

Studi Pengaruh Indian Ocean Dipole Terhadap Karakteristik Massa Air Laut di Perairan Barat Sumatera

Marito Gracia Lumban Gaol, Anindya Wirasatriya, Indra Budi Prasetyawan*

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

Abstrak

Indian Ocean Dipole (IOD) merupakan fenomena interaksi laut-atmosfer di Samudera Hindia yang berpengaruh signifikan terhadap kondisi oseanografi regional. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh fase IOD terhadap karakteristik massa air di Perairan Barat Sumatera menggunakan metode kuantitatif dan deskriptif. Data suhu, salinitas, dan kedalaman diperoleh dari World Ocean Database periode 2019–2024, kemudian dianalisis melalui diagram T-S (Temperature-Salinity) yang dikombinasikan dengan data IOD dan Sea Level Anomaly (SLA) untuk mengidentifikasi fenomena upwelling dan downwelling. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fase positif IOD meningkatkan salinitas dengan karakteristik South Indian Central Water (SICW) sekitar 35,4 psu, disertai upwelling yang ditandai nilai SLA negatif ($-0,23$ m). Sebaliknya, fase negatif IOD menurunkan salinitas dengan karakteristik Indonesian Upper Water (IUW) sekitar 34,4 psu, disertai downwelling dengan SLA positif ($+0,22$ m). Berdasarkan diagram T-S, teridentifikasi tujuh massa air, yakni empat pada lapisan upper water: Bengal Bay Water (BBW), Indian Equatorial Water (IEW), Indonesian Upper Water (IUW), dan South Indian Central Water (SICW); serta tiga pada lapisan intermediate water: Antarctic Intermediate Water (AIW), Indonesian Intermediate Water (IIW), dan Red Sea Persian Gulf Intermediate Water (RSPGW). Penelitian ini memberikan pemahaman tentang dinamika massa air yang dipengaruhi variabilitas iklim IOD dan dapat menjadi dasar prediksi kondisi oseanografi, pengelolaan sumber daya kelautan, serta penentuan daerah penangkapan ikan di wilayah tersebut.

Kata kunci : IOD, CTD, Massa Air, SLA

Abstract

Study of the Influence of the Indian Ocean Dipole on the Characteristics of Sea Water Masses in the Western of Sumatra Waters

The Indian Ocean Dipole (IOD) is an ocean-atmosphere interaction phenomenon in the Indian Ocean that significantly influences regional oceanographic conditions. This study aims to analyze the effect of IOD phases on water mass characteristics in the Western Waters of Sumatra using quantitative and descriptive methods. Temperature, salinity, and depth data were obtained from the World Ocean Database for the period 2019–2024, analyzed through a Temperature-Salinity (T-S) diagram combined with IOD and Sea Level Anomaly (SLA) data to identify upwelling and downwelling events. The results indicate that the positive IOD phase increases salinity, characterized by South Indian Central Water (SICW) at approximately 35.4 psu, accompanied by upwelling indicated by a negative SLA value (-0.23 m). Conversely, the negative IOD phase decreases salinity, characterized by Indonesian Upper Water (IUW) at approximately 34.4 psu, accompanied by downwelling with a positive SLA value ($+0.22$ m). Based on the T-S diagram analysis, seven water masses were identified: four in the upper water layer, namely Bengal Bay Water (BBW), Indian Equatorial Water (IEW), Indonesian Upper Water (IUW), and South Indian Central Water (SICW); and three in the intermediate water layer, namely Antarctic Intermediate Water (AIW), Indonesian Intermediate Water (IIW), and Red Sea Persian Gulf Intermediate Water (RSPGW). This study provides insight into water mass dynamics influenced by IOD climate variability and can serve as a basis for predicting oceanographic conditions, managing marine resources, and determining fishing grounds in the region.

Keywords: IOD, CTD, Seawater Mass, SLA

PENDAHULUAN

Perairan Barat Sumatera memiliki karakteristik massa air yang unik dan kompleks karena dipengaruhi langsung oleh Samudera Hindia sebagai jalur *conveyor belt* sirkulasi termohalin atau Arus Lintas Indonesia (Berliani *et al.*, 2025). Dinamika perairan ini dipengaruhi oleh angin musim dan angin pasat yang membawa massa air dari berbagai perairan sekitar, sehingga menjadikan kawasan ini rentan terhadap variabilitas iklim skala besar, salah satunya *Indian Ocean Dipole* (IOD). IOD merupakan fenomena anomali suhu permukaan laut yang signifikan memengaruhi karakteristik massa air di Perairan Barat Sumatera, di mana suhu dan salinitas berperan sebagai parameter penting untuk menggambarkan kondisi dan klasifikasi massa air di perairan ini (Fahlevi *et al.*, 2022). Millenia *et al.*, (2023) menyatakan bahwa fase IOD positif menyebabkan pendinginan di bagian timur Samudera Hindia, sementara fase negatif menunjukkan pola sebaliknya. Perubahan *Sea Surface Height Anomaly* (SSHA) atau biasa juga disebut *Sea Level Anomaly* (SLA) selanjutnya memengaruhi dinamika termoklin dan struktur vertikal massa air di kawasan tersebut (Delman *et al.*, 2016; Miranda *et al.*, 2021).

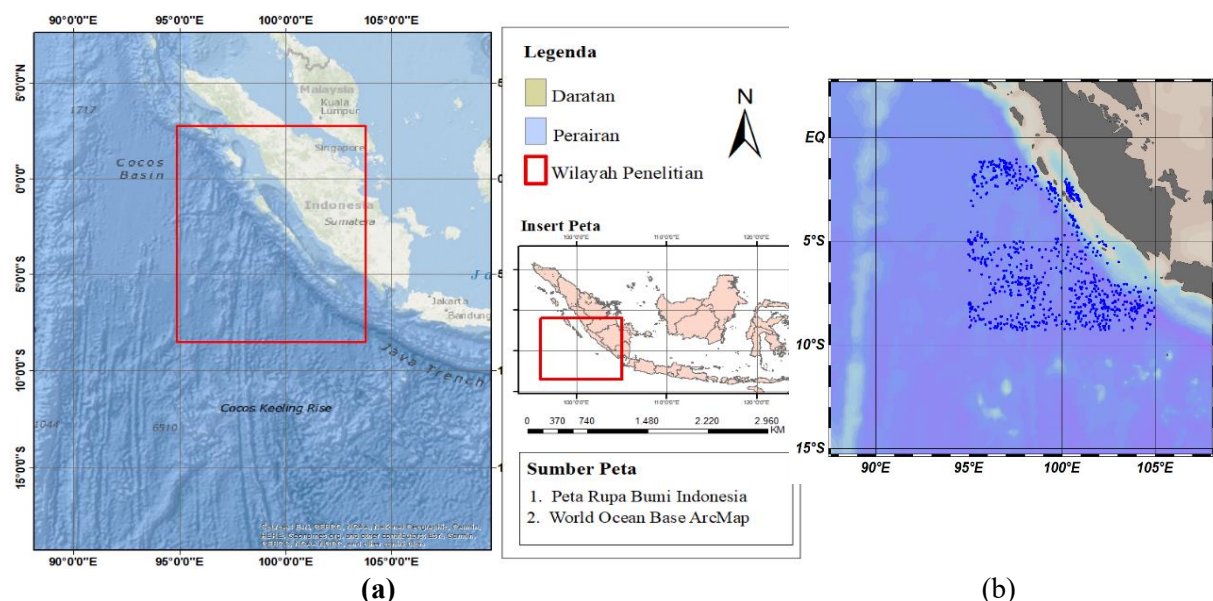
Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji karakteristik massa air di wilayah ini. Ramadhanty *et al.* (2021) mengidentifikasi enam jenis massa air BBW (*Bengal Bay Water*), SLW (*Subtropical Lower Water*), SICW (*South Indian Central Water*), IEW (*Indian Equatorial Water*), NSM (*Northern Salinity Minimum*), dan ASW (*Arabian Sea Water*), pada lapisan tercampur dan termoklin menggunakan Diagram T-S. Adiwira *et al.* (2018) menunjukkan bahwa variabilitas IOD dapat dideteksi dari profil suhu vertikal hingga lapisan termoklin. Malau *et al.* (2024) menemukan bahwa IOD positif menyebabkan penurunan temperatur dan kenaikan salinitas, sedangkan IOD negatif berdampak sebaliknya. Namun, penelitian Napitupulu *et al.* (2022) hanya mencakup periode satu tahun dengan pembagian empat musim.

Meskipun penelitian tentang IOD dan massa air telah banyak dilakukan, kajian komprehensif mengenai variabilitas karakteristik massa air selama fase IOD berbeda (positif, negatif, netral) dalam periode multi-tahun masih terbatas. Belum ada penelitian yang mengkaji secara spesifik hubungan antara anomali IOD dengan perubahan karakteristik massa air di Perairan Barat Sumatera selama periode 2019-2024.

Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik massa air laut di Perairan Barat Sumatera berdasarkan variabilitas IOD dan mengkaji hubungannya dengan anomali SLA menggunakan data CTD dari *World Ocean Database*. Penelitian ini penting untuk melengkapi pemahaman tentang dinamika massa air di wilayah strategis ini dalam konteks perubahan iklim dan variabilitas oseanografi regional.

MATERI DAN METODE

Penelitian wilayah kajian yang diambil berada pada koordinat 2° LS – 8° LS dan 95° BT – 103° BT. Seperti yang ditampilkan pada Gambar 1 Peta Lokasi Penelitian Perairan Barat Sumatera



Gambar 1. a). Peta Lokasi Penelitian Perairan Barat Sumatera, b).Titik Lokasi CTD

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif yaitu suatu metode ilmiah *scientific* yang konkret, objektif, terencana, terstruktur dan sistematis (Saputra *et al.*, 2023). Data yang digunakan adalah data CTD berupa suhu, salinitas, densitas dan kedalaman, kemudian data IOD dan data SLA. Data CTD di unduh melalui laman <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-ocean-database> dari tahun 2019 – 2024. Data diolah dengan menggunakan *software* ODV dengan format WOD untuk mendapatkan diagram TS yang mempermudah dalam menentukan klasifikasi massa air, data ini akan diolah berdasarkan fase IOD yaitu netral, positif dan negatif di setiap kejadian pada setiap tahunnya. Diagram T-S (*Temperature – Salinity*) digunakan untuk mengetahui jenis massa air di suatu perairan, pengolahan ini dilakukan pada *software* ODV untuk membedakan jenis massa air berdasarkan titik-titik yang membentuk kurva tertentu. Berikut merupakan klasifikasi massa air laut yang dijadikan acuan dalam menentukan dan analisis massa air laut di Perairan Barat Sumatera seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

Pengumpulan data variabilitas iklim IOD diperoleh dari *Dipole Mode Index* (DMI) di unduh melalui laman <https://www.bom.gov.au> selama 6 tahun (2019– 2024) berformat NetCFD (*Network Common Data Format*) dengan extension .nc. Data yang didownload berupa data mingguan dan dirata-ratakan terlebih dahulu menjadi data bulanan melalui *Microsoft Excel* dengan cara mengcopy paste nilai indeks dari *website* tersebut lalu diplot dengan tahun dan bulan terjadinya dalam bentuk tabel, data yang sudah di persiapkan pada *Excel* tersebut diolah lagi kedalam bahasa pemrograman untuk melihat grafik atau pola keseluruhan fenomena IOD. Tabel 2 untuk mengidentifikasi fenomena IOD normal, positif dan negatif yaitu dengan mengelompokkan data bulanan suhu, salinitas dan densitas.

Data anomali ketinggian muka air laut didapat dari satelit altimetri yang merupakan data observasi level 4 dengan resolusi sebesar $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ melalui *website* <https://data.marine.copernicus> diolah menggunakan perangkat lunak *Python* (*Google Collab*). Proses dilakukan untuk memotong area penelitian berdasarkan koordinat lintang dan bujur, menentukan rentang waktu pengamatan. Pengolahan ini akan mendapatkan peta SLA setiap tahunnya mulai tahun 2019 – 2024 yang digunakan untuk melihat pola propagasi spasio-temporal SLA sepanjang lintang atau bujur tertentu.

Tabel 1. Klasifikasi Massa Air Laut (Emery dan Meincke, 1986)

Lapisan	Karakteristik Massa Air	Temperature (°C)	Salinity (psu)
Upper Water (0 – 500 M)	Bengal Bay Water (BBW)	25 - 29	28 – 35
	Arabian Sea Water (ASW)	24 - 30	35,5 – 36,8
	Indian Equatorial Water (IEW)	8 - 23	34,6 – 35
	Indonesian Upper Water (IUW)	8 - 23	34,4 – 35
	South Indian Central Water (SICW)	8 - 25	34,6 – 35,8
Intermediate Waters (500 – 1500)	Antarctic Intermediate Water (AIW)	2 - 10	33,8 – 34,8
	Indonesian Intermediate Water (IIW)	3,5 - 5,5	34,6 – 34,7
	Red Sea Persian Gulf Intermediate Water (RSPGW)	5 - 14	34,8 – 35,4
Deep And Abyssal Water (1.500 M – Bottom)	Circumpolar Deep Water (Cdw)	0,1 – 2,0	34,62 – 34,73

Tabel 2. Klasifikasi Nilai DMI (Adiwira, 2018)

No.	Nilai DMI	Keterangan
1	$-0,4^\circ\text{C} < \text{DMI} < +0,4^\circ\text{C}$	IOD Normal
2	$\text{DMI} > +0,4^\circ\text{C}$	IOD Positif
3	$\text{DMI} < -0,4^\circ\text{C}$	IOD Negatif

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fase positif Indian Ocean Dipole (IOD+) terjadi pada Juni -Desember 2019 dan muncul kembali pada akhir 2023, dengan nilai DMI mencapai puncak sekitar $+1,7^{\circ}\text{C}$, menunjukkan peristiwa positif yang kuat. Dimana pada saat fenomena IOD+ maka Samudera Hindia bagian Barat akan mengalami peningkatan suhu permukaan laut dan tekanan yang lebih rendah (Ridwan, 2024). Perbedaan tekanan antara Samudra Hindia bagian barat dan bagian timur menyebabkan terjadinya pergerakan angin menuju wilayah dengan tekanan yang lebih rendah, hal ini diperkuat oleh pernyataan Lestari dan Heltria (2025), ketika tekanan di Samudra Hindia bagian barat lebih rendah, angin akan bergerak ke arah barat sehingga arus laut pun ikut mengalir ke arah tersebut.

Sebaliknya, ketika tekanan rendah terjadi di bagian timur, proses serupa akan berlangsung dengan arah yang berlawanan dan hal ini terjadi pada fase IOD- pada bulan Agustus-Oktober 2020, Juli-November 2021 dan 2022, dan kembali antara pertengahan hingga akhir 2024. Nilai DMI terendah, sekitar $-1,25^{\circ}\text{C}$, terjadi pada September 2022, menandakan peristiwa IOD negatif yang kuat ketika Samudra Hindia bagian timur, termasuk perairan sekitar Indonesia, mengalami suhu permukaan laut yang lebih tinggi dibandingkan dengan wilayah barat dimana tekanan di bagian timur juga akan rendah yang mengakibatkan di Samudera Hindia bagian Timur akan mengalami *downwelling*. Di luar periode ekstrem ini, kondisi netral terlihat pada awal 2020, sebagian tahun 2021, dan 2024, ketika nilai DMI berkisar antara $-0,4^{\circ}\text{C}$ dan $+0,4^{\circ}\text{C}$.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa di lokasi penelitian terdapat 7 klasifikasi massa air, 4 diantaranya berada pada kedalaman 0-500m atau biasa disebut sebagai lapisan *upper waters* dan 3 diantaranya berada pada lapisan *Intermediate Waters* (500m – 1500m). Kotak berwarna dalam gambar tersebut digunakan untuk mempermudah klasifikasi massa air, warna kuning untuk BBW, merah untuk IEW, ungu untuk IUW, hijau untuk SICW, hitam untuk AIW, biru untuk IIW dan coklat untuk RPGW. Pada lapisan *upper waters* terdapat jenis massa air *Bengal Bay Water* (BBW) dengan ciri mempunyai salinitas 28 – 35 psu dan temperatur 25°C - 29°C , *Indian Equatorial Water* (IEW) mempunyai salinitas 34.6 psu – 35 psu dan temperatur 8°C - 23°C , *Indonesian Upper Water* (IUW) mempunyai salinitas 34.4 psu – 35 psu dan temperature 8°C - 23°C , *South Indian Central Water* (SICW) mempunyai salinitas 34.6 psu – 35.8 psu dan temperature 8°C - 25°C . Pada lapisan *Intermediate Waters* yaitu *Antarctic Intermediate Water* (AIW) mempunyai salinitas 33.8 psu – 34.8 psu dan temperature 2°C - 10°C , Indonesian Intermediate Water (IIW) mempunyai salinitas 34.6 psu – 34.7 psu dan temperature 3.5°C – 5.5°C dan *Red Sea Persian Gulf Intermediate Water* (RSPGW) mempunyai salinitas 34.8 psu – 35.4 psu dan temperature 5°C - 14°C .

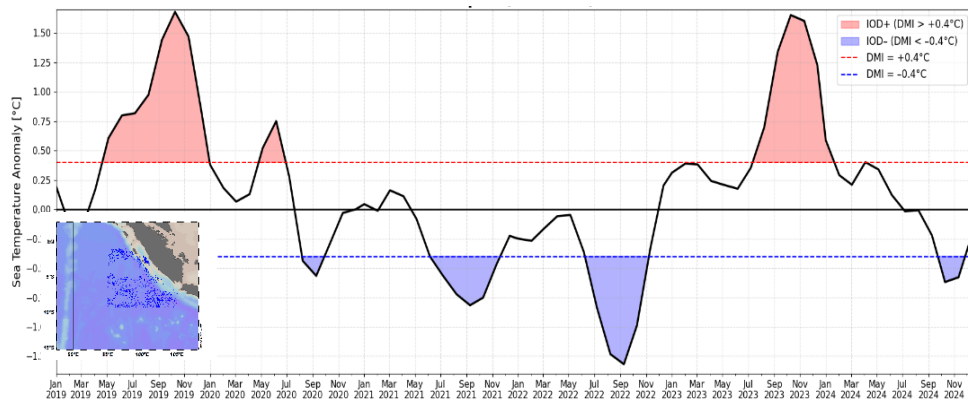
Karakteristik Massa Air Laut setiap Fase IOD

Hasil pengolahan data CTD berdasarkan fase IOD atau sesuai bulan terjadinya fenomena IOD di tahun tersebut. Pada Gambar 4 menunjukkan karakteristik massa air pada saat fase IOD Netral dimana diagram T-S menunjukkan sebaran massa air yang relatif seimbang tanpa adanya anomali signifikan, pada tahun 2019 fase IOD netral terjadi pada bulan Januari – Mei (sehingga data CTD juga diolah berdasarkan bulan ini) dengan massa air BBW yang dengan temperatur 25°C - 29°C dan salinitas 33.8 -34,9 psu, IUW dengan temperatur 10°C - 23°C dan salinitas 34,5 -35 psu, IEW dengan temperatur 10°C - 23°C dan salinitas 34,6 -35 psu, SICW di temperature 10°C - 25°C dan salinitas 34,6-35 psu, AIW dengan temperatur 5°C - 9°C dan salinitas 34,7 - 34,8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5°C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu dan RSPGW dengan temperatur 5°C - 9°C dan salinitas 34,8-34,9 psu. Pada tahun 2022 IOD netral terjadi pada Januari-Juni pada musim barat dan musim peralihan 1 massa air BBW yang dengan temperatur 29°C dan salinitas 34.1 -35 psu, IUW dengan temperatur 10°C - 23°C dan salinitas 34,5 -35 psu, IEW dengan temperatur 10°C - 23°C dan salinitas 34,6 -35 psu, SICW di temperature 10°C - 25°C dan salinitas 34,6-35 psu, AIW dengan temperatur 5°C - 9°C dan salinitas 34,7 -34,8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5°C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu dan RSPGW dengan temperatur 5°C - 9°C dan salinitas 34,8psu. Pada tahun 2024 IOD netral terjadi pada Juni-September pada musim timur massa air BBW yang dengan temperatur 25 - 29°C dan salinitas 33.8-34.6 psu, IUW dengan temperatur 10- 23°C dan salinitas 34,5 -34,8 psu, IEW dengan temperatur 10 - 23°C dan salinitas 34,6 -35 psu, SICW di temperature 10°C - 23°C dan salinitas 34,6-35 psu, dan dilapisan bawahnya ada AIW ditandai dengan temperatur 5 - 9°C dan salinitas 34,6-34,8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5°C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu.

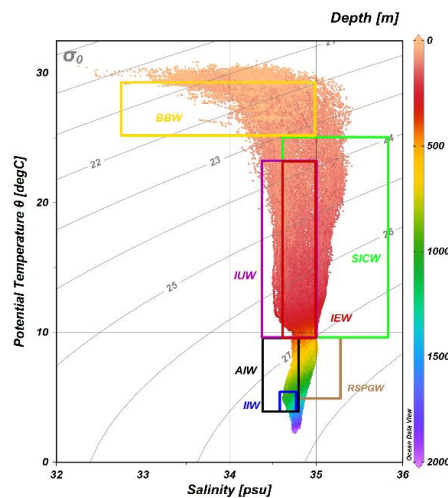
Pada Gambar 5 menunjukkan massa air pada fase IOD positif terlihat adanya peningkatana atau intrusi massa air laut yang lebih asin atau tinggi salinitas apabila dibandingkan dengan pada saat fase IOD netral

maupun IOD negatif. Tahun 2019 pada bulan Juni – Desember terdapat jenis massa air BBW dengan suhu 25 – 29 °C dan salinitas 33.5-34.9 psu, IEW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.6 – 35psu, IUW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.4 – 35 psu, SICW dengan suhu 10 - 25°C dan salinitas 34.6 – 35.4 psu, AIW dengan suhu 5 – 9 °C dan salinitas 34.6-34.8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5 °C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu dan RSPGW dengan suhu 5-8 °C dan salinitas 34.8 – 34.9 psu, tahun 2020 pada bulan Juni-Juli terdapat massa air BBW dengan suhu 25 – 29 °C dan salinitas 33.3-35 psu, IEW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.6 – 35psu, IUW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.6 – 35 psu, SICW dengan suhu 10 - 25°C dan salinitas 34.6 – 35.3 psu, AIW dengan suhu 6– 9 °C dan salinitas 34.6-34.8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5 °C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu dan RSPGW dengan suhu 7-9 °C dan salinitas 34.8 – 34.9 psu dan pada tahun 2023 bulan Agustus-Desember terdapat massa air BBW dengan suhu 25 – 29 °C dan salinitas 33.9-34.8 psu, IEW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.6 – 35psu, IUW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.4 – 35 psu, SICW dengan suhu 10 - 25°C dan salinitas 34.6 – 35.4 psu, AIW dengan suhu 5 – 9 °C dan salinitas 34.6-34.8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5 °C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu dan RSPGW dengan suhu 5-8 °C dan salinitas 34.8 – 35 psu.

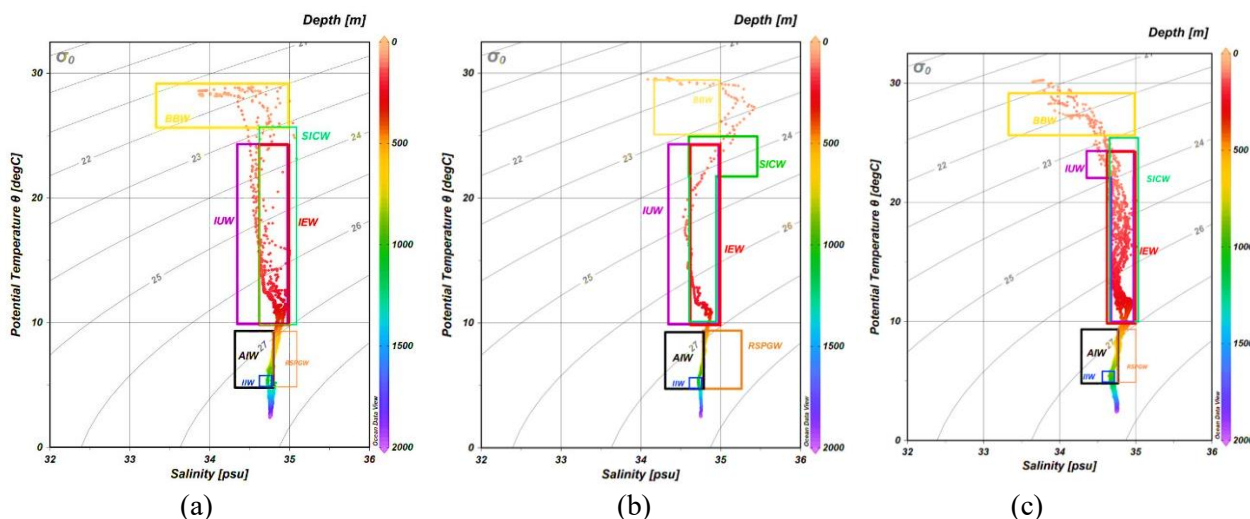
Diagram TS saat IOD positif menunjukkan pergeseran karakter massa air dibanding kondisi netral, dimana pada saat fase IOD positif ini kurva bergeser kearah salinitas yang lebih tinggi yang ditandai dengan massa air SICW yang dicirikan dengan salinitas tinggi dibanding dengan massa air lainnya dan muncul di setiap tahun IOD positif. Peningkatan salinitas di lapisan menengah dan menurunnya sebaran massa air tawar permukaan mengindikasikan intensifikasi penguapan dan *upwelling*, yang umum terjadi saat IOD positif (Berliani *et al.*, 2025).



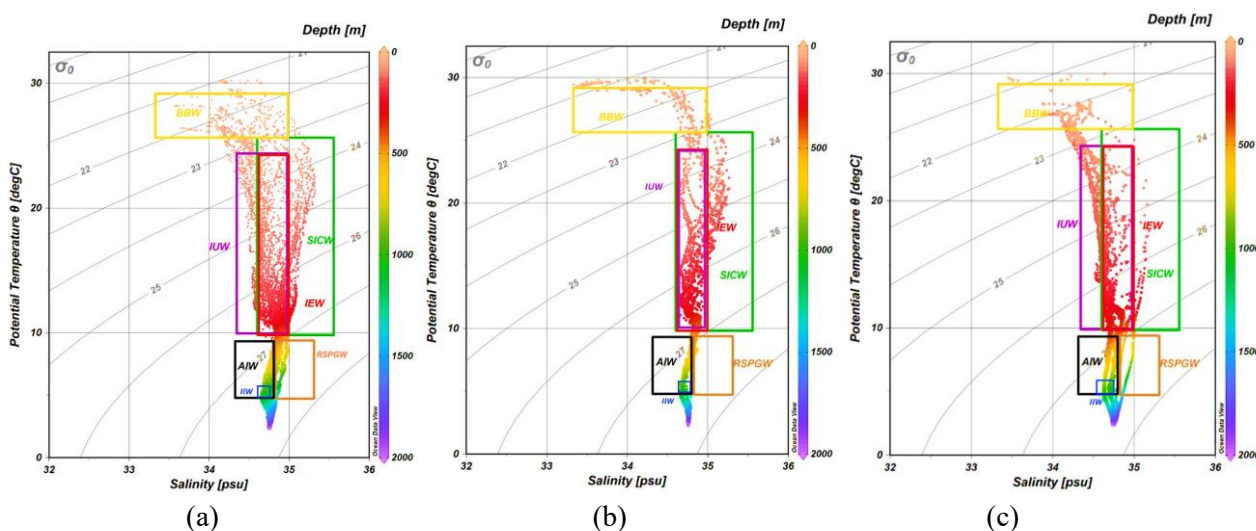
Gambar 2. Grafik *Indian Ocean Dipole* 2019 – 2024



Gambar 3. Klasifikasi massa air laut di perairan Barat Sumatera 2019-2024



Gambar 4. Karakteristik massa air pada saat fase IOD Netral a). 2019, b). 2022, c). 2024



Gambar 5. Karakteristik massa air pada saat fase IOD Positif a). 2019, b). 2020, c). 2023

IOD positif menyebabkan penumpukan air hangat di barat Samudra Hindia (dekat Afrika) dan *upwelling* dingin di timur (dekat Indonesia). Proses ini menghasilkan perbedaan suhu permukaan laut, memicu gelombang Kelvin yang mengangkat atau menekan lapisan termoklin hingga 50-70 m (Putri *et al.*, 2023). Hal ini membawa SICW dengan salinitas yang lebih tinggi ke perairan Barat Sumatera, menghasilkan anomali salinitas. Munculnya massa air SICW berkisar 35.4psu pada setiap fase IOD positif menunjukkan adanya intrusi massa air asin dari bagian selatan Samudra Hindia yang bergerak ke arah utara. Hal ini sejalan dengan pola IOD positif, di mana angin mendorong massa air hangat menjauh dari perairan timur Indonesia (Ridwan, 2024), sehingga memungkinkan terjadi kekosongan massa air di wilayah tersebut dan massa air yang dari lapisan bawah naik mengisi kekosongan tersebut atau biasa disebut sebagai *upwelling* dan memungkinkan masuknya massa air yang lebih asin dan dingin dari selatan.

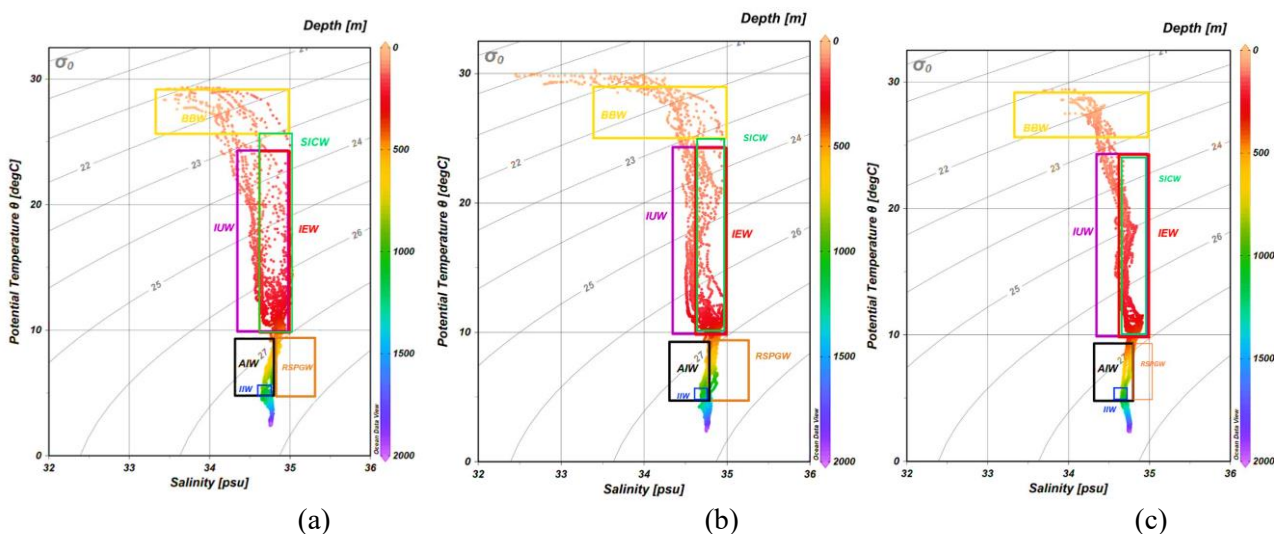
Gambar 6 merupakan kondisi massa air di perairan barat sumatera pada saat kondisi IOD negatif pada tahun 2021 bulan Agustus – November yaitu massa air BBW dengan suhu 25 – 29 °C dan salinitas 33.5-35 psu, IEW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.6 – 35psu, IUW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.4 – 35 psu, SICW dengan suhu 10 - 25°C dan salinitas 34.6 – 35 psu, AIW dengan suhu 6– 9 °C dan salinitas 34.6-

34.8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5 °C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu dan RSPGW dengan suhu 8-9 °C dan salinitas 34.8 psu. Tahun 2022 bulan Agustus - November yaitu massa air BBW dengan suhu 25 – 29 °C dan salinitas 33.8 -35 psu, IEW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.6 – 35psu, IUW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.4 – 35 psu, SICW dengan suhu 10 - 25°C dan salinitas 34.6 – 35 psu, AIW dengan suhu 6– 8 °C dan salinitas 34.8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5 °C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu dan RSPGW dengan suhu 6-9 °C dan salinitas 34.8-34.9 psu .Tahun 2024 bulan Oktober- November yaitu massa air BBW dengan suhu 25 – 29 °C dan salinitas 33.9 -34.6 psu, IEW dengan suhu 10 - 23°C dan salinitas 34.6 – 35psu, IUW dengan suhu 10 -23°C dan salinitas 34.4 – 35 psu, SICW dengan suhu 10 - 25°C dan salinitas 34.6 – 35 psu, AIW dengan suhu 5– 9 °C dan salinitas 34.7-34.8 psu, IIW ditandai dengan temperature 5°C – 5.5 °C salinitas 34.6 psu – 34.7 psu

Dibandingkan dengan kondisi netral dan positif, grafik tersebut menunjukkan bahwa ada penurunan salinitas di tahun IOD negatif dan peningkatan suhu. Tetapi keseluruhan massa air pada fase IOD negatif didominasi oleh massa air BBW, IEW dan IUW yang memiliki salinitas yang lebih rendah dari massa air lainnya dan SICW tetap terlihat pada fase IOD negatif tetapi dengan karakteristik sama dengan IEW. Kondisi ini menunjukkan peningkatan curah hujan dan masukan air tawar yang signifikan di wilayah timur Samudra Hindia selama fase IOD negatif. Fenomena ini konsisten dengan karakteristik IOD negatif, di mana angin baratan menguat dan mendorong massa air hangat ke arah timur (Tong dan Wang, 2025), sehingga menyebabkan pemanasan di sekitar perairan Indonesia bagian barat dan timur Sumatera.

Fase IOD negatif yang ada pada tahun 2021, 2022 dan 2024 secara signifikan mengubah karakteristik massa air di perairan barat Sumatera melalui *downwelling*, stratifikasi hujan, dan kedalaman *thermocline*. Intensitas tertinggi terdeteksi pada 2022, dengan transisi bertahap ke kondisi netral pada 2024. Pola ini berbanding terbalik dengan IOD positif, seperti yang diutarakan oleh (Ridwan, 2024) bahwa pergerakan angin mengikuti pola musiman tapi bisa dimodifikasi oleh IOD sehingga IOD sebagai pengatur utama dinamika massa air regional.

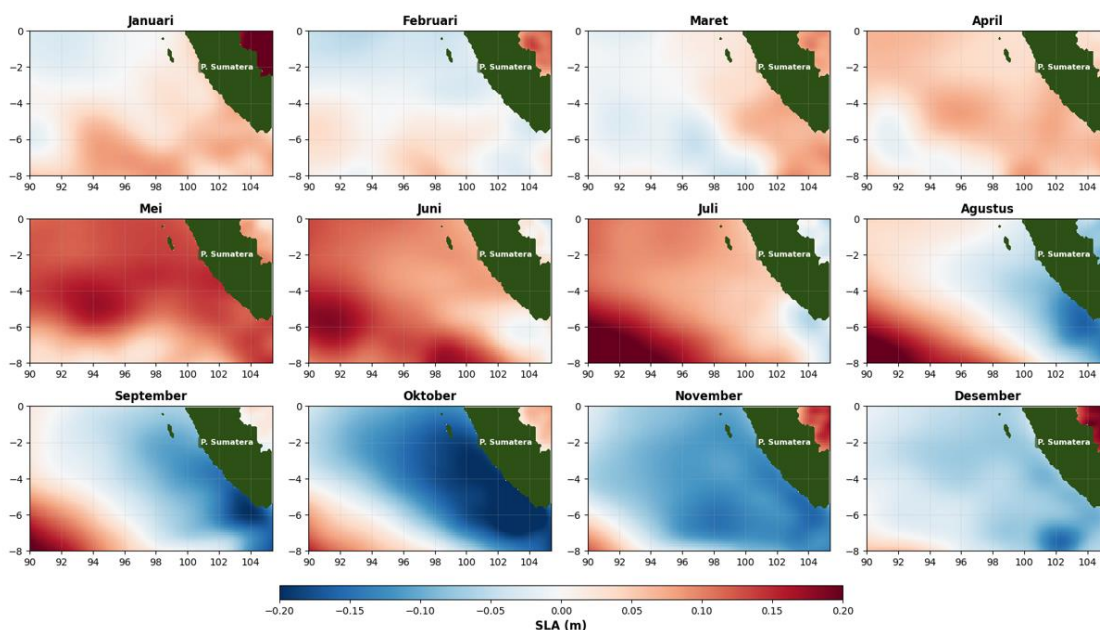
Fenomena IOD memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik massa air laut di Perairan Barat Sumatera, dengan dampak yang dominan terjadi pada lapisan upper water (kedalaman 0-500 m). Menurut Setyadji dan Amri (2017), konsentrasi pengaruh IOD pada lapisan atas perairan dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme oseanografi, dimana lapisan atas merupakan zona yang paling responsif terhadap tekanan atmosfer dan perubahan pola angin yang diinduksi oleh IOD. Ketika terjadi anomali IOD, perubahan tekanan atmosfer dan pola angin zonalnya akan langsung mempengaruhi dinamika lapisan permukaan hingga kedalaman termoklin. Hal ini diperkuat oleh pernyataan (Agdialta dan Ariwibowo 2023), bahwa lapisan atas merupakan zona mixing aktif dan lapisan termoklin utama, dimana variabilitas suhu dan salinitas sangat sensitif terhadap perubahan kondisi permukaan. Massa air pada lapisan atas memiliki kontak langsung dengan proses-proses seperti *upwelling*, *downwelling* yang intensitasnya sangat bergantung pada fase IOD.



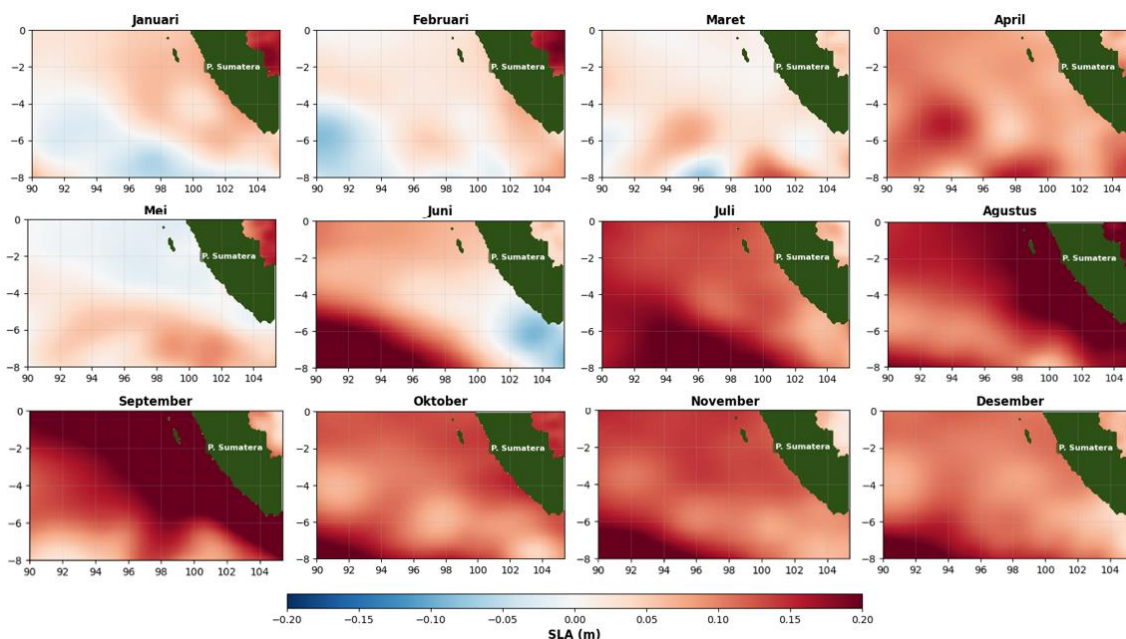
Gambar 6. Karakteristik massa air pada saat fase IOD Negatif a). 2021, b). 2022, c). 2024

Sea Level Anomaly

Gambar 7 menampilkan peta rata-rata bulanan SLA di tahun 2019 di wilayah inti perairan Barat Sumatera dengan skala SLA dari -0.2 m dimana biru menandakan anomali negatif atau permukaan laut lebih rendah dari rata-rata, hingga +0.2 m merah menandakan anomali positif atau permukaan laut lebih tinggi. Pada bulan Januari – Mei SLA cenderung netral, dengan fluktuasi ringan dengan rata-rata anomali sekitar -0.009 hingga 0.08 m, menunjukkan kondisi permukaan laut relatif sedang. Pada bulan Juni – Juli air laut mulai mengalami penurunan kemudian intensitas meningkat Agustus - Desember terlihat anomali SLA negatif, dengan rata-rata -0.007 hingga -0.23 m dan ini mengindikasikan penurunan permukaan laut signifikan, kondisi ini berkaitan dengan fase IOD positif di tahun 2019, dimana terjadi *upwelling* di timur Samudera Hindia termasuk barat Sumatera, menyebabkan penurunan SLA karena massa air dingin naik ke permukaan dan permukaan laut turun.

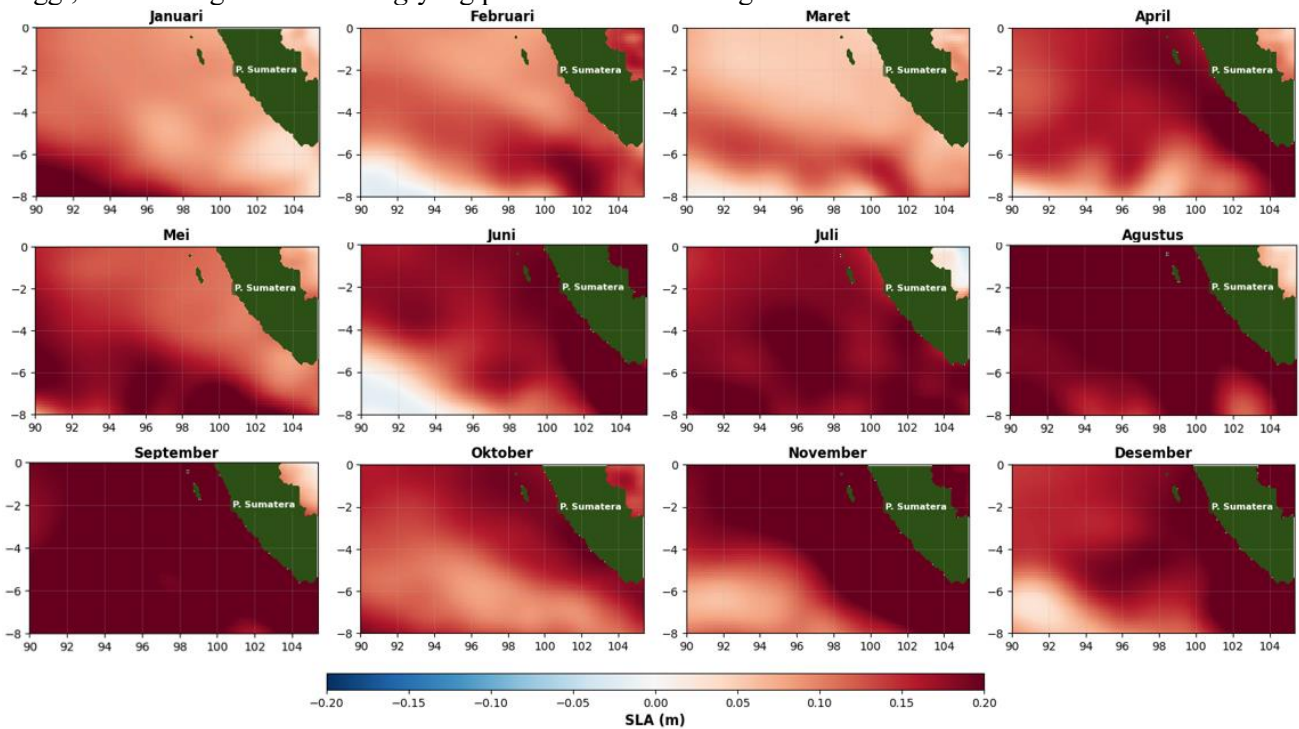


Gambar 7. Peta SLA di Perairan Barat Sumatera pada Tahun 2019

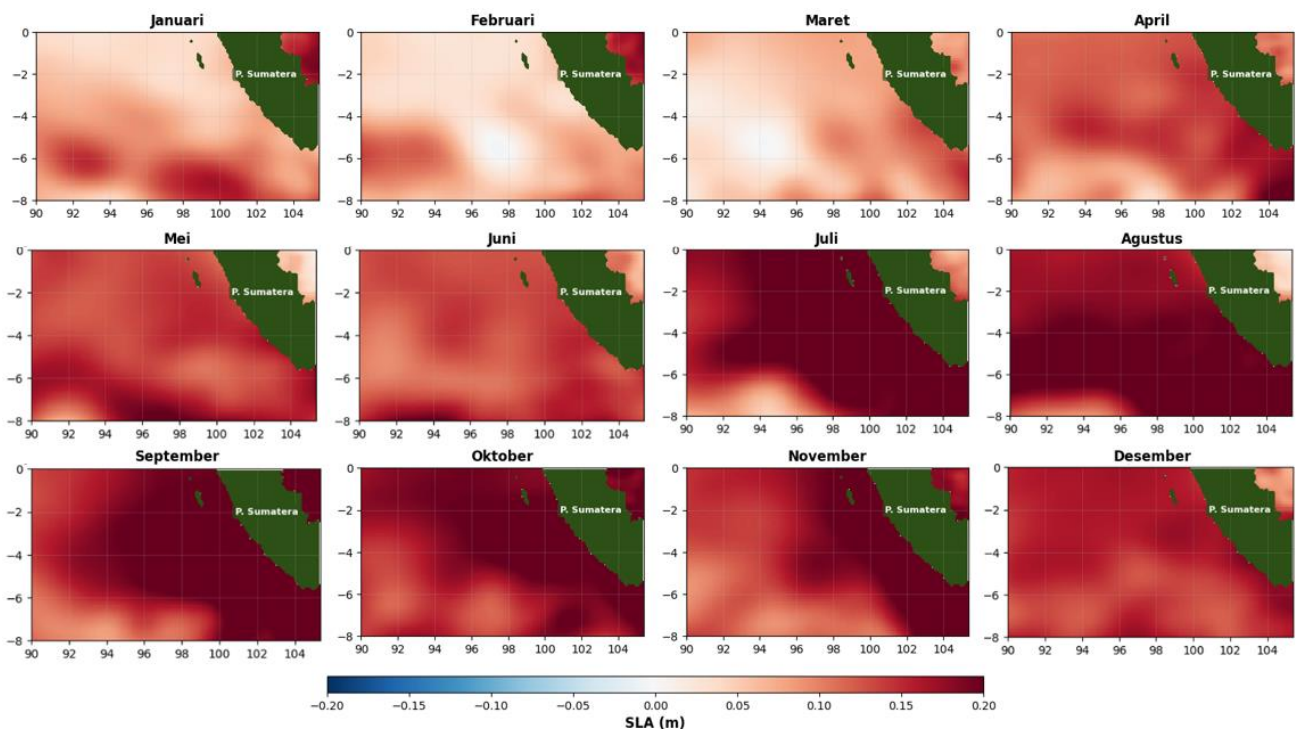


Gambar 8. Peta SLA di Perairan Barat Sumatera pada Tahun 2020

Gambar 8 menampilkan SLA pada tahun 2020, pada bulan Januari – April terlihat bahwa ketinggian muka air laut cenderung negatif atau netral bisa saja akibat residu dari fenomena sebelumnya dimana SLA sekitar -0,005 hingga 0,07 m dan mengalami penurunan pada bulan Mei-Juni terlihat nilai SLA negatif berkisar -0.10m hal ini berkaitan dengan fase IOD positif, dan Agustus-September berkisar 0.15 m hal ini berkaitan dengan fase IOD negatif yang terjadi pada bulan tersebut di tahun 2020, menunjukkan permukaan laut relatif tinggi, terkait dengan *downwelling* yang pada saat fase IOD negatif.



Gambar 9. Peta SLA di Perairan Barat Sumatera pada Tahun 2021

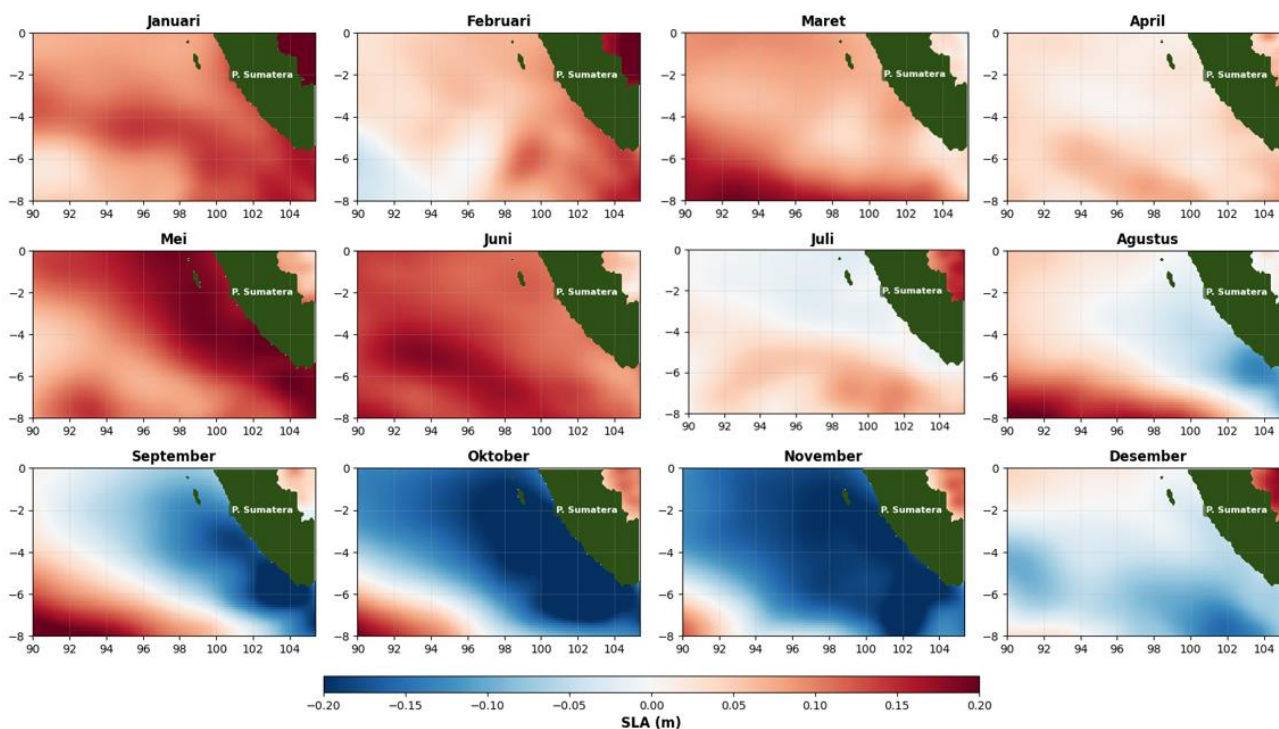


Gambar 10. Peta SLA di Perairan Barat Sumatera pada Tahun 2022

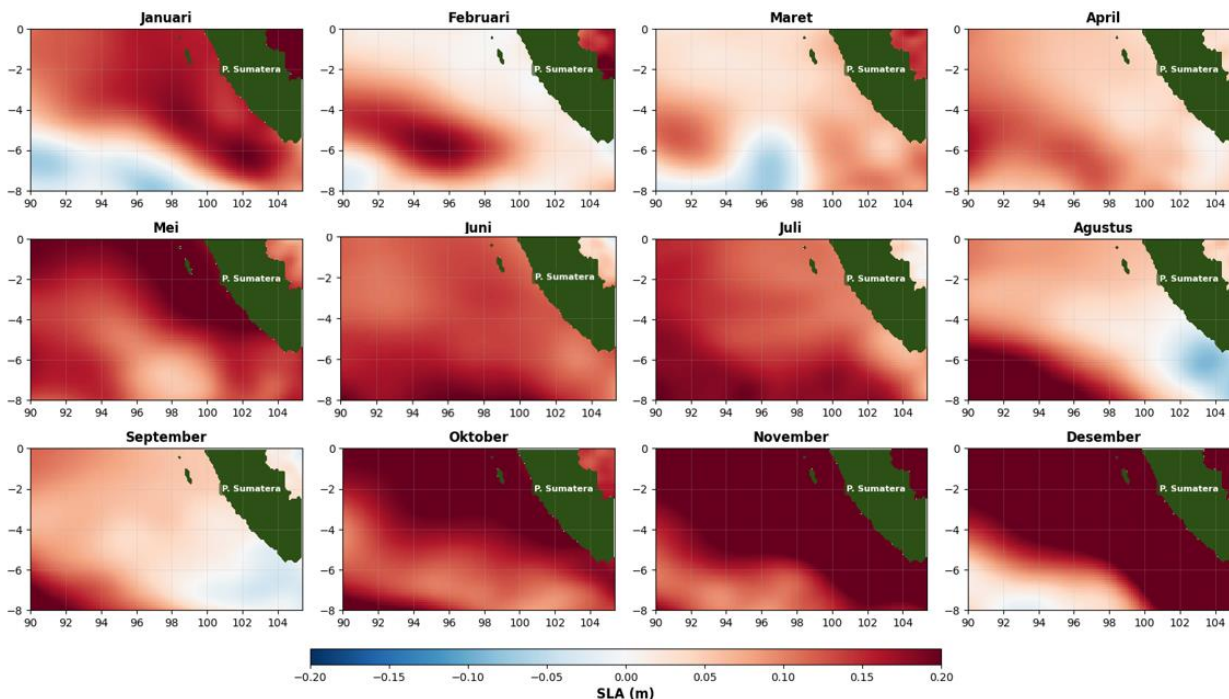
Gambar 9 menampilkan peta SLA untuk tahun 2021, dimana pada bulan Januari -Mei terlihat ketinggian muka air laut cenderung stabil dan atau positif yaitu berkisar antara 0,09 m, dan pada bulan Juni - Desember mengalami kenaikan sampai 0,22m dimana hal ini berkaitan dengan fase IOD negatif yang terjadi di wilayah tersebut pada tahun 2021 menyebabkan kenaikan SLA karena massa air hangat menumpuk dan permukaan laut naik atau biasanya disebut dengan *downwelling*. Gambar 10 menampilkan SLA pada tahun 2022, pada bulan Januari – Juni terlihat bahwa ketinggian muka air laut cenderung netral ke positif dimana SLA sekitar 0,0067 hingga 0,1 m dan semakin meningkat pada bulan Juli - November terlihat nilai SLA positif berkisar 0,15 hingga 0,2m dan *downwelling* yang mendominasi terkait fenomena IOD negatif di tahun 2022 yang menyebabkan kenaikan SLA karena massa air hangat menumpuk dan permukaan laut naik.

Gambar 11 menampilkan peta rata-rata bulanan SLA di tahun 2023 di wilayah inti perairan Barat Sumatera. Pada bulan Januari – Juni SLA cenderung positif atau netral, dengan fluktuasi ringan. Rata-rata anomali sekitar 0.03 hingga 0.07 m, menunjukkan kondisi permukaan laut relatif sedang. Pada bulan Juli - Desember terlihat ke anomali negatif, dengan intensitas meningkat dari September hingga November (rata-rata -0.01 hingga -0.2 m) dan ini mengindikasikan penurunan permukaan laut signifikan dan *upwelling* pada fase IOD positif kuat di tahun 2023 menyebabkan penurunan SLA karena massa air dingin naik ke permukaan dan permukaan laut turun. Gambar 12 menampilkan SLA pada tahun 2024, pada bulan Oktober - Desember mengalami kenaikan sekitar 0,2m menunjukkan permukaan laut relatif tinggi, terkait dengan penumpukan massa air di lapisan atas dan memungkinkan *downwelling* yang mendominasi pada fase IOD negatif.

Ketika suhu air laut meningkat pada saat fase IOD negatif, efek ekspansi termal mendorong tinggi muka air laut naik, menciptakan kondisi dimana SLA positif lebih sering terlihat (Anwar *et al.*, 2024). Hal ini disebabkan oleh melemahnya angin timuran, sehingga air hangat dari Pasifik masuk dan menetap di wilayah timur. Akumulasi air hangat ini menyebabkan kenaikan muka laut, yang tercermin sebagai SLA positif ditandai dengan warna merah pada peta SLA diatas. SLA positif tersebut menunjukkan bahwa volume air permukaan meningkat dimana biasanya disebabkan oleh penumpukan air hangat yang memiliki densitas lebih rendah dan pelemahan *upwelling*, sehingga air dingin dari bawah tidak naik ke permukaan. Arus permukaan yang cenderung stagnan atau berputar lokal, bukan bergerak menjauh dari pantai sehingga massa air di wilayah ini menjadi lebih hangat dan kurang asin di lapisan permukaan (Gera *et al.*, 2016). Stratifikasi termal meningkat, artinya lapisan air menjadi lebih terpisah antara permukaan dan kedalaman. Pencampuran vertikal melemah, sehingga nutrisi dari bawah tidak naik ke permukaan.



Gambar 11. Peta SLA di Perairan Barat Sumatera pada Tahun 2023



Gambar 12. Peta SLA di Perairan Barat Sumatera pada Tahun 2024

Sebaliknya, SLA negatif menunjukkan adanya penurunan muka laut, yang sering dikaitkan dengan proses *upwelling*. Angin timuran menguat, mendorong air permukaan menjauh dari wilayah Indonesia menuju barat mendorong air menjauh dari pantai, air dari lapisan bawah yang lebih dingin dan kaya nutrisi naik ke permukaan. Hal ini meningkatkan produktivitas primer dan konsentrasi klorofil-a (Nababan *et al.*, 2021), seperti yang diamati di perairan barat Sumatera selama fase IOD positif. SLA negatif juga dapat mengindikasikan pelemahan arus permukaan dan peningkatan arus bawah, yang memengaruhi distribusi massa air dan biota laut. Massa air di wilayah ini menjadi lebih dingin dan lebih asin di permukaan karena air dari kedalaman naik.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi tujuh klasifikasi massa air di Perairan Barat Sumatera: empat massa air lapisan atas (0-500 m) yaitu BBW, IEW, IUW, dan SICW; serta tiga massa air lapisan menengah (500-1500 m) yaitu AAIW, IIW dan RSPGW. Fase IOD terbukti berpengaruh terhadap karakteristik massa air. IOD positif (DMI +1,6°C) memicu *upwelling* suhu lebih dingin dan salinitas permukaan lebih tinggi dimana SICW mencapai 35,4 psu, menghasilkan SLA negatif (-0,23 m). Sebaliknya, IOD negatif (DMI -1,25°C) menyebabkan *downwelling* dengan dominasi IUW dan BBW yang hangat dan salinitas lebih rendah (salinitas 34,4 psu) serta SLA positif (0,22 m). Fase netral menunjukkan kondisi transisi dengan distribusi massa air seimbang. IOD berperan sebagai pengatur utama dinamika massa air regional yang memengaruhi struktur termohalin dan produktivitas perairan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwira, H., Purba, N. P., Harahap, S. A., & Syamsuddin, M. L. 2018. Variabilitas Suhu Laut Pada Kejadian IOD (Indian Ocean Dipole) di Perairan Barat Sumatera Menggunakan Data Argo Float. *Jurnal Ilmu-Ilmu Perairan, Pesisir, dan Perikanan*, 7(1): 28-41. <https://doi.org/10.13170/depik.7.1.8089>
- Agdialta, R., & Ariwibowo, F. S. 2023. Karakteristik Suhu Dan Salinitas Vertikal Kaitannya Dengan Massa Air Selama Periode IOD (+), IOD (-), Musim Barat, dan Musim Timur di Selat Mentawai. *Maspari Journal-Marine Science Research*, 15(1): 41-54. <https://doi.org/10.56064/maspari.v15i1.21>
- Berliani, R., Siregar, A. A., Abrar, C. B., Rahmawati, N. S., Suhendra, S., & Lizalidiawati, L. 2025. Identifikasi Suhu Permukaan Laut Pada Saat Terjadinya Iod Positif, El Niño Dan Monsun Di Perairan Barat

- Sumatra. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 18(1): 10-21. <https://doi.org/10.21107/jk.v18i1.29100>
- Delman, A. S., Sprintall, J., McClean, J. L., & Talley, L. D. 2016. Anomalous Java Cooling at The Initiation of Positive Indian Ocean Dipole Events. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(8): 5805-5824. <https://doi.org/10.1002/2016JC011635>
- Emery, W. J., & Meincke, J. 1986. Global Water Masses: Summary and Review. *Oceanologica Acta*. <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0108>
- Fahlevi, M. R., Bayhaqi, A., Sugianto, D. N., Fadli, M., Wang, H., Susanto, R. D., & Wouthuyzen, S. 2022. Karakteristik Massa Air di Selat Sunda Dan Perairan Lepasnya. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(3): 231-247. <https://doi.org/10.14710/buloma.v11i2.41323>
- Gera, A., Mitra, A. K., Mahapatra, D. K., Momin, I. M., Rajagopal, E. N., & Basu, S. 2016. Sea Surface Height Anomaly And Upper Ocean Temperature Over The Indian Ocean During Contrasting Monsoons. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 75(1): 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2016.04.002>
- Lestari, D. J., & Heltria, S. 2025. Analisis Pengaruh Angin, Curah Hujan Dan Suhu Permukaan Laut Terhadap Hasil Tangkapan Handline Di Pelabuhan Perikanan Samudera Bungus. *Journal of Marine & Coastal Science*, 14(3). <https://doi.org/10.20473/jmcs.v14i3.72571>
- Malau, R. E. L., Asmadin, & Takwar, A. 2024. Variabilitas Lapisan Termoklin Berdasarkan Fenomena Indian Ocean Dipole (IOD) di Perairan Barat Sumatera. *Journal of Marine Research and Technology*, 7(2): 177-180. <https://doi.org/10.24843/JMRT.2024.v07.i02.p15>
- Millenia, Y. W., Helmi, M., & Maslukah, L. 2023. Analisis Mekanisme Pengaruh IOD, ENSO dan Monsun terhadap Suhu Permukaan Laut dan Curah Hujan di Perairan Kepulauan Mentawai, Sumatera Barat. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(4): 87-98. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i4.14414>
- Miranda, L. J. K., Helmi, M., Hariyadi, H., Wirasatriya, A., & Purwanto, P. 2021. Studi Pergerakan Gelombang Kelvin Berdasarkan Analisis SLA (Sea Level Anomaly) di Samudra Hindia. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(3): 224-229. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i3.11225>
- Nababan, B., Sihombing, E. G. B., & Panjaitan, J. P. 2021. Variabilitas Suhu Permukaan Laut Dan Konsentrasi Klorofil-A Di Samudera Hindia Bagian Timur Laut, Barat Sumatera. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 12(2): 143-159. <https://doi.org/10.24319/jtpk.12.143-159>
- Napitupulu, G., Radjawane, I. M., Azuga, N. A., Pratama, K. R., Fekranie, N. A., & Park, H. 2022. Identification of Seasonal Water Mass Characteristics in West Sumatra Waters. *Equatorial Atmospheric Science and Environment*, 531-543.
- 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. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v5i3.15244>
- Ramadhanty, F. W., Muslim, M., Kunarso, K., Rochaddi, B., & Ismunarti, D. H. 2021. Pengaruh Fenomena IOD (Indian Ocean Dipole) Terhadap Sebaran Temperatur Dan Salinitas di Perairan barat Sumatera. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(1): 89-99. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i1.10494>
- Ridwan, M. B. 2024. Pengaruh Indian Ocean Dipole (IOD) Terhadap Sebaran Pola Angin di Bandara Depati Amir Pangkalpinang. *Jurnal Widya Climago*, 6(2): 34-41.
- Saputra, M. R. A., Chalid, F. I., & Budianto, H. 2023. Metode Ilmiah Dan Penelitian: Kuantitatif, Kualitatif, Dan Kepustakaan (Bahan Ajar Madrasah Riset). Nizamia Learning Center.
- Setyadji, B., & Amri, K. 2017. Pengaruh anomali iklim (ENSO dan IOD) Terhadap Sebaran Ikan Pedang (*Xiphias gladius*) di Samudera Hindia Bagian Timur. *Jurnal Segara*, 13(1): 49-63.
- Tong, B., Zhou, W., & Wang, X. 2025. Rising Warm Positive Indian Ocean Dipole Under Global Warming: Early Western Indian Ocean Warming As A Key Predictor. *One Earth*, 8(4).