

Karakteristik Kualitas Perairan dan Status Eutrofikasi di Perairan Pesisir Kota Pekalongan

**Pramesthi Dwi Octavianna^{1*}, Muhammad Helmi², Lilik Maslukah²,
Muhammad Zainuri², Aris Ismanto²**

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

²Departemen Oseanografi Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

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

Email: pramesthioct@gmail.com

Abstrak

Perairan pesisir Kota Pekalongan merupakan wilayah yang rentan terhadap eutrofikasi akibat tingginya aktivitas antropogenik di daratan, seperti kawasan terbangun, tambak, dan pertanian, yang berpotensi meningkatkan masukan nutrisi ke perairan laut. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji status trofik perairan pesisir Kota Pekalongan berdasarkan *Trophic State Index* (TSI), menganalisis perbedaan karakteristik kualitas perairan antara area pesisir dan area transisi pesisir-laut, serta mengkaji keterkaitannya dengan kondisi tutupan lahan daratan. Pengambilan data kualitas perairan dilakukan dalam satu hari pengamatan dengan total 77 titik sampling, meliputi parameter klorofil-a, nitrat, fosfat, total padatan tersuspensi, oksigen terlarut, suhu, salinitas, pH, dan kecerahan. Nilai TSI dihitung berdasarkan indikator klorofil-a, nutrisi, dan kecerahan, kemudian dianalisis secara spasial menggunakan interpolasi spline, serta didukung oleh analisis deskriptif berupa boxplot. Hasil penelitian menunjukkan bahwa area pesisir memiliki tingkat eutrofikasi yang relatif lebih tinggi dan lebih bervariasi dibandingkan area transisi, yang dicirikan oleh konsentrasi nutrisi dan klorofil-a yang lebih tinggi serta kecerahan yang lebih rendah. Dominasi tutupan lahan terbangun dan tambak di wilayah daratan berpotensi berkontribusi terhadap kondisi eutrofikasi perairan pesisir. Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya pengelolaan wilayah daratan sebagai bagian dari upaya mitigasi eutrofikasi dan pengelolaan perairan pesisir secara berkelanjutan.

Kata kunci : Eutrofikasi, Trophic State Index, perairan pesisir, kualitas perairan, tutupan lahan

Abstract

Water Quality Assessment and Eutrophication Status in the Pekalongan City Coastal Zone

The coastal waters of Pekalongan City are vulnerable to eutrophication due to high anthropogenic activity on land, such as built-up areas, fish ponds, and agriculture, which have the potential to increase nutrient inputs into marine waters. This study aims to assess the trophic status of coastal waters in Pekalongan City based on the Trophic State Index (TSI), analyze differences in water quality characteristics between coastal and coastal-marine transition areas, and examine their relationship with land cover conditions. Water quality data were collected on a single observation day at several sampling points, covering parameters such as chlorophyll-a, nitrate, phosphate, total suspended solids, dissolved oxygen, temperature, salinity, pH, and brightness. TSI values were calculated based on chlorophyll-a, nutrients, and brightness indicators, then analyzed spatially using spline interpolation, supported by descriptive analysis in the form of boxplots. The results showed that coastal areas had relatively higher and more variable levels of eutrophication than transitional areas, characterized by higher concentrations of nutrients and chlorophyll-a and lower light intensity. The dominance of built-up land cover and ponds in inland areas has the potential to contribute to the eutrophication of coastal waters. The results of this study emphasize the importance of inland area management as part of efforts to mitigate eutrophication and manage coastal waters in a sustainable manner.

Keyword : Eutrophication, Trophic State Index, coastal waters, water quality, land cover

*Corresponding author

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 26-12-2025

DOI:10.14710/buloma.v15i1.81010

Disetujui/Accepted : 29-01-2026

PENDAHULUAN

Status trofik menggambarkan tingkat kesuburan air berdasarkan ketersediaan nutrisi seperti fosfor dan nitrogen, serta respon biologis yang terjadi seperti produktivitas primer yang biasanya diukur dari konsentrasi klorofil-a (Azman *et al.*, 2023). Secara umum, status trofik diklasifikasikan menjadi oligotrofik, mesotrofik, dan eutrofik, dimana kondisi eutrofik ditandai oleh tingginya biomassa fitoplankton akibat peningkatan masukan nutrisi (Azman *et al.*, 2023; Zeleke *et al.*, 2024). Peningkatan status trofik yang berlebihan dapat memicu ledakan populasi fitoplankton (algal bloom) yang menurunkan transparansi perairan dan menyebabkan fluktuasi oksigen terlarut hingga kondisi hipoksia, yang berdampak negatif pada keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem akuatik (Marin *et al.*, 2025; Wahl *et al.*, 2021). Kondisi ini tidak hanya menurunkan kualitas perairan bagi organisme akuatik maupun aktivitas manusia, serta mengganggu transfer energi antar tingkat trofik dalam rantai makanan air (Wahl *et al.*, 2021).

Pesisir Kota Pekalongan yang merupakan bagian pesisir Utara Jawa telah mengalami peningkatan tekanan ekologis yang disebabkan oleh aktivitas antropogenik seperti pertanian, tambak, industri, dan urbanisasi yang berperan pada tingginya masukan beban nutrisi ke perairan yang mempengaruhi kualitas air dan menyebabkan degradasi ekosistem pesisir (Sarah dan Soebowo, 2018). Aktivitas antropogenik yang terjadi di daratan berkontribusi pada peningkatan nutrisi seperti nitrat yang dibawa oleh aliran air ke perairan pesisir (Ismanto *et al.*, 2023). Hal ini dapat menyebabkan eutrofikasi yang mengganggu keseimbangan ekosistem laut dan berdampak pada keanekaragaman serta kelimpahan fitoplankton dan organisme akuatik lainnya. Studi lain menunjukkan bahwa input nutrisi dari aktivitas manusia di pesisir mengubah konsentrasi nutrisi dan dapat memicu fenomena seperti ledakan alga dan gangguan rantai makanan di ekosistem laut (Kumar *et al.*, 2023). Tekanan tersebut berpotensi memengaruhi status trofik perairan laut Kota Pekalongan.

Status trofik perairan dapat diidentifikasi melalui berbagai pendekatan, salah satunya menggunakan *Trophic State Index* (TSI). Indeks TSI dihitung berdasarkan indikator kualitas perairan yang berkaitan langsung dengan proses eutrofikasi, seperti konsentrasi nitrat, fosfat, klorofil-a, serta tingkat kecerahan perairan yang

diperoleh dari hasil survei lapangan. Indeks ini banyak digunakan karena mampu menyederhanakan kompleksitas parameter kualitas air menjadi satu nilai yang representatif terhadap kondisi kesuburan perairan.

Kajian terhadap faktor-faktor yang berpengaruh terhadap status trofik perairan menjadi penting sebagai dasar dan pertimbangan dalam upaya pengendalian dan penurunan tingkat eutrofikasi. Informasi mengenai hubungan antara parameter kualitas perairan dan nilai indeks TSI dapat menjadi dasar ilmiah dalam merumuskan strategi pengelolaan dan mitigasi eutrofikasi pada suatu perairan. Selain itu, analisis status trofik secara spasial memungkinkan diperolehnya data mengenai pola sebaran dan variabilitas kondisi trofik di suatu wilayah perairan, sehingga area dengan tingkat eutrofikasi relatif lebih tinggi dapat diidentifikasi secara lebih akurat.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis status trofik perairan laut Kota Pekalongan menggunakan metode TSI serta mengkaji distribusi spasial parameter kualitas perairan yang meliputi nitrat, fosfat, klorofil-a, oksigen terlarut (DO), pH, salinitas, suhu permukaan laut (SPL), dan material padatan tersuspensi (MPT). Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menyediakan informasi ilmiah yang komprehensif mengenai tingkat kesuburan dan kondisi kualitas perairan pesisir Pekalongan sebagai bahan pertimbangan dalam pengelolaan wilayah pesisir, pengendalian beban nutrisi, serta perencanaan upaya mitigasi eutrofikasi secara berkelanjutan.

MATERI DAN METODE

Lokasi penelitian terletak di perairan pantai Pekalongan, meliputi depan muara Sungai Mrican, Sungai Sengkarang dan Sungai Loji. Pengambilan data lapangan dilakukan pada 30 Mei 2024. Pengambilan sampel dilakukan pada 77 stasiun, mewakili perairan dekat daratan dan lebih ke area laut lepas. Parameter lingkungan yang diukur secara insitu meliputi oksigen terlarut (DO), salinitas, suhu, pH, dan kecerahan perairan menggunakan alat ukur DO meter, refraktometer, pH meter, dan cakram *Secchi*. Sampel air untuk analisis klorofil-a, nitrat, dan fosfat diambil dekat permukaan perairan dan disimpan dalam botol gelap untuk mencegah pengaruh cahaya yang dapat memicu proses biologis maupun fotokimia, serta dijaga tetap dingin dengan es guna menghambat aktivitas mikroorganisme dan

memperlambat perubahan kimia sehingga kualitas sampel tetap terjaga hingga dilakukan analisis di laboratorium (Foo *et al.*, 2023).

Analisis klorofil-a menggunakan metode spektrofotometer mengikuti metode standar dari APHA (2005). Metode ini melibatkan ekstraksi pigmen dari sampel menggunakan pelarut aseton 90%, dan mengukur absorbansinya pada panjang gelombang 664 nm, 647 nm, dan 630 nm. Konsentrasi klorofil-a dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$C (\mu\text{g/L}) = 11,85E_{664} - 1,54E_{667} - 0,08E_{630}$$

$$\text{klorofil - a } (\mu\text{g/L}) = \frac{C \times v}{V \times d}$$

Keterangan: V = volume sampe air sampel yang disaring (L); v = volume ekstrak aseton (mL); d = lebar kuvet (1 cm)

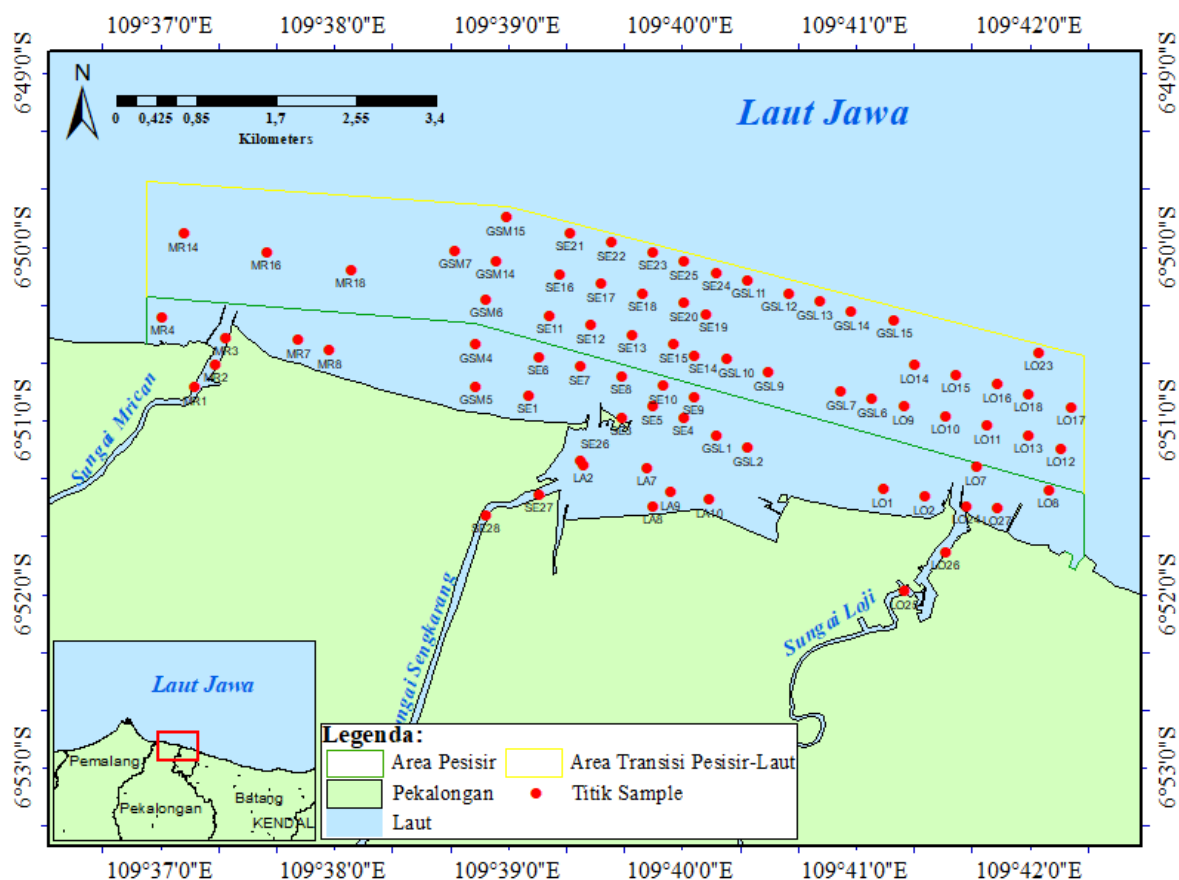
Analisis nitrat dalam penelitian kali ini menggunakan metode reduksi cadmium dan fosfat menggunakan metode *molybdenum blue* (Parsons

et al., 1984). Selanjutnya untuk analisis MPT menggunakan metode gravimetrik APHA 2540, dengan cara menyaring sampel air laut sebanyak 1 liter menggunakan kertas saring GF/F merk Whatman (ukuran pori 0,7 μm). Kertas saring selanjutnya dikeringkan di dalam oven pada suhu 103-105°C hingga mencapai berat konstan, kemudian didinginkan dalam desikator. Perhitungan MPT menggunakan rumus berikut:

$$\text{MPT (mg/L)} = \frac{(A - B)}{C}$$

Keterangan: A = berat filter + residu kering (mg); B = berat filter (mg); C = volume sampel air (L)

Nilai Carlson's TSI (*Trophic State Index*) dihitung menggunakan konsentrasi klorofil-a Chl-a) yang diperoleh dari analisis laboratorium. TSI ini bertujuan untuk menggambarkan tingkat kesuburan atau trofik perairan berdasarkan biomassa fitoplankton yang diperkirakan melalui konsentrasi klorofil-a. Perhitungan TSI berdasarkan



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

klorofil-a sering digunakan karena Chl-a merupakan indikator langsung dari produktivitas primer perairan dan kesuburan nutrien (Saturday *et al.*, 2022). Klasifikasi berdasarkan nilai TSI tersebut dibagi menjadi beberapa status trofik: oligotrofik (rendah gara kesuburan dan produktivitas), mesotrofik (menengah), eutrofik (tinggi), dan hipereutrofik (sangat tinggi dengan risiko ledakan ganggang dan menurunnya kualitas air) (Saturday *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024). Perhitungan TSI menggunakan persamaan sebagai berikut (Carlson, 1977):

$$\begin{aligned} \text{TSI}(\text{SD}) &= 60 - 14.41 \ln(\text{SD}) \\ \text{TSI}(\text{Chl} - a) &= 9.81 \ln(\text{Chl} - a) + 30.6 \\ \text{TSI}(\text{TP}) &= 14.42 \ln(\text{TP}) + 4.15 \\ \text{TSI}(\text{TN}) &= 54.45 + 14.43 \ln(\text{TN}) \end{aligned}$$

Keterangan: SD = kecerahan perairan (m); Chl-a = klorofil-a ($\mu\text{g/L}$); TP = total fosfat; TN = total nitrat

Indeks status trofik (TSI) dihitung berdasarkan beberapa parameter, yaitu klorofil-a, total fosfor, total nitrogen, dan kecerahan air. TSI(SD) mencerminkan kejernihan perairan yang dipengaruhi oleh biomassa alga dan partikel tersuspensi. TSI(Chl) merepresentasikan biomassa fitoplankton aktual, sedangkan TSI(TP) dan TSI(TN) menggambarkan tekanan nutrien fosfor dan nitrogen sebagai faktor penyebab eutrofikasi. Keempat indeks ini digunakan secara komplementer untuk mengevaluasi status trofik dan mekanisme pengendali eutrofikasi (Carlson, 1977).

Pola distribusi spasial nilai TSI dianalisis menggunakan perangkat lunak ArcGIS. Nilai TSI pada titik sampling diinterpolasi menggunakan metode Spline untuk menghasilkan peta sebaran TSI di perairan pesisir Kota Pekalongan. Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan permukaan interpolasi yang halus dan sesuai untuk menggambarkan gradien perubahan nilai indeks di perairan pesisir. Hal ini penting untuk menggambarkan gradien perubahan nilai indeks

TSI secara alami dan realistis di antara titik-titik data yang tersebar di wilayah perairan. Spline bekerja dengan menghubungkan titik-titik data melalui fungsi-fungsi polinomial yang halus sehingga permukaan yang dihasilkan tidak hanya mengikuti nilai titik data secara akurat, tetapi juga mempertahankan kelancaran transisi antar titik (Isa *et al.*, 2024).

Analisis Tutupan Lahan

Pembuatan peta tutupan lahan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan platform *Google Earth Engine* (GEE) karena menyediakan akses langsung ke arsip citra satelit dengan kemampuan pemrosesan berbasis komputasi awan. Data utama berasal dari Sentinel-2 MSI Level-2A (*Surface Reflectance*) milik *European Space Agency* (ESA) dengan resolusi spasial 10-20 m dan periode perekaman lima hari. Selain itu, digunakan Sentinel-1 GRD (data radar C-band resolusi 10 m) untuk memperoleh nilai *backscatter*, SRTM DEM (30 m) untuk informasi topografi. Penggunaan data optik (sentinel-2) yang beresolusi tinggi serta data radar (sentinel-1) yang merekam permukaan bumi tanpa terpengaruh kondisi cuaca dan awan dapat mengurangi kebingungan spektral antar jenis tutupan lahan (Hu *et al.*, 2021). Data pendukung yang digunakan dalam penelitian meliputi JRC *Global Surface Water* (GSW) dan SRTM *Digital Elevation Model* (DEM). JRC GSW memiliki resolusi spasial 30 meter dan dibangun dari arsip citra Landsat sejak tahun 1984, sehingga mampu memberikan informasi mengenai keberadaan dan dinamika badan air seperti air permanen maupun musiman (Pekel *et al.*, 2016). Sementara itu, SRTM DEM juga memiliki resolusi 30 meter dan menyediakan informasi elevasi permukaan bumi yang kemudian dapat diturunkan menjadi variabel turunan seperti kemiringan lereng (*slope*) untuk membantu identifikasi area rendah, tergenang, atau berpotensi menjadi rawa (Alali *et al.*, 2023). Kedua data ini digunakan sebagai lapisan tambahan untuk meningkatkan akurasi klasifikasi tutupan lahan.

Tabel 1. Klasifikasi Status Trofik dan Tingkat Eutrofikasi Berdasarkan Nilai TSI

Nilai TSI	Klasifikasi Trofik	Tingkat Eutrofikasi
0 – 30	Ultra Oligotrofik	Sangat Rendah
30 – 40	Oligotrofik	Rendah
40– 50	Mesotrofik	Sedang
50 – 70	Eutrofik	Tinggi
>70,0	Hipertrofik	Sangat Tinggi

Proses klasifikasi dilakukan menggunakan metode *supervised classification* dengan algoritma *random forest*, yang mampu mengolah kombinasi data multispektral, radar, indeks spektral, dan DEM secara efektif (Amoakoh *et al.*, 2021; Luca *et al.*, 2022). Hasil klasifikasi kemudian divalidasi menggunakan titik uji melalui perhitungan *Overall Accuracy* (OA) dan *Kappa Coefficient*, dan setelah akurat, peta akhir diekspor dalam format GeoTIFF untuk disusun dalam layout kartografis menggunakan perangkat lunak ArcGIS. Peta tutupan lahan kemudian dianalisis secara spasial untuk mengkaji keterkaitannya dengan distribusi nilai TSI di perairan pesisir, khususnya dalam konteks potensi sumber nutrisi dari daratan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik kualitas perairan di area pesisir dan area transisi pesisir-laut menunjukkan perbedaan yang mencerminkan pengaruh gradien darat-laut (Tabel 2). Pola gradien ini umum dijumpai pada perairan pesisir yang dipengaruhi oleh masukan dari daratan, sehingga parameter fisika, kimia, dan biologi perairan mengalami perubahan seiring bertambahnya jarak dari pantai (Zielinski *et al.*, 2022). Secara umum, area pesisir memperlihatkan kecenderungan produktivitas primer yang lebih tinggi (Pessarrodona *et al.*, 2022). Sedangkan area transisi cenderung memiliki transparansi perairan yang lebih baik dan salinitas yang relatif lebih tinggi, yang mengindikasikan dominasi pengaruh massa air laut (O'Brien *et al.*, 2021; Lew *et al.*, 2022).

Tabel 2 menunjukkan bahwa secara umum nilai rata-rata klorofil-a, nitrat, fosfat, dan MPT di area pesisir masing-masing sebesar 6,83 µg/L, 0,18 mg/L, 0,55 mg/L, dan 57,56 mg/L, lebih tinggi

dibandingkan area transisi yang masing-masing sebesar 5,37 µg/L, 0,10 mg/L, 0,32 mg/L, dan 41,67 mg/L. Nilai rata-rata oksigen terlarut (DO) di area pesisir sebesar 7,02 mg/L, sedikit lebih tinggi dibandingkan area transisi sebesar 6,79 mg/L, sedangkan nilai SPL relatif serupa, yaitu 32,56°C di pesisir dan 32,61°C di area transisi. Salinitas rata-rata di area pesisir sebesar 10,85 ppm, lebih rendah dibandingkan area transisi sebesar 11,74 ppm, sementara nilai pH relatif seragam pada kedua area, yaitu 8,23 di pesisir dan 8,29 di area transisi. Nilai kecerahan rata-rata di area pesisir sebesar 1,25 m, lebih rendah dibandingkan area transisi sebesar 1,59 m.

Konsentrasi nilai nitrat yang lebih tinggi di area pesisir dibandingkan area transisi (Gambar 4) menunjukkan bahwa nitrogen merupakan nutrisi yang dominan dipengaruhi oleh aktivitas daratan. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan Dzakwan *et al.* (2023), yang menyatakan nitrat di perairan muara Sungai Sengkarang Pekalongan memiliki kisaran antara 0,001-0,118 mg/L. Dimana nilai ini telah melebihi ambang batas nitrat untuk air laut menurut PP RI No.22 Tahun 2021 sebesar 0,06 mg/L. Studi Jafarzadeh *et al.* (2024), menegaskan bahwa limpasan perkotaan, limbah domestik, dan aktivitas pertanian merupakan sumber utama nitrogen di perairan pesisir, yang menyebabkan peningkatan konsentrasi nitrat secara lokal dan episodik.

Konsentrasi fosfat yang lebih tinggi dan nilai maksimumnya di area pesisir yang telah melampaui ambang batas fosfat untuk air laut menurut PP RI No.22 Tahun 2021 yang ditetapkan sebesar 0,015 mg/L yang menunjukkan bahwa sumber fosfat tersebut berasal dari limpasan daratan, termasuk dari deterjen, pupuk pertanian,

Tabel 2. Perbedaan kualitas air antara area pesisir dan transisi di lokasi penelitian

Lokasi	Nilai	Parameter								
		Klo-a (µg/L)	Nitrat (mg/L)	Fosfat (mg/L)	MPT (mg/L)	DO (mg/L)	SPL (°C)	Salinitas (ppm)	pH	Keccerahan (m)
Area Pesisir	rata-rata	6,83	0,18	0,55	57,56	7,02	32,56	10,85	8,23	1,25
	min	3,50	0,00	0,06	19,00	2,54	28,00	2,00	7,48	0,40
	max	14,24	1,54	3,00	299,00	11,50	36,90	25,00	8,75	3,00
Area Transisi	rata-rata	5,37	0,10	0,32	41,67	6,79	32,61	11,74	8,29	1,59
	min	2,10	0,01	0,04	25,00	4,00	30,30	1,80	7,98	0,70
	max	9,87	0,63	0,55	102,00	10,76	37,30	28,00	8,61	3,00

dan sisa pakan tambak (Meter *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2024). Hasil penelitian ini sejalan dengan studi Pradiva *et al.* (2023), yang melaporkan konsentrasi fosfat di perairan muara Sungai Banger, Pekalongan pada tahun 2022 berkisar antara 1,054–1,130 µg/L. Konsentrasi fosfat yang tinggi di area pesisir dangkal umumnya menunjukkan adanya akumulasi lokal fosfor, yang melibatkan pelepasan fosfor dari sedimen melalui proses resuspensi dan perubahan kondisi redoks. Dalam kondisi oksik, fosfor terutama terikat pada oksida besi (Fe) dalam sedimen, namun saat kondisi redoks berubah menjadi anoksik atau reduktif, ikatan ini melemah sehingga fosfor dapat terlepas dari sedimen ke perairan atasnya (Hermans *et al.*, 2021). Perubahan redoks ini sering dipengaruhi oleh tingginya beban bahan organik, karena degradasi bahan organik di sedimen mengonsumsi oksigen, menimbulkan hipoksia atau anoksia di zona dasar perairan pesisir (Pein *et al.*, 2021). Selain itu, resuspensi sedimen akibat aktivitas fisik seperti gelombang atau arus mempercepat pelepasan fosfor yang tadinya terikat di dalam sedimen ke dalam kolom air. Proses ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi fosfat yang terdeteksi di perairan pesisir (Huang *et al.*, 2021).

Konsentrasi klorofil-a dengan rata-rata di area pesisir lebih tinggi dibandingkan area transisi. Pola ini sejalan dengan temuan Kunarso *et al.*, (2019), yang menunjukkan bahwa perairan pesisir umumnya memiliki konsentrasi klorofil-a yang lebih tinggi terutama disebabkan oleh masukan nutrisi dari daratan. Hasil distribusi klorofil-a pada penelitian ini sejalan dengan studi Karima *et al.* (2024), yang melaporkan konsentrasi klorofil-a di perairan muara Sungai Badahan Pekalongan pada tahun 2023 berkisar antara 0,153–9,371 µg/L. Respons fitoplankton terhadap nutrisi di area pesisir sangat dipengaruhi oleh kondisi spasial-lokal sehingga menyebabkan variasi signifikan pada konsentrasi klorofil-a perairan pesisir. Nutrien seperti nitrat dan fosfor, umumnya merangsang pertumbuhan fitoplankton dan meningkatkan kadar klorofil-a, namun keterbatasan nutrisi yang berbeda-beda di tiap wilayah menyebabkan pola pertumbuhan fitoplankton yang juga berbeda (Fernández-González *et al.*, 2022; Browning *et al.*, 2021).

Nilai MPT yang lebih tinggi dan sangat bervariasi di area pesisir mencerminkan kuatnya dinamika sedimen di wilayah dekat pantai. Dimana nilai MPT di perairan Pekalongan telah melebihi ambang batas yang telah ditetapkan menurut PP RI

No.22 Tahun 2021 sebesar 80 mg/L untuk pelabuhan dan mangrove serta 20 mg/L untuk coral dan lamun. Penelitian yang telah dilakukan oleh Ridarto *et al.* (2023), menemukan bahwa Sungai Banger Pekalongan mengalami peningkatan konsentrasi MPT sebesar 37,6–39,2% pada periode 2021–2022, yang diduga berkaitan dengan meningkatnya aktivitas antropogenik di daerah aliran sungai. Studi hidrodinamika pesisir menunjukkan bahwa perairan dangkal dekat daratan sangat rentan terhadap resuspensi sedimen, yang dipicu oleh interaksi gelombang, arus, dan pasang surut. Gelombang memiliki peranan utama dalam menghasilkan gesekan di dasar laut yang mengangkat sedimen dari dasar ke kolom air (Li *et al.*, 2024). Gelombang dan arus pasang surut yang berinteraksi secara sinergis menciptakan profil kecepatan kompleks pada lapisan batas dasar laut yang dapat menyebabkan turbulensi tinggi dan pengadukan yang efektif, sehingga mempermudah resuspensi sedimen (Li *et al.*, 2024).

Suhu permukaan laut (SPL) yang relatif seragam antara area pesisir dan transisi menunjukkan bahwa perubahan suhu bukanlah faktor pengendali utama dalam variasi kualitas perairan pada saat pengamatan. Hal ini sejalan dengan temuan di perairan pesisir tropis yang menunjukkan bahwa kualitas perairan lebih dipengaruhi oleh masukan nutrisi dan dinamika fisik dibandingkan pengaruh termal. Misalnya, dalam studi Román *et al.*, (2022), yang menyatakan pengukuran parameter seperti kandungan klorofil-a, bahan tersuspensi, dan bahan organik terlarut yang dipengaruhi oleh masukan nutrisi terbukti lebih menentukan dalam evaluasi kualitas air daripada fluktuasi suhu, termasuk di kawasan tropis.

Perbedaan kecerahan yang lebih rendah di area pesisir dibandingkan area transisi merupakan konsekuensi langsung dari tingginya muatan sedimen tersuspensi dan bahan organik. Kecerahan yang terukur untuk perairan Pekalongan masih belum melampaui ambang batas yang telah ditetapkan berdasarkan PP RI No.22 Tahun 2021 yaitu sebesar >3m untuk pelabuhan dan lamun, serta >5m untuk coral. Penurunan transparansi air pesisir memperkecil distribusi cahaya ke kedalaman yang lebih besar, sehingga fitoplankton di lapisan bawah perairan pesisir mendapatkan cahaya yang kurang dibandingkan area transisi yang lebih jernih. Dampaknya selain menurunkan fotosintesis, juga akan mengubah struktur komunitas fitoplankton karena beberapa spesies

fitoplankton memiliki toleransi cahaya yang berbeda, sehingga cahaya rendah dapat menguntungkan kelompok fitoplankton tertentu seperti cyanobacteria yang mampu bertahan dalam intensitas cahaya yang rendah dan kualitas cahaya yang berbeda (Stockenreiter *et al.*, 2021).

Nilai DO memiliki rata-rata di pesisir sedikit lebih tinggi daripada transisi. Namun, nilai minimum DO di pesisir lebih rendah dibanding transisi. Dimana nilai pengukuran DO yang di perairan Pekalongan telah melebihi ambang batas yang ditetapkan dalam PP RI No.22 Tahun 2021 sebesar >5 mg/L. Kondisi ini sering dikaitkan dengan tingginya beban nutrisi dan bahan organik yang meningkatkan respirasi dan proses dekomposisi, sehingga menurunkan DO. tingginya beban nutrisi dan bahan organik yang mendorong peningkatan aktivitas respirasi dan proses dekomposisi, sehingga mengurangi kadar DO secara lokal. Aktivitas biologis di perairan pesisir yang kaya nutrisi meningkatkan biomassa fitoplankton, yang saat mati atau terurai oleh mikroorganisme meningkatkan permintaan oksigen melalui respirasi dan dekomposisi bahan organik. Akibatnya, terjadi penurunan DO yang signifikan terutama di lapisan bawah perairan dan sedimen (Zhang *et al.*, 2023; Wei *et al.*, 2021). Eutrofikasi jangka panjang juga mengubah komunitas fitoplankton di perairan pesisir seperti peningkatan dominansi dinoflagellata dan diatom tertentu yang dapat memperpanjang waktu residensi material organik di kolom air dan meningkatkan konsumsi oksigen secara efisien, sehingga memperparah hipoksia (Miao *et al.*, 2024; Wei *et al.*, 2021).

Salinitas yang lebih tinggi dan relatif stabil di area transisi mencerminkan dominasi massa air laut, sedangkan kisaran salinitas yang lebih lebar di area pesisir menunjukkan kuatnya pengaruh intrusi air tawar dari daratan melalui aliran sungai dan limpasan permukaan. Gradien salinitas ini merupakan ciri utama interaksi darat-laut, dimana pada estuari yang dipengaruhi oleh pasang surut dan aliran sungai, intrusi air asin dapat merambat ke hulu dengan intensitas yang dipengaruhi oleh debit air tawar dan kondisi pasang, sehingga menyebabkan distribusi salinitas yang berubah-ubah secara spasial dan temporal (Liu *et al.*, 2024). Meskipun terjadi perbedaan salinitas dan variasi nutrisi antar zona, nilai pH pada kedua area relatif stabil dan berada pada kisaran netral hingga sedikit basa, yang menunjukkan bahwa sistem perairan masih berada dalam kondisi kimia yang umum bagi

perairan laut pesisir. Secara umum, meskipun eutrofikasi dapat menyebabkan perubahan pH lokal yang signifikan dalam batas mikrohabitat atau zona pesisir tertentu, pencampuran massa air laut yang melibatkan proses hidrodinamika seperti arus, gelombang, dan pasang surut, memainkan peranan penting dengan mencampur air bernutrien tinggi dan mengencerkan konsentrasi ion penyebab perubahan pH. Hal ini mengakibatkan pH laut tetap berada dalam rentang yang relatif stabil di wilayah yang luas, meskipun ada fluktuasi lokal akibat kegiatan biologis dan antropogenik (Liang *et al.*, 2024; Vigouroux *et al.*, 2021).

Sebaran Spasial Status Trofik Perairan

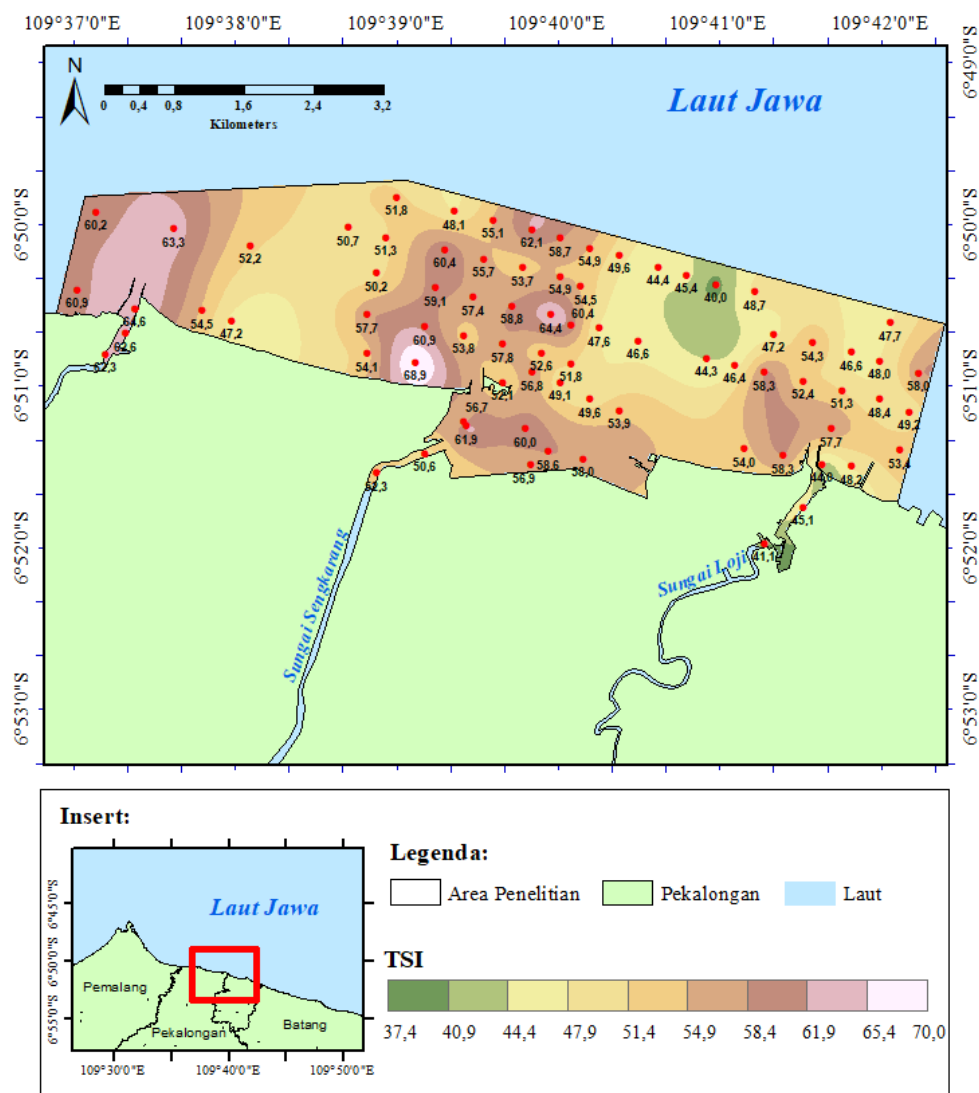
Sebaran spasial status trofik perairan Kota Pekalongan berdasarkan nilai TSI memperlihatkan pola yang tidak merata secara horizontal (**Gambar 2**). Secara umum, nilai TSI yang lebih tinggi teridentifikasi di area pesisir, sedangkan nilai yang lebih rendah cenderung ditemukan pada area transisi pesisir-laut. Pola spasial ini mencerminkan adanya gradien darat-laut, dimana pengaruh aktivitas daratan terhadap kualitas perairan semakin berkurang seiring bertambahnya jarak dari garis pantai. Area pesisir yang berdekatan dengan muara sungai cenderung menunjukkan nilai TSI yang relatif lebih tinggi, yang mengindikasikan tingginya masukan nutrisi dari limpasan permukaan, aliran sungai, serta aktivitas antropogenik di wilayah daratan. Kejadian ini mencirikan pola eutrofikasi pesisir, dimana kualitas air menurun seiring meningkatnya indeks trofik dekat muara sungai akibat konsentrasi nutrisi yang lebih tinggi dari daratan (Lazar *et al.*, 2024).

Sebaliknya, pada area transisi pesisir-laut, nilai TSI cenderung lebih rendah jika dibanding dengan wilayah pesisir. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses oseanografis seperti pencampuran massa air, sirkulasi perairan, dan pengenceran alami oleh air laut berperan dalam menurunkan konsentrasi nutrisi terlarut dan menstabilkan kondisi trofik perairan (Vigouroux *et al.*, 2021; Luo *et al.*, 2022). Proses-proses tersebut menyebabkan tekanan eutrofikasi dari daratan tidak sepenuhnya terakumulasi ke area transisi.

Tingginya nilai TSI di area pesisir menunjukkan bahwa eutrofikasi di wilayah ini bersifat lokal dan terfragmentasi, bukan merata di seluruh perairan. Lokasi yang berada dekat daratan maupun muara sungai dan aktivitas tambak teridentifikasi sebagai hotspot eutrofikasi, yaitu

area dengan konsentrasi nutrien dan nilai indeks status trofik yang tinggi dibandingkan wilayah sekitarnya. Pola ini menegaskan bahwa faktor lokal, seperti keberadaan muara sungai dan intensitas aktivitas manusia, memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap status trofik perairan karena keduanya merupakan sumber utama masukan nutrien nitrogen dan fosfor. Aliran sungai membawa nutrien dari daratan, sedangkan aktivitas budidaya tambak menyumbang nutrien melalui limbah pakan dan ekskresi organisme, sehingga meningkatkan ketersediaan nutrien dan mendorong pertumbuhan fitoplankton di perairan pesisir. Studi Liang *et al.*, (2024), menunjukkan bahwa keberadaan muara sungai memiliki dampak besar terhadap konsentrasi nutrien seperti nitrogen dan fosfor yang memasuki perairan pesisir serta

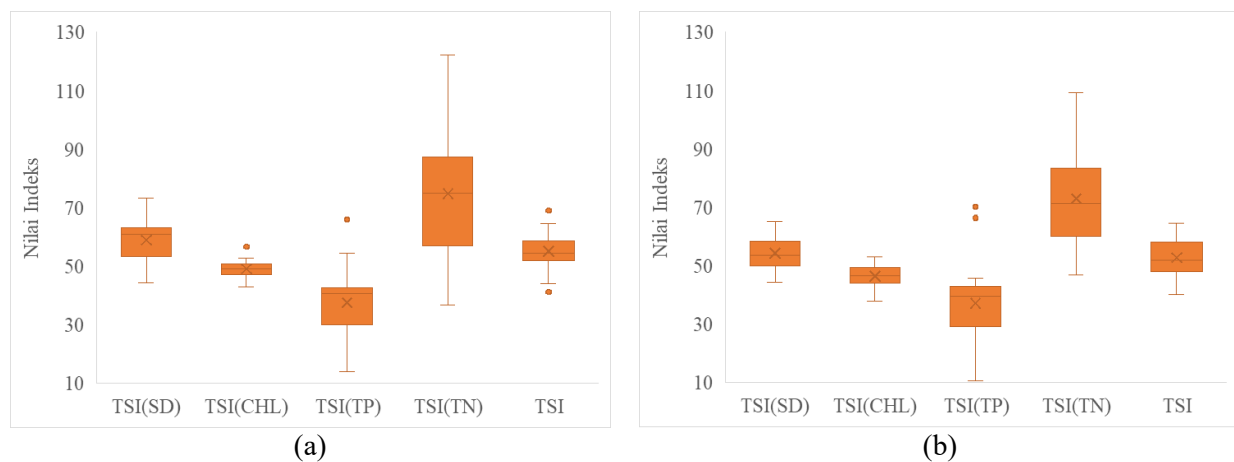
kondisi hidrodinamika seperti pengenceran oleh pasang surut dan arus laut juga memengaruhi distribusi nutrien secara spasial, sehingga menciptakan pola eutrofikasi yang tidak merata. Variasi nilai TSI pada area pesisir dan area transisi pesisir-laut ditunjukkan melalui boxplot pada Gambar 3, sedangkan ringkasan statistik deskriptifnya disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan nilai rata-rata, area pesisir memiliki nilai TSI yang lebih tinggi (55,09) dibandingkan area transisi (52,67). Status trofik mesotrofik lebih banyak ditemukan di perairan transisi dibandingkan pesisir yang didominasi status eutrofik. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa perairan pesisir cenderung mengalami tingkat kesuburan yang lebih tinggi, yang berkaitan dengan kedekatannya terhadap sumber masukan nutrien dari daratan.



Gambar 2. Persebaran status trofik area penelitian berdasarkan indeks TSI

Tabel 3. Perbedaan nilai indeks TSI antara area pesisir dan transisi di lokasi penelitian

Lokasi	Nilai	Indeks				
		TSI(SD)	TSI(CHL)	TSI(TP)	TSI(TN)	TSI
Area Pesisir	rata-rata	58,928	49,053	37,555	74,835	55,093
	min	44,169	42,883	14,018	36,791	41,131
	max	73,204	56,658	65,891	122,278	68,950
Area Transisi	rata-rata	54,203	46,386	37,165	72,918	52,668
	min	44,169	37,883	10,483	46,793	39,996
	max	65,140	53,055	70,090	109,285	64,394

**Gambar 3.** Boxplot nilai *Trophic State Index* (TSI) pada area pesisir dan area transisi pesisir-laut yang menunjukkan perbedaan median dan sebaran status trofik perairan di (a) area pesisir dan (b) area transisi

Sebaran nilai TSI pada Gambar 3a memperlihatkan bahwa area pesisir memiliki rentang nilai yang lebih lebar dibandingkan area transisi, yang tercermin dari whisker dan keberadaan nilai ekstrem pada beberapa komponen indeks. Kondisi ini menunjukkan bahwa status trofik di area pesisir bersifat lebih heterogen dan dipengaruhi oleh faktor lokal. Sebaliknya, sebaran nilai TSI pada area transisi (Gambar 3b) cenderung lebih sempit dan homogen.

Jika ditinjau berdasarkan komponen penyusun indeks, TSI(TN) menunjukkan nilai rata-rata tertinggi pada kedua zona, yaitu 74,835 di area pesisir dan 72,918 di area transisi. Tingginya nilai TSI(TN) mengindikasikan bahwa nutrisi nitrat merupakan faktor yang dominan dalam menentukan tingkat eutrofikasi perairan di lokasi penelitian. Rentang nilai TSI(TN) yang lebar,

khususnya di area pesisir dengan nilai maksimum mencapai 122,278, menunjukkan adanya masukan nitrat yang sangat tinggi pada titik-titik tertentu.

Komponen TSI(SD) dan TSI(CHL) menunjukkan nilai rata-rata yang lebih rendah dibandingkan TSI(TN), namun tetap memberikan kontribusi terhadap nilai TSI total. Nilai TSI(SD) yang relatif tinggi pada kedua zona mencerminkan rendahnya transparansi perairan, yang berkaitan dengan tingginya muatan sedimen tersuspensi dan kekeruhan perairan pesisir. Sementara itu, nilai TSI(CHL) yang berada pada kisaran menengah menunjukkan respons produktivitas fitoplankton terhadap ketersediaan nutrisi bervariasi antar-lokasi secara spasial. Variasi ini diduga dipengaruhi oleh perbedaan masukan nutrisi dari daratan dan muara sungai, tingkat pengenceran oleh massa air laut, serta kondisi pencahayaan dan

pencampuran vertikal, sehingga menghasilkan tingkat biomassa fitoplankton yang berbeda di setiap lokasi.

Komponen TSI(TP) memiliki nilai rata-rata paling rendah dibandingkan komponen lainnya, baik di area pesisir (37,555) maupun area transisi (37,165). Meskipun demikian, rentang nilai TSI(TP) yang cukup lebar, terutama pada area transisi dengan nilai maksimum mencapai 70,090, mengindikasikan bahwa konsentrasi fosfat dapat meningkat secara lokal dan berkontribusi terhadap eutrofikasi pada titik-titik tertentu.

Tutupan Lahan dan Keterkaitannya dengan Status Trofik

Persentase luasan tutupan lahan di Kota Pekalongan yang ditunjukkan pada Gambar 4 memperlihatkan dominasi lahan terbangun sebesar 31%, diikuti oleh tambak (20%), vegetasi lain (18%), pertanian (11%), mangrove (10%), dan rawa (10%). Komposisi tutupan lahan tersebut mencerminkan tingginya intensitas aktivitas manusia di wilayah daratan pesisir, khususnya aktivitas permukiman, infrastruktur, dan budidaya perairan, yang berpotensi memberikan tekanan terhadap kualitas perairan pesisir.

Dominasi lahan terbangun mengindikasikan tingginya potensi limpasan permukaan yang membawa nutrisi anorganik dan bahan organik ke badan air, terutama melalui sistem drainase perkotaan dan aliran sungai. Limpasan dari kawasan permukiman umumnya mengandung nitrogen dan fosfor yang berasal dari limbah domestik, aktivitas rumah tangga, serta sisa bahan organik, yang selanjutnya dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi di perairan pesisir (Tao *et al.*, 2021). Kondisi ini sejalan dengan nilai klorofil-*a* dan nutrisi yang relatif lebih tinggi di area pesisir serta nilai Trophic State Index (TSI) yang cenderung lebih besar dibandingkan area transisi, sebagaimana juga dilaporkan pada berbagai perairan pesisir yang dipengaruhi tekanan perkotaan (Sá *et al.*, 2021; Dar *et al.*, 2021).

Keberadaan lahan tambak yang cukup luas juga berpotensi berkontribusi terhadap masukan nutrisi ke perairan pesisir. Aktivitas budidaya perikanan di tambak umumnya melibatkan pemberian pakan dan pupuk sebagai sumber utama nutrisi tersebut. Dalam sistem tambak, pemberian pakan dan pupuk dapat menyumbang hingga 99% dari total input nutrisi, dengan pakan dan pupuk sebagai sumber dominan nitrogen dan fosfor

(Barbosa *et al.*, 2024). Namun, hanya sebagian dari nutrisi ini yang benar-benar diserap oleh ikan, misalnya ikan mengasimilasi maksimal 45% nitrogen dan 60% fosfor, sedangkan sisanya mengendap di dasar tambak atau terbuang melalui keluaran air tambak (pembuangan atau rembesan) ke perairan sekitarnya (Barbosa *et al.*, 2024). Masukan nutrisi dari aktivitas tambak ini diketahui dapat memperkuat proses eutrofikasi lokal, terutama pada perairan pesisir yang relatif dangkal dan memiliki sirkulasi terbatas (Seidel *et al.*, 2021).

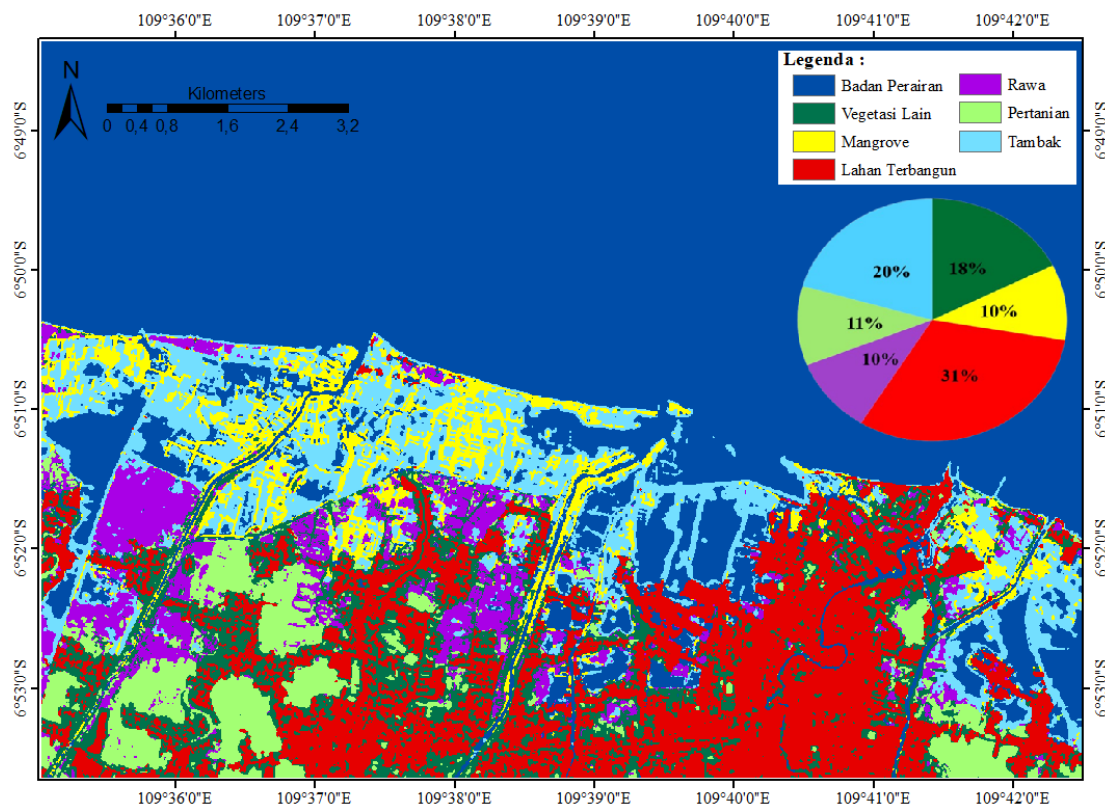
Lahan pertanian yang mencakup sekitar 11% wilayah daratan juga berperan sebagai sumber nutrisi, khususnya melalui penggunaan pupuk berbasis nitrogen dan fosfor. Dalam konteks global dan regional, limpasan nutrisi dari lahan pertanian merupakan salah satu penyebab utama eutrofikasi yang merusak kualitas air dan keseimbangan ekosistem pesisir. Studi di berbagai wilayah menunjukkan bahwa aktivitas manusia di daratan, termasuk intensifikasi penggunaan pupuk dan perubahan penggunaan lahan, meningkatkan beban nitrogen dan fosfor ke laut pantai melalui limpasan dan aliran permukaan (Kelly *et al.*, 2021; Rajaei *et al.*, 2021). Beban nutrisinya dapat bersifat episodik, terpicu oleh kejadian hujan deras yang meningkatkan limpasan dan aliran permukaan, sehingga membawa pupuk terlarut dan nutrisi lainnya dengan cepat ke perairan pesisir. Nitrogen yang berlimpah ini terutama dalam bentuk nitrat sering diperantarai melalui limpasan dari tanah pertanian yang diberi pupuk, dan fosfor juga disumbangkan oleh partikel tersuspensi yang terbawa oleh aliran permukaan (Oliver *et al.*, 2024).

Di sisi lain, keberadaan mangrove dan rawa memiliki peran ekologis yang berbeda dibandingkan tutupan lahan antropogenik. Ekosistem mangrove dan rawa berfungsi sebagai penyangga alami yang mampu menahan sedimen, menyerap nutrisi, serta memperlambat aliran limpasan sebelum mencapai perairan laut (Alhassan and Aljahdali, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Namun, proporsi mangrove dan rawa yang relatif lebih kecil dibandingkan lahan terbangun dan tambak menunjukkan bahwa fungsi penyangga alami tersebut kemungkinan belum cukup optimal dalam menekan beban nutrisi yang masuk ke perairan pesisir Kota Pekalongan.

Keterkaitan antara tutupan lahan daratan dan status trofik perairan tercermin pada perbedaan nilai TSI antara area pesisir dan area transisi. Nilai

Tabel 4. Luasan tutupan lahan Kota Pekalongan pada tahun 2024

Klasifikasi Tutupan Lahan	Luasan (km ²)
Vegetasi Lain	9,985
Mangrove	5,728
Lahan Terbangun	17,671
Rawa	5,724
Pertanian	5,991
Tambak	11,633

**Gambar 4.** Peta tutupan lahan 2024 di wilayah pesisir Kota Pekalongan sebagai gambaran distribusi penggunaan lahan daratan yang berpotensi memengaruhi kondisi trofik perairan pesisir.

TSI yang relatif lebih tinggi dan lebih bervariasi di area pesisir menunjukkan bahwa pengaruh daratan masih menjadi faktor dominan dalam menentukan tingkat eutrofikasi perairan. Sebaliknya, area transisi yang lebih jauh dari daratan dan lebih dipengaruhi oleh proses oseanografis menunjukkan nilai TSI yang lebih rendah dan lebih homogen, yang mengindikasikan adanya proses pengenceran dan pencampuran massa air laut.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perairan pesisir Kota Pekalongan berada pada

status trofik mesotrofik hingga eutrofik dengan dominasi kondisi eutrofik. Sementara itu, area transisi pesisir-laut umumnya berada pada status mesotrofik hingga eutrofik dengan tingkat eutrofikasi yang lebih rendah dibandingkan wilayah pesisir. Secara spasial, nilai TSI memperlihatkan pola gradien darat-laut yang jelas, dimana nilai TSI tertinggi terkonsentrasi di area pesisir yang berdekatan dengan muara sungai dan kawasan daratan terbangun, kemudian cenderung menurun ke arah area transisi yang lebih dipengaruhi oleh massa air laut. Pola variasi spasial tersebut sejalan dengan karakteristik kualitas

perairan, dimana area pesisir dicirikan oleh produktivitas biologis yaitu konsentrasi klorofil-a dan nutrien yang lebih tinggi, kecerahan yang lebih rendah, serta variasi parameter kimia yang lebih besar, sementara area transisi menunjukkan kondisi perairan yang relatif lebih homogen. Keterkaitan antara dominasi tutupan lahan terbangun (permukiman, kawasan industri, dan infrastruktur) dan tambak dengan tingginya nilai TSI di area pesisir mengindikasikan adanya masukan nutrien dari daratan merupakan faktor utama yang mengendalikan status eutrofikasi perairan pesisir Kota Pekalongan, sehingga pengelolaan dan mitigasi eutrofikasi perlu difokuskan pada pengendalian sumber nutrien dari daratan, khususnya di wilayah muara dan zona pesisir yang paling rentan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Universitas Diponegoro, Indonesia, dalam rangka Program Peningkatan Reputasi Publikasi Internasional (RPIBT) dengan nomor hibah 609-115/UN7.D2/PP/VIII/2023 dan 609-115/UN7.D2/PP/VII/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Alali, A.M., Salih, A. & Hassaballa, A. 2023. Geospatial-based analytical hierarchy process (AHP) and weighted product model (WPM) techniques for mapping and assessing flood susceptibility in the Wadi Hanifah drainage basin, Riyadh region, Saudi Arabia. *Water*, 15(10): 1943. doi: 10.3390/w15101943
- Alhassan, A.B. & Aljahdali, M.O. 2021. Nutrient and physicochemical properties as potential causes of stress in mangroves of the central Red Sea. *PLoS ONE*, 16(12): e0261620. doi: 10.1371/journal.pone.0261620
- Amoakoh, A.O., Aplin, P., Awuah, K.T., Delgado-Fernandez, I., Moses, C., Alonso, C.P., Kankam, S. & Mensah, J.C. 2021. Testing the contribution of multi-source remote sensing features for random forest classification of the Greater Amanzule tropical peatland. *Sensors*, 21(10): 3399. doi: 10.3390/s21103399
- Azman, M.H.A., Hamdan, R., Md-Ali, Z. & Siddiqui, Z. 2023. Water quality monitoring for trophic state of Tasik Kemajuan, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 14(3): 015. doi: 10.30880/ijscet.2023.14.03. 015
- Barbosa, A.P.D., Kosten, S., Oliveira-Junior, E.S. & Muniz, C.C. 2024. From feed to fish: nutrients' fate in aquaculture systems. *Applied Sciences*, 14(14): 6056. doi: 10.3390/app14146056
- Browning, T.J., Dai, M., Liu, X., Zhou, K., Zhang, R., Cai, Y., Liu, J., Cao, Z., Zhou, Y., Xu, F., Wen, Z., Zhu, Y., Achterberg, E.P. & Shi, D. 2021. Nutrient co-limitation in the subtropical Northwest Pacific. *Limnology and Oceanography Letters*, 7(1): 52–61. doi: 10.1002/lol2.10205
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2): 361–369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361
- Dar, S.A., Bhat, S.U. & Rashid, I. 2021. Land system transformations govern the trophic status of an urban wetland ecosystem: perspectives from remote sensing and water quality analysis. *Land Degradation & Development*, 32(14): 4087–4104. doi: 10.1002/ldr.3924
- Dzakwan, A.Z., Endrawati, H. & Ario, R. 2023. Analisis konsentrasi nitrat dan fosfat terhadap kelimpahan fitoplankton di perairan Sengkarang Pekalongan. *Journal of Marine Research*, 12(4): 571–578. doi: 10.14710/jmr.v12i4.35259
- Fernández-González, C., Tarran, G.A., Schuback, N., Woodward, E.M.S., Aristegui, J. & Marañón, E. 2022. Phytoplankton responses to changing temperature and nutrient availability are consistent across the tropical and subtropical Atlantic. *Communications Biology*, 5(1): 03971. doi: 10.1038/s42003-022-03971-z
- Foo, S.C., Yusoff, F.M. & Khong, N.M.H. 2023. Storage and degradation kinetics of physicochemical and bioactive attributes in microalgal-derived fucoxanthin-rich microcapsules. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15: 100823. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100823
- Hermans, M., Astudillo Pascual, M., Slomp, C.P., Conley, D.J., Lenstra, W.K. & Behrends, T. 2021. Coupled dynamics of iron, manganese, and phosphorus in brackish coastal sediments populated by cable bacteria. *Limnology and Oceanography*, 66(7): 2611–2631. doi: 10.1002/lno.11776
- Hu, B., Ding, Q., Li, Y., Xu, Y., Cheng, Q., Huang, X. & Bai, L. 2021. Improving urban land cover classification with combined use of Sentinel-2 and Sentinel-1 imagery. *ISPRS*

- International Journal of Geo-Information*, 10(8): 533. doi: 10.3390/ijgi10080533
- Huang, S., Tang, Q., Liu, J., Shang, D., Liu, R. & Xu, H. 2021. Phosphorus fractions and release factors in surface sediments of a tailwater river in Xinmi City. *Sustainability*, 13(10): 5417. doi: 10.3390/su13105417
- Isa, A.R., Yusoff, I.M. & Abdul Rahman, R. 2024. Lake water quality assessment through GIS-based interpolation method: case study of Beris Dam, Kedah, Malaysia. *Trends in Sciences*, 21(4): 7333. doi: 10.48048/tis.2024.7333
- Ismanto, A., Atmodjo, W., Safinatunnajah, N., Siagian, H., Hadibarata, T., Widada, S. & Satriadi, A. 2023. Heavy metal contamination in the marine environment of Pekalongan, Indonesia. *Environmental Quality Management*, 33(4): 37–46. doi: 10.1002/tqem.21978
- Jafarzadeh, A., Matta, A., Moghadam, S.V., Dessouky, S., Hutchinson, J. & Kapoor, V. 2024. Evaluation of stormwater runoff pollutant distributions combined with land-use information in a regional karst aquifer in Texas, USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11): 13308. doi: 10.1007/s10661-024-13308-4
- Karima, Z., Sugianto, D.N. & Zainuri, M. 2024. Konsentrasi dan sebaran klorofil-a sebagai indikator kesuburan perairan di muara Sungai Bedahan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 6(1): 23–32. doi: 10.14710/ijoce.v6i1.21633
- Kelly, N.E., Guijarro-Sabaniel, J. & Zimmerman, R. 2021. Anthropogenic nitrogen loading and risk of eutrophication in the coastal zone of Atlantic Canada. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 263: 107630. doi: 10.1016/j.ecss.2021.107630
- Kumar, P.S., Muthukumar, C., Santhanakumar, J., Dharani, G., Venkatnarayanan, S., Pandey, V., Jebakumar, J.P.P., James, R.A. & Jha, D.K. 2023. Assessment of phytoplankton diversity along the southeast coast of India. *Frontiers in Marine Science*, 10: 1215627. doi: 10.3389/fmars.2023.1215627
- Kunarso, K., Helmi, M., Satriadi, A., Irwani, I., Prayogi, H., Wirasatriya, A. & Munandar, B. 2019. Impact of climate variability to aquatic productivity and fisheries resources in Jepara waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 246(1): 012021. doi: 10.1088/1755-1315/246/1/012021
- Lazar, L., Boicenco, L., Bisinicu, E., Vlas, O., Marin, O., Filimon, A., Abaza, V. & Pantea, E. 2024. Black Sea eutrophication comparative analysis. *Sustainability*, 16(12): 5146. doi: 10.3390/su16125146
- Lew, S., Kobus, S., Glińska-Lewczuk, K., Obolewski, K., Burandt, P. & Kulesza, K. 2022. Salinity as a determinant structuring microbial communities in coastal lakes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8): 4592. doi: 10.3390/ijerph19084592
- Li, J., Wang, Y.P. & Gao, S. 2024. In situ hydrodynamic observations on reef flats in the Nansha Islands. *Frontiers in Marine Science*, 11: 1375301. doi: 10.3389/fmars.2024.1375301
- Li, M., Lu, J., Dai, Y., Bao, K., Liu, S., Yan, K., Wu, S., Yuan, Q. & Wang, H. 2024. Distribution and ecological risk assessment of nutrients and heavy metals in Yantai coastal zone. *Water*, 16(5): 760. doi: 10.3390/w16050760
- Li, R., Liang, L., Huang, X., Li, Z., Pan, Y., Wu, H., Xiao, K. & Zhao, G. 2024. Comprehensive assessment of eutrophication in multifunctional reservoirs. *Water*, 16(12): 1752. doi: 10.3390/w16121752
- Liang, H., Deng, X., Zhang, J., Lu, C., Chen, J., Liang, Y., Zhang, P., Wang, Z. & Long, C. 2024. Nutrient development in Zhanjiang Bay over 20 years. *Frontiers in Marine Science*, 11: 1373716. doi: 10.3389/fmars.2024.1373716
- Liu, J., Hetland, R., Yang, Z., Wang, T. & Sun, N. 2024. Response of salt intrusion in a tidal estuary to climatic forcing. *Environmental Research Letters*, 19(7): 074019. doi: 10.1088/1748-9326/ad4fa1
- Luca, G.D., Silva, J.M.N., Di Fazio, S. & Modica, G. 2022. Integrated Sentinel-1 and Sentinel-2 land cover mapping. *European Journal of Remote Sensing*, 55(1): 52–70. doi: 10.1080/22797254.2021.2018667
- Luo, Y., Zhang, J.W., Gao, C., Lin, Z.Y., Yuan, Z., Liu, J.W. & Wu, J.W. 2022. Comprehensive assessment of eutrophication in Xiamen Bay. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20): 13055. doi: 10.3390/ijerph192013055
- Marin, V., Colas, F., Boulêtreau, S. & Cucherousset, J. 2025. Relative effects of eutrophication and warming on freshwater

- ecosystems. *Global Change Biology*, 31(8): 70410. doi: 10.1111/gcb.70410
- Meter, K.J.V., Van Cappellen, P., Mcleod, M.M., Tenkouano, G.T., Liu, J., Basu, N.B. & Hall, R.I. 2021. Watershed phosphorus legacies beyond mass balance. *Water Resources Research*, 57(10): e2020WR029316. doi: 10.1029/2020WR029316
- Miao, W., Lin, T., Yan, Y., Zhang, D., Bao, Z., Zhang, H., Wang, S. & Jiang, Z. 2024. Assembly mechanisms of phytoplankton under eutrophication. *mSphere*, 9(7): e00366-24. doi: 10.1128/msphere.00366-24
- O'Brien, P.A.J., Polovodova Asteman, I. & Bouchet, V.M.P. 2021. Benthic foraminiferal indices for environmental assessment. *Water*, 13(14): 1898. doi: 10.3390/w13141898
- Oliver, A.C., Cantelon, J.A., Kurylyk, B.L., Smith, K.A. & Jamieson, R.C. 2024. Intertidal spring dynamics and coastal nutrient loading. *Hydrological Processes*, 38(5): e15144. doi: 10.1002/hyp.15144
- Parsons, T.R., Maita, Y. & Laili, C.M. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Oxford: Pergamon Press. 173 p. doi: 10.25607/OBP-1830
- Pein, J., Daewel, U., Van Beusekom, J.E.E., Staneva, J., Sanders, T., Eisele, A., Schrum, C. & Stanev, E.V. 2021. Seasonal stratification and biogeochemical turnover in a dredged estuary. *Frontiers in Marine Science*, 8: 623714. doi: 10.3389/fmars.2021.623714
- Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N. & Belward, A.S. 2016. High-resolution mapping of global surface water. *Nature*, 540: 418–422. doi: 10.1038/nature20584
- Pessarrodona, A., Filbee-Dexter, K., Krumhansl, K.A., Pedersen, M.F., Moore, P.J. & Wernberg, T. 2022. Global dataset of seaweed net primary productivity. *Scientific Data*, 9(1): 01554. doi: 10.1038/s41597-022-01554-5
- Pradiva, Z.A., Zainuri, M. & Rochaddi, B. 2023. Sebaran fosfat terhadap klorofil-a di perairan Kota Pekalongan. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(4): 249–255. doi: 10.14710/ijoce.v5i4.17543
- Rajaei, F., Dudic, B., Novicevic, R., Galalizadeh, S., Ahmadisharaf, E., Dahmardeh Behrooz, R. & Spalevic, V. 2021. Integrated watershed management measures to minimize land use change impacts. *Water*, 13(15): 2039. doi: 10.3390/w13152039
- Ridarto, A.K.Y., Zainuri, M., Helmi, M., Kunarso, K., Baskoro, B., Maslukah, L., Endrawati, H., Handoyo, G. & Koch, M. 2023. TSS concentration dynamics in Pekalongan waters. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(1): 142–152. doi: 10.14710/buloma.v12i1.51454
- Román, A., D'Amico, S., Tovar-Sánchez, A., Gauci, A., Colica, E., Deidun, A., Navarro, G. & Caballero, I. 2022. UAV-based multispectral water-quality monitoring. *Remote Sensing*, 15(1): 237. doi: 10.3390/rs15010237
- Sá, A.K.D.D.S., Costa, D.S., Cavalcanti, L.F., Oliveira, A.L.L., Serejo, J.H.F., Cutrim, M.V.J. & Ferreira, F.S. 2021. Algal blooms and trophic state in a tropical estuary. *Ocean and Coastal Research*, 69: e006. doi: 10.1590/2675-2824069.20-006
- Sarah, D. & Soebowo, E. 2018. Land subsidence threats in North Coast of Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1): 012042. doi: 10.1088/1755-1315/118/1/012042
- Saturday, A., Machiwa, J., Pamba, S. & Lyimo, T.J. 2022. Trophic state variations of Lake Bunyonyi. *Applied Water Science*, 13(1): 01816. doi: 10.1007/s13201-022-01816-y
- Seidel, L., Broman, E., Turner, S., Ståhle, M. & Dopson, M. 2021. Eutrophication and warming effects on bacterial communities. *Scientific Reports*, 11(1): 02725. doi: 10.1038/s41598-021-02725-x
- Stockenreiter, M., Isanta Navarro, J., Stibor, H. & Buchberger, F. 2021. Phytoplankton community shifts under mixing depth and light quality. *Freshwater Biology*, 66(11): 2145–2157. doi: 10.1111/fwb.13822
- Tao, W., Dong, Y., Lou, Q., Fu, T. & Niu, L. 2021. Nutrient pollution dynamics in the Pearl River Estuary. *Frontiers in Marine Science*, 8: 713907. doi: 10.3389/fmars.2021.713907
- Vigouroux, G., Kari, E., Beltrán-Abaunza, J.M., Uotila, P., Yuan, D. & Destouni, G. 2021. Trend correlations for coastal eutrophication drivers. *Science of the Total Environment*, 779: 146367. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146367
- Wahl, C., Kaller, M. & Diaz, R. 2021. Floating fern invasion alters macroinvertebrate structure. *Hydrobiologia*, 848(10): 2523–2537. doi: 10.1007/s10750-021-04571-4
- Wei, H., Zhao, L., Zhang, H., Lu, Y., Yang, W. & Song, G. 2021. Summer hypoxia in Bohai Sea. *Anthropocene Coasts*, 4(1): 77–86. doi: 10.1139/anc-2020-0017

- Zelege, T.B., Soeprbowati, T.R., Adissu, S. & Warsito, B. 2024. Effect of water hyacinth invasion on Lake Tana water quality. *Chemistry and Ecology*, 41(3): 297–313. doi: 10.1080/02757540.2024.2432886
- Zhang, X., Zhao, J., Wang, G.Y., Yao, C., Lin, X., Gong, J., Tan, W. & Zhang, B. 2023. Dynamics of benthic nitrate reduction in mariculture zones. *Environmental Science & Technology*, 57(40): 15014–15025. doi: 10.1021/acs.est.3c03994
- Zhang, Z., Kashif, M., Nie, S., Su, G., Li, J., Yan, B., Mo, S., Sang, Y. & Jiang, C. 2022. *Spartina alterniflora* invasion effects on nutrient cycling. *Microbiology Spectrum*, 10(3): e00682-21. doi: 10.1128/spectrum.00682-21
- Zielinski, O., Löhmus, K., Wollschläger, J., Schulz, J., Schwalfenberg, K., Massmann, G., Pollmann, T., Winkler, H., Engelen, B., Albinus, M., Lehnert, C., Meyerjürgens, J., Feenders, C., Waska, H., Pieck, D., Fock, S., Braun, A., Lübken, A., Thölen, C. & Stone, J. 2022. The Spiekeroog coastal observatory. *Frontiers in Marine Science*, 8: 754905. doi: 10.3389/fmars.2021.754905