



ANALISIS SPASIAL KLOROFIL-A PERAIRAN PESISIR KOTA PAREPARE MENGGUNAKAN CITRA SENTINEL-2

Spatial Analysis of Chlorophyll-a in the Coastal Waters of Parepare City Using Sentinel-2

Yusri Prayitna¹, Muhammad Ihsan²

^{1,2}Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie

¹Email: yusri.prayitna@ith.ac.id

²Email: m.ihsan@ith.ac.id

Abstract

The coastal waters of Parepare City exhibited pronounced water quality dynamics during the 2024–2025 period, as reflected by fluctuations in the spatially averaged Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) values ranging from -0.07 to 0.21 . This study aims to analyze the spatial and temporal variability of chlorophyll-a in the coastal waters of Parepare using Sentinel-2 imagery and to evaluate the relationship between NDCI and bio-optical parameter estimates derived from the Case-2 Regional CoastColour (C2RCC) algorithm. The analysis was conducted using Google Earth Engine for NDCI computation and extreme-condition selection, accompanied by data quality filtering based on water-body masking and cloud screening. Two extreme conditions were identified, namely the HIGHEST condition on 14 January 2024 (mean NDCI = 0.2126) and the LOWEST condition on 28 May 2025 (mean NDCI = -0.0719), which were subsequently analyzed using the C2RCC algorithm applied to Sentinel-2 Level-1C imagery through the SNAP software. The results indicate that the coastal waters of Parepare exhibit typical Case-2 water characteristics, in which spatial variability in chlorophyll-a is generally associated with changes in Total Suspended Matter (TSM) driven by terrestrial material inputs. Although NDCI is effective as a relative indicator of chlorophyll-a variability, the occurrence of anomalies in littoral zones caused by mixed pixels highlights the necessity of integrating spectral indices with C2RCC based bio-optical estimates for robust monitoring of optically complex coastal waters.

Keywords: Chlorophyll-a, NDCI, Sentinel-2, Google Earth Engine, C2RCC, Case-2 Waters

Abstrak

Perairan pesisir Kota Parepare menunjukkan dinamika kualitas perairan yang nyata selama periode 2024–2025, yang tercermin dari fluktuasi nilai rata-rata spasial (mean) Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) pada rentang $-0,07$ hingga $0,21$. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis variasi spasial dan temporal klorofil-a di perairan pesisir Parepare menggunakan citra Sentinel-2 serta mengevaluasi keterkaitan antara NDCI dan estimasi parameter bio-optik berbasis algoritma Case-2 Regional CoastColour (C2RCC). Analisis dilakukan menggunakan Google Earth Engine untuk perhitungan NDCI dan seleksi kondisi ekstrem, disertai pemfilteran kualitas data berbasis pembatasan wilayah perairan dan masking awan. Dua kondisi ekstrem teridentifikasi, yaitu kondisi HIGHEST pada 14 Januari 2024 (mean NDCI $0,2126$) dan kondisi LOWEST pada 28 Mei 2025 (mean NDCI $-0,0719$), yang selanjutnya dianalisis menggunakan algoritma C2RCC pada citra Sentinel-2 Level-1C melalui perangkat lunak SNAP. Hasil menunjukkan bahwa perairan Parepare memiliki karakteristik Case-2 waters, di mana variasi klorofil-a secara spasial umumnya

berasosiasi dengan perubahan *Total Suspended Matter (TSM)* akibat masukan material terestrial. Meskipun *NDCI* efektif sebagai indikator relatif klorofil-*a*, keberadaan anomali pada zona litoral akibat piksel campuran menegaskan perlunya integrasi indeks spektral dan estimasi bio-optik *C2RCC* dalam pemantauan kualitas perairan pesisir yang kompleks.

Kata Kunci: klorofil-*a*, *NDCI*, Sentinel-2, *Google Earth Engine*, *C2RCC*, *Case-2 Waters*

PENDAHULUAN

Klorofil-*a* (*Chl-a*) merupakan pigmen utama pada fitoplankton yang berperan penting dalam proses fotosintesis dan dianggap sebagai indikator kunci produktivitas primer dan kualitas perairan di ekosistem pesisir maupun perairan terbuka (Zhang et al., 2023). Pemantauan klorofil-*a* secara spasial dan temporal penting untuk memahami dinamika ekologis dan kondisi eutrofikasi, yang berdampak pada kesehatan ekosistem dan pengelolaan sumber daya perairan (García-Nieto et al., 2024). Metode penginderaan jauh telah banyak digunakan untuk menjawab keterbatasan pengukuran *in situ*, karena mampu menyediakan cakupan spasial yang luas dan interval pengambilan data yang tinggi (Blondeau-Patissier et al., 2014; Li et al., 2024).

Salah satu indeks spektral yang digunakan untuk mengestimasi keberadaan klorofil-*a* dari citra multispektral adalah *Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI)*, yang memanfaatkan pita spektral merah dan red-edge pada sensor satelit untuk mengidentifikasi variasi kandungan klorofil-*a* di perairan produktif dan keruh (*Case-2 waters*) melalui perbedaan reflektansi spektral (Mishra & Mishra, 2012). Indeks ini telah dikembangkan dan divalidasi dalam berbagai studi terhadap perairan pantai, serta digunakan sebagai indikator spasial relatif untuk klorofil-*a* ketika data *in situ* tidak tersedia atau terbatas (Manuel & Blanco, 2023; Mishra & Mishra, 2012).

Selain indeks spektral, pendekatan bio-optik berbasis model digunakan untuk memisahkan kontribusi konsentrasi optik zat terlarut dan tersuspensi serta pigmen fitoplankton dari sinyal pantulan satelit, terutama di perairan kompleks yang diklasifikasikan sebagai *Case 2* (IOCCG, 2000). *Case-2 Regional CoastColour (C2RCC)* adalah salah satu algoritma yang dirancang untuk wilayah perairan optik kompleks (*Case-2 waters*) yang melakukan koreksi atmosfer dan inversi bio-optik untuk menghasilkan estimasi parameter seperti klorofil-*a* dan *Total Suspended Matter (TSM)* dari citra satelit secara terotomatis dan konsisten untuk berbagai sensor optik, termasuk Sentinel-2 MSI (Brockmann et al., 2016).

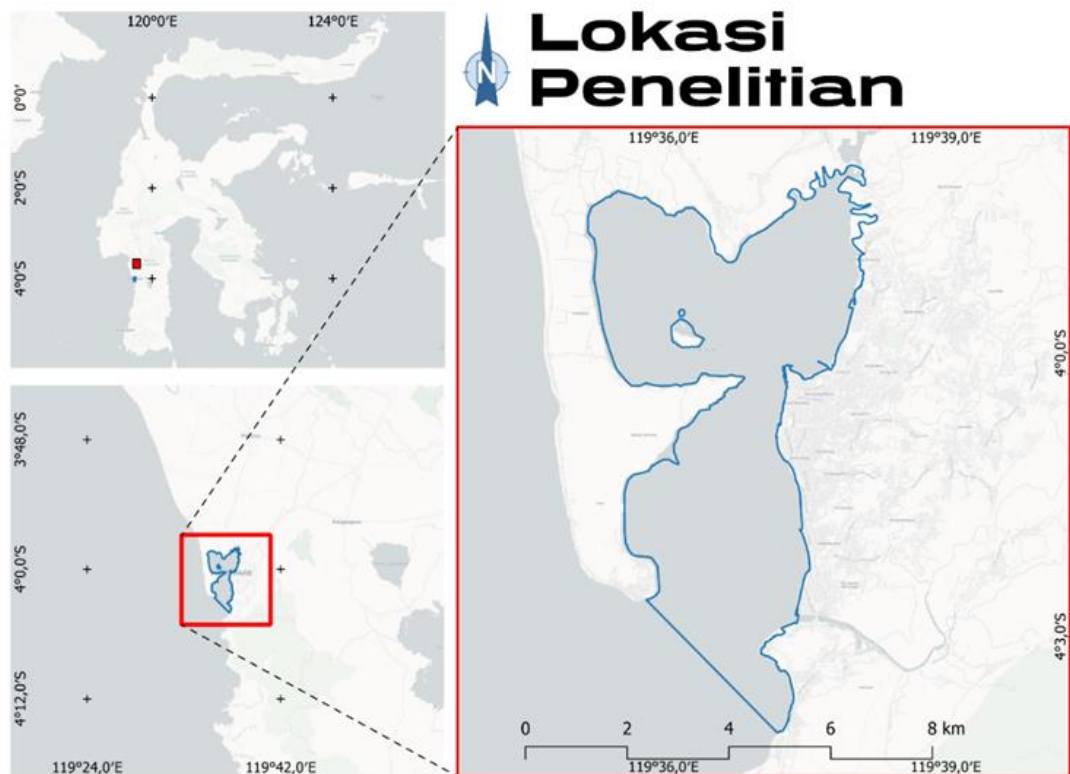
Penggunaan citra satelit Sentinel-2 MSI memberikan keuntungan dalam hal resolusi spasial yang tinggi (~10 m) dan ketersediaan multi-pita spektral yang mendukung perhitungan indeks spektral seperti *NDCI* dan pemrosesan bio-optik dengan *C2RCC* (Brockmann et al., 2016). Sentinel-2 telah digunakan secara luas dalam pemantauan kualitas perairan pesisir dan badan air lainnya (Caballero et al., 2022; Kwong et al., 2022; Tran et al., 2023), termasuk untuk analisis temporal variabilitas klorofil-*a* dan parameter optik lainnya menggunakan *Google Earth Engine* sebagai platform komputasi awan untuk pemrosesan citra berskala besar (Gorelick et al., 2017).

Namun demikian, penggunaan *NDCI* sebagai indikator relatif klorofil-*a* dalam perairan pesisir perlu dikaitkan dengan estimasi bio-optik yang lebih kuantitatif untuk memahami keterbatasan interpretasi sinyal spektral, terutama di

wilayah yang dipengaruhi oleh berbagai komponen optik seperti TSM dan zat terlarut berwarna (Brockmann et al., 2016; Mishra & Mishra, 2012). Kondisi ini sangat relevan bagi perairan pesisir Kota Parepare yang memiliki dinamika masukan material terlarut dan tersuspensi yang dipengaruhi oleh siklus musiman. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memetakan distribusi spasial klorofil-a secara relatif di perairan pesisir Kota Parepare berdasarkan NDCI dari citra Sentinel-2 yang dianalisis melalui *Google Earth Engine*, serta mengevaluasi keterkaitan NDCI dengan estimasi klorofil-a dan TSM menggunakan algoritma C2RCC pada kondisi ekstrem yang mewakili variabilitas musiman di wilayah tersebut.

METODE

Wilayah studi mencakup perairan pesisir Kota Parepare, Sulawesi Selatan, Indonesia, yang dibatasi oleh poligon *Region of Interest* (ROI) pada zona perairan semi-tertutup yang berhadapan langsung dengan Selat Makassar (Gambar 1). Secara optik, wilayah ini diklasifikasikan sebagai *Case-2 waters*, di mana respon spektral perairan dipengaruhi secara simultan oleh fitoplankton, material tersuspensi, dan zat terlarut yang berasal dari masukan terestrial melalui limpasan permukaan dan muara sungai, sehingga menunjukkan kompleksitas optik yang tinggi dan variabilitas musiman yang kuat.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

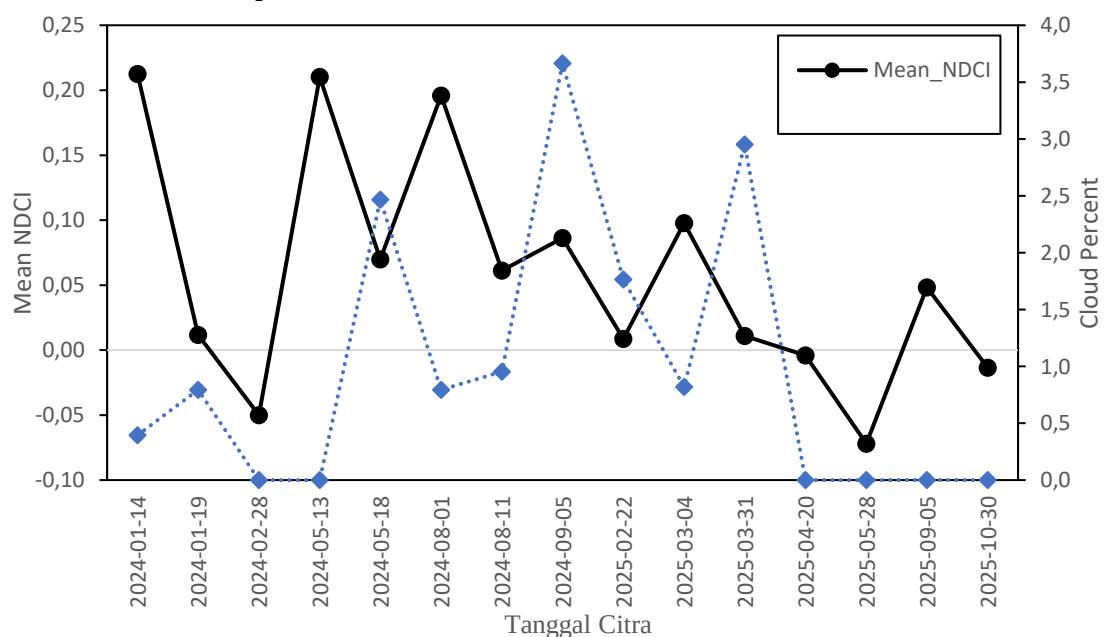
Penelitian ini memanfaatkan citra Sentinel-2 *Multispectral Instrument* (MSI) dengan dua tingkat produk untuk mengakomodasi kebutuhan analisis yang berbeda. Produk Sentinel-2 Level-2A (*surface reflectance*) digunakan untuk analisis indeks spektral dan variabilitas temporal menggunakan platform *Google Earth Engine* (GEE), sedangkan produk Sentinel-2 Level-1C (*top-of-atmosphere*) digunakan sebagai input estimasi parameter bio-optik menggunakan algoritma *Case-2 Regional CoastColour*

(C2RCC) pada perangkat lunak SNAP. Pendekatan ini memungkinkan pemisahan yang konsisten antara analisis indeks spektral multi-temporal dan estimasi bio-optik berbasis inversi spektral.

Pra-pemrosesan citra Level-2A di GEE meliputi pemotongan citra berdasarkan ROI, masking awan dan bayangan awan, penghilangan awan tipis (*haze removal*), serta penyaringan citra berdasarkan ambang batas persentase awan maksimum $\leq 5\%$ di dalam ROI. Nilai *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI) dihitung menggunakan kombinasi pita *red-edge* dan *red* Sentinel-2 (Mishra & Mishra, 2012), kemudian dirata-ratakan secara spasial di dalam ROI untuk setiap tanggal pengamatan sehingga membentuk deret waktu variabilitas temporal pada periode Januari 2024 hingga Desember 2025 (Altuntas et al., 2025). Berdasarkan deret waktu ini, dua kondisi ekstrem dipilih secara objektif, yaitu kondisi dengan nilai mean NDCI tertinggi (*HIGHEST*) dan terendah (*LOWEST*), yang selanjutnya diverifikasi secara visual menggunakan citra komposit RGB untuk memastikan kualitas radiometrik dan spasial. Estimasi distribusi spasial klorofil-a dan *Total Suspended Matter* (TSM) dilakukan dengan memproses citra Sentinel-2 Level-1C pada tanggal kondisi *HIGHEST* dan *LOWEST* menggunakan algoritma C2RCC di SNAP (Brockmann et al., 2016). Sebelum pemrosesan, citra dilakukan resampling ke resolusi spasial 20 m. Algoritma C2RCC diterapkan untuk melakukan koreksi atmosfer sekaligus inversi spektral berbasis jaringan saraf tiruan, sehingga memungkinkan pemisahan sinyal kolom air dari kontribusi atmosfer dan daratan. Hasil estimasi bio-optik kemudian dianalisis secara spasial dan dibandingkan dengan distribusi NDCI untuk mengevaluasi keterkaitan antara indeks spektral dan parameter bio-optik pada perairan pesisir Parepare.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Variabilitas Temporal NDCI



Gambar 2. Variabilitas Temporal Mean NDCI di Perairan Pesisir Parepare Periode 2024–2025

Variabilitas temporal klorofil-a secara relatif dianalisis menggunakan NDCI yang dihitung dari citra Sentinel-2 pada periode Januari 2024 hingga Desember 2025. Nilai NDCI dihitung sebagai nilai rata-rata spasial (*mean*) di dalam batas perairan pesisir Kota Parepare (ROI). Tanggal-tanggal pengamatan merupakan tanggal citra Sentinel-2 yang lolos tahapan pemfilteran kualitas data di *Google Earth Engine*, sehingga deret waktu yang disajikan bersifat diskret dan tidak berjarak waktu seragam (Gambar 2).

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai mean NDCI mengalami fluktuasi temporal yang nyata dengan rentang nilai sekitar -0,07 hingga 0,21. Nilai tertinggi tercatat pada 14 Januari 2024, sedangkan nilai terendah terjadi pada 28 Mei 2025. Variasi ini mencerminkan perubahan kondisi optik perairan antar waktu pengamatan yang berbeda.

Secara umum, nilai NDCI pada tahun 2024 memperlihatkan variasi yang lebih besar dibandingkan tahun 2025, yang cenderung menunjukkan nilai lebih rendah dan mendekati nol. Persentase awan pada seluruh citra yang dianalisis berada di bawah ambang batas kualitas yang ditetapkan, sehingga variasi NDCI yang teramati dapat dianggap merepresentasikan kondisi perairan secara relatif. Variabilitas temporal ini selanjutnya digunakan sebagai dasar seleksi kondisi ekstrem *HIGHEST* dan *LOWEST*.

2. Seleksi Kondisi *HIGHEST* dan *LOWEST*

Seleksi kondisi *HIGHEST* dan *LOWEST* dilakukan untuk memperoleh dua kondisi perairan yang merepresentasikan variasi ekstrem klorofil-a secara relatif berdasarkan nilai mean NDCI. Pemilihan ini didasarkan pada hasil analisis variabilitas temporal NDCI (Subbab 3.1), sehingga bersifat objektif dan berbasis data. Seluruh citra Sentinel-2 yang dianalisis terlebih dahulu melewati tahapan pemfilteran kualitas di GEE, meliputi pembatasan wilayah perairan pesisir, masking awan dan bayangan awan, penghilangan awan tipis (*haze*), serta penerapan ambang batas persentase awan maksimum di dalam ROI (Kwong et al., 2022; Makarau et al., 2014). Setelah proses ini, nilai mean NDCI dihitung sebagai rata-rata spasial dalam batas ROI pada setiap tanggal pengamatan.

Berdasarkan hasil pemrosesan tersebut, kondisi *HIGHEST* ditentukan sebagai citra dengan nilai mean NDCI tertinggi, sedangkan kondisi *LOWEST* ditentukan sebagai citra dengan nilai mean NDCI terendah. Selain nilai indeks, persentase awan di dalam wilayah kajian (*cloud percent ROI*) menjadi parameter krusial untuk memastikan citra terpilih memiliki kualitas radiometrik yang memadai. Hasil verifikasi visual melalui citra RGB menunjukkan efektivitas algoritma pembatasan awan yang bekerja sangat baik pada wilayah kajian. Sebagaimana terlihat pada Gambar 3, citra pada kondisi *HIGHEST* (14 Januari 2024) secara utuh sebenarnya memiliki cakupan awan yang sangat luas dan tebal di wilayah daratan serta sebagian laut lepas sisi selatan dan barat. Namun, melalui pemfilteran berbasis cloud in ROI, area perairan pesisir yang menjadi fokus penelitian tetap terpantau bersih dari gangguan atmosfer. Hal ini membuktikan bahwa pemilihan data berbasis ambang batas awan di dalam poligon perairan mampu mengisolasi data berkualitas tinggi meskipun kondisi meteorologi regional sedang berawan.

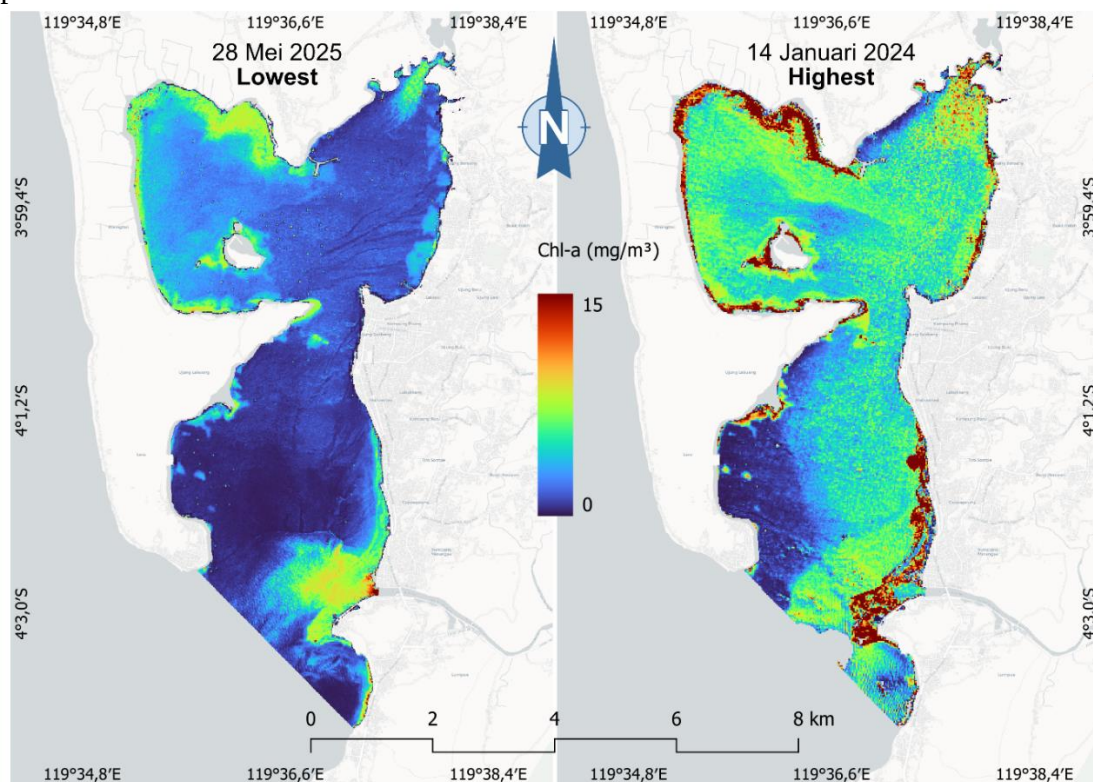
Secara kuantitatif, kondisi *HIGHEST* terjadi pada 14 Januari 2024 dengan nilai mean NDCI sebesar 0,2126 dan persentase awan di dalam ROI hanya sebesar

0,39%. Sebaliknya, kondisi *LOWEST* terjadi pada 28 Mei 2025 dengan nilai mean NDCI sebesar -0,0719 dan persentase awan sebesar 0%. Nilai persentase awan yang sangat rendah pada kedua tanggal ekstrem ini memastikan bahwa perbedaan nilai NDCI yang diamati murni mencerminkan perubahan konstituen bio-optik perairan, bukan akibat gangguan atmosfer.

3. Distribusi Spasial Klorofil-a (C2RCC)

Distribusi spasial klorofil-a di perairan pesisir Kota Parepare dianalisis menggunakan produk konsentrasi klorofil-a (*conc_chl*) hasil algoritma *Case-2 Regional CoastColour* (C2RCC) pada dua kondisi ekstrem, yaitu *HIGHEST* dan *LOWEST*, yang telah diseleksi berdasarkan nilai mean NDCI. Peta distribusi klorofil-a disajikan untuk memungkinkan perbandingan langsung antar kondisi ekstrem (Gambar 4).

Pada kondisi *HIGHEST*, klorofil-a menunjukkan konsentrasi relatif lebih tinggi yang tersebar luas di perairan pesisir, terutama di wilayah teluk bagian dalam dan zona dekat pantai, dengan gradien pesisir–lepas yang lebih tajam. Sebaliknya, pada kondisi *LOWEST*, klorofil-a menunjukkan nilai yang lebih rendah dan relatif homogen di sebagian besar wilayah perairan, dengan peningkatan terbatas di area pesisir dan dekat muara.



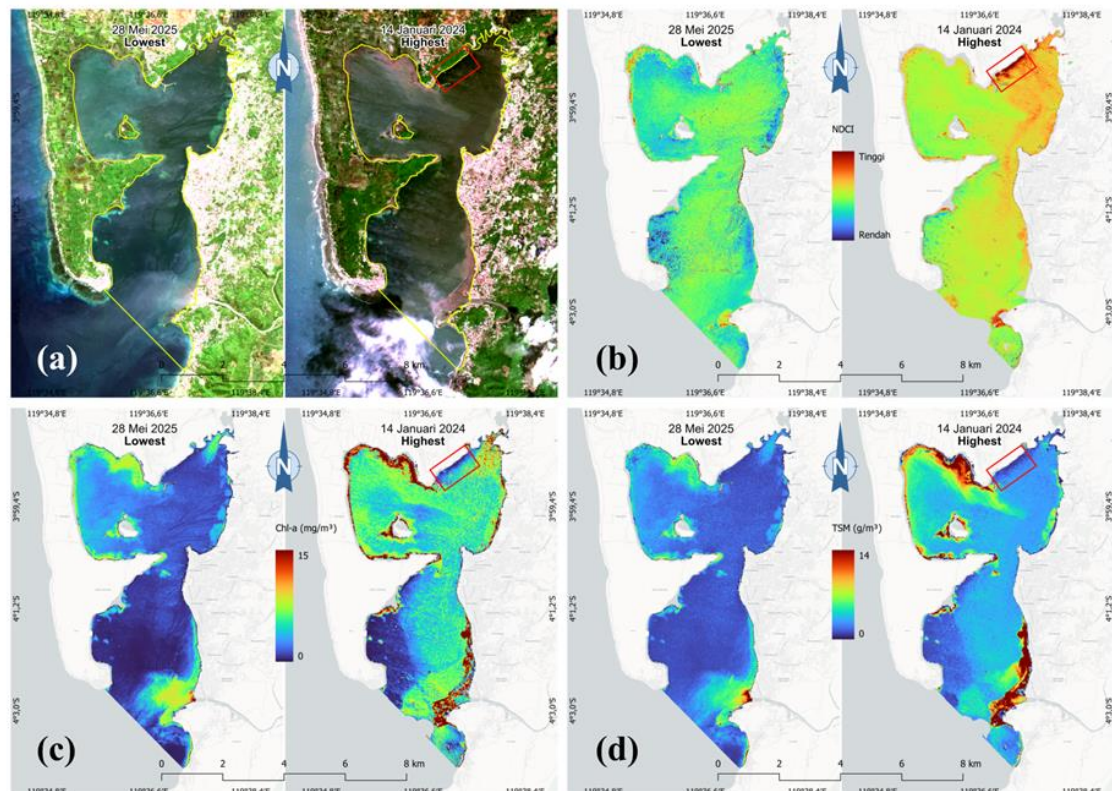
Gambar 4. Distribusi spasial klorofil-a (mg/m³)

Perbandingan kedua kondisi tersebut menunjukkan adanya kontras spasial yang jelas, yang konsisten dengan variasi nilai NDCI pada analisis temporal sebelumnya. Hasil ini menegaskan bahwa kondisi ekstrem yang diseleksi berdasarkan NDCI merepresentasikan perbedaan nyata dalam distribusi spasial klorofil-a hasil estimasi bio-optik, serta menjadi dasar untuk analisis perbandingan indeks spektral dan parameter bio-optik pada subbagian berikutnya.

4. Perbandingan NDCI, Klorofil-a, dan TSM

Analisis perbandingan distribusi spasial NDCI, konsentrasi klorofil-a, dan TSM dilakukan untuk mengevaluasi keterkaitan antara indeks spektral berbasis reflektansi dengan parameter bio-optik perairan pesisir Kota Parepare pada dua kondisi ekstrem, yaitu kondisi *HIGHEST* dan *LOWEST*.

Pada kondisi *HIGHEST* (14 Januari 2024), peta NDCI menunjukkan nilai tinggi yang tersebar luas di wilayah pesisir dan teluk bagian dalam. Pada sebagian besar area, pola ini sejalan dengan distribusi klorofil-a dan TSM hasil algoritma C2RCC, yang juga memperlihatkan nilai relatif tinggi terutama di sepanjang garis pantai dan di sekitar muara sungai. Visualisasi RGB pada tanggal yang sama memperlihatkan rona perairan keruh kehijauan hingga kecokelatan, yang mengindikasikan tingginya konsentrasi sedimen tersuspensi dan material terlarut (Morel & Prieur, 1977). Kondisi ini mencerminkan karakteristik perairan pesisir bertipe *Case-2 waters*, di mana masukan sedimen dan nutrisi dari daratan berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas primer dan kompleksitas optik perairan.



Gambar 4. Perbandingan Spasial Kondisi Perairan Ekstrem di Pesisir Parepare (a) RGB, (b) NDCI, (c) Chl-a, (d) TSM.

Namun demikian, pada kondisi *HIGHEST* juga teridentifikasi anomali optik di wilayah pesisir utara (ditandai dengan kotak merah pada Gambar 3.4). Pada area ini, nilai NDCI sangat tinggi, sementara estimasi klorofil-a dan TSM justru menunjukkan nilai yang rendah. Visualisasi RGB menunjukkan bahwa area tersebut merupakan zona transisi darat-laut dengan keberadaan vegetasi pesisir dan perairan dangkal, sehingga berpotensi menghasilkan piksel campuran (mixed pixels) antara air dan vegetasi. Pantulan kuat vegetasi pada pita red-edge Sentinel-

2 (Band 5) dapat meningkatkan nilai NDCI secara artifisial, meskipun secara bio-optik tidak terjadi peningkatan klorofil-a di dalam kolom air. Sebaliknya, algoritma C2RCC cenderung lebih selektif terhadap sinyal kolom air dan mampu mengurangi kontribusi sinyal non-air, sehingga menghasilkan estimasi klorofil-a dan TSM yang lebih rendah pada area tersebut.

Keterkaitan antara nilai tinggi klorofil-a dan TSM pada kondisi *HIGHEST* juga diperkuat oleh konsistensi spasial dengan citra RGB. Area dengan estimasi klorofil-a dan TSM relatif tinggi berasosiasi dengan rona perairan yang lebih keruh, terutama di sekitar muara sungai dan zona pesisir yang dipengaruhi limpasan daratan. Hal ini mengindikasikan bahwa masukan sedimen tersuspensi dari daratan tidak hanya meningkatkan kekeruhan perairan, tetapi juga membawa nutrisi yang mendukung pertumbuhan fitoplankton secara simultan.

Sebaliknya, pada kondisi *LOWEST* (28 Mei 2025), nilai NDCI cenderung rendah hingga negatif, sejalan dengan estimasi klorofil-a dan TSM yang juga mendekati nol di sebagian besar wilayah perairan. Visualisasi RGB pada kondisi ini menunjukkan rona perairan yang lebih biru dan homogen, mencerminkan kondisi perairan yang relatif jernih dengan masukan sedimen dan nutrisi yang minimal. Kesesuaian antara ketiga parameter ini menunjukkan bahwa respon NDCI pada kondisi *LOWEST* lebih merepresentasikan variasi klorofil-a dalam perairan dengan kompleksitas optik yang lebih sederhana.

Secara keseluruhan, hasil perbandingan ini menegaskan bahwa NDCI efektif digunakan sebagai indikator relatif variasi klorofil-a di perairan pesisir Kota Parepare, khususnya untuk membedakan kondisi ekstrem produktivitas perairan. Namun, keberadaan anomali pada kondisi *HIGHEST* menunjukkan bahwa interpretasi NDCI di wilayah pesisir harus mempertimbangkan pengaruh piksel campuran, reflektansi vegetasi, dan karakteristik optik perairan dangkal. Oleh karena itu, integrasi antara indeks spektral, estimasi bio-optik C2RCC, dan verifikasi visual melalui citra RGB menjadi pendekatan yang krusial dalam analisis kualitas perairan pesisir berbasis citra Sentinel-2.

KESIMPULAN

Perairan pesisir Kota Parepare menunjukkan dinamika kualitas perairan yang signifikan selama periode 2024–2025. Kondisi produktivitas primer relatif tertinggi terjadi pada 14 Januari 2024 dengan nilai mean NDCI sebesar 0,2126, sedangkan kondisi terendah tercatat pada 28 Mei 2025 dengan nilai mean NDCI sebesar -0,0719. Distribusi spasial klorofil-a hasil estimasi algoritma C2RCC menunjukkan bahwa perairan Parepare memiliki karakteristik *Case-2 water*, di mana peningkatan konsentrasi klorofil-a secara spasial berasosiasi dengan kenaikan *Total Suspended Matter* (TSM) akibat masukan material terestrial, terutama dari limpasan daratan dan muara sungai. Pemanfaatan *Google Earth Engine* dengan pembatasan awan berbasis wilayah kajian (ROI) terbukti efektif dalam mengekstraksi data perairan berkualitas tinggi, meskipun kondisi meteorologi regional didominasi oleh tutupan awan yang luas.

Hasil perbandingan antara indeks spektral dan parameter bio-optik menunjukkan bahwa NDCI dapat digunakan sebagai indikator relatif yang andal untuk memantau variabilitas klorofil-a di perairan pesisir Kota Parepare. Namun demikian, keberadaan anomali pada zona litoral mengindikasikan bahwa nilai

NDCI dapat meningkat secara artifisial akibat pengaruh piksel campuran antara air dan vegetasi pesisir. Dalam konteks ini, algoritma C2RCC yang diimplementasikan melalui perangkat lunak SNAP menunjukkan kinerja yang lebih unggul dalam memitigasi anomali tersebut, sehingga menghasilkan estimasi klorofil-a dan TSM yang lebih representatif terhadap kondisi kolom air. Oleh karena itu, integrasi antara indeks spektral NDCI dan estimasi bio-optik C2RCC sangat direkomendasikan sebagai pendekatan yang komprehensif untuk pemantauan kualitas perairan pesisir dengan kompleksitas optik tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Altuntas, O. Y., Saygi, M., & Colkesen, I. (2025). Long-Term Monitoring of Coastal Water Quality Using Sentinel-2 Satellite Images and Google Earth Engine: The Case Study Izmir and Erdek Bays. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48(M-6-2025), 37–43. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-6-2025-37-2025>
- Blondeau-Patissier, D., Gower, J. F. R., Dekker, A. G., Phinn, S. R., & Brando, V. E. (2014). A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. *Progress in Oceanography*, 123, 123–144. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.12.008>
- 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. *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, SP-740*.
- Caballero, I., Roca, M., Santos-echeandía, J., Bernárdez, P., & Navarro, G. (2022). Use of the Sentinel-2 and Landsat-8 Satellites for Water Quality Monitoring: An Early Warning Tool in the Mar Menor Coastal Lagoon. *Remote Sensing*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/rs14122744>
- García-Nieto, P. J., García-Gonzalo, E., Alonso Fernández, J. R., & Díaz Muñoz, C. (2024). Forecast of chlorophyll-a concentration as an indicator of phytoplankton biomass in El Val reservoir by utilizing various machine learning techniques: A case study in Ebro river basin, Spain. *Journal of Hydrology*, 639(April). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131639>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- IOCCG. (2000). Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal , and Other Optically-Complex , Waters. In *Reports and Monographs of the International OceanColour Coordinating Group* (Vol. 3). <http://www.vliz.be/imis/imis.php?module=ref&refid=134621&request=147862>
- Kwong, I. H. Y., Wong, F. K. K., & Fung, T. (2022). Automatic Mapping and Monitoring of Marine Water Quality Parameters in Hong Kong Using Sentinel-2 Image Time-Series and Google Earth Engine Cloud Computing.



- Frontiers in Marine Science*, 9(May), 1–18.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.871470>
- Li, J., Matsuoka, A., Pang, X., Massicotte, P., & Babin, M. (2024). Performance of Algorithms for Retrieving Chlorophyll a Concentrations in the Arctic Ocean: Impact on Primary Production Estimates. *Remote Sensing*, 16(5).
<https://doi.org/10.3390/rs16050892>
- Makarau, A., Richter, R., Muller, R., & Reinartz, P. (2014). Haze detection and removal in remotely sensed multispectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9), 5895–5905.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2293662>
- Manuel, A., & Blanco, A. C. (2023). Transformation of the Normalized Difference Chlorophyll Index To Retrieve Chlorophyll-a Concentrations in Manila Bay. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48(4/W6-2022), 217–221.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W6-2022-217-2023>
- Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
- Morel, A., & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22(4), 709–722.
<https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- Tran, M. D., Vantrepotte, V., Loisel, H., Oliveira, E. N., Tran, K. T., Jorge, D., Mériaux, X., & Paranhos, R. (2023). Band Ratios Combination for Estimating Chlorophyll-a from Sentinel-2 and Sentinel-3 in Coastal Waters. *Remote Sensing*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/rs15061653>
- Zhang, K., Zhao, X., Xue, J., Mo, D., Zhang, D., Xiao, Z., Yang, W., Wu, Y., & Chen, Y. (2023). The temporal and spatial variation of chlorophyll a concentration in the China Seas and its impact on marine fisheries. *Frontiers in Marine Science*, 10(August), 1–19.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1212992>