Volume 18, No. 2, 2025

ISSN: 1907-9931 (print), 2476-9991 (online)

RESPON SUHU PERMUKAAN LAUT DAN KLOROFIL-A SAAT TRIPLE-DIP LA NIÑA (2020–2023) DI SULAWESI TENGGARA-LAUT BANDA

RESPONSE OF SEA SURFACE TEMPERATURE AND CHLOROPHYLL-A DURING TRIPLE-DIP LA NIÑA (2020-2023) IN SOUTHEAST SULAWESI-BANDA OCEAN

Muh Adhim Adrian*, Asmadin, Amadhan Takwir

Program Studi Oseanografi, Jurusan Geofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Haluoleo
Jl. H.E.A. Mokodompit, Kendari, Sulawesi Tenggara 93232 Indonesia

*Corresponding author e-mail: adhimadrian@gmail.com

Submitted: 20 June 2025 / Revised: 24 July 2025 / Accepted: 4 August 2025

http://doi.org/10.21107/jk.v18i2.30604

ABSTRAK

Fenomena triple-dip La Niña yang terjadi selama tiga tahun berturut-turut (2020–2023) merupakan peristiwa iklim global yang jarang terjadi dan berdampak signifikan terhadap dinamika oseanografi regional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variabilitas suhu permukaan laut (SPL) dan konsentrasi klorofil-a di perairan Sulawesi Tenggara hingga Laut Banda selama periode tersebut. Data SPL harian dan klorofil-a bulanan diperoleh dari Marine Copernicus dan dianalisis secara spasial-temporal menggunakan pendekatan statistik dan visualisasi musiman. Hasil menunjukkan bahwa selama La Niña berkepanjangan, SPL mengalami penurunan konsisten dan diikuti oleh fluktuasi klorofil-a yang menunjukkan peningkatan pada musim dan lokasi tertentu, terutama di wilayah pesisir dan perairan dangkal. Sementara itu, indeks ONI secara konsisten menunjukkan nilai negatif selama tiga tahun, mengonfirmasi keberadaan La Niña multiyear yang memperkuat sirkulasi atmosfer timur dan mendorong proses upwelling di wilayah studi. Temuan ini menegaskan pentingnya pemantauan berkelanjutan terhadap parameter oseanografis dan indikator iklim global dalam memahami dampak jangka panjang ENSO terhadap ekosistem laut tropis Indonesia.

Kata Kunci: *ENSO, klorofil-a, La Niña, ONI, suhu permukaan laut.*

ABSTRACT

The triple-dip La Niña phenomenon that persisted for three consecutive years (2020–2023) is a rare global climate event with significant impacts on regional oceanographic dynamics. This study aims to analyze the variability of sea surface temperature (SST) and chlorophyll-a concentration in the waters of Southeast Sulawesi to the Banda Sea during this period. Daily SST data and monthly chlorophyll-a data from Marine Copernicus were analyzed spatio-temporally using statistical approaches and seasonal visualization. The results reveal a consistent decrease in SST, accompanied by an increase in chlorophyll-a during specific seasons and locations, particularly in coastal and shallow waters. The Oceanic Niño Index (ONI) remained negative over the three years, confirming a multiyear La Niña that strengthened easterly atmospheric circulation and enhanced upwelling in the study area. These findings highlight the importance of long-term monitoring of oceanographic parameters and global climate indicators to better understand and anticipate the impacts of ENSO on tropical marine ecosystems in Indonesia.

Keywords: *ENSO, chlorophyll-a, La Niña, ONI, sea surface temperature.*

PENDAHULUAN

El Niño Southern Oscillation (ENSO) merupakan fenomena osilasi antar-tahunan paling signifikan yang terjadi di wilayah Pasifik tropis. ENSO terdiri dari dua fase utama, yaitu El Niño dan La Niña, yang masing-masing ditandai oleh anomali suhu permukaan laut (SPL). La Niña ditandai oleh anomali negatif atau pendinginan SPL di kawasan Pasifik tengah dan timur (Kurniadi, Weller, Min, & Seong, 2021). Deteksi fenomena ini umumnya dilakukan menggunakan Oceanic Niño Index (ONI), di mana nilai negatif menunjukkan

indikasi kuat terjadinya La Niña. Pendinginan ini memperkuat angin pasat timur, yang kemudian memicu proses upwelling, yaitu naiknya air dingin kaya nutrien dari bawah permukaan ke permukaan laut. Proses ini berkontribusi terhadap perbedaan tekanan udara antara Pasifik timur-tengah dan barat, yang pada akhirnya mengaktifkan sirkulasi Walker dan meningkatkan aktivitas konvektif di wilayah Indonesia(Alhadid & Budi Nugroho, 2024).

ENSO merupakan bentuk interaksi atmosfer-laut yang berskala besar dan tidak stabil, dengan periode osilasi 3–7 tahun antara fase hangat (El Niño) dan fase dingin (La Niña). ENSO juga diketahui memengaruhi pola spasial konsentrasi klorofil-a di perairan Indonesia (Wirasatriya, Setiawan, & Subardjo, 2017). Dalam beberapa dekade terakhir, tren suhu permukaan laut di wilayah tropis Pasifik menunjukkan kecenderungan ke arah kondisi mirip La Niña, yang ditandai dengan pemanasan di Pasifik barat, pendinginan di Pasifik timur, serta penguatan angin timur (Dharma, 2024). Fenomena triple-dip La Niña yang terjadi berturut-turut selama tiga tahun berturut-turut dari 2020 hingga 2023 diperkirakan diperkuat oleh kondisi ini. Meski umumnya La Niña hanya berlangsung kurang dari satu tahun, pada kasus multiyear seperti triple-dip, fenomena ini dapat memperlambat laju pemanasan global serta memicu kondisi iklim yang lebih dingin dan basah (Jeong *et al.,* 2023).

Sejak tahun 1990-an, La Niña tercatat lebih sering terjadi dibanding El Niño, dan dalam beberapa kasus berlangsung hingga tiga tahun, seperti pada periode 1973–1976, 1998–2001, dan 2020–2023. Kejadian triple-dip La Niña 2020–2023 diyakini dipicu oleh angin timur yang persisten serta interaksi lintas samudra dengan Samudra Atlantik dan Hindia. Faktor lain seperti anomali suhu tahunan (khususnya gradien suhu utara–selatan atau mode antisimetris) juga diduga turut berperan mempertahankan keberlangsungan La Niña melalui penguatan angin lintas ekuator (Jiang *et al.,* 2023)

Perubahan oseanografi akibat ENSO, seperti suhu permukaan laut dan konsentrasi klorofil-a, berdampak langsung pada produktivitas perairan. Selama La Niña, SPL di wilayah Pasifik timur menurun, sedangkan di Indonesia cenderung lebih hangat dengan kecenderungan penurunan klorofil-a (Carundyatama *et al.,* 2024). Namun, angin timur yang kuat dapat memicu upwelling yang menggantikan air hangat di permukaan dengan air dingin dari kedalaman laut yang kaya nutrien, sehingga meningkatkan produktivitas laut. Sebaran spasial dan temporal SPL serta klorofil-a di Indonesia sangat dipengaruhi oleh pola angin muson yang berubah secara musiman. Klorofil-a sendiri merupakan indikator utama biomassa fitoplankton yang menjadi penggerak awal rantai makanan laut, mentransfer energi ke tingkat trofik lebih tinggi dan berperan dalam menentukan produktivitas serta hasil tangkapan ikan (Rachman, Hidayah, & Yuliardi, 2025; Wirasatriya *et al.*, 2021).

Wilayah Sulawesi Tenggara dan Laut Banda memiliki peran penting dalam dinamika kelautan regional. Laut Sulawesi, sebagai pintu masuk massa air dari Samudra Pasifik, sangat dipengaruhi oleh arus lintas Indonesia yang berdampak pada SPL dan klorofil-a (Alfiqri, Handoyo, & Widiaratih, 2024). Sementara itu, Laut Banda merupakan cekungan dalam yang memisahkan paparan Sunda dan Sahul, serta memiliki topografi kompleks berupa cekungan dan palung yang memengaruhi sirkulasi massa air. Pergerakan vertikal air yang membawa nutrien dari dasar laut menyebabkan penurunan SPL dan peningkatan klorofil-a, mengindikasikan fenomena upwelling (Nurafifah, Zainuri, & Wirasatriya, 2022). Konsentrasi klorofil-a di wilayah ini sangat dipengaruhi oleh musim dan fenomena iklim global seperti El Niño dan La Niña, dengan puncak konsentrasi terjadi pada musim kering, terutama di bagian timur Laut Banda (Marpaung *et al.,* 2022).

Penelitian terkait dampak ENSO terhadap fitoplankton telah dilakukan di berbagai wilayah, seperti oleh Dang *et al.,* (2020) di Sulu Ridge, yang menunjukkan hubungan kompleks antara ENSO dan dinamika fitoplankton. Di Laut Cina Selatan, Yu *et al.,* (2019) mencatat tren peningkatan klorofil, khususnya di bagian utara, sebagai hasil dari interaksi fisik-biologis. Sementara itu, Liu, Wang, Cheng, & Du (2012) melaporkan penurunan angin muson barat daya dan upwelling di pesisir selatan Vietnam pasca-El Niño, yang menyebabkan penurunan klorofil akibat efek kapasitor Samudra Hindia. Di Indonesia, Prasetyo & Nabilah (2017) mencatat adanya indikasi SPL dan klorofil-a yang signifikan pada bulan Juni–Agustus di pesisir selatan Jawa, dan Purba *et al.,* (2024) menekankan pentingnya sea surface height anomaly dalam menjelaskan kejadian upwelling saat La Niña 2022–2024.

Namun, sebagian besar penelitian tersebut hanya berfokus pada kejadian ENSO secara

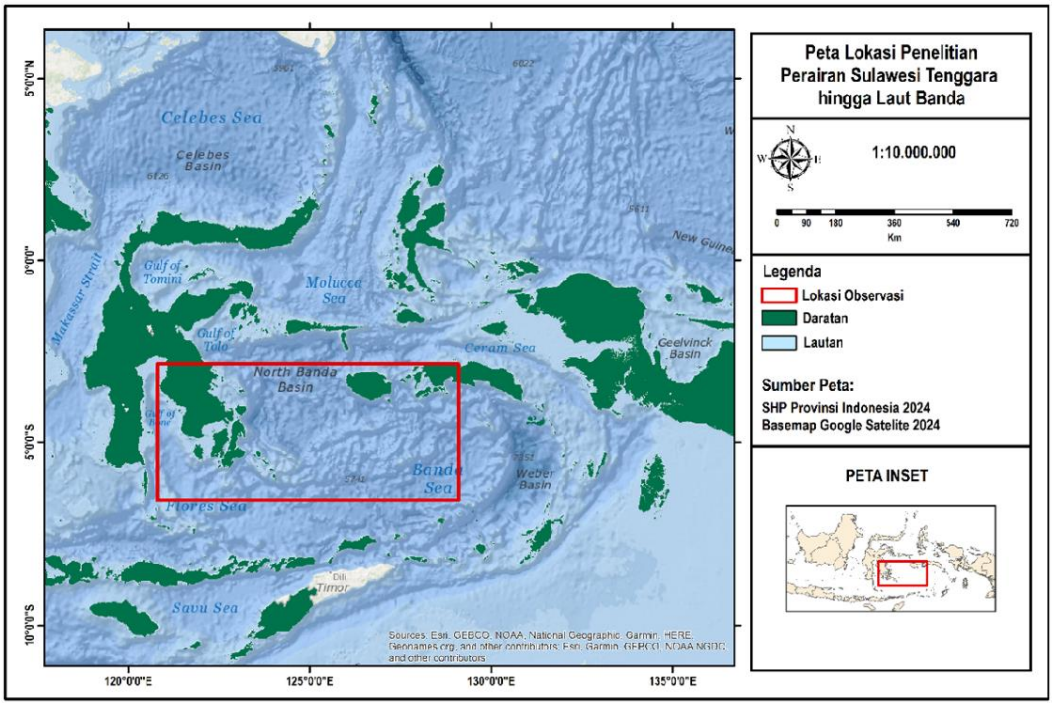
umum dan belum banyak membahas secara rinci kejadian triple-dip La Niña (2020–2023), terutama dari aspek spasial dan implikasinya terhadap sebaran klorofil-a. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a selama periode triple-dip La Niña di wilayah Sulawesi Tenggara hingga Laut Banda. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan ilmu kelautan, khususnya dalam memahami kesuburan perairan dan potensi wilayah penangkapan ikan.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini mencakup wilayah perairan Sulawesi Tenggara hingga Laut Banda sebagaimana disajikan pada **Gambar 1**, dengan batas koordinat antara 120,88°–129,87° BT dan 3,05° LU–6,89° LS. Data utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas SPL harian dan konsentrasi klorofil-a bulanan, yang diperoleh dari layanan *Copernicus Marine and Environment Monitoring Service* (CMEMS) untuk periode 1 Januari 2020 hingga 31 Desember 2023.

Data SPL bersumber dari produk *Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis* (OSTIA) yang dioperasikan oleh Met Office Inggris dan disediakan oleh IFREMER. Produk ini merupakan hasil analisis harian dengan resolusi spasial 0,05° x 0,05°, yang menggabungkan data satelit inframerah dan microwave (GHRSST) serta observasi in situ. Sementara itu, data klorofil-a diperoleh dari Brockmann Consult (BC) sebagai penyedia produk biogeokimia berbasis observasi satelit (SeaWiFS, MODIS, MERIS, VIIRS, OLCI) dengan resolusi spasial 4 km dan resolusi temporal bulanan. Data disusun dalam dua kategori, yaitu *Near Real Time (NRT)* dan *Multi-Year (MY)*. Seluruh data dapat diakses pada situs http://marine.copernicus.eu. Data arah dan kecepatan angin diunduh dari The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) dengan resolusi resolusi 0,25 derajat untuk data reanalisis dan 0,5 derajat untuk estimasi ketidakpastian (masing-masing 0,5 dan 1 derajat untuk data gelombang laut)

Analisis pengaruh ENSO terhadap SPL dan klorofil-a dilakukan dengan menggunakan indeks *Oceanic Niño Index* (ONI) yang merujuk pada wilayah NINO 3.4, di mana anomali suhu permukaan laut ±0,5°C digunakan sebagai ambang batas untuk mengidentifikasi kejadian El Niño (ONI > +0,5°C) atau La Niña (ONI < -0,5°C).



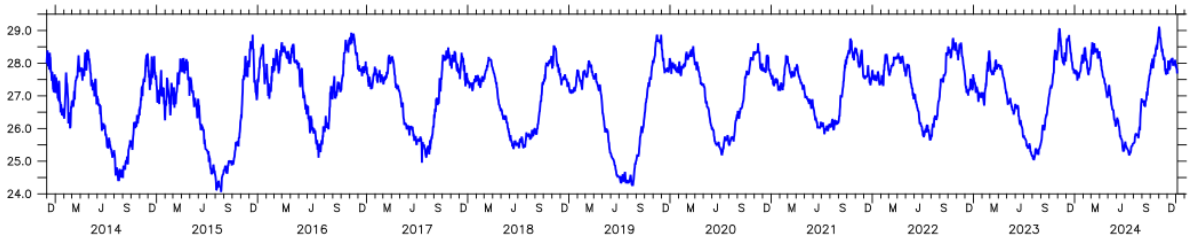
Gambar 1. Peta lokasi penelitian. Kotak merah adalah lokasi pengamatan SPL dan klorofil-a

HASIL DAN PEMBAHASAN

Triple Dip La Nina Tahun 2020-2023

Suhu permukaan laut rata-rata tahunan memperlihatkan bagaimana pola yang terbentuk dari tahun 2014 hingga 2024. Dapat diamati bahwa, untuk bulan Juni-Juli-Agustus di setiap tahun mengalami penurunan SPL yang kemudian hal ini berangsur-angsur meningkat di bulan SON. Hal ini tentu

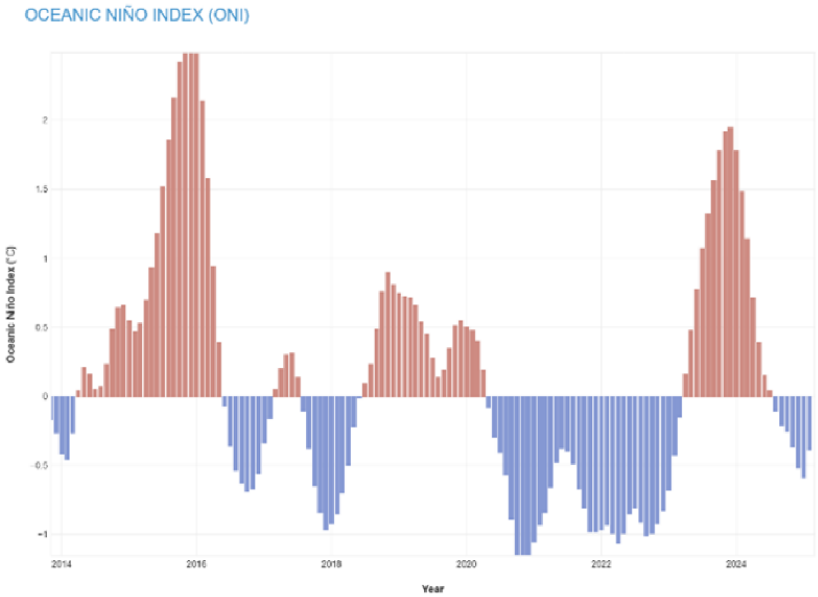
memperlihatkan bagaimana ENSO cukup mengambil peran penting dalam mempengaruhi variable fisik suatu perairan, khususnya SPL. Hal ini kemudian terjadi juga pada tahun 2015 yang merupakan fase El-Nino Sangat Kuat yang kemudian ditampilkan pada **Gambar 2** berikut.



Gambar 2. SPL rata-rata pada tahun 2014-2024

Berdasarkan data Oceanic Niño Index (ONI), periode tahun 2020 hingga awal 2023 menunjukkan keberadaan fenomena triple-dip La Niña, yang ditandai dengan nilai ONI yang secara konsisten berada di bawah ambang batas –0,5 °C selama lebih dari lima triwulan berturut-turut dalam tiga musim dingin berturut-turut. Kondisi ini tergolong langka dan menjadi salah satu periode La Niña terpanjang dalam dua dekade terakhir. Secara klimatologis, ONI merupakan indikator utama yang merefleksikan anomali suhu permukaan laut di wilayah Niño 3.4, dan nilai negatif yang berkepanjangan selama tiga tahun tersebut mengindikasikan dominasi sistem atmosfer-laut yang mendukung pendinginan berskala basin di Samudra Pasifik tropis (Amanulloh & Romdani, 2024).

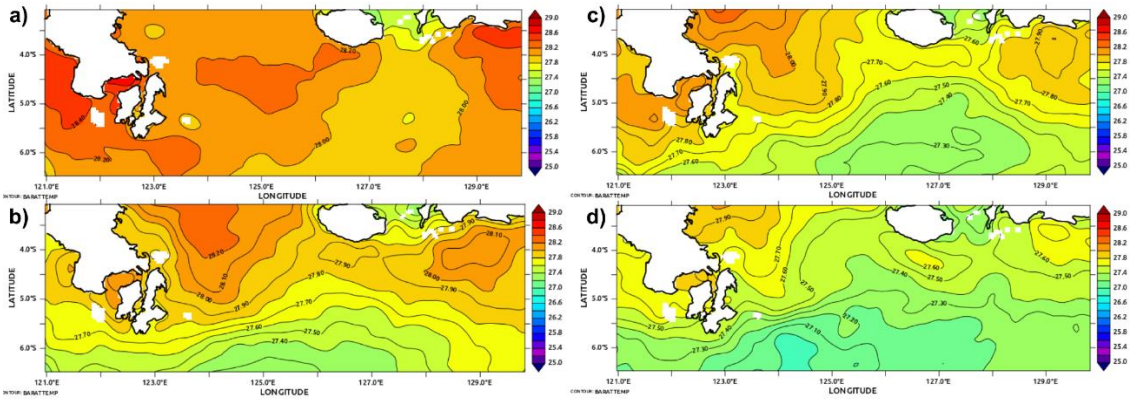
Fenomena triple-dip La Niña berdampak luas terhadap sistem iklim global, termasuk pola curah hujan, sirkulasi atmosfer, dan dinamika monsun. La Niña yang berlangsung dalam tiga fase tahunan berturut-turut cenderung memperkuat angin pasat, meningkatkan upwelling, dan memperluas wilayah laut dengan suhu permukaan lebih rendah dari normal di Pasifik tropis bagian barat. Selain itu, anomali ini juga berdampak pada intensifikasi hujan di kawasan maritim Indonesia dan peningkatan aktivitas badai di beberapa wilayah tropis lainnya. Kejadian triple-dip ini memberikan gambaran penting tentang ketahanan dan keberlanjutan sistem iklim regional terhadap variabilitas interannual yang dipicu oleh ENSO (El Niño–Southern Oscillation), sekaligus menekankan pentingnya pemantauan jangka panjang terhadap ONI sebagai indikator utama dinamika iklim global.



Gambar 3. Suhu permukaan laut musiman (3 bulanan) di Samudra Pasifik tropis bagian tengah dibandingkan dengan rata-rata 2004-2024. Pemanasan atau pendinginan setidaknya 0.5˚C di atas atau di bawah rata-rata di dekat Garis Data Internasional merupakan salah satu kriteria yang digunakan untuk memantau pola iklim El Nino-La Nina. Sumber: NOAA Climate.gov, berdasarkan data dari Pusat Prediksi Iklim.

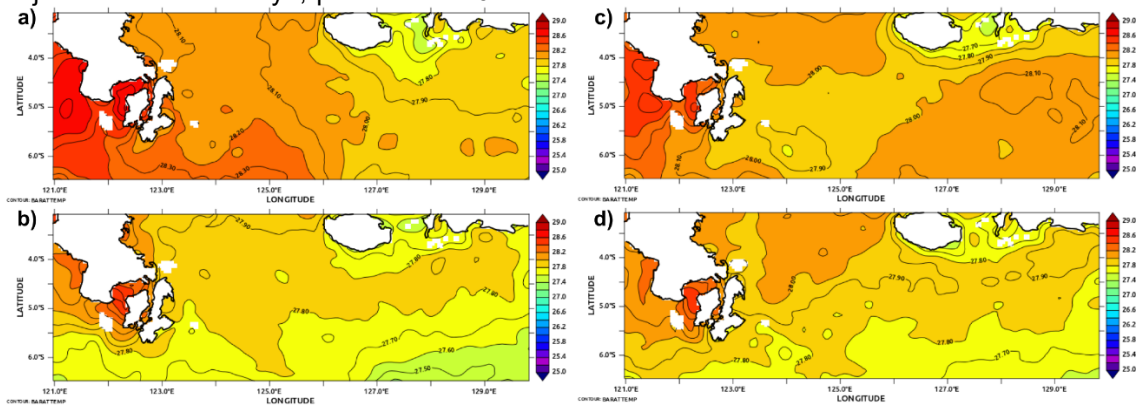
Variabilitas Suhu Permukaan Laut (SPL) pada Fase Triple Dip La Nina (2020-2023)

Sebaran variabilitas SPL pada bulan Desember-Januari-Februari (DJF) yang mempresentasikan musim barat di perairan Sulawesi Tenggara hingga laut Banda ditampilkan pada **Gambar 4**. Pada tahun 2020 (**Gambar 4a**), SPL relatif hangat dengan nilai berkisar antara 27.5°C hingga di atas 29.0°C, menunjukkan kondisi netral hingga awal pembentukan La Niña. Tahun 2021 (**Gambar 4b**) mencerminkan SPL yang lebih rendah secara signifikan di wilayah tengah hingga selatan dengan nilai minimum sekitar 26,5°C, mengindikasikan penguatan La Niña. Tren ini berlanjut pada tahun 2022 (**Gambar 4c**), dengan SPL tetap rendah (sekitar 26.0°C–28.0°C), menandai keberlanjutan La Niña tahun kedua. Penurunan suhu yang meluas di wilayah tropis memperkuat sinyal triple-dip La Niña (Purba *et al.,* 2025), yang biasanya terkait dengan pendinginan luas di Samudra Pasifik bagian tengah dan timur. Pada tahun 2023 (**Gambar 4d**), SPL mulai menunjukkan pemanasan kembali, dengan nilai meningkat ke kisaran 27.5°C–28.8°C, terutama di bagian utara dan timur wilayah studi. Hal ini mencerminkan berakhirnya fase La Niña dan potensi transisi menuju kondisi netral atau El Niño. Selama periode triple-dip La Niña (2020–2022), SPL yang relatif lebih dingin secara konsisten mendukung peningkatan upwelling dan pengaruh angin pasat timur yang lebih kuat, berdampak terhadap pola curah hujan, suhu udara, dan dinamika laut regional.



Gambar 4. Sebaran SPL a) tahun 2020, b) tahun 2021, c) tahun 2022, d) tahun 2023 pada musim barat (DJF)

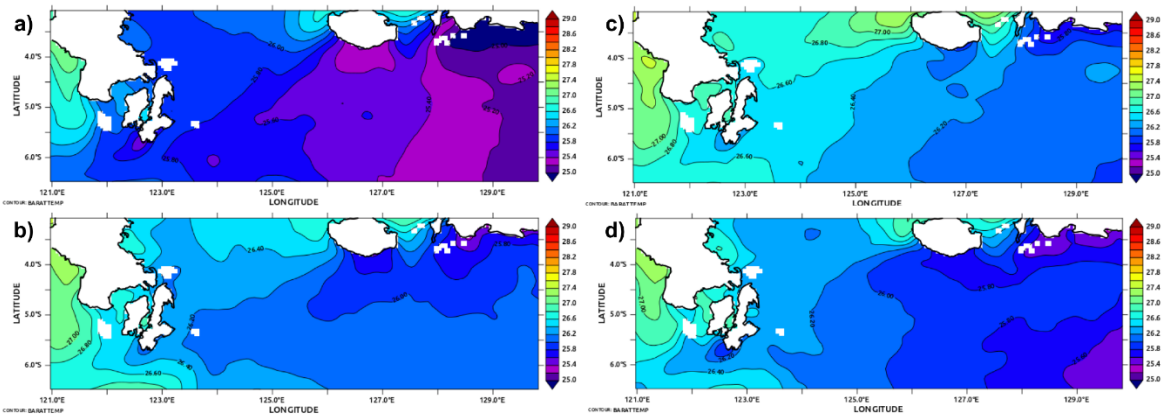
Gambar 5 menunjukkan variasi suhu permukaan laut (SPL) pada musim peralihan I Maret-April-Mei (MAM). Pada tahun 2020 dan 2023 (**Gambar 5a** dan **5d**), SPL cenderung hangat dengan kisaran 27.5°C–29.0°C, mencerminkan kondisi netral hingga transisi menuju El Niño. Sebaliknya, pada tahun 2021 dan 2022 (**Gambar 5b** dan **5c**), terjadi penurunan SPL terutama di wilayah selatan dan tengah dengan suhu mencapai sekitar 26.0°C–28.0°C, mengindikasikan pengaruh kuat triple-dip La Niña yang berlangsung tiga tahun berturut-turut



Gambar 5. Sebaran SPL a) tahun 2020, b) tahun 2021, c) tahun 2022, d) tahun 2023 pada musim peralihan I (MAM)

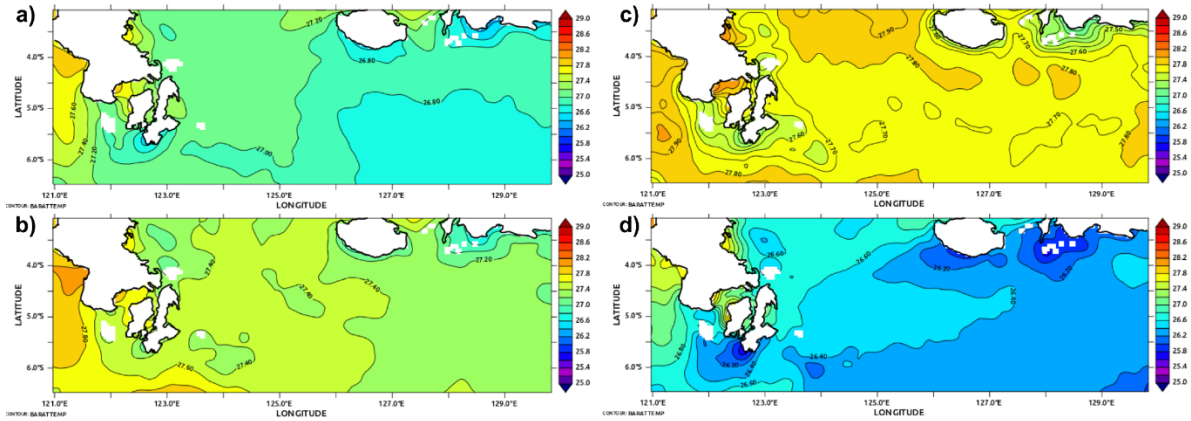
Variasi SPL (**Gambar 6**) pada musim barat Juni-Juli-Agustus (JJA) dari tahun 2020 hingga 2023 menunjukkan indikasi kuat pengaruh La Niña, terutama pada tahun 2021 dan 2022

(**Gambar 6b** dan **6c**), di mana SPL melandai pada kisaran 25.4°C–27.5°C di sebagian besar wilayah, menandakan pendinginan yang konsisten dan meluas. Penurunan suhu yang signifikan ini mencerminkan intensifikasi upwelling serta penguatan angin pasat timuran yang umum terjadi selama fase La Niña kuat, selaras dengan fenomena triple-dip yang tercatat dalam kurun waktu tersebut (Iwakiri *et al.,* 2023). Sebaliknya, tahun 2020 (**Gambar 5a**) menunjukkan suhu relatif lebih rendah di bagian timur tetapi lebih hangat di barat (hingga >28,0°C), sementara tahun 2023 (**Gambar 6d**) memperlihatkan tanda pemulihan dengan suhu meningkat di wilayah tengah hingga kisaran 27.0°C–28.0°C, mengindikasikan transisi menuju kondisi netral pasca-La Niña.



Gambar 6. Sebaran SPL a) tahun 2020, b) tahun 2021, c) tahun 2022, d) tahun 2023 pada musim barat (JJA)

Variasi SPL pada musim peralihan II September-Oktober-November (SON) selama periode 2020–2023 menunjukkan dinamika termal yang selaras dengan pengaruh La Niña kuat, terutama pada tahun 2022 (**Gambar 7d**), yang ditandai oleh dominasi SPL rendah berkisar antara 25.4°C hingga 27.0°C di sebagian besar wilayah timur perairan. Hal ini mencerminkan anomali pendinginan yang tajam akibat penguatan *upwelling* dan peningkatan curah hujan yang mengindikasikan intensitas La Niña pada tahun tersebut. Sementara pada tahun 2020 dan 2021 (**Gambar 7a** dan **7b**), SPL menunjukkan nilai sedang antara 26.8°C–28.0°C, yang mengindikasikan fase awal penguatan La Niña. Tahun 2023 (**Gambar 7c**) mencatat pemulihan SPL hingga >28.0°C di wilayah barat dan tengah, menunjukkan transisi ke kondisi netral yang mendukung pelemahan sistem pendinginan La Niña. Pola ini menegaskan keterkaitan musiman antara SPL dan variabilitas iklim global di kawasan tropis barat Pasifik.

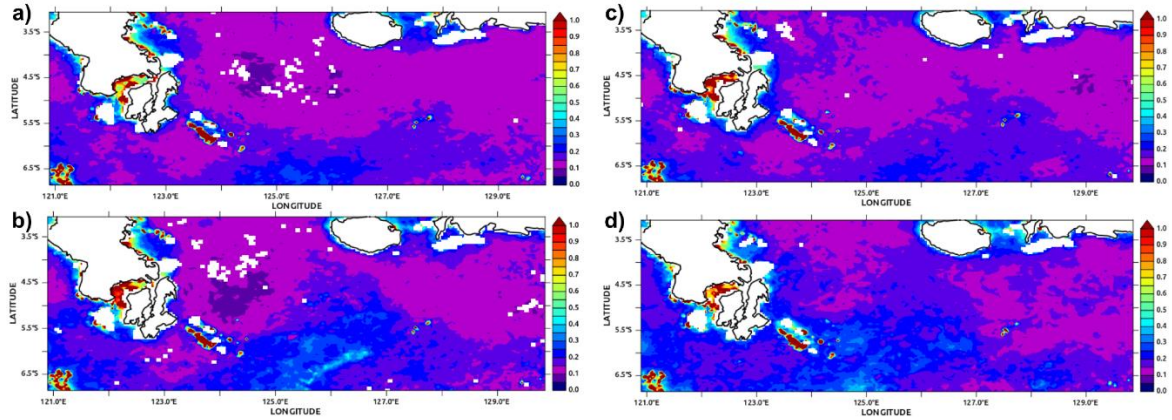


Gambar 7. Sebaran SPL a) tahun 2020, b) tahun 2021, c) tahun 2022, d) tahun 2023pada musim peralihan II (SON)

Distribusi Klorofil-a pada Fase Triple Dip La Nina (2020-2023)

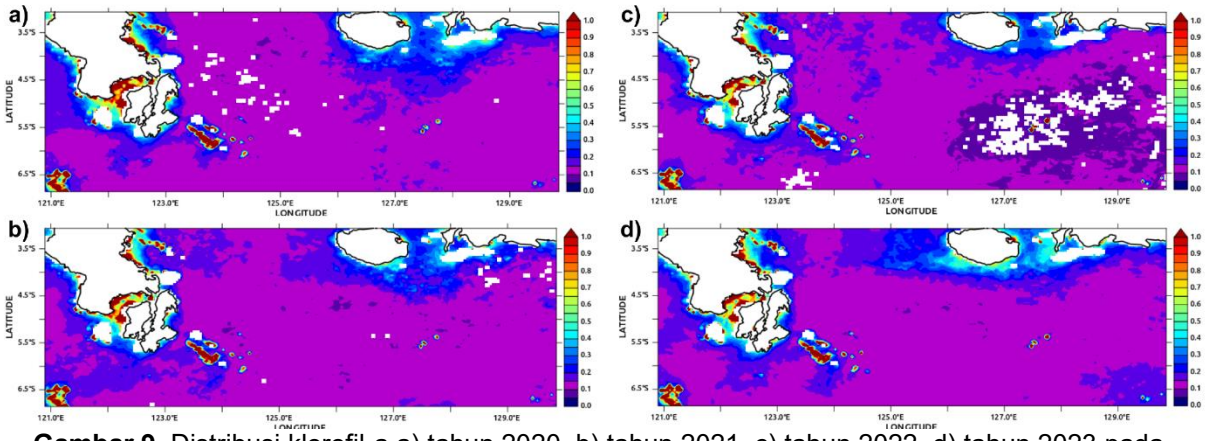
Distribusi klorofil-a pada musim timur (DJF) periode 2020–2023 menunjukkan fluktuasi konsentrasi yang berkorelasi erat dengan intensitas La Niña, khususnya pada tahun 2022 (**Gambar 8c**), di mana terjadi peningkatan signifikan konsentrasi klorofil-a hingga >0.7 mg/m³ di sekitar pesisir barat daya dan selatan,

yang mengindikasikan pengayaan nutrien akibat peningkatan upwelling dan curah hujan selama La Niña kuat. Sebaliknya, tahun 2020 dan 2021 (**Gambar 8a** dan **8b**) mencatat konsentrasi klorofil-a yang relatif moderat antara 0.2–0.6 mg/m³, menunjukkan fase awal peningkatan produktivitas primer. Pada tahun 2023 (**Gambar 8d**), penurunan konsentrasi klorofil-a hingga <0.3 mg/m³ di sebagian besar wilayah mengindikasikan pelemahan La Niña dan kembalinya kondisi oseanografi yang lebih stabil. Secara umum, pola ini mencerminkan hubungan positif antara intensitas La Niña dan peningkatan biomassa fitoplankton di perairan tropis barat Pasifik.



Gambar 8. Distribusi klorofil-a a) tahun 2020, b) tahun 2021, c) tahun 2022, d) tahun 2023pada musim timur (DJF)

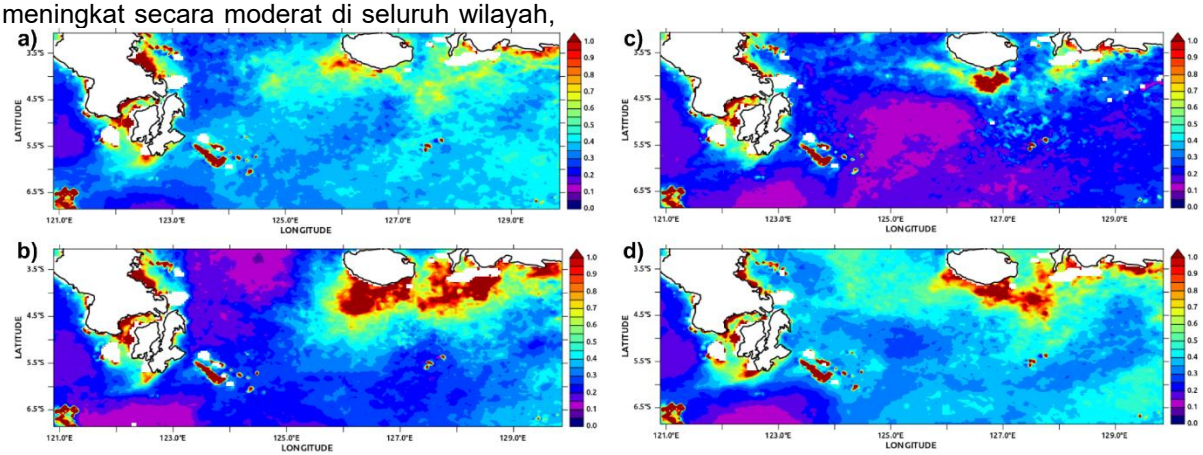
Distribusi klorofil-a selama musim peralhian I (MAM) menunjukkan variasi spasial yang dipengaruhi oleh dinamika oseanografi dan intensitas fenomena La Niña. Pada tahun 2022 (**Gambar 9c**), terjadi peningkatan signifikan konsentrasi klorofil-a di sepanjang pesisir barat dan selatan, dengan nilai mencapai >0.8 mg/m³, yang mengindikasikan terjadinya eutrofikasi akibat pasokan nutrien yang tinggi dari limpasan daratan dan peningkatan upwelling, selaras dengan kuatnya fenomena La Niña pada tahun tersebut. Sementara itu, tahun 2020 dan 2021 (**Gambar 9a** dan **9b**) menunjukkan konsentrasi klorofil-a moderat sekitar 0.3–0.6 mg/m³, terutama di wilayah pesisir timur dan selatan Pulau Seram. Tahun 2023 (**Gambar 9d**) mengalami penurunan klorofil-a secara umum dengan nilai <0.3 mg/m³, menunjukkan kondisi lingkungan yang kurang mendukung pertumbuhan fitoplankton.



Gambar 9. Distribusi klorofil-a a) tahun 2020, b) tahun 2021, c) tahun 2022, d) tahun 2023 pada musim peralihan I (MAM)

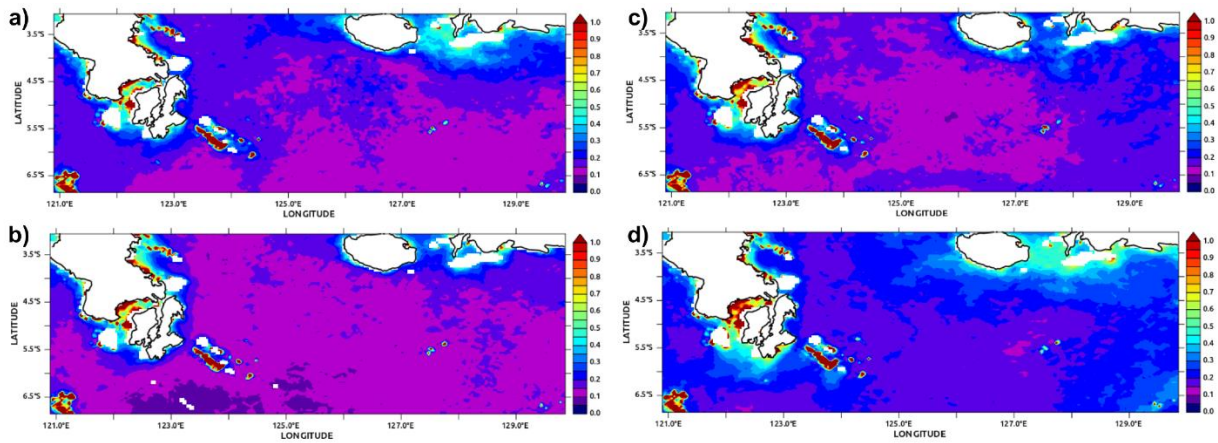
Distribusi konsentrasi klorofil-a di perairan Sulawesi Tenggara hingga Laut Banda selama musim barat (JJA) variasi spasial dipengaruhi oleh fenomena iklim tersebut (**Gambar 10**). Pada tahun 2020 (**Gambar 10a**), klorofil-a relatif rendah di perairan tengah dengan konsentrasi 0.2–0.5 mg/m³, sementara peningkatan (>0.7 mg/m³) teramati di perairan pesisir. Tahun 2021 (**Gambar 10b**) menunjukkan peningkatan signifikan di wilayah utara dan pesisir dengan konsentrasi mencapai 1.0 mg/m³, mengindikasikan adanya pengayaan nutrien kemungkinan akibat penguatan upwelling. Tahun 2022 (**Gambar**

10c), klorofil-a menurun tajam di sebagian besar wilayah, terutama di bagian tengah hingga timur dengan nilai dominan <0.3 mg/m³, yang mencerminkan kondisi perairan oligotrofik. Sementara itu, pada tahun 2023 (**Gambar 10d**), distribusi klorofil-a kembali meningkat secara moderat di seluruh wilayah, khususnya di perairan pesisir dengan kisaran 0.4–0.7 mg/m³. Fluktuasi ini mengindikasikan bahwa intensitas dan durasi La Niña berpengaruh terhadap ketersediaan nutrien dan produktivitas primer di kawasan ini (Kurniadi *et al.,* 2021).



Gambar 11. Distribusi klorofil-a a) tahun 2020, b) tahun 2021, c) tahun 2022, d) tahun 2023 pada musim barat (JJA)

Distribusi klorofil-a pada musim barat (SON) di wilayah perairan Sulawesi Tenggara hingga Laut Banda selama periode triple-dip La Niña 2020–2023 menunjukkan kondisi oligotrofik yang dominan dengan konsentrasi rendah di sebagian besar wilayah laut lepas (**Gambar 11**). Pada tahun 2020 (**Gambar 11a**), konsentrasi klorofil-a umumnya berada pada kisaran 0.1–0.4 mg/m³ dengan akumulasi moderat di sekitar pesisir. Tahun 2021 (**Gambar 11b**) memperlihatkan kondisi yang lebih oligotrofik, dengan nilai klorofil-a di bawah 0.2 mg/m³ hampir di seluruh wilayah, kecuali di zona pesisir yang tetap menunjukkan nilai tinggi (>0.8 mg/m³). Tahun 2022 (**Gambar 11c**) memperlihatkan pola serupa dengan konsentrasi dominan <0.3 mg/m³, menandakan rendahnya produktivitas primer selama periode ini. Namun, pada tahun 2023 (**Gambar 11d**), terjadi peningkatan konsentrasi klorofil-a di beberapa area pesisir dan bagian barat wilayah studi, dengan nilai mencapai 0.5–0.7 mg/m³.



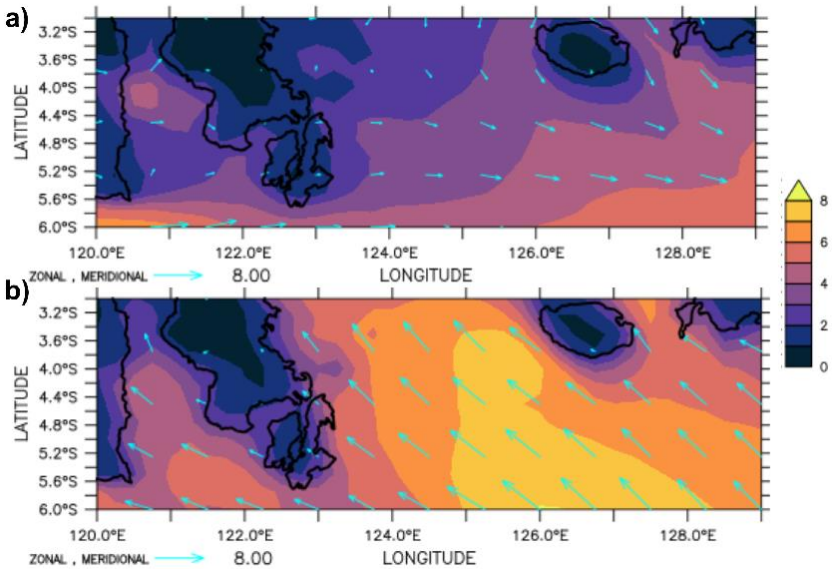
Gambar 11. Distribusi klorofil-a a) tahun 2020, b) tahun 2021, c) tahun 2022, d) tahun 2023 pada musim perlihan II (SON)

Pola Resultan Angin Permukaan pada Musim Timur dan Barat

Pola resultan angin permukaan di perairan Sulawesi Tenggara hingga Laut Banda menunjukkan perbedaan musiman yang signifikan selama periode triple-dip La Niña 2020–2023. Pada musim timur (**Gambar 12a**), arah angin dominan dari tenggara ke barat laut dengan kecepatan berkisar 4–6 m/s, menyebabkan terbentuknya angin timuran yang biasanya diasosiasikan dengan proses upwelling. Meskipun demikian, data sebaran klorofil-a menunjukkan konsentrasi relatif

rendah (<0.3 mg/m³) di wilayah perairan terbuka selama musim ini, mengindikasikan bahwa upwelling yang terjadi tidak cukup kuat atau berlangsung dalam durasi pendek. Suhu permukaan laut (SPL) yang tetap tinggi (28–29°C) mendukung hipotesis bahwa proses pendinginan permukaan dan suplai nutrien dari lapisan dalam kurang efektif pada musim timur selama fase La Niña tersebut (Marshal *et al.,* 2025).

Sebaliknya, pada musim barat (**Gambar 12b**), arah angin berbalik dari barat laut ke tenggara dengan intensitas serupa atau sedikit lebih tinggi (5–8 m/s), dan justru menunjukkan kontribusi signifikan terhadap peningkatan produktivitas primer. Konsentrasi klorofil-a tercatat lebih tinggi (>0.5 mg/m³ hingga >0.9 mg/m³), terutama di sepanjang pesisir Sulawesi Tenggara, Laut Banda barat, dan perairan dangkal lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun arah angin tidak mendukung upwelling klasik, proses turbulensi, resuspensi, dan kemungkinan limpasan darat atau dinamika arus lokal akibat interaksi La Niña dengan sirkulasi regional justru mendukung peningkatan konsentrasi fitoplankton. Fenomena ini menggarisbawahi bahwa dalam konteks triple-dip La Niña, respon ekosistem laut tropis tidak hanya dikendalikan oleh pola angin musiman, tetapi juga oleh interaksi kompleks antara suhu permukaan laut, dinamika arus, dan ketersediaan nutrien.



Gambar 12. Resultan angin permukaan pada dua musim berbeda (barat dan timur)

KESIMPULAN DAN SARAN

Fenomena *triple-dip La Niña* yang berlangsung pada periode 2020–2023 memberikan dampak signifikan terhadap dinamika oseanografi di perairan Sulawesi Tenggara hingga Laut Banda. Pendinginan suhu permukaan laut yang konsisten selama tiga tahun berturut-turut mengindikasikan penguatan sistem atmosfer-laut berskala basin yang memengaruhi pola musim, sirkulasi laut, serta kestabilan iklim regional di kawasan tropis barat Pasifik. Saran yang perlu diperhatikan adalah pemantauan jangka panjang terhadap indikator iklim seperti Oceanic Niño Index (ONI) perlu ditingkatkan untuk mengantisipasi dampak dari fenomena ENSO multiyear terhadap wilayah kelautan Indonesia. Penelitian lanjutan juga diperlukan untuk mengevaluasi dampak La Niña berkepanjangan terhadap sektor perikanan, pola cuaca ekstrem, dan keberlanjutan ekosistem laut secara holistik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada tim penelitian ini atas arahan dan bantuannya selama mengerjakan analisis pengolahan data dan interpretasi data.

DAFTAR PUSTAKA

Agatha Regen Purba, & Ayi Tarya. (2024). Studi variabilitas sea surface height anomaly (SSHA) di daerah upwelling Perairan Indonesia Timur Tahun 1993-2021. *Jurnal Ilmu Kelautan Kepulauan, 25*(1), 89–97.

Alfiqri, M. Z., Handoyo, G., & Widiaratih, R. (2024). Pengaruh El Niño 2015-2016 dan La Niña 2020-2021 Terhadap SPL, Klorofil-A, dan Intensitas Curah Hujan di Laut Sulawesi. *Indonesian Journal of Oceanography, 6*(3), 239–248. https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i3.20009

Alhadid, at, & Budi Nugroho, A. (2024). The

Study of Triple-Dip La Nina Phenomenon (2020-2023) and Its Impact on Atmospheric Dynamics and Rainfall in The Indonesian Region. *Science and Education, 3*, 707–716. Retrieved from https://cds.climate.copernicus.eu.

Dang, X., Chen, X., Bai, Y., He, X., Chen, C.-T. A., Li, T., … Zhang, Z. (2020). Impact of ENSO events on phytoplankton over the Sulu Ridge. *Marine Environmental Research, 157*, 104934. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104934

Dharma, K. S. (2024). The Influence of Climate Factors on the Incidence Area of Fusarium spp . in Shallots on Java Island during the Triple-Dip La Niña (2020 − 2022). *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia, 28*(2), 104–115. https://doi.org/10.22146/jpti.85639

Iwakiri, T., Imada, Y., Takaya, Y., Kataoka, T., Tatebe, H., & Watanabe, M. (2023). Triple-Dip La Niña in 2020–23: North Pacific Atmosphere Drives 2nd Year La Niña. *Geophysical Research Letters, 50*(22), 1–9. https://doi.org/10.1029/2023GL105763

Jeong, H., Park, H. S., Chowdary, J. S., & Xie, S. P. (2023). Triple-Dip La Niña Contributes to Pakistan Flooding and Southern China Drought in Summer 2022. *Bulletin of the American Meteorological Society, 104*(9), E1570–E1586. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0002.1

Jiang, S., Zhu, C., Hu, Z. Z., Jiang, N., & Zheng, F. (2023). Triple-dip La Niña in 2020-23: understanding the role of the annual cycle in tropical Pacific SST. *Environmental Research Letters, 18*(8). https://doi.org/10.1088/1748-9326/ace274

Kurniadi, A., Weller, E., Min, S. K., & Seong, M. G. (2021). Independent ENSO and IOD impacts on rainfall extremes over Indonesia. *International Journal of Climatology, 41*(6), 3640–3656. https://doi.org/10.1002/joc.7040

Liu, X., Wang, J., Cheng, X., & Du, Y. (2012). Abnormal upwelling and chlorophyll-a concentration off South Vietnam in summer 2007. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 117*(C7). https://doi.org/10.1029/2012JC008052

Marpaung, S., Prayogo, T., Yati, E., Dwi Purwanto, A., Nandika, M. R., Dirgahayu Domiri, D., & Kushardono, D. (2022). Analisis Karakteristik Net Primary Productivity Dan Klorofil-a Di Laut Banda Dan Sekitarnya. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis, 14*(1), 31–46. https://doi.org/10.29244/jitkt.v14i1.36757

Marshal, W., Roseli, N. H., Amin, R. M., & Akhir, M. F. B. M. (2025). Long-term biogeochemical variations in the southern South China Sea and adjacent seas: A model data analysis. *Journal of Sea Research, 204*(February), 102573. https://doi.org/10.1016/j.seares.2025.102573

Nurafifah, U. O., Zainuri, M., & Wirasatriya, A. (2022). Pengaruh ENSO dan IOD Terhadap Distribusi Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a Pada Periode Upwelling di Laut Banda. *Indonesian Journal of Oceanography, 4*(3), 74–85. https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i3.14971

Prasetyo, Y., & Nabilah, F. (2017). Pattern Analysis of El Nino and la Nina Phenomenon Based on Sea Surface Temperature (SST) and Rainfall Intensity using Oceanic Nino Index (ONI) in West Java Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 98*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/98/1/012041

Purba, N. P., Akhir, M. F., Faid, G. M., Roseli, N. H., Sinaga, I. F., & Faizal, I. (2025). Stratified Ocean Chlorophyll-a and Nutrient Availability in the Eastern Tropical Indian Ocean during La Nina 2022-2023. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries, 29*(1), 297–320. https://doi.org/10.21608/ejabf.2025.404325

Rachman, H. A., Hidayah, Z., & Yuliardi, A. Y. (2025). Dinamika Suhu Permukaan Laut dan Konsentrasi Klorofil-a di Perairan Laut Flores Hubungannya dengan Fenomena ENSO dan IOD. *Jurnal Kelautan Tropis, 28*(1), 53–62. https://doi.org/10.14710/jkt.v28i1.25779

Rahmat Amanulloh, F., & Romdani, A. (2024). Morpho-hydrodynamic processes impacted by the 2022-extreme La Niña event and high river discharge conditions in the southern coastal area of West Java, Indonesia. *Journal of Water and Climate Change, 15*(8), 4157–4176. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.343

Daniar, D. I., Arzhida, B., Novitarini, P. W., & Nugraheni, I. R. (2024). Identifikasi Variabilitas Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-a Lombok Strait pada Triple-Dip La Niña 2020-2022. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, *16*(3), 317-329.https://doi.org/10.29244/jitkt.v16i3.57981

Wirasatriya, A., Setiawan, R. Y., & Subardjo, P. (2017). The Effect of ENSO on the

Variability of Chlorophyll-a and Sea Surface Temperature in the Maluku Sea. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10*(12), 5513–5518. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2745207

Wirasatriya, A., Susanto, R. D., Setiawan, J. D., Ramdani, F., Iskandar, I., Jalil, A. R., … Maslukah, L. (2021). High chlorophyll-a areas along the western coast of south sulawesi-indonesia during the rainy season revealed by satellite data. *Remote Sensing, 13*(23). https://doi.org/10.3390/rs13234833

Yu, Y., Xing, X., Liu, H., Yuan, Y., Wang, Y., & Chai, F. (2019). The variability of chlorophyll-a and its relationship with dynamic factors in the basin of the South China Sea. *Journal of Marine Systems, 200*, 103230. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103230