

Analisis Spasial dan Temporal Marine Heatwave di Selat Sunda (1982-2021)

Nimas Ratri Kirana Anggraeni^{1,2,3}, Rizal Attaqwa^{1,2,3}, Felix Gok Asi Simangunsong^{1,2},
Stephanie Michelle Gunady^{1,2}, Lilik Maslukah¹, Anindya Wirasatriya^{1*}

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

²UKM-F REGISTER, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Gondang Timur IV No. 50 Rt 004/ Rw 01, Kelurahan Bulusan, Kecamatan Tembalang, 50277 Indonesia

³ALGOMARINE, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275 Indonesia
Email: anindyawirasatriya@lecturer.undip.ac.id

Abstrak

Marine Heatwaves (MHW) adalah kondisi meningkatnya suhu permukaan laut (SPL) secara ekstrem pada suatu periode tertentu. Fenomena MHW memberikan dampak signifikan terhadap ekosistem laut, seperti pemutihan terumbu karang, perubahan distribusi massa air, dan penurunan keanekaragaman hayati. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik fenomena MHW, termasuk frekuensi, durasi, dan intensitas kumulatifnya, serta menganalisis peran dinamika atmosfer seperti El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), dan Outgoing Longwave Radiation (OLR) dalam memengaruhi kemunculan MHW di Selat Sunda. Data yang digunakan berupa SPL harian dari OSTIA Marine Copernicus selama periode 1982–2021. Berdasarkan hasil analisis data selama 1982-2021 menunjukkan bahwa fenomena MHW paling parah terjadi pada tahun 1998, dengan intensitas maksimum mencapai 1,6187°C dan berlangsung selama 86 hari. Peningkatan signifikan DMI dan ONI menunjukkan pengaruh kuat dari IOD positif dan El Niño, yang menyebabkan perbedaan suhu bagian barat dan timur Samudra Hindia. Anomali OLR positif yang tinggi mencerminkan kondisi minim konveksi, sehingga mengurangi tutupan awan dan curah hujan. Kombinasi anomali ini memperparah pemanasan laut dan memperkuat intensitas serta durasi MHW, khususnya pada tahun 1998. Tren tahunan menunjukkan MHW di Selat Sunda semakin sering, lama, dan intens, menekankan pentingnya upaya mitigasi dan adaptasi terhadap dampak perubahan iklim, khususnya di wilayah pesisir yang rentan.

Kata kunci : *Marine Heatwaves, Outgoing Longwave Radiation, ENSO IOD*

Abstract

Spatial and Temporal Analysis of Marine Heatwave in Sunda Strait (1982-2021)

Marine Heatwaves (MHW) are periods of extreme sea surface temperature (SST) anomalies that significantly impact marine ecosystems, causing coral bleaching, shifts in water mass distribution, and biodiversity loss. This study investigates the characteristics of MHWs frequency, duration, and cumulative intensity in the Sunda Strait from 1982 to 2021, and examines the role of atmospheric dynamics such as El Niño–Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), and Outgoing Longwave Radiation (OLR) in influencing their occurrence. SST data were obtained from OSTIA Marine Copernicus. The most severe MHW occurred in 1998, with an intensity of 1.6187°C and a duration of 86 days. A notable increase in Dipole Mode Index (DMI) and Oceanic Niño Index (ONI) indicates the strong influence of positive IOD and El Niño events, which alter heat distribution in the Indian Ocean. Meanwhile, a high positive OLR anomaly reflects reduced convection, cloud cover, and rainfall, further amplifying ocean warming. This combination intensified the MHW's severity. Long-term analysis shows that MHWs in the Sunda Strait are becoming more frequent, longer, and more intense, highlighting the urgent need for mitigation and adaptation strategies in vulnerable coastal regions to anticipate the growing impact of climate change.

Keywords : *Marine Heatwaves, Outgoing Longwave Radiation, ENSO IOD*

PENDAHULUAN

Marine Heatwaves (MHW) atau gelombang panas laut adalah fenomena anomali suhu ekstrem yang terjadi di perairan laut, di mana suhu air meningkat melebihi ambang batas klimatologis persentil ke-90 dari suhu rata-rata musiman selama minimal lima hari berturut-turut (Hobday *et al.*, 2016). Fenomena ini dapat disebabkan oleh kombinasi faktor lokal, seperti intensitas radiasi matahari yang tinggi dan rendahnya tingkat penguapan, serta faktor global, termasuk perubahan iklim dan pola iklim skala besar seperti *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) (Beliyana *et al.*, 2022). Di Indonesia, Selat Sunda menjadi salah satu wilayah yang rentan terhadap MHW karena perannya sebagai jalur strategis penghubung antara Samudera Hindia dan Laut Jawa, sekaligus bagian penting dalam sirkulasi massa air nasional. Menurut Fahlevi *et al.* (2022), suhu permukaan laut (SPL) di kawasan ini cenderung tinggi, berkisar antara 29–30,2°C, yang berpotensi mempengaruhi distribusi massa air serta biodiversitas laut. MHW tidak hanya berdampak pada dinamika laut dan atmosfer, tetapi juga pada ekosistem laut, seperti penurunan kualitas habitat, kerusakan ekosistem, pemutihan karang, hingga gangguan terhadap kehidupan masyarakat pesisir yang bergantung pada sumber daya laut. Penelitian mengenai karakteristik dan pola kejadian MHW di wilayah ini menjadi penting untuk memahami dampaknya dan mendukung upaya mitigasi perubahan iklim.

Selat Sunda merupakan salah satu perairan yang penting dalam sirkulasi massa air di Indonesia. Dinamika oseanografinya dipengaruhi massa air Laut Jawa dan Samudera Hindia (Amri *et al.*, 2014). Karakteristik perairan di Selat Sunda sangat dipengaruhi oleh dinamika oseanografi yang kompleks, termasuk pengaruh angin muson dan pertemuan dua jenis massa air. Dinamika arus di Selat Sunda juga sangat penting, dengan arus yang bergerak dari Laut Jawa menuju Samudera Hindia sepanjang tahun. Arus ini dipengaruhi oleh gradien tekanan dan topografi dasar laut, yang menyebabkan percampuran massa air yang dapat meningkatkan nutrisi di perairan. Selat Sunda terletak di antara Laut Jawa dan Samudera Hindia, dan karakteristik fisik serta sirkulasi massa airnya dipengaruhi oleh sistem angin muson yang berbeda sepanjang tahun. Menurut Hendra *et al.* (2022), variasi suhu dan salinitas yang dihasilkan oleh perubahan arah angin dapat memicu percampuran massa air yang lebih dalam, yang berdampak pada

distribusi nutrisi dan kehidupan laut. Secara keseluruhan, karakteristik perairan di Selat Sunda mencerminkan interaksi kompleks antara arus laut, suhu, dan pengaruh lingkungan yang lebih luas, menjadikannya sebagai area penting untuk studi oseanografi dan ekosistem laut.

Dalam beberapa dekade terakhir, frekuensi dan intensitas MHW di perairan Indonesia mengalami peningkatan. Gunawan *et al.* (2022) melaporkan bahwa di pesisir barat Sulawesi Selatan, kejadian MHW terjadi sekitar 2–3 kali dalam setahun. Meskipun jumlah kejadian cenderung menurun, durasi fenomena ini justru semakin panjang. Menurut Maulida *et al.* (2022) mengungkapkan bahwa wilayah tropis Indonesia, seperti Teluk Jakarta dan Selat Makassar, sering mengalami MHW dengan durasi dan intensitas yang semakin meningkat dalam beberapa dekade terakhir. Selaras dengan temuan tersebut, faktor global seperti ENSO, terutama selama *El Niño* yang kuat pada tahun 1998 serta anomali positif dari IOD, turut memperparah intensitas dan lamanya MHW. Dampak dari kejadian ini meliputi pengasaman laut, penurunan kadar oksigen terlarut, serta hilangnya habitat bagi berbagai organisme laut. Beberapa faktor yang berkontribusi terhadap fenomena ini mencakup variabilitas iklim seperti *El Niño* dan *La Niña*, perubahan pola angin, serta dinamika atmosfer. Peningkatan suhu laut akibat MHW berdampak besar terhadap ekosistem laut, seperti pemutihan karang (*coral bleaching*), kematian massal biota laut, serta gangguan pada rantai makanan dan sektor perikanan, yang pada akhirnya berimbas pada kesejahteraan masyarakat pesisir.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kejadian MHW di Selat Sunda dengan menggunakan data SPL dan analisis statistik untuk menentukan frekuensi, durasi, dan intensitas kumulatif dari fenomena tersebut. Dengan memahami pola dan karakteristik MHW, diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna bagi pengelolaan sumber daya laut dan mitigasi dampak perubahan iklim di wilayah tersebut. Melalui penelitian ini, diharapkan akan terungkap hubungan antara kondisi atmosfer dan lautan yang mempengaruhi terjadinya MHW di Selat Sunda.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini berlokasi di Perairan Selat Sunda yang berada diantara Pulau Jawa dan Pulau Sumatra. Lokasi penelitian berada pada batas

koordinat $-04^{\circ} 00' 00''$ LS sampai $-08^{\circ} 00' 00''$ LS dan $103^{\circ} 00' 00''$ BT sampai $107^{\circ} 00' 00''$ BT (Gambar 1).

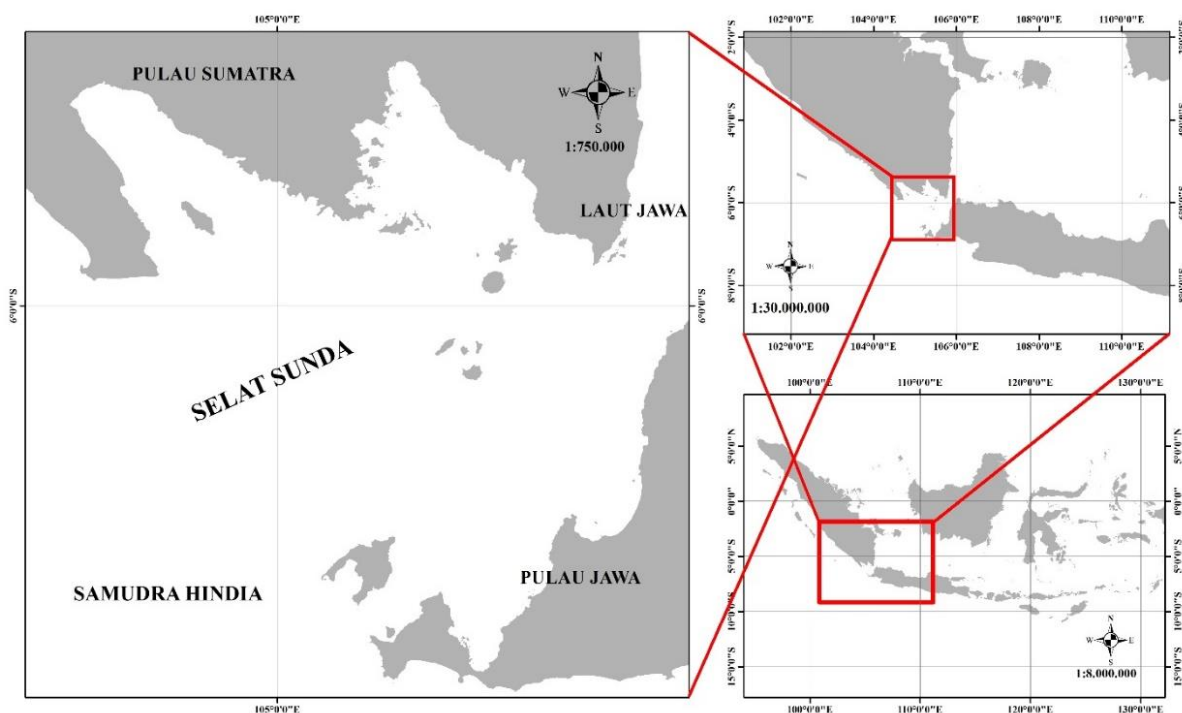
Deteksi Kejadian MHW dalam 40 Tahun (1982-2021)

Penelitian ini menggunakan data SPL selama 40 tahun, dari tahun 1982 hingga 2021, yang diperoleh dari OSTIA *Marine Copernicus*. Data yang digunakan adalah produk SST OSTIA L4 *Marine Copernicus Global Ocean Physics Reanalysis* dengan resolusi spasial $0,05^{\circ} \times 0,05^{\circ}$ (https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/description).

Data SPL ini digunakan untuk menghitung SPL harian rata-rata, klimatologi musiman, dan ambang batas kejadian MHW di wilayah Selat Sunda selama periode 1982 hingga 2021 yang disesuaikan dengan hierarki Hobday *et al.* (2016). Penelitian ini juga mendeteksi kejadian MHW untuk mengidentifikasi kejadian dengan frekuensi tertinggi dan durasi terpanjang. Analisis lebih lanjut dilakukan untuk mengungkap pola spasial MHW, termasuk frekuensi, durasi rata-rata, dan jumlah tahunan kejadian. Pendekatan yang digunakan mengikuti hierarki Hobday *et al.* (2016). Tabel 1 berikut menjelaskan metrik yang digunakan untuk menganalisis MHW.

Tabel 1. Metrik MHW (Hobday *et al.*, 2016)

Metrik MHW	Keterangan	Satuan
Frekuensi kejadian tahunan	Jumlah kejadian MHW dalam satu tahun	Kejadian/tahun
Durasi tahunan	Waktu awal mulai hingga selesai MHW per jumlah kejadian dalam satu tahun	Hari
Intensitas kumulatif tahunan	Total penjumlahan dari intensitas sepanjang durasi kejadian MHW dalam satu tahun	$^{\circ}\text{C}$



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Perhitungan rata-rata klimatologis SPL merujuk pada metode yang dikembangkan oleh Azuga dan Radjawane (2022), yang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$T_m(j) = \sum_{y=y_s}^{y_e} \sum_{d=j-5}^{j+5} \frac{T(y,d)}{11(y_e-y_s)}$$

Keterangan: T_m = rata-rata klimatologis ($^{\circ}\text{C}$); j = hari dalam setahun; y_s = tahun mulai; y_e = tahun akhir; T = SPL ($^{\circ}\text{C}$)

Identifikasi kejadian MHW dilakukan dengan menganalisis nilai SPL yang melampaui persentil ke-90, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$T_{90}(j) = P_{90}(X)$$

Dengan P_{90} adalah persentil ke-90 dan $P_{90}(X)$, (X) dijelaskan sebagai:

$$X = \{T_{(y,d)} | y_s \leq y \leq y_e, j-5 \leq d \leq j+5\}$$

Analisis Pola *El Nino* dan *La Nina* dalam 40 Tahun (1982-2021)

Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola kejadian *El Niño* dan *La Niña* selama 40 tahun (1982–2021) menggunakan Oceanic Niño Index (ONI) 3.4 versi 5 sebagai indikator utama. Data ONI diperoleh dari situs resmi NOAA Climate Prediction Center (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php), yang disusun dalam format bulanan dan menyatakan anomali suhu permukaan laut (SPL) di wilayah Niño 3.4 (5°LU – 5°LS , 120° – 170°BT). ONI dihitung sebagai rata-rata bergerak tiga bulan dari anomali SPL berbasis dataset ERSST.v5 terhadap periode klimatologis 1971–2000. Klasifikasi kondisi ENSO mengikuti standar NOAA, dengan visualisasi area positif dan negatif pada grafik untuk *El Niño* dan *La Niña*. Tabel 2 menjelaskan klasifikasi kondisi ENSO menggunakan standar NOAA berdasarkan nilai ONI.

Tabel 2. Klasifikasi ENSO berdasarkan nilai ONI (L'Heureux *et al.*, 2024).

Nilai ONI	Keterangan
ONI > 0,5	El Niño
$-0,5 \leq \text{ONI} \leq 0,5$	Netral
ONI < -0,5	La Niña

Analisis Pola *El Nino* dan *La Nina* dalam 40 Tahun (1982-2021)

Metode penelitian ini menggunakan data *Dipole Mode Index* (DMI) sebagai indikator variabilitas *Indian Ocean Dipole* (IOD) untuk menganalisis hubungan antara fenomena IOD dan kejadian Marine Heatwave (MHW) di Selat Sunda pada periode 1982–2021. Data DMI diunduh dari NOAA *Physical Sciences Laboratory* (https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/dmieast.had.long.data), yang dihitung berdasarkan perbedaan anomali suhu permukaan laut antara wilayah barat (50°E – 70°E , 10°S – 10°N) dan timur Samudra Hindia (90°E – 110°E , 10°S – 0°N). Saji dan Yamagata (2003) menyebutkan bahwa fase IOD positif dan negatif ditentukan berdasarkan nilai DMI yang signifikan secara statistik, yang biasanya diambil di kisaran sekitar $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ sampai $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Tabel 3 menjelaskan klasifikasi kondisi IOD menggunakan ambang batas $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ untuk DMI diadopsi dari standar operasional Australian Bureau of Meteorology (BOM) berdasarkan nilai DMI.

Analisis *Outgoing Longwave Radiation* (OLR)

OLR adalah radiasi termal yang dipancarkan dari permukaan bumi dan atmosfer ke luar angkasa pada puncak atmosfer (TOA - *Top of Atmosphere*) (Dewitte dan Clerbaux, 2018). Indeks OLR digunakan untuk menganalisis dan mengidentifikasi variasi atmosfer berdasarkan jumlah energi yang dipancarkan ke luar angkasa oleh permukaan bumi, lautan, dan atmosfer. Data OLR diperoleh dari instrumen HIRS (*High-resolution Infrared Radiation Sounder*) pada satelit NOAA, yang menyediakan data secara global dengan resolusi spasial $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ (sumber: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.olrcdr.interp.html>). Data ini kemudian dipotong pada wilayah penelitian (Selat Sunda) untuk analisis selama tahun 1998, dengan tujuan mengkaji hubungan antara anomali OLR dan kejadian gelombang panas laut (MHW) terburuk yang terjadi pada tahun tersebut. Anomali OLR menjadi indikator kondisi iklim tertentu, seperti pengurangan tutupan

Tabel 3. Klasifikasi IOD menggunakan nilai DMI (Ramadhanty *et al.*, 2021)

Nilai ONI	Keterangan
DMI > 0,4	IOD Positif
$-0,4 \leq \text{DMI} \leq 0,4$	Netral
DMI < -0,4	IOD Negatif

awan, yang menciptakan kondisi atmosfer mendukung terjadinya MHW. Analisis ini membantu memahami pengaruh dinamika atmosfer terhadap fenomena ekstrem di laut (Benthuisen *et al.*, 2021).

Anomali OLR dihitung menggunakan rumus berikut:

$$OLR_{anom}(t) = OLR_{mean}(t) - \underline{OLR_{mean}}$$

Keterangan: $OLR_{anom}(t)$ = Anomali OLR pada waktu t ; $OLR_{mean}(t)$ = Rata-rata spasial OLR pada waktu t ; $\underline{OLR_{mean}}$ = Rata-rata temporal dari $OLR_{mean}(t)$ selama periode penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola SPL di Selat Sunda Selama 40 tahun (1982-2021)

MHW terjadi pada lokasi dan waktu tertentu dengan ambang batas yang berbeda-beda tergantung pada lokasinya (Lien *et al.*, 2024). Berbagai metrik digunakan untuk mendeskripsikan kejadian MHW secara lebih rinci, termasuk frekuensi kejadian tahunan, durasi tahunan, dan intensitas kumulatif tahunan. Peristiwa MHW diukur berdasarkan durasinya, yaitu rentang waktu sejak awal hingga akhir kejadian yang dihitung dalam satuan hari. Gambar 2 menunjukkan SPL harian, klimatologi, dan ambang batas MHW di Selat Sunda dari tahun 1982 hingga 2021.

Garis kuning merepresentasikan SPL harian yang berfluktuasi mengikuti pola musiman, dengan suhu tertinggi ditunjukkan terjadi pada bulan-bulan musim timur menuju musim peralihan 2 (Juni hingga September). Garis biru menunjukkan rata-rata klimatologi SPL musiman selama periode 1982–2021, yang menggambarkan suhu rata-rata sepanjang tahun. Sementara itu, garis hitam mewakili ambang batas MHW, dihitung sebagai persentil ke-90 dari data SPL harian historis. MHW dapat diidentifikasi ketika SPL harian (garis kuning) melampaui ambang batas. MHW dapat diidentifikasi ketika nilai SPL melebihi ambang batas (*threshold*) selama lebih dari 5 hari. Hal ini diperkuat oleh Meehl dan Tebaldi (2004) yang mengatakan bahwa MHW didefinisikan sebagai periode setidaknya tiga hingga lima hari di mana anomali suhu rata-rata atau maksimum setidaknya 3 - 5 °C di atas normal. Pada grafik menunjukkan lonjakan SPL yang signifikan yaitu pada tahun 1992, 1993, 1998, 2002, 2005, 2009, 2010, 2011, 2014, 2016, 2019, 2020 dan 2021. Gambar 2

terlihat terdapat tanda merah yang menunjukkan pada tahun tersebut terjadi MHW *strong*. Menurut Hobday *et al.* (2018), MHW dibagi ke dalam empat kategori berdasarkan seberapa besar SPL melebihi ambang batas dan klimatologi. *Moderate* (ringan) dianggap jika SPL sedikit melebihi ambang batas, *strong* (kuat) dianggap jika SPL melebihi dua kali ambang batas dan klimatologi, *severe* (berat) dianggap jika SPL melebihi tiga kali ambang batas dan klimatologi, dan *extreme* dianggap jika SPL melebihi empat kali ambang.

Berdasarkan analisis data nilai MHW di Selat Sunda sepanjang periode 1983 hingga 2021 pada Tabel 4, tahun 1998 tercatat sebagai tahun dengan kejadian MHW paling parah. Pada tahun tersebut, Selat Sunda mencatat intensitas maksimum panas laut sebesar 1,6187, dengan rata-rata intensitas 0,7188. Durasi MHW terpanjang berlangsung selama 86 hari, dari 23 Februari 1998 hingga 13 Oktober 1998. Tingkat intensitas pada tahun ini diklasifikasikan dalam kategori Strong, menunjukkan adanya tekanan panas laut yang sangat tinggi dan bertahan dalam jangka waktu yang lama. Menurut Gattuso dan Hansson (2011), kenaikan suhu laut yang ekstrim mengakibatkan pergeseran distribusi spesies laut dan pengasaman laut akibat penyerapan CO₂. Peningkatan suhu air laut juga mengancam organisme laut karena meningkatkan stress thermal.

Pola Temporal MHW Terburuk pada Tahun 1998

MHW mulai terjadi pada 23 Februari 1998, ditandai dengan SPL yang melampaui batas ambang musiman. Setelah itu, suhu laut terus berfluktuasi di atas ambang batas dalam waktu yang cukup lama. Kejadian MHW ini berlangsung selama 86 hari dan berakhir pada 13 Oktober 1998. Selama periode tersebut, suhu laut tetap tinggi, dan intensitasnya semakin meningkat seiring waktu. Fase MHW terburuk (*worst* MHW) terjadi mulai 29 Juni hingga 22 September 1998, di mana suhu laut mencapai nilai puncaknya, bahkan melebihi 30,5°C. Area merah pada grafik menunjukkan periode ini sebagai saat tekanan panas laut paling tinggi dan berlangsung secara konsisten. Setelah pertengahan September, suhu mulai menurun, dan pada pertengahan Oktober kembali mendekati nilai normal, menandai berakhirnya MHW tahun 1998.

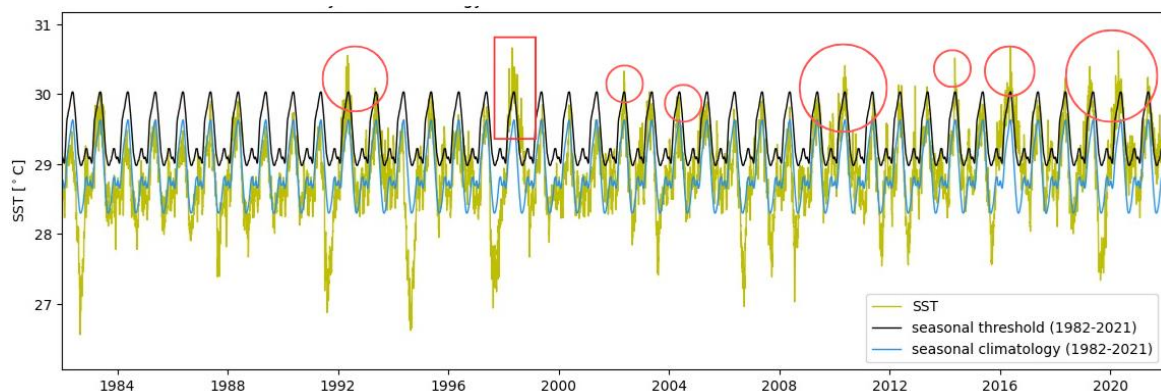
Jika dibandingkan dengan kejadian MHW lainnya dari tahun 1982 hingga 2021, data statistik pada Tabel 2 memperkuat bahwa tahun 1998 memang menjadi momen paling ekstrem. Kejadian

ini tidak hanya mencatat intensitas maksimum tertinggi yaitu 1,6187 °C, tetapi juga kenaikan suhu tersebut berlangsung secara terus-menerus dan stabil selama 86 hari, mencerminkan tekanan panas laut yang kuat dan persisten di wilayah Selat Sunda. Meskipun dikategorikan sebagai MHW dengan tingkat *strong*, kombinasi antara durasi yang signifikan dan intensitas suhu yang tinggi menjadikan peristiwa ini sebagai yang paling menonjol dibandingkan tahun-tahun lainnya. Sebagai contoh, MHW tahun 2012 dan 2015 diklasifikasikan dalam kategori *Severe*, durasi kejadian MHW pada periode tersebut relatif singkat hanya berlangsung selama 8 hari pada 2012 dan 41 hari pada 2015. Selain itu, intensitas rata-ratanya pun tidak setinggi yang tercatat pada tahun 1998, sehingga dampaknya tidak sebesar peristiwa MHW yang terjadi pada tahun tersebut. Oleh karena itu, berdasarkan data observasi jangka panjang, klasifikasi intensitas oleh Hobday *et al.* (2018), serta dukungan dari temuan Rahman *et al.* (2019) yang mencatat peningkatan suhu 1°C

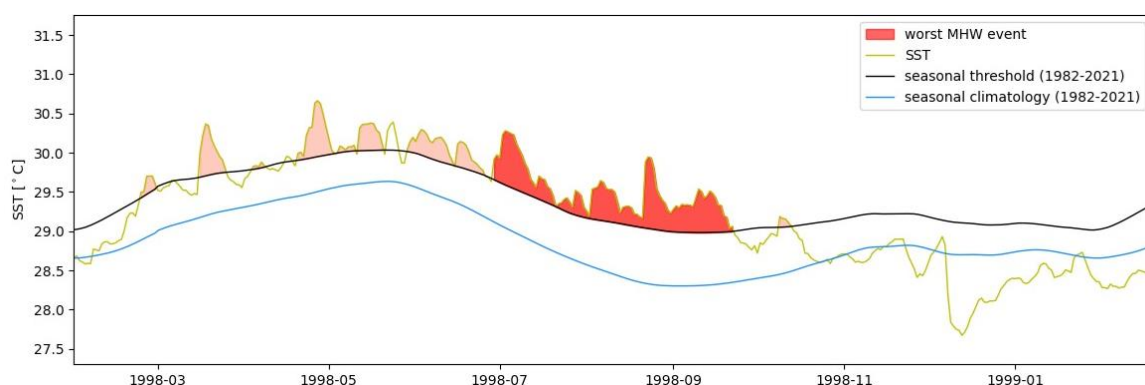
hingga 3°C selama periode tersebut, peristiwa MHW tahun 1998 secara konsisten diidentifikasi sebagai kejadian paling parah yang pernah tercatat di Selat Sunda dalam empat dekade terakhir.

Rata-rata Durasi, Intensitas dan Jumlah Kejadian MHW Secara Annual Selama 40 Tahun

Peta distribusi spasial pada Gambar 4a menunjukkan rata-rata jumlah hari MHW per tahun di Selat Sunda selama periode 1982–2021. Wilayah pesisir utara dan timur Sumatera, serta pesisir barat Jawa, menjadi hotspot MHW dengan durasi rata-rata sekitar 31–32 hari per tahun, ditunjukkan dengan warna merah hingga oranye. Hal ini menandakan akumulasi panas yang intens di wilayah pesisir yang cenderung dangkal. Sebaliknya, perairan tengah Selat Sunda dan beberapa wilayah barat serta selatan ditunjukkan dengan warna hijau hingga biru mengalami durasi MHW yang lebih rendah, di bawah 29 hari per tahun. Tingginya durasi pada wilayah pesisir



Gambar 2. Rata-rata SPL Harian, Klimatologi dan MHW *Threshold* di Selat Sunda dari 1982 sampai 2021



Gambar 3. Kejadian Terburuk MHW pada 29 Juni 1998 - 22 September 1998

Tabel 4. Nilai MHW dari tahun 1983-2021

<i>Year</i>	<i>Max Intensity</i>	<i>Avg Intensity</i>	<i>Max Duration</i>	<i>First Start Date</i>	<i>Last End Date</i>	<i>Max Category</i>
1983	0,8708	0,6607	11	14/03/1983	15/07/1983	<i>Moderate</i>
1992	0,9613	0,7023	14	15/02/1992	28/06/1992	<i>Strong</i>
1993	0,9713	0,7045	12	03/01/1993	29/10/1993	<i>Strong</i>
1994	0,6561	0,5010	13	03/01/1994	31/12/1994	<i>Moderate</i>
1995	0,7915	0,6712	15	10/10/1995	22/11/1995	<i>Moderate</i>
1996	1,1214	0,9806	8	21/09/1996	28/09/1996	<i>Moderate</i>
1998	1,6187	0,7188	86	23/02/1998	13/10/1998	<i>Strong</i>
2001	0,8437	0,7771	7	12/09/2001	18/09/2001	<i>Moderate</i>
2002	0,8228	0,5163	16	05/01/2002	29/12/2002	<i>Strong</i>
2003	0,5996	0,5289	11	01/04/2003	21/04/2003	<i>Moderate</i>
2004	0,6004	0,5074	16	06/01/2004	21/01/2004	<i>Moderate</i>
2005	1,2383	0,7286	22	19/01/2005	10/10/2005	<i>Strong</i>
2007	0,7102	0,6013	19	30/01/2007	17/02/2007	<i>Moderate</i>
2009	1,0264	0,6587	38	20/06/2009	28/12/2009	<i>Strong</i>
2010	1,1675	0,7883	27	20/02/2010	17/10/2010	<i>Strong</i>
2011	0,8414	0,5659	21	20/11/2011	10/12/2011	<i>Strong</i>
2012	1,4029	0,7395	8	08/06/2012	12/12/2012	<i>Severe</i>
2014	0,8967	0,6135	21	15/05/2014	25/11/2014	<i>Strong</i>
2015	1,1691	0,6655	41	24/11/2015	06/02/2016	<i>Severe</i>
2016	1,4960	0,6831	87	17/02/2016	22/11/2016	<i>Strong</i>
2017	1,2377	0,6372	14	28/09/2017	22/11/2017	<i>Moderate</i>
2018	0,6020	0,4945	6	15/05/2018	09/12/2018	<i>Moderate</i>
2019	1,0525	0,6690	27	10/01/2019	08/12/2019	<i>Strong</i>
2020	1,1718	0,7038	31	16/01/2020	22/11/2020	<i>Strong</i>
2021	1,1699	0,6388	37	10/05/2021	28/12/2021	<i>Strong</i>

menunjukkan adanya akumulasi panas yang intens dan berkelanjutan di wilayah pesisir yang cenderung dangkal dan dekat daratan sedangkan daerah tengah selat dan lepas pantai cenderung memiliki dinamika laut yang lebih aktif seperti arus dan pencampuran vertikal yang membantu menurunkan suhu dan memperpendek durasi kejadian MHW. Menurut Ismail (2021), MHW yang terdeteksi di dekat pantai dan lepas pantai menunjukkan tren peningkatan durasi, frekuensi, dan jumlah hari. Sebaliknya, nilai intensitas maksimum dan intensitas kumulatif di wilayah lepas pantai menunjukkan sedikit penurunan. Hal ini ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan dalam proses pemanasan permukaan di Selat Sunda dan proses fisik lautan di daerah lepas pantai.

Peta intensitas rata-rata pada Gambar 4b menggambarkan seberapa besar kenaikan suhu laut di atas ambang batas selama kejadian MHW di Selat Sunda. Intensitas MHW di wilayah ini berkisar antara 0,5 hingga 1,0°C, ditunjukkan dengan warna hijau hingga kuning yang artinya suhu laut rata-rata naik setengah hingga satu derajat Celsius di atas ambang batas musiman. Menariknya, bagian barat daya peta yang berbatasan dengan Samudra Hindia menunjukkan intensitas lebih tinggi, mencapai >1,0°C hingga hampir 2,0°C (warna kuning hingga oranye), sedangkan wilayah timur laut menuju Laut Jawa memiliki intensitas rendah, kurang dari 0,5°C (warna biru). Perbedaan ini mencerminkan peran Selat Sunda sebagai penghubung antara perairan laut terbuka yang lebih panas dan perairan pesisir yang lebih stabil. Menurut Fahlevi *et al.* (2022),

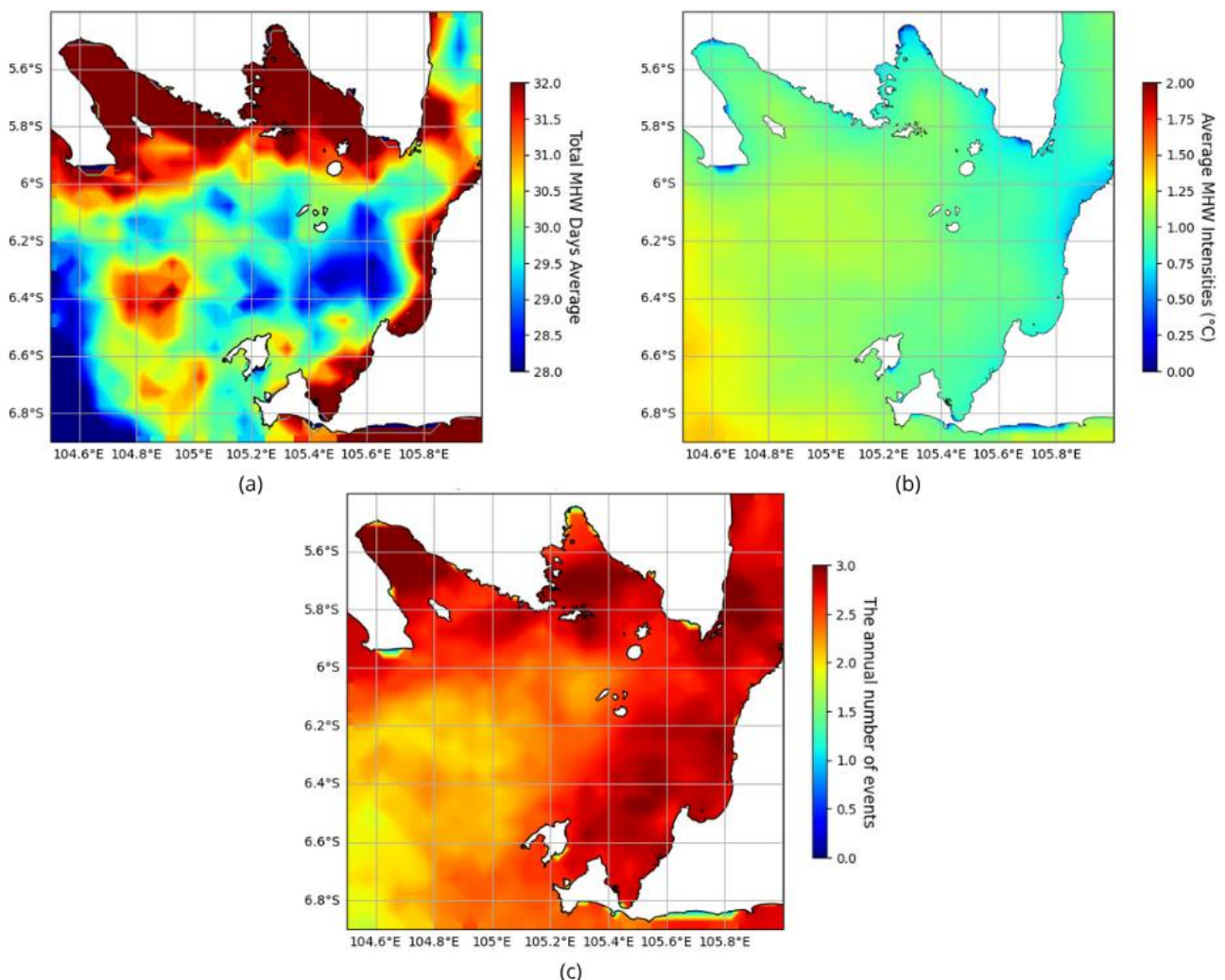
SPL musiman rata-rata di Selat Sunda lebih tinggi dibandingkan perairan lepas pantai karena intensitas cahaya dan batimetri, di mana perairan dangkal menerima cahaya lebih optimal.

Terakhir, frekuensi rata-rata tahunan MHW pada Gambar 4c menunjukkan seberapa sering pemanasan ekstrem pada laut terjadi di suatu wilayah dalam satu tahun, yang merupakan indikator dampak perubahan iklim terhadap SPL. Intensitas MHW dihitung dari selisih antara suhu teramati dan rata-rata klimatologi. Di kawasan Selat Sunda, khususnya di perairan pesisir utara Jawa dan timur Sumatera, dominasi warna merah menunjukkan frekuensi kejadian MHW yang tinggi, sekitar 2,5 hingga >3 kali dalam setahun. Sementara itu, area di sebelah barat daya menuju Samudra Hindia menampilkan warna oranye hingga kuning,

mencerminkan frekuensi yang sedikit lebih rendah, sekitar 1,5 hingga 2 kejadian per tahun.

Indeks ONI dan DMI dari Tahun 1982 hingga 2020

Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan yang konsisten dalam intensitas, frekuensi, dan durasi MHW selama beberapa dekade terakhir. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Azuga dan Radjawane (2022), yang menyatakan bahwa tren kejadian MHW pada lapisan permukaan secara signifikan mengalami peningkatan pada frekuensi kejadian tahunan, durasi tahunan, dan intensitas kumulatif kejadian MHW khususnya pada tahun 1998 dengan pengaruh paling besar diakibatkan oleh adanya fenomena ENSO saat fase *El Niño*. Variasi suhu di lautan sangat dipengaruhi oleh kondisi atmosfer



Gambar 4. (a) Rata-rata Durasi MHW Selama 40 Tahun (b) Intensitas MHW Selama 40 Tahun (c) Jumlah Kejadian MHW Secara Annual Selama 40 Tahun

(Adnan *et al.*, 2022), di mana SPL meningkat seiring dengan tingginya intensitas cahaya. Semakin besar intensitas cahaya yang masuk, semakin tinggi pula SPL yang tercatat (Laosuwan *et al.*, 2022). Gambar 5 merupakan grafik indeks ONI dari tahun 1992 hingga 2021 menggambarkan perubahan anomali SPL sepanjang tahun 1992 hingga 2021. Grafik indeks ONI yang menunjukkan anomali SPL dari tahun 1992 hingga 2021 memberikan gambaran tentang fluktuasi suhu laut yang menjadi indikator utama untuk mengidentifikasi kejadian *El Niño* (merah) yaitu ketika terjadi anomali suhu positif dengan nilai $> 0,5$ dan *La Niña* (biru) dengan anomali suhu negatif dan nilai $< -0,5$. Dalam periode ini, terlihat beberapa peristiwa *El Niño* yang sangat kuat, seperti pada tahun 1997 hingga 1998 dan tahun 2015 hingga 2016, dengan kenaikan suhu laut yang signifikan hingga lebih dari $+2^{\circ}\text{C}$ dibanding rata-rata klimatologis. Puncak nilai ONI pada tahun 1998 mencapai $+2,5^{\circ}\text{C}$ menunjukkan *El Niño* kuat.

Dalam Gambar 5 tahun 1998 tercatat kenaikan ONI yang sangat signifikan, di mana SPL mengalami anomali hingga sekitar $+2,5^{\circ}\text{C}$ pada akhir tahun 1997 dan tetap tinggi hingga awal 1998. Nilai ONI yang melebihi $+2,0^{\circ}\text{C}$ selama beberapa kuartal berturut-turut mengindikasikan bahwa *El Niño* saat itu berlangsung lama dan memiliki intensitas yang sangat kuat. Ketika nilai ONI melebihi $+0,5^{\circ}\text{C}$ selama lima musim berturut-turut, kondisi tersebut dikategorikan sebagai *El Niño*, sedangkan nilai di bawah $-0,5^{\circ}\text{C}$ menunjukkan *La Niña* seperti yang tercantum pada Tabel 2. diatas untuk mengklasifikasikan ENSO (Zhou *et al.*, 2024). Pemanasan laut yang disebabkan oleh gangguan angin pasat dan sirkulasi laut menghambat proses pendinginan alami di permukaan laut. Akibatnya, suhu laut meningkat secara ekstrem dan bertahan lama, yang kemudian memicu MHW parah di Selat Sunda pada tahun 1998. Menurut Fekranie *et al.* (2024), *La Niña* yang berlangsung dalam tiga tahun berturut-turut menyebabkan penguatan angin pasat timuran, yang mendorong peningkatan volume arus laut Lintas Indonesia (*Indonesian Throughflow/ITF*). Aliran massa air dari Samudra Pasifik barat ini membawa suhu yang lebih rendah ke perairan Indonesia, sehingga menurunkan suhu permukaan laut dan mengurangi potensi munculnya MHW. *El Niño* dapat meningkatkan kejadian MHW akibat pemanasan laut, sementara *La Niña* cenderung menurunkan frekuensi dan intensitasnya melalui penguatan sirkulasi dan

pendinginan laut. Gregory *et al.* (2024) mendukung hal ini dengan temuan bahwa *El Niño* yang berlangsung lama dapat meningkatkan risiko MHW hingga 12 kali lipat di Samudra Hindia dan Pasifik. *El Niño* berkontribusi terhadap peningkatan MHW melalui pemanasan laut, sedangkan *La Niña* cenderung meredam pemanasan dengan memperkuat sirkulasi dan proses pendinginan laut.

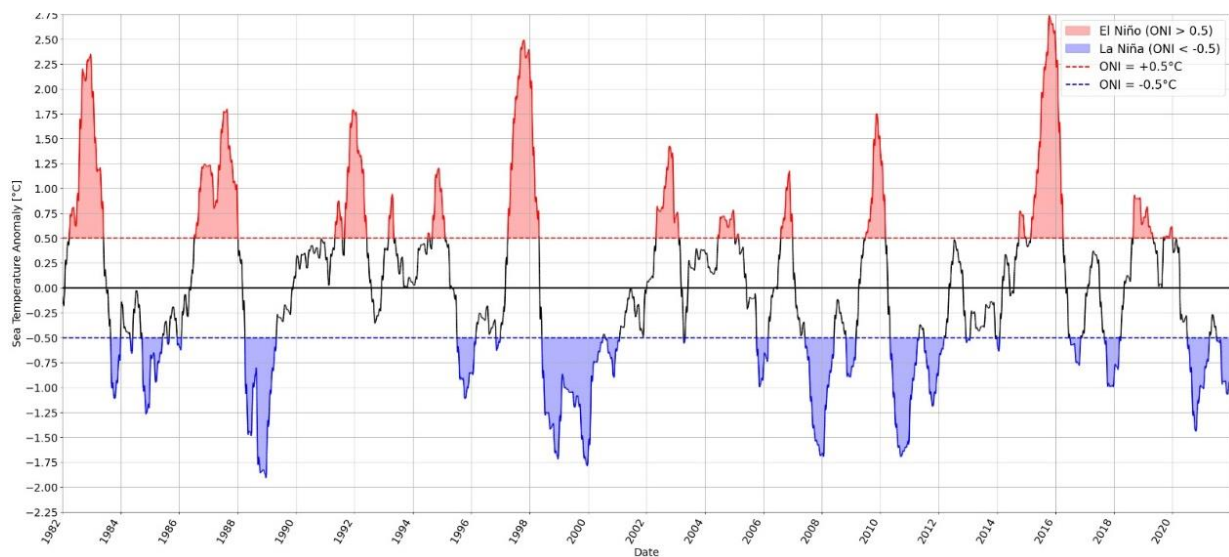
Gambar 6 menggambarkan anomali SPL di Samudra Hindia, yang dihitung dari selisih suhu antara wilayah barat (dekat Afrika) dan wilayah timur (dekat perairan Indonesia). Warna merah mengindikasikan kondisi IOD positif, yaitu ketika suhu di bagian barat lebih tinggi daripada bagian timur. Sebaliknya, warna biru menunjukkan IOD negatif, ketika bagian timur lebih hangat dari barat (Asyam *et al.*, 2024). Pada tahun 1998, terlihat adanya peningkatan DMI yang mencolok, terutama pada pertengahan hingga akhir tahun, dengan nilai positif yang cukup tinggi. Selama beberapa bulan, DMI tercatat melebihi $+0,5^{\circ}\text{C}$ dengan puncak hingga $1,25^{\circ}\text{C}$, menandakan bahwa bagian barat Samudra Hindia mengalami pemanasan yang jauh lebih intens dibandingkan bagian timurnya. Seperti yang tercantum pada Tabel 3. yang mengklasifikasikan IOD dengan nilai DMI. Salah satu faktor yang turut berkontribusi terhadap pergeseran musim di Indonesia adalah fenomena IOD. IOD terjadi akibat perbedaan anomali suhu permukaan laut antara bagian barat dan timur Samudra Hindia, yang kemudian berdampak pada peningkatan atau penurunan suhu laut, serta perubahan pola curah hujan (Rahayu *et al.*, 2018). Saat IOD positif, curah hujan di Indonesia cenderung menurun, sementara pada saat IOD negatif, curah hujan justru meningkat. Selain memengaruhi suhu permukaan laut, variabilitas iklim seperti ENSO dan IOD juga memiliki peran besar dalam dinamika iklim regional.

Intensitas MHW di Selat Sunda pada Tahun 1998

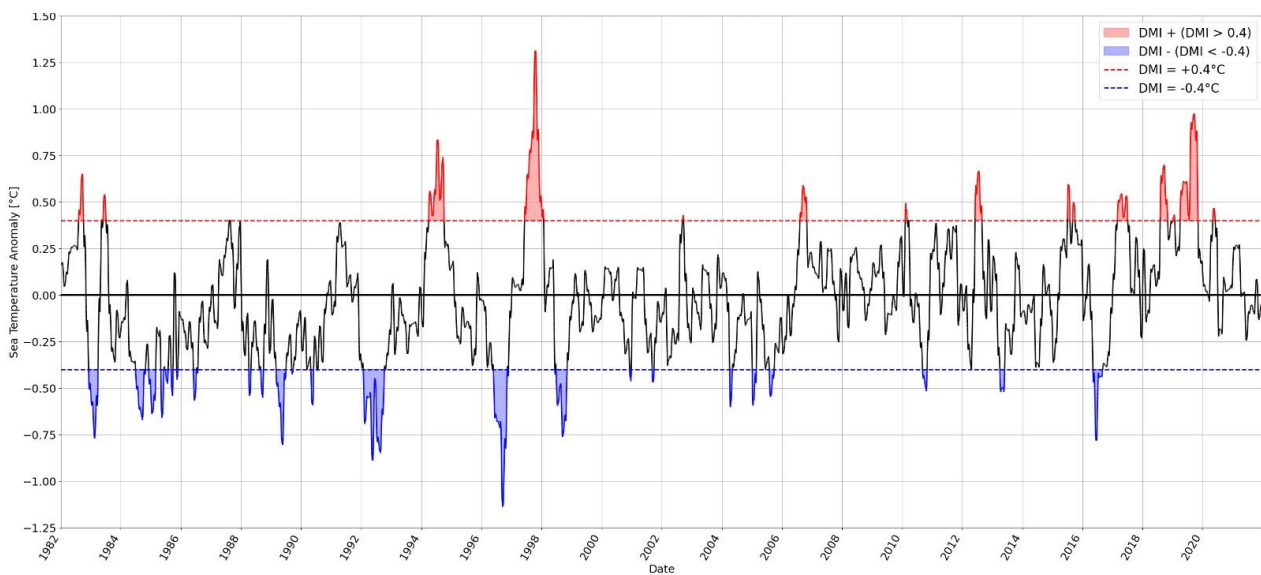
Analisis MHW di Selat Sunda selama rentang waktu 40 tahun memiliki kejadian MHW tertinggi pada tahun 1998. Pada tahun 1998, sebaran spasial anomali suhu laut di Selat Sunda menunjukkan variasi intensitas yang berkisar dari 0 hingga lebih dari 2°C . Visualisasi peta pada gambar 7. memperlihatkan bahwa wilayah selatan dan tenggara Selat Sunda mengalami intensitas

MHW paling tinggi, ditandai dengan warna merah tua yang merepresentasikan pemanasan laut di atas 2°C dari ambang normal musiman. Sebaliknya, bagian utara dan tengah selat menunjukkan intensitas yang lebih rendah, ditampilkan dalam warna hijau hingga biru muda, yang menggambarkan anomali suhu antara $0,25^{\circ}\text{C}$ hingga $1,0^{\circ}\text{C}$. Pola ini mengindikasikan bahwa wilayah yang lebih terbuka dan berdekatan dengan Samudra Hindia lebih rentan terhadap pemanasan

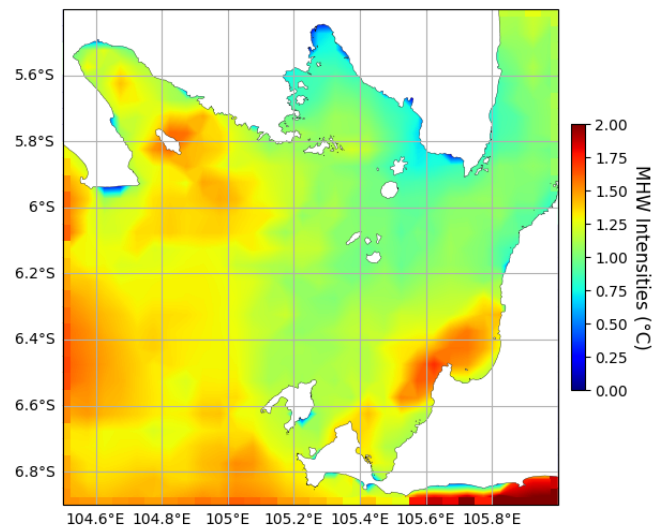
ekstrem dibandingkan kawasan pesisir yang lebih tertutup. Hal ini menunjukkan perairan Indonesia telah mengalami peningkatan suhu yang cukup ekstrem dari tahun ke tahun. Selain itu, intensitas radiasi matahari memiliki pengaruh besar terhadap SPL (Nababan, 2016). Laosuwan *et al.* (2022) menjelaskan bahwa SPL meningkat seiring dengan tingginya intensitas cahaya, sehingga semakin tinggi intensitas radiasi matahari, semakin tinggi pula SPL.



Gambar 5. Grafik Indeks ONI (*Oceanic Niño Index*) dari Tahun 1982 hingga 2020



Gambar 6. Grafik Indeks DMI (*Dipole Mode Index*) dari Tahun 1982 hingga 2020



Gambar 7. Intensitas MHW tahun pada 1998

Dijelaskan oleh penelitian Lubis *et al.* (2017), saat SPL meningkat, stratifikasi lapisan air menjadi lebih jelas, sehingga panas terakumulasi di permukaan dan meningkatkan intensitas MHW. ENSO dan IOD memicu kondisi atmosfer dasar yang mendukung terjadinya gelombang panas yang lebih sering, berlangsung lama, dan memiliki intensitas tinggi (Loughran *et al.*, 2019). Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 5. Bahwa nilai ONI positif dan cukup tinggi, melampaui ambang batas $+0,5^{\circ}\text{C}$, yang mengindikasikan kondisi *El Niño* seperti yang tertera pada Tabel 2. Penentuan ini sejalan dengan penjelasan oleh Glantz dan Ramirez (2020), yang menyatakan bahwa suatu peristiwa diklasifikasikan sebagai *El Niño* jika anomali SPL mencapai atau melebihi $+0,5^{\circ}\text{C}$ selama lima musim tiga bulanan berturut-turut. Selama periode tersebut, SPL melebihi *threshold* 32°C , yang berlangsung dari Maret hingga Oktober, seperti yang terlihat dari data anomali suhu yang signifikan (Gambar 7). Berdasarkan penelitian oleh Beliyana *et al.* (2023), terjadi durasi MHW paling lama pada perairan Indonesia pada fase El Nino dan IOD positif menghasilkan frekuensi MHW tertinggi dengan rata-rata 2,52 kejadian pertahun dan intensitas maksimum sebesar $1,54^{\circ}\text{C}$. Penelitian oleh Reddy *et al.* (2022) menyebutkan bahwa selama El Niño, intensitas *heatwave* sudah meningkat, terutama di wilayah timur laut dan tenggara Australia. Namun, saat El Niño kuat terjadi bersamaan dengan IOD positif, intensitasnya meningkat lebih tajam, dengan amplitudo suhu yang lebih tinggi, durasi yang lebih panjang, dan tingkat keparahan yang lebih besar.

Intensitas SPL Maksimum pada MHW Terburuk

Gambar 8 menunjukkan pola distribusi suhu yang berbeda antara wilayah pesisir dan laut lepas pada saat kejadian MHW terburuk pada 29 Juni hingga 22 September 1998. Di sepanjang pesisir Selat Sunda, tampak warna hijau hingga kuning yang merepresentasikan suhu sekitar 30°C . Hal ini menunjukkan bahwa meskipun fenomena MHW terjadi secara meluas, intensitas pemanasan di kawasan pesisir relatif lebih rendah. Namun sebagian besar perairan Selat Sunda mencatat suhu laut antara 30°C hingga lebih dari 31°C dengan warna oranye hingga merah pada peta. Didukung oleh Cook *et al.* (2022), dimana kawasan pesisir dengan kedalaman $<15\text{ m}$ menunjukkan respons lebih cepat terhadap fluktuasi atmosferik, namun intensitas MHW lebih rendah karena proses pendinginan melalui turbulensi vertikal yang lebih efisien. Sementara itu, perairan laut lepas terutama di sisi barat dan selatan Selat Sunda menunjukkan warna *orange* hingga merah gelap yang menandakan SPL lebih tinggi, berkisar di atas 31°C dan mendekati 32°C . Hal ini menandakan bahwa akumulasi panas selama MHW lebih intens terjadi di wilayah perairan terbuka. Suhu yang tinggi ini disebabkan oleh kolom air laut yang lebih stabil dan dalam, sehingga panas lebih mudah terperangkap dan bertahan lebih lama.

Gambar 8. menggambarkan bahwa dampak MHW di wilayah laut lepas jauh lebih besar dibandingkan wilayah pesisir, baik dari segi intensitas maupun distribusi suhu. Hal ini diperkuat oleh Habibie dan Nuraini (2014), daerah perairan

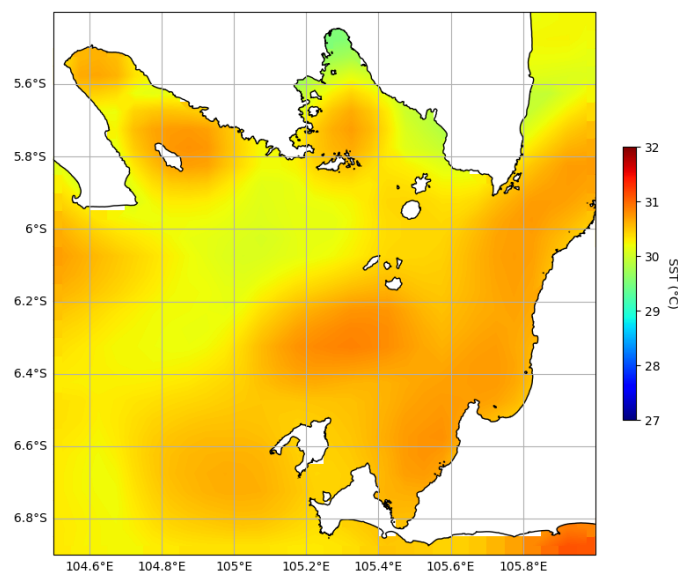
antar pulau atau selat mengalami tren peningkatan SPL lebih banyak dibandingkan yang berada di perairan terbuka. SPL maksimum selama puncak MHW pada tahun 1998 tidak terlepas dari dampak gabungan El Niño dan IOD positif seperti yang terlihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. El Niño menyebabkan lemahnya angin pasat dan mengurangi proses upwelling di Samudra Pasifik, sementara IOD positif meningkatkan suhu di bagian barat Samudra Hindia dan mengurangi kelembapan udara di wilayah Indonesia. Hal ini didukung oleh penelitian Kemarau *et al.* (2024) bahwa gabungan terjadinya fenomena *El Niño* dan IOD positif menyebabkan berkurangnya tutupan awan di Indonesia, meningkatkan penyerapan radiasi matahari dan menghambat pelepasan panas, sehingga memicu akumulasi panas di laut. Akibatnya, SPL meningkat drastis dan bertahan pada tingkat tinggi, sehingga memperkuat intensitas serta memperpanjang durasi MHW terburuk yang terjadi di Selat Sunda.

Anomali OLR pada 1998

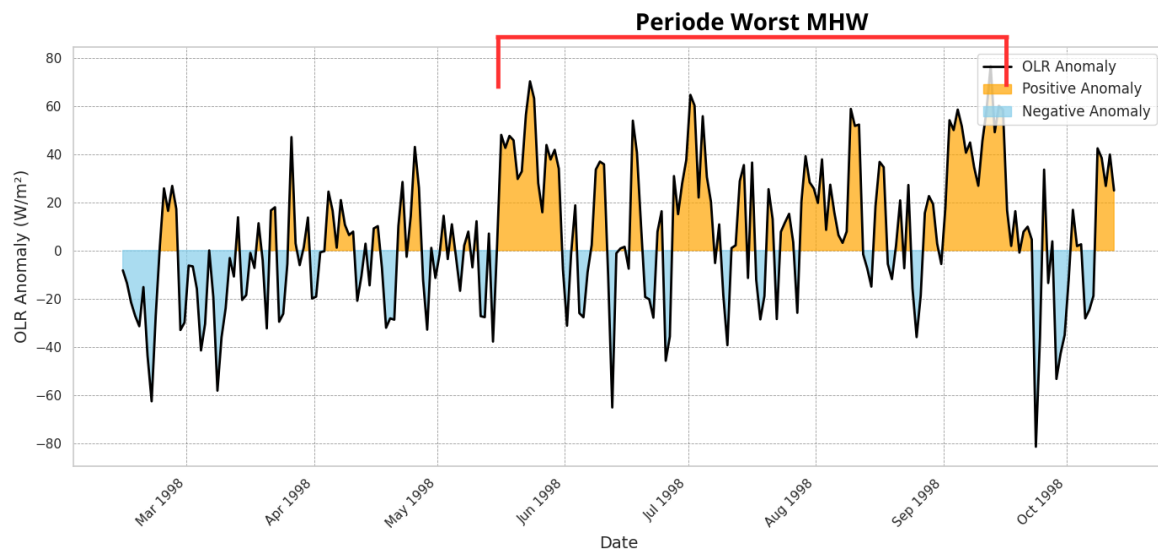
OLR digunakan untuk mengukur tingkat aktivitas konveksi di atmosfer (Artana *et al.*, 2024). OLR mengacu pada radiasi gelombang panjang yang dipancarkan dari permukaan Bumi, atmosfer, dan awan ke luar angkasa. OLR memainkan peran penting sebagai indikator yang dapat membantu memahami interaksi antara atmosfer dan lautan dalam memicu terjadinya MHW. Dari grafik Time Series anomali OLR diatas dapat dilihat bahwa pada bulan Juni hingga September 1998, OLR menunjukkan anomali positif yang menunjukkan

korelasi positif dengan kejadian MHW terburuk yang terjadi pada 29 Juni 1998 sampai 22 September 1998. Anomali positif pada OLR, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, menunjukkan kondisi atmosfer yang cenderung kering, yang dapat meningkatkan intensitas radiasi matahari langsung ke permukaan laut. Anomali positif OLR pada tahun 1998 ini salah satunya disebabkan oleh adanya *El Niño* pada tahun 1998 yang ditunjukan oleh nilai ONI yang menunjukkan peningkatan signifikan dalam nilai OLR, dengan beberapa puncak mencapai lebih dari $+60 \text{ W/m}^2$, menandakan kondisi atmosfer yang relatif kering.

Sejalan dengan hasil penelitian Whitburn *et al.* (2021), yang mengungkapkan bahwa *El Niño* menyebabkan kenaikan SPL di wilayah tropis dan mendorong tren peningkatan OLR, terutama di kawasan Samudra Pasifik tengah dan timur, seiring dengan pola sirkulasi atmosfer yang menjadi ciri khas dari fase *El Niño*. Hal ini berkontribusi pada peningkatan SPL yang memicu terjadinya MHW. Sebaliknya, OLR rendah yang menunjukkan aktivitas konveksi kuat dapat berperan dalam mendinginkan lautan melalui peningkatan tutupan awan dan curah hujan, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya MHW. Sesuai yang dikemukakan oleh Li *et al.* (2024), nilai OLR yang rendah (anomali negatif) mencerminkan aktivitas konvektif yang kuat, yang sering dikaitkan dengan curah hujan tinggi dan awan tebal. Sebaliknya, nilai OLR yang tinggi (anomali positif) menunjukkan konveksi yang tertekan, biasanya berhubungan dengan kondisi cuaca kering dan minimnya pembentukan awan.



Gambar 8. SPL Maksimum dari 29 Juni hingga 22 September 1998



Gambar 9. Time Series Anomali OLR di Selat Sunda 1998

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis SPL dan peristiwa MHW di Selat Sunda dari tahun 1982 hingga 2021, teridentifikasi adanya peningkatan intensitas, frekuensi, dan durasi MHW. Puncak kejadian MHW terparah tercatat pada tahun 1998, berlangsung selama 86 hari dari 23 Februari hingga 13 Oktober, dengan fase terburuk dari 29 Juni hingga 22 September 1998. Pada tahun 1998, anomali suhu laut di Selat Sunda bervariasi dari 0 hingga lebih dari 2°C, bahkan mencapai lebih dari 30,5°C dengan intensitas maksimum 1,6187°C. Peningkatan signifikan DMI positif bernilai +2,5°C menunjukkan pemanasan intens di Samudra Hindia bagian barat, berkorelasi dengan MHW terkuat. Wilayah pesisir ditemukan lebih rentan terhadap pemanasan ekstrem ini. Kondisi ini diperparah oleh anomali OLR positif yang tinggi hingga mencapai +60 W/m², menandakan minimnya kondensasi dan cuaca kering, serta fenomena El Niño yang ditunjukkan oleh nilai ONI positif tinggi mencapai +1,25°C. Sebaliknya, OLR rendah berhubungan dengan aktivitas konveksi yang mendinginkan laut dan mengurangi MHW. Korelasi positif antara anomali OLR tinggi dan MHW terburuk pada Juni hingga September 1998 menegaskan hubungan ini. Peningkatan MHW ini menekankan pentingnya mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan suhu laut untuk melindungi ekosistem pesisir dan kehidupan laut di Selat Sunda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Riset ini didukung oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi; dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan melalui Program Pendanaan PRPB skema e-ASIA JRP dengan nomor kontrak 013/E5/PG.02.00/PRPB BATCH 2/2024 dan 130/UN7.D2/PP/IX/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan, N.A., Tafzilmeriam, S., Abdul, S., Asmal, S. & Seah, Y.G., 2022. Chlorophyll-a Estimation and Relationship Analysis Chlorophyll-a Estimation and Relationship Analysis With Sea Surface Temperature and Fish Diversity. *Journal of Sustainability Science and Management*, 17(7): 133–150. doi: 10.46754/jssm.2022.07.010
- Amri, K., Priatna, A. & Suprpto. 2014. Karakteristik Oseanografi dan Kelimpahan Fitoplankton di Perairan Selat Sunda pada Musim Timur. *Bawal*, 6(1): 11-20. doi: 10.15578/bawal.6.1.2014.11-20
- Artana, C., Rodrigues, R.R., Fevrier, J. & Coll, M., 2024. Characteristics and Drivers of Marine Heatwaves in The Western South Atlantic. *Communications Earth and Environment*, 555(1): 1-10. doi: 10.1038/s43247-024-01726-8.
- Asyam, A.M.D., Rochaddi, B. & Widiaratih, R., 2024. Hubungan ENSO dan IOD Terhadap Suhu Permukaan Laut dan Curah Hujan di Selatan Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(2): 165-172.

- Azuga, N.A. & Radjawane. I.M., 2022. *Marine Heatwaves* pada Lapisan Bawah Permukaan di Perairan Selatan Jawa: Tren, Frekuensi, Durasi, dan Intensitas Kumulatif Berdasarkan Data Model Asimilasi (1993-2019). *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 27(3): 394-406. doi: 10.31258/jpk.27.3.394-406.
- Beliyana, E., Ningsih, N.S., Gunawan, S.R. & Tarya, A., 2023. Characteristics of Marine Heatwaves in the Indonesian Waters during the PDO, ENSO, and IOD Phases and Their Relationships to Net Surface Heat Flux. *Atmosphere Journal*, 14(6): 1-21. doi: 10.3390/atmos14061035.
- Beliyana, E., Ningsih, N.S. & Tarya, A., 2022. Characteristics of Marine Heatwaves (2008–2021) in the Savu Sea, East Nusa Tenggara. *Journal of Physics*, 2377(1): 1-6. doi: 10.1088/1742-6596/2377/1/012043.
- Benthuisen, J.A., Smith, G.A., Spillman, C.M. & Steinberg, C.R., 2021. Subseasonal Prediction of the 2020 Great Barrier Reef and Coral Sea Marine Heatwave. *Environmental Research Letters*, 16(12): p.124050. doi: 10.1088/1748-9326/ac3aa1.
- Cook, F., Smith, R.O., Roughan, M., Cullen, N.J., Shears, N. & Bowen, M., 2022. Marine Heatwaves in Shallow Coastal Ecosystems are Coupled with the Atmosphere: Insights from Half a Century of Daily in situ Temperature Records. *Frontiers in Climate*, 4: p.1012022. doi: 10.3389/fclim.2022.1012022.
- Dewitte, S. & Clerbaux, N., 2018. Decadal changes of earth's outgoing longwave radiation. *Remote Sensing*, 10(10): p.1539. doi: 10.3390/rs10101539.
- 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. doi: 10.14710/buloma.v11i2.41323.
- Fekranie, N.A., Setiawan, A. & Putri, M.R., 2024. Variability of Indonesian Throughflow Transport in the Indonesian Seas during Triple-Dip La Niña. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1350(1): p.012007. doi: 10.1088/1755-1315/1350/1/012007.
- Gattuso, J.P. & Hansson, L. 2011. *Ocean Acidification*. Penerbit Oxford University (Oxford University Press).
- Glantz, M. H. & Ramirez, I.J., 2020. Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to Enhance Societal Readiness for El Niño's Impacts. *International Journal of Disaster Risk Science*, 11(1): 394-403. doi: 10.1007/s13753-020-00275-w.
- Gregory, C.H., Artana, C., Lama, S., Fonfay, D.L., Sala, J., Xiao, F., Xu, T., Capotondi, A., Villalobos, C.M. & Holbrook, N.J., 2024. Global marine heatwaves under different flavors of ENSO. *Geophysical Research Letters*, 51(20): 1-11. doi: 10.1029/2024GL110399.
- Gunawan, S.R., Ningsih, N.S., Beliyana, E. & Tarya, A., 2022. Marine Heatwaves Characteristics in Spermonde Islands West Coast of South Sulawesi Indonesia. *Journal of Physics*, 2377 (1): 1-8. doi: 10.1088/1742-6596/2377/1/012040.
- Habibie, M.N. & Nuraini, T.A., 2014. Karakteristik dan Tren Perubahan Suhu Permukaan Laut di Indonesia Periode 1982-2009. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 15(1): 37-49. doi: 10.31172/jmg.v15i1.171.
- Hendra., Pranowo, W.S., Mukhlis., Triaji & Agustinus., 2022. Karakteristik Arus Musiman di Selat Sunda. *Jurnal Chart Datum*, 8(2): 117-124. doi: 10.37875/chartdatum.v8i2.146.
- Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Oliver, E.C. & Wernberg, T., 2016. A Hierarchical Approach to Defining Marine Heatwaves. *Progress in oceanography Journal*, 141(1): 227-238. doi: 10.1016/j.pocean.2015.12.014.
- Hobday, A.J., Oliver, E.C.J., Gupta, A.S., Benthuisen, J.A., Burrows, M.T., Donat, M.G., Holbrook, N.J., Moore, P.J., Thomsen, M.S., Wernberg, T. & Smale, D.A., 2018. Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography* 31(2): 1-13. doi: 10.5670/oceanog.2018.205.
- Ismail, M.F.A., 2021. Characteristics of Marine Heatwaves off West Sumatra Derived from High Resolution Satellite Data. *Journal of Human University*, 48(6): 130-136.
- Kemarau, R.A., Boo, W.H., Sakawi, Z., Dambul, R., Suab, S.A., Jaafar, W.S.W.M., Eboy, O. V. & Norzin, M.A.F., 2024. Impact Of El Niño, Indian Ocean Dipole, And Madden-Julian Oscillation On Land Surface Temperature In Kuching City Sarawak, During The Periods Of 1997/1998 And 2015/2016: A Pilot Study. *Journal of Water and Climate Change*, 15(8): 3702–3723. doi: 10.2166/wcc.2024.022.

- L'Heureux, M.L., Tippet, M.K., Wheeler, M.C., Nguyen, H., Narsey, S., Johnson, N., Hu, Z. Z., Watkins, A.B., Lucas, C., Ganter, C., Becker, E., Wang, W & Liberto, T.D., 2024. A Relative Sea Surface Temperature Index for Classifying ENSO Events in a Changing Climate. *Journal of Climate*, 37(4): 1197-1211. doi: 10.1175/JCLI-D-23-0406.1.
- Laosuwan, T., Uttarak, Y. & Rotjanakusol, T., 2022. Analysis of Content and Distribution of Chlorophyll-a on the Sea Surface through Data from Aqua/MODIS Satellite. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(5): 4711–4719. doi: 10.15244/pjoes/150731.
- Li, Z., Wu, G., Xu, C., Zhu, X. H. & Long, Y., 2024. Summer Marine Heatwaves in The Tropical Indian Ocean Associated With an Unseasonable Positive Indian Ocean Dipole Event 2012. *Frontiers in Marine Science*, 11(1): 1-14.
- Lien, V.S., Raj, R.P. & Chatterjee, S., 2024. Surface and Bottom Marine Heatwave Characteristics in The Barents Sea: A Model Study. *State of the Planet Journal*, 4(1): 1-11. doi: 10.5194/sp-4-osr8-8-2024.
- Loughran, T.F., Pitman, A.J. & Kirkpatrick, S.E.P., 2019. The El Niño–Southern Oscillation's effect on summer heatwave development mechanisms in Australia. *Clim. Dynam.* 52(1): 6279–6300.
- Lubis, M.Z., Anugroho, W., Kausarian, H., Surya, G. & Choanji, T., 2017. Sea Surface Temperature and Wind Velocity in Batam Waters: Its Relation to Indian Ocean Dipole (IOD). *Journal of Geoscience Engineering, Environment and Technology*, 2(4): 255-263. doi: 10.24273/jgeet.2017.2.4.778.
- Maulida, T., Wirasatriya, A., Ismunarti, D.H. & Puryajati, A.D., 2022. Physical Drivers of the 2013 Marine Heatwave in the Seas of the Southern Java-Nusa Tenggara. *Geographia Technica*, 17(1): 129-139. doi: 10.21163/GT_2022.171.10.
- Meehl, G.A. & Tebaldi, C., 2004. More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science Journal*, 305(5686): 994-997. doi: 10.1126/science.1098704.
- Nababan, B., 2016. Sea Surface Temperature And Chlorophyll - a Concentration Variabilities of Jakarta Bay and its Surrounding Water. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 8(1): 385–402. doi: 10.29244/jitkt.v8i1.13915.
- Rahayu, N.D., Sasmito, B. & Bashit, N. 2018. Analisis Pengaruh Fenomena Indian Ocean Dipole (IOD) Terhadap Curah Hujan di Pulau Jawa. *Jurnal Geodesi Undip*, 7(1): 57-67. doi: 10.14710/jgundip.2017.19299.
- Rahman, M.A., Laksmi, M., Agung, U.K. & Sunarto., 2019. Pengaruh Musim Terhadap Kondisi Oseanografi Dalam Penentuan Daerah Penangkapan Ikan Cakalang (*Katsuwonus Pelamis*) Di Perairan Selatan Jawa Barat. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 10(1): 92-102. doi: 10.29244/coj.v7i1.42001.
- 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. doi: 10.14710/ijoce.v3i1.10494.
- Reddy, P.J., Kirkpatrick, S.E.P. Ridder, N.N. & Sharples, J.J., 2022. Combined Role Of ENSO And IOD On Compound Drought And Heatwaves In Australia Using Two CMIP6 Large Ensembles. *Weather and Climate Extremes*, 100469(1): 1-17. doi: 10.1016/j.wace.2022.100469.
- Saji, N.H. & Yamagata, T., 2003. Possible Impacts Of Indian Ocean Dipole Mode Events On Global Climate. *Climate Research*, 25(2): 151–169. doi: 10.3354/cr025151.
- Whitburn, S., Clarisse, L., Bouillon, M., Safieddine, S., George, M., Dewittw, S., Longueville, H. D., Coheur, P. F. & Clerbaux, C., 2021. Trends in Spectrally Resolved Outgoing Longwave Radiation From 10 Years of Satellite Measurements. *Climate and Atmospheric Science*, 4(48): 1-8. doi: 10.1038/s41612-021-00205-7.
- Zhou, F., Jian, S., Liu, M. & Wang, R., 2024. Madden-Julian Oscillation contributes to the skewed intraseasonal PNA in El Niño and La Niña winters. *Geophysical Research Letters*, 51(17): 1-11. doi: 10.1029/2024GL111119.