

## Pengaruh IOD Positif Kuat 2019 terhadap Karakteristik Upwelling di Perairan Nusa Tenggara

Muhammad Fakhri Khairillah Almunawir\*, Anindya Wirasatriya, dan Rikha Widiaratih

Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. H. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia  
Email: \*fakhrikalmunawir@hotmail.com

### Abstrak

Sebagai salah satu penggerak iklim, Indian Ocean Dipole (IOD) mempengaruhi dinamika interaksi atmosfer-laut di Indonesia, khususnya di pesisir yang berhadapan dengan Samudera Hindia seperti Perairan Nusa Tenggara. Dipole Mode Index (DMI) yang mencapai  $1.123^{\circ}\text{C}$  pada tahun 2019 menandai fase pIOD terkuat sejak tahun 1997. Keunikan lain dari pIOD 2019 adalah terlepas dari peristiwa El Nino di Samudera Pasifik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh IOD positif ekstrim tahun 2019 terhadap karakteristik *upwelling* di perairan Nusa Tenggara. Studi ini menggunakan data penginderaan jauh seperti OISST untuk suhu permukaan laut, ASCAT untuk kecepatan dan arah angin, OCCCI untuk konsentrasi klorofil-a, serta altimetri satelit untuk anomali permukaan laut. Semua data yang terkumpul kemudian dihitung dan dianalisis secara spasial menggunakan perangkat lunak IDL. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *upwelling* di perairan Nusa Tenggara pada saat IOD positif ekstrim tahun 2019 ditandai dengan anomali SLA negatif ( $-15\text{ cm}$ ), anomali SST negatif ( $-1^{\circ}\text{C}$ ), anomali angin zonal positif ( $1\text{ m/s}$ ), dan EMT lepas pantai yang kuat (hingga  $-5\text{ m}^2/\text{dtk}$ ). Puncak kejadian pada bulan Agustus dengan suhu permukaan laut di bawah  $26^{\circ}\text{C}$  dan konsentrasi klorofil-a di atas  $0,5\text{ mg/m}^3$ . Kami juga menemukan propagasi gelombang Rossby *upwelling* di perairan Nusa Tenggara yang dapat menekan efek *downwelling* gelombang Kelvin sehingga kondisi *upwelling* pesisir menguat meskipun kecepatan angin lebih rendah dari rata-rata klimatologi.

**Kata kunci:** Gelombang Rossby, Indian Ocean Dipole, Perairan Nusa Tenggara, *Upwelling*

### Abstract

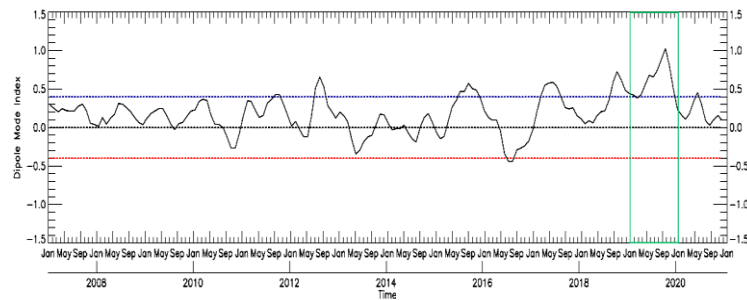
#### *Influence of Strong Positive IOD 2019 on Upwelling Characteristic in Nusa Tenggara Waters*

As one of the climate drivers, the Indian Ocean Dipole (IOD) affects the dynamics of atmosphere-ocean interactions in Indonesia, especially on the coast facing the Indian Ocean such as Nusa Tenggara Waters. The Dipole Mode Index (DMI) which reached  $1.123^{\circ}\text{C}$  in 2019 marked the strongest pIOD phase since 1997. Another unique feature of 2019 pIOD is its independent from El Nino event in Pacific Ocean. This study aims to understand the effect of extreme positive IOD in 2019 on upwelling characteristics in Nusa Tenggara waters. The study used remotely sensed data such as OISST for sea surface temperature, ASCAT for wind speed and direction, OCCCI for chlorophyll-a concentrations, as well as satellite altimetry for sea level anomalies. All the collected data is then computed and analyzed spatially using IDL software. The results showed that upwelling in Nusa Tenggara waters during the extreme positive IOD of 2019 was characterized by negative SLA anomalies ( $-15\text{ cm}$ ), negative SST anomalies ( $-1^{\circ}\text{C}$ ), positive zonal wind anomalies ( $1\text{ m/s}$ ), and strong offshore EMTs (up to  $-5\text{ m}^2/\text{s}$ ). The event peaks in August with sea surface temperatures below  $26^{\circ}\text{C}$  and chlorophyll-a concentrations above  $0.5\text{ mg/m}^3$ . We also found an upwelling Rossby waves propagation in Nusa Tenggara water that may suppressed the effect of downwelling Kelvin waves resulting in the strengthening coastal upwelling condition despite a wind speed lower than average climatology.

**Keywords:** Indian Ocean Dipole, Nusa Tenggara Waters, Rossby Waves, *Upwelling*

### PENDAHULUAN

Indian Ocean Dipole (IOD) mempengaruhi dinamika interaksi atmosfer-samudera di Indonesia, utamanya pada pesisir pantai yang berhadapan dengan Samudera India. IOD mempengaruhi sebaran suhu permukaan laut dan klorofil-a yang merupakan komponen penting dalam penentuan daerah *upwelling*. *Upwelling* terjadi untuk mengimbangi divergensi aliran horizontal dan menghasilkan aliran ke arah. Aliran ini membawa air dingin yang kaya akan nutrient dari kedalaman menuju ke permukaan (Ningsih *et.al.*, 2013).



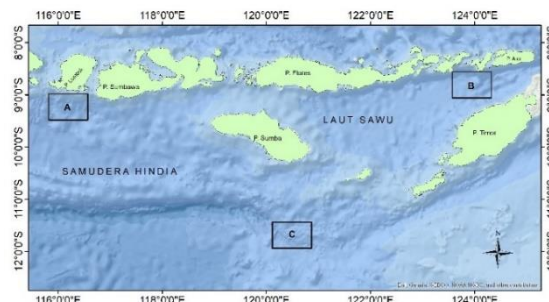
**Gambar 1.** Grafik Dipole Mode Index Selama 14 Tahun (2007-2020), kotak hijau menandakan tahun 2019

Perairan Nusa Tenggara memiliki kondisi geografis yang unik sebagai pintu keluar Arus Lintas Indonesia dan bagian dari sirkulasi *thermohaline* global yang membawa massa air hangat dari Samudra Pasifik ke Samudra India. Keadaan Perairan Nusa Tenggara tidak luput dari pengaruh variabilitas iklim dan meteorologi yang terjadi di Samudra Hindia, utamanya pada bagian timur Samudra India. Selain itu, dengan lanskap bawah laut yang curam tingginya produktivitas akibat fenomena *upwelling* menjadi habitat bagi fauna laut besar yang menetap dan bermigrasi seperti paus, lumba-lumba, duyung, hiu, penyu, dan pari manta (Perdanahardja dan Lionata 2017).

Fase *Indian Ocean Dipole* positif pada tahun 2019 merupakan peristiwa IOD positif terkuat kedua sepanjang sejarah. Keunikan IOD positif 2019 ini terdapat pada kejadiannya yang tidak disertai oleh fenomena *El Nino*. Sebuah fenomena IOD dapat dideteksi dengan menggunakan Dipole Mode Index (DMI) dimana didefinisikan sebagai perbedaan dalam anomaly suhu permukaan laut (SPL) antara khatulistiwa barat dan khatulistiwa timur Samudera India. Rata-rata anomaly dihitung untuk sebuah kotak di bagian barat Samudera India diikat oleh koordinat  $50^{\circ}\text{E} - 70^{\circ}\text{E}$  dan  $10^{\circ}\text{S} - 10^{\circ}\text{N}$ . Serta untuk kotak bagian timur diikat oleh koordinat  $10^{\circ}\text{S} - \text{Ekuator}$  dan  $90^{\circ}\text{E} - 110^{\circ}\text{E}$  (Vinayachandran *et al.*, 2009). Peristiwa ekstrim ini yang ditandai oleh nilai DMI mencapai  $1.123^{\circ}\text{C}$  ini diduga dipengaruhi oleh menguatnya *sea level pressure* (SLP) di Australia dan melemahnya SLP di Laut China Selatan (Lu dan Ren, 2020). Penelitian Du *et al.*, (2020) menemukan perambatan anomaly gelombang Rossby ke arah barat yang menyebabkan menghangatnya suhu permukaan laut di bagian barat Samudra India. Kedua hal tersebut berperan dalam meningkatkan nilai *Dipole Mode Index* pada tahun 2019. Penelitian terkait pengaruh IOD positif kuat pada tahun 2019 telah dilakukan sebelumnya oleh Safinatunnajah *et al.*, (2021) dan Iskandar *et al.*, (2022), tetapi hanya terbatas di Perairan Selatan Jawa saja. Safinatunnajah *et al.* (2021) mengindikasikan pelemahan *downwelling Kelvin wave* yang menguatkan proses coastal *upwelling* di sepanjang Selatan Jawa. Permasalahan yang diangkat kali ini adalah untuk melanjutkan penelitian sebelumnya dalam mengetahui pengaruh IOD positif kuat tahun 2019 terhadap karakteristik *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara. Fenomena *upwelling* dikarakteristikan melalui penurunan suhu permukaan laut dan anomaly muka air laut, peningkatan konsentrasi klorofil-a dan kecepatan angin timur, serta melalui intensitas *Ekman Mass Transport*.

## MATERI DAN METODE

Lokasi penelitian berada di Perairan Nusa Tenggara yang berada pada  $7^{\circ} - 14^{\circ}\text{LS}$  dan  $115.5^{\circ} - 125.5^{\circ}\text{BT}$ . Kotak hitam pada peta menunjukkan daerah yang akan di rata-rata. Kotak A merepresentasikan data yang ada di Perairan Nusa Tenggara pada perairan terbuka dan kotak B merepresentasikan data pada perairan tertutup. Sedangkan kotak C dipilih sebagai perwakilan data yang berada di lepas pantai.



**Gambar 2** Peta Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan data dengan rentang tahun selama 14 tahun dari 2007 hingga 2020. Data suhu permukaan laut yang digunakan adalah data *Optimal Interpolation Sea Surface Temperature* (OISST) harian yang diperoleh melalui <https://www.remss.com/>. Data ini merupakan data level 4 dengan resolusi spasial sebesar 8 km yang diakses pada tanggal 4 Mei 2022. Data klorofil-a yang digunakan adalah *Ocean Colour Climate Change Initiatives v5.0* yang memiliki resolusi spasial sebesar 4 km dan bersifat data harian level 3. Data ini diakses pada tanggal 1 Mei 2023 melalui <https://www.oceancolour.org/>. Data angin harian ASCAT yang digunakan memiliki resolusi spasial  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$  dan merupakan data level 3 yang diakses pada tanggal 1 Januari 2023 melalui situs <https://marine.copernicus.eu/>. Data *sea level anomaly* harian diperoleh dari satelit altimetri yang merupakan data observasi level 4 dengan resolusi sebesar  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ . Data ini diakses pada tanggal 11 Januari 2023 melalui situs <https://marine.copernicus.eu/>. *Dipole Mode Index* yang menunjukkan anomali perubahan suhu permukaan laut antara *West Tropical Indian Ocean* (WTIO) dan *South East Tropical Indian* (SETIO) diperoleh dari situs [https://psl.noaa.gov/gcos\\_wgsp/Timeseries/DMI/](https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/DMI/). Rentang data yang digunakan selama 14 tahun dari tahun 2007 hingga 2020.

Data harian yang diperoleh yang memiliki format NetCDF diolah melalui perangkat lunak IDL dengan merata-ratakan data hingga menjadi data bulanan untuk setiap variabelnya. Kemudian data bulanan dihitung menjadi data klimatologi dengan rentang selama 14 tahun dari 2007 hingga 2020. Rumus yang digunakan dalam menghitung data menjadi data bulanan dan data klimatologi didasarkan pada rumus matematis yang digunakan oleh (Wirasatriya et al., 2017) yaitu:

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

Keterangan:

$\bar{X}(x, y)$	= Rata-rata bulanan dan klimatologi
N	= Jumlah jam, hari atau bulan dalam hari, bulan atau tahun
i=1	= Hari atau bulan ke i
$xi(x, y, t)$	= Data harian atau bulanan ke I

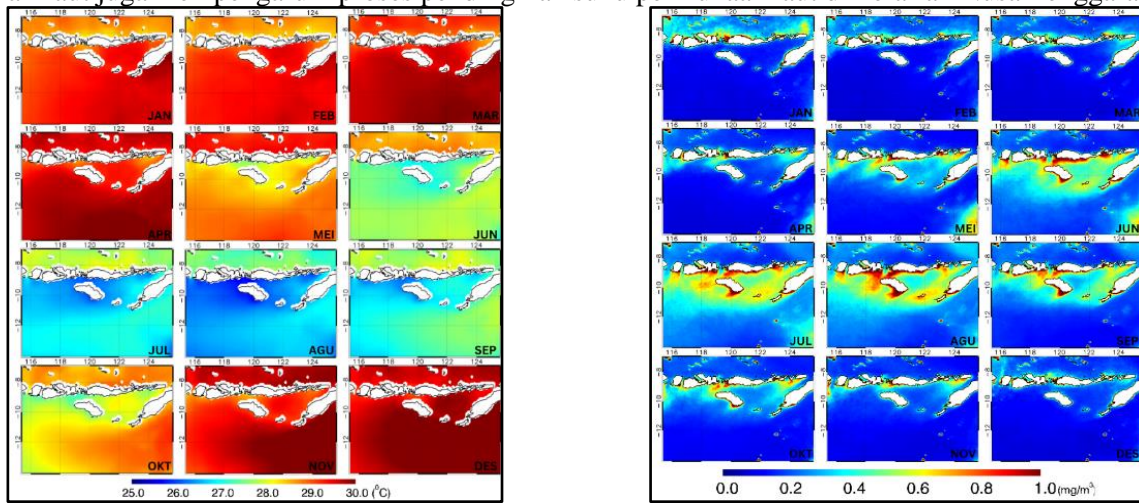
Setelah mendapatkan data komposit bulanan dan klimatologi dilakukan perhitungan anomaly pada tiap variable. Perhitungan anomaly dilakukan dengan mengurangi data bulanan dengan data klimatologi. Implementasi data hasil olahan berupa gambar peta klimatologi, peta anomaly dan diagram hovmoller.

Pada penelitian kali ini metode analisis korelasi yang digunakan adalah analisis korelasi Pearson. Korelasi Pearson digunakan untuk mengetahui keeratan linear yang diasosiasikan satu variabel terhadap variabel lainnya. Variabel yang digunakan dalam korelasi ini adalah suhu permukaan laut, konsentrasi klorofil-a, kecepatan angin, dan *sea level anomaly*.

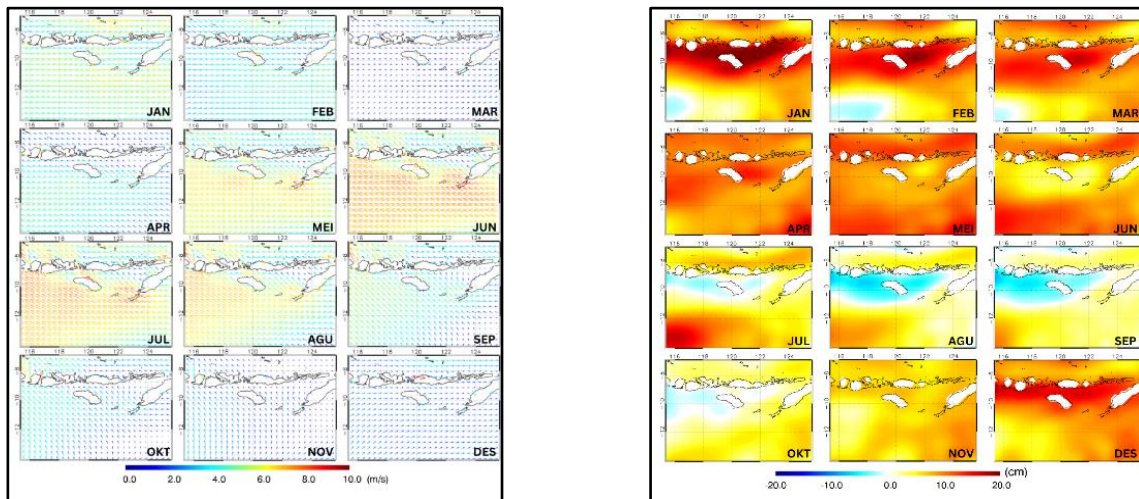
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis klimatologi selama 14 tahun suhu permukaan laut, terlihat pola musiman yang menunjukkan bahwa suhu permukaan laut di Perairan Nusa Tenggara pada musim timur (Juni, Juli dan Agustus) lebih rendah daripada musim barat (Desember, Januari, dan Februari) yang ditunjukkan pada **Gambar 3**. Puncak pendinginan terjadi pada bulan Agustus dimana suhu permukaan laut mencapai  $26.461^{\circ}\text{C}$ , sedangkan suhu permukaan laut tertinggi terjadi pada bulan Desember sebesar  $29.947^{\circ}\text{C}$ . Konsentrasi klorofil-a di Perairan Nusa Tenggara memiliki pola musiman yang berbeda dimana konsentrasi klorofil-a pada musim timur lebih tinggi daripada musim barat. Nilai klorofil-a tertinggi ditemukan ketika bulan Juli yang mencapai  $0.491 \text{ mg/m}^3$ , sedangkan nilai klorofil-a terendah terjadi pada bulan Februari senilai  $0.221 \text{ mg/m}^3$ . Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh (Ningsih, Rakhmaputeri, dan Harto 2013), dimana suhu permukaan laut lebih dingin dan konsentrasi klorofil-a lebih tinggi ketika musim timur dibandingkan dengan musim barat pada Perairan Nusa Tenggara. Rendahnya suhu permukaan laut dan tingginya konsentrasi klorofil-a pada Perairan Nusa Tenggara saat musim timur dipengaruhi oleh adanya pola angin Muson timur. Hal ini terlihat pada **Gambar 4**, dimana kecepatan angin lebih kencang saat musim timur daripada ketika musim barat. Angin muson timur yang bergerak ke arah barat menyebabkan kekosongan massa air sehingga massa air yang lebih dingin naik ke permukaan dan membawa kadar nutrisi yang tinggi. Angin tenggara yang berasal dari Australia berhembus sepanjang pesisir Nusa Tenggara ketika musim timur. Hal tersebut yang menggerakkan terjadinya Offshore Ekman Mass Transport. Menurut Wirasatriya et al (2017), kecepatan angin muson dapat mempengaruhi konsentrasi klorofil-a melalui proses mixing dan meningkatkan flux nutrisi ke

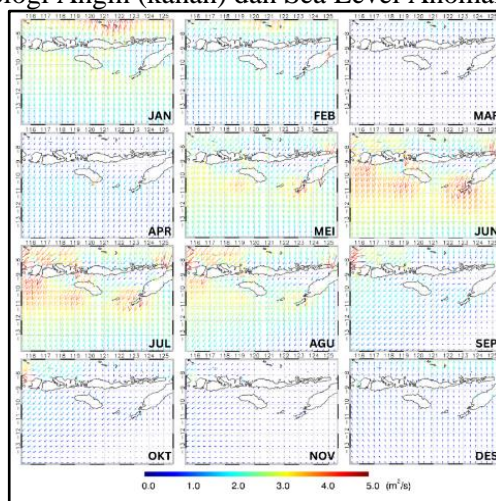
atas dengan menguatkan proses mixing vertikal. Kecepatan yang kuat juga meningkatkan proses pelepasan energi panas dari permukaan laut ke atmosfer sehingga menurunkan suhu permukaan laut. Selain itu, anomali muka air laut juga mempengaruhi proses pendinginan suhu permukaan laut di Perairan Nusa Tenggara.



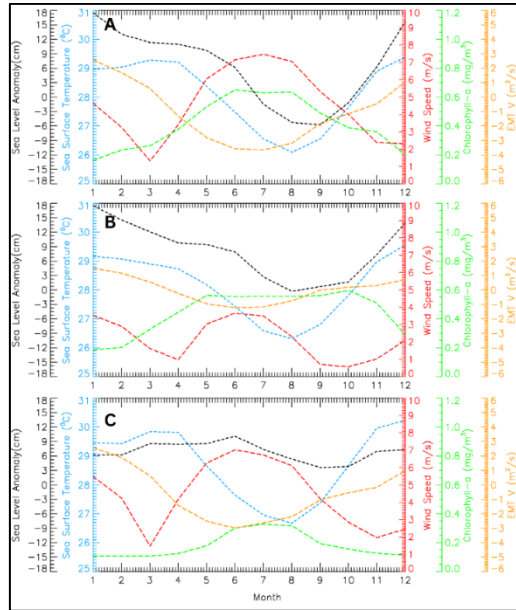
**Gambar 3** Peta Klimatologi Suhu Permukaan Laut (kanan) dan Klorofil-a (kiri) Tahun 2007-2020



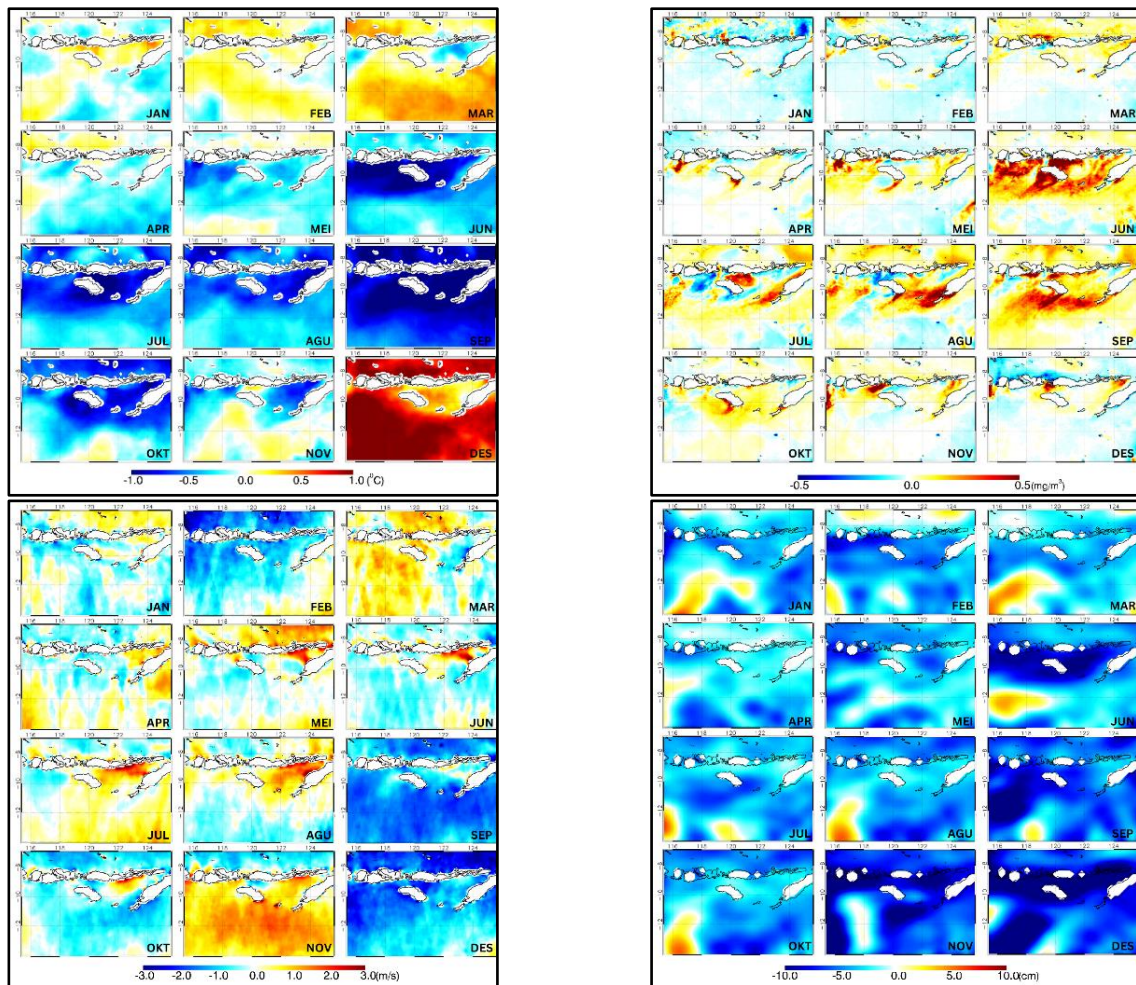
**Gambar 4** Peta Klimatologi Angin (kanan) dan Sea Level Anomaly (kiri) Tahun 2007-2020



**Gambar 5** Peta Klimatologi Ekman Mass Transport Tahun 2007-2020



**Gambar 6** Grafik Variasi Bulanan SST, Chl-a, Angin, SLA dan EMT V Tahun 2019 a) Kotak A, b) Kotak B, c) Kotak C.



**Gambar 7** Peta Anomali 2019 Suhu Permukaan Laut (kiri atas), Konsentrasi Klorofil-a (kanan atas), Angin Zonal (kiri bawah), dan SLA(kanan bawah)

**Tabel 1.** Korelasi SPL, Klorofil-a, Angin, dan SLA di Perairan Nusa Tenggara

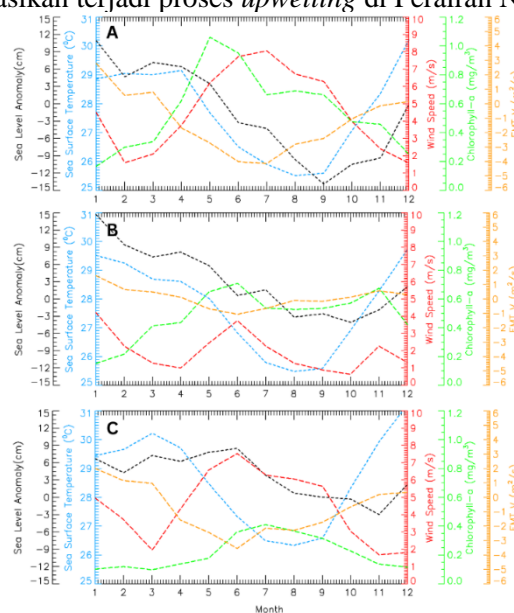
	Korelasi	sst	chl-a	wind	sla
Kotak A	sst	1	-.714**	-.722**	.732**
	chl-a	-.714**	1	.607**	-.644**
	wind	-.722**	.607**	1	-.308**
	sla	.732**	-.644**	-.308**	1
Kotak B	sst	1	-.664**	-0.098	.686**
	chl-a	-.664**	1	-.209**	-.726**
	wind	-0.098	-.209**	1	.252**
	sla	.686**	-.726**	.252**	1
Kotak C	sst	1	-.821**	-.655**	0.060
	chl-a	-.821**	1	.611**	-0.075
	wind	-.655**	.611**	1	0.128
	sla	0.060	-0.075	0.128	1

Analisis klimatologi anomali bulanan pada tahun 2019 menunjukkan variabilitas anomali suhu permukaan laut, klorofil-a, angin zonal, dan SLA di Perairan Nusa Tenggara. Anomali suhu permukaan laut pada tahun 2019 ketika musim timur lebih rendah daripada biasanya. Anomali negatif suhu permukaan laut terlihat menguat pada bulan Juni yang mencapai puncaknya pada bulan September dengan nilai anomali  $\pm -1^{\circ}\text{C}$ . Nilai DMI positif yang semakin meningkat ketika memasuki bulan Juni menjelaskan terjadinya anomali negatif suhu permukaan laut. Terutama pada bulan September dimana keseluruhan Perairan Nusa Tenggara mengalami anomali negatif kuat akibat nilai DMI positif yang memuncak. Anomali positif kuat terlihat terjadi pada bulan Desember dengan nilai anomali  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Hal tersebut menandakan telah berakhirnya peristiwa *Indian Ocean Dipole* di Perairan Nusa Tenggara. Puncak anomali negatif kuat suhu permukaan laut pada bulan September dipengaruhi oleh nilai SLA terendah yang terjadi pada bulan September. Anomali klorofil-a pada tahun 2019 mengalami puncak anomali positif kuat pada bulan Juni hingga mencapai  $0.5 \text{ mg/m}^3$ . Hal tersebut berbeda dengan puncak anomali negatif suhu permukaan laut yang terjadi pada bulan September. Puncak anomali positif klorofil-a pada bulan Juni dikarenakan kecepatan angin yang tinggi, meskipun anomali angin zonal tahun 2019 tidak menunjukkan anomali positif pada seluruh Perairan Nusa Tenggara. Anomali negatif kuat SLA yang terjadi pada bulan yang sama di Perairan Nusa Tenggara sehingga diduga memiliki peran terhadap puncak anomali positif klorofil-a pada bulan Juni.

Berdasarkan uji korelasi Pearson yang ditunjukkan pada **Tabel 1** diketahui hubungan antara suhu permukaan laut dan klorofil-a dengan nilai koefisien korelasi pada ketiga kotak adalah  $r = -0.714$  untuk kotak A,  $r = -0.664$  untuk kotak B, dan  $r = -0.821$  untuk kotak C. Sehingga dapat diartikan bahwa ketika suhu permukaan laut rendah, maka konsentrasi klorofil-a akan meningkat. Hal tersebut terlihat pada **Gambar 7** yang menunjukkan anomali positif klorofil-a dan anomali negatif suhu permukaan laut secara bersamaan pada bulan Juni dan September tahun 2019. Hubungan antara suhu permukaan laut dan angin di Perairan Nusa Tenggara ditunjukkan pada **Tabel 1** dengan nilai  $r = -0.722$  pada kotak A,  $r = -0.098$  pada kotak B, dan  $r = -0.655$  pada kotak C. Pada kotak A dan C, suhu permukaan laut dan angin memiliki korelasi kuat negatif yang berarti ketika kecepatan angin meningkat maka nilai suhu permukaan laut akan menurun. Sedangkan pada kotak B keduanya tidak memiliki korelasi yang signifikan. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh lemahnya kecepatan angin pada kotak C selama sepanjang tahun. Selain itu kondisi geografis pada kotak C yang berada di perairan tertutup dapat menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi kecepatan angin. Ketidaksesuaian hasil korelasi dengan peta anomali bulan 2019 menunjukkan bahwa rendahnya nilai suhu permukaan laut dipengaruhi oleh faktor lain selain kecepatan angin timur. Hubungan antara suhu permukaan dan anomali muka air laut di Perairan Nusa Tenggara berdasarkan **Tabel 1** adalah saling berbanding lurus kuat dengan nilai  $r = 0.732$  pada kotak A dan  $r = 0.686$  pada kotak B yang berarti ketika anomali muka air laut rendah maka nilai suhu permukaan laut juga akan ikut menurun dan sebaliknya. Hal tersebut merupakan indikator terjadinya proses *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara. Dimana kekosongan massa air mengakibatkan terjadinya pergerakan massa air dibawah yang lebih dingin ke atas permukaan. Sedangkan pada kotak C tidak ditemukan korelasi yang signifikan dengan nilai  $r = 0.060$ . Hubungan antara angin dan klorofil-a di Perairan Nusa Tenggara ditunjukkan pada **Tabel 1** dengan nilai  $r = 0.607$  untuk kotak A,  $r = -0.209$  untuk kotak B, dan  $r = 0.611$  untuk kotak C. Pada kotak A dan C hubungan antara keduanya berkorelasi positif kuat yang berarti

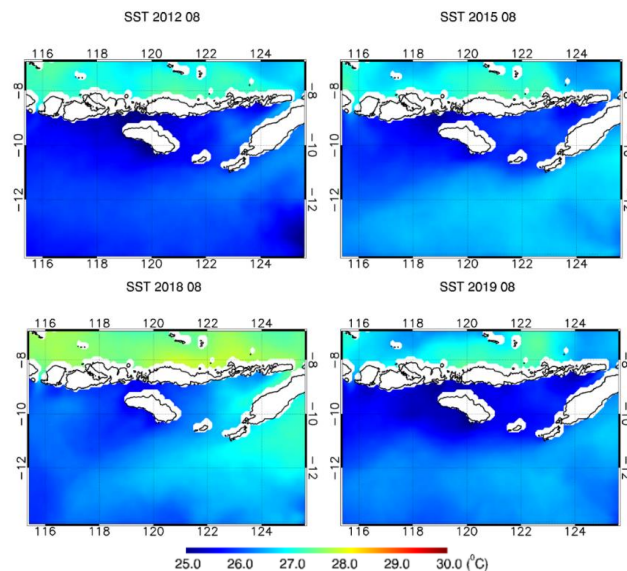
ketika kecepatan angin menguat, maka akan memicu peningkatan konsentrasi klorofil-a. Akan tetapi, pada kotak B korelasi antara keduanya menjadi negatif yang hubungan antara angin dan klorofil-a saling berbanding terbalik. Hubungan antara konsentrasi klorofil-a dengan anomali muka air di Perairan Nusa Tenggara ditunjukkan oleh **Tabel 1** dengan nilai  $r = -0.644$  pada kotak A,  $r = -0.726$  pada kotak B, dan  $r = 0.075$  pada kotak C. Hubungan saling berbanding terbalik ditunjukkan pada kotak A dan B yang berarti seiring dengan menurunnya nilai anomali muka air laut, maka konsentrasi klorofil-a akan meningkat dan sebaliknya. Sedangkan pada kotak C tidak terdapat korelasi yang signifikan.

Tiga kotak sampel di Perairan Nusa Tenggara menunjukkan perbedaan pola musiman daripada suhu permukaan laut, konsentrasi klorofil-a, kecepatan angin, anomali muka air laut, dan komponen EMT meridional pada tahun IOD positif kuat 2019. Pola musiman suhu permukaan laut memiliki pola yang relatif sama untuk ketiga kotak sampel. Pada kotak A dan kotak B, suhu permukaan laut mengalami pendinginan hingga di bawah  $26^{\circ}C$  ketika bulan Agustus yaitu sebesar  $25.51^{\circ}C$  untuk kotak A dan  $25.47^{\circ}C$  untuk kotak B. Sedangkan kotak C memiliki nilai di atas  $26^{\circ}C$  yaitu sebesar  $26.3^{\circ}C$  pada bulan yang sama. Perbedaan nilai antara kotak A dan B dengan kotak C dipengaruhi oleh kondisi geografis kotak sampel, dimana kedua kotak pertama berada di pesisir sedangkan kotak terakhir berada di lepas pantai. Letak kotak A dan B yang berada di pesisir memungkinkan untuk terjadinya *coastal upwelling*. Sedangkan untuk kotak yang berada di lepas pantai, pengaruh daripada *coastal upwelling* lebih kecil. Pola musiman konsentrasi klorofil-a memiliki pola yang berbeda di ketiga kotaknya. Pada kotak A, klorofil-a memuncak ketika bulan Mei hingga  $1.06 \text{ mg/m}^3$  dan terus menurun ketika musim timur (Juni, Juli, dan Agustus) dengan konsentrasi klorofil-a berada disekitar  $0.66 \text{ mg/m}^3 - 0.69 \text{ mg/m}^3$ . Pada kotak B, klorofil-a memuncak ketika bulan Juni dengan nilai sebesar  $0.71 \text{ mg/m}^3$  dan stabil ketika bulan Juli dan Agustus dengan konsentrasi klorofil-a  $0.53 \text{ mg/m}^3$  dan  $0.52 \text{ mg/m}^3$  masing-masing. Pada kotak C yang berada di lepas pantai, konsentrasi klorofil-a lebih rendah yang memuncak pada bulan Juli dengan nilai  $0.41 \text{ mg/m}^3$ . Perbedaan yang terjadi disebabkan oleh intensitas kecepatan angin yang berbeda disetiap kotaknya. Dimana kecepatan angin pada kotak A lebih tinggi daripada kecepatan angin di kotak B. Menurut (Setiawan *et al.*, 2019), konsentrasi klorofil-a sangat sensitif terhadap pengaruh angin khususnya terkait besaran dan distribusi spasial klorofil-a yang dikontrol oleh kekuatan dan arah dari stress angin. Akan tetapi, pada kotak A, konsentrasi klorofil-a mencapai puncak terlebih dahulu dibandingkan dengan kecepatan angin. Peristiwa ini diduga akibat terjadi fenomena IOD positif kuat pada tahun 2019 dikarenakan puncak konsentrasi klorofil-a pada tahun-tahun sebelumnya terjadi pada musim timur. Suhu permukaan laut yang di bawah  $26^{\circ}C$  dan konsentrasi klorofil-a yang berada di atas  $0.5 \text{ mg/m}^3$  pada kotak A dan B mengindikasikan terjadi proses *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara.



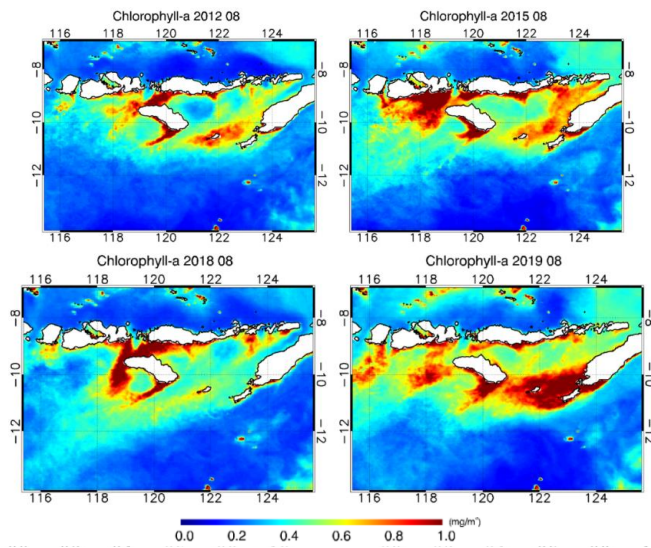
**Gambar 8** Grafik Variasi Bulanan SST, Chl-a, Angin, SLA dan EMT V Tahun 2019 a) Kotak A, b) Kotak B, c) Kotak C.

Perbandingan karakteristik *upwelling* (suhu permukaan laut, klorofil-a, angin, SLA, dan EMT) di Perairan Nusa Tenggara pada tahun-tahun pIOD (2012, 2015, 2018 dan 2019) menunjukkan perbedaan pada tiap tahunnya. Suhu permukaan laut berdasarkan **Gambar 9** pada tahun 2012 dan 2019 memiliki nilai yang lebih dingin diantara keempat tahun yang mencapai  $25^{\circ}\text{C}$ . Kedua tahun tersebut merupakan tahun kejadian pIOD tanpa disertai dengan fenomena *El Nino*. Sebaran suhu permukaan laut pada tahun 2019 lebih terkonsentrasi pada sekitar perairan pesisir. SPL tahun 2012 yang memiliki sebaran yang lebih luas akan tetapi lebih hangat  $0.5^{\circ}\text{C}$  dari tahun 2019. Rendahnya suhu permukaan laut pada tahun 2019 dibandingkan tahun pIOD yang lainnya diduga disebabkan karena tingginya nilai DMI yang memicu terjadinya anomali muka air laut negatif di Perairan Nusa Tenggara yang ditunjukkan oleh **Gambar 12**. Berdasarkan **Gambar 10** Klorofil-a pada tahun 2019 memiliki sebaran yang lebih luas dan konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan keempat tahun pIOD. Lokasi konsentrasi klorofil-a tinggi ( $\geq 0.5 \text{ mg/m}^3$ ) bervariasi tiap tahunnya, tetapi ditemukan daerah yang konsisten memiliki konsentrasi tinggi selama bulan Agustus yaitu pada selatan Pulau Sumba. Hal tersebut diduga memiliki keterkaitan terhadap kecepatan angin yang cenderung bertiup lebih kencang relatif terhadap Perairan Nusa Tenggara pada tahun yang sama yang ditunjukkan oleh **Gambar 11**. Selain itu, karakteristik *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara pada tahun-tahun pIOD juga terlihat pada **Gambar 13** melalui peta spasial *Ekman Mass Transport*. Pada keempat tahun, terjadi *offshore* EMT di bulan Agustus dimana massa air permukaan bergerak menjauhi pantai sehingga terjadi kekosongan di permukaan. Hal ini mengakibatkan naiknya massa air kedalaman yang dingin dan kaya nutrisi ke permukaan.

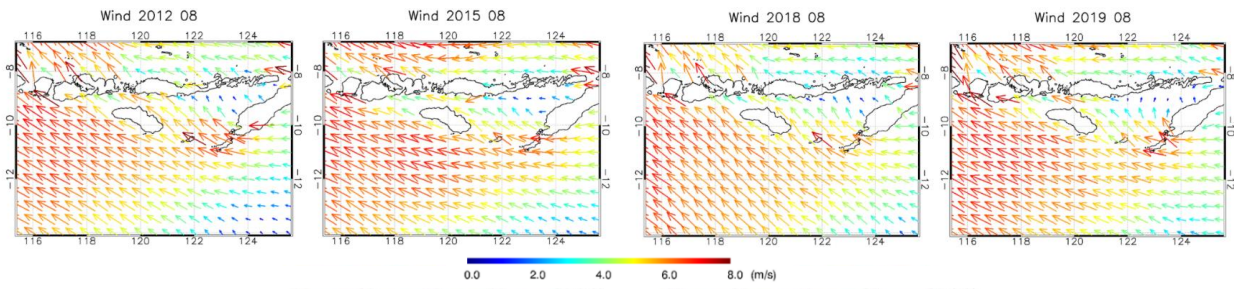


**Gambar 9** Peta Suhu Permukaan Laut Bulan Agustus Selama Tahun pIOD

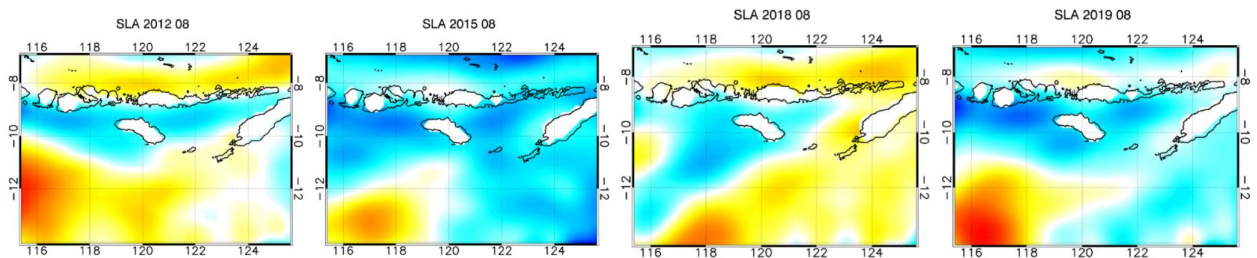




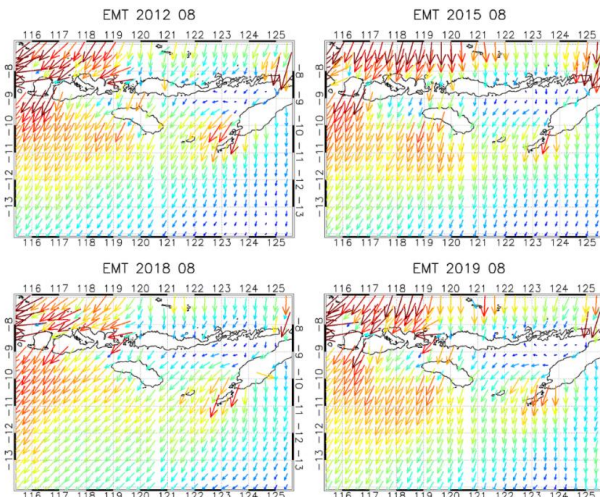
**Gambar 10** Peta Konsentrasi Klorofil-a Bulan Agustus Selama Tahun pIOD



**Gambar 11** Peta Arah dan Kecepatan Angin Bulan Agustus Selama Tahun pIOD

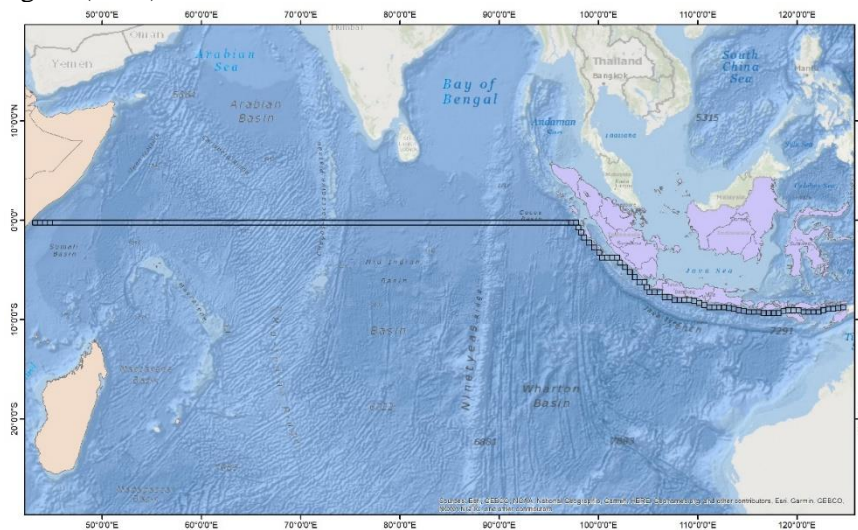


**Gambar 12** Peta Sea Level Anomaly Bulan Agustus Selama Tahun pIOD



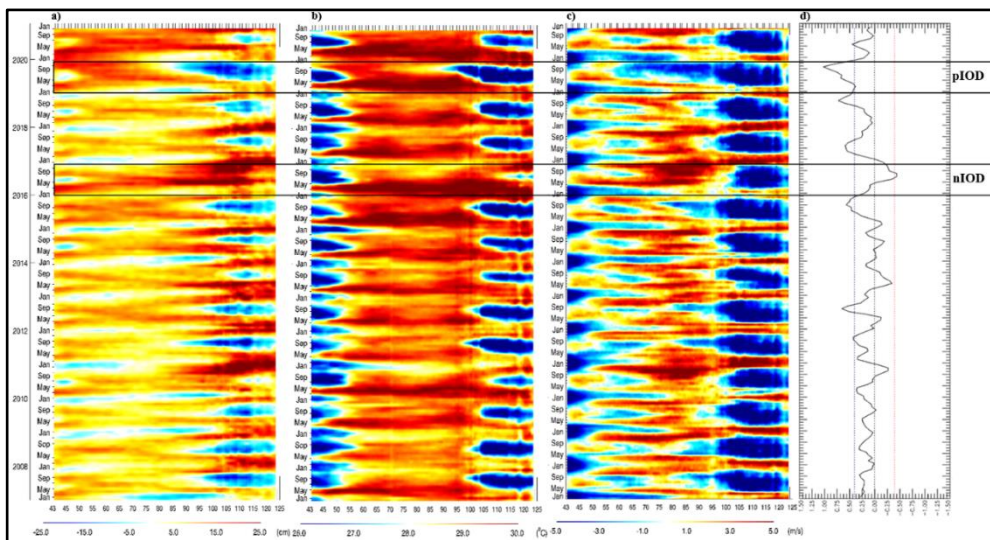
**Gambar 13** Arah dan Intensitas Ekman Mass Transport Bulan Agustus Selama Tahun pIOD

Diagram hovmoller kemudian dibuat untuk melihat faktor yang berperan dalam mekanisme *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara. Diagram hovmoller menggunakan 167 kotak sampel dengan ukuran seragam yaitu  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  tiap kotak sampelnya. Kotak sampel membentang dari Afrika Timur melewati ekuator samudra India, pesisir Selatan Jawa hingga Perairan Nusa Tenggara seperti pada **Gambar 14**. Diagram hovmoller pada **Gambar 15** dibuat menggunakan data bulanan selama 14 tahun dari 2007 hingga 2020 untuk mengetahui mekanisme *upwelling* melalui variabilitas SLA, perubahan suhu permukaan laut, serta arah dan kecepatan angin zonal selama fase *Indian Ocean Dipole*. Diagram hovmoller pada **Gambar 16** dibuat dengan data bulanan dari tahun 2016 hingga 2019 guna memperjelas dinamika anomali muka air laut, anomali suhu permukaan laut, anomali arah dan kecepatan angin zonal, dan EMT meridional pada saat fase IOD positif (2019) dan IOD negatif (2016).

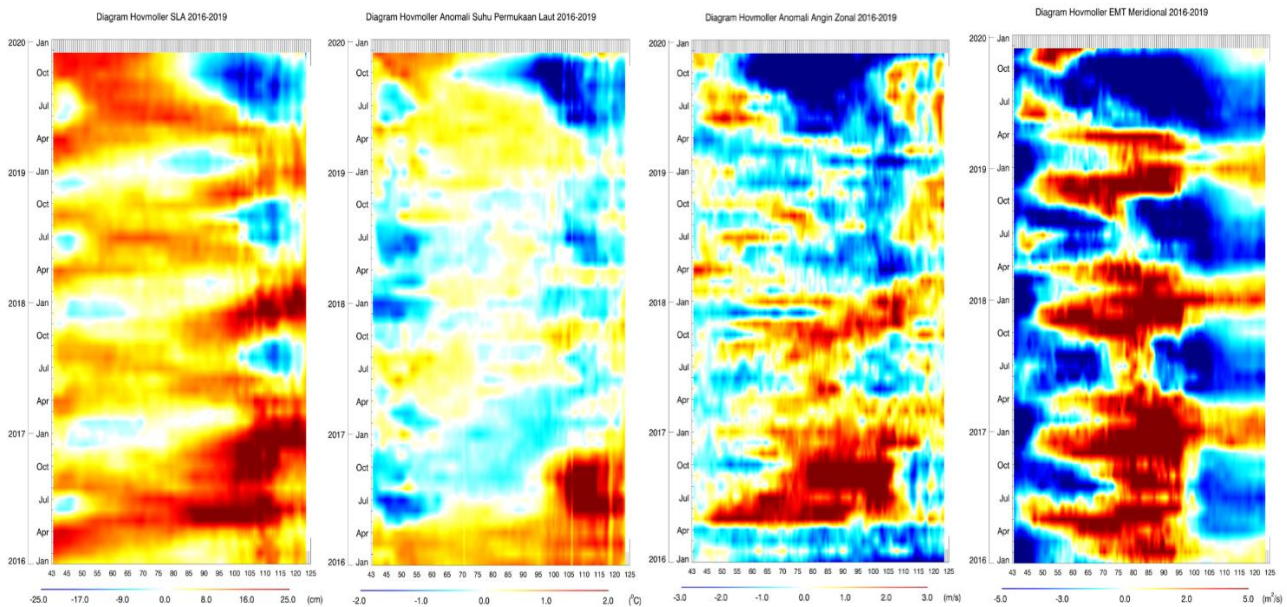


Anomali negatif muka air laut dan nilai EMT meridional yang negatif mempengaruhi proses terbentuknya *upwelling*. Anomali negatif muka air laut memiliki keterkaitan terhadap terjadinya peristiwa IOD positif kuat pada tahun 2019. Nilai DMI positif yang terjadi akibat perbedaan suhu permukaan laut pada WTIO dan SETIO mengakibatkan perbedaan tekanan udara antara kedua wilayah. Perbedaan tekanan udara tersebut akan menyebabkan pergerakan angin dari wilayah dengan tekanan yang lebih tinggi ke wilayah dengan tekanan yang lebih rendah (Kunarso *et al.*, 2011). Pada ekuator Samudera India, kecepatan angin barat (timur) akan mengakibatkan terjadinya fase gelombang kelvin *downwelling* (*upwelling*) yang bergerak dari arah barat ke timur yang berdampak pada nilai tinggi muka air laut (Du *et al.*, 2012; Pujiana dan McPhaden 2020). Diagram hovmoller SLA menunjukkan terjadinya *downwelling Kelvin Wave* yang bergerak ke arah timur

sepanjang ekuator hingga pesisir barat Sumatra dan *upwelling Rossby Wave* yang bergerak ke arah barat dari Perairan Nusa Tenggara hingga pesisir barat Sumatra pada tahun 2019. Energi perambatan gelombang kelvin mengalami berkurang karena ditekan oleh adanya perambatan gelombang Rossby. Hal tersebut berdampak pada suhu permukaan laut dimana terjadi anomali negatif pada tahun 2019 pada pesisir barat Sumatra hingga Perairan Nusa Tenggara. Terjadinya *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara ketika fase IOD positif kuat 2019 dikarakteristikan dengan anomali muka air laut dan anomali suhu permukaan laut yang lebih rendah, anomali angin zonal positif, dan arah EMT meridional yang menjauhi pantai (*offshore EMT*) ketika musim timur (Juni, Juli, dan Agustus).



**Gambar 14** Diagram Hovmoller 2007-2020 (a) Sea Level Anomaly, (b)Suhu Permukaan Laut, (c) Angin Zonal, (d) Dipole Mode Index



**Gambar 15** Diagram Hovmoller Bulanan Tahun 2016 – 2019 SLA, Anomali SPL, Anomali Angin Zonal, dan EMT Meridional

## KESIMPULAN

Terjadinya *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara ketika fase IOD positif kuat 2019 dikarakteristikan dengan anomali muka air laut (-15 cm) dan anomali suhu permukaan laut ( $-1^{\circ}\text{C}$ ) yang lebih rendah, anomali angin zonal positif (1 m/s), dan intensitas EMT meridional yang mencapai  $-5 \text{ m}^2/\text{s}$  (*offshore EMT*) ketika musim timur (Juni, Juli, dan Agustus). Puncak *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara terjadi pada bulan Agustus yang dicirikan dengan suhu permukaan laut yang di bawah  $26^{\circ}\text{C}$  dan konsentrasi klorofil-a yang berada di atas  $0.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Nilai DMI positif yang tinggi mengakibatkan anomali muka air laut menjadi lebih rendah yang kemudian menurunkan suhu permukaan laut di Perairan Nusa Tenggara. Fenomena pIOD kuat 2019 yang terjadi disebabkan oleh kecepatan angin zonal yang sangat kuat pada ekuator Samudra Hindia. Hal tersebut mendorong terjadinya *downwelling Kelvin Waves* dan *upwelling Rossby Waves*. Keduanya diduga memiliki peran dalam memperkuat *upwelling* di Perairan Nusa Tenggara terlepas dari lemahnya kecepatan angin di daerah tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Du, Yan et al. 2020. "Thermocline Warming Induced Extreme Indian Ocean Dipole in 2019." *Geophysical Research Letters* 47(18): 1–10.
- Du, Y., Liu, K., Zhuang, W., dan Yu, W-D. 2012. "The Kelvin Wave Processes in the Equatorial Indian Ocean during the 2006–2008 IOD Events." *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 5(4): 324–28.
- Iskandar, I. et al. 2022. "Extreme Positive Indian Ocean Dipole in 2019 and Its Impact on Indonesia." *Sustainability (Switzerland)* 14(22): 1–15.
- Kunarso, Hadi, S., Ningsih, N.S., dan Baskoro, M.S. 2011. "Variabilitas Suhu dan Klorofil-a di Daerah Upwelling pada Variasi Kejadian ENSO dan IOD di Perairan Selatan Jawa sampai Timor." *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences* 16(3): 171–80.
- Lu, B, dan Ren, H.L. 2020. "What Caused the Extreme Indian Ocean Dipole Event in 2019?" *Geophysical Research Letters* 47(11): 0–2.
- Perdanahardja, G., dan Lionata, H. 2017. *Nine years in Lesser Sunda*. The Nature Conservancy.
- Pujiana, K., dan McPhaden, M.J. 2020. "Intraseasonal Kelvin Waves in the Equatorial Indian Ocean and Their Propagation into the Indonesian Seas." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125(5): 1–18.
- Safinatunnajah, N. et al. 2021. "Influence of 2019 strong positive IOD on the upwelling variability along the southern coast of Java." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 919(1).
- Setiawan, R.Y. et al. 2019. "The Influence of Seasonal and Interannual Variability on Surface Chlorophyll-a off the Western Lesser Sunda Islands." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 12(11): 4191–97.
- Vinayachandran, P.N., Francis, P.A., dan Rao, S.A. 2009. "Indian Ocean Dipole: Processes and impacts." *Current Trends in Science*: 569–89. <http://moeseprints.incois.gov.in/97/>.
- Wirasatriya, A., Setiawan, R.Y., and 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 on Applied Earth Observations and Remote Sensing*: 10(12):. 5513-5518. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2745207.