

Pengaruh ENSO terhadap Variabilitas SPL dan Klorofil-a di Selat Sunda 2015 – 2025

Umi Holifah Mashur, Luthfi Anzani*, Willdan Aprizal Arifin

Program Studi Sistem Informasi Kelautan, Universitas Pendidikan Indonesia
Jl. Dr. Setiabudi No.229, Isola, Kec. Suasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40150
Email: *luthfi_anzani@upi.edu

Selat Sunda memiliki peran krusial dalam perputaran massa air laut di Indonesia, yang dipengaruhi oleh pertemuan dua aliran utama, yakni massa air yang berasal dari Laut Jawa dan massa air dari Samudra Hindia. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a serta pengaruh ENSO berdasarkan indeks ONI selama musim barat dan musim timur pada rentang waktu 2015–2025. Penelitian ini memanfaatkan data SPL dan klorofil-a berbasis citra satelit Aqua MODIS, data angin ERA5, serta data indeks ONI dari NOAA, dengan pendekatan kuantitatif deskriptif serta analisis spasial-temporal. Visualisasi dilakukan menggunakan interpolasi kriging pada ArcGIS dan pengolahan data angin menggunakan *Python*. Analisis dilakukan melalui korelasi Pearson serta regresi linear berganda. Temuan menunjukkan bahwa SPL memiliki pola musiman yang konsisten, ketika musim barat memiliki suhu lebih rendah dibandingkan dengan musim timur. Sementara klorofil-a ketika musim barat lebih tinggi yang disebabkan oleh curah hujan serta *runoff* daratan yang mengangkut nutrisi. Hubungan ONI terhadap SPL menunjukkan korelasi sangat rendah dan tidak signifikan pada musim barat ($r = 0,01$) dan korelasi negatif sedang pada musim timur ($r = -0,47$) dengan hasil regresi yang signifikan. Sementara hubungan ONI dengan klorofil-a bersifat lemah dan tidak signifikan pada kedua musim. Penelitian ini menunjukkan bahwa variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a tidak hanya dipengaruhi oleh ENSO, tetapi juga oleh dinamika oseanografi dan iklim regional perairan Selat Sunda.

Kata kunci: ENSO, Klorofil-a, ONI, Selat Sunda, Suhu Permukaan Laut

Abstract

ENSO Impact on Variability SST and Chlorophyll-A in Sunda Strait, 2015 – 2025

The Sunda Strait plays a crucial role in the circulation of seawater in Indonesia, which is influenced by the convergence of two major currents, one originating from the Java Sea and the other from the Indian Ocean. The purpose of this study is to analyze the variability of sea surface temperature and chlorophyll-a concentration, as well as the influence of ENSO based on the ONI index, during the west and east seasons over the 2015–2025 period. This study used SST and chlorophyll-a data from Aqua MODIS, ERA5 wind data, and ONI index data from NOAA, employing a descriptive quantitative approach and spatiotemporal analysis. Visualization was performed using kriging interpolation in ArcGIS, and wind data processing was conducted using Python. Pearson correlation analysis and multiple linear regression were performed. The results indicate that SST variability exhibits a consistent pattern, with lower temperatures during the western season compared to the eastern season. Meanwhile, chlorophyll-a levels are higher during the western season due to rainfall and terrestrial runoff transporting nutrients. The relationship between ONI and SST showed a very low and insignificant correlation during the west monsoon season ($r = 0,01$), and a moderate negative correlation during the east monsoon season ($r = -0,47$) with significant regression results. Meanwhile, the relationship between ONI and chlorophyll-a was weak and insignificant in both seasons. This study indicates that variations in SST and chlorophyll-a concentrations are influenced not only by ENSO but also by the oceanographic and regional climate dynamics of the Sunda Strait.

Keywords: Chlorophyll-a, ENSO, ONI, Sea Surface Temperature, Sunda Strait

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global ditandai oleh peningkatan suhu rata-rata di atmosfer, laut, dan permukaan tanah (Mulyani, 2020). Pada abad ke-21, rata-rata suhu permukaan global mengalami kenaikan sebesar $1,2^{\circ}\text{C}$, dengan rata-rata lebih tinggi di daratan sebesar $1,2^{\circ}\text{C}$, sementara di lautan terpantau rata-rata sebesar $0,9^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2021). Kenaikan suhu ini tidak hanya mempengaruhi atmosfer, tetapi juga memiliki dampak besar terhadap kondisi perairan. Perubahan suhu laut memicu sejumlah efek pada ekosistem, seperti peningkatan permukaan air laut, dampak di daerah pesisir, penurunan pH laut, dan kestabilan ekosistem serta keragaman hayati laut (Karlina and Viana, 2020). Salah satu faktor yang berkontribusi pada perubahan suhu laut adalah

fenomena iklim global yang dikenal sebagai *El Nino-Southern Oscillation* (ENSO). Menurut Ulandari *et al.* (2025) ENSO merupakan fenomena yang disebabkan oleh fluktuasi tekanan udara dan suhu permukaan laut (SPL) di wilayah tropis Samudra Pasifik, yang memiliki pengaruh besar terhadap perubahan iklim global.

Fenomena ENSO terbagi menjadi tiga fase, yakni Netral, El-Nino, dan La-Nina (Adrian *et al.*, 2025). Fase El-Nino ditandai dengan meningkatnya suhu air laut di bagian timur Samudra Pasifik (Ulandari *et al.*, 2025). Sementara fase La-Nina ditandai dengan meningkatnya curah hujan serta fluktuasi tinggi muka air laut (Hamdani, 2025). Fenomena ini berkaitan erat dengan dinamika sirkulasi angin dan atmosfer yang terjadi di atas lautan, serta massa atmosfer dalam lapisan udara di sepanjang laut di kawasan garis khatulistiwa (Haryanto *et al.*, 2021).

Dinamika perairan Indonesia, selain dipengaruhi oleh fenomena ENSO berskala global, dipengaruhi juga oleh sistem angin musiman yang diistilahkan sebagai Arus Monsun Indonesia (Armondo). Armondo terbentuk akibat perubahan angin muson barat yang berlangsung dari Desember hingga Februari dan angin muson timur yang berlangsung dari Juni hingga Agustus, yang mempengaruhi dinamika permukaan laut, seperti distribusi SPL, pola arus permukaan, distribusi massa air, serta proses pencampuran air yang meningkatkan kesuburan perairan (Agus, 2024; Maulana *et al.*, 2021). Perubahan pola arus yang disebabkan oleh angin monsun berperan dalam mengontrol distribusi *nutrient*, seperti konsentrasi klorofil-a (Patrick *et al.*, 2024). Dalam penelitian ini, Armondo berfungsi sebagai faktor pendukung yang dapat memperkuat atau memperlemah dinamika oseanografi akibat pengaruh ENSO di wilayah perairan Indonesia.

Dampak ENSO tidak hanya terbatas pada wilayah Samudra Pasifik, tetapi juga meluas hingga ke perairan Indonesia yang dikenal sebagai kawasan *Indonesia Maritime Continent* (IMC). Selama fenomena El-Nino dan La-Nina, variasi suhu di perairan Indonesia berdampak pada intensitas angin pasat yang mempengaruhi suhu laut, curah hujan, serta tinggi muka air laut di wilayah Indonesia (Hamdani, 2025; Yuniasih *et al.*, 2023). Penelitian sebelumnya (Adrian *et al.*, 2025; Amalia *et al.*, 2025; Haryanto *et al.*, 2021; Rachman *et al.*, 2025) menunjukkan bahwa fenomena ENSO memicu perubahan besar dalam oseanografi, di mana pada saat El-Nino berlangsung terjadi kenaikan SPL dan konsentrasi klorofil-a karena proses *upwelling* yang intens, sementara pada saat La-Nina suhu air lebih hangat dengan lapisan termoklin yang lebih dalam yang menyebabkan penurunan aktivitas *upwelling* dan produktivitas perairan. Perubahan oseanografi tersebut dapat dipicu oleh kondisi lokal seperti angin monsun yang berperan mempengaruhi dinamika perairan di berbagai wilayah perairan Indonesia, salah satunya perairan Selat Sunda yang memiliki fungsi krusial dalam perputaran massa air laut.

Selat Sunda terletak pada kisaran koordinat sekitar 6,0°LS dan 105,0°BT yang memisahkan Pulau Jawa dengan Pulau Sumatera dan mempertemukan Laut Jawa dengan Samudra Hindia (Susanto *et al.*, 2016). Posisi geografis tersebut menjadikan perairan Selat Sunda memiliki peran krusial dalam perputaran massa air laut di Indonesia, hal ini disebabkan oleh kondisi fisik yang dinamis yang dibentuk oleh Armondo yang melintas di Selat Sunda (Arifin *et al.*, 2025; Fahlevi *et al.*, 2022; Ramadlanie *et al.*, 2023). Pergerakan massa air ini dipengaruhi oleh pertemuan dua aliran utama, yakni massa air yang berasal dari Laut Jawa dan massa air dari Samudra Hindia (Amri, 2008 dalam Ramadlanie *et al.* (2023)). Interaksi kedua massa air tersebut memberikan dampak positif terhadap interaksi nutrien, SPL, dan konsentrasi klorofil-a (Anggraeni *et al.*, 2025; Fahlevi *et al.*, 2022; Tarigan *et al.*, 2020;). Fahlevi *et al.* (2022) menyebutkan bahwa SPL di Selat Sunda tergolong tinggi, pada kisaran antara 29°C hingga 30,2°C, yang berdampak pada penyebaran massa air dan keanekaragaman hayati laut. Sejalan dengan kondisi tersebut, penelitian (Tarigan *et al.*, 2020) mengemukakan bahwa konsentrasi klorofil-a secara keseluruhan di Selat Sunda tergolong tinggi, dengan rata-rata distribusi spasial yang mencapai 0,6796 mg/m³. Hal ini menunjukkan besarnya produktivitas ekosistem di wilayah perairan ini. Selain itu, kondisi oseanografi wilayah ini juga dipengaruhi oleh siklus angin monsun. Namun, fokus utama penelitian ini tertuju pada pengaruh ENSO terhadap variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a, dengan mempertimbangkan kondisi angin monsun sebagai faktor pendukung.

Penelitian Pesoth *et al.* (2024) yang dilakukan di perairan Laut Maluku menunjukkan bahwa saat fenomena El-Nino aktif terjadi peningkatan konsentrasi klorofil-a dan penurunan SPL, sedangkan ketika fenomena La-Nina aktif, hal sebaliknya berlangsung, dengan pola distribusi yang menunjukkan pencampuran (*mixing*) pada SPL dan peningkatan yang merata pada konsentrasi klorofil-a. Feberrito *et al.* (2025) dalam penelitiannya di perairan selatan Maluku menunjukkan bahwa SPL dan konsentrasi klorofil-a memperlihatkan korelasi negatif, akan tetapi hubungan tersebut dapat berubah selama periode ENSO aktif. Penelitian Berliani *et al.* (2025), menunjukkan bahwa terdapat hubungan kuat antara SPL dengan *Oceanic Nino Index* (ONI) di

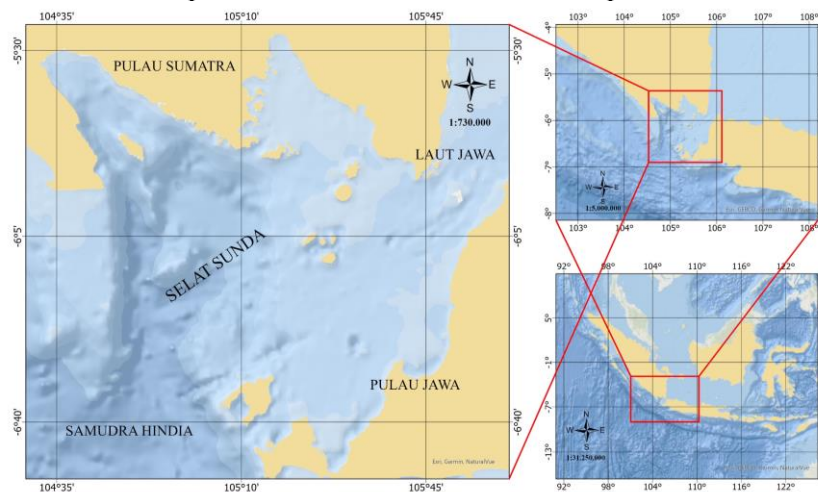
wilayah perairan Barat Sumatera, khususnya Lampung. Sejalan dengan itu, Trenggono *et al.* (2018) menemukan bahwa di bagian utara Selat Sunda, konsentrasi klorofil-a tidak dipengaruhi oleh El-Nino akan tetapi oleh aliran Sungai Musi, sedangkan di bagian selatan SPL dipengaruhi oleh El-Nino yang memicu penurunan suhu laut. Di samping itu, penelitian Ramadlanie *et al.* (2023) menyatakan bahwa puncak *upwelling* di Selat Sunda wilayah selatan ketika musim peralihan II dipengaruhi oleh arus barat dan angin Munson Tenggara, dengan konsentrasi klorofil-a 0,77 mg/m³ dan suhu 28,5°C, sedangkan wilayah utara nilai SPL tinggi 29°C hingga 30°C dengan konsentrasi klorofil-a yang stabil 0,3 – 0,5 mg/m³.

Meskipun beberapa penelitian telah mengkaji pengaruh ENSO terhadap kondisi oseanografi di berbagai wilayah perairan Indonesia, studi yang secara khusus menganalisis pengaruh fenomena ENSO terhadap variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a di perairan Selat Sunda masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan guna memahami bagaimana pengaruh fenomena ENSO terhadap variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a di perairan Selat Sunda. Analisis pengaruh ENSO menggunakan indikator ONI, dengan mempertimbangkan variasi musim barat dan musim timur. Dalam analisis ini, kondisi angin monsun dipertimbangkan sebagai faktor pendukung dalam memahami dinamika oseanografi yang terjadi di wilayah ini. Studi ini sangat penting untuk memahami dinamika ekosistem perairan serta perkembangan oseanografi sehingga hasilnya diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai pengaruh perubahan iklim terhadap produktivitas laut, dan menjadi landasan ilmiah untuk pengelolaan sumber daya laut yang berkelanjutan di wilayah perairan Selat Sunda.

MATERI DAN METODE

Penelitian berlokasi di Selat Sunda yang terletak pada koordinat 104,0°BT-105,0°BT dan -6°LS hingga -5°LS. Lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 1. Studi ini dilaksanakan pada periode Desember 2025 hingga April 2026, dengan menganalisis data historis selama sebelas tahun dari 2015 hingga 2025. Data yang digunakan dalam studi ini meliputi data bulanan, baik data utama maupun data pembanding. Data utama meliputi parameter oseanografi seperti data SPL, data klorofil-a yang diperoleh dari citra satelit MODIS level 3 beresolusi 4 km dengan format NetCDF (.nc). Data ini diakses melalui website *NASA Ocean Color*. Selain itu, terdapat data iklim yang meliputi data angin yang diperoleh dari ERA5 beresolusi 0.25°×0.25° dengan format NetCDF (.nc) yang diakses melalui website *Copernicus Climate*, dan data indeks ONI yang berfungsi untuk mempresentasikan dinamika ENSO. Data ini diunduh melalui website *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Data pembanding bersumber dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Stasiun Maritim Kelas 1 Serang dan Stasiun Maritim Lampung, meliputi data SPL.

Penelitian ini menerapkan metode kuantitatif dengan pendekatan deskriptif serta analisis spasial-temporal. Menurut Yanto *et al.* (2025) metode kuantitatif deskriptif bertujuan untuk menampilkan, menjelaskan, dan menyimpulkan data dengan cara yang sistematis dan terstruktur berdasarkan pola yang diperoleh dari sampel data yang terukur. Analisis spasial-temporal digunakan untuk memahami fenomena di wilayah studi. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai pengaruh fenomena ENSO terhadap SPL dan konsentrasi klorofil-a di perairan Selat Sunda.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan *software* SeaDAS untuk proses pemotongan data SPL serta klorofil-a berdasarkan wilayah perairan Selat Sunda. Selanjutnya dilakukan proses *filtering* data atau pembersihan data kosong (NaN) melalui Microsoft Excel untuk memastikan keakuratan data. Setelah data diverifikasi, langkah selanjutnya adalah melakukan pengelompokan data berdasarkan dua musim utama di Indonesia, yakni musim barat (Desember – Februari) serta musim timur (Juni – Agustus). Tahap selanjutnya dilakukan pemrosesan visualisasi data dengan menggunakan *software* ArcGIS versi 10.8 dengan menggunakan metode interpolasi Kriging. Kriging merupakan metode interpolasi yang dimanfaatkan dalam data geostatistik dengan memanfaatkan data dari titik-titik tertentu yang telah diketahui untuk memperkirakan data parameter dari titik pengamatan yang tidak diketahui. Menurut Feberito *et al.* (2025) interpolasi kriging dapat memperkirakan nilai SPL dan klorofil-a pada titik yang belum terukur. Selain itu, pengolahan data juga dilakukan menggunakan *Python* melalui *platform* Google *Collaboratory*, yang berfungsi dalam pengolahan, analisis, dan visualisasi baik spasial maupun numerik.

Analisis data dalam penelitian ini meliputi korelasi serta regresi linear berganda. Analisis korelasi yang digunakan yaitu korelasi Pearson, yang berperan untuk mengukur hubungan dan tingkat keakuratan antara dua variabel. Rumus korelasi Pearson dihitung menggunakan persamaan (1) (Pearson, 1896). Hasil koefisien korelasi (r) diinterpretasikan berdasarkan pada Tabel 1. Kriteria hubungan nilai koefisien korelasi (Pearson, 1896).

$$r = \frac{n\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n\sum X^2 - (\sum X)^2)(n\sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (1)$$

Keterangan: r = koefisien korelasi; X = variabel terikat; Y = variabel bebas; n = banyaknya data.

Analisis regresi linear berganda dihitung menggunakan persamaan (2) (Susanto and Suryadi (2010), Analisis ini bertujuan untuk menentukan seberapa besar pengaruh fenomena ENSO berdasarkan indeks ONI dan angin monsun (variabel independen) terhadap SPL dan konsentrasi klorofil-a (variabel dependen). Signifikansi model diuji melalui nilai p-model (Prob (F-statistic)). Model dinyatakan signifikan apabila p-model kurang dari 0,05 dan tidak signifikan apabila p-model lebih dari 0,05 (Susanti and Fazrina, 2022). Hasil koefisien determinasi (R^2) diinterpretasikan berdasarkan tabel 2 (Sugiyono, 2009).

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \mu \quad (2)$$

Dimana: Y = indeks ONI; X_1 = SPL; X_2 = konsentrasi klorofil-a; $\beta_1 \beta_2$ = koefisien masing-masing variabel X ; μ = error.

Penentuan klasifikasi fenomena ENSO berdasarkan indeks ONI, di mana fase La Nina terjadi ketika anomali ONI berada di bawah -0,5. Di sisi lain, fase El Nino terjadi jika anomali ONI lebih dari 0,5, sedangkan fase normal/netral berlangsung jika nilai ONI berada di antara -0,5 hingga 0,5 (Lindsey, 2009).

Tabel 1. Kriteria Hubungan Nilai Koefisien Korelasi (r)

Nilai Koefisien Negatif	Nilai Koefisien Positif	Interpretasi
-0,00 s.d -0,19	0,00 s.d 0,19	Sangat Rendah
-0,20 s.d -0,39	0,20 s.d 0,39	Rendah
-0,40 s.d -0,59	0,40 s.d 0,59	Sedang
-0,60 s.d -0,79	0,60 s.d 0,79	Kuat
-0,80 s.d -1,00	0,80 s.d 1,00	Sangat Kuat

Tabel 2. Kriteria Nilai Koefisien Determinasi (R^2)

Nilai Koefisien Determinasi (R^2)	Interpretasi
0,00 – 0,19	Sangat Rendah
0,20 – 0,39	Rendah
0,40 – 0,59	Sedang
0,60 - 0,79	Kuat
0,80 – 1,00	Sangat Kuat

HASIL DAN PEMBAHASAN

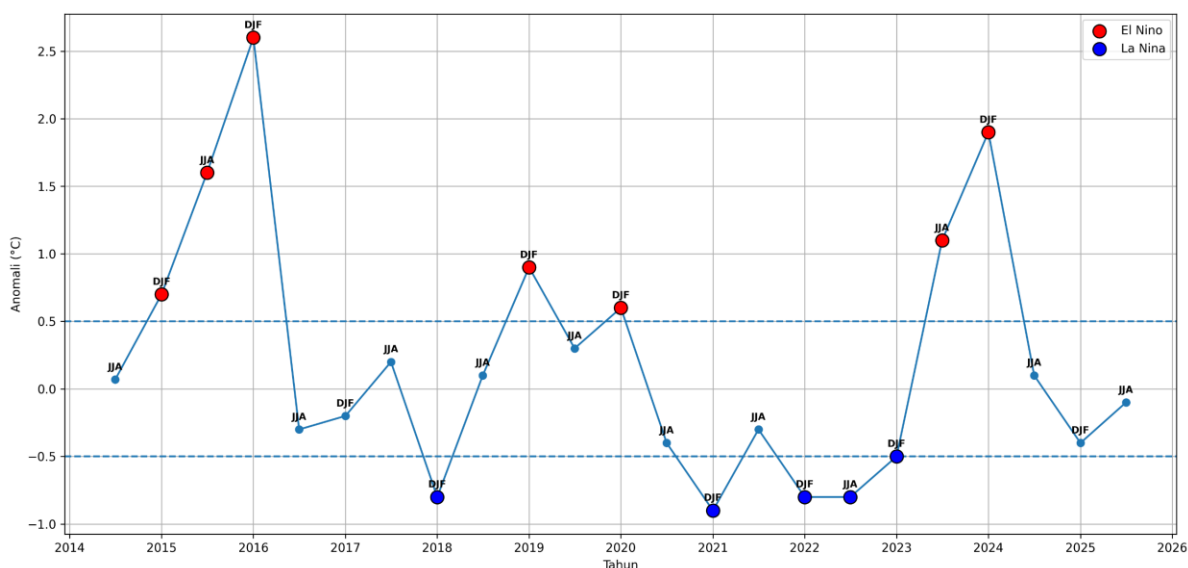
Karakteristik Fenomena ENSO Berdasarkan Indeks ONI

Hasil analisis indeks *Oceanic Nino Index* (ONI) pada Gambar 2 menunjukkan adanya variabilitas temporal fenomena El Nino dan La Nina selama periode 2015 hingga 2025, baik selama musim barat maupun selama musim timur. Berdasarkan nilai ONI, fase El Nino yang ditandai dengan warna merah, teridentifikasi pada kejadian El Nino 2014/2015, El Nino 2015/2016, El Nino 2018/2019, El Nino 2019/2020, dan El Nino 2023/2024 dengan intensitas bervariasi. Nilai ONI pada musim barat tahun 2014/2015 sebesar 0,7 dikategorikan sebagai fase El Nino lemah dan meningkat pada musim timur sebesar 1,6 yang dikategorikan sebagai fase El Nino kuat, kemudian mencapai puncaknya pada musim barat tahun 2015/2016 dengan nilai ONI sebesar 2,6 sehingga dikategorikan sebagai El Nino sangat kuat. Selanjutnya, pada tahun 2018/2019 dan 2019/2020 teramati fase El Nino lemah dengan nilai ONI 0,9 dan 0,5 yang terjadi di musim barat. Kemudian kembali mengalami fase El Nino kuat pada tahun 2023/2024 sebesar 1,1 di musim timur dan nilai ONI sebesar 1,9 di musim barat. Fase El Nino pada musim timur hanya teridentifikasi pada tahun 2015/2016 dan 2023/2024, yang menunjukkan bahwa kemunculannya relatif lebih terbatas dibandingkan dengan musim barat.

Sementara itu, fase La Nina ditandai dengan warna biru teridentifikasi pada kejadian La Nina 2017/2018, La Nina 2020/2021, La Nina 2021/2022, serta La Nina 2022/2023. Selama terjadinya fase ini, dikategorikan sebagai fase La Nina lemah. Pada tahun 2017/2018, nilai ONI tercatat sebesar -0,8 yang terjadi di musim barat, sementara pada tahun 2020/2021 yang terjadi di musim yang sama dengan nilai ONI tercatat sebesar -0,9. Selanjutnya, pada tahun 2021/2022 nilai ONI tercatat sebesar -0,8 yang terjadi di musim barat, sementara itu, pada tahun 2022/2023 nilai ONI di musim timur tercatat sebesar -0,8 dan di musim barat tercatat sebesar -0,5. Secara keseluruhan, sebaran dan intensitas fase La Nina ini mencerminkan fluktuasi fase dingin ENSO, yang cenderung berfluktuasi namun umumnya tidak mencapai kategori kuat selama periode pengamatan.

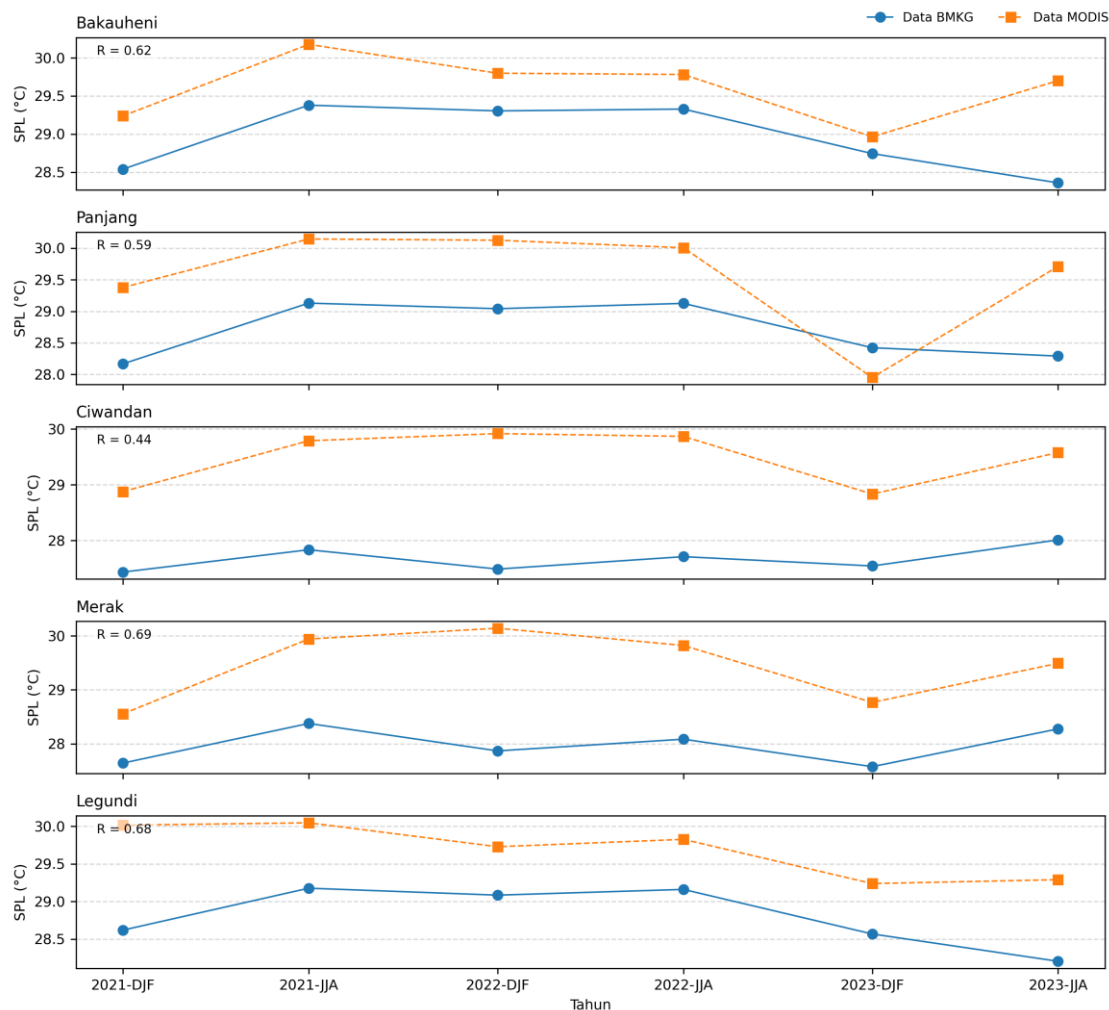
Validasi Data SPL MODIS dengan Data SPL BMKG

Validasi data SPL dilakukan melalui perbandingan antara data hasil pengolahan citra satelit MODIS dengan data observasi dari BMKG pada periode 2021-2023 di lima stasiun pengamatan, yaitu Bakauheni, Panjang, Ciwandan, Merak, dan Legundi. Perbandingan ini disajikan dalam bentuk grafik time series rata-rata musiman yang mencakup musim barat dan musim timur yang dilengkapi dengan nilai koefisien korelasi (r) untuk menunjukkan tingkat hubungan antara kedua dataset. Berdasarkan Gambar 3, pola variasi SPL antara data MODIS dan data BMKG menunjukkan kecenderungan yang serupa pada seluruh stasiun pengamatan, yang mengindikasikan bahwa data satelit mampu mempresentasikan dinamika SPL secara temporal, khususnya dalam mendeteksi variabilitas musiman.



Gambar 2. Grafik Indeks *Oceanic Nino Index* (ONI) 2015 – 2025

Nilai korelasi (r) yang diperoleh pada masing-masing stasiun menunjukkan hubungan dalam kategori sedang hingga kuat. Nilai r pada Stasiun Bakauheni sebesar 0,62 yang dikategorikan kuat, Stasiun Panjang dengan nilai $r = 0,59$, serta Stasiun Ciwandan dengan nilai $r = 0,44$ yang dikategorikan sedang. Stasiun Merak dan Legundi memiliki nilai r sebesar 0,69 dan 0,68 yang dikategorikan kuat. Nilai yang diperoleh mengindikasikan adanya hubungan yang signifikan antara data satelit dan data observasi. Korelasi yang lebih rendah pada stasiun Ciwandan mengindikasikan adanya pengaruh lokal yang lebih kompleks, seperti dinamika arus dan interaksi massa air dibandingkan dengan stasiun lainnya.



Gambar 3. Grafik Time Series Rata-rata SPL MODIS dan BMKG tahun 2021 – 2023

Tabel 4. Nilai Rata-rata SPL MODIS dan BMKG Musim Barat dan Musim Timur Tahun 2021 – 2023

Stasiun	Musim	SPL MODIS (°C)	SPL BMKG (°C)	Selisih (°C)
Bakauheni	Barat	29,3	28,8	0,47
Bakauheni	Timur	29,8	29,0	0,86
Panjang	Barat	29,1	28,5	0,61
Panjang	Timur	29,9	28,8	1,11
Ciwandan	Barat	29,2	27,4	1,72
Ciwandan	Timur	29,7	27,8	1,90
Merak	Barat	29,1	27,7	1,46
Merak	Timur	29,7	28,2	1,51
Legundi	Barat	29,6	28,7	0,90
Legundi	Timur	29,7	28,8	0,87

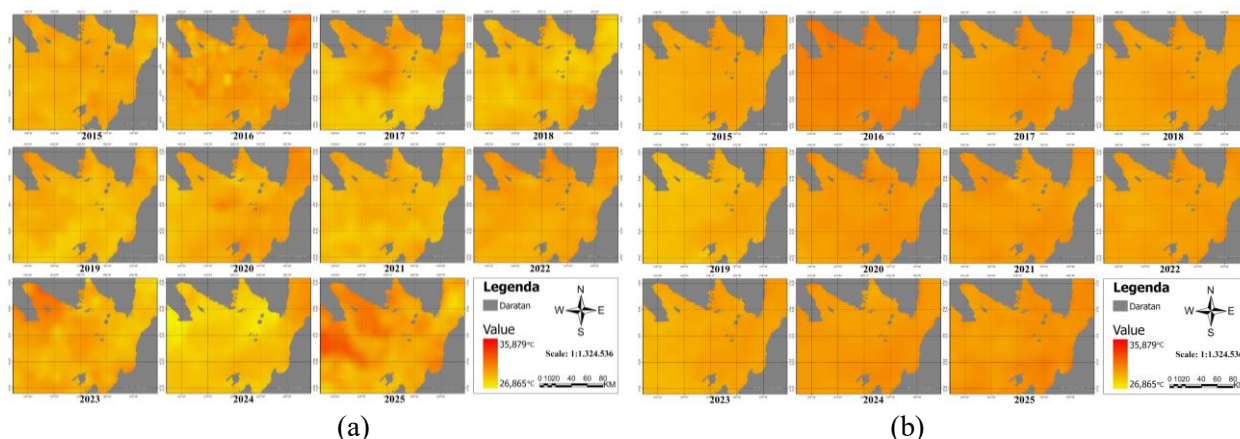
Berdasarkan Tabel 4, nilai rata-rata SPL data BMKG dan data MODIS ketika musim barat dan musim timur di setiap stasiun, beserta nilai selisih dataset. Secara keseluruhan, nilai SPL dari kedua dataset relatif lebih tinggi ketika musim timur dibandingkan dengan nilai SPL saat musim barat. Nilai SPL data MODIS secara konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan data BMKG, dengan nilai selisih kisaran 0,47°C hingga 1,90°C. Selisih terkecil terdapat pada musim barat di stasiun Bakauheni dengan nilai 0,47°C, sedangkan nilai terbesar terjadi pada musim timur sebesar 1,90°C di stasiun Ciwandan. Kondisi ini mengindikasikan adanya kecenderungan overestimasi oleh data satelit. Nilai selisih suhu kurang dari 0,5°C hingga sekitar 2°C masih dianggap representatif untuk validasi data SPL berbasis satelit, sehingga perbedaan yang diamati masih berada dalam rentang yang dapat diterima (He *et al.*, 2023). Data MODIS masih memiliki tingkat representatif yang cukup tinggi untuk digunakan dalam analisis variabilitas SPL jangka panjang dan cakupan spasial yang luas.

Variabilitas SPL dan Konsentrasi Klorofil-a

Variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a di perairan Selat Sunda selama periode 2015 hingga 2025 menunjukkan dinamika yang dipengaruhi oleh variabilitas musiman dan variabilitas iklim. Berdasarkan hasil visualisasi Gambar 4 dan didukung oleh data statistik pada Tabel 5, distribusi SPL di perairan Selat Sunda menunjukkan siklus musiman yang relatif konsisten, ketika nilai SPL musim timur cenderung lebih tinggi dibandingkan saat musim barat. Nilai SPL pada musim timur berkisar antara 27,5–35,8°C, dengan suhu terendah berada pada suhu 27,5°C pada tahun 2019 serta suhu tertinggi berada pada tahun 2023 dengan suhu 35,8°C. Sedangkan ketika musim barat berkisar antara 26,8–33,2°C, suhu terendah pada musim ini tercatat pada tahun 2024 dengan suhu 26,8°C, dan suhu tertinggi tercatat sebesar 33,2°C pada tahun 2023.

Tabel 5. Variabilitas SPL Musim Barat dan Musim Timur Tahun 2015 – 2025

Tahun	Musim	Minimum (°C)	Maksimum (°C)	Rata-rata (°C)	Musim	Minimum (°C)	Maksimum (°C)	Rata-rata (°C)
2015	Barat	28,6	30,6	29,7	Timur	29,1	33,7	30,0
2016	Barat	28,2	33,0	30,2	Timur	30,5	32,6	31,1
2017	Barat	28,0	31,2	29,4	Timur	29,6	32,5	30,3
2018	Barat	27,8	30,6	29,3	Timur	29,5	31,7	30,2
2019	Barat	28,1	31,5	29,5	Timur	27,4	35,5	29,4
2020	Barat	28,1	31,3	29,8	Timur	29,1	31,6	30,3
2021	Barat	28,0	30,5	29,4	Timur	29,4	31,5	30,4
2022	Barat	29,1	31,8	30,0	Timur	29,5	31,6	30,2
2023	Barat	27,8	33,2	29,8	Timur	28,6	35,9	29,8
2024	Barat	26,9	32,5	28,9	Timur	29,5	32,4	30,4
2025	Barat	27,8	32,9	30,2	Timur	29,6	33,8	30,7



Gambar 4. Variabilitas SPL Musim Barat (a) dan Musim Timur (b) Tahun 2015 – 2025

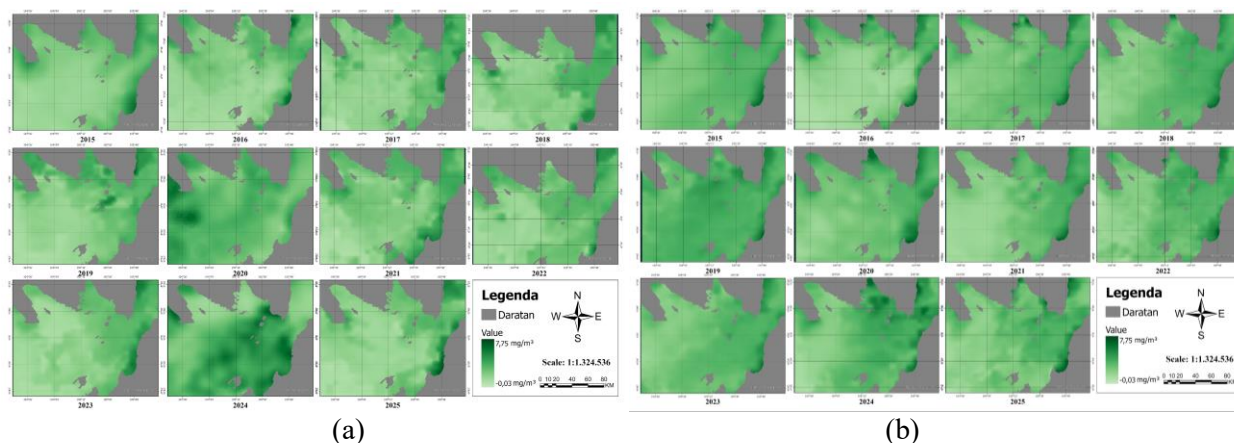
Berdasarkan nilai rata-rata pada Tabel 5, siklus ini semakin terlihat jelas di mana rata-rata SPL pada musim timur umumnya berada di atas 30°C, seperti pada tahun 2016 dengan suhu 31,1°C, tahun 2021 dengan suhu 30,4°C, dan tahun 2025 dengan suhu 30,7°C. Sebaliknya, ketika musim barat, nilai rata-rata SPL cenderung lebih rendah dan berada pada kisaran 28,9-30,2°C. Pemanasan ini memperlihatkan bahwa ketika musim timur kondisi SPL di perairan Selat Sunda mengalami pemanasan yang lebih tinggi (Daud *et al.*, 2025). Kondisi tersebut terlihat jelas pada Gambar 4, di mana warna dominan pada musim timur menunjukkan intensitas suhu yang lebih tinggi serta lebih merata dibandingkan pada musim barat.

Rentang nilai minimum dan maksimum yang besar, terutama pada musim timur, menunjukkan bahwa terdapat fluktuasi suhu yang signifikan antartahun. Penelitian Wangdiarta *et al.* (2024) menyatakan bahwa selain pengaruh musiman, faktor iklim seperti ENSO juga berperan terhadap dinamika SPL. Perubahan tersebut berkaitan dengan faktor meteorologi dan oseanografi, seperti curah hujan, kecepatan angin, intensitas radiasi matahari, serta penguapan yang berperan dalam proses distribusi SPL (Asyam *et al.*, 2024; Kurniawan *et al.*, 2025).

Distribusi konsentrasi klorofil-a menunjukkan siklus yang berlawanan dengan SPL. Berdasarkan Gambar 5, pada musim barat, nilai klorofil-a cenderung lebih tinggi dan tersebar di wilayah pesisir dibandingkan dengan musim timur yang relatif lebih rendah dan merata. Dapat dilihat pada Tabel 6, nilai konsentrasi klorofil-a pada musim barat berkisar antara -0,03–7,75 mg/m³. Nilai konsentrasi terendah berada pada tahun 2019 dengan konsentrasi -0,03 mg/m³ serta nilai tertinggi sebesar 7,75 mg/m³ yang berlangsung pada tahun 2025. Sementara itu, pada musim timur nilai klorofil-a cenderung lebih rendah dengan konsentrasi antara 0,05–7,51 mg/m³, dengan nilai terendah 0,05 mg/m³ pada tahun 2025 dan nilai klorofil-a tertinggi sebesar 7,51 mg/m³ pada tahun 2019.

Tabel 6. Variabilitas Konsentrasi Klorofil-a Musim Barat dan Musim Timur Tahun 2015 – 2025

Tahun	Musim	Minimum (mg/m ³)	Maksimum (mg/m ³)	Rata-rata (mg/m ³)	Musim	Minimum (mg/m ³)	Maksimum (mg/m ³)	Rata-rata (mg/m ³)
2015	Barat	0,10	4,12	0,68	Timur	0,21	5,50	0,98
2016	Barat	0,06	6,92	0,83	Timur	0,07	5,09	0,96
2017	Barat	0,05	3,40	0,59	Timur	0,10	6,29	1,06
2018	Barat	0,07	3,18	0,54	Timur	0,14	5,70	1,06
2019	Barat	-0,03	5,07	0,68	Timur	0,19	6,76	1,18
2020	Barat	0,27	5,86	1,60	Timur	0,14	6,82	1,09
2021	Barat	0,05	3,86	0,73	Timur	0,12	6,48	0,82
2022	Barat	0,05	7,72	0,68	Timur	0,11	5,93	0,99
2023	Barat	0,07	4,50	0,68	Timur	0,14	4,48	0,81
2024	Barat	0,49	7,08	2,53	Timur	0,08	7,51	1,11
2025	Barat	0,05	7,75	0,80	Timur	0,05	7,50	1,20



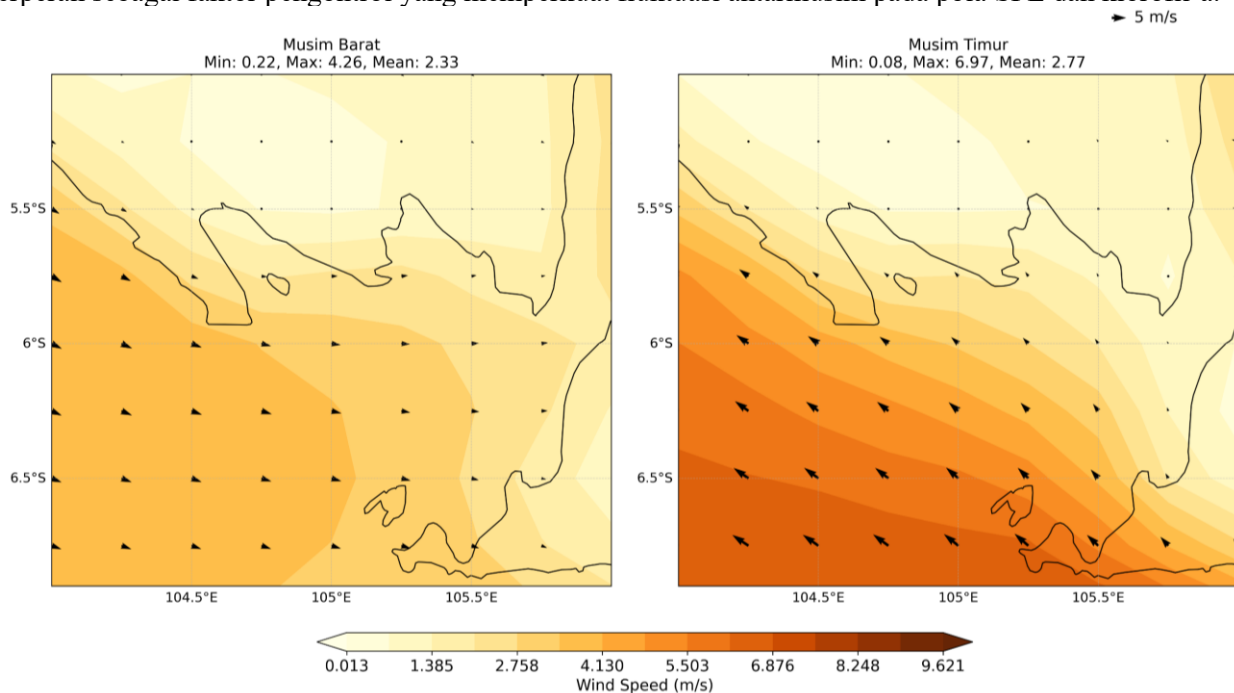
Gambar 5. Variabilitas Konsentrasi Klorofil-a Musim Barat (a) dan Musim Timur (b) Tahun 2015 – 2025

Berdasarkan nilai rata-rata pada Tabel 6, nilai konsentrasi ketika musim barat berkisar antara 0,54 hingga 0,83 mg/m³, namun angka tersebut secara signifikan meningkat pada tahun 2020 sebesar 1,60 mg/m³ dan sebesar 2,53 mg/m³ pada tahun 2024. Sementara itu, pada musim timur, nilai rata-rata lebih konsisten dengan kisaran 0,81 hingga 1,20 mg/m³. Rentang nilai minimum dan maksimum yang lebih besar saat musim barat menunjukkan bahwa lebih fluktuatif dibandingkan dengan musim timur.

Variabilitas konsentrasi klorofil-a dipengaruhi oleh kecepatan angin dan curah hujan. Penelitian Munandar *et al.* (2021), menjelaskan bahwa tingginya kecepatan angin berkontribusi terhadap tingginya konsentrasi klorofil-a. Selain itu, ketika musim barat, tingginya curah hujan turut berperan dalam meningkatkan pasokan nutrisi dari daratan melalui aliran sungai menuju laut, sehingga menyebabkan konsentrasi klorofil-a cenderung lebih tinggi (Agnadiva *et al.*, 2025; Graha *et al.*, 2024). Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, kandungan konsentrasi klorofil-a yang tinggi umumnya berada di wilayah spesisir. Hal ini mengindikasikan bahwa kontribusi nutrisi dari daratan merupakan salah satu faktor dominan dalam mengontrol produktivitas perairan wilayah tersebut.

Variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a di perairan Selat Sunda juga tidak terlepas dari pengaruh dinamika angin monsun (Armondo). Arah dan kecepatan angin saat musim barat dan musim timur memiliki perbedaan karakteristik yang cukup jelas, yang dapat dilihat pada Gambar 6. Ketika musim barat, arah angin bertiup dari barat laut menuju tenggara dengan kecepatan yang relatif lebih rendah dan lebih merata, terlihat dari nilai rata-rata kecepatan angin ketika musim barat sekitar 2,35 m/s, dengan kisaran minimum 0,22 m/s dan maksimum sebesar 4,32 m/s. Sebaliknya, ketika musim timur, arah angin lebih kuat berasal dari tenggara menuju barat laut dengan kecepatan yang lebih tinggi, ditunjukkan oleh rata-rata sekitar 2,74 m/s dengan nilai maksimum mencapai 6,87 m/s.

Perbedaan karakteristik angin ini berpengaruh langsung terhadap kondisi oseanografi di perairan Selat Sunda. Angin lebih kuat saat musim timur yang mendorong pergerakan massa air permukaan, namun tidak selalu meningkatkan pencampuran ke lapisan yang lebih dalam. Kondisi ini menyebabkan panas yang tersebar di lapisan permukaan, sehingga nilai SPL lebih tinggi dan relatif merata selama musim timur, sejalan dengan Dewi *et al.* (2020) kecepatan angin yang tinggi menyebabkan pelepasan panas laten yang lebih besar dan SPL yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada musim barat, ketika kecepatan angin lebih rendah, peningkatan kandungan nutrisi di perairan pesisir sebagian besar bergantung pada curah hujan dan limpasan (Graha *et al.*, 2024). Hal ini mendukung tingginya konsentrasi klorofil-a pada musim barat terutama di wilayah pesisir seperti pada Gambar 5. Melalui pengaruhnya terhadap SPL dan klorofil-a di perairan Selat Sunda, dinamika Armondo berperan sebagai faktor pengontrol yang memperkuat fluktuasi antarmusim pada pola SPL dan klorofil-a.

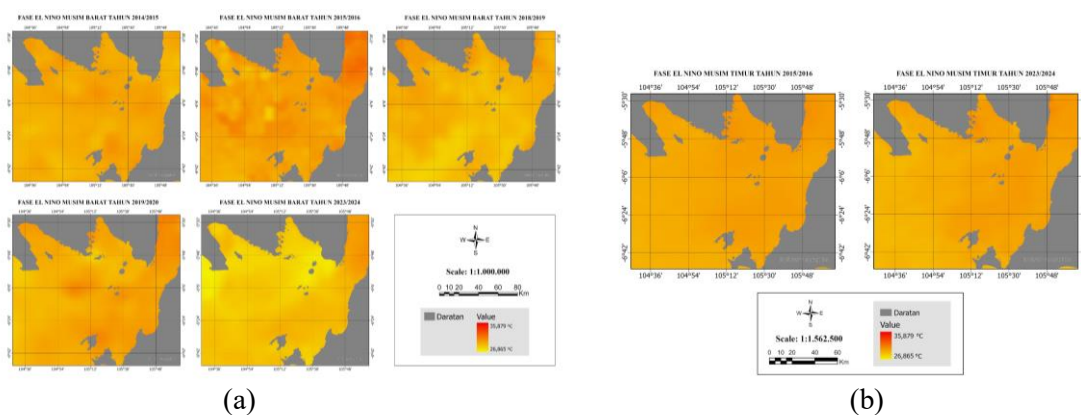


Gambar 6. Arah dan Kecepatan Angin Musim Barat dan Musim Timur Tahun 2015 – 2025

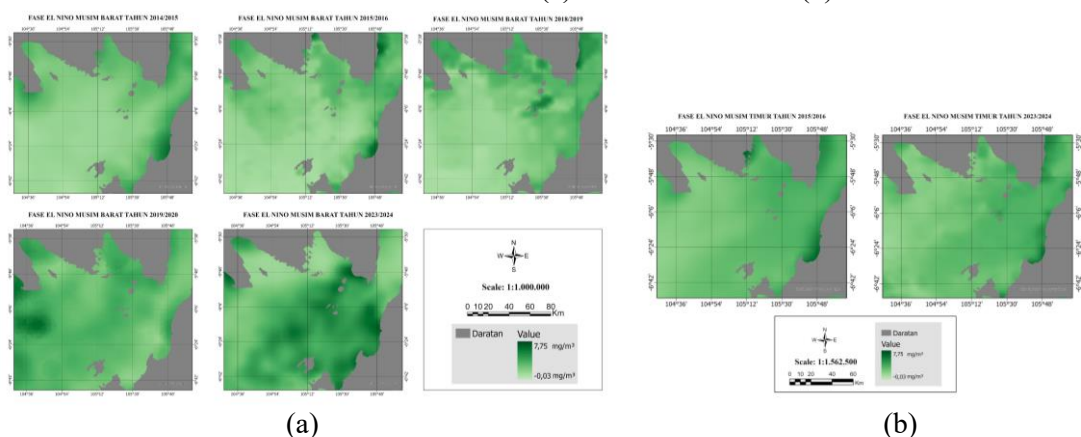
Variabilitas SPL dan Konsentrasi Klorofil-a ketika Fase El Nino

Ketika fase El Nino, variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a menunjukkan variasi spasial maupun temporal yang berbeda antar musim. Kondisi ini tidak terlepas dari pengaruh anomali pemanasan laut di Samudra Pasifik, sebagaimana ditunjukkan oleh indeks ONI yang positif, terutama selama tahun-tahun El Nino seperti 2014/2015 (lemah), El Nino 2015/2016 (kuat hingga sangat kuat), El Nino 2018/2019 (lemah), El Nino 2019/2020 (lemah), dan El Nino 2023/2024 (kuat), sebagaimana yang dijelaskan dalam subbagian 3.1. Pengaruh tersebut kemudian berinteraksi dengan dinamika oseanografi regional. Pada fase ini, suhu perairan Selat Sunda cenderung lebih hangat, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7. Nilai suhu ketika musim barat berkisar antara 26,9–30,0°C, suhu rata-rata antara 28,9–30,2°C. Sementara itu, hasil analisis nilai SPL ketika musim timur cenderung lebih tinggi dengan kisaran antara 28,6–35,9°C, dengan suhu rata-rata 29,8 hingga 30,0°C, yang menunjukkan adanya rentang variasi suhu yang cukup besar pada periode tersebut.

Selanjutnya, hasil analisis konsentrasi klorofil-a pada fase El Nino memiliki rentang konsentrasi sebesar -0,03-7,08 mg/m³ ketika musim barat, dengan nilai rata-rata 0,68 hingga 2,53 mg/m³, yang dapat dilihat pada Gambar 8. Secara umum, konsentrasi klorofil-a ketika musim barat cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan musim timur. Nilai konsentrasi selama musim timur memiliki rentang 0,14-5,50 mg/m³, dengan nilai rata-rata konsentrasi 0,81-0,98 mg/m³. Perbedaan pola SPL dan klorofil-a pada fase El Nino ini menunjukkan bahwa pengaruh pemanasan permukaan laut tidak berdiri sendiri, melainkan berinteraksi dengan kondisi oseanografi regional. Nilai SPL yang tinggi pada musim timur mencerminkan kondisi kolom air yang lebih stabil, sehingga pencampuran vertikal melemah serta pasokan nutrisi dari lapisan bawah berkurang. Sebaliknya, ketika musim barat, meskipun SPL relatif lebih rendah, konsentrasi klorofil-a justru lebih tinggi akibat kontribusi curah hujan serta limpasan daratan yang mengangkut nutrisi ke perairan. Sejalan dengan Feberito *et al.* (2025) yang menunjukkan hubungan negatif antara SPL dan klorofil-a, serta diperkuat oleh Zulfa *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa penurunan konsentrasi klorofil-a selama fase El Nino akibat berkurangnya curah hujan. Di sisi lain, pemanasan yang terjadi di seluruh cekungan laut menjadi penyebab kenaikan SPL selama fase El Nino (Mahasin *et al.*, 2026).



Gambar 7. Variabilitas SPL Musim Barat (a) dan Musim Timur (b) ketika Fase El Nino



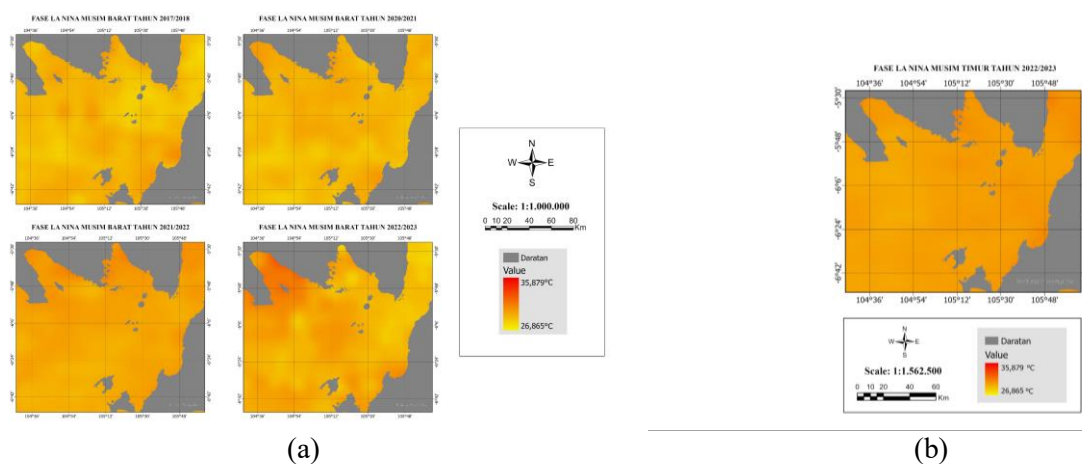
Gambar 8. Variabilitas Konsentrasi Klorofil-a Musim Barat (a) dan Timur (b) ketika Fase El Nino

Variabilitas SPL dan Konsentrasi Klorofil-a ketika Fase La Nina

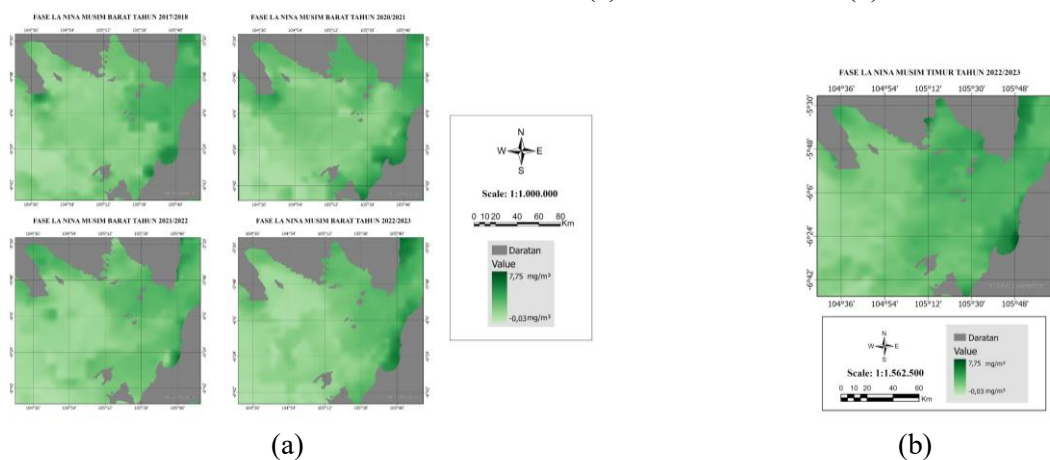
Pada fase La Nina variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a menunjukkan pola yang berbanding terbalik, namun relatif stabil dan merata dengan fase El Nino. Berdasarkan indeks ONI, selama fase La Nina terjadi, dikategorikan sebagai fase La Nina lemah, yang berlangsung di musim barat pada La Nina 2017/2018, La Nina 2020/2021, La Nina 2021/2022, dan La Nina 2022/2023 terjadi di musim barat dan musim timur. SPL pada fase La Nina berkisar 27,7–33,3 °C di musim barat yang terjadi pada tahun 2018, 2021–2023, dengan rata-rata suhu antara 29,2 hingga 30,0 °C, dapat dilihat pada Gambar 9. Sedangkan pada musim timur pada fase ini hanya terjadi pada tahun 2022, dengan suhu berkisar 29,5–31,5 °C dengan rata-rata suhu 30,2 °C.

Konsentrasi klorofil-a ketika fase La Nina relatif lebih tinggi dibandingkan dengan fase El Nino. Berdasarkan hasil visualisasi yang dapat dilihat pada Gambar 10, nilai klorofil-a pada musim barat meningkat dengan kisaran antara 0,03 hingga 7,72 mg/m³, dengan rata-rata antara 0,54–0,74 mg/m³. Sedangkan pada musim timur, nilai klorofil-a berkisar antara 0,11–5,93 mg/m³, dengan rata-rata klorofil-a 0,99 mg/m³.

Variabilitas SPL dan klorofil-a pada fase La Nina menunjukkan bahwa kondisi perairan lebih mendukung produktivitas, karena penguatan angin pasat dan pencampuran massa air yang membantu membawa suplai nutrisi ke lapisan permukaan sehingga konsentrasi klorofil-a pada fase La Nina meningkat. Sejalan dengan penelitian Pesoth *et al.* (2024) yang mengemukakan bahwa fase La Nina ditandai oleh pencampuran massa air yang lebih kuat dan distribusi klorofil-a yang lebih merata. SPL di perairan Selat Sunda lebih dingin selama fase La Nina (Daud *et al.*, 2025), sementara konsentrasi klorofil-a mengalami peningkatan, terutama ketika musim barat. Peningkatan klorofil-a tersebut disebabkan oleh adanya curah hujan yang meningkat, sebagaimana dikemukakan oleh (Zulfa *et al.*, 2024). Oleh karena itu, selama fase La Nina, konsentrasi klorofil-a tidak hanya tinggi di daerah pesisir, tetapi juga tersebar luas di lautan, yang mengindikasikan kondisi laut yang lebih stabil dan produktif selama fase La Nina.



Gambar 9. Variabilitas SPL Musim Barat (a) dan Musim Timur (b) ketika Fase La Nina

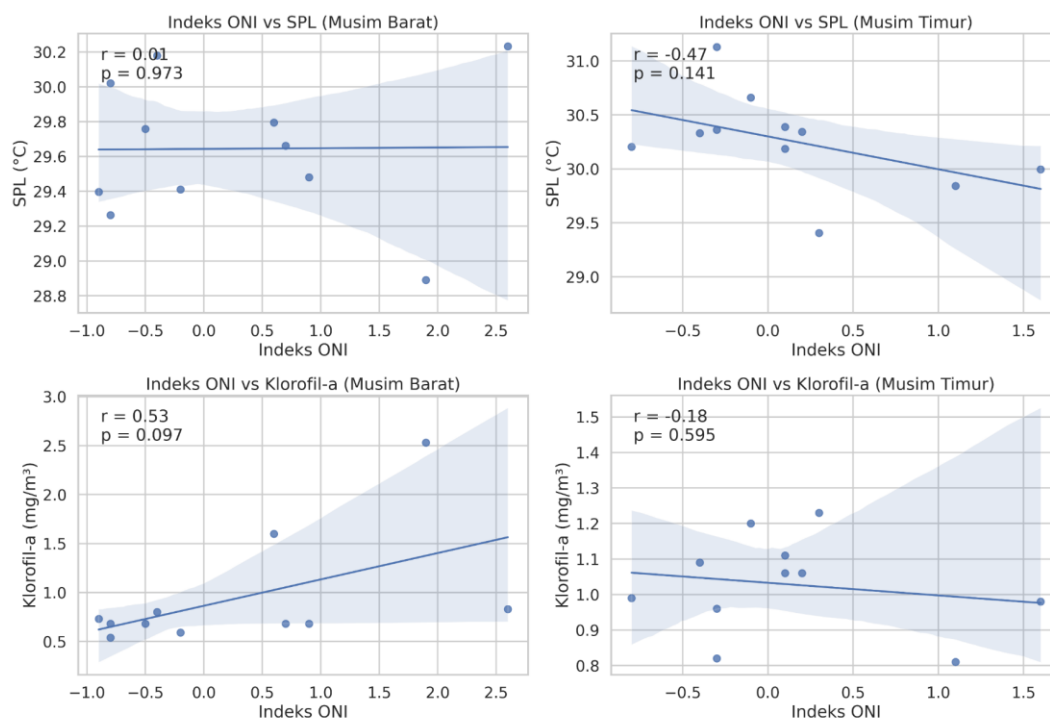


Gambar 10. Variabilitas Konsentrasi Klorofil-a Musim Barat (a) dan Timur (b) ketika Fase La Nina

Hubungan ENSO terhadap SPL dan Konsentrasi Klorofil-a

Hasil analisis korelasi dan regresi memperlihatkan bahwa pengaruh ENSO bersifat musiman dan bervariasi terhadap SPL dan klorofil-a di perairan Selat Sunda. Berdasarkan Gambar 11, hasil analisis menunjukkan bahwa pada musim barat, SPL dengan indeks ONI menunjukkan hubungan positif yang sangat rendah, di mana nilai $r = 0,01$ dan $p = 0,973$. Menunjukkan bahwa ENSO terhadap SPL tidak berpengaruh, yang diperkuat oleh hasil regresi pada Tabel 7, dengan nilai $R^2 = 0,096$ dan $p\text{-model} = 0,667$ yang tidak signifikan, sehingga faktor lokal lebih dominan mengontrol SPL pada musim barat, seperti curah hujan. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan di perairan selatan Jawa (Nababan *et al.*, 2021) dan Selat Sunda (Ramadlanie *et al.*, 2023), yang menunjukkan bahwa curah hujan dan intensitas sinar matahari memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap SPL dan klorofil-a dibandingkan dengan ENSO secara langsung. Sedangkan pada musim timur, hubungan ONI dengan SPL cenderung negatif sedang $r = -0,47$; $p = 0,141$, sementara hasil regresi menunjukkan model yang signifikan $R^2 = 0,719$ dan $p\text{-model} = 0,006$, dengan koefisien angin monsun sebesar $-0,596$. Kondisi ini menunjukkan bahwa variabilitas SPL tidak hanya dipengaruhi oleh variabilitas ENSO berdasarkan indeks ONI, tetapi juga oleh angin monsun tenggara. Temuan Ramadlanie *et al.* (2023) menyatakan bahwa pada saat musim timur hingga peralihan II, angin monsun tenggara dapat menyebabkan *upwelling* di Selat Sunda bagian selatan melalui mekanisme *transport Ekman*, sehingga massa air yang lebih dingin dari lapisan bawah terangkat ke permukaan dan mengakibatkan penurunan SPL.

Sementara itu, hubungan ONI dengan klorofil-a menunjukkan pola yang lebih lemah dan tidak konsisten. Pada musim barat, hubungan ONI dan klorofil-a menunjukkan hubungan positif sedang $r = 0,53$ dan $p = 0,097$. Peningkatan konsentrasi klorofil-a cenderung diikuti oleh meningkatnya nilai ONI, akan tetapi hasil regresi dengan $R^2 = 0,285$ dan $p\text{-model} = 0,261$ menunjukkan bahwa pengaruhnya tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan nutrisi yang signifikan dari daratan akibat curah hujan memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap peningkatan konsentrasi klorofil-a selama musim barat, didukung oleh temuan (Trenggono *et al.*, 2018) yang menjelaskan bahwa kenaikan klorofil-a berkaitan dengan masuknya nutrisi dari *runoff* daratan. Sedangkan pada musim timur hubungan ONI dengan klorofil-a memperlihatkan korelasi negatif sangat rendah dengan nilai $r = -0,18$ dan $p = 0,595$, diperkuat oleh hasil regresi dengan $R^2 = 0,247$ dan $p\text{-model} = 0,321$ yang tidak signifikan. Ini menunjukkan bahwa konsentrasi klorofil-a ketika musim timur lebih dipengaruhi oleh dinamika oseanografi lokal, seperti pencampuran massa air serta distribusi nutrisi, dibandingkan dengan pengaruh ENSO.



Gambar 11. Grafik Korelasi Pearson Indeks ONI dengan SPL dan Klorofil-a Selama 2015 – 2025

Tabel 7. Hasil Regresi Linear Berganda Pengaruh ONI dan Angin terhadap SPL dan Klorofil-a

Musim/Variabel	Konstan	ONI	Angin	R ²	p-model
SPL Musim Barat	30,514	-0,128	-0,323	0,096	0,667
SPL Musim Timur	31,935	0,042	-0,596	0,719	0,006
Klorofil-a Musim Barat	1,251	0,210	-0,144	0,285	0,261
Klorofil-a Musim Timur	0,703	-0,105	0,120	0,247	0,321

Indeks ONI mengindikasikan bahwa pengaruh ENSO terhadap variabilitas SPL lebih terlihat dibandingkan dengan konsentrasi klorofil-a di perairan Selat Sunda. Kondisi tersebut dapat diamati pada musim timur, ketika ENSO yang berlangsung bersama angin monsun tenggara berkontribusi terhadap perubahan SPL. Sementara itu, konsentrasi klorofil-a cenderung dipengaruhi oleh faktor-faktor lokal seperti curah hujan dan suplai nutrisi. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengaruh ENSO di Selat Sunda bersifat musiman dan tidak terlalu dominan, tetapi bekerja melalui interaksinya dengan kondisi oseanografi regional. Selain ENSO, fenomena *Indian Ocean Dipole* (IOD) juga berpotensi mempengaruhi dinamika perairan di wilayah ini. Penelitian Okgareta *et al.* (2024) menunjukkan bahwa fase IOD berkaitan dengan perubahan SPL di sekitar Teluk Lampung yang ditunjukkan oleh korelasi kuat ($r > 0,7$) pada perairan lepas pantai serta perubahan pola *upwelling* dan *downwelling*. Sementara itu, Wijaya *et al.* (2024) menyatakan bahwa fase IOD positif dapat meningkatkan konsentrasi klorofil-a melalui pengayaan nutrisi akibat proses *upwelling*. Dengan demikian, variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a di Selat Sunda tidak hanya dipengaruhi oleh ENSO, tetapi juga oleh dinamika oseanografi dan iklim regional di mana kombinasi anomali ONI dan IOD positif dapat mempengaruhi tingkat pemanasan laut di wilayah tersebut (Anggraeni *et al.*, 2025).

KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan bahwa karakteristik variabilitas SPL dan konsentrasi klorofil-a di perairan Selat Sunda menunjukkan pola yang konsisten. SPL dengan suhu berkisar 26,8–33,2°C saat musim barat, dan cenderung lebih tinggi ketika musim timur dengan suhu 27,5–35,8°C, dengan nilai minimum dan maksimum yang besar menunjukkan fluktuasi suhu yang signifikan antartahun. Sebaliknya, konsentrasi klorofil-a menunjukkan karakteristik yang berlawanan dengan SPL. Konsentrasi klorofil-a mengalami puncaknya ketika musim barat, dengan nilai konsentrasi -0,03–7,75 mg/m³, sementara ketika musim timur nilai konsentrasi cenderung lebih rendah, berkisar 0,05–7,51 mg/m³. Pengaruh ENSO berdasarkan indeks ONI terhadap SPL dan klorofil-a berfluktuasi serta bergantung pada musim. Pengaruh indeks ONI terlihat lebih jelas terhadap SPL, khususnya pada musim timur dengan korelasi negatif sedang ($r = -0,47$; $p = 0,141$) dengan regresi yang signifikan ($R^2 = 0,719$; $p\text{-model} = 0,006$) dipengaruhi oleh adanya interaksi angin monsun, sementara korelasi indeks ONI dan SPL pada musim barat ($r = 0,01$; $p = 0,973$) menunjukkan korelasi positif sangat rendah dengan regresi yang tidak signifikan ($R^2 = 0,096$; $p\text{-model} = 0,667$). Indeks ONI dan klorofil-a menunjukkan korelasi positif sedang dengan nilai ($r = 0,53$; $p = 0,097$) dengan regresi tidak signifikan ($R^2 = 0,285$; $p\text{-model} = 0,261$) yang terjadi ketika musim barat. Korelasi negatif sangat rendah ($r = -0,18$; $p = 0,595$) dengan regresi tidak signifikan ($R^2 = 0,247$; $p\text{-model} = 0,321$) menunjukkan bahwa produktivitas primer di Selat Sunda dipengaruhi oleh faktor lokal seperti nutrisi serta dinamika oseanografi dibandingkan dengan kontrol langsung dari fenomena ENSO.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, M.A., Asmadin & Takwir, A. 2025. Respon Suhu Permukaan Laut Dan Klorofil-A Saat Triple-Dip La Niña (2020–2023) Di Sulawesi Tenggara-Laut Banda. *Jurnal Kelautan*, 18(2): 2476–9991. <https://doi.org/10.21107/jk.v18i2.30604>.
- Agnadiva, A.K., Kunarso, K. & Zainuri, M. 2025. Analisis Konsentrasi dan Sebaran Klorofil-A di Perairan Laguna, Pekalongan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 7(2): 150–156. <https://doi.org/10.14710/ijoc.v7i2.25532>.
- Agus, A. 2024. Evaluasi Dinamika Perikanan Tangkap Tuna Skala Kecil di Kabupaten Bulukumba, Sulawesi Selatan. Universitas Hasanuddin. <http://repository.unhas.ac.id:443/id/eprint/43161> (Accessed: March 5, 2026).

- Amalia, I., Lubis, A.M. & Cahyarini, S.Y. 2025. Pengaruh ENSO Dan IOD Terhadap Suhu Permukaan Laut di Perairan Pulau Enggano. *Jurnal Kelautan Tropis*, 28(1): 71–81. <https://doi.org/10.14710/jkt.v28i1.25759>.
- Anggraeni, N.R.K., Attaqwa, R., Simangunsong, F.G.A., Gunady, S.M., Maslukah, L. & Wirasatriya, A. 2025. Analisis Spasial dan Temporal Marine Heatwave di Selat Sunda (1982-2021). *Buletin Oseanografi Marina*, 14(3): 347–361. <https://doi.org/10.14710/buloma.v14i3.68953>.
- Arifin, W.A., Daud, A., Maulsyid, R.P., Maulidia, R., Handyanto, L. & Sutrisno, R.A. 2025. Penerapan Interpolasi Inverse Distance Weighted (IDW) dalam Menentukan Tinggi Gelombang Laut di Perairan Selat Sunda. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 16(3): 268–281. <https://doi.org/10.24319/jtpk.16.268-281>.
- 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. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i2.17274>.
- Berliani, R., Siregar, A.A., Abrar, C.B., Rahmawati, N.S., Suhendra & Lizalidiawati. 2025. Identifikasi Suhu Permukaan Laut Pada Saat Terjadinya Iod Positif, El Niño Dan Monsun Di Perairan Barat Sumatra. *Jurnal Kelautan*, 18(1): 2476–9991. <https://doi.org/10.21107/jk.v18i1.29100>.
- Daud, A., Pratomo, D.G., Khomsin & Putra, A.W. 2025. Identifikasi Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kecepatan Arus Laut di Perairan Selat Sunda,” *Lambda: Jurnal Ilmiah Pendidikan MIPA dan Aplikasinya*, 5(2): 386–394. <https://doi.org/10.58218/lambda.v5i2.1366>.
- Dewi, Y.W., Wirasatriya, A., Sugianto, D.N., Helmi, M., Marwoto, J. & Maslukah, L. 2020. Effect of ENSO and IOD on the Variability of Sea Surface Temperature (SST) in Java Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/530/1/012007>.
- 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 Oktober*, 11: 231–247. <https://doi.org/10.14710/buloma.v11i3.41323>.
- Feberrito, J., Ismunarti, D.H. & Rifai, A. 2025. Kajian Korelasi Suhu Permukaan Laut dan Konsentrasi Klorofil-A di Perairan Selatan Maluku pada Periode Tahun 2015-2023. *Indonesian Journal of Oceanography*, 07(03): 252–264. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v7i3.25900>.
- Graha, D.S., Kunarso, K. & Zainuri, M. 2024. Variabilitas Antar Tahunan Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-A Terhadap Hasil Tangkapan Ikan Kembung (*Rastreligger Sp.*) di Perairan Demak. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(2): 148–158. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i2.17895>.
- Hamdani, Y.M.S. 2025. Pengaruh Interaksi ENSO dan IOD Terhadap Variabilitas Muka Air Laut Indonesia. Thesis. Universitas Pendidikan Indonesia. <http://repository.upi.edu/id/eprint/135028> (Accessed: December 20, 2025).
- Haryanto, Y.D., Hadiman, H., Agdialta, R. & Riama, N.F. 2021. Pengaruh El Niño Terhadap Pola Distribusi Klorofil-a dan Pola Arus di Wilayah Perairan Selatan Maluku. *Jurnal Kelautan Tropis*, 24(3): 364–374. <https://doi.org/10.14710/jkt.v24i3.10456>.
- He, M., Qin, J., Lu, N. & Yao, L. 2023. Assessment of ERA5 Near-Surface Air Temperatures over Global Oceans by Combining MODIS Sea Surface Temperature Products and In-Situ Observations,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16: 8442–8455. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3312810>.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021 The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Karlina, W.R. & Viana, A.S. 2020. Pengaruh Naiknya Permukaan Air Laut Terhadap Perubahan Garis Pangkal Pantai Akibat Perubahan Iklim. *Jurnal Komunikasi Hukum*, 6(2): 575-586 <https://doi.org/10.23887/jkh.v6i2.28203>
- Kurniawan, M.W., Rifai, A. & Ismunarti, D. H. 2025. Variabilitas Suhu Permukaan Laut Dipengaruhi oleh ENSO dan IOD di Laut Jawa, Tahun 2007-2021. *Journal of Marine Research*, 14(4): 706–715. <https://doi.org/10.14710/jmr.v14i4.46498>.
- Lindsey, R. 2009. *Climate Variability: Oceanic Niño Index*, NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-nino-index> (Accessed: March 4, 2026)

- Mahasin, A., Setiyono, H. & Hatmaja, R.B. 2026. Pengaruh Variabilitas Iklim ENSO dan IOD pada Upwelling Aceh Tahun 1998–2022. *Jurnal Kelautan Tropis*, 29(1), pp. 35–48. <https://doi.org/10.14710/jkt.v29i1.30205>.
- Maulana, R.A.D., Yusuf, M. & Rayzy, D.P.S.P. 2021. Studi Numerik Upwelling di Daerah Perairan Kalimantan Timur. *Jurnal Geosains Kutai Basin*, 4. <https://doi.org/10.30872/geofisunmul.v4i1.739>.
- Mulyani, A.S. 2020. Antisipasi Terjadinya Pemanasan Global dengan Deteksi Dini Suhu Permukaan Air Menggunakan Data Satelit. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2(1): 22-29. <https://doi.org/10.33541/cen.v2i1.2807>.
- Munandar, B., Wirasatriya, A., Sugianto, D.N., Ambariyanto, A. & Sunaryo, S. 2021. Respon Kecepatan Angin Terhadap Variabilitas Klorofil-a di Laut Filipina Dan Maluku Bagian Utara, *Buletin Oseanografi Marina*, 10(3): 269–276. <https://doi.org/10.14710/buloma.v10i3.38273>.
- Nababan, B., Sihombing, E.G.B. & Panjaitan, J.P. 2021. Variabilitas Suhu Permukaan Laut dan Konsentrasi Klorofil-a di Samudera Hindia Bagian Timur Laut Sebelah Barat Sumatera. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*, 12(2): 143–159. <https://doi.org/10.24319/jtpk.12.143-159>.
- Okgareta, D., Nurjaya, I.W., Naulita, Y. & Rastina. 2024. Oceanographic characteristics of Lampung Bay and its relationship to the Indian Ocean Dipole (IOD) period 2013-2021. *BIO Web of Conferences*. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410603001>.
- Patrick, W.F., Purwanto, B., Harsono, G., Kunarso, K. & Malik, K. 2024. Variasi Waktu Iklim Perairan Utara Papua Menggunakan Analisis Empirical Orthogonal Function (EOF),” *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 4(1):13–26. <https://doi.org/10.62703/jhi.v4i1.29>.
- Pearson, K. 1896. VII. Mathematical contributions to the theory of evolution. —III. Regression, heredity, and panmixia,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, (187): 253–328. <https://doi.org/10.1098/rsta.1896.0007>.
- Pesoth, C.D., Rimper, J.R.T.S.L., Warouw, V., Mantiri, R.O.S.E. & Sumilat, D.A. 2024. Analisis Pengaruh Kejadian El Nino La Nina dan Suhu Permukaan Laut Terhadap Konsentrasi Klorofil-A di Perairan Laut Maluku. *Jurnal Ilmiah Platax*, 12(1): p. 2024. <https://doi.org/10.35800/jip.v10i2.52236>.
- 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>.
- Ramadhanie, F.Y., Indrayanti, E. & Handoyo, G. 2023. Identifikasi Daerah Upwelling Berdasarkan Indikator Suhu Permukaan Laut & Klorofil-a di Perairan Selat Sunda. *Indonesian Journal of Oceanography* <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/ijoce.v4i4.15341>.
- Sugiyono. 2009. Metode Penelitian Kombinasi, Bandung: CV Alfabeta
- Susanti, I. & Fazrina, S. 2022. Penerapan Metode Analisis Regresi Linear Berganda Untuk Mengatasi Masalah Multikolinearitas Pada Kasus Indeks Pembangunan Manusia (IPM) Di Kabupaten Aceh Tamiang. *Jurnal Gamma-Pi*, 4. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.33059/jgp.v4i2.5591>.
- Susanto, S. & Suryadi, D., 2010. Pengantar data mining: mengagali pengetahuan dari bongkahan data. Yogyakarta: Andi Offset
- Susanto, R.D., Wei, Z., Adi, T.R., Zheng, Q., Fang, G., Fan, B., Supangat, A., Agustyadi, T., Li, S., Trenggono, M. & Setiawan, A. 2016. Oceanography surrounding Krakatau Volcano in the Sunda Strait, Indonesia. *Oceanography*, 29(2): 264–272. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2016.31>.
- Tarigan, D.J., Cahyadi, F.D., Sasongko, A.S., Yonanto, L. & Dinda, R. 2020. Daerah Penangkapan Ikan Kembung (*Rastrelliger* Sp) Di Selat Sunda Pada Musim Peralihan. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan*. 11(1): 63-79. <https://doi.org/10.24319/jtpk.11.63-79>.
- Trenggono, M., Amron, A., Pasha, W.A. & Rolian, D.L. 2018. Effects Of El Nino On Distribution Of Chlorophyll-A And Sea Surface Temperature In Northern To Southern Sunda Strait. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184705004>.
- Ulandari, T.P., Irkhos, I. & Lizalidiawati, L. 2025. Perubahan Muka Air Laut dan Klorofil-A di Perairan Bengkulu Akibat Kejadian Enso. *Jurnal Akuatiklestari*, 8(2): 135–144. <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v8i2.7158>.
- Wangdiarta, F.P., Wirasatriya, A. & Harsono, G. 2024. Respon Suhu Permukaan Laut (SPL) terhadap ENSO di Perairan Masalembo Periode 2010-2019. *Indonesian Journal of Oceanography*. 6(1): 57-71

-
- Wijaya, Y.J., Wisha, U.J., Maslukah, L., Windarto, S., Wirasatriya, A. & Zainuri, M. 2024. Seasonal variation of chlorophyll-a in South Java over the past quarter-century. *Ocean Dynamics*, 74(8): 703–724. <https://doi.org/10.1007/s10236-024-01629-4>.
- Yanto, S., Kurniawan, Y.S., Munir, P.Z.S. & Yanti, D.I.W. 2025. *Metodologi Penelitian Mengintegrasikan Pendekatan Kuantitatif Kualitatif dan Mix Methods*. Cetakan I. Medan: PT Media Penerbit Indonesia.
- Yuniasih, B., Harahap, W.N. & Wardana, D.A.S. 2023. Anomali Iklim El Nino dan La Nina di Indonesia pada 2013-2022. *AGROISTA : Jurnal Agroteknologi*, 6(2): 136–143. <https://doi.org/10.55180/agi.v6i2.332>.
- Zulfa, I.N., Wirasatriya, A. & Ismanto, A. 2024. Kajian Spasial dan Temporal Klorofil-a di Selat Makassar: Variasi Musiman dan Antar Tahunan. *Buletin Oseanografi Marina Oktober*, 13: 311–326. <https://doi.org/10.14710/buloma.v13i3.63067>.