

Variasi Klorofil-a di Perairan Sekitar Laut Jawa, Laut Flores, dan Selat Makassar *Chlorophyll-a Variation in Waters Around the Java Sea, Flores Sea, and Makassar Strait*

Eko Yuli Handoko*, Muhammad Aldila Syariz, Megivareza Putri Hanansyah

Departemen Teknik Geomatika, FTSPK-ITS, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

*Korespondensi penulis: ekoyh@its.ac.id

Diterima: 22072024; Diperbaiki: 21102024; Disetujui: 21102024; Dipublikasi: 22102024

Abstrak: Laut Jawa, Flores, dan Selat Makassar merupakan daerah pertemuan massa air dan juga merupakan salah satu titik masuk Arus Lintas Indonesia. Massa air tawar dari Samudera Pasifik masuk ke perairan Indonesia melalui Selat Makassar. Tidak hanya itu, wilayah maritim Indonesia dipengaruhi oleh Muson Asia-Australia yang mempengaruhi produktivitas primer di perairan, ditunjukkan dengan variasi klorofil-a. Maka dari itu, perlunya pemahaman tentang dinamika klorofil-a untuk penentuan strategi pengelolaan ekosistem laut yang lebih baik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis variasi klorofil-a di perairan sekitar Laut Jawa, Flores, dan Selat Makassar, serta hubungannya dengan suhu dan salinitas dari tahun 2016-2023. Penelitian ini menggunakan data klorofil-a yang dikumpulkan dari sensor *Ocean and Land Color Instrument* dari Sentinel-3. Data klorofil-a berasal dari perhitungan algoritma *Ocean Color 4 for MERIS* untuk jenis perairan *case-1*. Dari penelitian ini, didapatkan hasil bahwa konsentrasi klorofil-a cenderung tinggi saat periode muson barat bersamaan dengan datangnya musim hujan yang meningkatkan limpasan air sungai. Sebaliknya, konsentrasi klorofil-a di perairan Selatan Jawa hingga Nusa Tenggara cenderung tinggi saat muson timur diikuti dengan penurunan Suhu Permukaan Laut dan kenaikan salinitas permukaan. Pada tahun 2018 dan 2019, terjadinya fenomena *El Niño* bersamaan dengan fase positif *Indian Ocean Dipole* mendorong peningkatan klorofil-a. Rata-rata klorofil-a sepanjang tahun 2018 hingga 2019 mencapai 0,71 µg/L di Laut Flores dan Selat Makassar, serta 0,73 µg/L di Laut Jawa. Penelitian lebih lanjut dengan rentang temporal klorofil-a yang lebih panjang diperlukan agar pengaruh fenomena global dapat terlihat lebih jelas.

Copyright © 2024 Geoid. All rights reserved.

Abstract: The Java Sea, Flores, and Makassar Strait are the meeting areas of water masses and are also one of the entry points of the Indonesian Throughflow. Freshwater masses from the Pacific Ocean enter Indonesian waters through the Makassar Strait. Not only that, the Indonesian maritime region is influenced by the Asian-Australian Monsoon which affects primary productivity in the waters, indicated by variations in chlorophyll-a. Therefore, it is necessary to understand the dynamics of chlorophyll-a to determine a better marine ecosystem management strategy. The purpose of this study is to analyze the variation of chlorophyll-a in the waters around the Java Sea, Flores, and Makassar Strait, as well as its relationship with temperature and salinity from 2016-2023. This study uses chlorophyll-a data collected from the *Ocean and Land Color Instrument* sensor of Sentinel-3. Chlorophyll-a data came from the calculation of the *Ocean Color 4 for MERIS* algorithm for *case-1* water types. From this study, it was found that chlorophyll-a concentrations tend to be high during the Northwest monsoon period along with the arrival of the rainy season which increases river water runoff. In contrast, chlorophyll-a concentrations in the southern waters of Java to Nusa Tenggara tend to be high during the Southeast monsoon followed by a decrease in Sea Surface Temperature and an increase in surface salinity. In 2018 and 2019, the occurrence of the *El Niño* phenomenon along with the positive phase of the *Indian Ocean Dipole* encouraged an increase in chlorophyll-a. The average chlorophyll-a from 2018 to 2019 reached 0.71 µg/L in the Flores Sea and Makassar Strait, and 0.73 µg/L in the Java Sea. Further research with a longer temporal range of chlorophyll-a is needed so that the influence of global phenomena can be seen more clearly.

Kata kunci: Klorofil-a; Muson; *Upwelling Downwelling*; ENSO; IOD

Cara untuk sitasi: Handoko, EY., Syariz, MA., Hanansyah MP. (2024). Variasi Klorofil-a di Perairan Sekitar Laut Jawa, Laut Flores, dan Selat Makassar. *Geoid*, 19(3), 418 - 428.

Pendahuluan

Perairan Indonesia (sekitar Laut Flores, Laut Jawa, dan Selat Makassar) merupakan wilayah di mana massa air dari Arus Lintas Indonesia (Arlindo) bertemu dengan perairan lokal (Gambar 1). Arlindo adalah transpor massa air dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia melalui perairan Indonesia. Salah satu jalur utama masuknya Arlindo ke perairan Indonesia adalah melalui Selat Makassar, yang mampu mengangkut 70%-80% dari total aliran Arlindo (Gordon, 2005). Sebagian besar massa air dari Selat Makassar akan mengalir ke Laut Flores, Laut Banda, dan berakhir di Samudera Hindia. Tidak hanya Arlindo, perairan Indonesia juga dipengaruhi oleh aliran massa air dari Laut Cina Selatan. Air tawar yang dibawa oleh Laut Cina Selatan masuk melalui Selat Karimata pada kedalaman 45-40 meter dan mengalir ke Laut Jawa (Gordon dkk., 2012).

Wilayah maritim Indonesia dipengaruhi oleh fenomena musiman, seperti Muson Asia-Australia yang menyebabkan perubahan suhu dan salinitas secara musiman. Muson Asia atau muson barat terjadi pada bulan Oktober hingga April dan Monsun Australia atau muson timur terjadi pada bulan April hingga Oktober setiap tahunnya (Hermawan, 2015). Selama muson barat, air permukaan dengan salinitas rendah bergerak dari Laut Jawa ke Selat Makassar bagian selatan. Muson timurlaut itu, selama muson timur, air permukaan dengan salinitas tinggi mengalir dari Laut Banda dan Laut Flores ke Selat Makassar bagian selatan. Perubahan Suhu Permukaan Laut (SPL) musiman juga berkaitan dengan fenomena *upwelling* dan *downwelling*. Selama muson timur, SPL di wilayah di bawah khatulistiwa menjadi lebih rendah, yang ditandai dengan produktivitas primer yang lebih tinggi (Gordon, 2005).

Karakteristik massa air dari Arlindo akan berubah ketika memasuki perairan Indonesia karena adanya pencampuran massa air yang disebabkan oleh pasang surut vertikal yang kuat. Hal ini diyakini akan mempengaruhi konsentrasi karbon, oksigen dan nutrisi di Laut Indonesia (Ayers dkk., 2014; Talley & Sprintall, 2005). Fenomena yang telah dijelaskan sebelumnya berdampak pada produktivitas primer di perairan, yang dapat diamati melalui variasi konsentrasi klorofil-a di permukaan. Klorofil-a ditemukan di banyak perairan sebagai pigmen hijau pada fitoplankton. Fitoplankton adalah organisme bersel tunggal yang hidup dalam jumlah besar di 100 meter teratas dari permukaan laut (Falkowski, 2012). Fitoplankton merupakan produsen utama di lautan, menjadikannya indikator biologis utama produktivitas di lautan (Litchman dkk., 2015). Oleh karena itu, mempelajari dinamika klorofil-a dari waktu ke waktu sangat penting untuk lebih memahami ekosistem dan fenomena yang terjadi di perairan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis variasi klorofil-a di perairan sekitar Laut Jawa, Flores, dan Selat Makassar, serta hubungannya dengan SPL, salinitas permukaan, dan fenomena yang terjadi di perairan Indonesia.

Pengamatan klorofil-a dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan teknologi *ocean color remote sensing*, yang memungkinkan kita untuk menganalisis variasi klorofil-a dalam jangka waktu yang lama. Pelopor satelit *ocean color* adalah *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS) pada tahun 1978 yang digunakan untuk mengamati populasi fitoplankton setiap minggunya (Falkowski, 2012). Sejak saat itu, beberapa sensor lain telah diperkenalkan dan digunakan secara luas untuk mengestimasi klorofil-a, seperti *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS), *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), dan *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) (EUMETSAT, 2018). Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari sensor *Ocean and Land Color Instrument* (OLCI) yang dibawa oleh satelit Sentinel-3. Sensor OLCI merupakan penerus dari MERIS, namun dengan jumlah *band* spektral yang lebih banyak dan kemampuan koreksi data serta informasi konstituen optik yang lebih baik. Selain itu, OLCI memiliki resolusi yang lebih baik yaitu 300 m dengan rata-rata waktu *global revisit time* selama 1,9 hari di wilayah khatulistiwa (EUMETSAT, 2018).

Dalam penelitian sebelumnya, Moutzouris-Sidiris & Topouzelis (2021) membandingkan data pemrosesan klorofil-a OLCI berdasarkan algoritma *Ocean Color 4 for MERIS* (OC4Me) untuk perairan jenis *case-1* dan algoritma *Neural Network* (NN) untuk perairan jenis *case-2* di perairan dalam Laut Tengah. Dalam kasus ini, data yang diproses dengan algoritma OC4Me memiliki kinerja yang lebih baik. Data klorofil-a dengan algoritma OC4Me digunakan dalam penelitian ini karena sesuai dengan karakteristik perairan di wilayah

penelitian. Perairan Indonesia sangat beragam, memiliki banyak selat-selat sempit dan dalam yang menghubungkan antar laut dengan berbagai variasi kedalaman. Kedalaman Laut Flores mencapai lebih dari 5.000 m, Laut Jawa sekitar 50 m, dan Selat Makassar mencapai lebih dari 2.000 m berdasarkan data batimetri daring dari Navionics. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa wilayah studi dikategorikan sebagai perairan *case-1*, di mana *Inherent Optical Properties* (IOP) didominasi oleh fitoplankton (mengacu pada perairan laut terbuka) (Matsushita dkk., 2012).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana klorofil-a di area sekitar Laut Jawa, Laut Flores, dan Selat Makassar dari tahun 2016 hingga 2023, baik secara spasial maupun temporal. Data SPL dan salinitas permukaan juga digunakan dalam penelitian ini untuk membantu menganalisis terjadinya *upwelling* ataupun *downwelling* yang dapat memengaruhi konsentrasi klorofil-a. Selain itu, studi ini juga menganalisis apakah variasi klorofil-a berkaitan dengan fenomena yang terjadi, baik regional maupun global. Fenomena regional seperti Muson Asia-Australia yang memengaruhi perubahan iklim di Indonesia, serta fenomena global *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) yang memengaruhi iklim negara di sekitar Samudra Pasifik dan Hindia. Penelitian ini akan berkontribusi pada pemahaman kita tentang interaksi kompleks antara lautan dan iklim, dan diharapkan dapat membantu menentukan strategi pengelolaan yang lebih baik untuk ekosistem laut.

Data dan Metode

Studi area terletak di area pertemuan perairan Selat Makassar, Laut Flores, dan Laut Jawa (Gambar 1). Data klorofil-a didapatkan dari satelit Sentinel-3 OLCI level 2 *marine products* (OL_2_WFR). Data level 2 telah melalui proses georeferensi dan kalibrasi *top of atmosphere radiances*. Setelah itu, data diproses menjadi *water leaving reflectances* dan variabel *bio-optical* dengan salah satu hasilnya adalah konsentrasi klorofil-a. Sehingga, tidak perlu dilakukan ekstraksi klorofil-a lagi. Data OLCI memiliki resolusi spasial 300 meter dan resolusi temporal 1,9 hari di wilayah ekuator. Konsentrasi pigmen alga untuk klorofil-a didapatkan berdasarkan algoritma OC4Me yang dikembangkan oleh Morel dkk. (2007). Algoritma ini valid untuk klorofil-a di atas 0,1 µg/L dengan persamaan sebagai berikut.

$$\log_{10}[chl] = \sum_{x=0}^4 (A_x \log_{10} R_j^i)^x \quad (1)$$

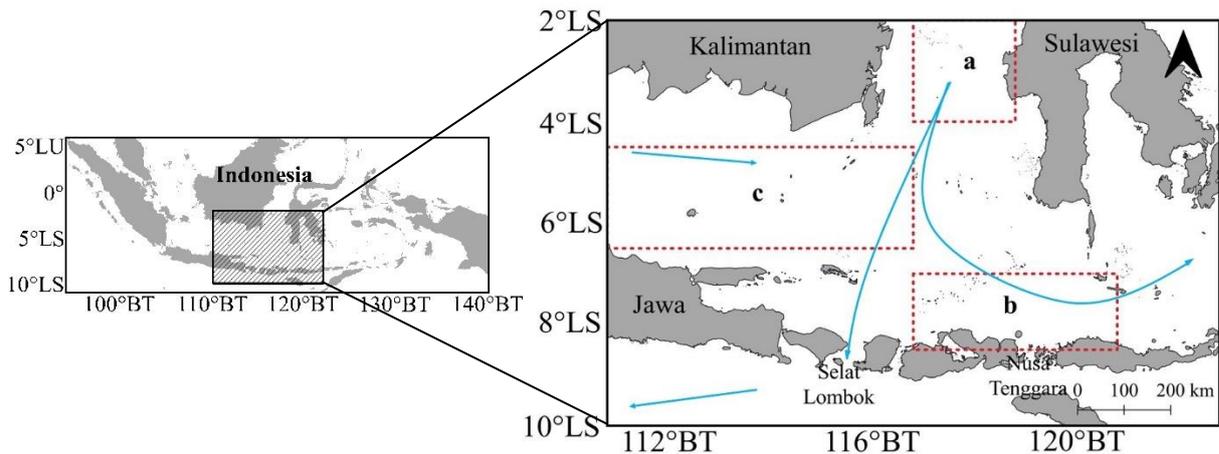
Dengan

$$\begin{aligned} A_0 &= 0.4502748 & A_3 &= -3.359422 \\ A_1 &= -3.259491 & A_4 &= 0.949586 \\ A_2 &= 3.522731 & & \end{aligned}$$

$$R_j^i = \max\left(\frac{443}{555}R, \frac{490}{555}R, \frac{510}{555}R\right) \quad (2)$$

Dimana R adalah *irradiance reflectance*.

Studi ini menggunakan data SPL dan salinitas permukaan untuk menganalisis proses *upwelling* yang terjadi di perairan. Data tersebut didapatkan dari *Global Ocean Physics Reanalysis* yang dikeluarkan oleh *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS), tersedia online di data.marine.copernicus.eu. Data yang digunakan merupakan data bulanan dengan resolusi spasial 0,083°. Untuk menganalisis hubungan klorofil-a dengan ENSO dan IOD, digunakan data *Multivariate ENSO Index Version 2* (MEI.v2) dan *Dipole Mode Index* (DMI) dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* yang tersedia luring di psl.noaa.gov.



Gambar 1. Studi area yang mencakup Selat Makassar bagian Selatan(a), Laut Flores (b), dan Laut Jawa bagian Barat(c). Jalur Arlindo ditunjukkan oleh garis biru.

Pemrosesan awal adalah dilakukan mosaik atau proses penggabungan beberapa citra Sentinel-3 OLCI Level-2 *marine products*. Kemudian dilakukan reproyeksi untuk mengubah sistem koordinat ke WGS84, sekaligus subset citra sesuai dengan batas koordinat area penelitian. Setelah itu, dilakukan proses *cloud masking* untuk menghilangkan tutupan awan pada citra. Visualisasi sebaran klorofil-a disajikan berdasarkan periode muson, yakni muson barat (Des-Jan-Feb), peralihan I (Mar-Apr-Mei), muson timur (Jun-Jul-Agt), dan peralihan II (Sep-Okt-Nov). Seluruh data dari tahun 2016 hingga 2023 dirata-rata pada setiap pikselnya untuk mengetahui bagaimana sebaran klorofil-a di seluruh musim.

Hubungan antara klorofil-a dengan SPL dan salinitas permukaan dihitung menggunakan korelasi pearson secara *pixel by pixel*. Perhitungan dilakukan pada RStudio dengan fungsi bernama *Gridded Correlation for Time Series Raster Data* (*gridcorts*) yang dikembangkan oleh Abdi dkk. (2019). Koefisien korelasi setiap piksel diplot pada raster layer dengan resolusi dan *extent* yang sama dengan data klorofil-a. Berikut adalah persamaan dari korelasi pearson.

$$r_{X,Y} = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2}} \quad (3)$$

Dimana,

- $r_{X,Y}$: koefisien korelasi pearson
- N : jumlah sample atau observasi
- X : variabel pertama
- Y : variabel kedua

Variabilitas klorofil-a pada penelitian ini dikaitkan dengan fenomena ENSO dan IOD. Fenomena ENSO diwakili dengan nilai indeks MEI. *El Niño* terjadi saat MEI menunjukkan nilai lebih dari sama dengan +0,5, sedangkan *La Niña* terjadi saat nilai kurang dari sama dengan -0,5. Fenomena IOD diwakili dengan nilai indeks DMI. Kejadian IOD positif diidentifikasi ketika rata-rata DMI tiga bulan berjalan lebih dari sama dengan +0,4°C. Sedangkan, IOD negatif ditunjukkan dari nilai DMI kurang dari sama dengan -0,4°C selama tiga bulan berturut-turut antara bulan Juni dan November.

Hasil dan Pembahasan

Sebaran klorofil-a di sekitar Laut Flores, Jawa, dan Selat Makassar dapat dilihat pada Gambar 2a-b. Area sekitar pesisir Pulau Kalimantan dan pesisir utara Pulau Jawa memiliki konsentrasi klorofil-a yang tinggi, baik pada muson barat maupun muson timur. Tingginya konsentrasi klorofil-a pada pesisir Kalimantan dan pesisir utara Jawa dipengaruhi oleh aliran sungai (Xu dkk., 2021). Limpasan air sungai membawa nutrisi yang

memperkaya perairan pesisir, sehingga mendukung produktivitas fitoplankton pada perairan tersebut. Namun, ekstrimnya konsentrasi klorofil-a di area pesisir kemungkinan disebabkan oleh bias dari *suspended sediment*. Area pesisir Kalimantan (Riadi dkk., 2023; Widyanata dkk., 2024) dan pesisir utara Jawa (Hariyanto dkk., 2017; Pribadi & Hariyanto, 2019) memiliki kandungan *Total Suspended Sediment* (TSS) yang tinggi. Kandungan TSS berasal dari limpasan air sungai, yang mana saat musim hujan kandungan TSS meningkat.

Distribusi klorofil-a di perairan Indonesia berhubungan erat dengan fenomena muson Asia-Australia. Angin muson merupakan siklus tahunan di Indonesia yang memiliki dampak besar terhadap perubahan iklim dan cuaca di Indonesia. Berdasarkan pergerakannya, angin muson di Indonesia terbagi menjadi dua, yakni muson timur yang puncaknya terjadi pada Juni-Juli-Agustus dan muson barat pada Desember-Januari-Februari. Muson timur bergerak dari benua Australia membawa udara kering menuju benua Asia melalui wilayah maritim Indonesia. Periode muson timur ini ditandai dengan musim kemarau di sebagian besar wilayah Indonesia. Sebaliknya, muson barat berhembus dari benua Asia menuju benua Australia melalui wilayah Indonesia. Angin ini membawa udara lembab dari Samudra Hindia dan Laut Cina Selatan. Sehingga, pada periode muson barat, Indonesia mengalami musim hujan. Selain itu, terdapat periode transisi antara musim hujan dan kemarau dikenal dengan nama periode peralihan. Pada periode ini, iklim lebih bervariasi dengan hujan sesekali dan angin yang berfluktuasi. Periode peralihan terbagi menjadi dua, yakni peralihan I (Maret-April-Mei) dan peralihan II (September-Oktober-November) (Hermawan, 2015).

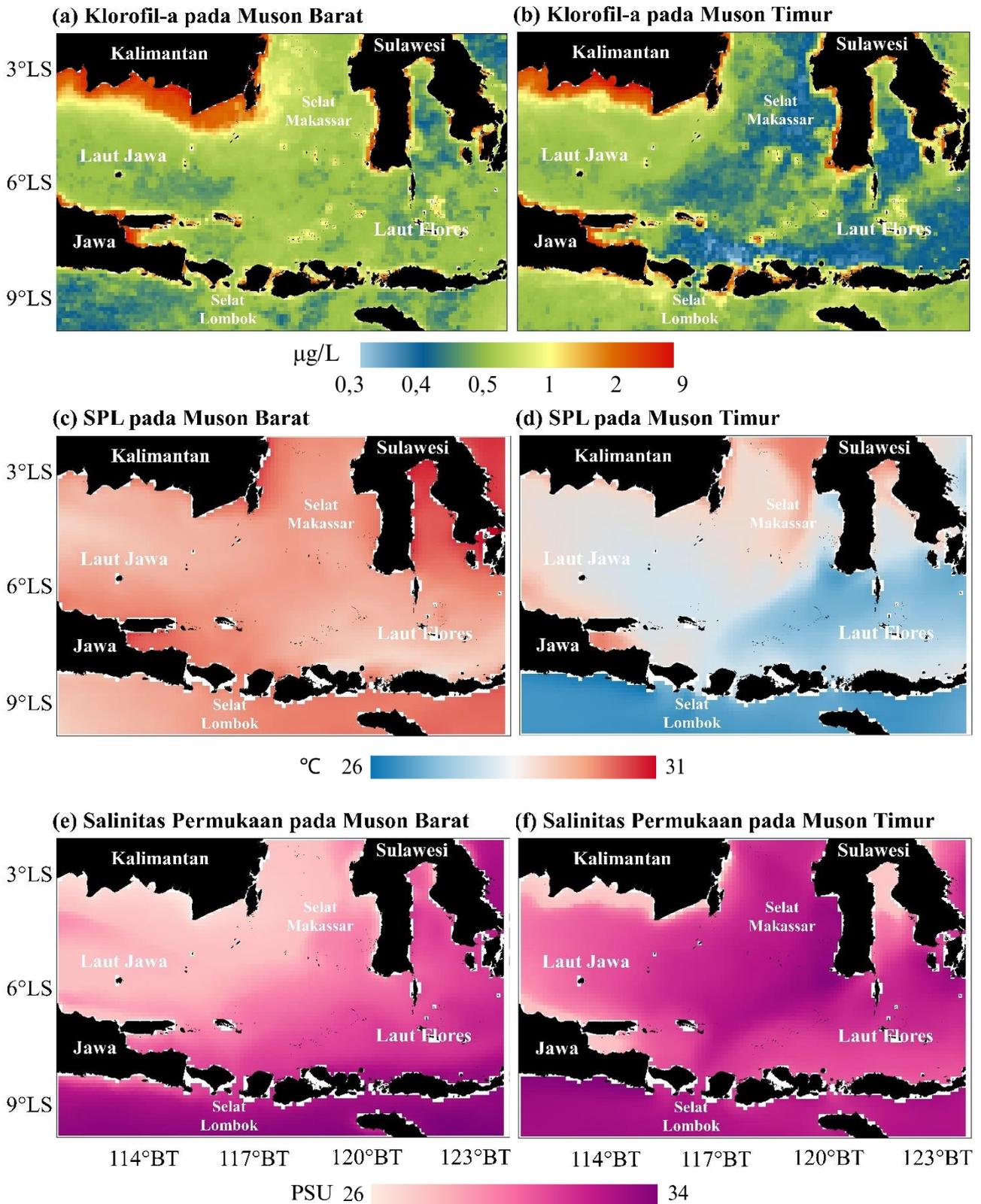
Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konsentrasi klorofil-a di area studi lebih tinggi saat muson barat daripada saat muson timur (Gambar 2a-b). Hal ini juga dapat dilihat pada Tabel 1, dimana disajikan rata-rata klorofil-a pada setiap periode muson dari tahun 2016 hingga 2023. Periode muson barat merupakan periode dimana rata-rata konsentrasi klorofil-a mencapai puncak tertinggi pada seluruh area analisis. Rata-rata klorofil-a di Laut Flores, Jawa, dan Selat Makassar pada periode muson barat masing-masing sebesar 0,58 µg/L, 0,58 µg/L, dan 0,63 µg/L. Periode muson timur menjadi periode klorofil-a terendah pada Laut Jawa dan Selat Makassar dengan rata-rata konsentrasi sebesar 0,51 µg/L dan 0,47 µg/L. Sedangkan, untuk area sampel Laut Flores mengalami klorofil-a terendah saat periode transitional I dengan rata-rata konsentrasi sebesar 0,55 µg/L.

Tabel 1. Korelasi klorofil-a dengan SPL dan salinitas permukaan.

Area	Muson Barat	Peralihan I	Muson Timur	Peralihan II
Laut Jawa	0,58	0,51	0,51	0,52
Laut Flores	0,58	0,55	0,57	0,56
Selat Makassar	0,63	0,52	0,47	0,54

Satuan: µg/L

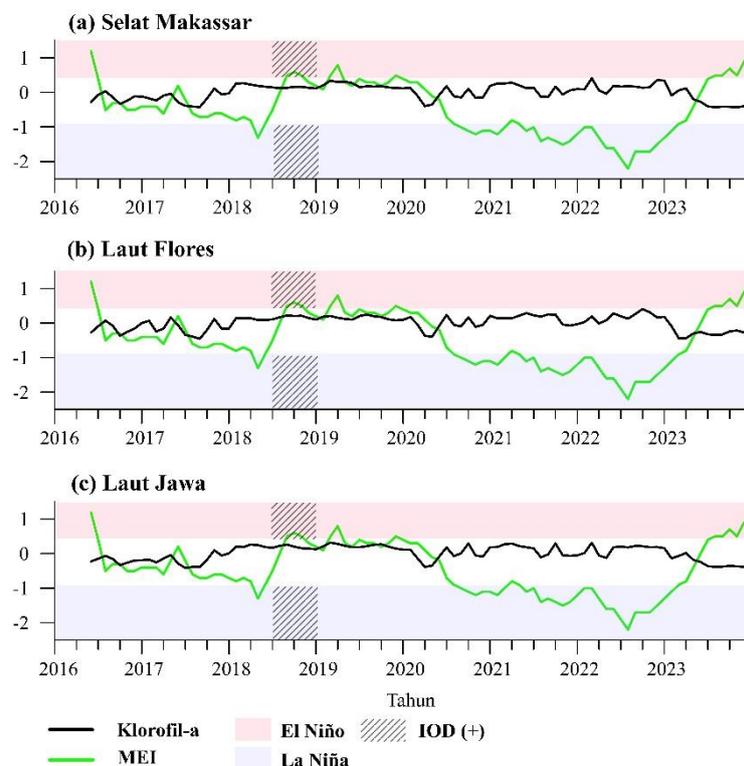
Fenomena *upwelling* pesisir di perairan Indonesia sebagian besar terjadi saat muson timur, sedangkan *downwelling* terjadi saat periode muson barat (Gordon, 2005). Beberapa penelitian terkait *upwelling* muson timur telah dilakukan di berbagai area perairan, seperti Laut Maluku (Munandar dkk., 2023), Laut Arafura (Handoko dkk., 2024), dan Laut Banda (Ratnawati dkk., 2016), dimana konsentrasi klorofil-a lebih tinggi saat muson timur dan lebih rendah ketika muson barat. Namun, hal sebaliknya terjadi di area penelitian ini, dimana peningkatan klorofil-a terjadi saat muson barat. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Wirasatriya dkk. (2021) terkait *upwelling* muson barat yang terjadi di perairan Indonesia. Salah satu lokasi *upwelling* muson barat adalah bagian utara perairan Nusa Tenggara (sepanjang pesisir utara Pulau Lombok hingga Alor) yang mencakup area sampel perairan Laut Flores pada penelitian ini. Angin barat mampu menginduksi terjadinya *upwelling* pesisir, sehingga klorofil-a lebih tinggi pada perairan sekitar Laut Flores saat muson barat.



Gambar 2. Distribusi klorofil-a pada muson barat (a) dan muson timur (b); SPL pada muson barat (c) dan muson timur (d); serta salinitas permukaan pada muson barat (e) dan muson timur (f). Seluruh parameter merupakan hasil rata-rata dari tahun 2016 – 2023 pada masing-masing periode muson.

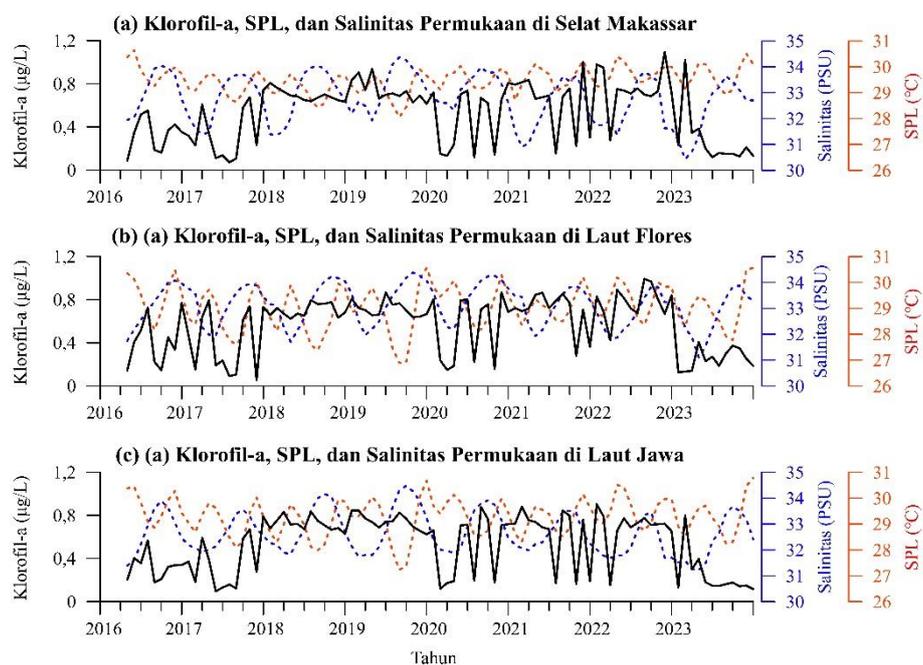
Tingginya salinitas bersamaan dengan rendahnya suhu mengindikasikan masuknya massa air dengan sifat lebih padat secara vertikal dari perairan lebih dalam, sehingga terjadi *upwelling* (Mandal dkk., 2022). Berdasarkan hasil studi ini, SPL lebih rendah saat muson timur (Gambar 2c-b), serta salinitas permukaan lebih tinggi saat muson timur (Gambar 2e-f). Namun justru sebaliknya, klorofil-a area sampel mengalami penurunan saat muson timur yang mengindikasikan terjadi *downwelling*. Tidak terjadinya *upwelling* ketika muson timur pada area studi ini kemungkinan besar disebabkan oleh *onshore ekman transport* seperti yang disebutkan dalam penelitian Wirasatriya dkk. (2021). Angin kuat yang berhembus selama muson timur mampu mendorong pencampuran air dan pelepasan panas, sehingga menurunkan SPL. Akan tetapi, *offshore ekman transport* yang menghasilkan *upwelling* pesisir tidak terdeteksi saat muson timur pada sepanjang pesisir utara Lombok hingga Laut Flores. Oleh sebab itu, nutrisi dari lapisan termoklin tidak bisa naik ke permukaan dan klorofil-a menurun saat muson timur. Hal ini juga didukung oleh hasil penelitian (Sprintall & Liu, 2005) yang menyebutkan bahwa angin muson barat lebih kuat dan tidak teratur mampu menghasilkan transport massa air yang tinggi di sepanjang perairan utara Nusa Tenggara.

Konsentrasi klorofil-a di sepanjang pesisir selatan Kalimantan tinggi saat muson barat. Hal ini disebabkan saat periode muson barat, curah hujan di sebagian besar wilayah Indonesia muson timur semakin tinggi, diikuti dengan meningkatnya limpasan air dari sungai ke pesisir (Xu dkk., 2021). Dengan begitu, nutrisi yang dibawa dari sungai menuju pesisir semakin banyak, sehingga mendukung pertumbuhan fitoplankton. Klorofil-a di bagian selatan Selat Makassar lebih tinggi saat muson barat. Hal ini dapat disebabkan oleh pengaruh perairan kaya klorofil-a di pesisir Kalimantan. Hal yang sama juga terjadi di perairan Laut Jawa bagian barat, yang mana mengalami kenaikan klorofil-a pada muson barat. Hal ini dapat disebabkan oleh pengaruh klorofil-a di pesisir utara Jawa dan pesisir selatan Kalimantan yang tinggi akibat limpasan air sungai. Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Syahdah dkk., 2014), dimana klorofil-a maksimum ketika saat periode muson barat dan minimum saat muson timur di perairan Selat Makassar dan Laut Jawa.



Gambar 3. Grafik rata-rata klorofil-a dengan MEI tahun 2016 hingga 2023. Data klorofil-a telah dilakukan detrend sebelumnya.

Fluktuasi klorofil-a antar tahunan dari 2016 hingga 2023 cenderung stabil antara nilai maksimum dan minimum di seluruh area sampel (Gambar 3). Rata-rata klorofil-a di Laut Flores berkisar antara 0,06 – 0,99 $\mu\text{g/L}$, Laut Jawa bagian barat berkisar antara 0,10 – 0,90 $\mu\text{g/L}$, dan Selat Makassar bagian Selatan berkisar antara 0,07 – 1,09 $\mu\text{g/L}$. Akan tetapi, terdapat perbedaan pada tahun 2018 hingga 2019, dimana klorofil-a cenderung tinggi atau berada di kondisi maksimum sepanjang tahun. Rata-rata klorofil-a tahun 2018 – 2019 di Laut Flores dan Selat Makassar adalah 0,71 $\mu\text{g/L}$, sedangkan di Laut Jawa adalah 0,73 $\mu\text{g/L}$. Kondisi ini kemungkinan besar merupakan respon klorofil-a terdapat fenomena ENSO. Tahun 2018 hingga 2019, terjadi fenomena *El Niño* bersamaan dengan fenomena IOD fase positif berdasarkan pengamatan luring di laman ds.data.jma.go.jp. Saat *el niño* dan IOD fase positif, SPL di perairan Indonesia lebih rendah yang menunjukkan peluang terjadinya *upwelling*. Hasil studi ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menemukan bahwa klorofil-a cenderung naik saat periode *El Niño* bersamaan dengan fase IOD positif dan cenderung turun saat *La Niña* bersamaan dengan fase IOD negative yang terjadi di Selat Bali (Sambah dkk., 2021) dan pesisir utara Nusa Tenggara (Simanjuntak & Lin, 2022).



Gambar 4. Grafik rata-rata bulanan klorofil-a, SPL, dan salinitas permukaan tahun 2016 hingga 2023 di Selat Makassar (a), Laut Flores (b), dan Laut Jawa (c).

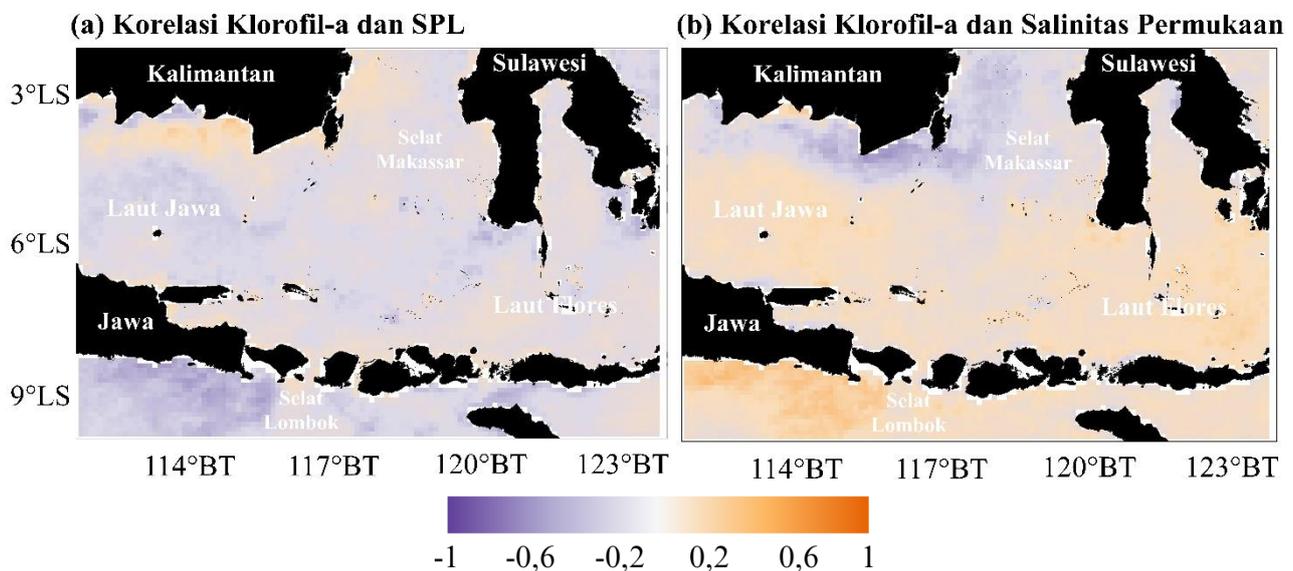
Gambar 4 menyajikan klimatologi bulanan SPL dan salinitas permukaan, dimana rata-rata SPL di sekitar perairan Laut Flores, Jawa, dan Selat Makassar berkisar antara 26,9°C hingga 30,8°C. Sedangkan, rata-rata salinitas permukaan berkisar antara 30,4 hingga 34,5 PSU. Gambar 5a-b menunjukkan korelasi antara klorofil-a dengan SPL dan salinitas permukaan pada setiap piksel dari tahun 2016 hingga 2023. Hasil perhitungan korelasi didominasi oleh korelasi lemah hingga tidak ada korelasi sebanyak 74% (klorofil-a dengan SPL) dan 76% (klorofil-a dengan salinitas permukaan) dari keseluruhan area (Tabel 2). Korelasi negatif sedang antara klorofil-a dan SPL serta korelasi positif sedang antara klorofil-a dengan salinitas permukaan terlihat pada perairan selatan Pulau Jawa dan Nusa Tenggara. Saat muson timur, SPL di perairan selatan Jawa dan Nusa Tenggara mengalami penurunan dan salinitas permukaan mengalami kenaikan, yang mana mengindikasikan *upwelling*. Hal ini sesuai dengan penelitian Mandal dkk. (2022), dimana klorofil-a di pesisir selatan Jawa mencapai maksimum saat muson timur dan minimum ketika muson barat. Penelitian yang dilakukan Anindya Wirasatriya dkk. (2021) dan Purba & Khan (2019) juga mendukung bahwa pesisir selatan Jawa dan Nusa Tenggara merupakan wilayah *upwelling* muson timur.

Korelasi negatif sedang juga terlihat pada pesisir Kalimantan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hidayat dkk. (2023) pada Teluk Benggala, dimana klorofil-a dan salinitas memiliki hubungan berbanding

terbalik. Saat salinitas permukaan tinggi, klorofil-a cenderung rendah. Sedangkan, saat salinitas permukaan rendah, klorofil-a menjadi lebih tinggi. Tingkat salinitas permukaan yang tinggi dapat menyebabkan proses tekanan osmosis pada fitoplankton, sehingga produktivitasnya menurun. Namun, hubungan antara klorofil-a dan salinitas permukaan membutuhkan penelitian lebih lanjut. Hal ini disebabkan, baik kenaikan maupun penurunan dapat meningkatkan klorofil-a. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sugie dkk. (2020), salinitas rendah dapat mendorong pertumbuhan fitoplankton berukuran kecil, namun juga dapat menurunkan pertumbuhan fitoplankton ukuran besar.

Tabel 2. Korelasi klorofil-a dengan SPL dan salinitas permukaan.

Korelasi	Klorofil-a - SPL	Klorofil-a - salinitas
(-1,0) – (-0,6)	-	-
(-0,6) – (-0,2)	25 %	9 %
(-0,2) – (0,2)	74 %	76 %
(0,2) – (0,6)	1 %	15 %
(0,6) – (1,0)	-	-



Gambar 5. Korelasi klorofil-a dengan SPL (a) dan klorofil-a dengan salinitas permukaan (b) tahun 2016 hingga 2023.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapatkan bahwa konsentrasi klorofil-a di pesisir selatan Kalimantan dan pesisir utara Jawa terpantau tinggi sepanjang tahun. Di sisi lain, variabilitas klorofil-a pada area sampel Laut Flores, Jawa, dan Selat Makassar berhubungan dengan fenomena muson. Klorofil-a pada area sampel studi cenderung tinggi saat periode muson barat dan cenderung rendah saat periode muson timur dari tahun 2016 hingga 2023. Saat muson barat, rata-rata konsentrasi klorofil-a adalah $0.58 \mu\text{g/L}$ (Flores), $0.58 \mu\text{g/L}$ (Jawa), dan $0.63 \mu\text{g/L}$ (Selat Makassar). Sedangkan, rata-rata konsentrasi terendah di sampel perairan Laut Jawa dan Selat Makassar terjadi saat muson timur sebesar $0.51 \mu\text{g/L}$ dan $0.47 \mu\text{g/L}$. Laut Flores mengalami fase klorofil-a terendah saat periode transitional I dengan rata-rata klorofil-a $0.55 \mu\text{g/L}$. Berkebalikan, klorofil-a di sepanjang perairan selatan Jawa hingga Nusa Tenggara mengalami kenaikan saat muson timur yang disertai dengan penurunan SPL dan kenaikan salinitas permukaan. Pada tahun 2018 dan 2019, rata-rata klorofil-a cenderung berada di fase maksimum dengan rata-rata $0.71 \mu\text{g/L}$ di Laut Flores dan Selat Makassar, serta $0.73 \mu\text{g/L}$ di Laut Jawa. Hal ini berkaitan dengan terjadinya fenomena *El Niño* bersamaan dengan fase

positif IOD pada tahun tersebut. Penelitian ini menganalisis klorofil-a berdasarkan data pengamatan satelit, yang mana proses interpolasi untuk menutupi data tutupan awan dapat menyebabkan eror. Kedepannya pengamatan lebih lanjut dengan metode pengamatan in situ sangat diperlukan untuk hasil yang lebih baik. Selain itu, dibutuhkan rentang temporal yang lebih panjang agar hubungan variabilitas klorofil-a terhadap fenomena global ENSO dan IOD dapat terlihat lebih jelas.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRPM) ITS. Penelitian ini dibiayai oleh: Direktorat Riset dan Pengabdian Kepada Masyarakat (DRPM) , Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, sesuai dengan Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Keilmuan Dana ITS Batch 1 Tahun 2024 Nomor Kontrak Peneliti : 1168/PKS/ITS/2024, tanggal 29 Februari 2024

Daftar Pustaka

- Abdi, A. M., Boke-Olén, N., Jin, H., Eklundh, L., Tagesson, T., Lehsten, V., & Ardö, J. (2019). First assessment of the plant phenology index (PPI) for estimating gross primary productivity in African semi-arid ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 249–260. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.018>
- Ayers, J. M., Strutton, P. G., Coles, V. J., Hood, R. R., & Matear, R. J. (2014). Indonesian throughflow nutrient fluxes and their potential impact on Indian Ocean productivity. *Geophysical Research Letters*, 41(14), 5060–5067. <https://doi.org/10.1002/2014GL060593>
- EUMETSAT. (2018). *Sentinel-3 OLCI Marine User Handbook*. <http://www.eumetsat.int>
- Falkowski, P. (2012). Ocean Science: The power of plankton. *Nature*, 483, S17–S20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/483S17a>
- Gordon, A. L. (2005). Oceanography of the Indonesian Seas and Their Throughflow. *Oceanography*, 18(4), 14–27. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.01>
- Gordon, A. L., Huber, B. A., Metzger, E. J., Susanto, R. D., Hurlburt, H. E., & Adi, T. R. (2012). South China Sea throughflow impact on the Indonesian throughflow. *Geophysical Research Letters*, 39(11). <https://doi.org/10.1029/2012GL052021>
- Handoko, E. Y., Hayati, N., Syariz, M. A., & Hanansyah, M. P. (2024). Analysis of Chlorophyll-a Variability in the Eastern Indonesian Waters Using Sentinel-3 OLCI from 2020-2021. *Forum Geografi*, 38(1), 74–82. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v38i1.2361>
- Hariyanto, T., Krisna, T. C., Khomsin, Pribadi, C. B., & Anwar, N. (2017). Development of total suspended sediment model using landsat-8 OLI and In-situ data at the surabaya coast, East Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 49(1), 73–79. <https://doi.org/10.22146/ijg.12010>
- Hermawan, E. (2015). *Indeks Monsun Asia-Australia dan Aplikasinya*. LIPI Press.
- Hidayat, M., Wafdan, R., Ramli, M., Muchlisin, Z., & Rizal, S. (2023). Relationship between chlorophyll-a, sea surface temperature, and sea surface salinity. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(3), 389–402. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2023.03.03>
- Litchman, E., de Tezanos Pinto, P., Edwards, K. F., Klausmeier, C. A., Kremer, C. T., & Thomas, M. K. (2015). Global biogeochemical impacts of phytoplankton: A trait-based perspective. *Journal of Ecology*, 103(6), 1384–1396. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12438>
- Mandal, S., Susanto, R. D., & Ramakrishnan, B. (2022). On Investigating the Dynamical Factors Modulating Surface Chlorophyll-a Variability along the South Java Coast. *Remote Sensing*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/rs14071745>
- Matsushita, B., Yang, W., Chang, P., Yang, F., & Fukushima, T. (2012). A simple method for distinguishing global Case-1 and Case-2 waters using SeaWiFS measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.02.008>
- Morel, A., Huot, Y., Gentili, B., Werdell, P. J., Hooker, S. B., & Franz, B. A. (2007). Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. *Remote Sensing of Environment*, 111(1), 69–88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.012>

- Moutzouris-Sidiris, I., & Topouzelis, K. (2021). Assessment of Chlorophyll-a concentration from Sentinel-3 satellite images at the Mediterranean Sea using CMEMS open source in situ data. *Open Geosciences*, 13(1), 85–97. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0204>
- Munandar, B., Wirasatriya, A., Sugianto, D. N., Susanto, R. D., Purwandana, A., & Kunarso. (2023). Distinct mechanisms of chlorophyll-a blooms occur in the Northern Maluku Sea and Sulu Sill revealed by satellite data. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2023.101360>
- Pribadi, C. B., & Hariyanto, T. (2019). The Evaluation of the Physical Condition in Coastal Area as a Result of Changes of Suspended Sediment (Case Study: Coastal Area of Surabaya and Gresik). *International Journal of Geoinformatics*, 15(3), 81–90.
- Purba, N. P., & Khan, A. M. A. (2019). Upwelling session in Indonesia Waters. *World News of Natural Sciences*, 25, 72–83. www.worldnewsnaturalsciences.com
- Ratnawati, H. I., Hidayat, R., Bey, A., & June, T. (2016). Upwelling di Laut Banda dan Pesisir Selatan Jawa serta Hubungannya dengan ENSO dan IOD. *Omni-Akuatika*, 12(3), 119–130. <http://iridl.ideo.columbia.edu/>
- Riadi, A., Triatmadja, R., & Yuwono, N. (2023). Study of Total Suspended Solids (TSS) Distribution and Salinity of Coastal Area Using Satellite Imagery for Pond Development in Pond Irrigation Areas (DIT) Sei Teras. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism (ICOSEAT 2022)*, 26. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2_23
- Sambah, A. B., Wijaya, A., Iranawati, F., & Hidayati, N. (2021). Impact of ENSO and IOD on chlorophyll-a concentration and sea surface temperature in the Bali Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 674(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/674/1/012083>
- Simanjuntak, F., & Lin, T. H. (2022). Monsoon Effects on Chlorophyll-a, Sea Surface Temperature, and Ekman Dynamics Variability along the Southern Coast of Lesser Sunda Islands and Its Relation to ENSO and IOD Based on Satellite Observations. *Remote Sensing*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/rs14071682>
- Sprintall, J., & Liu, W. T. (2005). EKMAN MASS AND HEAT TRANSPORT IN THE INDONESIAN SEAS. *Oceanography*, 18, 88–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.09>
- Sugie, K., Fujiwara, A., Nishino, S., Kameyama, S., & Harada, N. (2020). Impacts of Temperature, CO₂, and Salinity on Phytoplankton Community Composition in the Western Arctic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00821>
- Syahdah, M., Atmadipoera, A. S., Susilo, S. B., & Gaol, J. L. (2014). Variability of Surface Chlorophyll-a in the Makassar Strait – Java Sea, Indonesia. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 14(2), 103–116.
- Talley, L. D., & Sprintall, J. (2005). Deep expression of the Indonesian Throughflow: Indonesian Intermediate Water in the South Equatorial Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(10), 1–30. <https://doi.org/10.1029/2004JC002826>
- Widyanata, D., Dewi, I. P., Rahmania, R., & Baharuddin. (2024). Assessment of suspended sediment particles distribution pattern by using remote sensing approach and in-situ data to support coastal protection in Barito River mouth area, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1350(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1350/1/012044>
- Wirasatriya, A., Susanto, R. D., Kunarso, K., Jalil, A. R., Ramdani, F., & Puryajati, A. D. (2021). Northwest monsoon upwelling within the Indonesian seas. *International Journal of Remote Sensing*, 42(14), 5437–5458. <https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1918790>
- Xu, T., Wei, Z., Li, S., Susanto, R. D., Radiarta, N., Yuan, C., Setiawan, A., Kuswardani, A., Agustyadi, T., & Trenggono, M. (2021). Satellite-observed multi-scale variability of sea surface chlorophyll-a concentration along the south coast of the sumatra-java islands. *Remote Sensing*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/rs13142817>



This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).