

Analisis dan Penentuan Model Empiris untuk Estimasi Sebaran Klorofil-a menggunakan Citra Satelit Sentinel-2 (Studi Kasus: Waduk Saguling, Sungai Citarum)

Aulia Tirtana Putri¹, Prayatni Soewondo², Winda Wijayasari³, Faizal Immaddudin Wira Rohmat³

¹Magister Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi, Bandung, Indonesia

²Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

³Pusat Pengembangan Sumber Daya Air, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*Koresponden email: auliatirtanaputri@gmail.com

Diterima: 12 Februari 2025

Disetujui: 08 Maret 2025

Abstract

The upstream of River Citarum is mildly polluted, which indicates the importance of water river monitoring. This study aims to analyze and determine an empirical model, which is a regression equation using Sentinel-2 satellite imagery to estimate chlorophyll-a concentration in the Saguling Reservoir, upstream of Citarum River. The Multiple Linear Regression (MLR) equation has been obtained, integrating bands 2, 3, 4, 5 and 11 with an R^2 value of 0.75 and RMSE of 1.39. However, the results of the model correlation test with validation data indicate a decline in model performance, reflected by an R^2 value of 0.261 and RMSE of 4.2. The visualization results using the model with Google Earth Engine (GEE) show an increase in chlorophyll-a concentration in 2024 compared to 2022. However, the actual presence of vegetation in the waters and segmentation errors need to be considered, because they can affect the accuracy of the estimate. This study has limitations in that it only uses reflectance values and chlorophyll-a concentration in situ, without considering other factors. However, the results of the study indicate that the estimated results of the model and the actual values remain within the same range according to their trophic status, suggesting that this model can serve as an overview for predicting chlorophyll-a distribution in the Saguling Reservoir.

Keywords: *saguling reservoir, chlorophyll-a, sentinel-2 satellite imagery, empirical model, google earth engine*

Abstrak

Sungai Citarum di bagian hulu berstatus tercemar sedang, sehingga diperlukan pemantauan kualitas air sungai. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menentukan model empiris, yaitu persamaan regresi menggunakan citra satelit Sentinel-2 untuk mengestimasi konsentrasi klorofil-a pada Waduk Saguling, hulu Sungai Citarum. Persamaan *Multiple Linear Regression* (MLR) telah diperoleh, mengintegrasikan band 2, 3, 4, 5 dan 11 dengan nilai R^2 sebesar 0.75 dan RMSE sebesar 1.39. Namun, hasil uji korelasi model dengan data validasi menunjukkan penurunan kinerja model, ditunjukkan dengan nilai $R^2 = 0.261$ dan RMSE = 4.2. Hasil visualisasi menggunakan model dengan *Google Earth Engine* (GEE) memperlihatkan adanya kenaikan konsentrasi klorofil-a pada tahun 2024 dibandingkan dengan tahun 2022. Akan tetapi, keberadaan vegetasi pada perairan secara aktual dan kesalahan segmentasi perlu diperhatikan, karena dapat mempengaruhi akurasi estimasi. Penelitian ini memiliki keterbatasan berupa hanya menggunakan nilai reflektansi dan data aktual konsentrasi klorofil-a insitu, tanpa mempertimbangkan faktor-faktor lain. Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil estimasi model dan nilai aktual berada dalam rentang yang sama dengan status trofiknya, sehingga model ini dapat digunakan untuk memberikan gambaran besar prediksi sebaran konsentrasi klorofil-a pada Waduk Saguling.

Keywords: *waduk saguling, klorofil-a, citra satelit sentinel-2, model empiris, google earth engine*

1. Pendahuluan

Sungai Citarum berlokasi di Jawa Barat, berhulu di Gunung Wayang, Kecamatan Kertasari, Kabupaten Bandung dan bermuara di Laut Jawa. Sungai ini menjadi sumber daya air yang krusial bagi masyarakat Jawa Barat dengan penggunaannya sebagai bahan baku produksi air minum serta sumber air bersih bagi masyarakat sekitar sungai [1]. Sehingga diperlukan pemantauan kualitas air sungai untuk menjaga keberlanjutan sumber daya air. Berdasarkan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2022), kondisi kualitas air Sungai Citarum berstatus tercemar ringan dengan adanya kandungan nitrat yang

melebihi baku mutu di bagian hulu sungai [2]. Kelebihan kandungan nitrat pada sungai mempercepat pertumbuhan mikroorganisme fitoplankton dan menurunkan kualitas air sungai [3]. Hal ini mengindikasikan bahwa diperlukan pemantauan pada Sungai Citarum sangat krusial terutama pada daerah hulu Sungai Citarum.

Fitoplankton mengandung pigmen klorofil-a yang berperan penting dalam fotosintesis yang menjadi faktor utama pada produksi primer dalam rantai makanan di perairan. Konsentrasi klorofil-a dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kondisi geografis perairan, kualitas air sungai dan pemanfaatan lahan di sekitar perairan [4]. Kenaikan konsentrasi klorofil-a menjadi indikator biologi untuk mengukur kenaikan biomassa fitoplankton karena mencerminkan kelebihan nutrisi pada perairan. Kondisi kelebihan nutrisi pada perairan dinamakan eutrofikasi [5]. Hal ini berdampak terhadap pertumbuhan alga dan tanaman air yang berlebihan, serta terganggunya keseimbangan ekosistem dan kualitas air sungai [6]. Tingkat kesuburan pada air dapat diketahui melalui identifikasi eutrofikasi, dengan melihat status tropik yang menjadi standar kualitas air sungai untuk parameter biologi pada pemantauan air sungai [7].

Pemantauan kualitas air sungai secara tradisional dilakukan dengan pengambilan sampel secara langsung di lokasi dan dilakukan pengujian in situ ataupun di laboratorium. Metode ini memiliki keterbatasan dalam cakupan spasial dan frekuensi pengukuran, sehingga menyulitkan untuk mendeteksi perubahan spasial dan temporal konsentrasi klorofil-a yang dinamis di perairan. Keterbatasan tersebut membuat metode ini kurang efektif dalam memenuhi kebutuhan pemantauan air sungai yang membutuhkan cakupan area yang luas dengan rentang waktu tertentu. Berdasarkan hal tersebut, penginderaan jarak jauh (*remote sensing*) menjadi alternatif yang lebih efisien untuk menunjang pemantauan kualitas dan kuantitas perairan yang lebih luas dalam cakupan area dan rentang waktu tertentu [8, 9]. Teknologi ini dapat mendeteksi kondisi permukaan bumi dari jarak jauh dan menghasilkan gambar berupa citra satelit, seperti pada Sentinel-2. Sentinel-2 memiliki resolusi temporal 5 sampai dengan 10 hari dan resolusi spasial yang bervariasi, yaitu 10, 20 atau 60 meter [10]. Citra ini memiliki 13 band spektral dalam spektrum multispektral dan beberapa band yang sensitif terhadap klorofil-a, seperti band 4 (Red), band 5 (Red Edge 1), band 6 (Red Edge 2) dan band 7 (Red Edge 3). Oleh karena itu, Sentinel-2 dapat memenuhi kriteria untuk diterapkan dalam estimasi konsentrasi klorofil-a di perairan [11]. Data konsentrasi klorofil-a di lokasi dan data band Sentinel-2 digunakan dalam pengembangan model empiris untuk mengestimasi konsentrasi klorofil-a, yang berpotensi meningkatkan efisiensi pemantauan kualitas air.

Banyak penelitian terdahulu memanfaatkan citra satelit untuk pemantauan klorofil-a, seperti untuk pemantauan pada banjir kanal barat Semarang [12], kelimpahan fitoplankton di waduk Jatiluhur [13], kelimpahan organisme di kota Jayapura [14], menganalisis perairan tambak di Demak [15], dan menganalisis produktivitas turbin air [16]. Semua penelitian tersebut menggunakan kombinasi band citra satelit dalam membangun model empiris untuk melihat pengaruh dari klorofil-a. Perbedaan karakteristik setiap wilayah yang berbeda membuat setiap lokasi memiliki model empiris yang unik sehingga relevan dan aplikatif.

Dalam penelitian ini, lokasi yang dipilih adalah Waduk Saguling. Pada tahun 2022, waduk tersebut memiliki kondisi status trofik, ultra-mikrotrofik, hingga eutrofik. Dengan konsentrasi klorofil-a berkisar antara 0 sampai dengan 10 mg/m³ [17]. Hal tersebut menandakan kandungan nutrisi pada perairan relatif rendah. Namun, berdasarkan hasil data pengujian in situ oleh pihak pengelola Waduk Saguling pada tahun 2024, mengindikasikan adanya peningkatan konsentrasi yang berpotensi terjadinya kemunculan alga. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya pemantauan air dengan mengestimasi konsentrasi klorofil-a pada Waduk Saguling. Pemrosesan data satelit dilakukan melalui *Google Earth Engine* (GEE) dengan pengolahan langsung di *server cloud Google* dan *real-time processing* [18]. Hasil penelitian berupa hasil analisis dan visualisasi data dari citra satelit yang digunakan untuk membangun model.

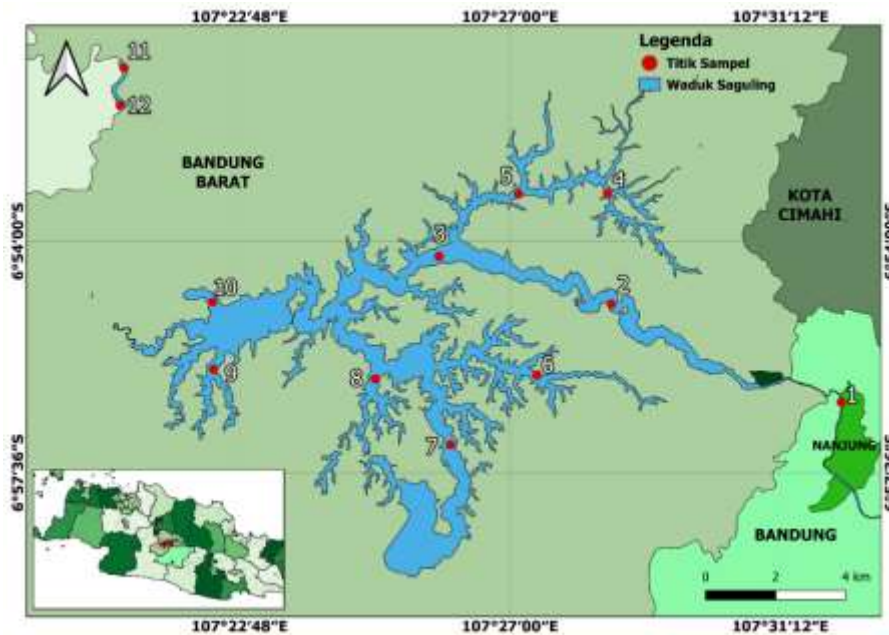
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan menentukan model empiris berupa persamaan yang digunakan dalam estimasi konsentrasi klorofil-a menggunakan citra satelit Sentinel-2. Visualisasi sebaran klorofil-a dilakukan untuk mempermudah analisis hasil. Hasil model diharapkan dapat dikembangkan dan digunakan sebagai informasi kualitatif maupun kuantitatif dari Waduk Saguling sebagai upaya pemantauan parameter biologi pada Waduk Saguling, Sungai Citarum.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian dan Sampel Data

Penelitian ini berfokus pada Waduk Saguling, yang terletak di Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat (6°55'52" Lintang Selatan dan 107°26'24" Bujur Timur). Waduk ini memiliki luas sekitar 56 km² dan dibangun pada tahun 1985 dengan fungsi utama sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), pengendali banjir dan pendukung pengelolaan air di Citarum [19]. Sebagai waduk yang berada di hulu

Sungai Citarum, Waduk Saguling juga berperan sebagai penampung awal air sebelum mengalir ke waduk-waduk di hilir seperti Waduk Cirata dan Jatiluhur. Lokasi Waduk Saguling dapat dilihat pada **Gambar 1**, di mana titik merah merupakan titik lokasi pengambilan sampel. Sampel berasal dari 12 titik lokasi, yaitu: 1) Sungai Citarum di Nanjung, 2) Cihampelas, 3) Maroko, 4) Cangkroah, 5) Surapati, 6) Cijere, 7) Cipatik, 8) Cililin, 9) Cilang, 10) Cijambu, 11) Cisamen, dan 12) TailRace [17].



Gambar 1. Peta lokasi penelitian.

Pengambilan sampel dilakukan berdasarkan standar *American Public Health Association* (APHA) tahun 2017 [20], yaitu secara langsung pada lokasi penelitian dengan mengambil sampel sebanyak 1,5 liter dan dimasukkan ke dalam wadah sampel berbahan plastik [21]. Kemudian sampel disimpan ke dalam *cool box*, agar terhindar dari matahari dan menjaga suhu sampel selama perjalanan menuju laboratorium untuk dilakukan uji konsentrasi klorofil-a. Pengujian konsentrasi klorofil-a pada setiap sampel dilakukan dengan perhitungan sebagai berikut [22]:

$$Klorofil_a = \left(\frac{Ca}{V} \right) \times Va \times d \quad (1)$$

di mana:

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

V = Volume sampel air (1500ml)

Va = Volume Aseton (15ml)

d = diameter cuvet (10 mm)

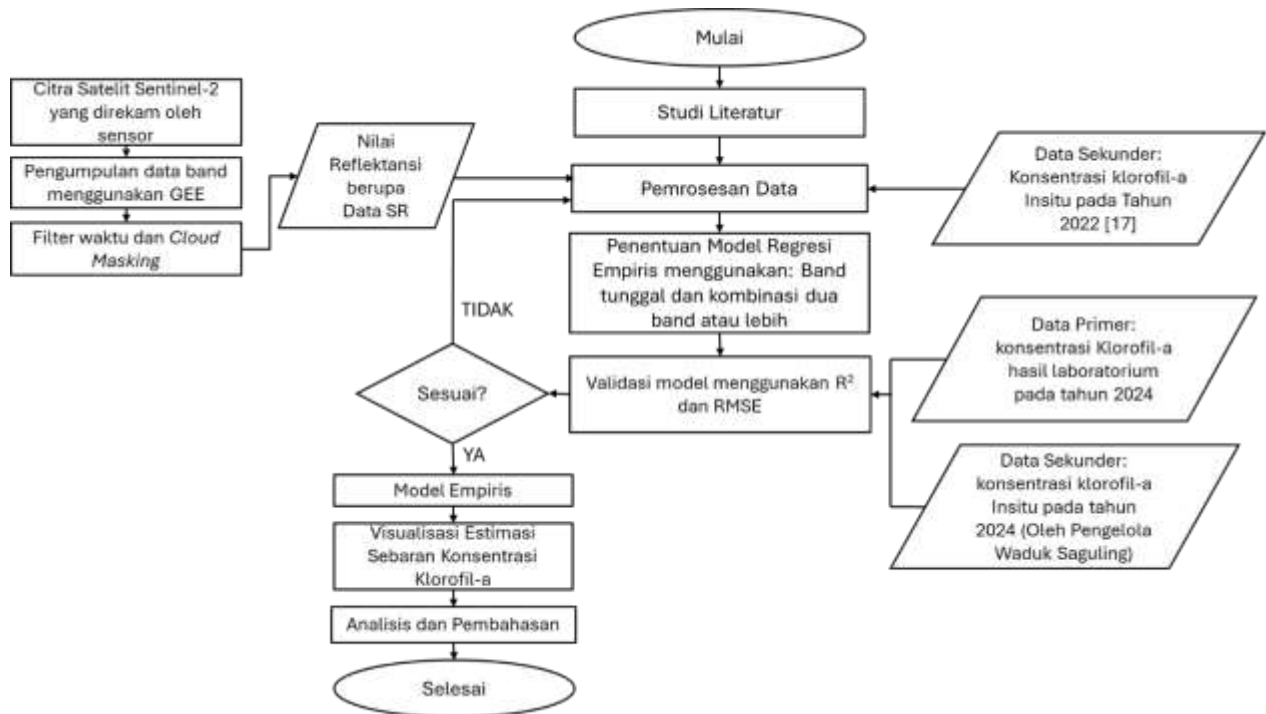
E = absorbansi atau serapan cahaya pada panjang gelombang 664 nm, 647 nm, dan 630 nm.

Penelitian ini melakukan uji laboratorium di Nanjung sebagai kondisi awal konsentrasi klorofil-a sebelum memasuki Waduk Saguling. Hasil uji laboratorium selanjutnya digabungkan dengan data pengujian yang berasal dari pengelola Waduk Saguling sebagai data validasi. Waktu pengambilan data in situ dan akuisisi adalah sebagai berikut: 29 - 31 Januari (akuisisi 8 Februari), 16 Mei (akuisisi 18 Mei), 28 - 30 Mei (akuisisi 28 Mei), 6 - 8 Agustus (akuisisi 6 Agustus) dan 29 Agustus 2024 (akuisisi 31 Agustus). Untuk 12 lokasi lainnya yang dipilih menggunakan data yang sama dari penelitian sebelumnya [17] sebagai penelitian lanjutan.

2.2 Metode

Penelitian ini terdiri dari empat tahap utama, yaitu pengumpulan data, pemrosesan data citra satelit, analisis data dan pembahasan hasil. Alur keseluruhan penelitian dapat dilihat pada diagram alir penelitian pada **Gambar 2**. Pada tahap pengumpulan data, dilakukan pengujian laboratorium pada sampel yang diambil di bagian hulu Waduk Saguling untuk menentukan konsentrasi klorofil-a sebelum memasuki waduk. Data sampel dan data aktual dari pengelola Waduk Saguling digunakan untuk menginterpretasikan data citra satelit. Tahap pemrosesan data citra satelit memanfaatkan GEE dalam pengumpulan data band.

Kemudian data tersebut diproses lebih lanjut menggunakan RStudio untuk menghasilkan model empiris. Selanjutnya, dilakukan validasi model untuk menguji model empiris yang terbentuk. Tahap analisis dilakukan dengan membandingkan hasil estimasi model dengan data aktual untuk menilai kesesuaian model. Visualisasi dilakukan dengan menerapkan model empiris pada citra satelit melalui GEE untuk menghasilkan peta distribusi konsentrasi klorofil-a. Tahap pembahasan mencakup evaluasi model empiris, interpretasi hasil penelitian, dan menjelaskan hasil visualisasi dalam batasan kajian penelitian.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.3 Data Citra Satelit Sentinel-2

Data citra satelit yang digunakan adalah koleksi data Sentinel-2 Harmonized level 2A atau koleksi citra berupa 'COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED' yang merupakan nama koleksi data Sentinel 2 pada GEE. Koleksi data ini menggabungkan data dari Sentinel-2A dan 2B yang sudah diharmonisasi, agar data yang didapatkan lebih akurat dengan bentuk data sebagai reflektansi permukaan (*Surface Reflectance, SR*). *SR* yang digunakan sudah dilakukan koreksi atmosferik dan radiometrik, sehingga menampilkan data reflektansi permukaan bumi tanpa dipengaruhi atmosfer. Reflektansi merupakan rasio radiasi yang dipantulkan terhadap radiasi yang diterima oleh permukaan, maka nilainya dinyatakan tanpa satuan dengan rentang 0 sampai dengan 1 atau dalam bentuk persentase.

Pengambilan data dengan citra satelit dilakukan melalui perekaman oleh band satelit terhadap radiasi pantulan dari permukaan bumi yang ditangkap oleh sensor satelit, kemudian data mentah dikonversi dan dikoreksi hingga mendapatkan nilai *SR*. Band satelit merupakan saluran spektral yang mendeteksi radiasi elektromagnetik pada rentang panjang gelombang tertentu dan setiap band mengukur nilai reflektansi pada panjang gelombang yang berbeda [10]. Selain itu, data telah melalui proses *cloud masking* untuk memastikan lokasi tidak tertutup awan. Nilai reflektansi pada band akan dikombinasikan untuk mendapatkan model empiris yang sesuai pada lokasi penelitian. **Tabel 1** menunjukkan kombinasi band terbaik pada penelitian sebelumnya di berbagai lokasi berbeda [12, 13, 14, 15, 16] menggunakan berbagai jenis citra satelit. Namun, meskipun satelit yang digunakan berbeda, tetapi memiliki panjang gelombang yang mirip, sehingga saat dilakukan konversi panjang gelombang di Sentinel-2, hasil kombinasi band yang diperoleh tetap sama [23]. R pada **Tabel 1** merupakan panjang gelombang (nm).

Tabel 1. Kombinasi Band Satelit pada Penelitian Terdahulu

Kombinasi band	Kombinasi Sentinel-2	Keterangan	Sumber
B3/B2 - Landsat 8 (OLI/TIRS)	B3/B2	<ul style="list-style-type: none"> Landsat 8: B3 (Green) = R(530-590), B2 (Blue) = R(450-510). Sentinel-2: B3 (Green)= R(560/559), B2 (Blue) = R(496.6/492.1). 	Perairan Banjir Kanal Barat, Semarang, Jawa Tengah – Pentury (1987) [12]
B5/B4 - Sentinel-2A	B5/B4	-	Waduk Jatiluhur, Kabupaten Purwakarta, Jawa Tengah – Rahman dkk. (2022) [13]
B4+B6/B5- Landsat 8 (OLI/TIRS)	B4+B11/B8	<ul style="list-style-type: none"> Landsat 8: B4 (Red) = R(640-670), B6 (Shortwave Infrared 1/SWIR 1) = R(1570-1650), B5 (Near-Infrared/ NIR) = R(850-880). Sentinel-2: B4 (Red) = R(664.5/665), B11 (SWIR1) = R(1613.7/1610.4), B8 (NIR)= R(835.1/833). 	Perairan Kota Jayapura, Papua – Hamuna & Dimara (2017) [14]
B1-B2/B1+B2 Landsat 7 (ETM+)	B2-B3/B2+B3	<ul style="list-style-type: none"> Landsat 7: B1 (Blue)= R(450-520), B2 (Green) = R(520-600). Sentinel-2: B2 (Blue)= R(496.6/492.1), B3 (Green)= R(560/559). 	Perairan tambak di Kabupaten Demak, Jawa Tengah – Arief dan Laksmi (2006) [15]
R(708)-R(665)/R(708)-R(665) ENVISAT (MERIS)	B5 – B4/B5+B4	<ul style="list-style-type: none"> Sentinel-2: B5 (Red Edge 1) = R(703.9/703.8), B4 (Red) = R(664.5/665) 	Pantai Timur Amerika Serikat - Mishra (2012) [16]

2.4 Estimasi Klorofil-a dengan Sentinel-2

Variabel parameter kualitas air terhadap pertumbuhan fitoplankton di Waduk Saguling memiliki nilai R^2 untuk musim hujan dan kemarau sebesar 0.97 dan 0.98 [8]. Fitoplankton mempunyai hubungan positif yang kuat dengan klorofil-a, sehingga menunjukkan bahwa perbedaan musim tidak berpengaruh signifikan terhadap hasil model [24]. Berdasarkan hal ini, model akan berlaku untuk semua musim. Model empiris dibangun dengan menerapkan persamaan regresi dari persamaan regresi sederhana hingga regresi linier ganda (*Multiple Linear Regression*, MLR), sehingga diperoleh persamaan yang optimal. Konsentrasi klorofil-a sebagai variabel tidak bebas dan nilai reflektansi pada band sebagai variabel bebas. Evaluasi dilakukan dengan nilai koefisien korelasi (*R-Square* (R^2)), di mana semakin mendekati +1, maka menunjukkan hubungan yang kuat antara variabel bebas dan tidak bebas. Sebaliknya, apabila R^2 mendekati 0, maka hubungan kedua variabel lemah. Berbagai jenis model regresi dibandingkan, termasuk persamaan regresi dengan band tunggal, kombinasi beberapa band dan MLR. Persamaan dengan nilai R^2 tertinggi kemudian dipilih sebagai model yang paling sesuai untuk mengestimasi konsentrasi klorofil-a di lokasi penelitian. Persamaan regresi yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut [14, 25]:

- Regresi Linear

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

- Polinomial Orde 2

$$y = a + bx^2 + b_1x \quad (3)$$

- Polinomial Orde 3

$$y = a + bx^3 + b_1x^2 + b_2x \quad (4)$$

- *Multiple Linear Regression* (MLR)

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (5)$$

di mana,

y = Konsentrasi klorofil-a prediksi

x = Nilai reflektansi dari band,

a = Konstanta atau intersep

b, b_1, b_2 dan b_n = Koefisien regresi.

Validasi model menggunakan R^2 dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Semakin kecil nilai indeks RMSE, maka menunjukkan bahwa hasil estimasi model semakin mendekati nilai aktual yang menandakan persamaan bagus dan akurat. Perhitungan nilai indeks RMSE dilakukan dengan rumus berikut [8].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n}} \quad (6)$$

di mana:

\hat{y} = Nilai prediksi (model)

y_i = Nilai in situ

n = Jumlah data.

2.5 Status Trofik

Status trofik menunjukkan status nutrien dan produktivitas dari suatu perairan, sehingga dapat digunakan sebagai indikator eutrofikasi. Status trofik secara umum diklasifikasikan ke dalam 3 kelompok, yaitu: 1) Oligotrofik, berupa badan perairan yang memiliki kadar nutrien atau tingkat kesuburan yang rendah, 2) Mesotrofik, berupa badan perairan yang memiliki kadar nutrien atau tingkat kesuburan yang sedang dan 3) Eutrofik, berupa badan perairan yang memiliki kadar nutrien atau tingkat kesuburan yang tinggi. Rentang konsentrasi klorofil-a untuk setiap status trofik ditampilkan pada **Tabel 2** [7].

Tabel 2. Klasifikasi Tingkat Trofik berdasarkan Klorofil – a

Status Trofik	Konsentrasi Klorofil – a (mg/m ³)
Ultra-mikrotrofik	0 – 0.33
Mikrotrofik	0.33 – 0.82
Oligotrofik	0.82 – 2.0
Mesotrofik	2.0 – 5.0
Eutrofik	5.0 – 12.0
Supertrofik	12.0 – 31.0
Hipertrofik	>31

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Konsentrasi Klorofil-a Hasil Sampel

Hasil uji konsentrasi klorofil-a pada titik awal yaitu di Nanjung [17], dilakukan untuk mengetahui kondisi status trofik awal sebagai gambaran kondisi awal air yang masuk ke Waduk Saguling. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 3**. Data ini digunakan dalam uji akurasi pada persamaan yang dipilih. Apabila ditinjau dari kriteria status trofik pada **Tabel 2**, maka hasil uji laboratorium dari konsentrasi klorofil-a, dikategorikan sebagai eutrofik. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi awal Waduk Saguling memiliki kadar nutrien atau kesuburan yang tinggi.

Tabel 3. Hasil Uji Konsentrasi Klorofil-a di Nanjung sebagai kondisi awal konsentrasi klorofil-a yang memasuki Waduk Saguling.

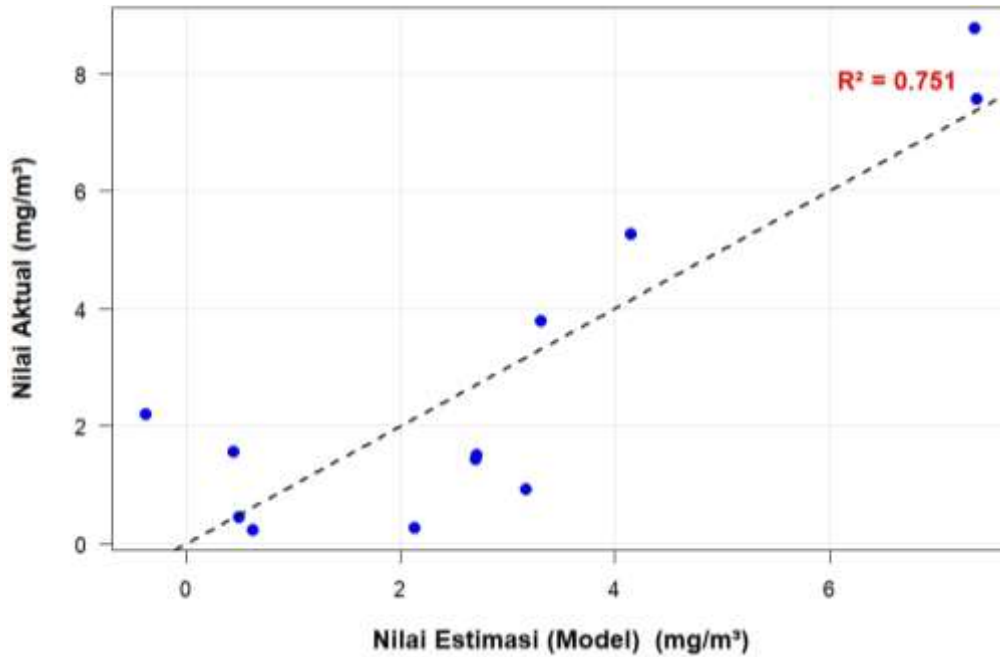
Klorofil – a (mg/m ³)	
16 Mei 2024	29 Agustus 2024
6.735	5.9

3.2 Estimasi Konsentrasi Klorofil-a dengan Sentinel-2

Band pada sentinel-2 digunakan untuk membuat model empiris berupa persamaan untuk estimasi konsentrasi klorofil-a. Hasil R^2 dari berbagai kombinasi band dan persamaan regresinya dapat dilihat pada **Tabel 4**. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai R^2 tertinggi pada kombinasi dua band yaitu pada kombinasi band 3 dibagi band 2 (B3/B2) dengan persamaan polinomial orde 2 dan nilai R^2 sebesar 0.379. Kemudian nilai R^2 tertinggi pada band tunggal yaitu pada band 2, 3, 4 dan 11 dengan nilai R^2 sebesar 0.928, 0.6, 0.762 dan 0.740 pada persamaan polinomial orde 2. Band-band tunggal tersebut diintegrasikan ke dalam persamaan *Multiple Linear Regression* (MLR).

Tabel 4. Hasil Nilai R^2 dari Kombinasi Band Sentinel – 2.

Model Persamaan	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 8A	Band 11
$y = a + bx$	0.537	0.437	0.519	0.420	0.339	0.316	0.328	0.319	0.441
$y = a + bx^2 + b_1x$	0.884	0.597	0.728	0.474	0.369	0.376	0.472	0.417	0.722
$y = a + bx^3 + b_1x^2 + b_2x$	0.928	0.600	0.762	0.482	0.414	0.384	0.512	0.418	0.740
Model Persamaan	B3/B2	B5 / B4	(B4+B11)/B8	B2-B3/B2+B3			B5-B4/B5+B4		
$y = a + bx$	0.125	0.003	0.131	0.048			0.002		
$y = a + bx^2 + b_1x$	0.377	0.021	0.132	0.176			0.026		
$y = a + bx^3 + b_1x^2 + b_2x$	0.379	0.238	0.132	0.304			0.198		



Gambar 3. Grafik Perbandingan Estimasi Klorofil-a dan Aktual

R^2 untuk model dengan band tunggal tertinggi pada polinomial orde 3 pada Band 2 (0.928), Band 4 (0.762), Band 11 (0.740) dan Band 3 (0.600). Akan tetapi, meskipun nilai R^2 yang dihasilkan tinggi, pada model yang hanya melibatkan satu band berpeluang terjadinya overfitting dan menyebabkan model memiliki akurasi yang rendah. Penggunaan model kombinasi dari beberapa band lebih sesuai digunakan karena menggunakan variabel lebih banyak, lebih kompleks dan dapat mendeteksi faktor lain. Sehingga dapat memberikan estimasi yang lebih stabil. R^2 untuk kombinasi band, diperoleh pada polinomial orde 3 pada Band 3/Band 4 sebesar 0.379.

Selanjutnya dibuat model MLR dengan melibatkan band yang memberikan R^2 tinggi yaitu dengan mengintegrasikan band 2, 3, 4 dan 11. Hasilnya diperoleh nilai R^2 dan RMSE sebesar 0.75 dan 1.39. Hasil persamaan tersebut menunjukkan bahwa 75% dari variabel dependen (konsentrasi klorofil-a in situ) dapat dijelaskan oleh variabel independen (band). Namun, 25% lainnya masih dipengaruhi oleh variabel lain. RMSE menunjukkan bahwa selisih atau eror antara konsentrasi klorofil-a hasil estimasi dengan nilai aktual sebesar 1.39 mg/m^3 . Nilai tersebut mengindikasikan bahwa tingkat kesalahan rata-rata kecil. Persamaan MLR yang diperoleh dari hasil integrasi empat band tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

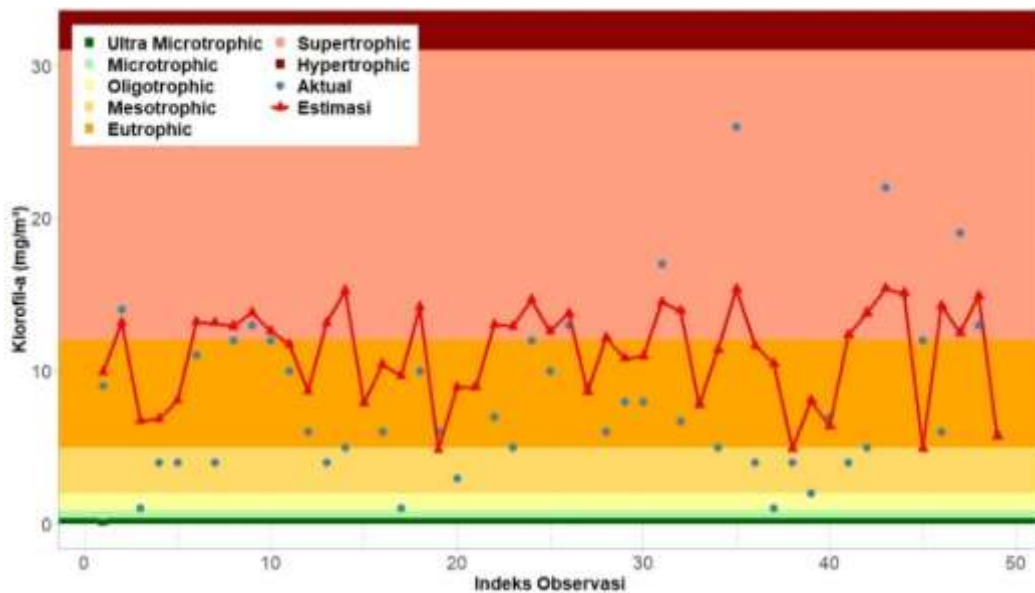
$$y = 13.36 - 239.98 B2 + 235,19 B3 - 0.578 B4 - 56,68 B11 \quad (7)$$

Kurva hubungan nilai reflektansi pada band dengan klorofil-a hasil pengujian model MLR dapat dilihat pada **Gambar 3**, di mana titik biru merupakan nilai aktual dan garis merah merupakan hasil estimasi menggunakan **Persamaan 7**. Berdasarkan gambar tersebut, menunjukkan bahwa nilai estimasi klorofil-a masih mendekati nilai aktual.

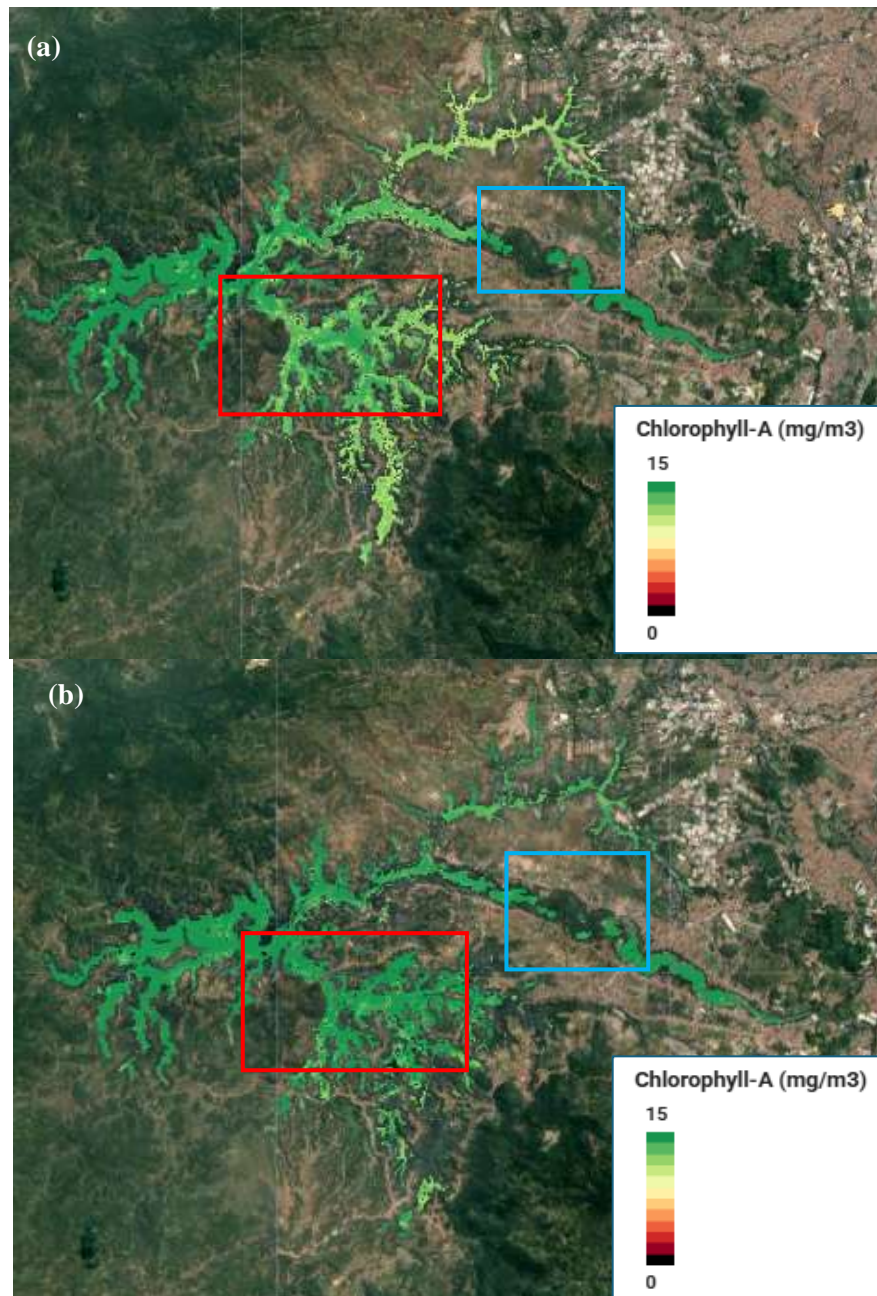
3.3 Uji Validasi Model

Model Empiris yang didapatkan berfungsi sebagai model persamaan matematis untuk estimasi konsentrasi klorofil-a. Validasi model dilakukan menggunakan data validasi berupa hasil in situ pada tahun 2024 di Waduk Saguling. Pengujian model dilakukan untuk mengetahui seberapa efisien pengaplikasian model terhadap data baru. Hasil perbandingan antara estimasi dan nilai aktual konsentrasi klorofil-a ditunjukkan pada **Gambar 4**, dengan garis merah yang menunjukkan hasil estimasi konsentrasi klorofil-a dan titik biru yang menunjukkan konsentrasi klorofil-a aktual. Status trofik yang mengacu pada **Tabel 2** dibedakan berdasarkan warna pada **Gambar 4**, yaitu warna hijau tua (*ultra mikrotrofik*), hijau pastel muda (*mikrotrofik*), kuning pucat (*oligotrofik*), kuning jingga terang (*mesotrofik*), jingga (*eutrofik*), jingga kemerahan (*supertrofik*) dan merah tua (*hipertrofik*). Status trofik ini membantu dalam interpretasi hasil analisis dan memberikan gambaran tentang tingkat nutrisi dalam perairan Waduk Saguling.

Hasil uji akurasi model empiris yaitu R^2 sebesar 0.261 dengan RMSE 4.2. Hasil tersebut menunjukkan adanya penurunan performa model terhadap data 2024, ditunjukkan dari R^2 yang menurun dan RMSE yang meningkat. Hal ini dapat disebabkan dari perubahan karakteristik badan air pada tahun 2022 dan 2024. Selain itu, variabel prediktor lain yang mempengaruhi klorofil-a seperti faktor internal berupa nutrisi dan faktor eksternal berupa curah hujan, limpasan, suhu, transparansi, cahaya matahari, kondisi hidrologi, meteorologi dan aktivitas antropogenik [3, 4, 6, 26, 27]. Walaupun akurasi model terhadap data tahun 2024 lebih rendah dibandingkan data sebelumnya, akan tetapi hasil estimasi klorofil-a masih memberikan gambaran yang valid tentang status trofik Waduk Saguling. Berdasarkan status trofik, Waduk Saguling berstatus oligotrofik hingga eutrofik, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4**. Sehingga hasil estimasi tetap relevan untuk memberikan gambaran besar dalam menentukan kondisi status trofik pada Waduk Saguling. Visualisasi estimasi sebaran klorofil-a dilakukan menggunakan Sentinel-2 dengan GEE untuk melihat perubahan sebaran pada tahun 2022 dengan tahun 2024, seperti pada **Gambar 5**.



Gambar 4. Grafik Hasil Uji Akurasi Model



Gambar 5. Peta Waduk Saguling dengan (a) Sebaran Klorofil-a pada Desember 2022 dan (b) Sebaran Klorofil-a pada Mei 2024. Berdasarkan citra satelit Sentinel-2 dengan menggunakan GEE.

Berdasarkan perbandingan wilayah yang dikelilingi garis merah pada **Gambar 5** (a) dan (b), terjadinya kenaikan konsentrasi klorofil-a yang signifikan dari tahun 2022 ke tahun 2024, terlihat pada perubahan warna dari hijau kekuningan di **Gambar 5a** menjadi hijau gelap pada **Gambar 5b**, yang menunjukkan wilayah semakin mendekati status eutrofik, di mana konsentrasi klorofil-a melebihi 12 mg/m³. Berdasarkan hasil estimasi dan status trofik pada **Tabel 2**, sebaran klorofil-a pada 2024 memiliki status trofik mikrotrofik hingga eutrofik, tetapi didominasi dengan status mendekati eutrofik. Pada pemodelan menggunakan citra satelit tetap harus dibarengi dengan pengetahuan mengenai lokasi penelitian terutama pada perairan. Wilayah yang dikelilingi garis biru pada **Gambar 5** (a) dan (b) menunjukkan vegetasi mengapung seperti tanaman sehingga menghambat citra satelit dalam mendeteksi badan air Waduk Saguling, sehingga wilayah tersebut tidak menampilkan hasil estimasi.

Gambar 6 menunjukkan peta hasil visualisasi dengan GEE, berupa warna natural atau *true color* pada citra menggunakan kombinasi *True Colour Composite*. Kombinasi ini merupakan gabungan band 4 (merah), band 3 (hijau), dan band 5 (biru). Hasil visualisasi menampilkan warna asli alam yang terlihat oleh mata manusia, sehingga dapat mengidentifikasi area perairan, vegetasi dan sebagainya [28]. Berdasarkan wilayah yang dikelilingi garis merah pada **Gambar 6**, adanya keberadaan vegetasi yang menutupi perairan,

terlihat pada warna kehijauan yang menunjukkan vegetasi. Salah satu vegetasi yang tumbuh di Waduk Saguling adalah tanaman enceng gondok [29]. Citra mendeteksi tanaman pada perairan sebagai vegetasi atau non-air, sehingga mengurangi akurasi estimasi pada perairan. Selain itu, dapat terjadinya salah segmentasi yang menyebabkan citra mendeteksi wilayah non-air sebagai wilayah perairan. Sehingga kesalahan segmentasi perlu menjadi perhatian pada saat melakukan visualisasi dengan data Citra Satelit Sentinel 2 menggunakan GEE.



Gambar 6. Peta Citra Satelit *True Color* (B4, B3, dan B2) dengan GEE pada Mei 2024

Salah satu penyebab salah segmentasi yaitu tingginya hamburan balik permukaan (*backscattering*) pada vegetasi, terutama yang menghasilkan pantulan ganda (*double-bounce backscattering*). Hamburan ini menghasilkan sinyal lebih tinggi dibandingkan lahan kosong tanpa tanaman atau permukaan air, sehingga vegetasi menjadi diklasifikasi sebagai non-air. Di sisi lain, NDWI (*Normalized Difference Water Index*), yang digunakan untuk mengidentifikasi air, memiliki keterbatasan pada wilayah dengan vegetasi tinggi. Vegetasi di sekitar sungai dapat menghasilkan pantulan serupa dengan air, terutama citra dengan piksel campuran seperti sawah atau wilayah basah lainnya sehingga mengakibatkan kesalahan segmentasi. Kesalahan klasifikasi ini perlu dipertimbangkan dalam analisis lanjutan untuk meningkatkan akurasi estimasi klorofil-a di lokasi penelitian. Salah satu cara meningkatkan akurasi deteksi air dalam visualisasi menggunakan GEE adalah dengan menerapkan indeks yang lebih kompleks, seperti MNDWI (*Modified NDWI*). MNDWI memiliki sensitivitas terhadap struktur bangunan sekitarnya, sehingga kemampuan untuk membedakan antara air dan non-air lebih tinggi dibandingkan NDWI. Selain itu, integrasi data Sentinel-2 dan citra satelit Landsat juga dapat dilakukan untuk menghasilkan citra cakupan air permukaan yang stabil. Kombinasi kedua citra ini memberikan keunggulan dalam resolusi temporal dan spektral, sehingga dapat meningkatkan akurasi pengamatan pada air permukaan [18]. Oleh karena itu, wilayah perairan yang tertutup vegetasi secara aktual dan kesalahan segmentasi perlu menjadi perhatian saat visualisasi, untuk meningkatkan akurasi estimasi.

4. Kesimpulan

Penelitian menghasilkan model empiris berupa persamaan regresi menggunakan kombinasi band dari Citra Satelit Sentinel-2 dan data aktual tahun 2022 untuk memprediksi konsentrasi klorofil-a di Waduk Saguling, Sungai Citarum. Model yang dihasilkan berupa persamaan *Multiple Linear Regression* (MLR) dengan mengintegrasikan band 2, 3, 4, 5 dan 11. Nilai RMSE dan R^2 yang diperoleh masing-masing sebesar 1.39 dan 0.75, menunjukkan adanya korelasi kuat antara estimasi konsentrasi klorofil-a dengan data aktual serta performa model yang baik. Uji akurasi model dilakukan dengan data validasi tahun 2024, menghasilkan nilai R^2 sebesar 0.261 dan RMSE sebesar 4.2, yang menunjukkan adanya penurunan performa model saat diterapkan pada data baru. Hal ini dapat disebabkan dari perubahan karakteristik badan air pada data tahun 2022 dan 2024, serta adanya variabel prediktor lain yang mempengaruhi konsentrasi klorofil-a. Namun, berdasarkan status trofik dari hasil estimasi dan nilai aktual, keduanya masih berada

pada rentang yang sama. Oleh karena itu, model ini tetap relevan dalam memberikan gambaran umum prediksi sebaran klorofil-a pada Waduk Saguling.

Hasil visualisasi menggunakan model empiris dengan data Sentinel-2 pada GEE menunjukkan terdapat peningkatan konsentrasi klorofil-a pada tahun 2024 dibandingkan dengan tahun 2022. Hasil estimasi menunjukkan bahwa status trofik Waduk Saguling pada 2024 berada dalam kisaran mikrotrofik hingga eutrofik. Namun, keberadaan vegetasi yang menutupi wilayah perairan secara aktual dan kesalahan segmentasi saat visualisasi perlu diperhatikan, karena dapat menghambat akurasi estimasi.

Model ini bermanfaat untuk memberikan gambaran umum terkait prediksi sebaran konsentrasi klorofil-a di Waduk Saguling sebagai gambaran awal pemantauan kondisi perairan. Meskipun demikian, penelitian ini terbatas hanya menggunakan data reflektansi dari satelit Sentinel-2 dengan data aktual yang terbatas. Penelitian selanjutnya disarankan untuk meningkatkan jumlah data aktual serta mempertimbangkan berbagai faktor lingkungan seperti karakteristik badan air, nutrisi, curah hujan, limpasan, suhu, transparansi, cahaya matahari, serta kondisi hidrologi, dan meteorologi.

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dilaksanakan dengan dukungan pendanaan oleh Riset Inovatif Produktif (RISPRO) Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) melalui program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) Gelombang I, Tahun 2022/2023 dengan nomor kontrak 20/IV/KS/06/2022 dan 417/IT1.B07/KS.00/2022. Juga kami ucapkan terima kasih kepada pihak Pengelola Waduk Saguling atas dukungan non-finansial terhadap penelitian ini.

6. Referensi

- [1] I. Prawinegara, "Sungai sebagai Proyek: Proses Komodifikasi Aliran Sungai Citarum," Agrarian Resources Center (ARC), No. 02/WP-CTR/2020, Bandung, Indonesia, Des. 2020.
- [2] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, "Status Mutu Air," KLHK. [Online]. Tersedia: <https://ppkl.menlhk.go.id/onlimo-2022/> [Diakses: 20 Januari 2025].
- [3] A. W. Tungka, H. Haeruddin, dan C. Ain, "Konsentrasi Nitrat dan Ortofosfat di Muara Sungai Banjir Kanal Barat dan Kaitannya dengan Kelimpahan Fitoplankton," *Indonesian Journal of Fisheries Science and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 40–46, 2017, doi: 10.14710/ijfst.12.1.40-46.
- [4] X. Zhi, L. Chen, S. Chen, J. Yu, J. Jiang, Y. Xu, L. Li, X. Meng, dan Z. Shen, "Heterogeneity and influencing factors of algal blooms in the reservoir-impacted tributary: Evidence from remote sensing and physical-based model," *Journal of Hydrology*, vol. 634, p. 131058, 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.131058.
- [5] A. Sunaryani, A. B. Santoso, P. Soewondo, Suharyanto, A. Imananda, dan I. F. Sani, "Eutrophication in Lake Batur: Current status and management strategies," *E3S Web of Conferences*, vol. 485, no. 60, pp. 1–10, 2024, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448503013>.
- [6] J. Lee, S.Y. Woo, Y.W. Kim, S.J. Kim, J. Pyo, dan K. H. Cho, "Dynamic calibration of phytoplankton blooms using the modified SWAT model," *Journal of Cleaner Production*, vol. 343, p. 131005, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131005>.
- [7] A. Perrie, "Lake Water Quality and Ecology Monitoring Programme Annual Data Report, 2016/17," Greater Wellington Regional Council, No.GW/ESCI-T-17/96, Wellington, New Zealand, Nov. 2017.
- [8] M. Hadi, P. Soewondo, F. Immaddudin Wira Rohmat, dan A. Ritka May, "Model Prediktif Pertumbuhan Fitoplankton di Waduk Saguling Berbasis Artificial Neural Network," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 6551–6560, 2023, doi: <https://doi.org/10.32672/jse.v8i3.6238>.
- [9] D. Awfa, A. N. Wicaksono, R. Putra, dan P. Soewondo, "Remote sensing estimation of water transparency for Saguling Dam in the past decade (2013-2022) based on Landsat 8," *E3S Web of Conferences*, vol. 485, pp. 1–11, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202448503003.
- [10] European Space Agency (ESA), "Sentinel-2 User Handbook," ESA, Paris, France, Mei. 2015.
- [11] J. Delegido, J. Verrelst, L. Alonso, dan J. Moreno, "Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content," *Sensors*, vol. 11, no. 7, pp. 7063–7081, 2011, doi: 10.3390/s110707063.
- [12] H. Qanita, S. Subiyanto, dan Hani'ah, "Analisis Distribusi Total Suspended Solid dan Kandungan Klorofil-a Perairan Banjir Kanal Barat Semarang menggunakan Citra Landsat 8 dan Sentinel-2a," *Jurnal Geodesi Undip*, vol. 8, no. 1, pp. 435–445, 2019, doi: <https://doi.org/10.14710/jgundip.2019.22774>.

- [13] A. Rahman, L. P. Astuti, A. Warsa, dan A. A. Sentosa, “Prediksi Konsentrasi Klorofil-a Menggunakan Data Citra Satelit Sentinel-2A di Waduk Jatiluhur Kabupaten Purwakarta,” *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 23, no. 2, pp. 165–171, 2022, doi: 10.29122/jtl.v23i2.5192.
- [14] B. Hamuna dan L. Dimara, “Pendugaan Konsentrasi Klorofil-a dari Citra Satelit Landsat 8 di Perairan Kota Jayapura,” *Masparsi Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 139–148, 2017.
- [15] M. Arief dan W. L. Laksmi, “Analisis Kesesuaian Perairan Tambak di Kabupaten Demak ditinjau dari Nilai Klorofil-a, Suhu Permukaan Perairan dan Muatan Padatan Tersuspensi menggunakan Data Citra Satelit Landsat ETM 7+,” *Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan Data Citra Digital*, vol. 3, no. 1, pp. 108–118, 2010.
- [16] S. Mishra dan D. R. Mishra, “Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 117, pp. 394–406, 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.10.016.
- [17] M. Hadi, “Pengembangan Model Status Klorofil-a di Waduk Saguling berbasis Parameter Fisikokimia dan Citra Satelit Landsat menggunakan Artificial Neural Network,” M.S. thesis, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 2024.
- [18] A. Declaro dan S. Kanae, “Enhancing Surface Water Monitoring through Multi-Satellite Data-Fusion of Landsat-8/9, Sentinel-2, and Sentinel-1 SAR,” *Remote Sensing*, vol. 16, no. 17, 2024, doi: 10.3390/rs16173329.
- [19] A. Fandya dan P. Soewondo, “Efisiensi Penyisihan Organik Air Sodetan Sungai Citarum menggunakan Constructed Wetland dengan Tanaman Typha sp. dan Scirpus grossus (Studi Kasus: Desa Daraulin, Kabupaten Bandung),” *Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 17, no. 2, pp. 56–67, 2011, doi: 10.5614/jtl.2011.17.2.6.
- [20] V. Febrianna, M. R. Muskananfolo, dan S. Suryanti, “Produktivitas Primer Perairan berdasarkan Kandungan Klorofil-A dan Kelimpahan Fitoplankton di Muara Sungai Bedono Demak,” *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, vol. 6, no. 3, pp. 318–325, 2018, doi: 10.14710/marj.v6i3.20593.
- [21] Standard Methods Committee of the American Public Health Association, American Water Works Association, dan Water Environment Federation, “1060 Collection and Preservation of Samples,” dalam *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*, edisi ke-24. Washington, DC, USA: American Public Health Association Press (APHA), 2017, doi: 10.2105/SMWW.2882.009.
- [22] H. K. Dewi, B. Hendarto, dan C. Ain, “Kandungan Klorofil-a dan Fitoplankton di Lokasi yang Berbeda di Sungai Wulan, Kabupaten Demak,” *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, vol. 6, no. 1, pp. 51–60, 2017, doi: <https://doi.org/10.14710/marj.v6i1.19810>.
- [23] Google Earth Engine Team, “Google Earth Engine Data Catalog,” GEE Team. [Online]. Tersedia: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog> [Diakses: 5 Februari 2025].
- [24] Moh. R. Ridho, E. Patriono, dan Y. S. Mulyani, “Hubungan Kelimpahan Fitoplankton, Konsentrasi Klorofil-A dan Kualitas Perairan Pesisir Sungsang, Sumatera Selatan,” *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2020, doi: 10.29244/jitkt.v12i1.25745.
- [25] W. Jang, J. Kim, J. H. Kim, J. K. Shin, K. Chon, E. T. Kang, Y. Park, dan S. Kim, “Evaluation of Sentinel-2 Based Chlorophyll-a Estimation in a Small-Scale Reservoir: Assessing Accuracy and Availability,” *Remote Sens*, vol. 16, no. 2, p. 315, 2024, doi: 10.3390/rs16020315.
- [26] P. Orlińska-Woźniak, E. Szalińska, E. Jakusik, D. Bojanowski, dan P. Wilk, “Biomass Production Potential in a River under Climate Change Scenarios,” *Environ Sci Technol*, vol. 55, no. 16, pp. 11113–11124, 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c03211.
- [27] R. Widiaratih, A. A. D. Suryoputra, dan G. Handoyo, “Korelasi Klorofil-a dengan Nutrien dan Kualitas Perairan di Pulau Seruni Karimunjawa Indonesia,” *Jurnal Kelautan Tropis*, vol. 25, no. 2, pp. 249–256, 2022, doi: 10.14710/jkt.v25i2.14170.
- [28] P. P. E. Pupilaya, “Aplikasi Google Earth Engine Dalam Menyediakan Citra Satelit Sumberdaya Alam Bebas Awan,” *Makila: Jurnal Penelitian Kehutanan*, vol. 16, no. 2, pp. 96–103, 2022, doi: 10.30598/makila.v16i2.6586.
- [29] R. S. Utami, A. Salsabila, Sofiyah, dan T. Kurniawan, “Pemanfaatan Enceng Gondok Waduk Saguling untuk Peningkatan Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan Masyarakat oleh PT.PLN Indonesia Power Saguling POMU,” *Jurnal Kelola: Jurnal Ilmu Sosial*, vol. 6, no. 2, pp. 11–23, 2023, doi: <https://doi.org/10.54783/jk.v6i2.722>.