

# Variabilitas Spasial Klorofil-a Gradien Pesisir–Lepas Pantai Perairan Kota Langsa

Teuku Muhammad Faisal<sup>1\*</sup>, Tri Muji Susantoro<sup>2</sup>, Riza Yuliratno Setiawan<sup>3</sup>, Andika Putriningtias<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Ilmu Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Samudra  
Jl. Prof. dr. Syarief Thayeb, Meurandeh, Kec. Langsa Lama, Kota Langsa, Aceh

<sup>2</sup>Pusat Riset Geoinformatika, Badan Riset dan Inovasi Nasional  
Kawasan Sains Soekarno, Cibinong, Bogor, Jawa Barat

<sup>3</sup>Departemen Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada  
Gedung A4, Jl. Flora, Bulaksumur, Yogyakarta, 55281  
Email: teukumuhammadfaisal@unsam.ac.id

## Abstrak

Perairan Kota Langsa merupakan sistem pesisir tropis yang dipengaruhi masukan daratan, dinamika estuarin, dan konektivitas dengan Selat Malaka, sehingga distribusi klorofil-a berpotensi membentuk gradien yang jelas dari pesisir ke lepas pantai. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pola spasial–temporal klorofil-a di perairan Kota Langsa selama 2025 dengan menekankan gradien pesisir–lepas pantai dan perbedaan antar musim. Data diperoleh dari produk Level-2 Sentinel-3 OLCI berbasis jaringan saraf tiruan (CHL\_NN) dan dianalisis melalui komposit median bulanan dengan ambang minimal lima hari observasi valid per piksel. Analisis statistik dilakukan menggunakan uji Kruskal–Wallis untuk menguji perbedaan keseluruhan antar kelompok, dilanjutkan dengan uji Dunn untuk mengidentifikasi pasangan kelompok yang berbeda signifikan. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi klorofil-a membentuk gradien yang jelas, dengan nilai tertinggi pada zona 0–5 km dan menurun bertahap hingga zona 15–20 km. Zona pesisir relatif lebih stabil dibanding zona transisi dan lepas pantai. Perbedaan antar musim tidak menunjukkan pola yang kuat. Temuan ini menegaskan bahwa distribusi klorofil-a di Langsa lebih ditentukan oleh gradien spasial pesisir–lepas pantai daripada oleh pembagian musim, serta memperkuat penggunaan zonasi jarak dan kontrol representativitas temporal sebagai kerangka analisis produktivitas primer pesisir tropis berbasis satelit.

**Kata kunci:** CHL\_NN, gradien pesisir–lepas pantai, klorofil-a, Langsa, Sentinel-3 OLCI

## Abstract

### *Spatial Variability of Chlorophyll-a Along the Coastal–Offshore Gradient in the Waters of Langsa City*

*The waters of Langsa City represent a tropical coastal system influenced by terrestrial inputs, estuarine dynamics, and connectivity with the Malacca Strait, creating the potential for a distinct coastal-to-offshore chlorophyll-a gradient. This study evaluated the spatial–temporal pattern of chlorophyll-a in Langsa waters throughout 2025, with particular emphasis on the coastal–offshore gradient and seasonal variation. Data were derived from the neural network-based Sentinel-3 OLCI Level-2 product (CHL\_NN) and analyzed using monthly median composites with a minimum threshold of five valid observation days per pixel. Statistical analysis employed the Kruskal–Wallis test to assess overall differences among groups, followed by Dunn’s post hoc test to identify significantly different pairs. The results revealed a clear spatial gradient, with the highest chlorophyll-a concentrations in the 0–5 km zone and a gradual decline toward the 15–20 km zone. The coastal zone was also relatively more stable than the transitional and offshore zones, whereas seasonal differences showed no strong pattern. These findings indicate that chlorophyll-a distribution in Langsa is governed more by the coastal–offshore spatial gradient than by seasonal variability, and support the use of distance-based zonation and temporal representativeness criteria as a standardized framework for satellite-based assessment of primary productivity in tropical coastal waters.*

**Keywords:** CHL\_NN, chlorophyll-a, coastal–offshore gradient, Langsa, Sentinel-3 OLCI

## PENDAHULUAN

Klorofil-a merupakan indikator utama biomassa fitoplankton dan produktivitas primer laut tropis, yang menentukan transfer energi menuju tingkat trofik lebih tinggi termasuk sumber daya perikanan (Falkowski *et al.*, 1998). Di wilayah tropis, konsentrasinya dikendalikan oleh interaksi stratifikasi kolom air, suplai nutrisi, serta variabilitas oseanografi yang muncul sebagai respons terhadap perubahan kondisi meteorologis dan dinamika hidrodinamika (Shi *et al.*, 2025). Karena itu, dinamika klorofil-a merefleksikan respons ekosistem terhadap kontrol fisik sekaligus tingkat kesuburan perairan, sehingga pemantauan spasial-temporal menjadi esensial dalam analisis sistem laut tropis. Namun, estimasi klorofil-a di perairan pesisir tropis menghadapi kompleksitas optik yang lebih tinggi dibanding laut lepas. Perairan optik kompleks tipe-2 dipengaruhi tidak hanya oleh fitoplankton, tetapi juga sedimen tersuspensi, CDOM, dan detritus yang memodifikasi reflektansi spektral (Wu *et al.*, 2025), sehingga hubungan antara sinyal spektral dan konsentrasi klorofil-a menjadi non-linear. Dalam kondisi ini, algoritma rasio biru-hijau yang dikembangkan untuk perairan oligotrofik dapat menghasilkan bias ketika diterapkan pada perairan keruh (Harshada *et al.*, 2021), sehingga diperlukan pendekatan yang mampu memisahkan kontribusi komponen absorpsi secara lebih eksplisit (Liu *et al.*, 2020).

Keterbatasan tersebut mendorong pengembangan algoritma berbasis inversi spektral penuh dan jaringan saraf tiruan (*neural network*) untuk perairan optik kompleks tipe-2, yang diimplementasikan melalui C2R pada MERIS (Doerffer & Schiller, 2007) dan dikembangkan menjadi C2RCC untuk Sentinel-2 dan Sentinel-3 OLCI (Brockmann *et al.*, 2016). Produk klorofil Sentinel-3 berbasis *neural network* (CHL\_NN) menggunakan pendekatan inversi penuh untuk memisahkan pigmen *fitoplankton* dari komponen optik lain, sehingga lebih adaptif terhadap perairan pesisir yang kompleks. Seiring perkembangan metode komputasi, pendekatan berbasis pembelajaran mesin dan inversi spektral penuh terbukti meningkatkan akurasi estimasi klorofil-a dibanding algoritma rasio biru-hijau konvensional, khususnya pada perairan pesisir dan perairan dengan

kandungan CDM tinggi (Pahlevan *et al.*, 2020, 2021; Li *et al.*, 2025). Dalam konteks pesisir tropis yang dipengaruhi masukan daratan dan heterogenitas optik tinggi, penggunaan CHL\_NN menjadi krusial untuk memperoleh estimasi klorofil-a yang lebih representatif dan konsisten secara spasial-temporal.

Karakteristik tersebut relevan pada sistem pesisir dengan interaksi darat-laut yang intens. Perairan Kota Langsa merupakan sistem pesisir tropis yang dipengaruhi dinamika estuarin dengan masukan air tawar, sedimen, dan nutrisi ke Selat Malaka. Sistem dengan suplai terrigenous kuat menunjukkan variabilitas tinggi klorofil-a dan materi tersuspensi akibat limpasan serta pencampuran (Chowdhury *et al.*, 2024), sementara teluk dangkal berfungsi sebagai reservoir sedimen dan nutrisi yang aktif secara biogeokimia sehingga meningkatkan kekeruhan dan kompleksitas optik (Gubri *et al.*, 2025). Kompleksitas tersebut memicu heterogenitas spasial kualitas air dan distribusi klorofil-a (Wu *et al.*, 2025), sekaligus meningkatkan risiko bias pada estimasi berbasis algoritma konvensional. Secara oseanografis, sistem ini juga sensitif terhadap variabilitas monsun, sirkulasi regional, dan stratifikasi kolom air; angin dan curah hujan memodulasi distribusi nutrisi dan biomassa fitoplankton (Karnan & Gautham, 2024), sementara siklon tropis dapat meningkatkan pencampuran dan suplai nutrisi yang memicu respons klorofil-a (Shi *et al.*, 2025).

Dinamika pesisir-estuari menghasilkan gradien spasial yang jelas dari zona pesisir menuju perairan terbuka. Pada sistem estuarin dan teluk dangkal, konsentrasi sedimen dan nutrisi cenderung menurun ke arah lepas pantai (*offshore*) (Chowdhury *et al.*, 2024), sementara teluk pesisir dangkal dapat memperkuat heterogenitas horizontal melalui perannya sebagai reservoir sedimen dan nutrisi yang aktif secara biogeokimia (Gubri *et al.*, 2025). Dalam perairan pesisir yang heterogen dan optik kompleks, agregasi spasial tanpa stratifikasi berisiko menggabungkan wilayah dengan karakter fisik-biogeokimia berbeda ke dalam satu nilai komposit (Wu *et al.*, 2025), padahal pendekatan yang mempertimbangkan variasi spasial terbukti meningkatkan konsistensi estimasi klorofil pada perairan optik kompleks (Holbach *et al.*, 2025). Oleh karena itu, penelitian ini mengoperasionalkan

gradien pesisir–lepas pantai sebagai interval jarak tetap (0–5 km, 5–10 km, 10–15 km, dan 15–20 km) sehingga jarak dari garis pantai berfungsi sebagai variabel spasial terkontrol. Dalam kerangka ini, zona 0–5 km merepresentasikan wilayah pesisir yang paling kuat dipengaruhi input *terrigenous*, zona 5–15 km mencerminkan wilayah transisi dengan gradien pencampuran massa air yang kuat, sedangkan zona 15–20 km merepresentasikan kondisi perairan dengan pengaruh daratan yang semakin lemah.

Pemilihan interval ini didasarkan pada karakteristik sistem estuarin–pesisir, di mana pengaruh daratan membentuk gradien lingkungan yang nyata dari pesisir menuju perairan yang lebih terbuka, ditandai oleh perubahan kondisi fisik, kimia, dan bio–optik sepanjang transek pesisir–laut terbuka (Lucas *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2025). Dalam konteks tersebut, zonasi berbasis jarak digunakan sebagai pendekatan operasional untuk merepresentasikan transisi bertahap antar sistem sekaligus menjaga keterbandingan spasial melalui interval yang seragam, sebagaimana diterapkan pada studi berbasis transek estuari–pesisir (Turner *et al.*, 2019). Selain itu, komposit bulanan *ocean colour* umumnya dibangun melalui agregasi *pixel-wise* (pada tingkat piksel) tanpa pengendalian eksplisit terhadap jumlah observasi valid minimum per piksel, sehingga representativitas temporal antar zona dapat menjadi tidak seragam. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini menerapkan ambang minimal lima hari observasi valid per piksel (*minimum five valid observation days per pixel*) sebelum pembentukan komposit median bulanan. Pendekatan ini memungkinkan perbandingan antar zona dilakukan pada komposit yang lebih *robust* (tahan terhadap nilai ekstrem) dan lebih terkontrol secara inferensial.

Meskipun analisis distribusi klorofil-a berbasis citra satelit pada gradien pesisir–lepas pantai telah banyak diterapkan di berbagai wilayah, studi ini menempatkan gradien tersebut bukan sekadar sebagai konteks geografis, melainkan sebagai unit analisis inferensial yang terstruktur. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi dua komponen metodologis dalam satu kerangka analitis, yaitu stratifikasi spasial berbasis interval jarak tetap (0–5 km, 5–10 km, 10–15 km, dan 15–20 km) serta pengendalian representativitas temporal melalui ambang lima hari valid per piksel sebelum pembentukan komposit median bulanan. Dengan

pendekatan ini, diferensiasi klorofil-a antar zona tidak hanya disajikan secara deskriptif, tetapi diuji secara statistik pada komposit yang memiliki keterbandingan temporal lebih terkontrol. Dalam konteks perairan pesisir tropis optik kompleks di Kota Langsa, kerangka ini menghasilkan evaluasi spasial–temporal yang lebih inferensial, terstandar, dan replikabel.

## MATERI DAN METODE

Penelitian ini menganalisis distribusi klorofil-a di perairan Kota Langsa selama Januari–Desember 2025 untuk mengevaluasi dinamika produktivitas primer pada gradien pesisir–lepas pantai. Pengambilan dan pengolahan data satelit dilakukan pada Januari 2026 menggunakan platform komputasi awan Google Colab. Wilayah studi dibagi menjadi empat zona berbasis jarak dari garis pantai, yaitu 0–5 km, 5–10 km, 10–15 km, dan 15–20 km, guna merepresentasikan gradien pengaruh daratan terhadap dinamika produktivitas primer. Seluruh data spasial diproses dalam sistem referensi koordinat metrik *Web Mercator* (EPSG:3857) untuk menjaga konsistensi resolusi piksel dan kesesuaian antar raster komposit bulanan. Batas zonasi diperoleh dari *shapefile* yang telah diverifikasi dan direproyeksikan sehingga memungkinkan evaluasi komparatif antar jarak secara kuantitatif dalam kerangka spasial yang seragam sepanjang periode observasi.

Data utama penelitian berasal dari sensor *Ocean and Land Colour Instrument* (OLCI) pada satelit Sentinel-3 yang menyediakan estimasi klorofil-a berbasis algoritma *neural network* (CHL\_NN). Produk CHL\_NN dipilih karena dirancang untuk perairan optik kompleks tipe-2 (*case-2 waters*), sehingga lebih sesuai untuk analisis komparatif spasial pada sistem pesisir dibanding algoritma rasio spektral konvensional. Produk Level-2 digunakan karena telah melalui kalibrasi radiometrik dan koreksi atmosfer sehingga menghasilkan parameter bio–optik turunan, termasuk *water-leaving reflectance* (reflektansi yang meninggalkan kolom air) atau *remote sensing reflectance / Rrs* (reflektansi penginderaan jauh) yang menjadi dasar estimasi klorofil-a (Doerffer, 2010). Sensor OLCI banyak dimanfaatkan dalam estimasi klorofil-a pada perairan pesisir dan perairan optik kompleks melalui pendekatan *machine*

*learning* (pembelajaran mesin) (Pahlevan *et al.*, 2020) maupun algoritma spektral untuk perairan optik kompleks tipe-2 (Liu *et al.*, 2020). Sensor ini memiliki resolusi spasial 300 m dengan frekuensi observasi harian. Produk CHL\_NN Level-2 disajikan dalam bentuk logaritmik sehingga dilakukan transformasi balik untuk memperoleh satuan  $\text{mg}/\text{m}^3$  yang lebih interpretatif secara ekologis.

Analisis dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python pada platform komputasi berbasis *cloud* (komputasi awan) Google Colab. Pengolahan raster dilakukan dengan pustaka Rasterio, pengelolaan data tabular menggunakan Pandas, pengujian statistik non-parametrik menggunakan SciPy, dan analisis uji lanjut (*post-hoc*) menggunakan scikit-posthocs, sementara QGIS 3.44.6 Solothurn digunakan untuk validasi spasial dan penyusunan peta tematik. Data raster harian diunduh, dipotong berdasarkan zona studi, dan apabila terdiri dari beberapa *tile* dilakukan *mosaicking* untuk menghasilkan layer kontinu. Nilai klorofil-a dalam bentuk logaritmik dikonversi kembali ke skala linear ( $\text{Chl} = 10^x$ ) sebelum dihitung median dan rerata piksel valid per zona. Median diprioritaskan karena lebih robust terhadap nilai ekstrem dan distribusi tidak simetris.

Komposit bulanan dibentuk dengan pendekatan median secara *pixel-wise* dari seluruh observasi harian yang valid. Pendekatan komposit median digunakan untuk mengurangi pengaruh nilai pencilan dan fluktuasi ekstrem dalam data observasi satelit, termasuk ledakan fitoplankton (*bloom*) yang terjadi secara episodik. Untuk menjamin kualitas data, diterapkan ambang lima hari valid per piksel, sehingga piksel yang tidak memenuhi kriteria dieliminasi guna meminimalkan bias akibat cakupan awan dan variabilitas atmosfer (Harshada *et al.*, 2021). Pemilihan ambang ini didasarkan pada pertimbangan metodologis bahwa median bulanan yang dibentuk dari jumlah observasi terlalu sedikit berisiko kurang merepresentasikan kondisi bulanan, sedangkan ambang yang terlalu ketat dapat mengurangi cakupan spasial secara berlebihan. Dalam produk komposit satelit, jumlah observasi yang mendasari tiap piksel dapat bervariasi akibat proses *quality control* (kendali mutu) dan *masking* (pemaskaan) data, sehingga informasi jumlah

observasi valid menjadi penting untuk menilai reliabilitas hasil agregasi temporal. Dengan demikian, ambang lima hari valid per piksel digunakan dalam penelitian ini sebagai kompromi operasional antara representativitas temporal dan ketersediaan data, sehingga komposit antar zona tetap lebih robust dan layak dibandingkan secara inferensial. Anomali bulanan diidentifikasi menggunakan metode *interquartile range* (IQR), dengan nilai di atas  $Q3 + 1,5 \times \text{IQR}$  dikategorikan sebagai *outlier* (Yang *et al.*, 2019). Perbedaan antar zona dan musim diuji menggunakan uji Kruskal–Wallis (Kruskal & Wallis, 1952) dan uji lanjut Dunn dengan koreksi Bonferroni (Dunn, 1961; Agbangba *et al.*, 2024).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Cakupan observasi Sentinel-3 OLCI sepanjang tahun 2025 (Tabel 1) menunjukkan bahwa penerapan ambang lima hari valid per piksel per bulan secara langsung memengaruhi ketersediaan komposit bulanan, terutama pada zona lepas pantai yang lebih rentan terhadap kehilangan data akibat tutupan awan, *quality flags* (penanda kualitas) atmosfer, serta kompleksitas optik perairan. Pada November 2025, tidak terdapat piksel yang memenuhi ambang minimal lima hari observasi valid per piksel, sehingga komposit bulanan tidak tersedia untuk bulan tersebut. Kondisi ini tidak merepresentasikan penurunan produktivitas biologis, melainkan keterbatasan jumlah observasi efektif dalam periode tersebut akibat penyaringan kualitas data. Oleh karena itu, interpretasi dinamika temporal klorofil-a perlu selalu dikaitkan dengan informasi jumlah hari valid sebagai indikator reliabilitas dan representativitas komposit bulanan.

Persentase piksel yang memenuhi kriteria ambang lima hari valid per piksel (Tabel 2) menunjukkan bahwa pada Januari–September dan Desember, cakupan piksel valid pada zona 5–10 km dan 10–15 km sebagian besar berada pada kisaran 90–99%, sedangkan zona 15–20 km berada pada kisaran 70–100% dan beberapa kali mencapai 100%. Pada periode yang sama, zona 0–5 km lebih berfluktuasi, dari 49% pada Maret hingga 93% pada Juli. Penurunan paling jelas terjadi pada Oktober di seluruh zona, yaitu 8%, 19%, 32%, dan 63% berturut-turut pada zona 0–5 km, 5–10 km, 10–15

km, dan 15–20 km. Pada November 2025, tidak terdapat piksel yang memenuhi ambang minimal lima hari observasi valid per piksel, sehingga komposit bulanan tidak disajikan untuk bulan tersebut.

Deret waktu median bulanan klorofil-a tahun 2025 (Gambar 1) menegaskan konsistensi gradien spasial pesisir–lepas pantai sepanjang periode pengamatan. Zona 0–5 km secara stabil

mempertahankan konsentrasi tertinggi dengan fluktuasi relatif sempit, sedangkan zona 15–20 km menunjukkan nilai terendah dengan rentang perubahan bulanan yang kecil pada sebagian besar bulan. Zona 5–10 km dan 10–15 km memperlihatkan variasi antarbulan yang lebih besar, terutama pada awal dan akhir tahun. Secara umum, terjadi penurunan konsentrasi pada April–Juni dan peningkatan

**Tabel 1.** Rata-rata jumlah hari observasi valid per piksel per bulan dan zona jarak pantai di perairan Kota Langsa, 2025.

Bulan	0–5 km (hari)	5–10 km (hari)	10–15 km (hari)	15–20 km (hari)
Januari	5,91	6,04	6,06	5,89
Februari	6,86	8,72	7,62	7,93
Maret	5,80	5,81	6,34	7,06
April	7,32	8,03	7,05	5,80
Mei	7,75	6,54	6,61	7,47
Juni	7,69	8,33	8,86	10,12
Juli	12,76	14,67	15,13	15,10
Agustus	8,57	9,79	9,63	9,11
September	7,66	7,70	7,96	7,41
Oktober	5,35	5,20	5,18	5,42
November	-	-	-	-
Desember	8,10	7,79	7,85	7,49

**Tabel 2.** Persentase piksel yang memenuhi kriteria ambang minimal lima hari observasi valid per piksel per bulan dan zona jarak pantai di perairan Kota Langsa, 2025.

Bulan	0–5 km (%)	5–10 km (%)	10–15 km (%)	15–20 km (%)
Januari	86	94	92	92
Februari	74	99	99	100
Maret	49	90	95	100
April	87	99	95	70
Mei	91	99	99	100
Juni	90	99	99	100
Juli	93	99	99	100
Agustus	91	99	99	100
September	87	99	99	100
Oktober	8	19	32	63
November	-	-	-	-
Desember	91	99	99	80

kembali menjelang Desember di seluruh zona. Meskipun besarnya fluktuasi temporal berbeda antar zona, urutan hierarkis konsentrasi tetap konsisten dari pesisir menuju lepas pantai.

Peta tematik distribusi klorofil-a berbasis Sentinel-3 OLCI CHL\_NN (Gambar 2) menampilkan sebaran konsentrasi dalam satuan mg/m<sup>3</sup> berdasarkan piksel yang memenuhi kriteria minimal lima hari observasi valid per bulan selama tahun 2025, kecuali November yang tidak memiliki piksel lolos ambang. Visualisasi menggunakan gradasi warna dari ungu hingga kuning untuk merepresentasikan konsentrasi rendah hingga tinggi. Batas administratif Kota Langsa dan zonasi jarak pesisir-lepas pantai 0–5 km, 5–10 km, 10–15 km, dan 15–20 km ditampilkan sebagai acuan spasial. Dengan penyajian tersebut, peta memudahkan

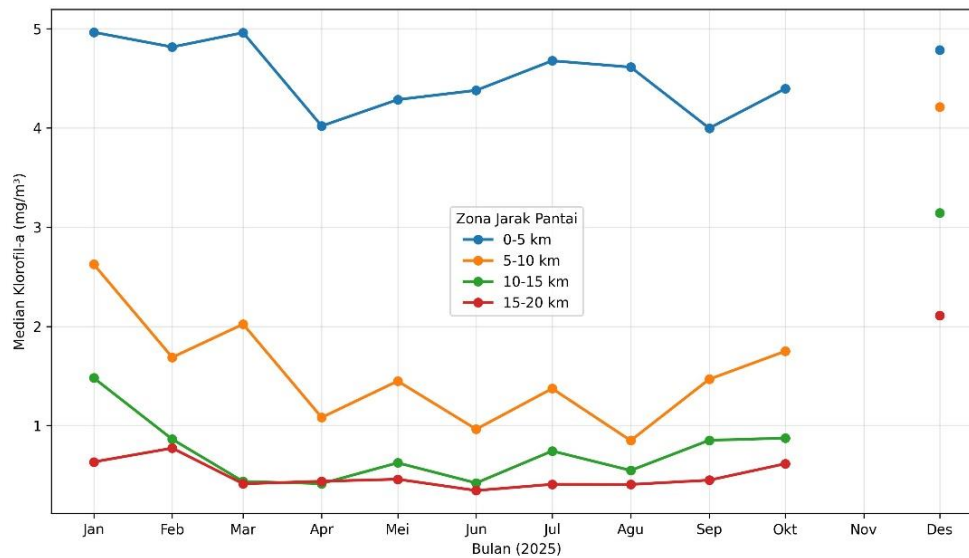
identifikasi gradien konsentrasi klorofil-a dari wilayah pesisir menuju perairan yang lebih lepas secara konsisten antarbulan.

Gradien konsentrasi klorofil-a tahunan (Tabel 3) yang menunjukkan median >4 mg/m<sup>3</sup> pada zona 0–5 km dan menurun hingga <1 mg/m<sup>3</sup> pada zona 15–20 km merepresentasikan struktur spasial khas sistem pesisir-laut lepas.

Koefisien variasi (CV) pada Tabel 3 menunjukkan perbedaan tingkat variabilitas konsentrasi klorofil-a antar zona pesisir-lepas pantai. Nilai CV terendah ditemukan pada zona 0–5 km (7,62%), meningkat pada 5–10 km (53,84%), mencapai maksimum pada 10–15 km (83,66%), dan sedikit menurun pada 15–20 km (78,44%). Pola ini menunjukkan bahwa zona pesisir relatif lebih stabil dibanding zona transisi dan lepas pantai.

**Tabel 3.** Statistik tahunan klorofil-a per zona jarak pantai di perairan Kota Langsa, 2025.

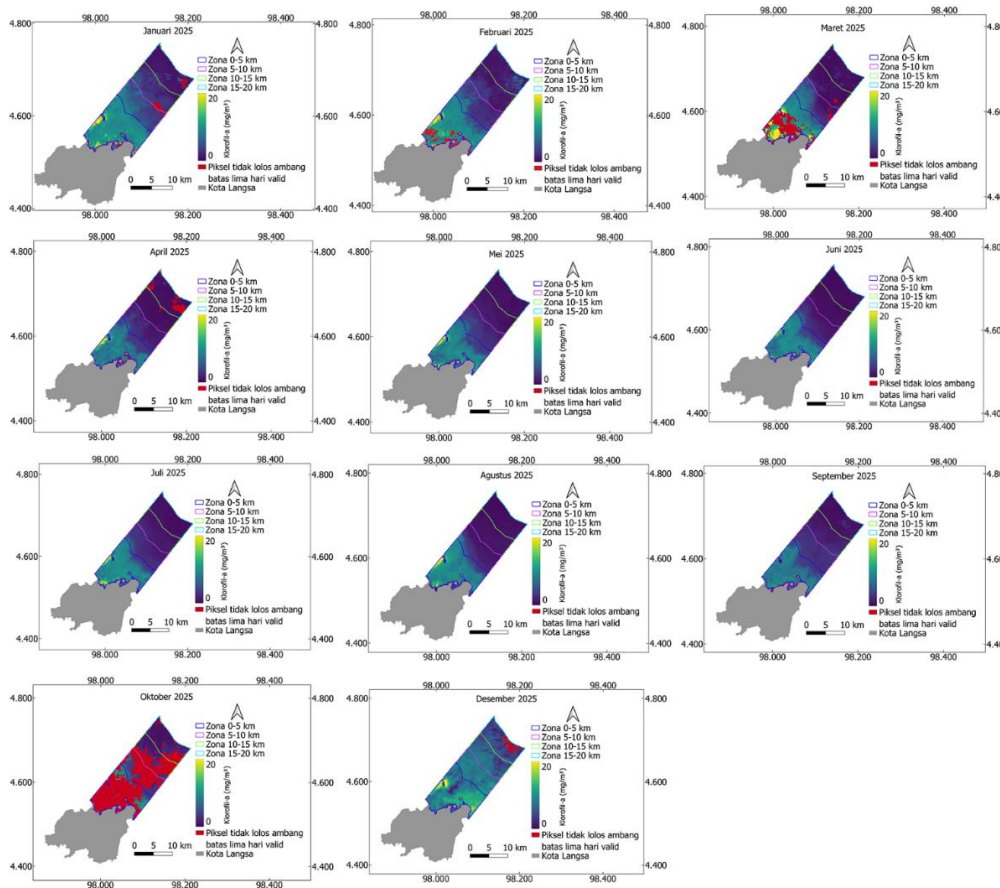
Zona (km)	Jumlah bulan valid	Median tahunan (mg/m <sup>3</sup> )	Mean tahunan (mg/m <sup>3</sup> )	Standar deviasi tahunan	Nilai minimum bulanan (mg/m <sup>3</sup> )	Nilai maksimum bulanan (mg/m <sup>3</sup> )	Koefisien variasi (CV) (%)
0–5	11	4,613	4,536	0,346	3,997	4,964	7,620
5–10	11	1,467	1,771	0,953	0,849	4,212	53,840
10–15	11	0,744	0,946	0,791	0,416	3,145	83,660
15–20	11	0,450	0,641	0,503	0,346	2,108	78,440



**Gambar 1.** Deret waktu median bulanan klorofil-a per zona jarak pantai di perairan Kota Langsa Tahun 2025.

**Tabel 4.** Outlier bulanan antar zona (Sentinel-3 OLCI CHL\_NN, ambang  $\geq 5$  hari valid per piksel, 2025)

Bulan	Zona	Median Klorofil-a (mg/m <sup>3</sup> )	Q1	Q3	IQR	Batas Bawah	Batas Atas	Jenis Outlier
Januari	10–15 km	1,480	0,492	0,868	0,376	-0,072	1,432	Outlier Atas
Desember	5–10 km	4,212	1,228	1,886	0,658	0,241	2,873	Outlier Atas
Desember	10–15 km	3,145	0,492	0,868	0,376	-0,072	1,432	Outlier Atas
Desember	15–20 km	2,108	0,411	0,625	0,214	0,090	0,945	Outlier Atas



**Gambar 2.** Distribusi spasial klorofil-a di perairan Kota Langsa berdasarkan komposit bulanan tahun 2025.

Identifikasi outlier menggunakan pendekatan Interquartile Range (IQR) (Tabel 4; Gambar 3) menunjukkan bahwa anomali konsentrasi klorofil-a terjadi secara selektif pada bulan dan zona tertentu. Secara statistik, nilai median yang melampaui batas atas ( $Q3 + 1,5 \text{ IQR}$ ) terdeteksi pada Januari di zona

10–15 km serta pada Desember di zona 5–10 km, 10–15 km, dan 15–20 km. Sebaliknya, zona 0–5 km tetap berada dalam rentang variasi tahunan normal.

Uji Kruskal–Wallis (Tabel 5) menunjukkan adanya perbedaan signifikan distribusi konsentrasi klorofil-a bulanan antar empat zona jarak dari pantai

( $H = 32,12$ ;  $p = 4,94 \times 10^{-7}$ ). Dengan nilai  $p$  jauh di bawah  $0,05$ , hipotesis nol yang menyatakan kesamaan median antar zona ditolak.

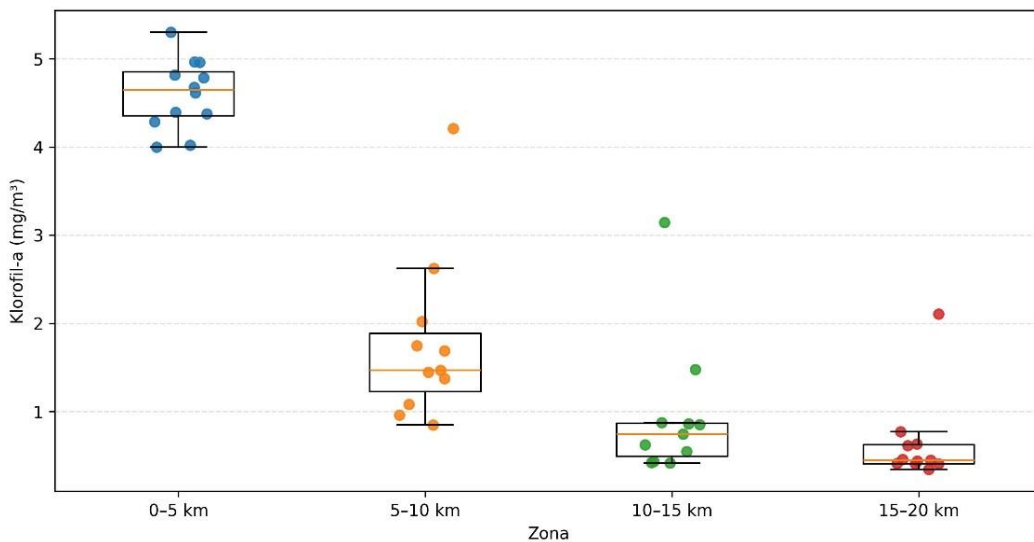
Uji lanjut Dunn dengan koreksi Bonferroni (Tabel 6) menunjukkan bahwa perbedaan signifikan konsentrasi klorofil-a terjadi antara zona 0–5 km dan 10–15 km, serta antara 0–5 km dan 15–20 km. Selain itu, perbedaan juga terdeteksi antara zona 15–20 km dan 5–10 km. Sebaliknya, zona 0–5 km tidak berbeda signifikan dengan 5–10 km, dan zona 5–10 km tidak berbeda nyata dengan 10–15 km maupun 10–15 km dengan 15–20 km.

Uji Kruskal–Wallis antar kelompok musim (Tabel 7) menunjukkan bahwa variasi konsentrasi klorofil-a sepanjang tahun 2025 tidak berbeda signifikan secara statistik ( $H = 6,379$ ;  $p = 0,095$ ). Dengan nilai  $p$  di atas ambang  $0,05$ , hipotesis nol kesamaan distribusi antar musim tidak dapat ditolak, sehingga klasifikasi Musim Barat, Timur, dan Peralihan tidak menghasilkan diferensiasi median bulanan yang konsisten.

Penerapan ambang lima hari valid per piksel menunjukkan bahwa kestabilan komposit bulanan sangat dipengaruhi oleh jumlah observasi yang mendasari tiap piksel. Dengan demikian, pengendalian representativitas temporal diperlukan agar pola gradien pesisir–lepas pantai tidak dipengaruhi secara berlebihan oleh fluktuasi

observasi harian yang terbatas. Hal ini terutama penting pada bulan dengan cakupan observasi rendah, ketika jumlah pengamatan yang terlalu sedikit dapat menyebabkan komposit bulanan kurang merepresentasikan pola spasial klorofil-a yang sebenarnya. Dalam konteks penelitian ini, ketersediaan jumlah hari observasi valid per piksel tidak seragam antar bulan dan antar zona, sehingga penerapan ambang yang lebih tinggi berisiko mengurangi cakupan spasial dan kontinuitas temporal secara berlebihan karena semakin banyak piksel tidak memenuhi syarat minimum. Oleh karena itu, ambang lima hari valid per piksel dipilih sebagai kompromi operasional yang sesuai dengan karakter data pada penelitian ini. Pada dataset dengan ketersediaan observasi yang lebih memadai, ambang yang lebih tinggi tetap dimungkinkan untuk meningkatkan robustitas komposit.

Gradien klorofil-a tahunan pada perairan Langsa menunjukkan bahwa zona 0–5 km merupakan wilayah yang paling kuat dipengaruhi sistem sungai–estuari dan pesisir dangkal, sehingga konsentrasi klorofil-a tetap lebih tinggi dibanding zona yang lebih jauh dari pantai. Kondisi ini menunjukkan bahwa produktivitas primer di dekat pantai terutama dikontrol oleh kedekatan terhadap sumber masukan daratan dan perairan pesisir dangkal yang memperkaya lapisan permukaan.



**Gambar 3.** Distribusi median bulanan klorofil-a per zona jarak pantai di perairan Kota Langsa Tahun 2025 menggunakan *boxplot* dan *swarmplot*.

Karakter estuari Kuala Langsa yang semi-tertutup dan terhubung langsung dengan Selat Malaka menunjukkan bahwa gradien tersebut terbentuk melalui interaksi antara aliran sungai, pasang surut, dan konektivitas dengan perairan regional (Irwansyah *et al.*, 2023). Selain itu, banyaknya sungai dan estuari di pesisir Aceh Timur memperkuat peran masukan daratan pada zona pesisir (Tjahjo *et al.*, 2023), sementara dinamika Selat Malaka memungkinkan modulasi regional melalui monsun Asia (Tan *et al.*, 2006). Dengan demikian, penurunan konsentrasi klorofil-a ke arah lepas pantai mencerminkan pelemahan bertahap pengaruh daratan dan meningkatnya dominasi proses oseanografi perairan yang lebih terbuka.

Pola spasial yang menunjukkan konsentrasi klorofil-a lebih tinggi pada zona dekat pantai dan menurun ke arah lepas pantai juga konsisten dengan pengamatan pada perairan Aceh lainnya. Di Sungai Krueng Raba, Lhoknga, Aceh Besar, konsentrasi klorofil-a tertinggi tercatat pada stasiun muara sebesar 4,55 mg/m<sup>3</sup> dan terendah pada stasiun laut sebesar 0,43 mg/m<sup>3</sup> pada pengamatan Mei 2016, yang menegaskan kuatnya pengaruh gradien sungai–muara–laut terhadap distribusi klorofil-a (Nufus *et al.*, 2017). Pada skala penginderaan jauh, perairan Aceh Barat dan Nagan Raya menunjukkan kisaran klorofil-a tahunan 0,94–3,01 mg/m<sup>3</sup> pada 2011 dan meningkat menjadi 2,07–4,86 mg/m<sup>3</sup> pada 2021, sehingga menunjukkan bahwa konsentrasi klorofil-a

**Tabel 5.** Hasil uji Kruskal–Wallis konsentrasi klorofil-a median bulanan antar zona jarak pantai di perairan Kota Langsa, 2025.

Metode	Statistik H	Nilai p	Jumlah bulan valid				Kesimpulan
			(0–5 km)	(5–10 km)	(10–15 km)	(15–20 km)	
Kruskal–Wallis antar zona (2025)	32,1174	$4,94 \times 10^{-7}$	11	11	11	11	Signifikan (p < 0,05)

**Tabel 6.** Hasil uji lanjut Dunn dengan koreksi Bonferroni untuk konsentrasi klorofil-a median bulanan antar zona jarak pantai di perairan Kota Langsa, 2025.

Zona 1 (km)	Zona 2 (km)	Nilai p	Signifikan ( $\alpha = 0,05$ )
0–5	10–15	0,000139	Ya
0–5	15–20	0,000001	Ya
0–5	5–10	0,096595	Tidak
10–15	15–20	1,000000	Tidak
10–15	5–10	0,407330	Tidak
15–20	5–10	0,024520	Ya

**Tabel 7.** Hasil uji Kruskal–Wallis konsentrasi klorofil-a median bulanan antar musim di perairan Kota Langsa, 2025.

Metode	Statistik H	Nilai p	Kesimpulan
Kruskal–Wallis	6,379	0,095	Tidak signifikan (p $\geq$ 0,05)

pesisir di Aceh dapat berada pada kisaran yang relatif tinggi (Kusumawati *et al.*, 2025). Pada skala regional, perairan utara Aceh juga dilaporkan memiliki klorofil-a yang relatif tinggi di dekat pantai, dengan puncak pada *Northeast monsoon* dan pola musiman yang relatif lemah, sehingga memperkuat interpretasi bahwa kontrol spasial dapat lebih dominan dibanding segmentasi musim yang tegas (Haditiar *et al.*, 2024).

Pola CV antar zona menunjukkan bahwa variabilitas klorofil-a tidak hanya merefleksikan fluktuasi statistik, tetapi juga perubahan mekanisme pengontrol sepanjang gradien pesisir–lepas pantai. Rendahnya CV pada zona 0–5 km mengindikasikan bahwa wilayah pesisir inti menerima pengaruh daratan yang relatif persisten, sehingga biomassa fitoplankton dapat dipertahankan pada tingkat tinggi dengan fluktuasi relatif kecil. Sebaliknya, kenaikan CV pada zona 5–15 km menunjukkan bahwa wilayah transisi lebih sensitif terhadap transport lateral, resuspensi sedimen, dan perubahan pencampuran massa air, sehingga respons klorofil-a menjadi lebih tidak stabil. Pada zona 15–20 km, penurunan ringan CV dibanding zona transisi mengindikasikan berkurangnya pengaruh langsung input daratan, meskipun variabilitas masih dapat dimodulasi oleh dinamika regional Selat Malaka dan monsun Asia melalui perubahan pencampuran, transport massa air, dan kondisi kolom air (Tan *et al.*, 2006). Namun, karena perbedaan musiman dalam penelitian ini tidak signifikan secara statistik pada uji Kruskal–Wallis antar musim, maka pengaruh monsun lebih tepat dipahami sebagai faktor pemodulasi daripada pengontrol utama. Dengan demikian, gradien antar zona di Langsa bukan hanya menunjukkan perbedaan tingkat klorofil-a, tetapi juga pergeseran dari sistem pesisir yang relatif produktif dan stabil menuju wilayah transisi yang lebih dinamis, lalu ke perairan yang semakin dipengaruhi proses fisik regional. Pola tersebut sejalan dengan kerangka ekologi komunitas, di mana variabilitas temporal relatif terhadap nilai rata-rata dapat digunakan sebagai indikator kestabilan sistem; CV yang lebih rendah mencerminkan kondisi yang lebih persisten, sedangkan CV yang lebih tinggi menunjukkan sistem yang lebih sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan (Ives & Carpenter, 2007).

Dominasi outlier pada zona transisi dan lepas pantai menunjukkan bahwa lonjakan klorofil-a tidak

terjadi secara merata di seluruh gradien, melainkan lebih sering muncul pada wilayah yang lebih sensitif terhadap fluktuasi kondisi fisik perairan jangka pendek. Pada perairan seperti ini, peningkatan biomassa fitoplankton dapat dipicu oleh pencampuran episodik, redistribusi massa air, atau peningkatan suplai nutrisi sesaat yang tidak berlangsung cukup lama untuk mengubah pola tahunan secara menyeluruh. Dalam konteks hasil penelitian ini, kemunculan outlier pada Januari di zona 10–15 km serta pada Desember di zona 5–10 km, 10–15 km, dan 15–20 km menunjukkan bahwa zona transisi dan lepas pantai lebih responsif terhadap kejadian episodik dibanding pesisir inti, yang tetap berada dalam rentang variasi tahunan normal. Dengan demikian, outlier pada Januari dan Desember lebih tepat ditafsirkan sebagai sinyal respons episodik pada bulan tertentu, tanpa mengubah pola gradien tahunan yang tetap didominasi oleh struktur spasial pesisir–lepas pantai.

Signifikansi hasil uji Kruskal–Wallis antar zona menegaskan bahwa gradien pesisir–lepas pantai pada perairan Langsa merepresentasikan diferensiasi spasial yang nyata dalam distribusi tahunan klorofil-a, bukan sekadar pola visual. Pola signifikansi pada uji lanjut Dunn dengan koreksi Bonferroni menunjukkan bahwa gradien pesisir–lepas pantai merepresentasikan transisi ekologis yang berlangsung secara bertahap. Zona 5–10 km dan 10–15 km berfungsi sebagai wilayah transisi yang secara statistik menempati posisi antara karakter pesisir yang diperkaya nutrisi dan sistem lepas pantai yang lebih dibatasi oleh proses internal kolom air. Dengan demikian, diferensiasi spasial klorofil-a sepanjang tahun pengamatan mencerminkan gradien kontinu dalam intensitas pengaruh daratan, sehingga zonasi lebih tepat dipahami sebagai spektrum perubahan ekologis daripada sebagai pemisahan spasial yang bersifat diskrit.

Integrasi analisis spasial–temporal menunjukkan bahwa produktivitas primer di perairan Langsa lebih kuat dibentuk oleh struktur gradien pesisir–lepas pantai daripada oleh pembagian musim yang bersifat diskrit. Implikasi oseanografi dari temuan ini adalah bahwa kedekatan terhadap sumber masukan daratan, suplai nutrisi, dan intensitas pencampuran membentuk kondisi yang lebih mendukung akumulasi biomassa fitoplankton pada zona pesisir, sedangkan wilayah transisi dan lepas

pantai lebih dipengaruhi oleh dinamika fisik jangka pendek dan proses internal kolom air. Secara ekologis, dominasi faktor spasial tersebut menunjukkan bahwa zona pesisir inti berfungsi sebagai wilayah dengan produktivitas primer yang relatif lebih persisten, sementara zona transisi mencerminkan wilayah dengan respons yang lebih dinamis terhadap redistribusi massa air, dan zona yang lebih lepas mencerminkan sistem dengan keterbatasan nutrisi yang lebih besar. Dengan demikian, distribusi klorofil-a di wilayah studi tidak hanya menggambarkan pola sebaran spasial, tetapi juga menunjukkan bahwa fungsi produktivitas primer pesisir di Langsa terutama ditopang oleh zona dekat pantai yang terus dipengaruhi sistem sungai–estuari dan dinamika pesisir.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi klorofil-a di perairan Kota Langsa selama 2025 membentuk gradien yang jelas dari pesisir ke lepas pantai. Zona 0–5 km memiliki konsentrasi klorofil-a paling tinggi dan relatif paling stabil, sedangkan zona 5–15 km menunjukkan perubahan yang lebih dinamis sebelum menurun pada zona 15–20 km. Hasil ini menunjukkan bahwa produktivitas primer di wilayah studi lebih erat berkaitan dengan kedekatan terhadap masukan daratan, sistem sungai–estuari, dan dinamika pesisir daripada dengan pembagian musim monsun. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa zonasi jarak dan pengendalian representativitas temporal melalui ambang minimal lima hari observasi valid per piksel dapat digunakan sebagai kerangka yang lebih terstandar untuk mengevaluasi klorofil-a di perairan pesisir tropis berbasis satelit.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agbangba, C.E., Aide, E.S., Honfo, H. & Glèlè Kakai, R. 2024. On the use of post-hoc tests in environmental and biological sciences: a critical review. *Heliyon*, 10(3): e25131. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25131
- 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. *Proceedings of the Living Planet Symposium 2016*, Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016. ESA-SP 740: 54.
- Chowdhury, M., Caballero, I., de la Calle, I. & Laiz, I. 2024. Chlorophyll-a and suspended matter variability in a data-scarce coastal–estuarine ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 309: 108973. doi: 10.1016/j.ecss.2024.108973
- Doerffer, R. 2010. *OLCI Level 2 Algorithm Theoretical Basis Document: Ocean Colour Turbid Water*. Sentinel-3 L2 Products and Algorithm Definition, Document Ref. S3-L2-SD-03-C11-GKSS-ATBD, Issue 2.1.
- Doerffer, R. & Schiller, H. 2007. The MERIS case 2 water algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3): 517–535. doi: 10.1080/01431160600821127
- Dunn, O.J. 1961. Multiple comparisons among means. *Journal of the American Statistical Association*, 56(293): 52–64. doi: 10.2307/2282330
- Falkowski, P.G., Barber, R.T. & Smetacek, V. 1998. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281(5374): 200–206. doi: 10.1126/science.281.5374.200
- Gubri, B., Hansen, J.P., Wikström, S.A., Snickars, M., Dahl, M., Gullström, M., Rydin, E., Masqué, P., Garbaras, A., Björk, M. & Boström, C. 2025. Shallow coastal bays as sediment carbon and nutrient reservoirs in the Baltic Sea. *Estuaries and Coasts*, 48: 136. doi: 10.1007/s12237-025-01541-0
- Haditiar, Y., Ikhwan, M., Mahdi, S., Siregar, A.N., Haridhi, H.A., Setiawan, I., Nanda, M., Prajaputra, V. & Irham, M. 2024. Oceanographic characteristics in the North of Aceh waters. *Regional Studies in Marine Science*, 71: 103408. doi: 10.1016/j.rsma.2024.103408
- Harshada, D., Raman, M. & Jayappa, K.S. 2021. Evaluation of the operational chlorophyll-a product from global ocean colour sensors in the coastal waters, south-eastern Arabian Sea. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3): 769–786. doi: 10.1016/j.ejrs.2021.09.005
- Holbach, A., Upadhyay Stæhr, S., Upadhyay Stæhr, P.A. & Markager, S. 2025. Chlorophyll-a

- estimations in complex coastal waters from space — A new optimization method by spatially resolved scaling factors. *Science of the Total Environment*, 1006: 180868. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.180868
- Irwansyah, I., Isma, F., Ismida, Y., Isma, M.F., Sufahani, S.F. & Akbar, H. 2023. Effect of Stream River and Tidal on the Suspended Sediment Concentration of Kuala Langsa Estuary, Aceh, Indonesia. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 28(1): 27–36. doi: 10.14710/ik.ijms.28.1.27-36
- Ives, A.R. & Carpenter, S.R. 2007. Stability and diversity of ecosystems. *Science*, 317(5834): 58–62. doi: 10.1126/science.1133258
- Karnan, C. & Gautham, S. 2024. Seasonal enhancement of phytoplankton biomass in the southern tropical Indian Ocean: Significance of meteorological and oceanography parameters. *Oceanologia*, 66(2): 196–219. doi: 10.1016/j.oceano.2023.10.003
- Kruskal, W.H. & Wallis, W.A. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260): 583–621. doi: 10.2307/2280779
- Kusumawati, I., Suriani, M. & Nurdini, J.A. 2025. Analisis variabilitas sebaran klorofil-a pada lokasi bongkar muat batubara di perairan Aceh Barat dan Nagan Raya menggunakan citra Aqua MODIS dan kaitannya dengan arus. *Jurnal Kelautan*, 18(1): 48–57. doi: 10.21107/jk.v18i1.29777
- Li, J., Matsuoka, A., Devred, E., Hooker, S.B., Pang, X. & Babin, M. 2025. A novel GSM and fluorescence coupled full-spectral chlorophyll a algorithm for waters with high CDM content. *Remote Sensing of Environment*, 321: 114667. doi: 10.1016/j.rse.2025.114667
- Liu, G., Li, L., Song, K., Li, Y., Lyu, H., Wen, Z., Fang, C., Bi, S., Sun, X., Wang, Z., Cao, Z., Shang, Y., Yu, G., Zheng, Z., Huang, C., Xu, Y. & Shi, K. 2020. An OLCI-based algorithm for semi-empirically partitioning absorption coefficient and estimating chlorophyll a concentration in various turbid case-2 waters. *Remote Sensing of Environment*, 239: 111648. doi: 10.1016/j.rse.2020.111648
- Lucas, J., Wichels, A. & Gerdt, G. 2016. Spatiotemporal variation of the bacterioplankton community in the German Bight: from estuarine to offshore regions. *Helgoland Marine Research*, 70: 16. doi: 10.1186/s10152-016-0464-9
- Nufus, H., Karina, S. & Agustina, S. 2017. Analisis sebaran klorofil-a dan kualitas air di Sungai Krueng Raba Lhoknga, Aceh Besar. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kelautan dan Perikanan Unsyiah*, 2(1): 58–65.
- Pahlevan, N., Smith, B., Schalles, J., Binding, C., Cao, Z., Ma, R., Alikas, K., Kangro, K., Gurlin, D., Hà, N., Matsushita, B., Moses, W., Greb, S., Lehmann, M.K., Ondrusek, M., Oppelt, N. & Stumpf, R. 2020. Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111604. doi: 10.1016/j.rse.2019.111604
- Pahlevan, N., Smith, B., Binding, C., Gurlin, D., Li, L., Bresciani, M. & Giardino, C. 2021. Hyperspectral retrievals of phytoplankton absorption and chlorophyll-a in inland and nearshore coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 253: 112200. doi: 10.1016/j.rse.2020.112200
- Shi, H., Chen, Y., Zhao, H., Mortimer, R. & Pan, G. 2025. Impact of tropical cyclone on coastal phytoplankton blooms and underlying mechanisms. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59: 102389. doi: 10.1016/j.ejrh.2025.102389
- Tan, C.K., Ishizaka, J., Matsumura, S., Yusoff, F.M. & Mohamed, M.I.H. 2006. Seasonal variability of SeaWiFS chlorophyll a in the Malacca Straits in relation to Asian monsoon. *Continental Shelf Research*, 26(2): 168–178. doi: 10.1016/j.csr.2005.09.008
- Tjahjo, D.W.H., Wiadnyana, N.N., Purnamaningtyas, S.E., Arifin, T., Yulius, Purbani, D., Syam, A.R., Mujiyanto & Wisna, U.J. 2023. Assessment of water quality status, nutrients, and phytoplankton communities in the coastal zone of East Aceh Regency, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 24(9): 112–129. doi: 10.12911/22998993/168614
- Turner, R.E., Swenson, E.M., Milan, C.S. & Lee, J.M. 2019. Spatial variations in chlorophyll a, C, N, and P in a Louisiana estuary from 1994 to

2016. *Hydrobiologia*, 834: 131–144. doi: 10.1007/s10750-019-3918-7
- Wu, Z., Pang, J., Li, J., Wang, Y., Ruan, J., Zhang, X., Yang, L., Pang, Y. & Gao, Y. 2025. A review of remote sensing-based water quality monitoring in turbid coastal waters. *Intelligent Marine Technology and Systems*, 3: 24. doi: 10.1007/s44295-025-00075-2
- Yang, J., Rahardja, S. & Fränti, P. 2019. Outlier detection: how to threshold outlier scores? *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, Information Processing and Cloud Computing (AIIPCC '19)*, Sanya, China, 19–21 December 2019, 1–6. doi: 10.1145/3371425.3371427