

Pemantauan Geo-AI Multitemporal Total Suspended Solids dan Klorofil-a di Pantai Timur Surabaya Menggunakan Landsat 8-9

Arfico Rizky Hidayat^{a,*}, Lalu Muhamad Jaelani^a

^aDepartemen Teknik Geomatika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 60111

*Korespondensi Penulis: arfico.hidayat@gmail.com



Dikirim: 8 Juli 2025;

Diterima: 22 Juli 2025

Diterbitkan: 22 Juli 2025

Abstrak. Kawasan perairan Pantai Timur Surabaya merupakan wilayah strategis yang rentan terhadap pencemaran, terutama dari limbah domestik yang berasal dari aktivitas daratan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis estimasi parameter kualitas air, yaitu *Total Suspended Solids* (TSS) dan klorofil-a, menggunakan citra satelit Landsat 8-9 OLI/TIRS secara multitemporal selama periode 2020-2024. Analisis dilakukan melalui pengolahan data citra pada platform *Google Earth Engine* dengan penerapan algoritma estimasi pada empat lokasi *in situ*: Muara Kali Jagir, Kali Wonorejo, Kali Dadapan, dan Kali Bonagung. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil estimasi citra dan data pengukuran lapangan yang diperoleh menggunakan metode gravimetri untuk TSS dan spektrofotometri untuk klorofil-a. Hasil menunjukkan bahwa

konsentrasi TSS berfluktuasi antara 21-24 mg/L dengan nilai maksimum 25,057 mg/L pada April 2023. Secara spasial, TSS menunjukkan pola gradasi menurun dari pesisir ke laut lepas dengan nilai median 15,788-46,441 mg/L. Klorofil-a memiliki variabilitas lebih tinggi (0,0100-0,3000 µg/L), dengan nilai maksimum 0,4773 µg/L pada Maret 2023 yang mengindikasikan *blooming* fitoplankton. Validasi menunjukkan korelasi rendah untuk TSS ($R^2=0,001$) dan tinggi untuk klorofil-a ($R^2=0,932$), menunjukkan estimasi klorofil-a lebih akurat untuk pemantauan kualitas perairan.

Kata kunci: Estimasi; *Google Earth Engine*; Klorofil-a; Multitemporal; *Total Suspended Solids*

Multitemporal Geo-AI Monitoring of Total Suspended Solids and Chlorophyll-a in the Eastern Coast of Surabaya Using Landsat 8-9

Abstract. The coastal waters of East Surabaya is a strategic region that is vulnerable to pollution, particularly from domestic waste originating from land-based activities. This study aims to analyze the estimated water quality parameters—Total Suspended Solids (TSS) and chlorophyll-a—using multitemporal Landsat 8-9 OLI/TIRS satellite imagery over the 2020–2024 period. Image data were processed on the Google Earth Engine platform by applying estimation algorithms to four *in situ* locations: the estuaries of Kali Jagir, Kali Wonorejo, Kali Dadapan, and Kali Bonagung. Validation was conducted by comparing satellite-based estimates with field measurements obtained using gravimetric methods for TSS and spectrophotometry for chlorophyll-a. The results showed that TSS concentrations fluctuated between 21–24 mg/L, with a maximum value of 25.057 mg/L recorded in April 2023. Spatially, TSS exhibited a decreasing gradient from the shoreline toward offshore waters, with median values ranging from 15.788 to 46.441 mg/L. Chlorophyll-a demonstrated greater variability (0.0100–0.3000 µg/L), with a peak concentration of 0.4773 µg/L observed in March 2023, indicating a phytoplankton bloom. Validation results showed a weak correlation for TSS ($R^2 = 0.001$) and a strong correlation for chlorophyll-a ($R^2 = 0.932$), indicating that chlorophyll-a estimation is more accurate for coastal water quality monitoring.

Keywords: Chlorophyll-a; Estimation; Google Earth Engine; Multitemporal; Total Suspended Solids.

I. PENDAHULUAN

Pantai Timur Surabaya (Pamurbaya) merupakan kawasan pesisir strategis seluas 2503,9 hektar yang terbentang di empat kecamatan yaitu Gunung Anyar, Mulyorejo, Sukolilo, dan Rungkut [1]. Kawasan ini didominasi oleh area konservasi hutan mangrove yang berfungsi sebagai habitat kritis berbagai spesies flora dan fauna, sekaligus berperan vital dalam keberlanjutan perekonomian lokal dan perkembangan Kota Surabaya [2]. Namun, intensifikasi aktivitas antropogenik telah menyebabkan degradasi kualitas lingkungan yang signifikan. Pencemaran multisumber dari limbah domestik, industri, pertanian, dan tambak terakumulasi dalam sistem perairan melalui tiga jalur sungai utama: Kali Jagir, Kali Wonorejo, dan Kali Bonagung. Ekspansi pemukiman di sekitar kawasan semakin memperparah kondisi pencemaran, mengakibatkan penurunan kualitas air hingga tingkat yang membahayakan fungsi ekosistem dan produktivitas perikanan lokal.

Kualitas perairan dipengaruhi parameter biologi (fitoplankton, klorofil-a), fisika (suhu, kekeruhan, TSS, TDS), dan kimia (DO, nitrat, amonia) [3]. Parameter kritis yang menjadi fokus penelitian adalah *Total Suspended Solids* (TSS) dan klorofil-a. Tingginya kadar TSS mengindikasikan kekeruhan akibat limbah tersuspensi [4]. TSS mempengaruhi hamburan sinar matahari dalam air, sementara distribusi biomassa fitoplankton tercermin dari konsentrasi klorofil-a sebagai indikator produktivitas primer dan kelimpahan fitoplankton [5]. Konsentrasi klorofil-a dipengaruhi suhu, salinitas, arus, pasang surut, dan sirkulasi air [6]. Faktor-faktor lingkungan tersebut mempengaruhi distribusi spasial dan temporal parameter tersebut, sehingga memerlukan pendekatan pemantauan yang dinamis dan berkelanjutan.

Teknologi satelit modern memungkinkan estimasi parameter-parameter tersebut melalui penginderaan jauh sebagai alternatif metode *in situ* [7]. *Google Earth Engine* (GEE) yang diperkenalkan tahun 2010 mempermudah estimasi klorofil-a dan TSS menggunakan citra satelit [8]. Penelitian ini mengembangkan metodologi Geo-AI berbasis JavaScript yang terintegrasi dengan GEE, memanfaatkan citra satelit Landsat 8 dan Landsat 9 untuk estimasi parameter kualitas air secara multitemporal. Integrasi data dari kedua satelit bertujuan untuk optimalisasi *filtering* data dan reduksi *outlier* guna meminimalkan data kosong dan meningkatkan akurasi estimasi. Pendekatan *cloud computing* ini memungkinkan pemrosesan data satelit secara *real-time* tanpa memerlukan infrastruktur komputasi lokal yang intensif.

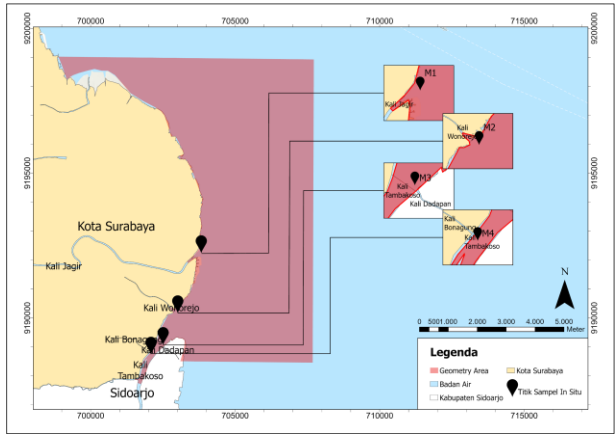
Implementasi metodologi ini menghasilkan sistem pemantauan otomatis yang dapat menghasilkan peta distribusi spasial TSS dan klorofil-a dengan resolusi temporal yang tinggi. Visualisasi hasil analisis disajikan

melalui *Earth Engine Apps* yang memungkinkan akses interaktif dan *user-friendly* bagi pengguna. Kontribusi penelitian ini meliputi pengembangan metodologi pemantauan estimasi TSS dan klorofil-a berbasis teknologi satelit, penyediaan basis data temporal kualitas perairan Pamurbaya, dan pengembangan *platform monitoring* yang dapat direplikasi untuk kawasan pesisir lainnya di Indonesia.

II. METODOLOGI

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dari tugas akhir ini adalah Perairan Pantai Timur Surabaya, Kota Surabaya, Jawa Timur. Kawasan ini secara terletak di antara 702088,256 - 703827,150 m U dan 9188733,592 - 9192236,357 m T. Berikut merupakan peta lokasi penelitian yang ditampilkan pada **Gamb. (1)** beserta koordinat titik sampel penelitian pada **Tab. (1)**.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

TABEL 1. KOORDINAT TITIK LOKASI SAMPEL PENELITIAN

Titik	Koordinat UTM	
	X (mU)	Y (mT)
M1	703827,150	9192236,357
M2	703014,342	9190163,988
M3	702507,403	9189067,382
M4	702088,256	9188733,592

2.2 Data dan Peralatan

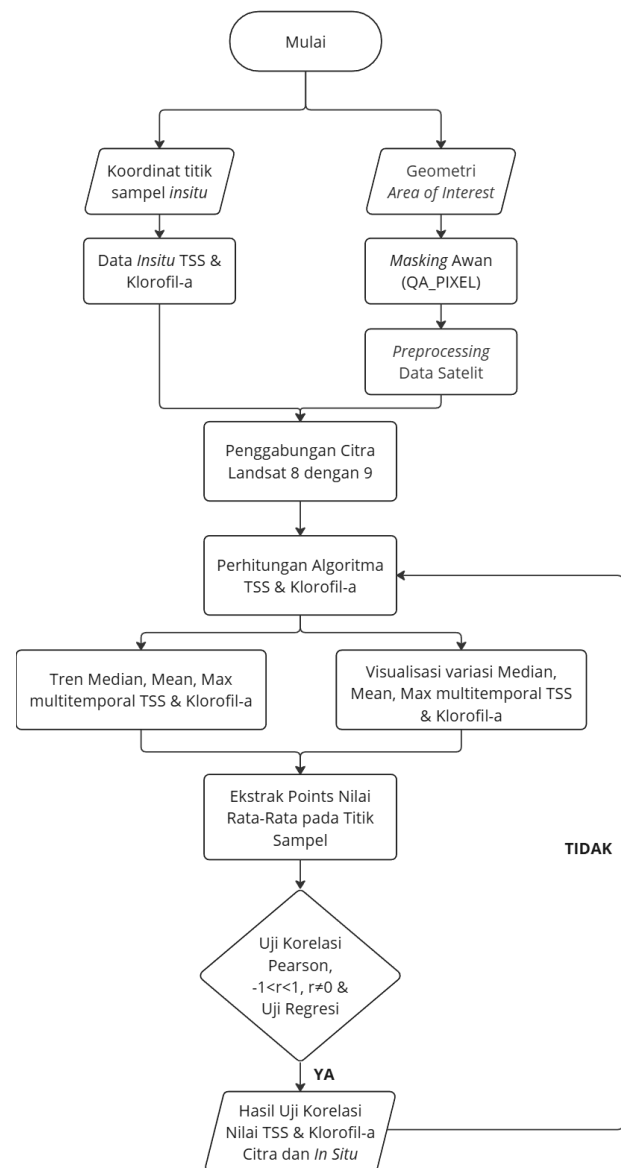
Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data citra satelit Landsat 8-9 OLI/TIRS Level 2 *Surface Reflectance Collection 2 Tier 1*, yang diakuisisi setiap tahun selama periode 2020 hingga 2024. Data ini dikumpulkan tanpa *threshold* tutupan awan guna memastikan cakupan temporal yang lengkap selama lima tahun. Sebagai data validasi, digunakan citra Landsat 8

OLI/TIRS Level 2 *Surface Reflectance Collection 2 Tier 1* yang diambil pada tanggal 11 Juni 2025, bertepatan dengan pengambilan sampel lapangan. Data ini digunakan untuk membandingkan hasil estimasi parameter kualitas air dari citra satelit dengan pengukuran langsung di lapangan. Sampel lapangan diperoleh dari empat titik pengamatan pada **Tab. (1)** yang tersebar di muara sungai-sungai utama yang bermuara ke wilayah pesisir timur Surabaya. Keempat titik ini dipilih berdasarkan keterwakilan lokasi muara sungai yang memiliki potensi signifikan dalam membawa beban sedimen dan nutrien ke wilayah perairan pantai. Selain data citra, penelitian ini juga menggunakan data vektor batas geometri perairan pesisir timur Surabaya, data vektor batas administrasi Rupabumi Indonesia dengan skala 1:25.000, serta data vektor dari Peta Lingkungan Pantai Indonesia Tahun 2017 skala 1:50.000, lembar 1608-02 (Kwanyar), sebagai referensi spasial dalam pemetaan dan analisis wilayah studi.

Dalam pelaksanaannya, penelitian ini didukung oleh penggunaan berbagai perangkat keras dan perangkat lunak. Di lapangan, koordinat lokasi pengambilan sampel ditentukan menggunakan smartphone yang telah dilengkapi dengan fitur GPS, yang memberikan akurasi lokasi yang memadai untuk keperluan georeferensi. Proses pengolahan data citra, analisis statistik, serta penyusunan laporan dilakukan menggunakan laptop sebagai perangkat utama. Untuk pengambilan sampel air laut, digunakan botol sampel standar yang disimpan dalam *cooler box* selama transportasi menuju laboratorium, guna menjaga kestabilan parameter fisik dan kimia air seperti suhu, kekeruhan, dan kandungan klorofil-a. Di sisi perangkat lunak, GEE digunakan sebagai *platform* utama untuk pemrosesan data citra satelit, mulai dari ekstraksi nilai reflektansi, penerapan algoritma estimasi TSS dan klorofil-a, hingga pembuatan visualisasi data spasial dan temporal. Selain itu, antarmuka *Earth Engine Apps* dimanfaatkan untuk menyusun *dashboard* interaktif yang menampilkan hasil analisis secara dinamis. Untuk proses kartografis dan tata letak peta, digunakan perangkat lunak ArcGIS Pro. Analisis statistik, seperti regresi linier dan korelasi, serta penyusunan dokumen akhir dilakukan menggunakan Microsoft Office 2021.

2.3 Tahapan Pengolahan Data

Penelitian ini memerlukan pengerjaan dua data, yakni data sampel lapangan dan data citra. Sehingga perlu dilakukan secara runtut mulai dari pemilihan lokasi sampel lapangan pengumpulan dan pemilahan data, metode yang digunakan, luaran yang dihasilkan, dan penjelasan kegiatan pada setiap langkah pengerjaan. Hal ini untuk menghasilkan luaran yang baik dan sesuai. Tahapan pemilahan data digambarkan dalam diagram alir.



Gambar 2. Diagram Alir Pengolahan Data

Penjelasan rinci dari tahap pengolahan data pada **Gamb. (2)**, yaitu data citra yang digunakan dalam penelitian ini mencakup citra Landsat 8-9 OLI/TIRS Level 2 *Surface Reflectance Collection 2 Tier 1* yang diambil pada tahun 2020, 2021, 2022, 2023, dan 2024. Selain itu, satu data tambahan diambil pada tanggal 11 Juni 2025 untuk keperluan validasi dengan data lapangan. Pemilahan data menjadi langkah awal dalam menentukan batasan penelitian, yang mencakup koordinat titik sampel lapangan, area penelitian, waktu pengambilan data, serta tutupan awan yang dapat mempengaruhi kualitas citra.

Pada proses pemilahan data, pemrosesan *scale factors* untuk seluruh kanal *Surface Reflectance* dilakukan

melalui kuantifikasi. Proses ini dapat dinyatakan dengan **Pers. (1)** berikut:

$$SR(\lambda) = DN \times 0,0000275 - 0,2 \quad (1)$$

Selanjutnya konversi *Surface Reflectance* ke *Remote-sensing Reflectance* ($Rrs(\lambda)$) menggunakan **Pers. (2)** sebagai berikut:

$$Rrs(\lambda) = SR(\lambda) \div \pi \quad (2)$$

Setelah proses pemilahan data selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah pengolahan data. Pada tahap ini, seluruh citra Landsat 8 dan 9 yang telah terkumpul selama periode lima tahun digabungkan, dengan 175 citra keseluruhan. Proses penggabungan ini bertujuan untuk memperoleh data yang lebih representatif dan mendukung analisis yang lebih komprehensif terhadap variabel yang diamati. Setelah citra digabungkan, dilakukan perhitungan estimasi TSS dan klorofil-a menggunakan algoritma yang telah ditentukan sebelumnya. Perhitungan TSS mengacu pada algoritma **Pers. (3)** yang dikembangkan oleh Laili [9], sebagai berikut:

$$TSS = 31,42 \times \left(\frac{\log Rrs_2}{\log Rrs_4} \right) - 12,719 \quad (3)$$

Sementara itu, untuk menghitung estimasi klorofil-a, digunakan **Pers. (4)** yang diusulkan oleh Jaelani [10]:

$$\log(Chla) = -0,9889 \times \left(\frac{Rrs_4}{Rrs_5} \right) + 0,3619 \quad (4)$$

Setelah proses kalkulasi selesai, hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk visualisasi serta analisis tren variasi konsentrasi TSS dan klorofil-a. Untuk keperluan validasi, digunakan empat sampel lapangan dengan koordinat yang telah ditentukan sebelumnya. Sampel-sampel tersebut diuji di laboratorium guna memperoleh nilai TSS dan klorofil-a secara in situ, sesuai dengan acuan Standar Nasional Indonesia [11] [12]. Selanjutnya, dilakukan uji regresi dan uji korelasi Pearson antara hasil TSS dan klorofil-a dari pengolahan citra pada 11 Juni 2025 dengan hasil uji laboratorium. **Pers. (5)** untuk menghitung korelasi Pearson adalah sebagai berikut:

$$r_{xy} = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (5)$$

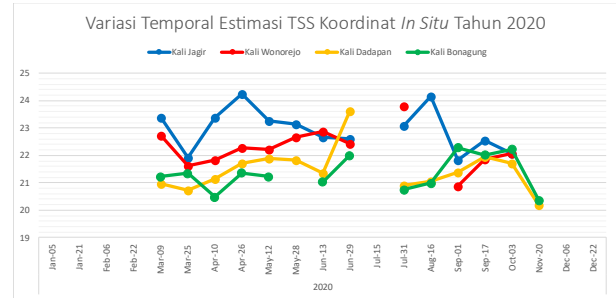
Perbandingan antara hasil algoritma dan data laboratorium digunakan untuk menilai akurasi model dalam menggambarkan kondisi nyata di lapangan. Visualisasi

peta multitemporal melalui *Google Earth Engine Apps* kemudian dikembangkan agar hasil analisis dapat disajikan secara interaktif dan mudah dipahami.

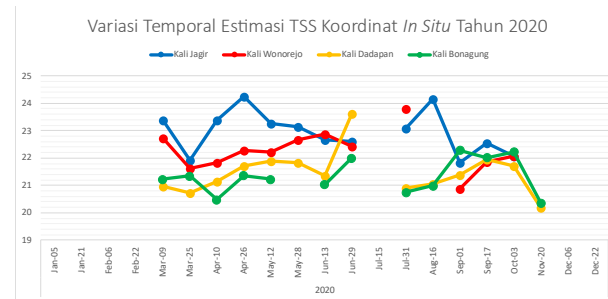
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

a) Variasi Estimasi Total Suspended Solids (2020-2024)

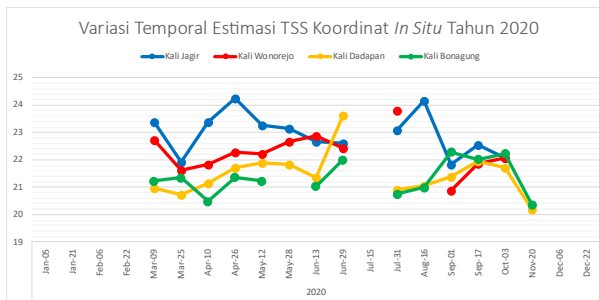
Variasi nilai TSS diperoleh melalui penerapan algoritma estimasi terhadap data citra satelit pada empat titik koordinat yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah citra Landsat 8-9 OLI/TIRS diproses menggunakan *scale factors* sesuai dengan spesifikasi Level 2 *Surface Reflectance*, algoritma estimasi TSS diterapkan secara konsisten pada seluruh citra multitemporal. Proses ini menghasilkan data estimasi yang merepresentasikan dinamika spasial dan temporal sebaran TSS di wilayah perairan Pantai Timur Surabaya selama periode pengamatan. Berikut grafik variasi temporal TSS setiap tanggal akuisisi yang divisualisasikan dalam per tahun pada **Gamb. (3-7)**.



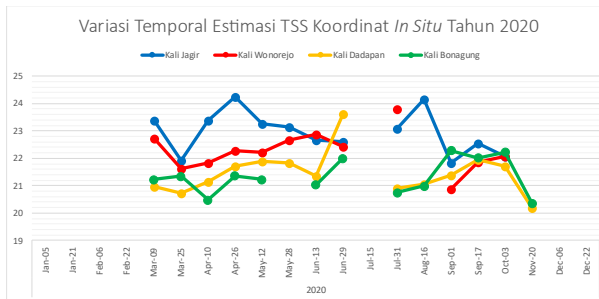
Gambar 3. Variasi Estimasi TSS (mg/L) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2020



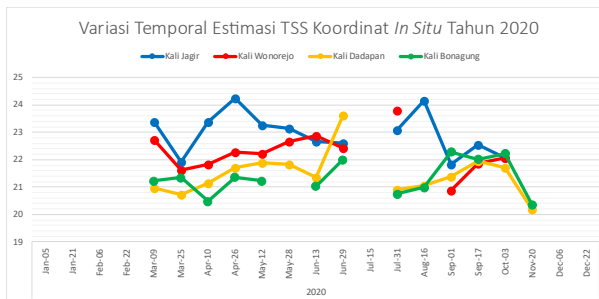
Gambar 4. Variasi Estimasi TSS (mg/L) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2021



Gambar 5. Variasi Estimasi TSS (mg/L) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2022



Gambar 6. Variasi Estimasi TSS (mg/L) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2023



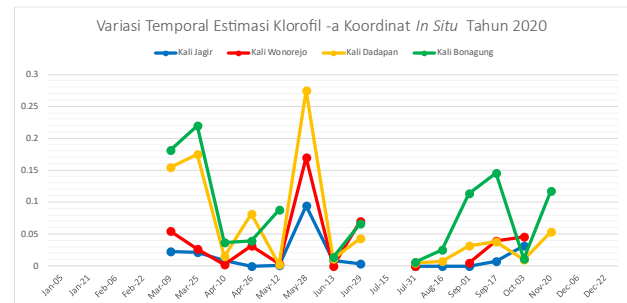
Gambar 7. Variasi Estimasi TSS (mg/L) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2024

Analisis multitemporal terhadap estimasi TSS pada **Gamb. (3-7)** memperlihatkan pola fluktuasi yang berbeda setiap tahunnya pada empat muara utama di Pantai Timur Surabaya. Tahun 2020 menunjukkan kestabilan relatif di awal tahun, diikuti peningkatan signifikan pada pertengahan hingga akhir tahun, dengan estimasi tertinggi di Kali Jagir mencapai 24,250 mg/L. Tahun 2021 mencatat peningkatan TSS yang lebih menonjol, terutama di Kali Jagir pada bulan Juli dan Agustus (hingga 26,840 mg/L), sementara muara lainnya menunjukkan variasi terbatas. Tahun 2022 mengalami peningkatan variabilitas di seluruh titik pengamatan, mencerminkan pengaruh eksternal terhadap kualitas air. Tahun 2023 ditandai oleh lonjakan ekstrem di Kali Jagir sebesar 33,993 mg/L pada awal April yang mencerminkan tingginya sedimentasi dan rendahnya penetrasi cahaya di lokasi tersebut sehingga menyebabkan TSS mengalami peningkatan signifikan,

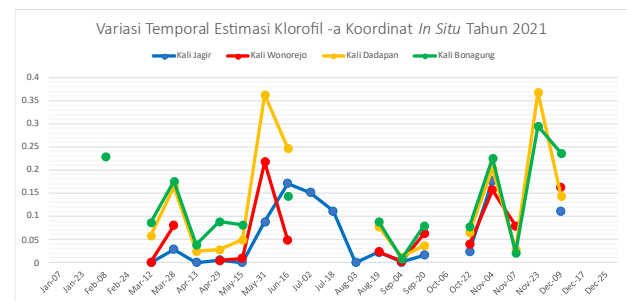
sebelum kembali stabil. Tahun 2024 menunjukkan pola yang cenderung stabil di seluruh lokasi, dengan estimasi maksimum berkisar antara 22,337 hingga 24,410 mg/L.

b) Variasi Estimasi Klorofil-a (2020-2024)

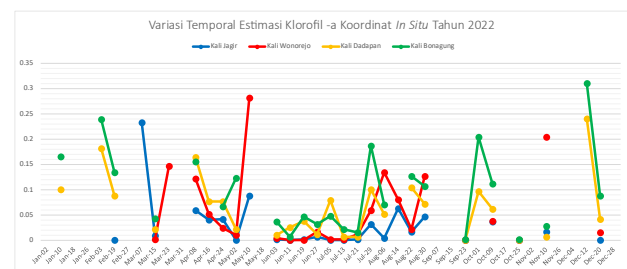
Variasi nilai klorofil-a diperoleh melalui penerapan algoritma estimasi terhadap data citra satelit pada empat titik koordinat yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah citra Landsat 8-9 OLI/TIRS diproses menggunakan *scale factors* sesuai dengan spesifikasi Level 2 *Surface Reflectance*, algoritma estimasi klorofil-a diterapkan secara konsisten pada seluruh citra multitemporal. Proses ini menghasilkan data estimasi yang merepresentasikan dinamika spasial dan temporal sebaran klorofil-a di wilayah perairan Pantai Timur Surabaya selama periode pengamatan. Berikut grafik variasi temporal klorofil-a setiap tanggal akuisisi yang divisualisasikan dalam per tahun pada **Gamb. (8-12)**.



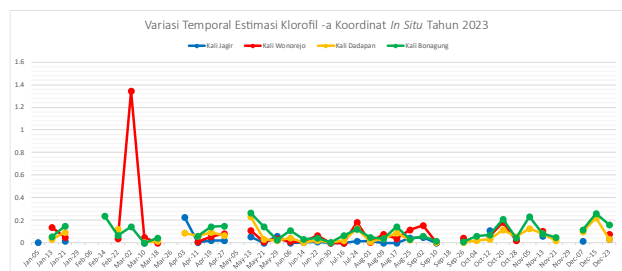
Gambar 8. Variasi Estimasi Klorofil-a (µg/L) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2020



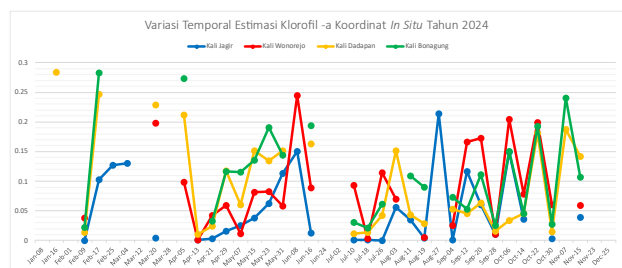
Gambar 9. Variasi Estimasi Klorofil-a (µg/L) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2021



Gambar 10. Variasi Estimasi Klorofil-a (µg/L) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2022



Gambar 11. Variasi Estimasi Klorofil-a ($\mu\text{g/L}$) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2023

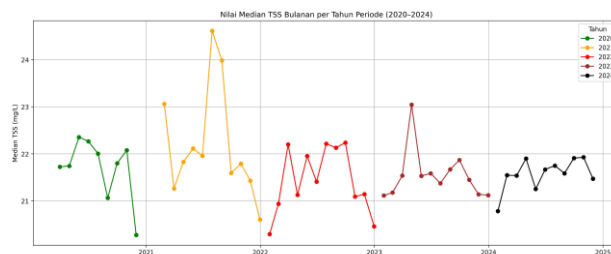


Gambar 12. Variasi Estimasi Klorofil-a ($\mu\text{g/L}$) Setiap Tanggal Akuisisi di Titik Koordinat Periode 2024

Distribusi temporal estimasi klorofil-a pada **Gamb.** (8-12) memperlihatkan dinamika fitoplankton perairan yang kompleks dan berbeda tiap tahun. Pada 2020, estimasi klorofil-a cukup beragam, dengan nilai tertinggi di Kali Dadapan ($0,275 \mu\text{g/L}$), sementara Kali Jagir dan Wonorejo tetap rendah. Tahun 2021 mencerminkan peningkatan fitoplankton, ditandai oleh dua periode *bloom* di Kali Dadapan dan Bonagung, masing-masing dengan nilai maksimum hingga $0,369 \mu\text{g/L}$ dan $0,296 \mu\text{g/L}$. Tahun 2022 menunjukkan distribusi yang lebih merata di seluruh lokasi, tanpa lonjakan ekstrem. Tahun 2023 menampilkan fenomena *bloom* klorofil-a yang sangat signifikan di Kali Wonorejo pada bulan Maret ($1,372 \mu\text{g/L}$), tertinggi sepanjang periode pengamatan. Tahun 2024 kembali menunjukkan kestabilan, dengan estimasi tertinggi berkisar antara $0,214$ hingga $0,284 \mu\text{g/L}$.

c) Tren Rerata Total Suspended Solids per Bulan

Analisis kuantitatif tren estimasi TSS dilakukan dengan menghitung rata-rata bulanan dari setiap tanggal akuisisi citra satelit sepanjang tahun terhadap keempat titik koordinat muara. Data dari setiap bulan disusun secara temporal dari Januari hingga Desember untuk menghasilkan representasi tahunan periode 2020-2024. Tren tahunan disajikan dalam bentuk nilai median sebagai representasi variabilitas TSS, karena nilai median kurang sensitif terhadap nilai ekstrem/*outlier* dan memungkinkan pengabaian nilai nol sebagai data tidak tersedia (Not Available). Adapun grafik tren TSS setiap tahun tertera pada **Gamb.** (13) berikut dengan representasi warna hijau

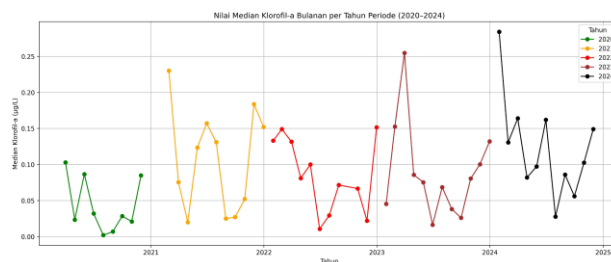


Gambar 13. Grafik Tren Rerata Bulanan Nilai TSS (mg/L) Tahun 2020-2024

(2020), oranye (2021), merah (2022), coklat (2023), dan hitam (2024). Berdasarkan **Gamb.** (13), nilai median TSS bulanan dari citra Landsat selama periode 2020 hingga 2024 menunjukkan fluktuasi yang relatif stabil, dengan kisaran antara 21 hingga 24 mg/L . Nilai ini merepresentasikan kondisi umum perairan yang cenderung konsisten dari waktu ke waktu. Meskipun terjadi dinamika musiman, seperti peningkatan pada April 2023 dan penurunan pada November 2020 serta Januari 2022, nilai median tetap berada dalam batas wajar. Beberapa lonjakan tidak memengaruhi nilai tengah secara signifikan, yang menunjukkan bahwa mayoritas data tidak mengalami perubahan ekstrem. Hal ini mengindikasikan distribusi TSS yang cukup merata di sebagian besar wilayah pengamatan sepanjang periode studi.

d) Tren Rerata Klorofil-a per Bulan

Analisis kuantitatif terhadap tren estimasi klorofil-a dilakukan melalui perhitungan rerata dari setiap tanggal akuisisi citra dalam satu bulan selama satu tahun. Adapun grafik tren klorofil-a setiap tahun tertera pada **Gamb.** (14) berikut dengan representasi warna hijau (2020), oranye (2021), merah (2022), coklat (2023), dan hitam (2024).



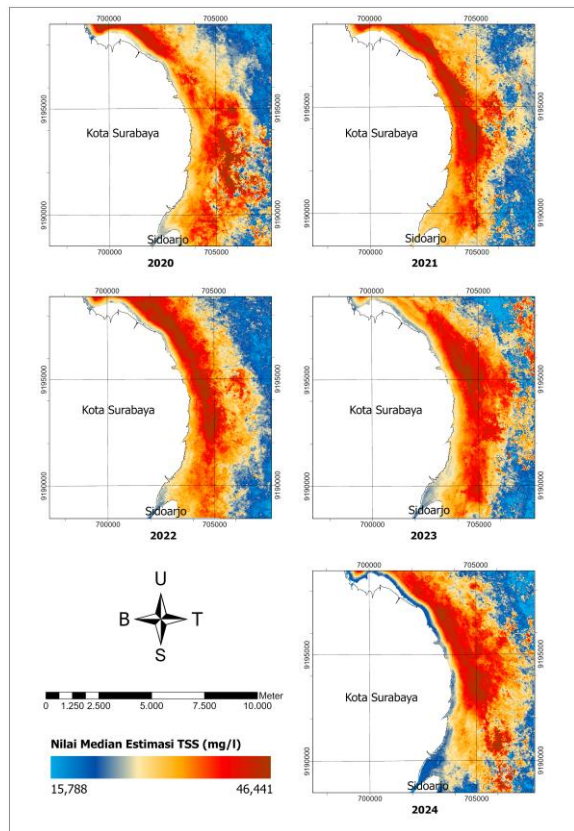
Gambar 14. Grafik Tren Rerata Bulanan Nilai Klorofil-a ($\mu\text{g/L}$) Tahun 2020-2024

Berdasarkan **Gamb.** (14) memperlihatkan bahwa nilai median estimasi klorofil-a mengalami fluktuasi selama periode pengamatan, dengan kisaran antara $0,0100$ hingga $0,3000 \mu\text{g/L}$. Nilai median ini mencerminkan distribusi tengah konsentrasi klorofil-a yang relatif stabil di sebagian besar waktu. Pada beberapa bulan, seperti Maret 2023 dan November 2022, terjadi peningkatan nilai maksimum,

tetapi tidak diikuti oleh kenaikan yang sebanding pada nilai median, yang mengindikasikan bahwa peningkatan hanya terjadi secara lokal pada sebagian kecil area. Fenomena ini diduga berkaitan dengan *blooming* fitoplankton yang bersifat spasial terbatas. Sementara itu, kenaikan median yang serentak dengan parameter lain pada Januari dan Maret 2024 menunjukkan peningkatan konsentrasi yang lebih merata di seluruh area pengamatan. Nilai median terendah tercatat pada pertengahan tahun 2020 dan 2022, yang kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang kurang mendukung pertumbuhan fitoplankton, seperti penurunan penetrasi cahaya akibat TSS.

e) Peta Estimasi Sebaran Total Suspended Solids

Peta sebaran disusun untuk memvisualisasikan nilai piksel median estimasi TSS dari seluruh citra satelit dalam satu tahun. **Gamb. (15)** menyajikan peta estimasi sebaran TSS multitemporal selama periode lima tahun pengamatan adalah sebagai berikut.



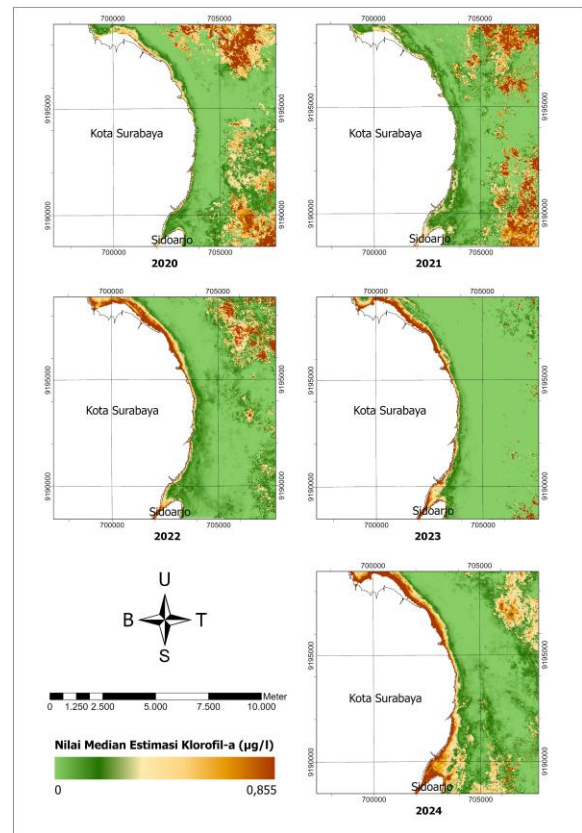
Gambar 15. Peta Estimasi Nilai Median TSS (mg/L) Tahun 2020-2024

Berdasarkan **Gamb. (15)** peta estimasi TSS periode 2020 hingga 2024, distribusi nilai median menunjukkan pola sebaran yang relatif konsisten, dengan gradasi konsentrasi

dari wilayah pesisir menuju laut lepas. Estimasi tertinggi umumnya terpantau di kawasan dekat pantai dan teluk, yang merupakan titik masuk utama material tersuspensi dari daratan. Sementara itu, perairan lepas cenderung memiliki estimasi median TSS yang lebih rendah dan stabil. Nilai median yang berada dalam kisaran 15,788 hingga 46,441 mg/L merepresentasikan kondisi umum perairan tanpa terpengaruh oleh nilai ekstrem, sehingga memberikan gambaran distribusi spasial yang lebih halus dan berkelanjutan di wilayah penelitian.

f) Peta Estimasi Sebaran Klorofil-a

Peta sebaran disajikan untuk memvisualisasikan nilai median piksel estimasi klorofil-a berdasarkan keseluruhan citra satelit tahunan. **Gamb. (16)** menampilkan peta sebaran estimasi klorofil-a multitemporal selama lima tahun masa pengamatan adalah sebagai berikut.



Gambar 16. Peta Estimasi Nilai Median Klorofil-a ($\mu\text{g/L}$) Tahun 2020-2024

Berdasarkan **Gamb. (16)** peta estimasi median klorofil-a selama periode 2020 hingga 2024, terlihat bahwa sebaran spasialnya cenderung terkonsentrasi di wilayah pesisir, terutama di sekitar muara dan ekosistem mangrove. Estimasi median tertinggi tercatat sebesar 0,855 $\mu\text{g/L}$,

yang menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah perairan berada pada tingkat produktivitas rendah hingga sedang. Sebaran nilai median memperlihatkan pola distribusi yang cukup seragam, dengan kisaran nilai yang sempit, menandakan bahwa klorofil-a terdistribusi relatif merata dan tidak dipengaruhi oleh lonjakan ekstrem di sebagian besar wilayah pengamatan. Pola ini mencerminkan karakteristik perairan yang tergolong oligotrofik, dengan dominasi estimasi klorofil-a yang rendah di hampir seluruh area.

g) Nilai TSS Insitu dan Estimasi Algoritma

Perbandingan antara hasil estimasi TSS dari citra satelit dan hasil uji laboratorium ditampilkan pada **Tab. (2)**, sementara nilai rata-rata tahunan TSS berdasarkan empat titik pengamatan disajikan pada **Tab. (3)**. Adapun informasi perbandingan selengkapnya disajikan sebagai berikut.

TABEL 2. NILAI TSS CITRA DAN *IN SITU* TANGGAL 11 JUNI 2025

Titik	<i>In Situ</i> (mg/L)	Estimasi (mg/L)
1	47,500	22,348
2	65,000	22,796
3	42,000	21,139
4	151,000	21,912

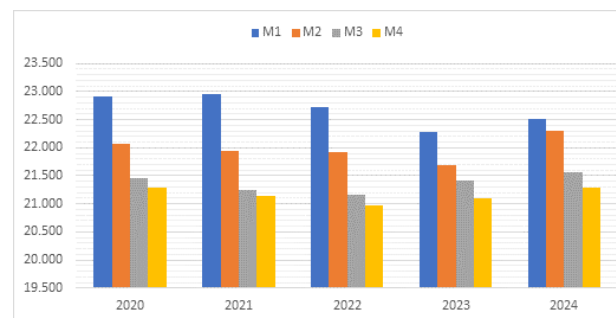
Berdasarkan **Tab. (2)**, estimasi nilai TSS dari citra satelit menggunakan algoritma Laili berkisar antara 21,139 mg/L hingga 22,796 mg/L, sedangkan data *in situ* analisis gravimetri menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi, yaitu 42,000 mg/L hingga 151,000 mg/L, serta tidak merepresentasikan fluktuasi yang selaras antara hasil citra dan analisis *in situ*. Perbedaan paling mencolok terlihat pada titik 4, di mana nilai *in situ* mencapai 151,000 mg/L, sedangkan estimasi hanya 21,912 mg/L. Ketidaksesuaian ini kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan algoritma, kondisi atmosfer saat perekaman, serta dinamika perairan yang tidak sepenuhnya tertangkap oleh citra satelit.

TABEL 3. NILAI RATA-RATA TSS TITIK KOORDINAT TAHUN 2020-2024

Titik	Estimasi TSS (mg/L)				
	2020	2021	2022	2023	2024
1	22,906	22,948	22,725	22,273	22,503
2	22,071	21,947	21,920	21,691	22,301
3	21,461	21,255	21,154	21,407	21,570
4	21,285	21,144	20,981	21,105	21,282

Adapun nilai rata-rata TSS terendah pada **Tab. (3)** tercatat sebesar 20,981 mg/L yang terjadi pada tahun 2022 di titik 4 Kali Bonagung, sedangkan nilai rata-rata tertinggi mencapai 22,948 mg/L pada tahun 2021 di titik 1 Kali Jagir. Untuk mempermudah pemahaman terhadap pola

fluktuasi nilai TSS pada setiap titik koordinat selama periode 2020 hingga 2024, maka disajikan visualisasi grafik perubahan pada **Gamb. (17)**.



Gambar 17. Grafik Perubahan Estimasi TSS (mg/L) di Titik Koordinat Tahun 2020-2024

h) Nilai Klorofil-a Insitu dan Estimasi Algoritma

Perbandingan antara hasil estimasi klorofil-a dari citra satelit dan hasil uji laboratorium ditampilkan pada **Tab. (4)**, sementara nilai rata-rata tahunan klorofil-a berdasarkan empat titik pengamatan disajikan pada **Tab. (5)**. Adapun informasi perbandingan selengkapnya disajikan sebagai berikut.

TABEL 4. NILAI KLOROFIL-A CITRA DAN *IN SITU* TANGGAL 11 JUNI 2025

Titik	<i>In Situ</i> (µg/L)	Estimasi (µg/L)
1	1,9374	0,0013
2	1,7392	0,0000
3	7,6852	0,0080
4	13,3424	0,0291

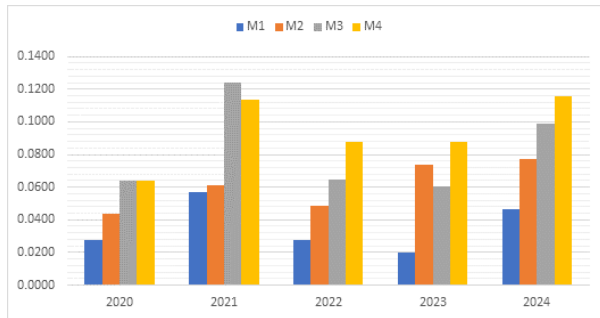
Berdasarkan **Tab. (4)**, estimasi nilai klorofil-a dari citra satelit menggunakan algoritma Jaelani berkisar antara 0,0000 µg/L hingga 0,0291 µg/L, sedangkan data *in situ* analisis spektrofotometri menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yaitu 1,7391 µg/L hingga 13,3424 µg/L. Namun, nilai klorofil-a merepresentasikan fluktuasi yang selaras antara hasil citra dan analisis *in situ*.

TABEL 5. NILAI RATA-RATA KLOROFIL-A TITIK KOORDINAT TAHUN 2020-2024

Titik	Estimasi Klorofil-a (µg/L)				
	2020	2021	2022	2023	2024
1	0,0275	0,0572	0,0278	0,0200	0,0462
2	0,0439	0,0615	0,0489	0,0738	0,0773
3	0,0643	0,1243	0,0646	0,0607	0,0992
4	0,0640	0,1132	0,0878	0,0879	0,1158

Adapun nilai rata-rata klorofil-a terendah pada **Tab. (5)** tercatat sebesar 0,0200 µg/L yang terjadi pada tahun 2023 di titik 1 Kali Jagir, sedangkan nilai rata-rata tertinggi

mencapai 0,1243 $\mu\text{g/L}$ pada tahun 2021 di titik 3 Kali Dadapan. Untuk mempermudah pemahaman terhadap pola fluktuasi nilai klorofil-a pada setiap titik koordinat selama periode 2020 hingga 2024, maka disajikan visualisasi grafik perubahan pada **Gamb. (18)**.



Gambar 18. Grafik Perubahan Estimasi Klorofil-a ($\mu\text{g/L}$) di Titik Koordinat Tahun 2020-2024

i) Uji Validasi Citra dan Analisis In Situ

Adapun hasil perhitungan nilai regresi dan korelasi Pearson antara parameter data citra dengan data lapangan *in situ* dapat dilihat pada **Tab. (6)** berikut.

TABEL 6. HASIL UJI KORELASI IN SITU DENGAN ESTIMASI PARAMETER

Parameter	R^2	r	Interpretasi
TSS	0,001	0,037	Sangat Lemah
Klorofil-a	0,932	0,965	Sangat Kuat

Berdasarkan **Tab. (6)**, hasil uji korelasi menunjukkan perbedaan yang mencolok antara parameter TSS dan klorofil-a. Nilai korelasi TSS sebesar $r = 0,037$ dengan $R^2 = 0,001$ mengindikasikan hubungan yang sangat lemah antara hasil estimasi citra dan data *in situ*. Hal ini menunjukkan bahwa model hanya mampu menjelaskan 0,1% variasi dari data lapangan. Ketidakesesuaian ini dapat disebabkan oleh tutupan awan, keterbatasan resolusi spasial citra, serta kemungkinan ketidaktepatan algoritma terhadap kondisi lokal wilayah pesisir. Sebaliknya, parameter klorofil-a menunjukkan nilai korelasi yang sangat kuat, yaitu $r = 0,965$ dan $R^2 = 0,932$, yang berarti model estimasi mampu menjelaskan 93,2% variasi data *in situ*. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma estimasi klorofil-a dari citra satelit lebih akurat dan dapat diandalkan dibandingkan dengan estimasi TSS dalam konteks wilayah penelitian.

IV. KESIMPULAN

Analisis temporal TSS memperlihatkan fluktuasi dinamis dengan kisaran 21-24 mg/L dan nilai tertinggi 25,057 mg/L pada April 2023. Klorofil-a menunjukkan variabilitas lebih besar (0,0100-0,3000 $\mu\text{g/L}$) dengan nilai tertinggi 0,4773 $\mu\text{g/L}$ pada Maret 2023. Secara spasial,

pola sebaran TSS menunjukkan gradasi konsentrasi dari pesisir menuju laut lepas dengan konsentrasi tertinggi di zona *nearshore* dengan nilai median 15,788-46,441 mg/L , sementara klorofil-a menunjukkan distribusi heterogen dengan pola acak yang tidak mengikuti gradasi linear, dengan konsentrasi tertinggi terpusat di kawasan pesisir sekitar ekosistem mangrove dan muara dengan median 0-0,855 $\mu\text{g/L}$. Hasil validasi menunjukkan perbedaan signifikan antara kedua parameter, dimana estimasi TSS memperlihatkan korelasi sangat lemah ($R^2 = 0,001$; $r = 0,037$) dengan hanya 0,1% variasi lapangan yang dapat dijelaskan oleh estimasi citra akibat kondisi perairan keruh, keterbatasan resolusi spasial, dan ketidaksesuaian algoritma, sedangkan estimasi klorofil-a memperlihatkan korelasi sangat kuat ($R^2 = 0,932$; $r = 0,965$) dengan 93,2% variasi data lapangan dapat dijelaskan oleh estimasi citra. Parameter TSS memperlihatkan inkonsistensi sekuensial di laboratorium dengan pola fluktuasi yang tidak selaras antara citra satelit dan pengukuran *in situ*, serta distribusi yang tidak sistematis dan cenderung acak. Sebaliknya, parameter klorofil-a memperlihatkan pola yang konsisten antara kedua metode pengukuran tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini, khususnya kepada mitra lapangan dan institusi pengelola data, yaitu nelayan Gununganyar Surabaya serta Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Safitri, F. Saves, and T. Panjaitan, "DINAMIKA GARIS PANTAI SURABAYA TAHUN 1994 – 2023," 2024.
- [2] G. Hibatullah, "PENGUASAAN PEMILIKAN PENGGUNAAN DAN PEMANFAATAN TANAH DI KAWASAN KONSERVASI PANTAI TIMUR SURABAYA (Studi di Kecamatan Rungkut dan Gunung Anyar Kota Surabaya)," Sep. 2024.
- [3] U. Zakiyah, A. Darmawan, dan Dian Senja Lazuardi, D. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, U. Brawijaya Malang, and M. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, "Analisis Sebaran Total Suspended Matter dan Klorofil-a," 2020.
- [4] W. Aprilianti, Muh. Yusuf, and S. Y. Wulandari, "Analisis Total Padatan Tersuspensi (TSS) dan Nitrat ($\text{NO}_3\text{-N}$), serta Penentuan Indeks Pencemaran di Perairan Pantai Rebo, Kabupaten Bangka," *Indonesian Journal of Oceanography*, vol. 5, no. 4, pp. 230–238, Nov. 2023, doi: 10.14710/ijocce.v5i4.16846.
- [5] J. Chen *et al.*, "Remote sensing inversion of water quality parameters (TSM, Chl-a, and CDOM) in subtidal seaweed beds and surrounding waters," *Ecol Indic*, vol. 167, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112716.

- [6] G. S. Timur, M. Zainuri, and Y. Wulandari, "Sebaran Klorofil-A dan Keterkaitannya dengan Kualitas Perairan Muara Sungai Kalikuto, Kendal," 2024. [Online]. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/ijoce>
- [7] R. L. S. Dias *et al.*, "Machine learning models applied to TSS estimation in a reservoir using multispectral sensor onboard to RPA," *Ecol Inform*, vol. 65, p. 101414, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ECOINF.2021.101414.
- [8] M. Mamun, M. Hasan, and K. G. An, "Advancing reservoirs water quality parameters estimation using Sentinel-2 and Landsat-8 satellite data with machine learning approaches," *Ecol Inform*, vol. 81, p. 102608, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.ECOINF.2024.102608.
- [9] N. Laili *et al.*, "DEVELOPMENT of WATER QUALITY PARAMETER RETRIEVAL ALGORITHMS for ESTIMATING TOTAL SUSPENDED SOLIDS and CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION USING LANDSAT-8 IMAGERY at POTERAN ISLAND WATER," in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, Oct. 2015, pp. 55–62. doi: 10.5194/isprsannals-II-2-W2-55-2015.
- [10] L. M. Jaelani, F. Setiawan, and A. Apip, "Pemetaan Distribusi Spasial Konsentrasi Klorofil-A dengan Landsat 8 di Danau Matano dan Danau Towuti, Sulawesi Selatan", doi: 10.13140/RG.2.1.1905.6484.
- [11] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 6989.3:2019 Air dan air limbah – Bagian 3: Cara uji padatan tersuspensi total (total suspended solids/TSS) secara gravimetri," 2019.
- [12] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 06-4157-1996 Metode Pengujian Kadar Klorofil A Fitoplankton dalam Air dengan Spektrofotometer," 1996.