

Evaluasi Algoritma Estimasi Klorofil-A di Muara Sungai Sengkarang, Pekalongan

Muhamad Nur Al Fajrin^{1*}, Lilik Maslukah², Aris Ismanto², Muhammad Zainuri²,
Anindya Wirasatriya²

¹Magister Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

²Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Jacob Rais. Tembalang Semarang Jawa Tengah 50275, Indonesia

Email: *muhammadnuralfajrin@gmail.com

Abstrak

Klorofil-a merupakan salah satu pigmen yang dimiliki oleh fitoplankton yang berfungsi membantu proses fotosintesis, sehingga dapat dijadikan indikator penting untuk mendeteksi eutrofikasi di perairan. Pengukuran konsentrasi klorofil-a dapat dilakukan dengan memanfaatkan metode penginderaan jauh menggunakan suatu algoritma yang diterapkan untuk mengonversi data nilai numerik reflektan dari citra satelit menjadi nilai estimasi konsentrasi klorofil-a. Metode tersebut memiliki keunggulan hemat waktu dan biaya dibandingkan dengan analisis laboratorium. Penerapan algoritma yang sesuai dibutuhkan untuk memperoleh hasil yang mendekati nilai aktual di lapangan. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi performa tiga algoritma klorofil-a dari penelitian terdahulu, yaitu: algoritma Maslukah; algoritma *Case 2 Regional Coastal Colour* (C2RCC); dan algoritma Putri di perairan Muara Sungai Sengkarang, Pekalongan dengan menggunakan citra Satelit Sentinel 2. Pengambilan sampel lapangan dilakukan pada tanggal 30 Mei 2024 dengan jumlah stasiun sebanyak 37 titik stasiun pengamatan. Konsentrasi klorofil-a *in situ* memiliki rentang nilai 2,10 - 9,42 µg/L dengan rata-rata 5,78 µg/L. Algoritma Maslukah menunjukkan performa terbaik (RMSE = 4,57 µg/L; MAPE = 99,40; bias = 4,38; $R^2 = 0,53$) dibandingkan dengan algoritma C2RCC (RMSE = 7,17 µg/L; MAPE = 70,39; bias = 2,95; $R^2 = 0,40$) dan algoritma Putri (RMSE = 7,31 µg/L; MAPE = 157,52; bias = 7,10; $R^2 = 0,28$). Variasi spasial-temporal untuk status trofik pada periode bulan April hingga bulan September tahun 2025 didominasi oleh kelas mesotrofik dengan rentang konsentrasi klorofil-a sekitar 5,1 - 20 µg/L.

Kata kunci : Klorofil-a, Sentinel 2, Pekalongan, Sengkarang

Abstract

Evaluation of Chlorophyll-A Estimation Algorithms at the Mouth of the Sengkarang River, Pekalongan

Chlorophyll-a is one of the pigments found in phytoplankton that aids in the process of photosynthesis, making it an important indicator for detecting eutrophication in water bodies. Chlorophyll-a concentration measurements can be carried out using remote sensing methods with an algorithm applied to convert numerical reflectance data from satellite images into estimated chlorophyll-a concentration values. This method has the advantage of being time and cost-effective compared to laboratory analysis. The application of an appropriate algorithm is needed to obtain results that are close to the actual values in the field. This study aims to evaluate the performance of three chlorophyll-a algorithms from previous studies, namely: the Maslukah algorithm; the Case 2 Regional Coastal Colour (C2RCC) algorithm; and the Putri algorithm in the waters of the Sengkarang River Estuary, Pekalongan, using Sentinel 2 satellite imagery. Field sampling was conducted on May 30, 2024, with a total of 37 observation stations. The in situ chlorophyll-a concentration ranged from 2.10 to 9.42 µg/L with an average of 5.78 µg/L. The Maslukah algorithm showed the best performance (RMSE = 4.57 µg/L; MAPE = 99.40; bias = 4.38; $R^2 = 0.53$) compared to the C2RCC algorithm (RMSE = 7.17 µg/L; MAPE = 70.39; bias = 2.95; $R^2 = 0.40$) and the Putri algorithm (RMSE = 7.31 µg/L; MAPE = 157.52; bias = 7.10; $R^2 = 0.28$). Spatial-temporal variation in trophic status during the period from April to September 2025 was dominated by the mesotrophic class with a chlorophyll-a concentration range of approximately 5.1–20 µg/L.

Keywords: Chlorophyll-a, Sentinel 2, Pekalongan, Sengkarang

PENDAHULUAN

Kabupaten dan Kota Pekalongan merupakan wilayah pesisir di Provinsi Jawa Tengah yang berbatasan langsung dengan Laut Utara Jawa dan memiliki total luas wilayah 882,25 km² dengan jumlah penduduk pada tahun 2025 tercatat mencapai 1.354.906 jiwa dan diproyeksikan akan terus meningkat (BPS Jawa Tengah, 2025). Beragam aktivitas dari berbagai sektor dilakukan di area urban untuk memenuhi kebutuhan dan keberlangsungan hidup manusia. Ridarto *et al.* (2023) menjelaskan bahwa Sungai Banger yang terletak di Pekalongan, pada periode waktu 2021-2022 mengalami peningkatan konsentrasi material padatan tersuspensi sebesar 37,6–39,2% akibat adanya peningkatan aktivitas antropogenik. Lebih lanjut, pada sisi barat Sungai Banger terdapat daerah aliran sungai lain yaitu Sungai Sengkarang yang juga menerima masukan material dari daratan. Sungai ini membentang sepanjang 52 km yang melalui kawasan dataran tinggi dan perkotaan dengan daerah hulu di Petungkriyono dan daerah hilir di Wonokerto yang bermuara ke Laut Utara Jawa (Ariadi *et al.*, 2024). Tekanan antropogenik menciptakan dinamika perairan yang berada di Muara Sungai Sengkarang dan kawasan pesisir sekitarnya menjadi sangat kompleks. Salah satu dampak buruk yang dapat ditimbulkan dari kondisi tersebut adalah terjadinya fenomena ledakan alga (*algae bloom*) yang sering diasosiasikan dengan peningkatan konsentrasi klorofil-a (Cheng dan Zhang, 2021).

Klorofil-a merupakan salah satu pigmen yang dimiliki oleh fitoplankton yang berfungsi untuk proses fotosintesis, sehingga dapat digunakan sebagai indikator dalam menilai kualitas lingkungan perairan (Wu *et al.*, 2025). Pengukuran klorofil-a dengan metode konvensional melalui analisis laboratorium memiliki kelemahan yaitu memakan waktu dan membutuhkan biaya yang besar. Metode penginderaan jauh dalam bentuk produk citra satelit dapat menjadi solusi dari kelemahan metode konvensional. Pada prinsipnya, pendekatan dengan metode ini dilakukan dengan menggunakan suatu algoritma yang diterapkan untuk mengonversi data nilai numerik reflektan dari citra satelit menjadi nilai estimasi konsentrasi klorofil-a (Clay *et al.*, 2019). Pada beberapa penelitian terkait algoritma estimasi konsentrasi klorofil-a, citra Satelit Sentinel 2 digunakan karena memiliki keunggulan berupa resolusi spasial cukup tinggi (hingga 10 meter) dan resolusi temporal yang baik (merekam suatu wilayah setiap 5 hari sekali) dengan area cakupan spasial yang luas (10.000 km²) serta pemantauan secara terus-menerus sejak tahun 2015 hingga saat ini. Selain itu, citra Satelit Sentinel 2 memiliki beragam jenis level yang dapat diakses dan diunduh oleh pengguna secara gratis sesuai dengan kebutuhan (Gascon *et al.*, 2017; Gatti dan Bertolini, 2015). Penelitian yang menggunakan citra Satelit Sentinel 2 untuk mengamati sebaran konsentrasi klorofil-a dapat dijumpai dalam penelitian Qanita *et al.* yang dilakukan di Teluk Semarang dan Astiti *et al.* (2025) dengan lokasi penelitian yang berada di Perairan Bali Tenggara. Kedua penelitian tersebut berhasil memanfaatkan keunggulan metode penginderaan jauh untuk mengidentifikasi kondisi status trofik di suatu perairan.

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan Kunarso *et al.* (2025) terkait analisis konsentrasi klorofil-a di Muara Sungai Sengkarang dan sekitarnya, lebih mengandalkan analisis laboratorium yang membutuhkan biaya besar. Sedangkan, pemantauan konsentrasi klorofil-a dengan metode pendekatan penginderaan jauh belum pernah dilakukan sebelumnya untuk area Muara Sungai Sengkarang. Demikian, diperlukan kajian terkait analisis sebaran konsentrasi klorofil-a di Muara Sungai Sengkarang dengan pendekatan metode penginderaan jauh sebagai opsi untuk akses informasi yang lebih murah, efisien dan efektif dalam mendeteksi eutrofikasi sehingga dapat mendukung *stakeholder* dalam menentukan kebijakan lebih lanjut untuk mencegah kerugian yang dapat ditimbulkan. Pemahaman mengenai penerapan algoritma estimasi klorofil-a yang sesuai dibutuhkan untuk memperoleh hasil yang mendekati nilai aktual di lapangan. Berdasarkan hal tersebut, studi ini bertujuan untuk mencari algoritma estimasi klorofil-a dengan performa terbaik untuk dapat diterapkan secara lebih lanjut dalam menganalisis status trofik perairan di Muara Sungai Sengkarang, Pekalongan dari tiga algoritma penelitian terdahulu, yaitu: algoritma Maslukah *et al.* (2024); algoritma *Case 2 Regional Coastal Colour* (C2RCC); dan algoritma Putri *et al.* (2025).

MATERI DAN METODE

Lokasi Penelitian dan Akuisisi Data Lapangan

Lokasi penelitian berada di Perairan Muara Sungai Sengkarang, Pekalongan, Jawa Tengah, Indonesia dengan koordinat lokasi 6°49'35" LS - 6°51'55" LS dan 109°38'45" BT - 109°41'5" BT. Penentuan lokasi pengamatan dilakukan berdasarkan metode *purposive sampling*. Stasiun pengamatan berjumlah 37 titik stasiun yang mewakili area sekitar pesisir (5, 8, 9, 10, 11, dan 16) dan muara sungai (1, 6, 7, 12, 13, 14, dan 15),

kawasan mangrove (2, 3 dan 4), serta area laut (17 hingga 37) (Gambar 1). Kegiatan pengambilan sampel lapangan dilakukan pada tanggal 30 Mei 2024 selama pukul 07:00-12:00 WIB mengacu pada waktu perekaman satelit Sentinel 2 ketika melintasi lokasi penelitian yaitu pada pukul 09:45 WIB. Sampel air laut diambil sebanyak 1 liter di kolom permukaan air (sekitar 30 cm dari permukaan) dan disimpan di dalam *cool box* (Maslukah *et al.*, 2024).

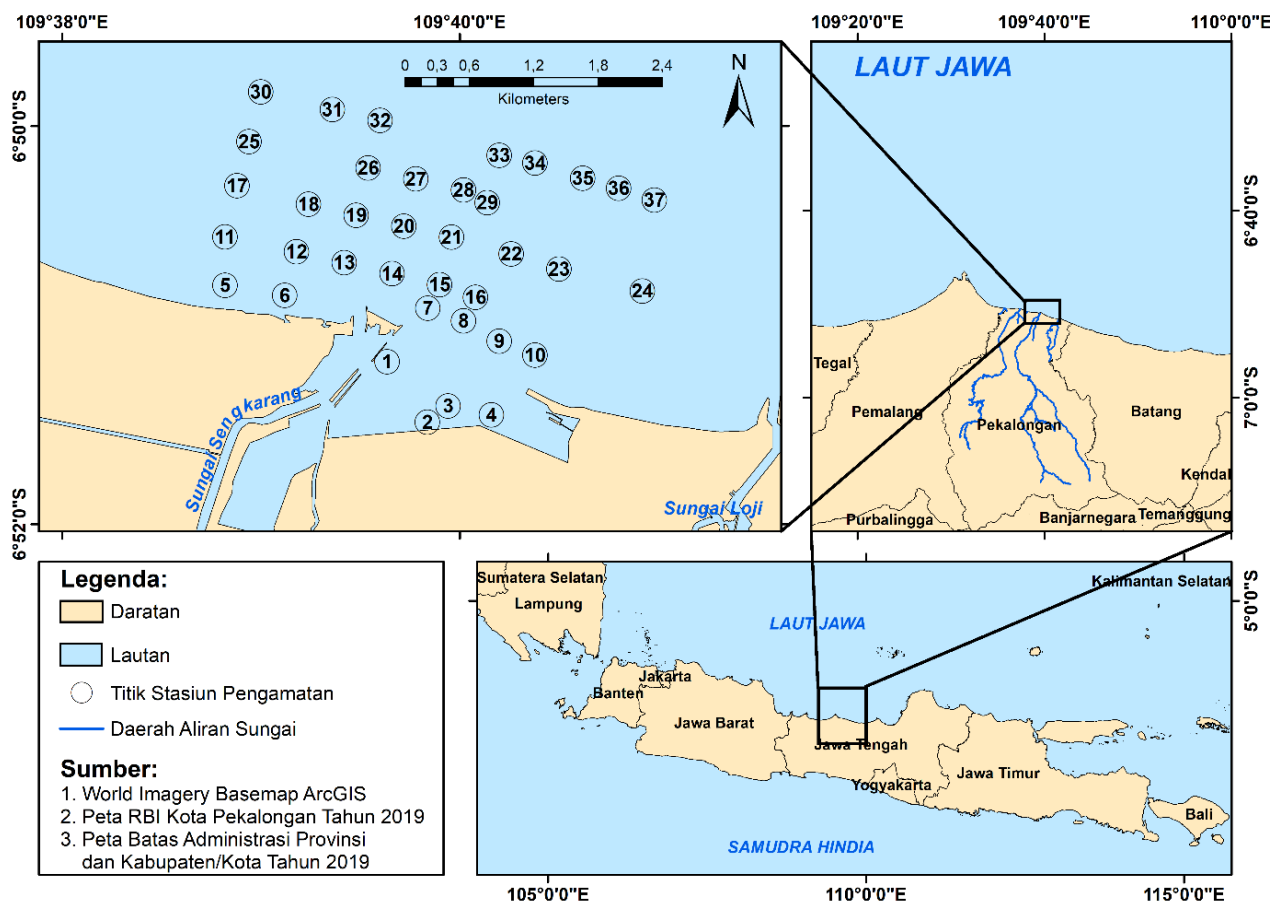
Analisis Sampel Klorofil-a

Analisis sampel dilakukan di Laboratorium Geologi Laut dan Laboratorium Kimia, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro. Sampel klorofil-a dianalisis menggunakan metode spektrofotometri berdasarkan SNI 06-2412-1991 (Kunarto *et al.*, 2025). Sampel air sebanyak 1 liter ditambahkan 3 tetes larutan $MgCO_3$, lalu difiltrasi dengan kertas selulosa ukuran $0,45 \mu m$ menggunakan perangkat *vacuum filtration*. Kertas hasil filtrasi diekstraksi dengan 10 ml larutan aseton 90% dan disimpan di lemari pendingin selama 1 hari. Selanjutnya, sampel disentrifugasi untuk pemisahan hasil ekstraksi menggunakan mesin *centrifuge* dengan kecepatan 4000 rpm. Nilai absorbansi diukur dengan spektrofotometer UV-Vis pada tiga panjang gelombang, yaitu: 664 nm, 645 nm, dan 630 nm. Perhitungan konsentrasi klorofil-a mengacu pada persamaan dalam metode American Public Health (APHA).

$$C = (11,85 \times \lambda_{664}) - (1,54 \times \lambda_{647}) - (0,08 \times \lambda_{630})$$

$$Klorofil - a (\mu g/L) = \frac{C \times V_a}{V_s \times d}$$

Dimana: C = konsentrasi klorofil-a dalam ekstrak; V_a = volume aseton (ml), V_s = volume sampel yang disaring (L), d = diameter kuvet (cm)



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Akuisisi dan Pengolahan Data Citra Satelit Sentinel 2

Satelit yang digunakan dalam penelitian ini adalah satelit Sentinel 2 milik European Space Agency (ESA) yang dapat diakses pada laman <https://browser.dataspace.copernicus.eu>. Produk citra satelit Sentinel 2 yang digunakan adalah citra level 2A dengan sistem proyeksi UTM/WGS84 yang memiliki nilai *Bottom of Atmosphere* (BOA) dan klasifikasi piksel dasar, serta sudah dikoreksi atmosferik dan geometrik menggunakan Sen2Cor oleh ESA. Citra satelit Sentinel 2 level 1C juga digunakan untuk transformasi nilai spektral pada citra menjadi nilai estimasi konsentrasi klorofil-a menggunakan prosesor *Case 2 Regional Coastal Colour* (C2RCC). Sentinel 2 memiliki 13 kanal dengan rentang panjang gelombang 443 - 2190 nm yang terbagi dalam 3 resolusi spasial yaitu 10, 20, dan 60 meter (Gascon *et al.*, 2017; Gatti dan Bertolini, 2015). Data citra Sentinel 2 dengan waktu perekaman 30 Mei 2025 digunakan untuk verifikasi penerapan algoritma penelitian terdahulu. Selain itu, untuk analisis salah satu citra satelit dari beberapa perekaman citra dalam satu bulan yang memiliki persentase tutupan awan terendah juga diakuisisi untuk mewakili bulan tersebut dengan periode Bulan April hingga bulan September tahun 2025 yang digunakan untuk analisis spasial-temporal klorofil-a (Tabel 1). Data citra tahun 2025 untuk periode bulan Januari hingga Maret dan September hingga November tidak dianalisis sebab seluruh citra yang direkam satelit Sentinel 2 tertutup oleh awan.

Resampling dilakukan untuk menyetarakan resolusi spasial citra ke 10 meter, sehingga pengolahan dari *band* dengan resolusi yang berbeda dapat dilakukan (Zheng *et al.*, 2017). *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) dan *masking* dengan data hasil digitasi dilakukan untuk memisahkan area perairan dari area daratan (Du *et al.*, 2016). Tampilan objek pada citra kemudian diproses dengan teknik penajaman citra (*image sharpening*) untuk memperoleh visualisasi yang lebih informatif. Tahap ini dilakukan untuk meningkatkan interpretabilitas visual citra agar tampak lebih jelas secara estetika maupun untuk keperluan analisis citra (Putra *et al.*, 2022).

Transformasi citra dari nilai spektral dilakukan menggunakan algoritma yang dibangun dari metode empiris yaitu Maslukah *et al.* (2024) dan Putri *et al.* (2025) serta pendekatan *inherent optical properties* (IOPs) untuk algoritma C2RCC yang dimodifikasi Brockmann *et al.* (2016) dan ESA dengan penyesuaian *input* parameter di lokasi penelitian menurut Helmi *et al.* (2025) yaitu salinitas (21,5 PSU) dan suhu (31,6°C), untuk parameter lain diatur ke *default*. Berikut persamaan dari tiga algoritma tersebut:

Maslukah *et al.*, (2024)

$$\text{Klorofil} - a = 10^{(2,743 - 0,725 \times (\log((Rrs(490) \times c)) - 0,625 \times (\log(Rrs(560) \times c)) + 1,623 \times (\log(Rrs(665) \times c)) + 0,809 \times (\log(Rrs(842) \times c)))}$$

Case 2 Regional Coastal Colour (C2RCC)

$$\text{Klorofil} - a = iop_apig^{CHL_{exp}} \times CHL_{fac}$$

Putri *et al.*, (2025)

$$\begin{aligned} \text{Klorofil} - a = & 3,36 - 239,98 \times Rrs(490) + 235,19 \times Rrs(560) - 0,578 \times Rrs(665) \\ & - 56,68 \times Rrs(490)1610 \end{aligned}$$

Dimana: Rrs(490) = *band* biru; Rrs(560) = *band* hijau; Rrs(665) = *band* merah; Rrs(842) = *band* inframerah dekat; Rrs(1610) = *band* inframerah gelombang pendek; c = 0,036/Rrs(842); iop apig = koefisien absorpsi pigmen fitoplankton pada 443 nm; CHL_{exp} = eksponen klorofil (*default* = 1,04); CHL_{fac} = faktor klorofil (*default* = 21,0)

Tabel 1. Daftar produk citra satelit Sentinel 2 yang digunakan untuk analisis spasial-temporal klorofil-a

Citra Satelit Sentinel 2	Persentase tutupan awan
S2C_MSIL2A_20250430T024611_N0511_R132_T49MCN_20250430T073713	21,99
S2C_MSIL2A_20250510T024541_N0511_R132_T49MCN_20250510T071405	16,06
S2B_MSIL2A_20250604T024529_N0511_R132_T49MCN_20250604T053007	8,01
S2A_MSIL2A_20250721T025201_N0511_R132_T49MCN_20250721T074614	1,18
S2B_MSIL2A_20250823T024529_N0511_R132_T49MCN_20250823T052951	19,87
S2C_MSIL2A_20250907T024601_N0511_R132_T49MCN_20250907T062019	22,68

Tabel 2. Klasifikasi status trofik berdasarkan konsentrasi klorofil-a menurut US EPA (Sudradjat *et al.*, 2024)

Klasifikasi status trofik	Konsentrasi klorofil-a (µg/L)
Oligotrofik	< 5
Mesotrofik	5 - 20
Eutrofik	> 20

Pada algoritma C2RCC, konsep prosesor ini bekerja dengan inversi spektrum menggunakan model bio-optik dan *neural network* yang dilatih dari jutaan simulasi. Metode ini memungkinkan C2RCC mengekstraksi *inherent optical properties* (IOPs) dan mengonversi menjadi konsentrasi klorofil-a yang dapat diterapkan secara global (Brockmann *et al.*, 2016).

Hasil perolehan konsentrasi klorofil-a estimasi dari algoritma penelitian terdahulu dengan performa terbaik diklasifikasikan berdasarkan status trofik menurut United States Environmental Protection Agency (US EPA) untuk menampilkan kondisi kualitas lingkungan perairan di Muara Sungai Sengkarang (Tabel 2) (Sudradjat *et al.*, 2024).

Metode Uji Statistik

Uji statistik dilakukan untuk menghitung akurasi nilai estimasi klorofil-a yang diperoleh dari algoritma yang digunakan terhadap nilai sebenarnya (*in situ*) di lapangan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), bias, dan koefisien determinasi (R^2) (Maslukah *et al.*, 2024).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Chl_o - Chl_e)^2}{n}}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{Chl_o - Chl_e}{Chl_o} \right|$$

$$Bias = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (Chl_e - Chl_o)$$

$$R^2 = \left[\frac{n \times \sum_{i=1}^n (Chl_o \times Chl_e) - \sum_{i=1}^n Chl_o \times \sum_{i=1}^n Chl_e}{\sqrt{[n \times \sum_{i=1}^n (Chl_o)^2 - (\sum_{i=1}^n Chl_o)^2][n \times \sum_{i=1}^n (Chl_e)^2 - (\sum_{i=1}^n Chl_e)^2]}} \right]^2$$

Dimana: Chl_e = klorofil-a estimasi; Chl_o = klorofil-a observasi (*in situ*); n = jumlah sampel

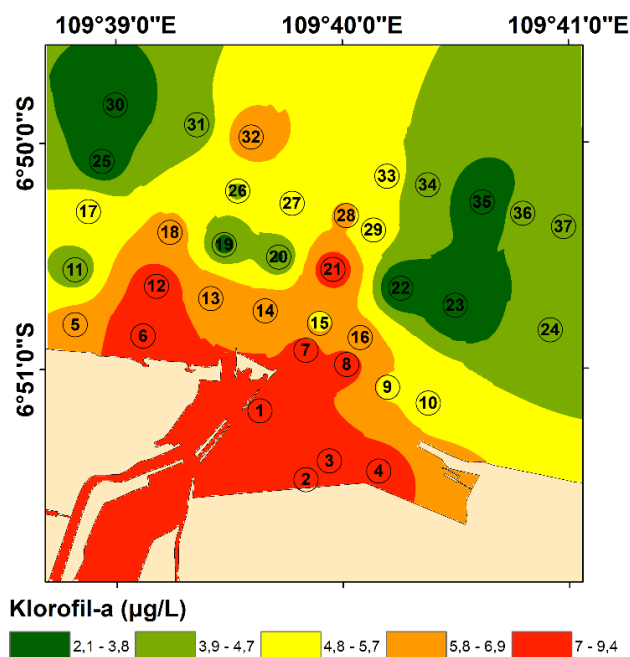
HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai konsentrasi klorofil-a *in situ* dan estimasi pada tanggal 30 Mei 2024 di Muara Sungai Sengkarang ditampilkan pada Tabel 3. Sebaran konsentrasi klorofil-a *in situ* dari 37 titik stasiun pengamatan memiliki nilai rata-rata 5,78 µg/L dengan konsentrasi terendah yaitu 2,10 µg/L pada stasiun 22 dan tertinggi yaitu 9,42 µg/L pada stasiun 6 (Gambar 2). Lebih lanjut, sebaran konsentrasi klorofil-a estimasi berdasarkan algoritma Maslukah *et al.* (2024) memiliki rentang nilai 7,85 – 9,87 µg/L dengan rata-rata 9,87 µg/L. Sebaran konsentrasi klorofil-a estimasi berdasarkan algoritma C2RCC memiliki rentang nilai 2,48 – 29,44 µg/L dengan rata-rata 8,43 µg/L. Sebaran konsentrasi klorofil-a estimasi berdasarkan algoritma Putri *et al.* (2025) memiliki rentang nilai 9,51 – 15,30 µg/L dengan rata-rata 12,58 µg/L. Berdasarkan nilai rata-rata estimasi terhadap nilai rata-rata *in situ*, ketiga algoritma *overestimate* dalam mendeteksi konsentrasi klorofil-a, dimana algoritma C2RCC (algoritma Putri *et al.* (2025)) memiliki selisih nilai terkecil (terbesar). Secara spasial, konsentrasi tertinggi berada pada area di sekitar muara atau area pertemuan antara air sungai dan air laut. Hal ini mengindikasikan adanya masukan material dari daratan seperti nutrien dan material padatan tersuspensi. Pola distribusi ini umum dijumpai di perairan, dimana konsentrasi klorofil-a lebih tinggi di area sekitar muara sungai dan cenderung menurun seiring dengan jarak yang semakin jauh (Damar *et al.*, 2019).

Tabel 3. Konsentrasi klorofil-a ($\mu\text{g/L}$) *in situ* dan estimasi pada tanggal 30 Mei 2024

Konsentrasi	<i>In situ</i>	Algoritma		
		Maslukah*	C2RCC	Putri**
Minimum	2,10	7,85	2,48	9,51
Maximum	9,42	14,32	29,44	15,30
Mean	5,78	9,96	8,44	12,51
Median	5,54	9,36	4,52	12,20
Standar deviasi	2,02	1,67	7,66	1,60

Keterangan: (*) = Maslukah *et al.* (2024); (**) = Putri *et al.* (2025)



Gambar 2. Sebaran konsentrasi klorofil-a *in situ* pada tanggal 30 Mei 2024 dengan visualisasi menggunakan metode interpolasi IDW (*Inverse Distance Weighting*)

Hasil evaluasi performa algoritma estimasi klorofil-a pada tanggal 30 Mei 2024 dengan uji statistik ditampilkan pada Tabel 4. Kriteria algoritma terbaik dalam penelitian ini mengacu pada nilai RMSE dan R^2 , dimana kedua uji tersebut merepresentasikan besarnya kesalahan absolut dan konsistensi hubungan antara nilai estimasi dan nilai *in situ* yang relevan untuk menilai tingkat akurasi algoritma dalam mengestimasi konsentrasi klorofil-a pada lokasi penelitian. Sedangkan, MAPE dan bias digunakan untuk melihat kesalahan relatif dan arah kesalahan (*overestimate/underestimate*) sehingga dapat menjelaskan keterbatasan dari algoritma. Algoritma Maslukah *et al.* (2024) memberikan performa terbaik (RMSE = 4,57 $\mu\text{g/L}$; MAPE = 99,40; bias = 4,38; R^2 = 0,53) dibandingkan dengan algoritma C2RCC (RMSE = 7,17 $\mu\text{g/L}$; MAPE = 70,39; bias = 2,95; R^2 = 0,40) dan algoritma Putri *et al.* (2025) (RMSE = 7,31 $\mu\text{g/L}$; MAPE = 157,52; bias = 7,10; R^2 = 0,28).

Algoritma Maslukah *et al.* (2024) dibangun dari metode empiris yang dikalibrasikan untuk perairan Banjir Kanal Timur, Semarang dengan persamaan matematis yang diperoleh dari regresi berganda menggunakan kombinasi beberapa *band* pada Sentinel 2. Performa dari algoritma Maslukah *et al.* (2024) cukup baik untuk diterapkan di Muara Sungai Sengkarang. Hal ini diduga karena karakteristik optik perairan Muara Sungai Sengkarang memiliki kemiripan dengan Perairan Banjir Kanal Timur yaitu sama-sama merupakan perairan pesisir dangkal yang bersifat *optically complex* (*case-2 waters*) dengan dominasi masukan material daratan berupa nutrien, material padatan tersuspensi, dan CDOM (Wilson *et al.*, 2024). Kondisi tersebut menyebabkan respons spektral perairan didominasi oleh pengaruh *non-algal particles*, sehingga algoritma empiris yang dikalibrasi pada lingkungan pesisir serupa masih mampu memberikan performa yang relatif baik ketika diterapkan lintas lokasi (Sòria-Perpinyà *et al.*, 2021).

Algoritma Putri *et al.* (2025) dibangun dengan metode yang serupa dengan algoritma Maslukah *et al.* (2024), namun algoritma ini dikalibrasi di kondisi perairan yang berbeda yaitu di Waduk Saguling, Bandung Barat, Jawa Barat. Selain itu, ada perbedaan jumlah data yang digunakan dalam membangun kedua algoritma tersebut. Semakin banyak data, maka algoritma memiliki peluang lebih besar dalam mempelajari pola yang lebih sesuai. Hal ini menjelaskan performa yang kurang baik dari algoritma Putri *et al.* (2025) untuk diterapkan di Muara Sungai Sengkarang. Meskipun performa algoritma C2RCC tidak sebaik algoritma Maslukah *et al.* (2024), untuk algoritma yang tidak dikalibrasi secara lokal sudah memberikan hasil yang cukup untuk diterapkan dalam mengestimasi klorofil-a di Muara Sungai Sengkarang. Hafeez dan Wong (2019) mengemukakan hal serupa untuk kemampuan dari algoritma C2RCC dalam mengestimasi parameter kualitas air di pesisir Sungai Pearl, Hongkong.

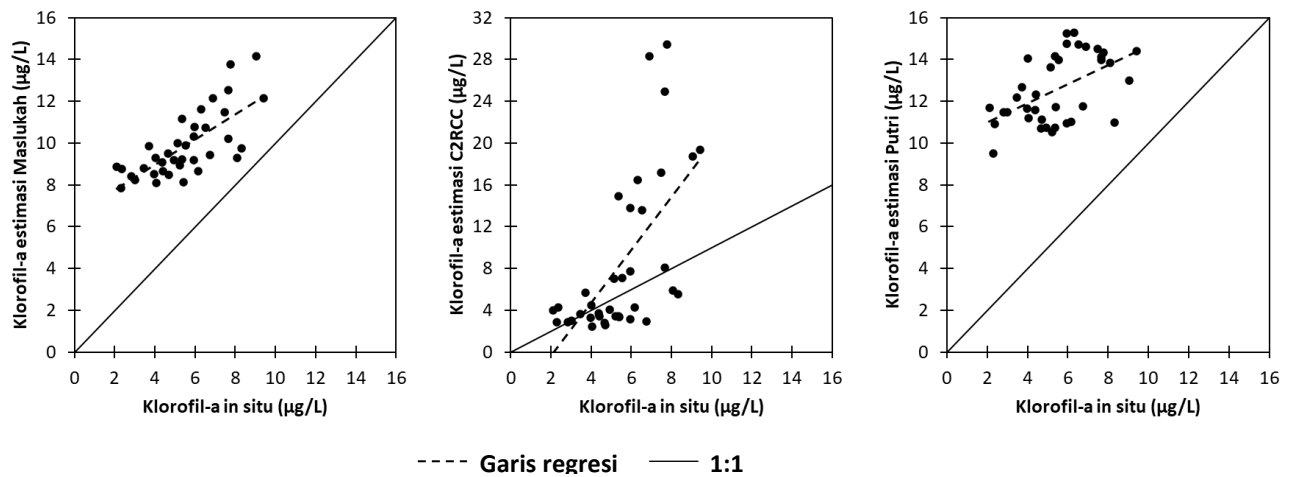
Pada penelitian ini, algoritma Maslukah *et al.* (2024) yang menunjukkan performa terbaik diterapkan untuk memperoleh konsentrasi klorofil-a estimasi di Perairan Muara Sungai Sengkarang, lalu diklasifikasikan berdasarkan status trofik perairan menurut US EPA dengan periode waktu pengamatan bulan April hingga bulan September 2025. Berdasarkan hal tersebut, secara spasial-temporal, status trofik di Muara Sungai Sengkarang didominasi oleh kelas mesotrofik (5,1 – 20 µg/L) atau masih dalam batas wajar. Namun, pada bulan Mei dan bulan Juni, di daerah aliran sungai dan sekitar muara sungai terdapat konsentrasi klorofil-a yang melebihi batas wajar ($> 20 \mu\text{g/L}$) yang mengindikasikan terjadinya eutrofikasi. Fenomena ini diduga berkaitan dengan peningkatan suplai nutrisi dari daratan, baik yang berasal dari limpasan permukaan, aktivitas permukiman, maupun kegiatan pertanian di daerah aliran Sungai Sengkarang. Pada periode tersebut, diduga bahwa kombinasi antara masukan nutrisi yang tinggi dan kondisi perairan muara yang relatif dangkal memungkinkan terjadinya respon cepat fitoplankton terhadap ketersediaan nutrisi (Madjar *et al.*, 2024). Selain itu, proses hidrodinamika di muara, seperti arus yang melemah dan waktu tinggal air yang lebih lama dapat memperkuat akumulasi fitoplankton dan meningkatkan konsentrasi klorofil-a secara lokal. Pola ini sejalan dengan karakteristik umum perairan muara di wilayah tropis, dimana area transisi sungai-laut sering menjadi *hotspot* eutrofikasi dibandingkan area condong ke arah laut lepas. Dinamika tersebut disebabkan oleh banyak faktor, seperti kondisi musim yang memengaruhi intensitas curah hujan, lama penyinaran matahari dan kecepatan serta arah angin (Sudradjat *et al.*, 2024). Kemudian, parameter hidro-oseanografi juga berperan, yaitu seperti kondisi debit sungai, arus sejajar pantai dan pasang surut (Li *et al.*, 2023; Xing *et al.*, 2021).

Walaupun suatu algoritma dapat digunakan untuk mengestimasi konsentrasi klorofil-a, pada praktiknya secara umum akan selalu terdapat penyimpangan (Gambar 3). Pola dari grafik menunjukkan bahwa algoritma dapat mengestimasi nilai konsentrasi klorofil-a yang *underestimate* atau *overestimate* dari nilai *in situ*. Hal ini ditunjukkan oleh nilai MAPE yang besar dari ketiga algoritma. Penyimpangan antara nilai klorofil-a estimasi dan *in situ* diduga dipengaruhi oleh kompleksitas optik perairan muara yang bersifat *optically complex (case-2 waters)*. Penggunaan metode penginderaan jauh dalam mendeteksi konsentrasi klorofil-a memiliki potensi kesalahan estimasi karena adanya interferensi optik dari partikel anorganik. Pada perairan seperti Muara Sungai Sengkarang, sinyal reflektan yang direkam sensor satelit dipengaruhi secara simultan oleh klorofil-a, material padatan tersuspensi, dan *colored dissolved organic matter* (CDOM), sehingga pemisahan sinyal klorofil-a menjadi kompleks dan berpotensi menghasilkan galat (Maciel *et al.*, 2023). Selain itu, perbedaan skala spasial antara titik pengambilan sampel *in situ* dan ukuran piksel citra Satelit Sentinel 2, serta dinamika perairan muara yang tinggi akibat pengaruh arus, pasang surut, dan resuspensi sedimen, turut berkontribusi terhadap ketidakpastian hasil estimasi (Park *et al.*, 2024). Kondisi aerosol, tutupan awan tipis, dan adanya perbedaan waktu (*mismatch*) akuisisi antara data *in situ* dengan waktu perekaman satelit juga dapat meningkatkan persentase kesalahan pada algoritma (Asim *et al.*, 2021; Warren *et al.*, 2019).

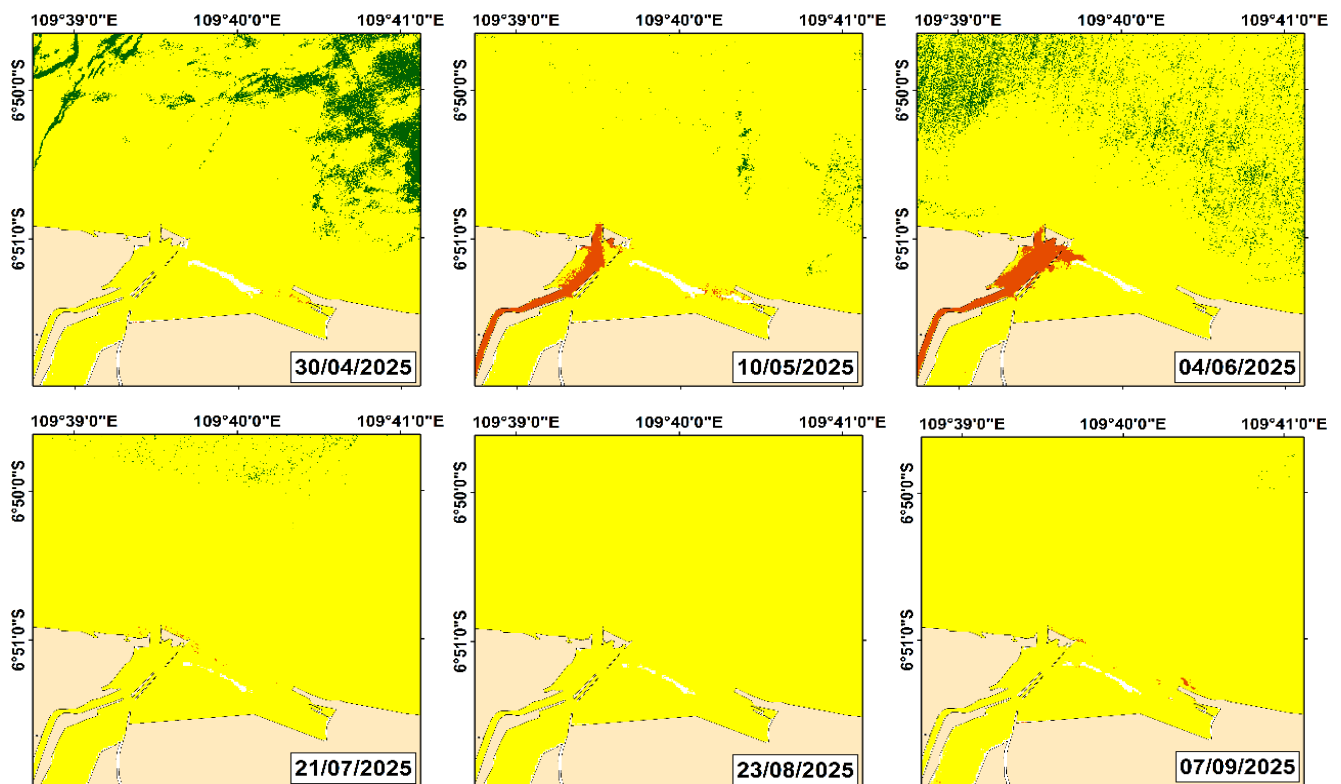
Tabel 4. Hasil uji statistik algoritma estimasi klorofil-a pada tanggal 30 Mei 2024

Algoritma	RMSE	MAPE	Bias	R ²
Maslukah*	4,57	99,40	4,38	0,53
C2RCC	7,17	70,39	2,95	0,40
Putri**	7,31	157,52	7,10	0,28

Keterangan: (*) = Maslukah *et al.* (2024); (**) = Putri *et al.* (2025)



Gambar 3. Grafik konsentrasi klorofil-a *in situ* vs estimasi pada tanggal 30 Mei 2024 dari tiga algoritma yang diuji



Keterangan:

Daratan Tidak ada data

Klasifikasi status trofik berdasarkan klorofil-a (µg/L) (Sudradjat et al. 2024)

chl < 5 (oligotrofik/baik) 5,1 - 20 (mesotrofik/wajar) 20 < chl (eutrofik/buruk)

Gambar 4. Peta status trofik perairan berdasarkan konsentrasi klorofil-a estimasi yang diperoleh dengan menggunakan algoritma Maslukah *et al.* (2024) di Muara Sungai Sengkarang, Pekalongan pada periode waktu pengamatan Bulan April hingga bulan September 2025

Performa yang terbatas dari hasil pengujian tiga algoritma dari penelitian terdahulu menjelaskan bahwa diperlukan algoritma baru yang dikalibrasi secara lokal dan spesifik untuk perairan di Muara Sungai Sengkarang, Pekalongan. Peningkatan akurasi dari konsentrasi klorofil-a estimasi akan memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pemantauan kualitas lingkungan perairan secara berkelanjutan. Upaya tersebut sejalan dengan PP Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Mutu Laut yang menetapkan baku mutu air laut berdasarkan peruntukan melalui parameter kimia, fisika dan biologi. Meskipun, untuk parameter klorofil-a belum ditetapkan sebagai parameter baku mutu secara eksplisit. Adanya regulasi terkait bertujuan untuk menjaga dan meningkatkan mutu lingkungan hidup agar fungsi ekologis perairan laut berada dalam kondisi yang baik.

KESIMPULAN

Nilai konsentrasi klorofil-a *in situ* pada tanggal 30 Mei 2024 di Muara Sungai Sengkarang dari 37 titik stasiun pengamatan memiliki nilai rata-rata 5,78 $\mu\text{g/L}$ dengan konsentrasi terendah yaitu 2,10 $\mu\text{g/L}$ pada stasiun 22 dan tertinggi yaitu 9,42 $\mu\text{g/L}$ pada stasiun 6. Hasil evaluasi terhadap tiga algoritma estimasi klorofil-a dari penelitian terdahulu di Muara Sungai Sengkarang menunjukkan bahwa algoritma Maslukah yang dikalibrasikan memberikan kinerja performa terbaik (RMSE = 4,57 $\mu\text{g/L}$; MAPE = 99,40; bias = 4,38; $R^2 = 0,53$) dibandingkan dengan algoritma global C2RCC dan algoritma Putri. Pengamatan variasi spasial-temporal menggunakan konsentrasi klorofil-a estimasi dari algoritma Maslukah untuk analisis status trofik pada periode bulan April hingga bulan September tahun 2025 menunjukkan bahwa dari waktu periode pengamatan tersebut didominasi oleh kelas mesotrofik (5 – 20 $\mu\text{g/L}$) atau masih dalam batas wajar. Rekomendasi untuk penelitian di waktu mendatang yaitu dibutuhkan algoritma baru yang dibangun dan dikalibrasikan khusus untuk Perairan Pekalongan, sehingga diperoleh nilai konsentrasi klorofil-a estimasi yang lebih mendekati nilai aktual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Sumber anggaran penelitian ini dibiayai oleh program Riset Publikasi Internasional Bereputasi Tinggi (RPIBT) dengan nomor 609-115/UN7.D2/PP/VIII/2023 dan 609-115/UN7.D2/PP/VII/2024 serta Hibah Penelitian dari Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro. Atas bantuannya, Kami ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariadi, H., Fahrurrozi, A., Wijianto, W., & Syakirin, M. B. 2024. Strategi Pengelolaan Sumber Daya Ikan Berkelanjutan di Sungai Sengkarang, Kabupaten Pekalongan, Jawa Tengah. *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan Dan Perikanan*, 14(1): 37–45.
- Asim, M., Brekke, C., Mahmood, A., Eltoft, T., & Reigstad, M. 2021. Improving Chlorophyll-A Estimation From Sentinel-2 (MSI) in the Barents Sea Using Machine Learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14:5529–5549. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3074975>.
- Astiti, S. P. C., Dharma, I. G. B. S., Pariartha, I. P. G. S., As-Syakur, Abd. R., & Arsana, I. G. N. K. 2025. Analysis of total suspended matter and chlorophyll-a in southeast Bali using Sentinel-2 satellite imagery data. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(7): 152–166. <https://doi.org/10.12912/27197050/205088>.
- BPS Jawa Tengah. 2025. Jumlah Penduduk dan Rasio Jenis Kelamin Menurut Kabupaten/Kota di Provinsi Jawa Tengah (Jiwa); Luas Daerah, Jumlah Pulau, Tinggi Wilayah, dan Jarak ke Ibukota Provinsi Menurut Kabupaten/Kota di Provinsi Jawa Tengah, 2019.
- Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Stelzer, K., Embacher, S., & Ruescas, A. 2016. Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters. *Living Planet Symposium*, Praha, Republik Ceko, 9 – 13 Mei 2016.
- Cheng, Y., & Zhang, S. 2021. The Research on the Variation of Chlorophyll-a in Bohai Sea Based on MODIS Data. *ESMA 2020, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/714/2/022029>.
- Clay, S., Peña, A., DeTracey, B., & Devred, E. 2019. Evaluation of Satellite-Based Algorithms to Retrieve Chlorophyll-a Concentration in the Canadian Atlantic and Pacific Oceans. *Remote Sensing*, 11(22): 2609. <https://doi.org/10.3390/rs11222609>.

- Damar, A., Hesse, K.-J., Colijn, F., & Vitner, Y. 2019. The eutrophication states of the Insian sea large marine ecosystem: Jakarta Bay, 2001–2013. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 163: 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.05.012>.
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. 2016. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, 8(4): 354. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>.
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A., Languille, F., Alhammoud, B., Viallefont, F., Pflug, B., Bieniarz, J., Clerc, S., Pessiot, L., Trémas, T., Cadau, E., ... Fernandez, V. 2017. Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status. *Remote Sensing*, 9(6): 584. <https://doi.org/10.3390/rs9060584>.
- Gatti, & Bertolini. 2015. *Sentinel-2 Products Specification Document*.
- Hafeez, S., dan Wong, M. S. 2019. Measurement of Coastal Water Quality Indicators Using Sentinel-2; An Evaluation Over Hong Kong and the Pearl River Estuary. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Jepang, 28 Juli – 2 Agustus 2019. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8899342>.
- Helmi, M., Sugianto, D. N., Widayani, A. P., Candrasekar, A. R., Zainuri, M., Ferdian, R. A., Widada, S., Rochaddi, B., Rofiqoh, F. N., Sitanggang, M. M. N., Durhan, Y. Z., Ratu, K. A. S., & Jihadi, M. S. 2025. Influence of Embankment Construction on Oceanographic Parameters and Emerging Pollutant Dynamics in Pekalongan Waters, Central Java. *Environmental Quality Management*, 35(1): e70125. <https://doi.org/10.1002/tqem.70125>.
- Kunarso, K., Zainuri, M., Fadhilah, S. N., Ismunarti, D. H., Rochaddi, B., Ananda, A. F., Candrasekar, A. R., Fajrin, M. N. Al, Pratiwi, N., Levina, E. S., Amalya, A., Agnadiva, A. K., & Jihadi, M. S. 2025. Emerging Pollutions From Small-Scale Industries and Chlorophyll-a as a Eutrophication Indicator in Pekalongan Waters Using Hydrodynamic Modeling. *Environmental Quality Management*, 35(1): e70134. <https://doi.org/10.1002/tqem.70134>.
- Li, J., Li, M., Wang, C., Zheng, Q., Xu, Y., Zhang, T., & Xie, L. 2023. Multiple mechanisms for chlorophyll a concentration variations in coastal upwelling regions: a case study east of Hainan Island in the South China Sea. *Ocean Science*, 19(2): 469–484. <https://doi.org/10.5194/os-19-469-2023>.
- Maciel, F. P., Haakonsson, S., Ponce de León, L., Bonilla, S., & Pedocchi, F. 2023. Challenges for chlorophyll-a remote sensing in a highly variable turbidity estuary, an implementation with sentinel-2. *Geocarto International*, 38(1). <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2160017>.
- Madjar, R. M., Vasile Scăteanu, G., & Sandu, M. A. 2024. Nutrient Water Pollution from Unsustainable Patterns of Agricultural Systems, Effects and Measures of Integrated Farming. *Water*, 16(21): 3146. <https://doi.org/10.3390/w16213146>.
- Maslukah, L., Wirasatriya, A., Wijaya, Y. J., Ismunarti, D. H., Widiarati, R., & Krisna, H. N. 2024. The assessment of chlorophyll-a retrieval algorithm and its spatial-temporal distribution using sentinel-2 MSI off the Banjir Kanal Timur River, Semarang, Insia. *Regional Studies in Marine Science*, 75: 103556. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103556>.
- Park, J., Khanal, S., Zhao, K., & Byun, K. 2024. Remote Sensing of Chlorophyll-a and Water Quality over Inland Lakes: How to Alleviate Geo-Location Error and Temporal Discrepancy in Model Training. *Remote Sensing*, 16(15): 2761. <https://doi.org/10.3390/rs16152761>.
- Peraturan Pemerintah Republik Insia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Pub. L. No. PP No. 22 Tahun 2021, Lembaran Negara Republik Insia Tahun 2021 Nomor 22 (2021).
- Putra, R. D., Napitupulu, H. S., Nugraha, A. H., Suhana, M. P., Ritonga, A. R., & Sari, T. E. Y., 2022. Pemetaan Luasan Hutan Mangrove Dengan Menggunakan Citra Satelit Di Pulau Mapur, Provinsi Kepulauan Riau. *Jurnal Kelautan Tropis*, 25(1): 20–30. <https://doi.org/10.14710/jkt.v25i1.12294>.
- Putri, A. T., Soewondo, P., Wijayasari, W., & Rohmat, F. I. W. 2025. Analisis dan Penentuan Model Empiris untuk Estimasi Sebaran Klorofil-a menggunakan Citra Satelit Sentinel-2 (Studi Kasus: Waduk Saguling, Sungai Citarum). *Jurnal Serambi Engineering*, 10(2): 13035–13036.
- Qanita, H., Subiyanto, S., & Hani'ah, H. 2019. Analisis Distribusi Total Suspended Solid dan Kandungan Klorofil-a Perairan Banjir Kanal Barat Semarang Menggunakan Citra Landsat-8 dan Sentienl-2A. *Jurnal Geodesi Undip*, 8(1): 435–445.

- Ridarto, A. K. Y., Zainuri, M., Helmi, M., Kunarso, K., Baskoro, B., Maslukah, L., Endrawati, H., Handoyo, G., & Koch, M. 2023. Assessment of Total Suspended Solid Concentration Dynamics Based on Geospatial Models as an Impact of Anthropogenic in Pekalongan Waters, Insia. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(1): 142–152. <https://doi.org/10.14710/buloma.v12i1.51454>.
- Sòria-Perpinyà, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Tenjo, C., Ruíz-Verdú, A., Delegido, J., Soria, J. M., Peña, R., & Moreno, J. 2021. Validation of Water Quality Monitoring Algorithms for Sentinel-2 and Sentinel-3 in Mediterranean Inland Waters with In Situ Reflectance Data. *Water*, 13(5): 686. <https://doi.org/10.3390/w13050686>.
- Sudradjat, A., Muntalif, B. S., Marasabessy, N., Mulyadi, F., & Firdaus, M. I. 2024. Relationship between chlorophyll-a, rainfall, and climate phenomena in tropical archipelagic estuarine waters. *Heliyon*, 10(4): e25812. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25812>.
- Warren, M. A., Simis, S. G. H., Martinez-Vicente, V., Poser, K., Bresciani, M., Alikas, K., Spyrakos, E., Giardino, C., & Ansper, A. 2019. Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 225: 267–289. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.018>.
- Wilson, K. L., Hilborn, A., Clay, S., & Devred, E. 2024. Improving Satellite Chlorophyll-a Retrieval in the Turbid Waters of the Bay of Fundy, Canada. *Estuaries and Coasts*, 47(4): 1012–1031. <https://doi.org/10.1007/s12237-024-01334-x>.
- Wu, J., Jiang, D., Cai, Z., Lv, J., Liu, G., & Li, B. 2025. Eutrophication Assessment Revealed by the Distribution of Chlorophyll-a in the South China Sea. *Remote Sensing*, 17(19): 3388. <https://doi.org/10.3390/rs17193388>.
- Xing, Q., Yu, H., Yu, H., Wang, H., Ito, S., & Yuan, C. 2021. Evaluating the Spring-Neap Tidal Effects on Chlorophyll-a Variations Based on the Geostationary Satellite. *Frontiers in Marine Science*, 8: 758538. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.758538>.
- Zheng, H., Du, P., Chen, J., Xia, J., Li, E., Xu, Z., Li, X., & Yokoya, N. 2017. Performance Evaluation of Downscaling Sentinel-2 Imagery for Land Use and Land Cover Classification by Spectral-Spatial Features. *Remote Sensing*, 9(12): 1274. <https://doi.org/10.3390/rs9121274>.