



Perubahan Muka Air Laut dan Klorofil-A di Perairan Bengkulu Akibat Kejadian Enso

Changes in Sea Level and Chlorophyll-A in Bengkulu Waters Due to Enso Events

Tresi Pitria Ulandari¹, Irkhos¹, Lizalidiawati¹✉

¹Prodi Fisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia 38122

✉ Info Artikel:

Diterima: 25 April 2025

Revisi: 2 Mei 2025

Disetujui: 9 Mei 2025

Dipublikasi: 31 Mei 2025

📖 Kata Kunci:

Anomali Muka Air Laut, Klorofil-a, El-Niño, La-Niña, *Upwelling*, Perairan Bengkulu

✉ Penulis Korespondensi:

Lizalidiawati

Prodi Fisika, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia 38122

Email:

lizalidiawati@unib.ac.id



This is an open access article under the [CC-BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) license.

Copyright © 2025 by Authors.

Published by Program Studi

Manajemen Sumberdaya Perairan

Universitas Maritim Raja Ali Haji.

ABSTRAK. Perairan Bengkulu merupakan salah satu perairan yang dipengaruhi oleh fenomena *El-Niño Southern Oscillation* (ENSO) sehingga memengaruhi perubahan muka air laut di wilayah Bengkulu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara kejadian El-Niño dan La-Niña Terhadap perubahan muka air laut serta distribusi klorofil-a di Perairan Bengkulu. Data yang dianalisis mencakup SLA, klorofil-a, serta indeks Nino 3.4 dalam rentang waktu 20 tahun (2002–2022), yang diperoleh dari satelit altimetri multi-misi dan NOAA. Proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak Panoply, SeaDAS, dan Excel, serta uji korelasi dan regresi linear dengan Matlab R2024b. Hasil Penelitian menunjukkan adanya korelasi linear negatif antara Indeks ENSO dan SLA ($r = -0,12$), serta korelasi linear positif antara Indeks ENSO dan klorofil-a ($r = 0,13$). Saat terjadi El-Niño, SLA mengalami penurunan ($-0,1$ hingga $0,1$ m), sementara konsentrasi klorofil-a meningkat ($-0,3$ hingga $0,4$ mg/m³) akibat proses *upwelling* mengalami penguatan yang membawa nutrisi dari perairan dalam ke permukaan. Sebaliknya saat La Niña terjadi, SLA cenderung meningkat sebesar $0,1$ hingga $0,12$ m, sedangkan klorofil-a mengalami penurunan sebesar $0,2$ hingga $0,5$ mg/m³ akibat adanya proses *downwelling*. Namun, selama periode La-Niña 2007–2009, ditemukan anomali dimana SLA mengalami penurunan, sementara klorofil-a meningkat. Hal ini diduga disebabkan oleh *upwelling* lokal yang dipengaruhi oleh fenomena *Indian Ocean Dipole* (IOD positif). Penelitian ini menunjukkan bahwa ENSO memiliki dampak signifikan terhadap dinamika oseanografi di perairan Bengkulu. Penelitian ini dapat dijadikan informasi awal khususnya bagi nelayan dan masyarakat sekitar pesisir dalam adaptasi dampak perubahan lingkungan laut akibat kejadian ENSO.

ABSTRACT. Bengkulu waters are one of the waters affected by the El-Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon, thus affecting sea level changes in the Bengkulu region. This study aims to analyze the relationship between El-Niño and La-Niña events and sea level changes and the distribution of chlorophyll-a in Bengkulu waters. The data analyzed include SLA, chlorophyll-a, and the Nino 3.4 index over a period of 20 years (2002–2022), obtained from multi-mission altimetry satellites and NOAA. The analysis process was carried out using Panoply, SeaDAS, and Excel software, as well as correlation and linear regression tests with Matlab R2024b. The results of the study showed a negative linear correlation between the ENSO Index and SLA ($r = -0.12$), and a positive linear correlation between the ENSO Index and chlorophyll-a ($r = 0.13$). During El-Niño, SLA decreases (-0.1 to 0.1 m), while chlorophyll-a concentration increases (-0.3 to 0.4 mg/m³) due to the strengthening of the upwelling process that brings nutrients from deep waters to the surface. Conversely, when La Niña occurs, SLA tends to increase by 0.1 to 0.12 m, while chlorophyll-a decreases by 0.2 to 0.5 mg/m³ due to the downwelling process. However, during the 2007–2009 La-Niña period, an anomaly was found where SLA decreased, while chlorophyll-a increased. This is thought to be caused by local upwelling influenced by the Indian Ocean Dipole phenomenon (positive IOD). This study shows that ENSO has a significant impact on oceanographic dynamics in Bengkulu waters. This study can be used as initial information, especially for fishermen and coastal communities in adapting to the impacts of changes in the marine environment due to ENSO events.

📖 How to cite this article:

Ulandari, TP., Irkhos, & Lizalidiawati. (2025). *Perubahan Muka Air Laut dan Klorofil-A di Perairan Bengkulu Akibat Kejadian Enso*. Jurnal Akuatiklestari, 8(2): 135-144. DOI: <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v8i2.7158>

1. PENDAHULUAN

Perairan Bengkulu merupakan bagian wilayah Perairan Indonesia yang terletak di Pantai Barat Sumatera, perairan Bengkulu bagian barat khususnya di wilayah pantai sangat rentan terhadap perubahan muka air laut dikarenakan berhubungan langsung dengan Samudra Hindia. Perubahan muka air laut laut menjadi salah satu tekanan yang hingga kini mengancam keberlanjutan wilayah pesisir kenaikan permukaan laut merupakan salah satu dampak paling signifikan dari pemanasan global (Mujadida *et al.*, 2021). Fenomena ini disebabkan oleh pencairan es di daerah kutub dan ekspansi termal air laut, yang berkontribusi pada peningkatan tingkat muka air laut yang signifikan. Kenaikan muka air laut (*sea level rise*) adalah fenomena yang terjadi akibat peningkatan suhu global yang menyebabkan pemuatan udara laut dan mencairnya es di kutub. Penurunan muka air laut dapat terjadi akibat beberapa faktor, termasuk pengambilan air tanah yang berlebihan yang menyebabkan permukaan tanah menjadi semakin menurun (Abidin *et al.*, 2011). Perubahan muka air laut mengacu pada variasi tingkat permukaan laut yang disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk pemanasan global, aktivitas manusia dan perubahan iklim. Salah satu fenomena cuaca yang memengaruhi perubahan iklim adalah *El-Niño Southern Oscillation* (ENSO). ENSO sebuah fenomena yang disebabkan oleh variasi tegangan permukaan Samudera Pasifik, mempunyai dampak signifikan terhadap iklim dunia. Suhu permukaan laut di Samudera Pasifik segera berguna untuk kekeringan dan banjir di wilayah masing-masing. Selain itu, ENSO juga memengaruhi frekuensi dan intensitas badai tropis di berbagai wilayah (Ullum *et al.*, 2024). Fenomena global seperti ENSO adalah salah satu fenomena cuaca yang berdampak terhadap iklim bumi yang terjadi di Samudra Pasifik (Kurniadi *et al.*, 2021). ENSO dibagi menjadi dua fase berbeda, yaitu El Niño dan La Niña. Peristiwa La Nina ditandai dengan turunnya suhu di daerah Samudra Pasifik dan sekitar daerah Ekuador (Gushchina *et al.*, 2020). El-Niño adalah fenomena alam yang ditandai dengan memanasnya suhu permukaan laut di Samudera Pasifik bagian timur. Fenomena ini mengganggu pola sirkulasi atmosfer normal dan memiliki dampak signifikan terhadap iklim global, termasuk perubahan pola curah hujan di berbagai wilayah (Irwandi *et al.*, 2017).

La-Niña biasanya terjadi setelah El-Niño dan dapat berlangsung selama beberapa bulan hingga lebih dari satu tahun (Yuniasih *et al.*, 2023). La-Niña sering kali menyebabkan peningkatan curah hujan di Indonesia, yang dapat menyebabkan banjir dan tanah longsor (Hidayat *et al.*, 2022). Fase netral ENSO ditandai dengan kelembapan tinggikan curah hujan berulang di Australia dan Asia, sedangkan wilayah Amerika Selatan mengalami iklim yang lebih kering. Periode netral sirkulasi ENSO menunjukkan kemiripan dengan fase La Nina lemah, ketika angin pasat mendorong air hangat dari Samudera Pasifik ke arah barat dan air dingin naik ke arah timur (Ullum *et al.*, 2024). Kejadian El-Niño dan La-Niña juga berdampak di perairan Bengkulu karena perairan Bengkulu berhadapan langsung dengan Samudra Hindia. Pergerakan ini umumnya membawa nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan fitoplankton di dekat permukaan laut sehingga menjadi sumber makanan ikan di lautan. Pada kawasan upwelling dapat dijadikan penanda sebagai suatu daerah yang memiliki potensi kandungan klorofil-a pada suatu perairan erat kaitannya dengan rantai makanan. Kandungan klorofil-a yang tinggi pada perairan akan meningkatkan produktivitas fitoplankton, sehingga tercipta suatu rantai makanan yang menunjang produktivitas di perairan (Alhaq *et al.*, 2021).

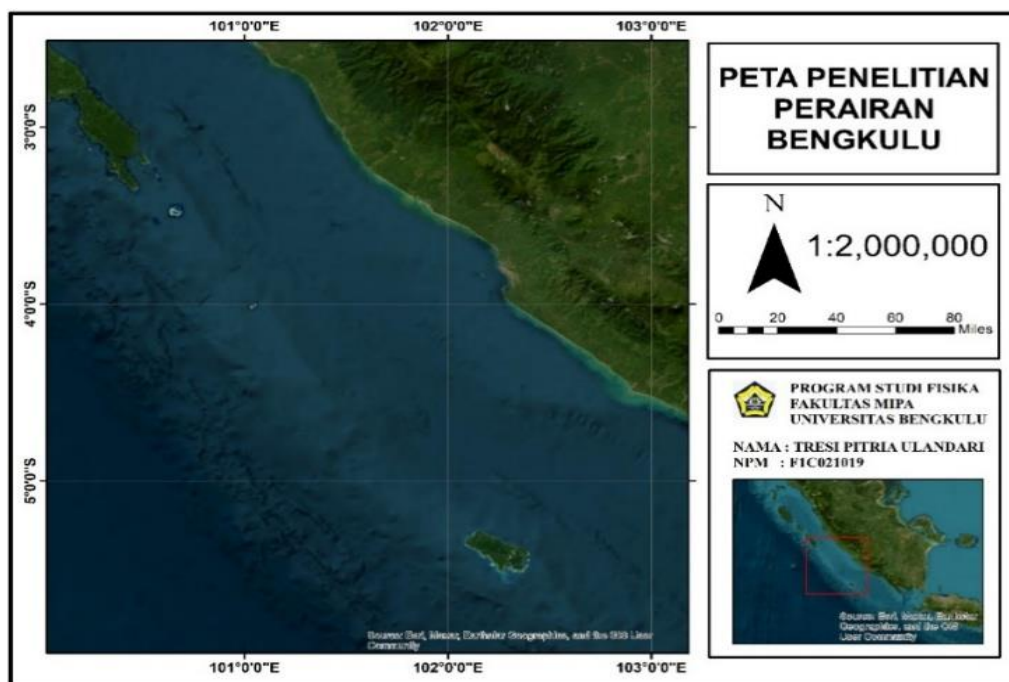
Klorofil memiliki fungsi sebagai salah satu parameter yang sangat menentukan produktivitas primer yang ada di laut, pengukuran klorofil sangat penting dilakukan karena kadar klorofil dalam suatu volume udara laut tertentu merupakan suatu ukuran bagi biomassa tumbuhan yang terdapat pada suatu daerah tersebut. Ketersediaan unsur hara dan intensitas cahaya matahari yang cukup sangat memengaruhi konsentrasi dari klorofil-a (Rahardjo *et al.*, 2021). Klorofil-a merupakan pigmen yang selalu ditemukan dalam fitoplankton serta semua organisme autotrof dan merupakan pigmen yang terlibat langsung (pigmen aktif) dalam proses fotosintesis (Veteran, 2024). Sebaran konsentrasi klorofil-a tinggi di perairan pantai sebagai akibat tingginya nutrien yang berasal dari daratan melalui limpasan air sungai dan sebaliknya cenderung lebih rendah di perairan lepas pantai (Irman *et al.*, 2017). Klorofil-a terutama ditemukan pada fitoplankton, yang mana fitoplankton berkontribusi hingga 95% dari total produksi primer di lautan. Fitoplankton adalah organisme mikroskopis yang melakukan fotosintesis dan merupakan bagian penting dari rantai makanan laut (Latifah *et al.*, 2024). Klorofil-a memberikan kontribusi 95% dalam produksi primer di laut dan kandungan klorofil-a sangat dipengaruhi oleh unsur hara seperti nitrogen dan fosfor.

Berdasarkan latar belakang tersebut, permasalahan utama yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah bagaimana fenomena ENSO memengaruhi perubahan muka air laut dan kandungan klorofil-a di perairan Bengkulu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara kejadian El-Niño dan La-Niña terhadap perubahan muka air laut serta distribusi klorofil-a di perairan Bengkulu. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai dampak ENSO terhadap ekosistem laut, serta menjadi bahan pertimbangan dalam edukasi bagi masyarakat pesisir, khususnya nelayan dalam menghadapi perubahan lingkungan laut yang dinamis.

2. BAHAN DAN METODE

2.1. Waktu dan Tempat

Lokasi Penelitian terletak di Perairan Bengkulu, Pantai Barat Pulau Sumatera, Indonesia, dengan koordinat 3°–5° LS dan 100°–103° BT. Peta lokasi penelitian disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Perairan Bengkulu

2.2. Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, yang memungkinkan pengolahan data numerik secara sistematis dan analisis statistik untuk menghasilkan informasi yang objektif. Proses analisis dilakukan melalui tiga tahap utama: pengolahan data SLA dan klorofil-*a*, pengolahan data Indeks Nino, dan analisis korelasi antar variabel dengan menggunakan Persamaan 1 dan Persamaan 2 untuk regresi linear.

Analisis korelasi antar variabel:

$$r(x, y) = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \dots\dots\dots (1)$$

Persamaan regresi linear:

$$y = a + bx \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan = Y_i adalah variabel terikat, x_i merupakan variabel bebas, a adalah variabel intersep, dan b , merupakan koefisien regresi (Ayuni & Fitriana, 2020)

2.3. Teknik Pengumpulan Data

Data Penelitian ini menggunakan data rata rata bulanan near real time selama 20 tahun, dari 2002 hingga 2022. Data yang dianalisis meliputi: Sea Level Anomaly (SLA), konsentrasi Klorofil-*a*, dan Indeks Nino 3. 4. Data SLA dan Klorofil-*a* diperoleh dari satelit altimetri multi-misi (Level 4) dengan resolusi spasial 4 km, diakses melalui situs *Marine Copernicus* (<https://data.marine.copernicus.eu>). Sementara itu, data ENSO berupa indeks NINO 3. 4 dan Dipole Mode Index (DMI) yang diunduh dari NOAA (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5/).

2.4. Analisis Data

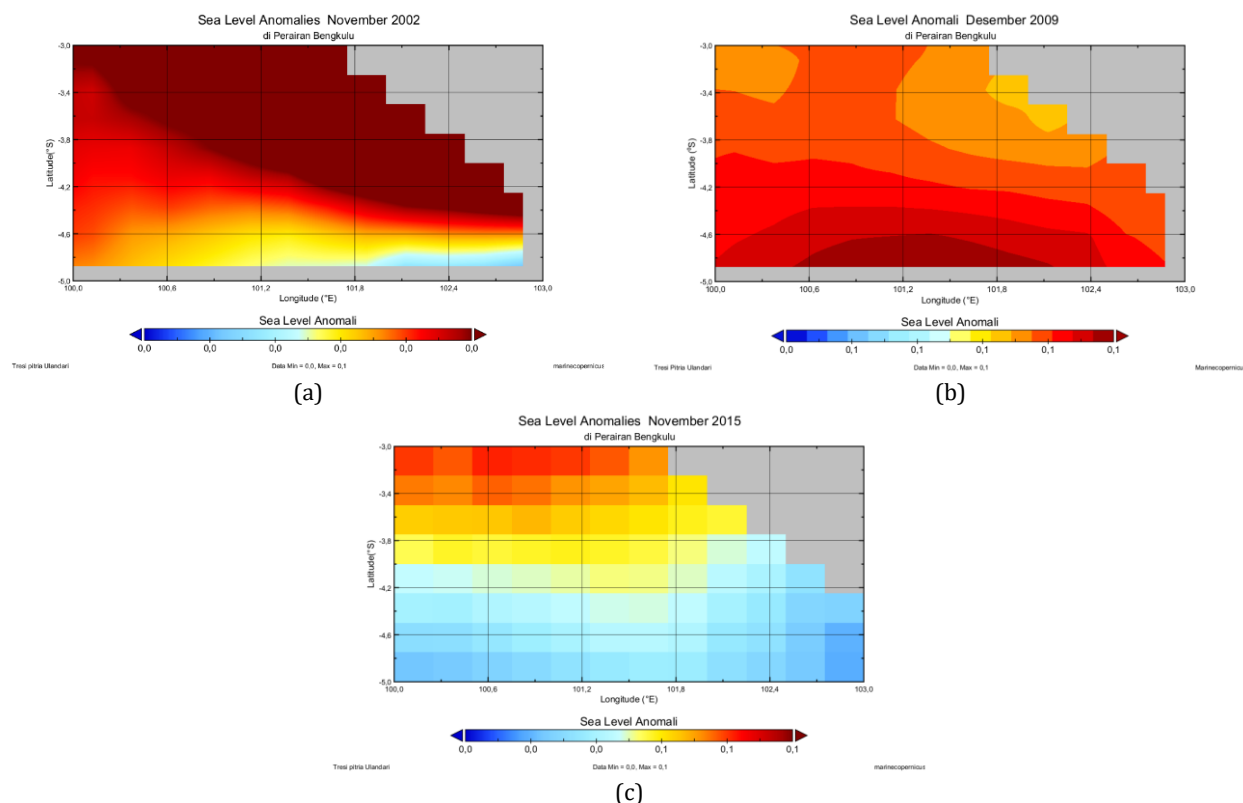
Analisis data dilakukan menggunakan beberapa perangkat lunak: Data SLA diproses menggunakan *Panoply* untuk memvisualisasikan pola sebaran spasialnya, lalu diekstrak untuk analisis lebih lanjut; Data klorofil-*a* dianalisis menggunakan *seadas* untuk melihat pola distribusinya, kemudian di proses di *Panoply* diekspor untuk pengolahan lebih lanjut di *Microsoft Excel*; Data Indeks Nino diolah menggunakan *Microsoft Excel* untuk menghasilkan grafik *time series*. Seluruh grafik *time series* dari SLA, Klorofil-*a*, dan ENSO kemudian dibandingkan untuk mengidentifikasi pola perubahan muka air laut dan konsentrasi Klorofil-*a* yang terkait dengan fenomena ENSO di Perairan Bengkulu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Fenomena El-Niño

Ketika fenomena El-Niño, Indeks Niño 3.4 terjadi puncak El-Niño pada November 2002 dengan nilai sebesar 1,3°C, Desember 2009 dengan nilai sebesar 1,6°C, dan November 2015 dengan nilai sebesar 2,6°C seperti disajikan dalam

Gambar 8. *Sea Level Anomaly* (SLA) mengalami penurunan yang terjadi pada November 2002 dengan SLA sebesar $-0,1$ m, Desember 2009 dengan SLA sebesar $-0,1$ m, dan November 2015 SLA mengalami penurunan rata-rata $0,1$ m. Sementara itu, klorofil-*a* mengalami peningkatan pada bulan November 2002 sebesar $0,3$ mg/m^3 , Desember 2009 dengan klorofil-*a* sebesar $0,4$ mg/m^3 , dan November 2015 dengan klorofil-*a* sebesar $0,4$ mg/m^3 di Perairan Bengkulu. Peningkatan konsentrasi klorofil-*a* di Perairan Bengkulu terjadi selama kejadian El-Niño. Peningkatan ini terjadi karena proses *upwelling* yang mengangkat nutrisi dari kedalaman laut ke permukaan, mendukung pertumbuhan fitoplankton yang menghasilkan klorofil-*a*. Proses *upwelling* ini didahului dengan penurunan tinggi muka laut di Perairan Bengkulu. Selanjutnya massa air dingin yang berasal dari lapisan dalam naik ke lapisan permukaan guna menggantikan ruang kosong di lapisan permukaan tersebut. Fenomena ini dapat dilihat dari hasil pada Gambar 2 dan 3 yang menunjukkan sebaran anomali tinggi muka laut dan klorofil-*a*. Hal ini, telah dibuktikan juga dalam penelitian Syafik *et al.* (2013) yang menunjukkan hubungan antara *upwelling* dan penurunan tinggi muka laut.

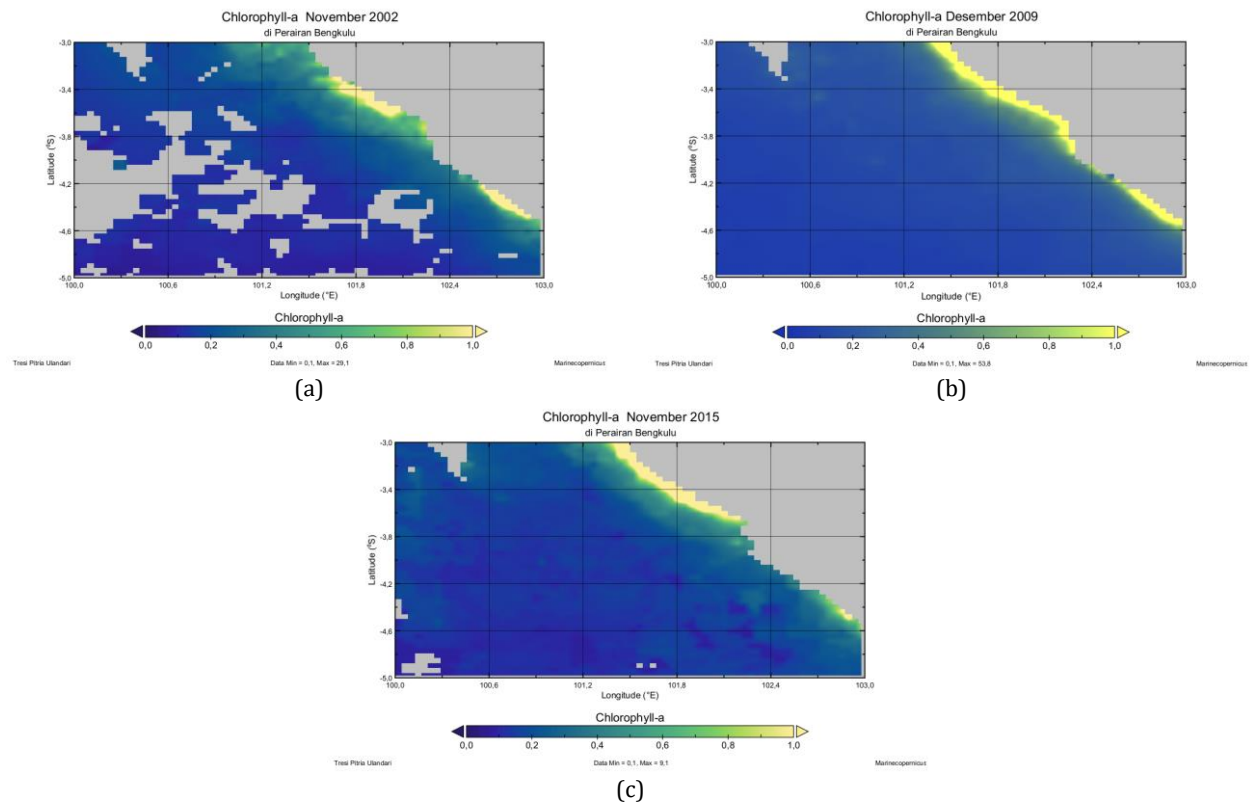


Gambar 2. SLA di Perairan Bengkulu pada saat El-Niño (a) November 2002, (b) Desember 2009, dan (c) November 2015

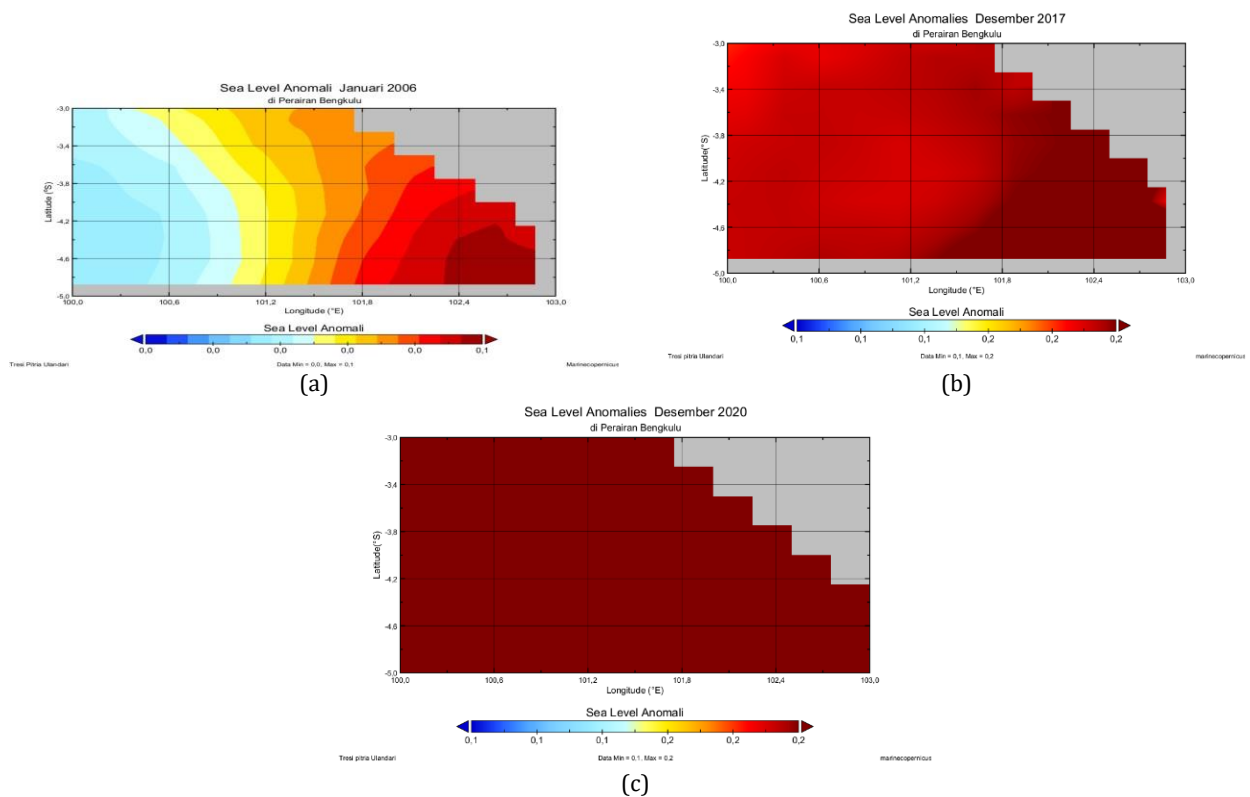
3.2. Fenomena La-Niña

Pada fenomena La-Niña, Indeks Niño 3.4 dikatakan pada puncak La-Niña terjadi pada Januari 2006 dengan nilai sebesar $-0,9^{\circ}\text{C}$, Desember 2017 dengan nilai sebesar -1°C , dan Desember 2020 dengan nilai sebesar $-1,2^{\circ}\text{C}$. Anomali permukaan laut mengalami peningkatan, sementara distribusi klorofil-*a* cenderung menurun akibat proses *downwelling* yang sering terjadi. Pada Januari 2006 dengan SLA sebesar $0,1$ m, Desember 2017 dengan SLA sebesar $0,1$ m, dan Desember 2020 dengan SLA sebesar $0,2$ m, sedangkan klorofil-*a* pada Januari 2006 dengan klorofil-*a* sebesar $0,5$ mg/m^3 , Desember 2017 dengan klorofil-*a* sebesar $0,4$ mg/m^3 , dan Desember 2020 dengan klorofil-*a* sebesar $0,2$ mg/m^3 . Proses *downwelling* ini terjadi ketika massa air bergerak menuju pantai dan mengalami penumpukan massa air di sisi pantai. Akibatnya permukaan air turun dan menciptakan ruang kosong yang dapat terisi oleh air lain, sehingga dapat menyebabkan peningkatan lokal pada tinggi permukaan laut (Shafira *et al.*, 2024).

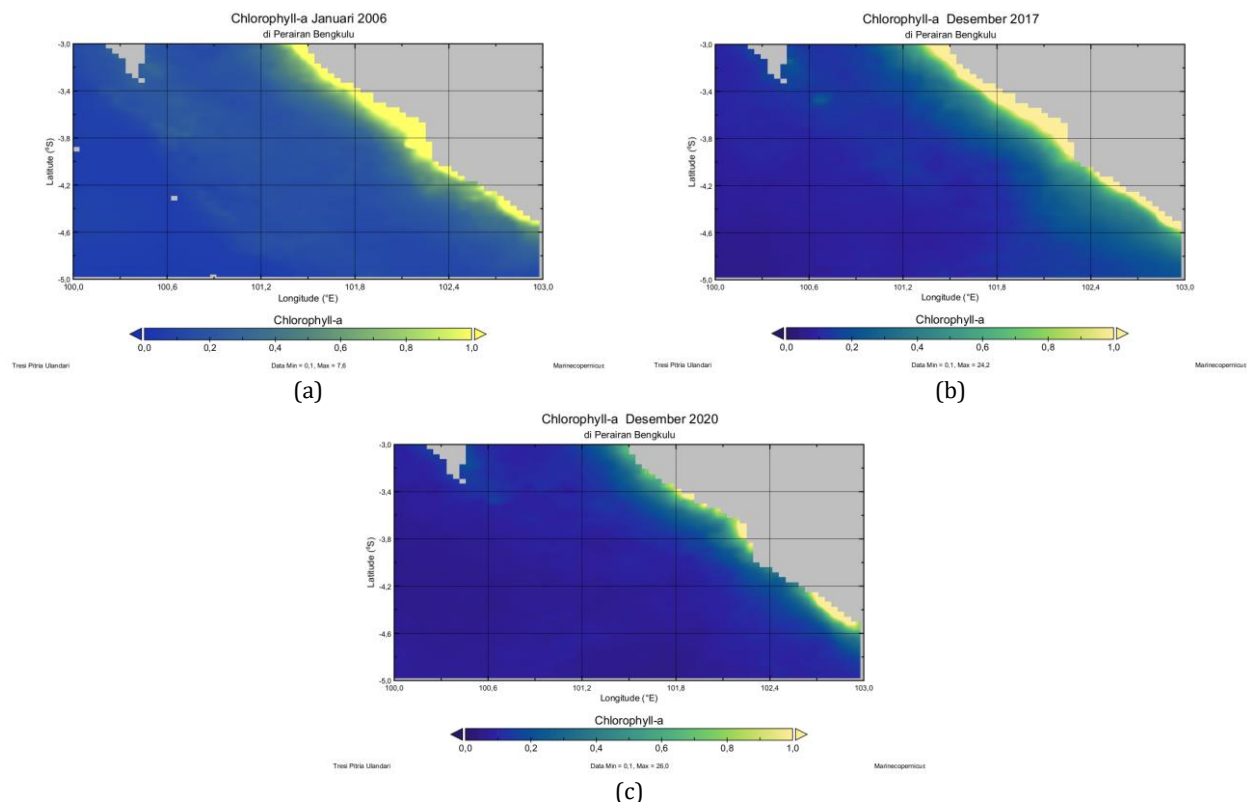
Downwelling berkontribusi pada peningkatan tinggi permukaan laut di daerah pantai karena akumulasi massa air saat fenomena La-Niña mulai terjadi. Variasi permukaan laut di Perairan Bengkulu mulai meningkat. Kenaikan ini dapat menghambat pertumbuhan fitoplankton karena kondisi lingkungan yang tidak mendukung (Pesoth *et al.*, 2024). Meskipun *downwelling* dapat menyebabkan peningkatan lokal pada permukaan laut, dampaknya terhadap produktivitas biologi bisa bervariasi. Proses ini membawa oksigen ke kedalaman laut dan mendistribusikan nutrisi, tetapi juga dapat mengurangi produktivitas biologis di permukaan karena mengurangi ketersediaan nutrisi (Yoga *et al.*, 2014). Selama periode La-Niña, konsentrasi klorofil-*a* cenderung lebih rendah dibandingkan dengan kondisi normal atau saat El Niño. Fenomena ini disajikan dalam Gambar 4 dan 5. Dari hasil tersebut menunjukkan sebaran anomali tinggi muka laut dan klorofil-*a*.



Gambar 3. Sebaran Klorofil-a di Perairan Bengkulu pada saat El-Niño (a) November 2002, (b) Desember 2009, dan (c) November 2015



Gambar 4. SLA di Perairan Bengkulu pada Saat La-Niña (a) Januari 2006, (b) Desember 2017, (c) Desember 2020



Gambar 5. Sebaran Klorofil-a di Perairan Bengkulu pada Saat La-Niña (a) Januari 2006, (b) Desember 2017, (c) Desember 2020

Pada fenomena La-Niña antara Tahun 2007 dan 2011 didapatkan Indeks Niño 3.4 di bulan Desember 2007 dengan nilai $-1,6^{\circ}\text{C}$ dan November 2011 dengan nilai sebesar $-1,6^{\circ}\text{C}$. Ditemukan bahwa pola peningkatan permukaan laut yang disertai dengan penurunan konsentrasi klorofil-a. Hal ini sesuai dengan kondisi umum La-Niña, dimana kenaikan permukaan laut akibat dominasi proses *downwelling* biasanya menyebabkan penurunan klorofil-a. Pada bulan Desember 2007 dengan SLA sebesar 0,1 m dan November 2011 dengan SLA sebesar 0,1 m. Sedangkan klorofil-a mengalami penurunan pada bulan Desember 2007 dengan klorofil-a sebesar $0,3 \text{ mg/m}^3$ dan November 2011 dengan klorofil-a sebesar $0,2 \text{ mg/m}^3$. Fenomena ini dapat dilihat dari hasil pada Gambar 6 dan 7 yang menunjukkan sebaran anomali tinggi muka laut dan klorofil-a.

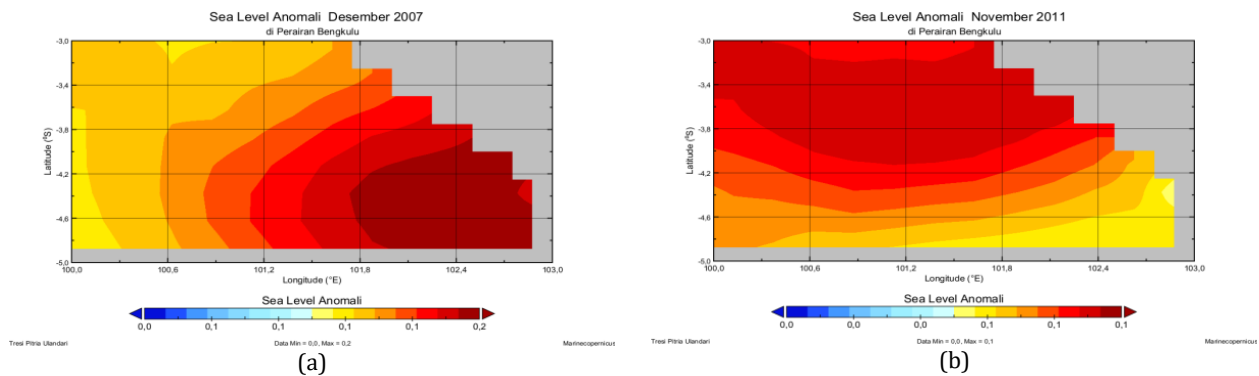
Penelitian menunjukkan bahwa *upwelling* dapat terjadi baik pada saat El-Niño maupun La-Niña, tetapi intensitasnya lebih lemah selama La-Niña dibandingkan El-Niño (Handoko et al., 2024). Fenomena IOD juga berpengaruh terhadap kenaikan klorofil-a dan penurunan SLA. Hal ini juga sejalan dengan menekankan bahwa IOD berkontribusi positif dalam mempengaruhi kondisi oseanografi, termasuk SLA dan klorofil-a menunjukkan bahwa IOD memiliki dampak lebih besar terhadap klorofil-a dikarenakan IOD positif mempunyai pengaruh signifikan terhadap SLA dan klorofil-a yang berdampak pada produktivitas ekosistem laut (Graha et al., 2024). IOD (+) ditandai dengan menghangatnya perairan di Samudra Hindia bagian Barat (Benua Afrika) dibandingkan dengan Samudra Hindia bagian Timur (Indonesia). Sedangkan IOD (-) adalah kebalikan dari IOD (+) yaitu dengan menghangatnya bagian timur Samudra Hindia dan lebih rendahnya suhu di bagian barat Samudra Hindia (Bramawanto & Abida, 2017).

Upwelling membawa massa air kaya nutrisi dari kedalaman ke permukaan, mendukung pertumbuhan fitoplankton yang menghasilkan klorofil-a (Mudlika et al., 2023). Penurunan konsentrasi klorofil-a antara tahun 2007 hingga 2011 menunjukkan adanya interaksi kompleks antara proses *downwelling* dan monsun barat laut. La-Niña umumnya dikaitkan dengan *downwelling* dan penurunan produktivitas biologis, variasi lokal seperti dinamika angin dan arus laut dapat mengubah dampak tersebut. *Upwelling* mengangkat nutrisi ke permukaan, meningkatkan konsentrasi klorofil-a. *Upwelling* selama La-Niña memiliki intensitas lebih rendah, sehingga konsentrasi klorofil-a tidak mencapai puncaknya seperti saat El-Niño (Mudlika et al., 2023).

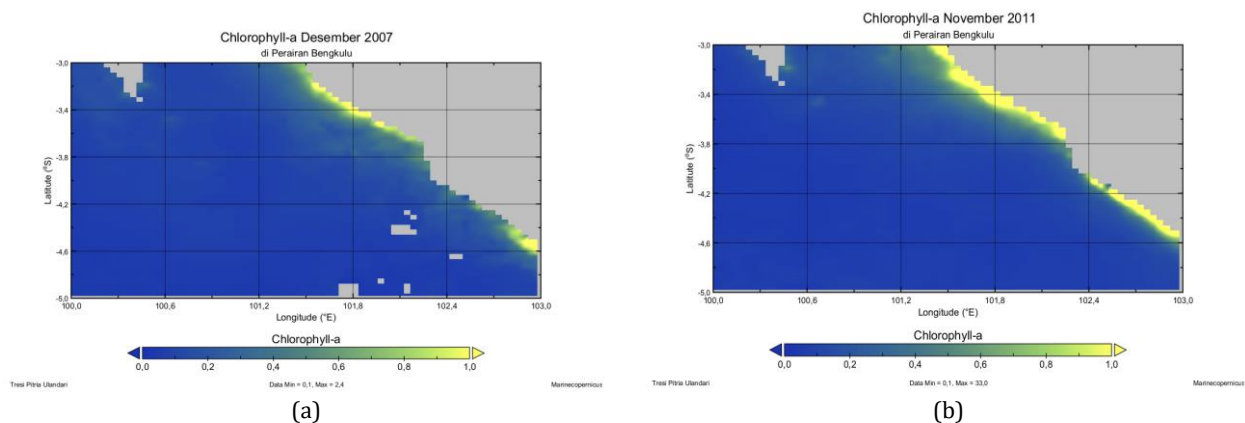
Menurut standar yang ditetapkan oleh National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), suatu peristiwa El Niño dikatakan terjadi ketika Indeks Niño 3.4 menunjukkan nilai $+0,5^{\circ}\text{C}$ atau lebih selama tiga bulan berturut-turut. Sebaliknya, La-Niña muncul ketika Indeks Niño 3.4 berada pada atau di bawah $-0,5^{\circ}\text{C}$ dalam rentang waktu yang sama. Untuk memahami dampaknya terhadap sistem iklim global, intensitas kedua fenomena ini dikategorikan berdasarkan besar kecilnya nilai Indeks Niño 3.4: El-Niño lemah jika nilainya berada antara $+0,5^{\circ}\text{C}$ hingga $+0,9^{\circ}\text{C}$, moderat antara $+1,0^{\circ}\text{C}$ hingga $+1,4^{\circ}\text{C}$, kuat antara $+1,5^{\circ}\text{C}$ hingga $+1,9^{\circ}\text{C}$, dan sangat kuat bila nilainya mencapai $+2,0^{\circ}\text{C}$ atau lebih (Nabilah et al., 2017).

Dalam analisis regresi, diperoleh model regresi untuk hubungan antara ENSO dan SLA, yaitu $y_1 = -0,0162x + 0,0162$. Sedangkan untuk hubungan antara ENSO dan klorofil-a, model regresinya adalah $y_2 = 0,0696x + 0,3951$. Koefisien

korelasi antara ENSO dengan SLA tercatat sebesar -0,12, sedangkan koefisien korelasi antara ENSO dengan klorofil-a adalah 0,13. Hal ini menunjukkan bahwa saat El Niño, SLA mengalami penurunan, sedangkan saat La-Niña, SLA mengalami kenaikan. Dari hasil regresi linear yang telah dilakukan berdasarkan data hubungan antara SLA, klorofil-a, dan ENSO pada periode 2002–2022 di Perairan Bengkulu menunjukkan hubungan yang bervariasi. Grafik yang ditampilkan secara keseluruhan menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara SLA dengan konsentrasi klorofil-a dari tahun 2002 hingga 2022. Hubungan ini dapat lebih jelas ditunjukkan pada Gambar 8., dimana Indeks Niño 3.4 terjadi puncak El-Niño pada November 2002 dengan nilai sebesar $1,3^{\circ}\text{C}$, Desember 2009 dengan nilai sebesar $1,6^{\circ}\text{C}$, dan November 2015 dengan nilai sebesar $2,6^{\circ}\text{C}$. Sedangkan puncak La-Niña terjadi pada Januari 2006 dengan nilai sebesar $-0,9^{\circ}\text{C}$, Desember 2017 dengan nilai -1°C . Desember 2020 dengan nilai sebesar -1°C , dengan nilai sebesar -1 m , dan Oktober 2021 dengan nilai sebesar $-0,8\text{ m}$. Ketika fenomena El-Niño terjadi, permukaan laut di Bengkulu mengalami penurunan. Penurunan permukaan laut ini turut berkontribusi pada peningkatan konsentrasi Klorofil-a, yang tercatat cukup tinggi selama periode tersebut. Penemuan ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh Haryanto et al. (2021) yang menyatakan bahwa konsentrasi klorofil-a di perairan meningkat pada saat terjadinya El-Niño.



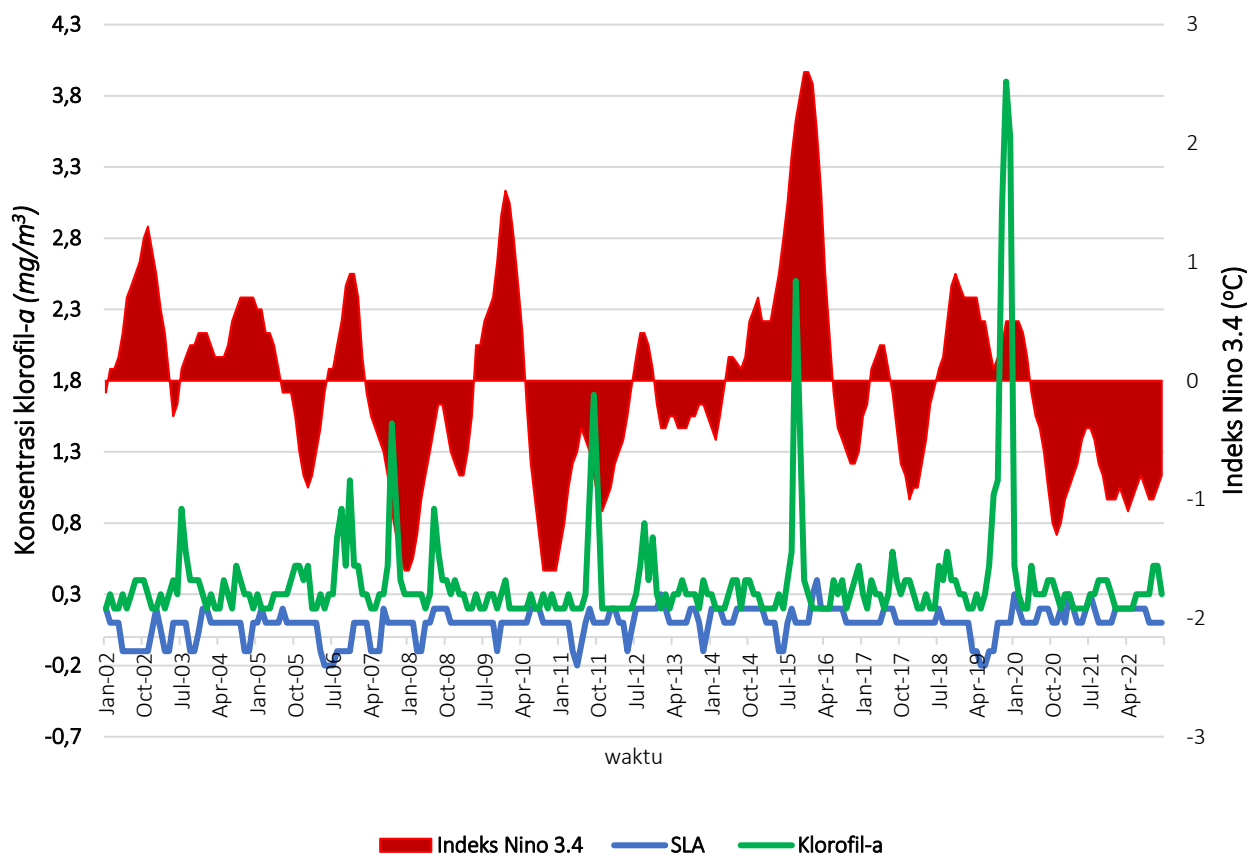
Gambar 6. SLA di perairan Bengkulu pada saat La-Niña (a) Desember 2007, (b) November 2011



Gambar 7. Sebaran Klorofil-a di Perairan Bengkulu pada saat La-Niña (a) Desember 2007, (b) November 2011

3.3. Hubungan El-Niño dan La-Niña terhadap Perubahan Muka Air Laut (SLA)

Hubungan ENSO, SLA, dan klorofil-a selama periode 2002–2022 di Perairan Bengkulu dapat dilihat pada Gambar 8. Fenomena El-Niño secara umum menyebabkan penurunan anomali muka laut (SLA). Misalnya, pada puncak El-Niño di November 2002, SLA sebesar $-0,1\text{ m}$, pada Desember 2009 SLA sebesar $-1,0\text{ m}$, dan November 2015 sebesar $0,1\text{ m}$. Penurunan SLA ini terjadi akibat proses *upwelling*, yaitu naiknya massa air dari lapisan dalam ke permukaan, yang menarik air permukaan ke bawah dan menurunkan permukaan laut. Sebaliknya, selama La-Niña, proses *downwelling* mendominasi, menyebabkan kenaikan SLA. SLA meningkat misalnya pada Januari 2006 sebesar $0,1\text{ m}$, Desember 2017 sebesar $-0,1\text{ m}$, dan Desember 2020 sebesar $0,2\text{ m}$. Pada periode Desember 2007 dan November 2011, SLA tetap di angka $0,1\text{ m}$. Dengan nilai La-Niña Desember 2007 $-1,6^{\circ}\text{C}$, dan November 2011 $-1,6^{\circ}\text{C}$ yang menandakan adanya *upwelling* lokal atau pengaruh faktor lain seperti IOD positif yang turut menurunkan SLA. Penurunan SLA selama El-Niño kaitannya dengan melemahnya angin pasat dan pergeseran massa air laut ke arah timur, yang mengakibatkan terbentuknya ruang kosong di lapisan permukaan dan mendorong proses *upwelling*. Di sisi lain, peningkatan SLA selama La-Niña disebabkan oleh akumulasi massa air di wilayah barat Pasifik akibat penguatan angin pasat, sehingga menyebabkan penumpukan volume air di sekitar perairan Indonesia, termasuk Bengkulu (Shafira et al., 2024).



Gambar 8. Grafik Hubungan ENSO, SLA, dan Klorofil-a Selama 20 Tahun di Perairan Bengkulu

3.4. Hubungan El-Niño dan La-Niña terhadap Distribusi Klorofil-a

Fenomena El-Niño di Perairan Bengkulu juga berkaitan dengan peningkatan konsentrasi klorofil-a, akibat proses *upwelling* yang membawa nutrisi dari kedalaman ke permukaan laut. Hal ini mendukung pertumbuhan fitoplankton. Pada saat El-Niño, tercatat peningkatan klorofil-a di November 2003 ($0,3 \text{ mg/m}^3$), Desember 2009 ($0,4 \text{ mg/m}^3$), dan Desember 2015 ($0,4 \text{ mg/m}^3$). Sebaliknya selama La-Niña, dominasi *downwelling* menyebabkan penurunan klorofil-a, karena minimnya pasokan nutrisi ke permukaan laut. Penurunan ini terlihat pada Januari 2006 ($0,5 \text{ mg/m}^3$), April 2018 ($0,3 \text{ mg/m}^3$), dan Oktober 2021 ($0,4 \text{ mg/m}^3$). Namun, pada Desember 2007 ($0,4 \text{ mg/m}^3$) dan November 2011 ($0,5 \text{ mg/m}^3$), di mana klorofil-a meningkat meski terjadi La-Niña. Hal ini mengindikasikan adanya proses *upwelling* lokal atau pengaruh dari IOD positif. Hal ini mengindikasikan bahwa saat El-Niño berlangsung, terjadi peningkatan konsentrasi klorofil-a di Perairan Bengkulu, sedangkan selama La-Niña, konsentrasi klorofil-a cenderung menurun. Kondisi ini dapat dijelaskan melalui proses *upwelling* yang lebih intens selama El-Niño, di mana nutrisi dari lapisan laut yang lebih dalam terangkat ke permukaan dan menyediakan kondisi ideal bagi pertumbuhan fitoplankton yang menghasilkan klorofil-a (Kunarto, 2011). Sebaliknya, selama La-Niña, proses *downwelling* lebih dominan dan menyebabkan penurunan suplai nutrisi ke permukaan laut, sehingga produktivitas biologis menurun. Namun demikian, tidak semua periode La-Niña menunjukkan pola yang seragam. Misalnya, pada tahun 2007 dan 2011, ditemukan adanya peningkatan klorofil-a meskipun terjadi La-Niña. Hal ini diperkirakan akibat pengaruh *upwelling* lokal yang tetap terjadi meski secara umum wilayah sedang didominasi oleh kondisi *downwelling*. Selain itu, faktor *Indian Ocean Dipole* (IOD) positif juga berperan penting, karena mampu meningkatkan suplai nutrisi ke permukaan laut melalui gangguan pola sirkulasi laut regional (Handoko et al., 2024).

4. SIMPULAN

Penelitian ini menemukan bahwa terdapat hubungan negatif antara ENSO dan anomali tinggi muka laut (SLA), di mana saat El Niño terjadi, SLA cenderung menurun, sedangkan saat La-Niña terjadi, SLA justru meningkat. Di Perairan Bengkulu, El Niño memicu *upwelling* yang membawa nutrisi dari lapisan dalam ke permukaan laut, sehingga mendukung pertumbuhan fitoplankton dan meningkatkan kadar klorofil-a. Pada tahun-tahun El-Niño seperti pada November 2003, Desember 2009, November 2015, SLA mengalami penurunan berkisar antara $-0,1$ hingga $0,1 \text{ m}$, sementara konsentrasi klorofil-a meningkat sebesar $0,3 \text{ mg/m}^3$ hingga $0,4 \text{ mg/m}^3$ per. Sebaliknya, selama La-Niña proses *downwelling* lebih dominan, menyebabkan peningkatan SLA pada Januari 2006, Desember 2017, Desember 2020 sebesar $0,1$ hingga $0,2 \text{ m}$ dan penurunan klorofil-a sebesar $0,2 \text{ mg/m}^3$ hingga $0,5 \text{ mg/m}^3$. Namun, pola yang berbeda muncul selama La-Niña

Desember 2007 dan november 2011, di mana SLA justru mengalami penurunan sebesar 0,1 m sementara klorofil-a meningkat sebesar 0,2 mg/m³ hingga 0,3 mg/m³. Fenomena ini kemungkinan besar terjadi akibat adanya *upwelling* lokal yang tetap berlangsung meskipun biasanya La-Niña lebih dikaitkan dengan *downwelling*. Hal ini menunjukkan bahwa IOD positif juga dipengaruhi terhadap dinamika laut di Perairan Bengkulu.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa syukur, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih ditujukan kepada tim yang ada di Laboratorium Fisika FMIPA Universitas Bengkulu atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama penelitian berlangsung.

6. REFERENSI

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y.E., & Deguchi, T. (2011). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*. 59(3): 1753-1771. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>
- Alhaq, M.S., Suryoputro, A.A.D., Zainuri, M., Muslim, M., & Marwoto, J. (2021). Analisa Sebaran Klorofil-a dan Kualitas Air di Perairan Pulau Sintok, Karimun, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Oceanography*. 3(4): 332-334. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i4.11728>
- Ayuni, G.N., & Fitriana, D. (2020). Penerapan Metode Regresi Linear untuk Prediksi Penjualan Properti pada PT XYZ. *Jurnal Telematika*. 14(2): 79-86. <https://doi.org/10.61769/telematika.v14i2.321>
- Bramawanto, R., & Abida, R.F. (2017). Produksi Garam Indonesia the Climatology Aspect Review (Enso and Iod) Against. *Jurnal Kelautan Nasional*. 12(2): 91-99. <http://dx.doi.org/10.15578/jkn.v12i2.6061>
- Chamidah, A., Afrilia, H.C., Ahmad, M.G., & Arisandi, D. (2024). Isolasi Klorofil a dan Analisis Aktivitas Antioksidan dari Mikroalga *C. vulgaris*. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*. 27(11): 1006-1020. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v27i11.57470>
- Graha, D.S., Kunarso, K., & Zainuri, M. (2024). Variabilitas Antar Tahunan Suhu Permukaan Laut dan Klorofil-A Terhadap Hasil Tangkapan Ikan Kembung (*Rastrelliger* Sp.) di Perairan Demak. *Indonesian Journal of Oceanography*. 6(2): 148-158. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i2.17895>
- Gushchina, D., Zheleznova, I., Osipov, A., & Olchev, A. (2020). Effect of various types of ENSO events on moisture conditions in the humid and subhumid tropics. *Atmosphere*. 11(12): 1354. <https://doi.org/10.3390/atmos11121354>
- Handoko, E.Y., Syariz, M.A., & Hanansyah, M.P. (2024). Variasi Klorofil-a di Perairan Sekitar Laut Jawa, Laut Flores, dan Selat Makassar. *Geoid*. 19(3): 418-428. <https://doi.org/10.12962/geoid.v19i3.1867>
- 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>
- Hidayat, U., Prasetyo, S., Haryanto, Y.D., & Riama, N.F. (2022). Pengaruh ENSO Terhadap Curah Hujan dan Kelembapan Relatif serta Suhu Permukaan Laut di Sulawesi. *Buletin GAW Bariri*. 2(2): 88-96. <https://doi.org/10.31172/bgb.v2i2.56>
- Irman, Nurgayah, W., & Irawati, N. (2017). Hubungan Klorofil-a Kaitannya Dengan Parameter Fisika Kimia Di Perairan Desa Tanjung Tiram Kecamatan Moramo Utara Kabupaten Konawe Selatan. *Sapa Laut*. 2(4): 97-102.
- Irwandi, H., Nasution, M.I., Kurniawan, E., & Megalina, Y. (2017). Pengaruh El Niño Terhadap Variabilitas Curah Hujan di Sumatera Utara. *FISITEK: Jurnal Ilmu Fisika dan Teknologi*. 1(2): 7-15.
- Kunarso. (2011). Variabilitas Suhu dan Klorofil-a di Daerah Upwelling pada Variasi Kejadian ENSO dan IOD di Perairan Selatan Jawa sampai Timor. *Indonesian Journal of Marine Sciences*. 16(3): 171-180.
- 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>
- Latifah, A.L., Wulandari, S.Y., & Kunarso, K. (2024). Hubungan Suhu Permukaan Laut (SPL) dan Klorofil-a Terhadap Hasil Tangkapan Yellowfin Tuna (*Thunnus albacares*) yang Didaratkan di Pelabuhan Tamperan, Pacitan. *Indonesian Journal of Oceanography*. 6(3): 197-208. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i3.20575>
- Mudlika, L., Haya, L.O.M.Y., & Asmadin. (2023). Kajian Fenomena Upwelling Selama Periode El-Nino Dan La-Niña Di Perairan Laut Maluku. *Sapa Laut*. 8(1): 21-31.
- Mujadida, Z., Setiyono, H., Handoyo, G., Hariyadi, H., & Marwoto, J. (2021). Analisis Dinamika Permukaan Laut di Laut Jawa dengan Recurrent Neural Network Periode 1993 sampai 2019. *Indonesian Journal of Oceanography*. 3(1): 100-110. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i1.10661>
- Nabilah, F., Prasetyo, Y., & Sukmono, A. (2017). Analisis Pengaruh Fenomena El Nino Dan La Nina Terhadap Curah Hujan Tahun 1998 - 2016 Menggunakan Indikator Oni (Oceanic Nino Index) (Studi Kasus: Provinsi Jawa Barat). *Jurnal Geodesi Undip*. 6(4): 402-412.
- Pesoth, C., Rimper, J.R.T.S., Warouw, V., Mantiri, R.O.S.E., & Sumilat, D.A. (2024). Analysis Of The Effect Of El Niño La Nina And Sea Level Temperatures on Chlorophyll-A Concentrations in the Waters of the Maluku Sea. *Jurnal Ilmiah PLATAX*. 12(1): 326-336. <https://doi.org/10.35800/jip.v12i1.52236>
- Rahardjo, C., Arifin, W.A., Lestari, D.A., Malik, A., & Buchori, S.S. Analisis Kandungan Klorofil-A sebagai Fishing Ground Potensial (Ikan Pelagis Kecil) di Sekitar Perairan Desa Sungsang Kabupaten Banyuasin Provinsi Sumatera Selatan. *Pena Akuatika: Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*. 20(2): 29-34. <https://doi.org/10.31941/penaakuatika.v20i2.1388>
- Shafira, A.W., Kunarso, K., & Maslukah, L. (2024). Pengaruh Klorofil-a dan Suhu Permukaan Laut Terhadap Hasil Tangkapan Ikan Cakalang (*Katsuwonus pelamis*) di Perairan Selatan Yogyakarta. *Indonesian Journal of Oceanography*. 6(1): 16-22. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i1.18965>
- Syafik, A., Kunarso, & Hariadi. (2013). Pengaruh Sebaran dan Gesekan Angin Terhadap Sebaran Suhu Permukaan Laut Di Samudera Hindia (Wilayah Pengelolaan Perikanan Republik Indonesia 573). *Journal of Oceanography*. 2(3): 318-328.
- Ullum, I.T.N.H., Fitria, A., & Widodo, W. (2024). Variasi Hasil Analisis Data Hasil El Nino-Southern Oscillation (ENSO) terhadap Iklim Global. *JSN: Jurnal Sains Natural*. 2(2): 40-47. <https://doi.org/10.35746/jsn.v2i2.528>
- Yoga, R.B., Setyono, H., & Harsono, G. (2014). Dinamika Upwelling Dan Downwelling Berdasarkan Variabilitas Suhu Permukaan

Laut Dan Klorofil-a. *Oceanografi*. 3(1): 57–66.

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>