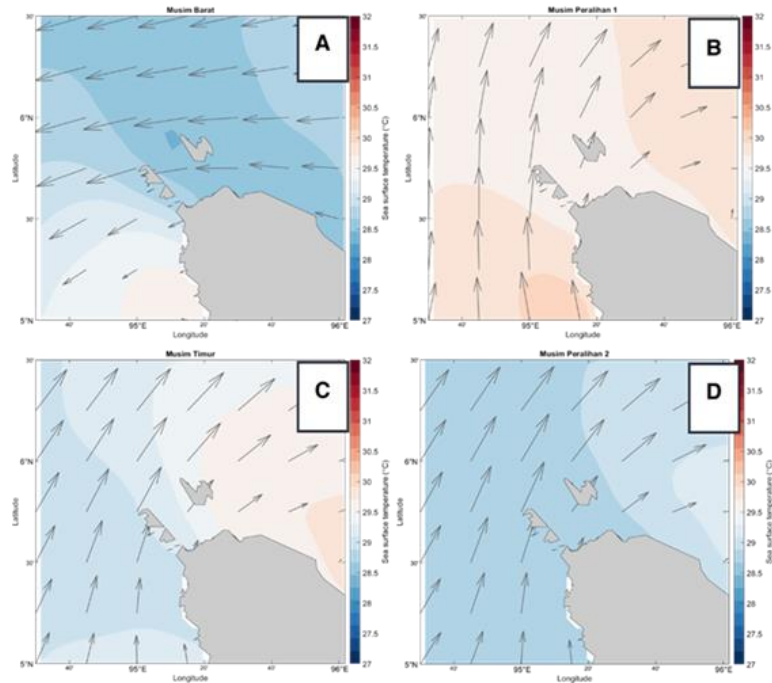
Pada data gradient SPL yang dilihat pada Gambar 5 nilai tertinggi pada musim barat (DJF) sekitar $0.68 \times 10^2^{\circ}\text{C}$. pada musim peralihan 1 (MAM) berkisar $0.57 \times 10^2^{\circ}\text{C}$, pada musim timur (JJA) berkisar $0.56 \times 10^2^{\circ}\text{C}$, dan pada musim peralihan 2 (SON) berkisar $0.53 \times 10^2^{\circ}\text{C}$. Nilai gradient suhu permukaan laut tertinggi berada pada musim barat dan terendah berada pada musim peralihan 2. Nilai gradient suhu permukaan laut pada setiap musim memiliki nilai diatas ($\geq 0.5^{\circ}\text{C}$) yang menandakan adanya perubahan suhu atau *front* di Perairan Utara Aceh (Trinugroho *et al.*, 2019).

Gambar 6 menunjukkan bahwa konsentrasi klorofil-a pada periode musim barat (DJF) sekitar 0.51 mg/m^3 , pada musim peralihan 1 (MAM) berkisar 0.39 mg/m^3 , pada musim timur (JJA) berkisar 0.35 mg/m^3 , dan pada musim peralihan 2 (SON) berkisar 0.39 mg/m^3 . Nilai konsentrasi klorofil-a tertinggi berada pada musim barat dan terendah berada pada musim timur. Tingginya nilai klorofil-a pada musim barat dibandingkan dengan musim lainnya disebabkan oleh adanya tingginya nilai *thermal front* dan adanya peristiwa *upwelling*. Proses fisik ini, dilihat dari tingginya intensitas *thermal front* yang dapat dilihat pada Gambar 5 dan indikasi *upwelling* yang terlihat pada Gambar 4, memfasilitasi melalui proses konvergensi antardensitas di mana tercampur dua massa air dengan

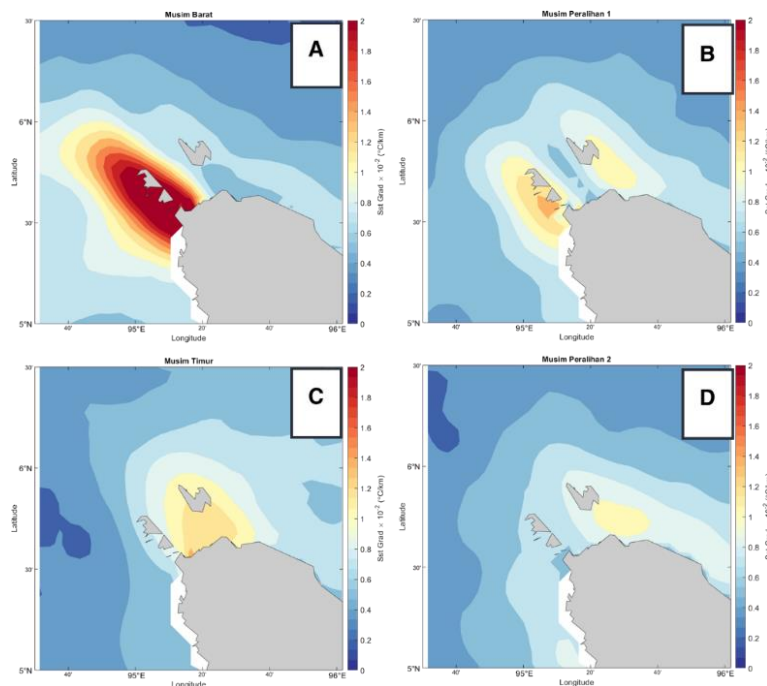


Gambar 3. Ekman Pumping dengan Overlay Angin Permukaan (Vektor Berwarna Hitam) dan Ekman Transport (Berwarna Merah) (A. Musim Barat; B. Musim Peralihan 1; C. Musim Timur; D. Musim Peralihan 2).

suhu yang berbeda sehingga meningkatkan pengayaan nutrisi ke lapisan permukaan (Raju et al., 2022). Respons biologis terhadap ketersediaan nutrisi tersebut menyebabkan peningkatan biomassa fitoplankton pada periode ini Siswanto et al. (2023).



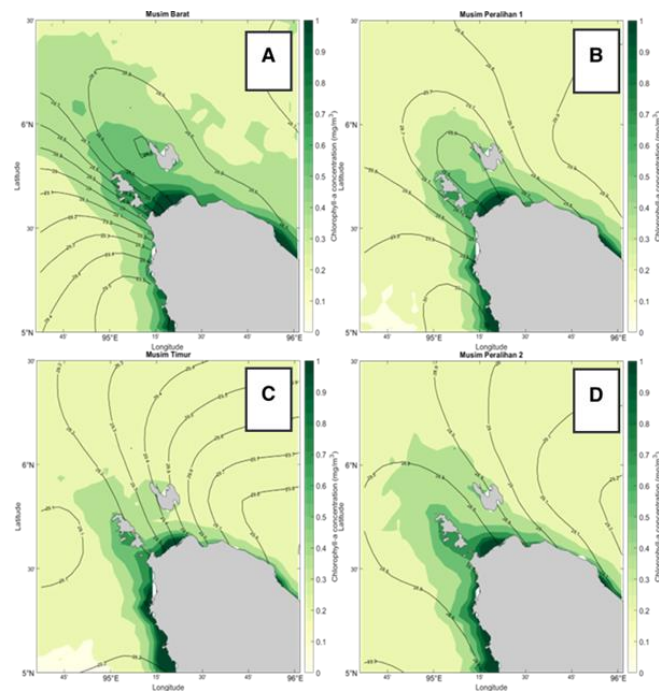
Gambar 4. SPL di Overlay dengan Angin Permukaan (Vektor Berwarna Hitam) (A. Musim Barat; B. Musim Peralihan 1; C. Musim Timur; D. Musim Peralihan 2)



Gambar 5. Gradient SPL (A. Musim Barat; B. Musim Peralihan 1; C. Musim Timur; D. Musim Peralihan 2)

Tabel 2. Pola Variabilitas Musiman Pada Parameter *Ekman Pumping*, Suhu Permukaan Laut, Gradient Suhu Permukaan Laut, dan Klorofil-a

Musim & Variabel	Ekman Pumping (m/s)	Suhu Permukaan Laut (°C)	Gradient SPL (°C)	Klorofil-a (mg/m ³)
DJF (Musim Barat)	1.97×10^4	28.8	0.87×10^2	0.51
MAM (Musim Peralihan 1)	-0.38×10^4	29.8	0.72×10^2	0.39
JJA (Musim Timur)	-2.50×10^4	29.4	0.69×10^2	0.36
SON (Musim Peralihan 2)	-0.86×10^4	28.9	0.68×10^2	0.39

**Gambar 6.** Konsentrasi Klorofil-a. (A. Musim Barat; B. Musim Peralihan 1; C. Musim Timur; D. Musim Peralihan 2)

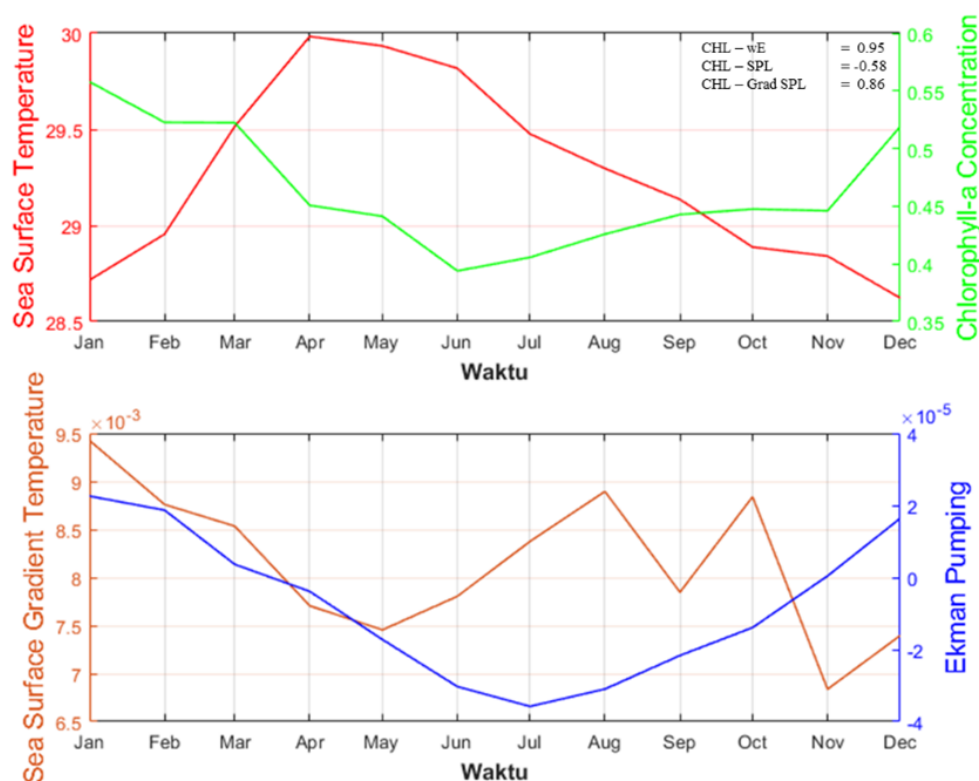
Pada perbandingan nilai korelasi pada Gambar 7 menunjukkan nilai klorofil-a dengan SPL yaitu -0,58, kemudian nilai korelasi antara klorofil-a dengan *ekman pumping* yaitu sebesar 0.95, dan pada nilai korelasi klorofil-a dengan gradient suhu permukaan laut yaitu 0.86. Artinya klorofil-a memiliki hubungan sebanding dengan *ekman pumping* dan gradient suhu permukaan laut, yaitu apabila *ekman pumping* dan gradient suhu permukaan laut tinggi maka klorofil-a juga tinggi. Namun, klorofil-a dan SPL memiliki hubungan berlawanan yaitu jika klorofil-a tinggi nilai SPL rendah.

Gambar 8 dan Tabel 2 terlihat kejadian El Nino menunjukkan adanya pergerakan angin ke arah barat kemudian pada suhu permukaan laut mengalami peningkatan, pada *ekman pumping* peningkatan, gradient SPL mengalami penurunan, dan klorofil-a juga mengalami penurunan. Pada fase El Niño, mengindikasikan upwelling jika dilihat pada kenaikan Ekman pumping dan indikasi kenaikan gradient SPL yang mengalami peningkatan. Namun, jumlah klorofil mengalami penurunan, yang diduga karena fitoplankton tidak dapat berkembang dengan baik pada SPL yang hangat. Kenaikan SPL yang terjadi pada fase El Nino disebabkan oleh adanya fenomena *basin wide warming*. Fenomena basin-wide warming dipicu oleh adanya aliran barat gelombang Rossby yang kuat yang memengaruhi sirkulasi Walker menjadi lebih cepat sehingga menyebabkan penghangatan suhu permukaan laut pada cekungan Samudra Hindia. Kemudian, angin di

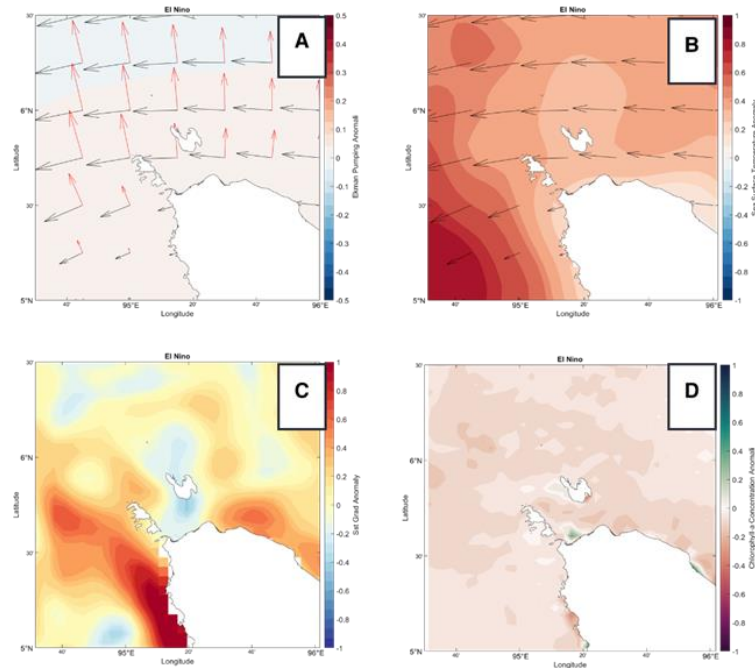
Samudra Hindia yang umumnya mengarah ke barat mengalami pelemahan dan berubah arah ke timur, sehingga memungkinkan akumulasi air hangat di seluruh cekungan.

Gambar 9 dan Tabel 2 fase La Nina menunjukkan pengaruh pada suhu permukaan laut mengalami penurunan, *ekman pumping* mengalami penurunan, gradient SPL mengalami penurunan dan klorofil-a mengalami penurunan. Fase La Niña mengindikasikan downwelling yang ditandai oleh adanya Ekman *pumping* dan gradient SPL yang menurun. Penurunan SPL pada La Niña tersebut disebabkan oleh adanya fenomena basin-wide cooling pada fase La Niña. Fenomena basin-wide cooling mengalami mekanisme yang berbeda, di mana angin di Samudra Hindia yang mengarah ke barat mengalami penguatan dan termoklin mengalami pendinginan (Zhang *et al.*, 2022). Gambar 10 dan Tabel 2 kejadian IOD positif mengindikasikan *upwelling* jika dilihat pada *ekman pumping*, gradient SPL, dan klorofil-a yang mengalami peningkatan serta SPL mengalami penurunan. Menurunnya SPL disebabkan oleh adanya pola angin yang mengarah ke barat pada Gambar 10 sehingga menyebabkan terjadinya *ekman transport* yang menjauhi pantai dan memicu kenaikan *ekman pumping* yang mendorong massa air laut ke daerah permukaan sehingga terjadi kesuburan klorofil-a (Simanjuntak *et al.*, 2022).

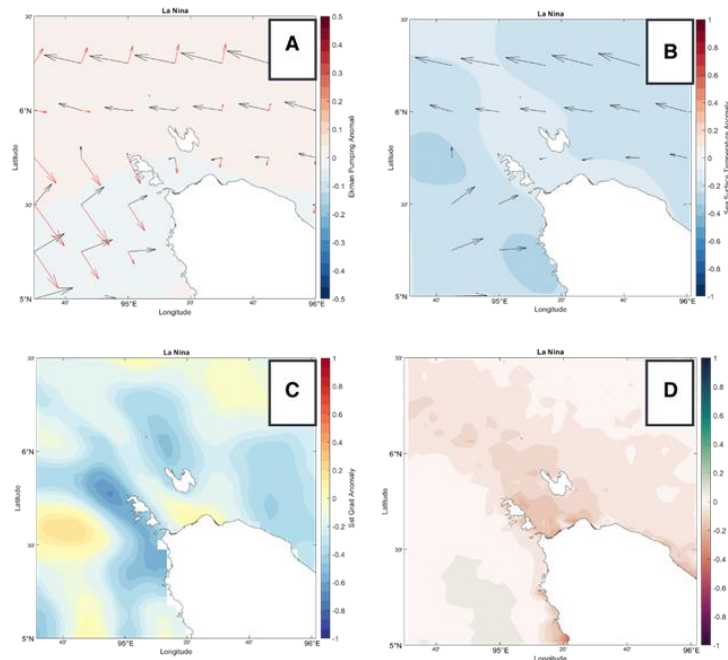
Gambar 11 dan Tabel 2 IOD negatif menunjukkan adanya indikasi *downwelling* yang ditandai oleh penurunan suhu permukaan laut, *ekman pumping* yang menurun, dan klorofil-a yang menurun. *Ekman Pumping* yang menurun disebabkan oleh adanya angin yang mengarah ke timur laut sehingga menyebabkan *ekman transport* mengarah ke daerah pesisir. Menurut Wirasatriya *et al.*, (2020) angin yang mengarah ke daerah pesisir menyebabkan penumpukan massa air akibatnya, lapisan termoklin menekan ke kedalaman (*downwelling*) sehingga memutus suplai nutrisi dari bawah ke permukaan. Pada suhu permukaan laut mengalami penurunan disebabkan oleh adanya kejadian La Nina dan IOD negatif *coincident* pada tahun 2016-2017.



Gambar 7. Time Series klimatologi parameter dan Korelasi Variabel antara Klorofil – a dengan SPL, Gradient SPL, dan Ekman Pumping



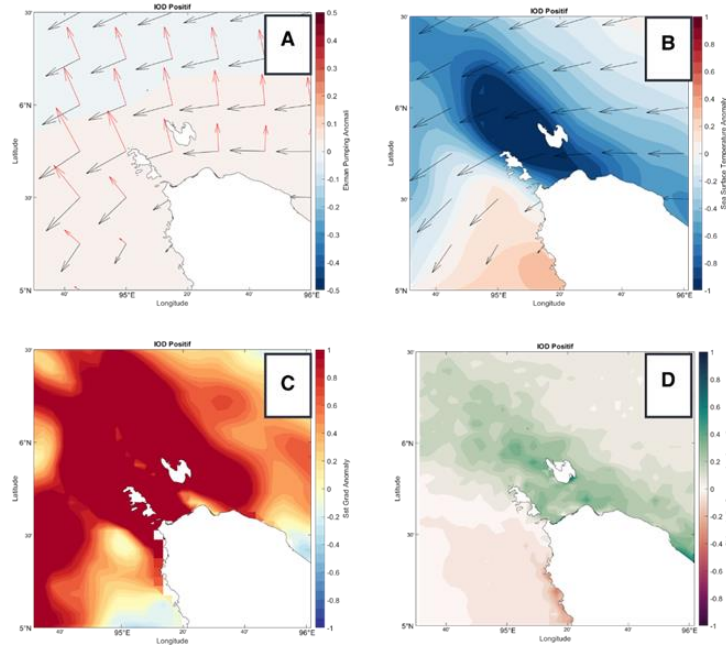
Gambar 8. Anomali Variabilitas El Nino Ekman Pumping (A), Suhu Permukaan Laut (B), Gradient Suhu Permukaan Laut (C), dan Klorofil-a (D)



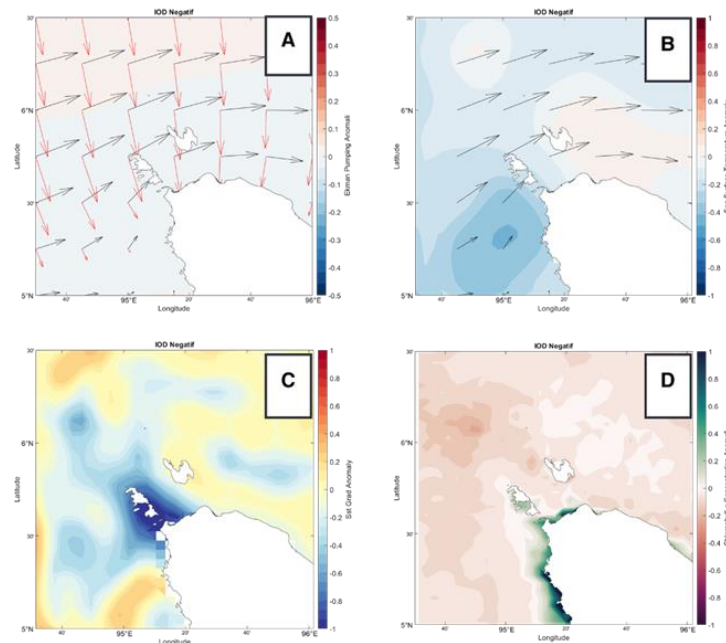
Gambar 9. Anomali Variabilitas La Nina Ekman Pumping (A), Suhu Permukaan Laut (B), Gradient Suhu Permukaan Laut (C), dan Klorofil-a (D).

Gambar 12 terlihat peningkatan klorofil-a paling tinggi terjadi awal tahun 2019-2020 dimana hal tersebut merupakan fase kejadian IOD positif, jika dihubungkan dengan parameter oseanografi menunjukan adanya variabilitas *ekman pumping* yang meningkat, gradient suhu permukaan laut yang meningkat, dan suhu permukaan laut yang mendingin yang terlihat pada Gambar 12 dibandingkan dengan tahun normal dan tahun-tahun lainnya sehingga pada kejadian awal tahun 2019-2020 diidentifikasi pada kejadian *upwelling* yang meningkatkan fluktuasi klorofil paling tinggi.

Temuan ini sejalan dengan studi Bahiyah *et al.* (2024), yang membuktikan bahwa peristiwa IOD Positif pada tahun 2019 memicu anomali *upwelling* yang kuat di Sumatera. Hal ini menyebabkan pendinginan SPL dan ledakan populasi fitoplankton (*blooming*). Hal tersebut bisa dilihat dari hasil korelasi menunjukkan adanya hubungan searah yang kuat pada klorofil-a dengan ekman *pumping* senilai 0.72, kemudian pada korelasi antara klorofil-a dengan gradient SPL juga menunjukkan adanya hubungan searah yang kuat senilai 0.81, dan pada hubungan klorofil-a dengan SPL menunjukkan adanya hubungan perbandingan terbalik yang kuat senilai -0.87.



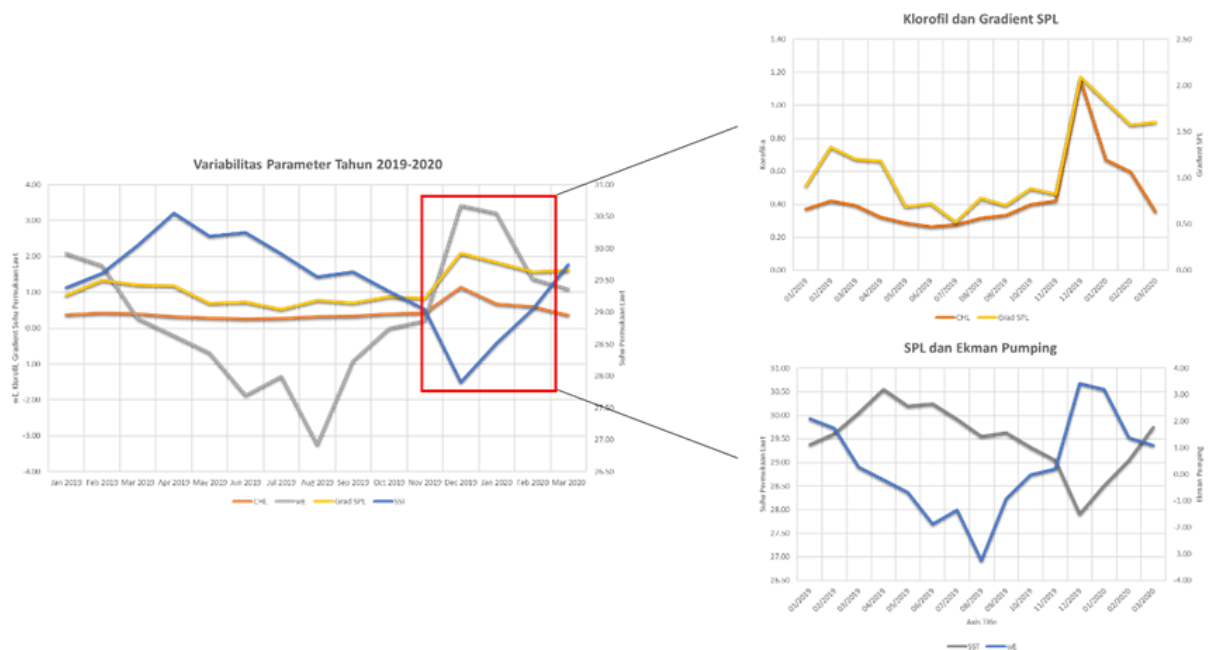
Gambar 10. Anomali Variabilitas IOD Positif Ekman Pumping (A), Suhu Permukaan Laut (B), Gradient Suhu Permukaan Laut (C), dan Klorofil-a (D).



Gambar 11. Anomali Variabilitas IOD Negatif Ekman Pumping (A), Suhu Permukaan Laut (B), Gradient Suhu Permukaan Laut (C), dan Klorofil-a (D).

Tabel 1. Nilai Rerata Anomali Parameter Pada Fenomena ENSO dan IOD selama 2019-2020

Fenomena	wE	SPL	Gradient SPL	Klorofil-a
El Nino	0.76	0.48	0.21	-0.23
La Nina	0.01	-0.17	-0.24	-0.06
IOD Positif	1.70	-0.33	1.18	0.36
IOD Negatif	-1.03	-0.06	-0.15	-0.06

**Gambar 12.** Variabilitas 2019-2020 Klorofil-a (Oranye), Gradient SPL (Kuning), Ekman Pumping (Abu-Abu), dan SPL (Biru) serta Korelasi Klorofil dengan SPL, Gradient SPL, dan Ekman Pumping.

KESIMPULAN

Studi interaksi atmosfer laut di Perairan Utara Aceh menunjukkan adanya fenomena *upwelling* pada musim barat yang diidentifikasi oleh *ekman pumping* dan gradient SPL yang berkorelasi tinggi dengan klorofil-a serta penurunan suhu permukaan laut yang berkorelasi berbanding terbalik yang kuat dengan klorofil-a. Pada interaksi variabilitas antar tahunan peningkatan *upwelling* lebih dipengaruhi oleh IOD positif dimana terlihat kenaikan klorofil-a dengan SPL yang menurun, gradient SPL yang meningkat, dan *ekman pumping* yang meningkat yang terlihat pada tahun 2019-2020 pada musim barat. Sedangkan pengaruh dari El Nino, La Nina, dan IOD negatif tidak meningkatkan klorofil-a dan tidak mengindikasikan suatu peningkatan *upwelling*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bahiyah, A., Wirasatriya, A., Mardiansyah, W., & Iskandar, I. (2024). Massive SST-front anomaly in the tip of Sumatra waters triggered by extreme positive IOD 2019 event. *International Journal of Remote Sensing*, 45(23), 8919-8936. doi: 10.1080/01431161.2023.2268821
- Daulay, S.R., Sari, T.E.Y., Usman, U., & Jhonnerie, R. 2019. Characteristics of thermal front in the tropical waters of Eastern Indian Ocean. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 21(1), hal 25-29. doi: 10.22146/jfs.39724

- Ekayana, I.M., Karang, I.W.G.A., As-syakur, A. R., Jatmiko, I., & Novianto, D. 2017. Hubungan Hasil Tangkapan Ikan Tuna Selama Februari-Maret 2016 dengan Konsentrasi Klorofil-a dan SPL dari Data Penginderaan Jauh Di Perairan Selatan Jawa-Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 3(1), 19-29. doi: 10.24843/jmas.2017.v3.i0
- Imamshadiqin, I., Imanullah, I., Erniati, E., Erlangga, E., Andika, Y., Salmarika, S., & Yusfiandayani, R. 2020. Variabilitas Konsentrasi Klorofil-a di Bagian Barat Perairan Aceh, Indonesia Berdasarkan Pergerakan Angin Monsun. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 11(2), 211-214. doi : 10.24319/jtpk.11.211-214
- Isa, N.S., Akhir, M.F., Khalil, I.D.H.A.M., Kok, P.H., & Roseli, N.H. 2020. Seasonal characteristics of the sea surface temperature and sea surface currents of the Strait of Malacca and Andaman Sea. *Journal of Sustainability Science and Management*, 15(4), 66-77. doi: 10.46754/jssm.2020.06.007
- Kim, T.W., Ha, H.K., Wählin, A.K., Lee, S., 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. doi: 10.1016/j.csr.2016.09.005
- Mahmud, M., Hashim, M., Matsuyama, H., Numata, S., & Hosaka, T. 2018. Spatial downscaling of satellite precipitation data in humid tropics using a site-specific seasonal coefficient. *Water*, 10(4), 409. doi: 10.3390/w10040409
- 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. doi: 10.14710/ijoce.v4i3.14971
- Otero, J., Álvarez-Salgado, X. A., & Bode, A. 2020. Phytoplankton diversity effect on ecosystem functioning in a coastal upwelling system. *Frontiers in Marine Science*, 7, 1-15. doi: 10.3389/fmars.2020.592255
- Pasha, W. A., Amron, A., & Pranowo, W. S. 2022. Pengaruh Enso (El Nino Southern Oscillation) Terhadap Suhu Dan Salinitas di Perairan Utara Aceh: The Effect of Enso (El Nino Southern Oscillation) on Temperature and Salinity in North Aceh Waters. *Jurnal Hidropilar*, 8(2), 61-74. doi: 10.37875/hidropilar.v8i2.247
- Raju, R.M., Nayak, R.K., Mulukutla, S., Mohanty, P.C., Manche, S.S., Seshasai, M.V.R., & Dadhwal, V.K. (2022). Variability of the thermal front and its relationship with Chlorophyll-a in the north Bay of Bengal. *Regional Studies in Marine Science*, 56, 102700. doi: 10.1016/j.rsma.2022.102700
- Ramadani, A., Suhana, M. P., Febrianto, T. (2022). Karakteristik Spasial Suhu Permukaan Laut Perairan Kota Tanjungpinang dan Kepulauan Riau. *Jurnal Kelautan*, 15(1), 39–59. doi: 10.21107/jk.v15i1.10832
- Shimada, T., Sakaida, F., Kawamura, H., & Okumura, T. (2005). Application of an edge detection method to satellite images for distinguishing sea surface temperature fronts near the Japanese coast. *Remote Sensing of Environment*, 98(1), 21-34. doi: 10.1016/j.rse.2005.05.018
- Simanjuntak, F., & Lin, T.H. (2022). Monsoon effects on chlorophyll-a, sea surface temperature, and ekman dynamics variability along the southern coast of lesser Sunda islands and its relation to ENSO and IOD based on satellite observations. *Remote Sensing*, 14(7), 1682. doi: 10.3390/rs14071682
- Siswanto, E., Sarker, M.L.R., Peter, B.N., Takemura, T., Horii, T., Matsumoto, K., ... & Honda, M.C. (2023). Variations of phytoplankton chlorophyll in the Bay of Bengal: Impact of climate changes and nutrients from different sources. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1052286. doi: 10.3389/fmars.2023.1052286
- Trinugroho, T., Satriadi, A., & Muslim, M. 2019. Sebaran thermal front musiman di wilayah perairan Selat Madura menggunakan single image edge detection. *Journal of Marine Research*, 8(4), 416-423. doi: 10.14710/jmr.v8i4.24815
- Trisianto, G., Wulandari, S.Y., Suryoputro, A.A.D., Handoyo, G., & Zainuri, M. 2021. Studi variabilitas upwelling di laut banda. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(1), 25-35. doi: 10.14710/ijoce.v3i1.9764
- Utama, A.F., Maulana, A., Alfany, D., Dharma, C.S., & Harsono, G. (2023). Pemetaan Kriteria Upwelling di Wilayah Kepulauan Karimata Menggunakan Parameter Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-A pada Bulan Mei 2023: Mapping of Upwelling Criteria in The Karimata Islands Region using Sea

- Surface Temperature and Chlorophyl-A Parameters in May 2023. *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 5(2), 99-104. doi: 10.62703/jhi.v5i2.26
- Wang, Y., & Castelao, R.M. 2016. Variability in the coupling between sea surface temperature and wind stress in the global coastal ocean. *Continental Shelf Research*, 125, 88-96. doi: 10.1016/j.csr.2016.07.011
- Wirasatriya, A., Setiawan, J.D., Sugianto, D.N., Rosyadi, I.A., Haryadi, H., Winarso, G., ... & 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. doi: 10.1109/JSTARS.2017.2745207
- Zhang, M., Jin, D., Wang, X., Chen, L., Luo, J., & Wang, Z. (2022). Seasonal transition of precedent Indian Ocean basin mode and subsequent Indian Ocean dipole without El Niño–Southern Oscillation impact. *International Journal of Climatology*, 42(16), 9023-9031. doi: 10.1002/joc.7793