Volume 7, No. 4, 2026

ISSN 2723-7583 (Online)

Kualitas Perairan Kota Makassar dengan Metode Indeks Pencemaran (IP)

Water Quality in Makassar Coastal Area Based on Pollution Index method (PI)

Hendra Hasim[1245], Muhammad Farid Samawi[25], Shinta Werorilangi[145], Arniati Massinai[35]

[1]Marine Ecotoxicology Laboratory, Marine Science Departmen, Hasanuddin University
[2]Chemical Oceanography Laboratory, Marine Science Departmen, Hasanuddin University
[3]Marine Microbiology Laboratory, Marine Science Departmen, Hasanuddin University
[4]Marine Plastic Research Group, Thematic Research Group Hasanuddin University
[5]*Marine Departmen, Faculty of Marine Science and Fishery, Hasanuddin University, Perintis Kemerdekaan KM 10 Makassar (90245), South Sulawesi, Indonesia.*

*Corresponding author email: *hendrahasim@unhas.ac.id*

Submitted: 22 July 2026/ Revised: 29 July 2026 / Accepted: 03 Agustus 2026

http://doi.org/10.21107/juvenil.v7i4.34325

ABSTRAK

Peningkatan tekanan antropogenik di perairan pesisir Kota Makassar berpotensi menurunkan fungsi ekologis dan kualitas lingkungan, sehingga dibutuhkan penelitian untuk menilai kualitas perairan pesisir Kota Makassar, menggunakan metode Indeks Pencemaran (IP) guna mengkuantifikasi tingkat pencemaran serta menyediakan dasar ilmiah bagi pengelolaan lingkungan pesisir yang berkelanjutan. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2022 di wilayah pesisir Makassar. Dalam penelitian ini kualitas air yang diukur yaitu padatan tersuspensi total (Total Suspended Solid), salinitas, suhu, derajat keasaman (pH), oksigen terlarut (Dissolved Oxygen), Biological Oxygen Demand (BOD), amoniadan fosfat. Status pencemaran pada perairan pesisir Makassar ditentukan menggunakan indeks pencemaran. Data hasil pengukuran kualitas perairan pada empat stasiun pengamatan yaitu CPI, Losari, Popsa, dan Paotere yang menunjukkan adanya variabilitas spasial yang cukup signifikan pada parameter fisika, kimia, dan biologis. Variasi ini mencerminkan perbedaan karakteristik lingkungan serta tekanan antropogenik di masing-masing lokasi pesisir, yang secara umum berada dalam kawasan pesisir Makassar yang dikenal memiliki intensitas aktivitas urban, pelabuhan, dan reklamasi yang tinggi. Hasil analisis Indeks Pencemaran (IP) menunjukkan adanya heterogenitas spasial yang kuat pada kualitas perairan pesisir Kota Makassar, dengan nilai IP berkisar antara 3,53 hingga 27,62. Secara metodologis, pendekatan IP berbasis rasio konsentrasi terhadap baku mutu merepresentasikan tingkat deviasi dari kondisi referensi, sehingga nilai yang tinggi mencerminkan tekanan lingkungan yang telah melampaui kapasitas asimilatif perairan. Dalam kerangka ini, IP tidak hanya berfungsi sebagai indikator status mutu air, tetapi juga sebagai proksi tekanan ekosistem yang terakumulasi. Kesimpulan penelitian menunjukkan bahwa parameter fisika-kimia yang diukur mengindikasikan bahwa aktivitas pesisir seperti pelabuhan, permukiman, dan limbah domestik berkontribusi signifikan terhadap penurunan kualitas perairan, sehingga diperlukan pengelolaan terpadu untuk mengendalikan beban pencemar di wilayah tersebut.

Kata kunci: *Pesisir, kualitas air, makassar, indeks pencemaran*

ABSTRACT

Increasing anthropogenic pressure in the coastal waters of Makassar City may compromise ecological functions and environmental quality. Therefore, an assessment of coastal water quality is needed using the Pollution Index (PI) to quantify the degree of pollution and provide a scientific basis for sustainable coastal environmental management. This study was conducted in October 2022 in the coastal waters of Makassar. In this study, the measured water quality parameters included Total Suspended Solids (TSS), salinity, temperature, pH, Dissolved Oxygen (DO), Biological Oxygen Demand (BOD), ammonia, and phosphate. The pollution status of the coastal waters of Makassar City was determined using the Pollution Index method. Water quality measurements at the four monitoring stations, CPI, Losari, Popsa, and Paotere, revealed significant spatial variations in the physical, chemical, and biological parameters. These variations reflect differences in environmental characteristics and anthropogenic pressures at each of these coastal locations, all of which are situated within the Makassar coastal zone,

which is characterized by intensive urban, port, and land reclamation activities. Pollution Index (PI) analysis revealed strong spatial heterogeneity in the water quality of Makassar's coastal waters, with PI values ranging from 3.53 to 27.62. Methodologically, the PI approach, based on the ratio of observed concentrations to water quality standards, represents the degree of deviation from reference conditions; thus, higher values indicate environmental pressures that exceed the assimilative capacity of the water. In this framework, the PI functions not only as an indicator of water quality status but also as a proxy for cumulative ecosystem stress. The study concluded that the measured physicochemical parameters indicated that coastal activities, such as port operations, settlements, and domestic waste, significantly contributed to the deterioration of water quality, highlighting the need for integrated management to control pollutant loads in the area.

Keywords: *Coastal, water quality, makassar, pollution index*

PENDAHULUAN

Perairan pesisir merupakan sumber daya alam yang vital bagi kehidupan manusia dan ekosistem laut. Kualitas perairan sangat mempengaruhi kesehatan lingkungan serta keberlanjutan sumber daya perikanan dan pariwisata di wilayah pesisir (Akbar & Pratiwi, 2023). Di Kota Makassar, perubahan cepat dalam penggunaan lahan, pertumbuhan penduduk, dan aktivitas industri telah meningkatkan tekanan terhadap ekosistem pesisir dan kualitas perairannya (Arifin *et al.,* 2023). Studi tentang kualitas perairan di Kota Makassar menjadi semakin penting untuk memahami dampak dari aktivitas manusia terhadap lingkungan pesisir ini. Dampak dari berbagai macam aktivitas manusia terhadap lingkungan pesisir akan menyebabkan pencemaran yang mengganggu fungsi ekologi perairan.

Pencemaran diidentifikasi sebagai akibat dari masuknya berbagai macam bahan kimia, polutan, limbah dan buangan dari hasil kegiatan manusia yang menyebabkan perubahan dan menurunnya fungsi lingkungan (Verma *et al.,* 2020). Masukan tersebut dapat mengubah karakteristik fisika, kimia, dan biologi perairan. Pencemaran perairan pada dasarnya terjadi ketika bahan atau energi yang masuk ke lingkungan menyebabkan perubahan kualitas perairan hingga melampaui kemampuan lingkungan untuk mempertahankan kondisi alaminya. Hal ini menunjukkan bahwa pencemaran tidak hanya ditentukan oleh keberadaan satu jenis polutan, tetapi merupakan hasil interaksi berbagai tekanan antropogenik yang memengaruhi sejumlah parameter kualitas perairan secara simultan.

Perubahan kualitas perairan dapat dievaluasi melalui parameter fisika, kimia, dan biologi yang merepresentasikan karakteristik serta respons ekosistem terhadap masukan pencemar (Glibert *et al.,* 2022). Parameter fisika seperti suhu, salinitas dan *total suspended solids* (TSS) menggambarkan karakteristik massa air dan keberadaan material tersuspensi. Peningkatan TSS umumnya berkaitan dengan limpasan daratan, erosi, aktivitas konstruksi, pengerukan, dan resuspensi sedimen. Material tersuspensi tersebut dapat meningkatkan kekeruhan dan mengurangi penetrasi cahaya ke dalam kolom air serta menjadi media transport bagi bahan organik dan kontaminan lainnya. Parameter berikutnya terkait biologi dan kimia menjadi indikator penting dalam penilaian kualitas perairan karena menggambarkan kondisi oksigenasi, beban bahan organik, dan tingkat pengayaan nutrien. *Dissolved oxygen* (DO) menunjukkan ketersediaan oksigen bagi organisme akuatik, sedangkan *biochemical oxygen demand* (BOD) mencerminkan kebutuhan oksigen untuk proses penguraian bahan organik; peningkatan masukan bahan organik umumnya meningkatkan BOD dan konsumsi oksigen sehingga berpotensi menurunkan DO. Selain itu, nutrien seperti amonia dan fosfat yang berasal dari limbah domestik, industri, pertanian, dan kegiatan budidaya dapat menyebabkan pengayaan nutrien berlebihan (*eutrofikasi*), meningkatkan biomassa primer, dan selanjutnya memperbesar konsumsi oksigen melalui respirasi serta dekomposisi. Oleh karena itu, keterkaitan antara DO, BOD, dan nutrien perlu dianalisis secara terpadu untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai tekanan antropogenik dan kondisi kualitas perairan.

Kompleksitas hubungan antarparameter tersebut menjadi salah satu tantangan dalam menentukan status pencemaran perairan. Evaluasi berdasarkan satu parameter dapat memberikan informasi yang spesifik, tetapi tidak mampu menggambarkan kondisi kualitas perairan secara keseluruhan. Suatu lokasi dapat memiliki beberapa parameter yang memenuhi baku mutu tetapi pada saat yang sama mengalami tekanan dari parameter lainnya. Oleh sebab itu, diperlukan pendekatan

yang mampu mengintegrasikan berbagai parameter menjadi suatu indikator yang lebih sederhana, kuantitatif, dan mudah dibandingkan antar lokasi. *Pollution Index* (PI) / Indeks Polusi (IP) merupakan dua pendekatan yang dikembangkan untuk tujuan tersebut. *Pollution Index* (PI/IP) memiliki keunggulan praktis karena menilai kondisi perairan melalui perbandingan hasil pengukuran parameter dengan baku mutu yang ditetapkan untuk peruntukan tertentu. Pendekatan ini memungkinkan beberapa parameter kualitas perairan diintegrasikan untuk menghasilkan nilai status pencemaran yang dapat dibandingkan antarstasiun. Dengan demikian, PI/IP sesuai digunakan pada wilayah pesisir perkotaan yang memiliki sumber pencemar heterogen dan memerlukan identifikasi lokasi dengan tekanan pencemaran relatif lebih tinggi.

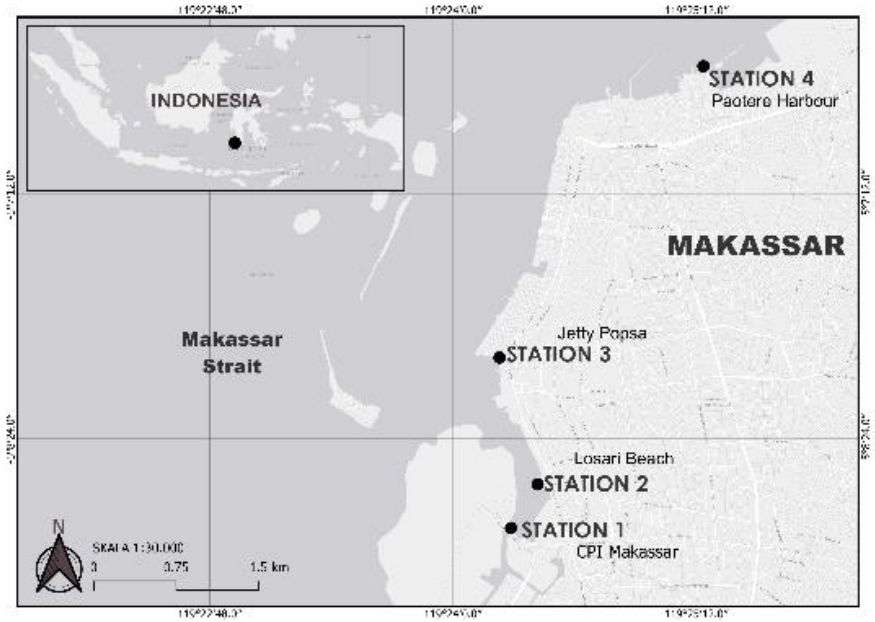
Studi terbaru menunjukkan bahwa Kota Makassar menghadapi tantangan signifikan terkait kualitas perairan, terutama di sekitar wilayah pesisir yang menjadi pusat aktivitas ekonomi dan sosial (Suleman *et al.,* 2018). Penelitian yang dilakukan oleh Edward *et al.* (2021) menyoroti peningkatan konsentrasi logam berat dalam sedimen pesisir sebagai dampak dari aktivitas industri dan perkotaan. Noor *et al.* (2021a) melaporkan keberadaan dan variasi spasial logam berat pada perairan dan sedimen pesisir Makassar, sedangkan Polapa *et al.* (2022) menemukan adanya logam berat pada perairan dan sedimen serta menggunakan indeks untuk mengevaluasi kondisi kualitas perairan. Firnanelty *et al.* (2022) mengidentifikasi kontaminasi beberapa logam berat di kawasan reklamasi Pantai Losari. Penelitain yang dilakukan oleh Fatma *et al.* (2025) menunjukkan pesisir Kota Makassar mengalami pencemaran ringan. Penelitian-penelitian tersebut membuktikan adanya tekanan pencemaran di berbagai lokasi pesisir Makassar. *Pollution Index* (PI/IP) digunakan untuk mengintegrasikan kondisi kualitas perairan yang terbentuk dari gradien aktivitas antropogenik dan hubungan antarparameter fisika-kimia-biologi pada wilayah pesisir Kota Makassar. Penelitian ini menempatkan parameter kualitas air sebagai suatu sistem yang saling berkaitan dalam merespons tekanan antropogenik.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis terhadap kualitas perairan di pesisir Kota Makassar dengan menggunakan metode indeks pencemaran (*Pollution Index*). Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diidentifikasi tingkat pencemaran perairan dan faktor-faktor yang menyebabkannya. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi untuk mendukung upaya-upaya manajemen lingkungan yang berkelanjutan di wilayah pesisir Kota Makassar.

MATERI DAN METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2022 di wilayah pesisir Kota Makassar pada 4 stasiun pengambilan contoh air. Urutan lokasi stasiun penelitian membujur dari selatan ke utara yaitu stasiun 1 (center point of Indonesia), stasiun 2 (pantai losari), stasiun 3 (jetty popsa) dan stasiun 4 (pelabuhan paotere) seperti tertera pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian pada pesisir Kota Makassar

Metode dan Teknik Pengambilan Data

Metode pengukuran parameter fisika-kimia air

Padatan tersuspensi total (*Total Suspended Solid*) diukur dengan metode gravimetri SNI 06-6989.3-2004, salinitas diukur menggunakan *handrefractometer,* suhu perairan diukur menggunakan termometer digital, derajat keasaman (pH) diukur menggunakan pH meter digital, oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*) dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) diukur menggunakan metode titrasi Winkler, amoniadan fosfat diukur menggunakan metode Spektrofotometri *UV-Visible*.

Indeks pencemaran

Status pencemaran, ditentukan menggunakan indeks pencemaran (IP) persamaan berdasarkan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air sebagaimana berikut:

$$PI_j = \sqrt{\frac{(C_i/L_{ij})_M^2 + (C_i/L_{ij})_R^2}{2}} \quad (1)$$

Keterangan:

- (PI*j*) = indeks pencemaran pada lokasi/stasiun (*j*)
- (C*i*) = konsentrasi parameter kualitas air ke-(*i*)
- (L*ij*) = baku mutu parameter ke-(*i*) untuk peruntukan perairan pada lokasi (*j*)
- (C*i*/L*ij*) M = nilai maksimum rasio konsentrasi terhadap baku mutu
- (C*i*/L*ij*) R) = nilai rata-rata rasio konsentrasi terhadap baku mutu

Analisis data, dilakukan secara deskriptif berdasarkan hasil pengukuran parameter kualitas air dan penghitungan Index Pencemaran (IP). Nilai IP selanjutnya digunakan untuk menentukan status mutu perairan pada setiap stasiun pengamatan. Interpretasi nilai IP mengacu pada klasifikasi, yaitu IP ≤ 1,0 menunjukkan kondisi memenuhi baku mutu (baik/tidak tercemar); 1,0 < IP ≤ 5,0 menunjukkan tercemar ringan; 5,0 < IP ≤ 10,0 menunjukkan tercemar sedang; dan IP > 10,0 menunjukkan tercemar berat. Perbandingan nilai IP antarstasiun digunakan untuk mengidentifikasi variasi spasial tingkat pencemaran dan lokasi yang memiliki tekanan lingkungan relatif lebih tinggi. Selain itu, hasil pengukuran masing-masing parameter digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang memberikan kontribusi terhadap peningkatan nilai IP, sehingga status pencemaran dapat diinterpretasikan berdasarkan karakteristik fisika-kimia perairan dan kondisi lingkungan pada masing-masing stasiun.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran kualitas perairan pada empat stasiun pengamatan yaitu CPI, Losari, Popsa, dan Paotere, menunjukkan adanya variabilitas spasial yang cukup signifikan pada parameter fisika, kimia, dan biologis (Tabel ***1***) yang mencerminkan perbedaan karakteristik lingkungan serta tekanan antropogenik di masing-masing lokasi pesisir, yang memiliki intensitas aktivitas urban, pelabuhan, dan reklamasi yang tinggi.

Tabel 1. Besaran Nilai Parameter Kualitas Air Wilayah Pesisir Kota Makassar

No	Parameter	Stasiun			
		1 (CPI)	2 (Losari)	3 (Popsa)	4 (Paotere)
1	Suhu (°C)	30,1	32,4	32,4	33,0
2	TSS (mg/L)	57,3	59,3	62,0	64,0
3	Salinitas (‰)	14,3	23,0	26,7	25,7
4	Derajat keasaman (pH)	7,3	7,5	7,4	7,3
5	Oksigen terlarut (mg/L)	0,00	3,98	8,96	7,11
6	BOD (mg/L)	0,00	46,22	8,38	2,57
7	Amonia(mg/L)	8,59	6,24	2,22	7,62
8	Fosfat (mg/L)	0,23	0,13	0,78	0,37

Suhu

Suhu berkisar 30,1°C-33°C (Tabel ***1***), nilai tersebut lebih tinggi bila dibandingkan dengan baku mutu air laut untuk kehidupan biota laut menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021. Suhu merupakan faktor oseanografi yang sangat berpengaruh terhadap kehidupan organisme di perairan. Suhu perairan mengatur penyebaran

organisme dan berpengaruh terhadap fisiologi organime akuatik, meskipun pengaruhnya terhadap organisme tidak berdiri sendiri dan dapat berinteraksi dengan parameter lingkungan lainnya (Simanjuntak, 2009).

Dari aspek fisiologis, peningkatan suhu dapat meningkatkan aktivitas metabolik organisme akuatik dan kebutuhan oksigennya. Suhu memengaruhi berbagai aspek fisiologis, antara lain laju metabolisme, konsumsi oksigen, pertumbuhan, respons terhadap pakan, dan tingkat stres (Cahyanti & Awalina, 2022). Peningkatan suhu menyebabkan kelarutan oksigen di dalam air menurun sehingga perubahan suhu dapat memengaruhi ketersediaan oksigen bagi organisme akuatik. Hal tersebut relevan dengan kondisi perairan penelitian karena suhu merupakan salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan bersama DO dalam mengevaluasi kualitas perairan (Yolanda *et al.,* 2016).

Variasi suhu juga berpotensi berkaitan dengan dinamika kontaminan di perairan. Suhu merupakan parameter lingkungan yang paling berpengaruh terhadap kandungan logam berat pada air dan tubuh ikan *Barbodes binotatus* di Sungai Cikaniki berdasarkan analisis korelasi Pearson (Azizah & Maslahat, 2021). Temuan tersebut menunjukkan bahwa suhu dapat menjadi salah satu faktor lingkungan yang berkaitan dengan distribusi dan akumulasi kontaminan pada organisme. Zamani and Arifin (2016) melaporkan bahwa peningkatan suhu perairan menyebabkan terjadinya gangguan kesehatan karang. Suhu tinggi (28-32°C) menyebabkan terjadinya peningkatan patogen virus, kekebalan tubuh karang menurun dan pemutihan karang. Pemutihan karang berbentuk *patches* merupakan gangguan yang paling banyak ditemukan, dengan 91 koloni terdampak. Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu merupakan salah satu faktor lingkungan yang berasosiasi dengan gangguan kesehatan karang, tetapi pengaruhnya perlu dipahami bersama faktor lingkungan lainnya. Hal berbeda dari peningkatan suhu, sebaliknya suhu rendah dapat memengaruhi hampir seluruh proses fisiologis krustasea, termasuk metabolisme, pertumbuhan, molting, reproduksi, perilaku, imunitas, dan kelangsungan hidup. Suhu rendah juga dapat meningkatkan kebutuhan energi untuk mempertahankan homeostasis sehingga energi yang tersedia untuk pertumbuhan menjadi berkurang (Ren *et al.,* 2021).

Total Suspended Solid

Padatan tersuspensi total pada lokasi penelitian berkisar 57-64 mg/L (

Tabel ***1***). Nilai tersebut sangat tinggi dibandingkan dengan standard baku mutu air laut dalam peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 untuk kehidupan biota kolom perairan dengan nilai padatan tersuspensi total sebesar 20 mg/L. Hasil penelitian tahun 2021, konsentrasi TSS sebesar 38,60–223,30 mg/L pada enam lokasi di sepanjang pesisir Kota Makassar, dengan nilai rata-rata 73,14 ± 73,76 mg/L (Noor *et al.,* 2021b). Tingginya TSS di perairan pesisir Kota Makassar diduga berkaitan dengan kombinasi masukan material dari daratan, aliran sungai, aktivitas antropogenik, dan proses resuspensi sedimen. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi perairan pesisir Kota Makassar dalam kondisi sangat buruk.

Peningkatan total padatan tersuspensi (TSS) di perairan laut memiliki dampak ekologis yang signifikan, yang memengaruhi kehidupan akuatik, kualitas air, dan kesehatan ekosistem. Konsentrasi TSS yang tinggi dapat menyebabkan efek yang merugikan pada berbagai organisme, termasuk ikan dan terumbu karang, dan dapat mengganggu proses reproduksi pada spesies akuatik. Dampak peningkatan TSS dengan ekotoksikologi pada organisme akuatik menyebabkan penyerapan logam berat dan bahan organik yang mengendap di sedimen akan menimbulkan risiko bagi kehidupan organisme. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar TSS berkorelasi dengan penurunan kesehatan ikan yang diakibatkan oleh toksisitas akut (Rossi *et al.,* 2006). Dampak lain dari peningkatan TSS dilaporkan oleh Gascho Landis *et al.* (2013) yang menyatakan bahwa proses fisiologi reproduksi kerang mengalami gangguan akibat kegagalan penyerapan nutrisi dari makanan yang disaring oleh kerang. Di sisi lain, meskipun efek merugikan dari TSS telah banyak dilaporkan, sejumlah studi mengungkapkan bahwa tingkat padatan tersuspensi yang moderat dapat berkontribusi pada siklus nutrisi dan meningkatkan kompleksitas habitat, yang mungkin memberikan keuntungan bagi spesies akuatik tertentu dalam situasi tertentu (Quinteiro *et al.,* 2015).

Salinitas

Salinitas adalah konsentrasi total garam terlarut dalam air, biasanya dinyatakan dalam bagian per seribu (‰) atau Practical Salinity Unit (PSU) (McCleskey *et al.,* 2023). Salinitas adalah parameter penting yang memengaruhi

distribusi dan kelangsungan hidup organisme akuatik, karena setiap spesies memiliki kisaran toleransi salinitas tertentu (Zheng *et al.,* 2022). mengindikasikan adanya pengaruh air tawar yang signifikan. Hal ini berbeda dengan salinitas di Stasiun 2 (Pantai Losari) 23,0‰, Stasiun 3 (Popsa) 26,7‰, dan Stasiun 4 (Pelabuhan Paotere) 25,7‰ yang menunjukkan dominasi pengaruh air laut (

Stasiun 1 yang terletak di CPI, memiliki salinitas terendah sebesar 14,3‰ yang

Tabel ***1***). Kondisi tersebut diduga berkaitan dengan pengaruh aliran daratan, kanal, dan sistem drainase yang membawa air tawar menuju perairan pesisir. Pada stasiun CPI terdapat aliran air tawar yang melewati kanal ke arah laut.

Secara umum, distribusi salinitas di wilayah pesisir dipengaruhi oleh interaksi antara masukan air tawar dari daratan dan intrusi air laut akibat pasang-surut, sehingga peningkatan debit air tawar dapat menurunkan salinitas di perairan pantai (Biemond *et al.,* 2022). Kondisi serupa telah dilaporkan di pesisir Kota Makassar, di mana salinitas yang lebih rendah pada wilayah yang dekat dengan muara dikaitkan dengan pengaruh aliran air dari hulu (Noor *et al.,* 2021b).

Jiang *et al.* (2020) menyatakan mekanisme fisiologi hewan akuatik sangat dipengaruhi oleh salinitas. Perubahan salinitas yang tiba-tiba dapat menyebabkan stres osmotik pada organisme air (Arief, 1984). Salinitas secara signifikan memengaruhi organisme akuatik dengan meningkatkan persistensi bahan kimia organik, meningkatkan waktu paparan, dan meningkatkan penyerapan pestisida beracun ke jaringan organisme, yang berpotensi menyebabkan efek toksik yang lebih besar di lingkungan muara dan laut (St Romain, 2023).

Karim (2008) menyatakan bahwa organisme laut dapat hidup dengan optimal dengan konsentrasi salinitas diatas 26‰. Rendahnya nilai salinitas air laut akibat curah hujan yang tinggi menyebabkan lamun dan beberapa jenis bivalvia mengalami kematian. Hal ini dilaporkan oleh Abe *et al.* (2024) yang melakukan penelitian Jepang di laguna Akkeshi-ko dan Notoro-ko. Mo *et al.* (2020) menyampaikan bahwa penurunan salinitas yang drastis menyebabkan keberlangsungan hidup kerang *Scapharca subcrenata* menjadi menurun. Kesimpulan penelitian yang dilakukan oleh Roibás-Rozas *et al.* (2022) menyatakan bahwa salinitas yang rendah dapat menyebabkan kematian massal organisme laut terutama kerang seperti yang terjadi di Galicia, Spanyol.

Derajat keasaman (pH)

Nilai pH perairan pada seluruh stasiun berkisar antara 7,3–7,5, dengan nilai terendah di Stasiun 1 (CPI) dan Stasiun 4 (Pelabuhan Paotere) sebesar 7,3, sedangkan Stasiun 2 (Pantai Losari) dan Stasiun 3 (Popsa) masing-masing sebesar 7,5 dan 7,4. Kisaran tersebut menunjukkan kondisi perairan yang relatif stabil dan berada dalam rentang netral hingga sedikit basa. Berdasarkan baku mutu air laut untuk biota laut dalam PP No. 22 Tahun 2021, kisaran pH yang dipersyaratkan adalah 7,0–8,5, sehingga seluruh nilai pH yang diperoleh masih memenuhi baku mutu. Variasi kecil antarstasiun kemungkinan berkaitan dengan perbedaan intensitas proses fotosintesis dan respirasi, dekomposisi bahan organik, pertukaran CO_2 antara atmosfer dan perairan, serta pencampuran massa air. Kondisi perairan pesisir Kota Makassar yang mendapat tekanan antropogenik, proses-proses ini dapat berlangsung secara bersamaan sehingga menghasilkan variasi pH secara spasial maupun temporal.

Penelitian di Jiaozhou Bay menunjukkan bahwa variasi pH perairan pesisir dikontrol oleh interaksi antara proses biologis, suhu, dan pertukaran CO_2 udara ke laut, sedangkan penelitian di perairan tropis Singapura menunjukkan bahwa masukan daratan dan remineralisasi bahan organik dapat memengaruhi dinamika pH (Li *et al.,* 2022; Martin *et al.,* 2022). Nilai pH 7,3–7,5 pada penelitian ini relatif lebih rendah dibandingkan kisaran pH sekitar 8,0–8,2 yang dilaporkan pada beberapa perairan pesisir tropis, sehingga meskipun masih memenuhi baku mutu, kondisi ini dapat mengindikasikan adanya pengaruh proses biologis dan masukan bahan dari daratan. Penelitian terkait perairan pesisir Indonesia juga menunjukkan bahwa tekanan antropogenik berupa masukan nutrien dan bahan organik dari daratan merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kondisi kimia perairan pesisir (Adyasari *et al.,* 2021).

Oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*)

Oksigen terlarut (DO) adalah jumlah oksigen yang tersedia dalam air dan merupakan parameter kualitas air yang paling penting untuk kelangsungan hidup sebagian besar organisme akuatik aerobik, termasuk ikan dan invertebrata (Piatka *et al.,* 2021). Kekurangan oksigen (hipoksia) atau ketiadaan oksigen (anoksia) dapat menyebabkan kematian massal organisme akuatik dan perubahan komposisi komunitas ekosistem (McArley *et al.,* 2021). Sumber oksigen terlarut meliputi difusi dari atmosfer dan fotosintesis oleh tanaman air dan alga (McArley *et al.,* 2021; Piatka *et al.,* 2021).

Oksigen terlarut (DO) merupakan salah satu indikator utama kondisi oksigenasi perairan karena diperlukan untuk respirasi organisme akuatik dan mencerminkan keseimbangan antara suplai oksigen dan proses konsumsi oksigen di dalam perairan. Oksigen dalam perairan terutama berasal dari pertukaran gas dengan atmosfer dan fotosintesis, sedangkan konsentrasinya dapat berkurang akibat respirasi, dekomposisi bahan organik, oksidasi senyawa tereduksi, serta kondisi hidrodinamika yang membatasi reaerasi. Pada penelitian ini, konsentrasi DO menunjukkan variasi spasial yang cukup besar, yaitu 0,00 mg/L di Stasiun 1 (CPI), 3,98 mg/L di Stasiun 2 (Pantai Losari), 8,96 mg/L di Stasiun 3 (Popsa), dan 7,11 mg/L di Stasiun 4 (Pelabuhan Paotere). Berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021, baku mutu DO untuk biota laut ditetapkan sebesar ≥5 mg/L, sehingga Stasiun 1 dan Stasiun 2 berada di bawah nilai yang dipersyaratkan, sedangkan Stasiun 3 dan Stasiun 4 masih memenuhi baku mutu.

Nilai 0,00 mg/L di Stasiun 1 (CPI) menunjukkan kondisi anoksik. Rendahnya DO di CPI diduga berkaitan dengan tingginya tekanan bahan organik dan nutrien dari aktivitas antropogenik serta terbatasnya proses pertukaran massa air. Hal ini didukung oleh karakteristik Stasiun 1 yang memiliki salinitas paling rendah (14,3‰) dan konsentrasi amonia paling tinggi (8,59 mg/L), yang mengindikasikan pengaruh masukan air daratan yang relatif kuat. Bahan organik yang masuk ke perairan akan mengalami dekomposisi mikroba. Proses remineralisasi tersebut menggunakan O_2 sehingga meningkatkan *oxygen demand*. Bahan organik yang dibawa dari daratan oleh sungai/kanal dapat berkontribusi langsung maupun tidak langsung terhadap konsumsi oksigen dan pembentukan hipoksia di wilayah pesisir.

Masukan bahan organik dan nutrien dapat meningkatkan aktivitas respirasi dan dekomposisi mikroba sehingga konsumsi oksigen meningkat dan menyebabkan penurunan DO; proses tersebut merupakan salah satu mekanisme utama pembentukan hipoksia di perairan pesisir yang mengalami eutrofikasi (Jarvis *et al.,* 2023; Zhang *et al.,* 2025). Sebaliknya, tingginya DO di Stasiun 3 (8,96 mg/L) dan Stasiun 4 (7,11 mg/L) menunjukkan kondisi oksigenasi yang lebih baik, yang kemungkinan dipengaruhi oleh pertukaran massa air dan reaerasi yang lebih efektif serta kontribusi fotosintesis. Nilai DO yang tinggi di Stasiun 3 juga perlu diinterpretasikan bersama karakteristik nutriennya karena konsentrasi oksigen di perairan dangkal dapat mengalami fluktuasi harian yang kuat akibat keseimbangan antara fotosintesis pada siang hari dan respirasi pada malam hari (Jarvis *et al.,* 2023).

Secara umum, nilai DO menunjukkan adanya heterogenitas kondisi oksigenasi antarstasiun, dengan CPI sebagai lokasi yang paling mengalami tekanan oksigenasi. Kondisi ini konsisten dengan kajian terbaru yang menunjukkan bahwa pengayaan bahan organik dan nutrien antropogenik merupakan pendorong utama penurunan DO dan hipoksia di ekosistem estuari dan pesisir, sementara suhu, stratifikasi, pencampuran, waktu tinggal massa air, dan karakteristik sedimen turut menentukan intensitas deoksigenasi (Zhang *et al.,* 2025).

Biological Oxygen Demand (BOD)

Biological Oxygen Demand (BOD) merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik biodegradable dalam air selama periode tertentu, umumnya lima hari pada suhu 20°C (BOD_5). Secara ekologis, peningkatan BOD menunjukkan semakin besarnya beban bahan organik yang tersedia untuk didekomposisi oleh mikroorganisme, sehingga kebutuhan oksigen meningkat dan konsentrasi oksigen terlarut (DO) berpotensi menurun. Proses konsumsi oksigen oleh mikroorganisme selama degradasi bahan organik merupakan salah satu mekanisme penting dalam deoksigenasi perairan, terutama pada wilayah pesisir yang menerima masukan bahan organik dari daratan. Jones *et al.* (2023) menyatakan bahwa karbon yang terbawa dari daratan ke perairan pesisir dapat memiliki tingkat biodegradabilitas yang berbeda dan berkontribusi terhadap kebutuhan oksigen. Hal yang sama disampaikan oleh Chen *et al.* (2025) bahwa peningkatan masukan bahan organik antropogenik di perairan pesisir dapat meningkatkan respirasi mikroba dan mempercepat penurunan oksigen, terutama ketika konsumsi biologis melebihi suplai oksigen secara fisik.

Hasil penelitian ini menunjukkan adanya variasi BOD yang sangat besar antarstasiun, yaitu 0,00 mg/L di CPI, 46,22 mg/L di Pantai Losari, 8,38 mg/L di Popsa, dan 2,57 mg/L di Pelabuhan Paotere. Nilai tertinggi di Pantai Losari menunjukkan bahwa stasiun ini memiliki beban bahan organik biodegradable yang jauh lebih besar dibandingkan stasiun lainnya. Kondisi tersebut sejalan dengan konsentrasi DO di Losari yang relatif rendah, yaitu 3,98

mg/L, dibandingkan Popsa dan Paotere yang masing-masing memiliki DO 8,96 dan 7,11 mg/L. Dengan demikian, tingginya BOD di Losari berpotensi meningkatkan konsumsi oksigen melalui proses dekomposisi bahan organik dan berkontribusi terhadap rendahnya DO. Namun, perbedaan DO antarstasiun tidak dapat dijelaskan hanya oleh BOD karena DO juga dikontrol oleh suhu, salinitas, fotosintesis, respirasi, aerasi, arus, pasang surut, stratifikasi, dan pertukaran massa air. Hal ini disampaikan oleh Zhang *et al.* (2023), bahwa hipoksia pesisir terbentuk melalui interaksi antara proses biogeokimia dan faktor fisik; dekomposisi bahan organik meningkatkan konsumsi DO, sedangkan stratifikasi dan lemahnya pertukaran massa air dapat menghambat proses reoksigenasi.

Perbedaan BOD antarstasiun diduga berkaitan dengan variasi masukan bahan organik, aktivitas antropogenik, dan kondisi hidrodinamika lokal. Pantai Losari merupakan kawasan dengan aktivitas perkotaan, perdagangan, wisata, dan jasa yang relatif intensif sehingga berpotensi menerima masukan bahan organik dari limbah domestik, limpasan permukaan, dan aktivitas masyarakat. Kondisi ini dapat meningkatkan ketersediaan substrat biodegradable bagi mikroorganisme dan selanjutnya meningkatkan kebutuhan oksigen. Sebaliknya, BOD yang lebih rendah di Popsa dan Paotere dapat menunjukkan bahwa masukan bahan organik biodegradable lebih rendah atau proses pengenceran dan pertukaran massa air berlangsung lebih efektif pada saat pengambilan sampel. Faktor hidrodinamika sangat penting karena pencampuran dan pertukaran massa air dapat meningkatkan suplai oksigen, sedangkan stratifikasi atau kondisi perairan yang relatif tenang dapat meningkatkan retensi bahan organik dan membatasi reoksigenasi. Temuan Jones *et al.* (2023) memperlihatkan bahwa karakteristik sumber karbon dan musim memengaruhi tingkat karbon yang tersedia untuk dimanfaatkan mikroorganisme, sedangkan Zhang *et al.* (2023) menunjukkan bahwa kombinasi masukan bahan organik dan keterbatasan pertukaran air dapat memperkuat pembentukan kondisi hipoksia. Oleh karena itu, tingginya BOD di Losari lebih tepat dipandang sebagai hasil interaksi antara beban bahan organik, aktivitas mikroba, dan proses fisik perairan, bukan sebagai akibat satu sumber pencemar tertentu.

Jika dibandingkan dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021, nilai baku mutu BOD_5 untuk air laut peruntukan biota laut adalah 20 mg/L. Berdasarkan nilai tersebut, BOD di Pantai Losari sebesar 46,22 mg/L telah melampaui baku mutu sekitar 2,31 kali, sedangkan Popsa (8,38 mg/L) dan Paotere (2,57 mg/L) masih berada di bawah ambang tersebut. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Pantai Losari merupakan stasiun dengan tekanan organik paling tinggi. Temuan tersebut juga lebih tinggi dibandingkan penelitian Fatma *et al.* (2025) pada pesisir Kota Makassar yang memperoleh BOD_5 sebesar 2,01–19,00 mg/L pada musim barat dan 0,65–0,97 mg/L pada musim timur, sehingga seluruh hasil penelitian tersebut masih berada di bawah nilai 20 mg/L. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya variasi spasial dan temporal beban organik di pesisir Makassar yang kemungkinan dipengaruhi oleh musim, limpasan daratan, aktivitas antropogenik, pasang surut, dan kondisi hidrodinamika. Dengan demikian, secara keseluruhan, hasil BOD menunjukkan bahwa Pantai Losari merupakan lokasi dengan indikasi beban organik biodegradable paling tinggi dan berpotensi memberikan tekanan terhadap kondisi oksigen perairan, sedangkan Popsa dan Paotere menunjukkan kondisi beban organik yang relatif lebih rendah.

Amonia

Amonia merupakan salah satu bentuk nitrogen anorganik terlarut yang keberadaannya di perairan berasal dari proses dekomposisi bahan organik, ekskresi organisme, limbah domestik, aktivitas budidaya, limpasan pertanian, dan masukan air limbah. Di dalam air, amonia berada dalam kesetimbangan antara bentuk terionisasi (NH_4^+) dan tidak terionisasi (NH_3), sedangkan proporsi NH_3 meningkat dengan meningkatnya pH dan suhu. Bentuk NH_3 tidak terionisasi lebih mudah melewati membran biologis sehingga lebih toksik bagi organisme akuatik dibandingkan NH_4^+ (Edwards *et al.,* 2024). Selain toksisitas langsung, peningkatan amonia juga menunjukkan adanya pengayaan nitrogen reaktif yang dapat meningkatkan produktivitas primer dan, melalui proses respirasi serta dekomposisi biomassa, berkontribusi terhadap penurunan oksigen dan eutrofikasi perairan (Edwards *et al.,* 2024; Marshall *et al.,* 2023).

Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi amonia tertinggi ditemukan di Stasiun 1 (CPI) sebesar 8,59 mg/L, kemudian menurun di Pantai Losari menjadi 6,24 mg/L dan Popsa menjadi 2,22 mg/L, tetapi kembali meningkat di Pelabuhan Paotere menjadi 7,62 mg/L.

Tingginya konsentrasi di CPI dapat dikaitkan dengan karakteristik kawasan reklamasi yang berdekatan dengan aktivitas perkotaan, drainase daratan, dan kawasan budidaya di sekitar pesisir. Interpretasi ini diperkuat oleh penelitian Fatma *et al.* (2025) di pesisir Kota Makassar yang menemukan bahwa konsentrasi amonia total tertinggi, yaitu 0,8 mg/L, juga terdapat pada stasiun batas terluar reklamasi CPI dan mengaitkannya dengan kemungkinan masukan limbah dari aktivitas budidaya/tambak dan limpasan pertanian yang membawa nitrogen organik maupun anorganik. Selain masukan eksternal, amonia juga dapat terbentuk melalui mineralisasi bahan organik. Pada kondisi oksigen yang cukup, NH_4^+ selanjutnya dapat mengalami nitrifikasi menjadi nitrit dan nitrat, sehingga konsentrasi amonia di suatu lokasi merupakan hasil keseimbangan antara masukan, produksi internal, nitrifikasi, asimilasi biologis, adsorpsi pada sedimen, dan pengenceran. Oleh karena itu, tingginya amonia di CPI tidak dapat dipastikan berasal dari satu sumber pencemar tanpa analisis sumber nitrogen atau pengamatan tambahan terhadap saluran masukan di sekitarnya.

Konsentrasi amonia yang kembali tinggi di Stasiun 4 (Pelabuhan Paotere) sebesar 7,62 mg/L kemungkinan berkaitan dengan karakteristik kawasan pelabuhan dan aktivitas perikanan yang intensif, termasuk aktivitas bongkar-muat, pendaratan ikan, sisa hasil perikanan, aktivitas kapal, serta masukan limbah domestik dari kawasan permukiman dan saluran drainase. Bahan organik yang berasal dari sisa ikan, limbah domestik, dan material organik lainnya dapat mengalami dekomposisi dan menghasilkan NH_4^+/NH_3. Bukti lokal mendukung interpretasi tersebut: Samawi *et al.* (2019) menemukan bahwa limbah domestik merupakan sumber penting fosfat dan amonia di kanal Jongaya dan Paotere, sedangkan penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa peningkatan amonia berkaitan dengan lokasi outlet drainase dan aktivitas reklamasi. Dengan demikian, tingginya amonia di Paotere lebih tepat dikaitkan dengan akumulasi masukan nitrogen dari aktivitas domestik dan perikanan serta proses dekomposisi bahan organik, bukan langsung dinyatakan sebagai pencemaran industri karena penelitian ini belum melakukan identifikasi sumber pencemar secara spesifik. Sebaliknya, rendahnya amonia di Popsa (2,22 mg/L) dapat menunjukkan bahwa masukan nitrogen lebih rendah atau proses pengenceran, pencampuran massa air, nitrifikasi, dan asimilasi biologis berlangsung lebih efektif. Perbedaan konsentrasi antarstasiun dengan demikian menunjukkan bahwa dinamika amonia dikontrol oleh kombinasi sumber nitrogen dan proses biogeokimia serta hidrodinamika lokal.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VIII, baku mutu amonia total (NH_3-N) untuk biota laut adalah 0,3 mg/L. Hal ini menunjukkan seluruh stasiun telah melampaui baku mutu, yaitu CPI 28,6 kali, Pantai Losari 20,8 kali, Popsa 7,4 kali, dan Paotere 25,4 kali. Pola tersebut menunjukkan bahwa pencemaran nitrogen-amonia merupakan masalah yang lebih luas dibandingkan hanya di CPI dan Paotere, meskipun kedua stasiun tersebut menunjukkan konsentrasi tertinggi. Hasil ini jauh lebih tinggi dibandingkan penelitian Fatma *et al.* (2025) di pesisir Kota Makassar yang melaporkan amonia total 0,014–0,046 mg/L pada musim barat dan 0,064–0,80 mg/L pada musim timur, dengan nilai maksimum 0,80 mg/L di sekitar CPI. Perbedaan yang sangat besar tersebut mengindikasikan adanya variasi spasial dan temporal yang kuat, kemungkinan akibat perbedaan musim, pasang-surut, limpasan daratan, intensitas aktivitas antropogenik, dan waktu pengambilan sampel.

Fosfat

Fosfat (PO_4^{3-}) merupakan nutrien penting bagi produktivitas primer perairan, tetapi peningkatan konsentrasinya dapat mendorong eutrofikasi. Di perairan pesisir, fosfat terutama berasal dari limbah domestik, deterjen, limpasan perkotaan dan pertanian, serta aktivitas perikanan, sementara konsentrasinya dikontrol oleh adsorpsi–desorpsi pada sedimen, sedimentasi, resuspensi, pelepasan fosfor dari sedimen, dan asimilasi oleh fitoplankton (Andrieux-Loyer & Aminot, 2023; Chen *et al.,* 2022; Defforey & Paytan, 2018; Oduor *et al.,* 2024). Di perairan pesisir Makassar, peningkatan fosfat juga telah dikaitkan dengan masukan limbah domestik dan aktivitas antropogenik (Samawi *et al.,* 2019). Hasil penelitian menunjukkan variasi spasial yang cukup besar, dengan konsentrasi fosfat sebesar 0,23 mg/L di CPI, 0,13 mg/L di Pantai Losari, 0,78 mg/L di Popsa, dan 0,37 mg/L di Pelabuhan Paotere. Konsentrasi tertinggi di Popsa kemungkinan berkaitan dengan kombinasi masukan fosfor dari aktivitas antropogenik di sekitarnya dan pelepasan kembali fosfor dari sedimen melalui proses resuspensi atau perubahan kondisi kimia sedimen. Sebaliknya, rendahnya konsentrasi di Losari dapat terjadi akibat pengenceran, pengambilan fosfat oleh fitoplankton, atau

pengendapan/adsorpsi fosfat pada partikel tersuspensi.

Tingginya fosfat di Popsa tidak dapat dijelaskan oleh keberadaan satu sumber pencemar karena dinamika fosfor sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrodinamika dan proses biogeokimia. Popsa merupakan kawasan yang berdekatan dengan aktivitas perkotaan, pelabuhan/jetty, dan perairan antarpulau sehingga masukan fosfor dapat berasal dari limpasan daratan maupun aktivitas masyarakat, sementara pencampuran dan resuspensi sedimen dapat meningkatkan kembali fosfat terlarut ke kolom air. Penelitian Samawi *et al.* (2019) di perairan pesisir Makassar menunjukkan bahwa konsentrasi fosfat yang tinggi ditemukan di sekitar outlet limbah dan kawasan reklamasi, yang mengindikasikan kontribusi aktivitas antropogenik terhadap pengayaan fosfor. Kondisi fosfat yang tinggi juga dapat meningkatkan ketersediaan nutrien bagi fitoplankton, tetapi belum dapat langsung dinyatakan menyebabkan algal bloom tanpa data klorofil-a, kelimpahan fitoplankton, transparansi, dan dinamika nutrien lainnya. Dengan demikian, nilai tinggi di Popsa lebih tepat diinterpretasikan sebagai indikasi pengayaan fosfor (phosphorus enrichment) yang berpotensi meningkatkan risiko eutrofikasi apabila berlangsung secara persisten dan didukung oleh kondisi lingkungan yang sesuai.

Berdasarkan PP Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VIII, baku mutu fosfat untuk air laut peruntukan biota laut adalah 0,015 mg/L sebagai PO_4-P. Oleh karena hasil nilai tersebut perlu dilakukan konversi terlebih dahulu ke PO_4-P; secara stoikiometri, PO_4-P ≈ 0,326 × PO_4^{3-}, sehingga konsentrasi penelitian setara sekitar 0,075; 0,042; 0,254; dan 0,121 mg/L PO_4-P untuk CPI, Losari, Popsa, dan Paotere. Hasil penelitian seluruh stasiun tetap berada di atas nilai acuan 0,015 mg/L PO_4-P, dengan Popsa menunjukkan tingkat pengayaan paling tinggi. Hasil ini juga lebih tinggi dibandingkan penelitian Fatma *et al.* (2025) di pesisir Kota Makassar yang melaporkan fosfat sebesar 0,009–0,056 mg/L pada musim barat dan 0,002–0,007 mg/L pada musim timur. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya variasi spasial-temporal pengayaan fosfor di pesisir Makassar yang kemungkinan dipengaruhi oleh sumber antropogenik, limpasan daratan, musim, pasang surut, serta proses pertukaran dan resuspensi sedimen.

Sebagai pembanding pada lokasi yang berbeda dengan karakter yang mirip, pemantauan perairan Teluk Jakarta pada 2021 melaporkan konsentrasi fosfat sekitar 0,002–0,008 mg/L pada beberapa stasiun laut (Puspitasari *et al.,* 2022). Kajian periode 2015–2021 juga menunjukkan bahwa konsentrasi fosfat di beberapa wilayah Teluk Jakarta telah melampaui nilai acuan dan cenderung lebih tinggi di sekitar sumber masukan daratan, terutama wilayah muara, kemudian menurun ke arah perairan yang lebih terbuka (Puspitasari *et al.,* 2022). Kajian jangka panjang oleh juga menunjukkan adanya variasi temporal konsentrasi fosfat dan nitrat di Teluk Jakarta serta karakter perairan yang relatif subur berdasarkan kandungan nutrien. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa pengayaan fosfor di ekosistem pesisir perkotaan dapat berkaitan dengan peningkatan produktivitas primer, meskipun status eutrofikasi tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan konsentrasi fosfat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa distribusi fosfat di Teluk Jakarta dipengaruhi kuat oleh masukan dari daratan dan karakteristik hidrodinamika teluk.

Nilai indeks pencemaran

Hasil analisis Indeks Pencemaran (IP) menunjukkan adanya heterogenitas spasial yang kuat pada kualitas perairan pesisir Kota Makassar, dengan nilai IP berkisar antara 3,53 hingga 27,62 (

Tabel **2**). Secara metodologis, pendekatan IP berbasis rasio konsentrasi terhadap baku mutu merepresentasikan tingkat deviasi dari kondisi referensi, sehingga nilai yang tinggi mencerminkan tekanan lingkungan yang telah melampaui kapasitas asimilatif perairan. Dalam kerangka ini, IP tidak hanya berfungsi sebagai indikator status mutu air, tetapi juga sebagai proksi tekanan ekosistem yang terakumulasi (Effendi, 2003).

Tabel 2. Hasil perhitungan indeks pencemaran perairan pesisir Kota Makassar

Stasiun	Lokasi	Indeks Pencemaran	Status Mutu Air
1	Center Point of Indonesia (CPI)	27,62	Tercemar Berat
2	Pantai Losari	4,83	Tercemar Ringan
3	Jetty Popsa	3,53	Tercemar Ringan
4	Pelabuhan Paotere	3,98	Tercemar Ringan

Ket: Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air.

Nilai IP yang sangat tinggi pada Stasiun CPI (27,62; kategori tercemar berat) mengindikasikan adanya tekanan antropogenik yang intens dan penurunan kualitas perairan yang signifikan. Dalam kerangka *assimilative capacity*, kondisi tersebut menunjukkan bahwa beban pencemar yang masuk telah melampaui kapasitas alami sistem untuk mengencerkan, mendispersikan, dan mentransformasi kontaminan melalui proses fisik, kimia, dan biogeokimia (Chapra, 1997). Pada sistem pesisir perkotaan, akumulasi masukan nitrogen dan fosfor dapat mempercepat degradasi kualitas perairan, terutama pada lokasi dengan intensitas aktivitas antropogenik yang tinggi (Wang *et al.,* 2024). Respons ekosistem terhadap peningkatan beban nutrien dapat bersifat nonlinier, sehingga perubahan relatif kecil pada masukan nutrien berpotensi menghasilkan perubahan ekologis yang substansial ketika kapasitas penyangga sistem telah terlampaui (*critical transition*) (Scheffer *et al.,* 2009). Kondisi tersebut dapat memperkuat proses eutrofikasi melalui stimulasi produktivitas primer dan peningkatan konsumsi oksigen selama dekomposisi bahan organik, sehingga berpotensi menurunkan kualitas perairan secara lebih lanjut (Smith *et al.,* 2006).

Kondisi di kawasan reklamasi seperti CPI semakin memperkuat interpretasi tersebut. Reklamasi pantai diketahui mengubah morfologi pesisir dan dinamika hidrodinamika lokal, yang pada akhirnya menurunkan kapasitas pertukaran air (flushing rate) dan meningkatkan waktu tinggal (residence time) polutan. Perubahan ini telah dibuktikan secara empiris pada berbagai sistem pesisir, di mana pembangunan struktur reklamasi menyebabkan pelemahan sirkulasi dan peningkatan retensi massa air (Lee & Park, 2013; Scherpereel *et al.,* 2025). Peningkatan residence time merupakan faktor kunci dalam akumulasi nutrien dan bahan organik, yang secara langsung meningkatkan kerentanan terhadap eutrofikasi (Defne & Ganju, 2015; Huggett *et al.,* 2021). Lebih lanjut, studi terbaru menunjukkan bahwa reklamasi pesisir, terutama ketika dikombinasikan dengan beban nutrien tinggi, dapat secara signifikan memperluas area dengan tekanan eutrofikasi melalui perubahan proses transport dan pencampuran yang dikendalikan oleh hidrodinamika (Wang *et al.,* 2026).

Hal yang berbeda pada stasiun Losari, Popsa, dan Paotere yang tergolong tercemar ringan (IP 3,53–4,83) mengindikasikan bahwa sistem masih berada dalam fase tekanan sub-letal, di mana fungsi ekosistem dasar masih dipertahankan, namun menunjukkan peningkatan kerentanan terhadap tekanan tambahan. Dalam kerangka disturbance ecology, kondisi ini mencerminkan sistem yang masih berada dalam domain stabil, tetapi mendekati ambang batas perubahan (Folke *et al.,* 2004). Fenomena ini sejalan dengan konsep early warning signals dalam degradasi ekosistem, di mana perubahan kecil dalam tekanan lingkungan dapat memicu pergeseran menuju kondisi alternatif yang lebih terdegradasi (Dakos *et al.,* 2015; Scheffer *et al.,* 2009). Dengan demikian, nilai IP pada kisaran ini dapat dipandang sebagai indikasi awal penurunan resiliensi sistem sebelum terjadinya transisi ekosistem yang lebih drastis.

Variabilitas spasial nilai IP menegaskan peran dominan faktor hidrodinamika dalam mengontrol distribusi polutan di sistem pesisir. Studi menunjukkan bahwa proses transport dan residence time yang dikendalikan oleh arus, pasang surut, dan input sungai berperan penting dalam menentukan pola akumulasi polutan secara spasial (Du *et al.,* 2025; Zainol *et al.,* 2021). Sistem pesisir semi-tertutup cenderung menunjukkan akumulasi polutan yang lebih tinggi dibandingkan perairan terbuka

akibat keterbatasan flushing dan pertukaran massa air, yang meningkatkan retensi nutrien dan bahan pencemar (John *et al.,* 2020). Selain itu, interaksi antara proses fisik dan biogeokimia memperkuat dinamika tersebut. Dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme meningkatkan kebutuhan oksigen biologis (BOD), yang pada akhirnya menurunkan kadar dissolved oxygen (DO). Penurunan DO ini merupakan indikator awal kondisi hipoksia yang berdampak langsung pada struktur komunitas biota laut (Breitburg *et al.,* 2018; Diaz & Rosenberg, 2008).

Tingginya nilai IP di kawasan CPI diduga dipengaruhi oleh kombinasi beban nutrien dan bahan organik yang berasal dari limpasan daratan (*urban runoff*), limbah domestik, serta aktivitas konstruksi pesisir (Nayeb Yazdi *et al.,* 2021). Urbanisasi pesisir diketahui meningkatkan input polutan secara signifikan melalui perubahan tata guna lahan dan peningkatan luas permukaan kedap air (impervious surface), yang pada akhirnya meningkatkan volume dan kecepatan limpasan serta mempercepat transport nutrien ke perairan penerima (Nayeb Yazdi *et al.,* 2021; Szalińska *et al.,* 2024). Limpasan perkotaan merupakan salah satu sumber utama polutan antropogenik di sistem pesisir, yang membawa nitrogen dan fosfor dalam jumlah signifikan dan berkontribusi langsung terhadap eutrofikasi

serta penurunan kualitas air (Pinto *et al.,* 2023; Yang & Toor, 2018).

Dari perspektif ekologi pesisir, perbedaan tingkat pencemaran ini memiliki implikasi signifikan terhadap stabilitas ekosistem. Pada kondisi tercemar berat, ekosistem cenderung mengalami penurunan keanekaragaman hayati, dominasi spesies toleran, serta gangguan fungsi ekosistem termasuk produktivitas primer. Sementara itu, pada kondisi tercemar ringan, sistem masih memiliki *ecological resilience*, namun berada dekat dengan ambang batas kritis. Konsep *ecological tipping point* menjadi relevan, di mana peningkatan kecil dalam beban pencemar dapat memicu perubahan drastis dan sulit dipulihkan (Scheffer *et al.,* 2009).

Selain pencemar konvensional, dinamika kualitas perairan pesisir saat ini juga dipengaruhi oleh *emerging pollutants* seperti mikroplastik. Mikroplastik telah diidentifikasi sebagai vektor bagi polutan organik persisten dan logam berat, serta berperan dalam meningkatkan mobilitas dan bioavailabilitas kontaminan dalam sistem perairan (Liang *et al.,* 2023; Yan *et al.,* 2023). Selain itu, mikroplastik berinteraksi secara aktif dengan dissolved organic matter (DOM), baik sebagai sumber maupun penyerap senyawa organik terlarut, sehingga mempengaruhi siklus karbon akuatik (Ivanic *et al.,* 2023). Studi terbaru menunjukkan bahwa mikroplastik dapat melepaskan DOM dengan karakteristik optik dan komposisi molekuler yang berbeda, yang pada akhirnya mengubah reaktivitas kimia dan proses biogeokimia dalam perairan (Lee *et al.,* 2023; Zhang *et al.,* 2024).

Pendekatan indeks pencemaran (IP) maupun water quality index (WQI) memiliki keunggulan sebagai indikator integratif yang sederhana dan komunikatif dalam menggambarkan status kualitas perairan. Namun demikian, pendekatan ini memiliki keterbatasan dalam menangkap kompleksitas interaksi antar parameter serta efek sinergistik antar polutan, termasuk fenomena ambiguity dan eclipsing effect dalam proses agregasi indeks (Uddin *et al.,* 2022). Oleh karena itu, peningkatan akurasi penilaian kualitas perairan memerlukan integrasi dengan pendekatan lain, seperti weighted WQI berbasis data, serta analisis multivariat seperti principal component analysis (PCA) dan cluster analysis, yang terbukti mampu mengidentifikasi parameter dominan dan pola spasial-temporal yang tidak terdeteksi oleh indeks tunggal (Alkhalidi *et al.,* 2021; Jha *et al.,* 2022; Lusiana *et al.,* 2022). Selain itu, pendekatan berbasis ekosistem atau multi-metrik memberikan representasi yang lebih komprehensif terhadap kondisi lingkungan karena mampu mengintegrasikan aspek struktur dan fungsi ekosistem dalam evaluasi kualitas perairan (Hardikar *et al.,* 2022)

Dari perspektif manajemen, tingginya nilai IP di kawasan CPI menunjukkan urgensi implementasi strategi Integrated Coastal Zone Management (ICZM) yang menekankan pengendalian sumber pencemar berbasis daratan, peningkatan infrastruktur pengolahan limbah, serta integrasi kebijakan lintas sektor dalam pengelolaan wilayah pesisir. Pendekatan ini penting mengingat tekanan utama pada sistem pesisir urban umumnya berasal dari limpasan daratan, limbah domestik, dan perubahan tata guna lahan (Stojanovic *et al.,* 2004). Selain itu, peningkatan kapasitas dan efektivitas sistem pengolahan limbah terbukti berkontribusi signifikan dalam menurunkan beban nutrien dan bahan organik yang masuk ke perairan pesisir, sehingga mengurangi risiko eutrofikasi dan degradasi kualitas air ((Lyu *et al.,* 2016)). Dalam konteks jangka panjang, integrasi pendekatan berbasis ekosistem dalam pengelolaan pesisir juga penting untuk meningkatkan kapasitas adaptif dan ketahanan sistem terhadap tekanan antropogenik (Jarvis *et al.,* 2015; Katsanevakis *et al.,* 2011).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kualitas perairan pesisir Kota Makassar bervariasi antar stasiun, dengan tingkat pencemaran berkisar dari tercemar ringan hingga tercemar berat. Stasiun Center Point of Indonesia (CPI) menunjukkan kondisi tercemar berat (IP = 27,62) dengan beban pencemar tinggi. Stasiun: Losari, Popsa dan Paotere relatif lebih baik. Parameter fisika-kimia yang diukur mengindikasikan bahwa aktivitas pesisir di zona pelabuhan, permukiman, dan limbah domestik berkontribusi signifikan terhadap penurunan kualitas perairan. sehingga membutuhkan pengelolaan terpadu untuk mengendalikan beban pencemar di wilayah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

Abe, H., Namba, M., Ito, M. A., & Nakaoka, M. (2024). Effects of low salinity water inflow on eelgrass and cultured bivalves in subarctic lagoons: Analysis using hydrodynamic model. *Regional Studies in Marine Science*, *74*, 103543.

Adyasari, D., Pratama, M. A., Teguh, N. A., Sabdaningsih, A., Kusumaningtyas, M. A., & Dimova, N. (2021). Anthropogenic impact on Indonesian coastal water

and ecosystems: Current status and future opportunities. *Mar Pollut Bull*, *171*, 112689. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112689

Akbar, A., & Pratiwi, I. (2023). Dampak pencemaran lingkungan di wilayah pesisir Makassar akibat limbah masyarakat. *Riset Sains dan Teknologi Kelautan*, 75-78.

Alkhalidi, M., Alsulaili, A., Almarshed, B., Bouresly, M., & Alshawish, S. (2021). Assessment of Seasonal and Spatial Variations of Coastal Water Quality Using Multivariate Statistical Techniques. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(11), 1292. https://www.mdpi.com/2077-1312/9/11/1292

Andrieux-Loyer, F., & Aminot, A. (2023). Assessing exchangeable phosphate and related data in coastal sediments: Theoretical and practical considerations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *281*, 108218. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108218

Arief, D. (1984). Pengukuran salinitas air laut dan peranannya dalam ilmu kelautan. *Jurnal Oseana*, *9*(1), 3-10.

Arifin, T., Nur Amri, S., Rahmania, R., Yulius, Ramdhan, M., Chandra, H., Adrianto, L., Geoffrey Bengen, D., Kurniawan, F., & Kurnia, R. (2023). Forecasting land-use changes due to coastal city development on the peri-urban area in Makassar City, Indonesia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, *26*(1), 197-206. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.02.002

Azizah, M., & Maslahat, M. (2021). Kandungan Logam Berat Timbal (Pb), Kadmium (Cd), dan Merkuri (Hg) di dalam Tubuh Ikan Wader (Barbodes binotatus) dan Air Sungai Cikaniki, Kabupaten Bogor. *Limnotek: perairan darat tropis di Indonesia*, *28*(2).

Biemond, B., de Swart, H. E., Dijkstra, H. A., & Díez-Minguito, M. (2022). Estuarine salinity response to freshwater pulses. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *127*(11), e2022JC018669.

Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., Garçon, V., Gilbert, D., Gutiérrez, D., Isensee, K., Jacinto, G. S., Limburg, K. E., Montes, I., Naqvi, S. W. A., Pitcher, G. C., Rabalais, N. N., Roman, M. R., Rose, K. A., Seibel, B. A., . . . Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, *359*(6371), eaam7240. https://doi.org/doi:10.1126/science.aam7240

Cahyanti, Y., & Awalina, I. (2022). Studi Literatur : Pengaruh Suhu terhadap Ikan Nila (Oreochromis niloticus). *Panthera : Jurnal Ilmiah Pendidikan Sains dan Terapan*, *2*(4), 226-238. https://doi.org/10.36312/pjipst.v2i4.110

Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling* (Vol. 1). McGraw-Hill New York.

Chen, Q., Tang, K., Zhai, W., Zhu, Z., Terence Yang, J. Y., He, Z., Li, M., Kao, S. J., Yang, J., Zheng, Q., Lønborg, C., Thomas, H., & Jiao, N. (2025). Microbial responses to ocean deoxygenation: Revisiting the impacts on organic carbon cycling. *iScience*, *28*(7), 112826. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112826

Chen, X., Wang, Y., Bai, Z., Ma, L., Strokal, M., Kroeze, C., Chen, X., Zhang, F., & Shi, X. (2022). Mitigating phosphorus pollution from detergents in the surface waters of China. *Science of The Total Environment*, *804*, 150125.

Dakos, V., Carpenter, S. R., van Nes, E. H., & Scheffer, M. (2015). Resilience indicators: prospects and limitations for early warnings of regime shifts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *370*(1659).

Defforey, D., & Paytan, A. (2018). Phosphorus cycling in marine sediments: advances and challenges. *Chemical Geology*, *477*, 1-11.

Defne, Z., & Ganju, N. K. (2015). Quantifying the Residence Time and Flushing Characteristics of a Shallow, Back-Barrier Estuary: Application of Hydrodynamic and Particle Tracking Models. *Estuaries and Coasts*, *38*(5), 1719-1734. https://doi.org/10.1007/s12237-014-9885-3

Diaz, R. J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science*, *321*(5891), 926-929. https://doi.org/doi:10.1126/science.1156401

Du, J., Park, K., Wright, K., Hu, X., Kiaghadi, A., Schoenbaechler, C., & Hua, J. (2025). Quantifying the Flushing Time of Major Coastal Bays in the Northern Gulf of

Mexico from 20-Year Simulations. *Estuaries and Coasts*, *49*(2), 34. https://doi.org/10.1007/s12237-025-01648-4

Edward, Helfinalis, Budiyanto, F., & Witasari, Y. (2021). Heavy metals concentration in sediment of Makassar Strait.

Edwards, T. M., Puglis, H. J., Kent, D. B., Durán, J. L., Bradshaw, L. M., & Farag, A. M. (2024). Ammonia and aquatic ecosystems – A review of global sources, biogeochemical cycling, and effects on fish. *Science of The Total Environment*, *907*, 167911. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167911

Effendi, H. (2003). Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumberdaya dan Lingkungan Perairan.

Fatma, F., Ayyub, F. R., & Azizah, N. (2025). An Analysis of The Water Quality and Pollution Index on Makassar City's Coast Based on The Physical-Chemical Characteristics of Seawater. *Agrikan Jurnal Agribisnis Perikanan*, *18*(2), 52-60.

Firnanelty, F., Chadijah, S., Adawiah, S. R., Firdaus, F., & Dyan, M. I. D. N. I. (2022). Analysis of the Heavy Metal Levels (Cd, Fe, Hg and Pb) at Losari Beach Tourism Reclamation of Makassar. *Indonesian Journal of Chemical Research*, *10*(2), 97-101.

Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., & Holling, C. S. (2004). Regime Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *35*(Volume 35, 2004), 557-581. https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711

Gascho Landis, A. M., Haag, W. R., & Stoeckel, J. A. (2013). High suspended solids as a factor in reproductive failure of a freshwater mussel. *Freshwater Science*, *32*(1), 70-81.

Glibert, P. M., Cai, W.-J., Hall, E. R., Li, M., Main, K. L., Rose, K. A., Testa, J. M., & Vidyarathna, N. K. (2022). Stressing over the Complexities of Multiple Stressors in Marine and Estuarine Systems. *Ocean-Land-Atmosphere Research*, *2022*. https://doi.org/doi:10.34133/2022/9787258

Hardikar, R., Haridevi, C. K., & Deshbhratar, S. (2022). Phytoplankton community indices in assessing the ecological quality status (EcoQS) of a coastal ecosystem (Thane Creek, India): Mono-metric vs multi-metric approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *274*, 107922. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107922

Huggett, R. D., Purdie, D. A., & Haigh, I. D. (2021). Modelling the Influence of Riverine Inputs on the Circulation and Flushing Times of Small Shallow Estuaries. *Estuaries and Coasts*, *44*(1), 54-69. https://doi.org/10.1007/s12237-020-00776-3

Ivanic, F. M., Guggenberger, G., Woche, S. K., Bachmann, J., Hoppe, M., & Carstens, J. F. (2023). Soil organic matter facilitates the transport of microplastic by reducing surface hydrophobicity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *676*, 132255. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132255

Jarvis, B. M., Hagy, J. D., Melendez, W., Simmons, C. W., & Wan, Y. (2023). Measuring and modeling diel oxygen dynamics in a shallow hypereutrophic estuary: Implications of low oxygen exposure on aquatic life. *Science of The Total Environment*, *882*, 163474. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163474

Jarvis, R. M., Bollard Breen, B., Krägeloh, C. U., & Billington, D. R. (2015). Citizen science and the power of public participation in marine spatial planning. *Marine Policy*, *57*, 21-26. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.03.011

Jha, D. K., Pandey, V., Muthukumar, C., Sathish Kumar, P., Venkatnarayanan, S., Jebakumar, J. P. P., & Dharani, G. (2022). Investigation of Coastal Water Characteristics Along the Southeast Coast of India: A Multivariate Approach [Data Report]. *Frontiers in Marine Science*, *Volume 9 - 2022*. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.945495

Jiang, C., Wang, J., Zhang, P., Wang, Y., Guo, X., & Zhu, L. (2020). Impact of Rapid Salinity Variation on Aquaculture Organisms Caused by Water Drainage from an Estuary Sluice. *Journal of Coastal Research*, *111*(SI), 39-42.

John, S., Muraleedharan, K. R., Revichandran, C., Azeez, S. A., Seena, G., & Cazenave, P. W. (2020). What Controls the Flushing Efficiency and Particle

Transport Pathways in a Tropical Estuary? Cochin Estuary, Southwest Coast of India. *Water*, *12*(3), 908. https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/908

Jones, K., Berggren, M., & Sjöstedt, J. (2023). Seasonal variation and importance of catchment area composition for transport of bioavailable carbon to the Baltic Sea. *Biogeochemistry*, *165*(3), 265-276.

Karim, M. Y. (2008). Pengaruh salinitas terhadap metabolisme kepiting bakau (Scylla olivacea). *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, *10*(1), 37-44.

Katsanevakis, S., Stelzenmüller, V., South, A., Sørensen, T. K., Jones, P. J., Kerr, S., Badalamenti, F., Anagnostou, C., Breen, P., & Chust, G. (2011). Ecosystem-based marine spatial management: review of concepts, policies, tools, and critical issues. *Ocean & Coastal Management*, *54*(11), 807-820.

Lee, H. W., & Park, S. S. (2013). A hydrodynamic modeling study to estimate the flushing rate in a large coastal embayment. *J Environ Manage*, *115*, 278-286. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.055

Lee, Y. K., He, W., Guo, H., Karanfil, T., & Hur, J. (2023). Effects of organic additives on spectroscopic and molecular-level features of photo-induced dissolved organic matter from microplastics. *Water Research*, *242*, 120272. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120272

Li, Y., Yang, H., Dang, J., Yang, X., Xue, L., & Zhang, L. (2022). Seasonal variation of sea surface pH and its controls in the Jiaozhou Bay, China. *Continental Shelf Research*, *232*, 104613. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104613

Liang, W., Wei, S., Lan, L., Chen, J., Zhou, Y., Zhao, J., Wang, H., Gao, R., & Zeng, F. (2023). Effect of microplastics on the binding properties of Pb(ii) onto dissolved organic matter: insights from fluorescence spectra and FTIR combined with two-dimensional correlation spectroscopy [10.1039/D3RA04189A]. *RSC Advances*, *13*(35), 24201-24210. https://doi.org/10.1039/D3RA04189A

Lusiana, E. D., Mahmudi, M., Hutahaean, S. M., Darmawan, A., Buwono, N. R., Arsad, S., & Musa, M. (2022). A Multivariate Technique to Develop Hybrid Water Quality Index of the Bengawan Solo River, Indonesia [journal article]. *Journal of Ecological Engineering*, *23*(2), 123-131. https://doi.org/10.12911/22998993/144420

Lyu, S., Chen, W., Zhang, W., Fan, Y., & Jiao, W. (2016). Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges. *Journal of Environmental Sciences*, *39*, 86-96. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.11.012

Marshall, A. J., Phillips, L., Longmore, A., Hayden, H. L., Heidelberg, K. B., Tang, C., & Mele, P. (2023). Temporal profiling resolves the drivers of microbial nitrogen cycling variability in coastal sediments. *Science of The Total Environment*, *856*, 159057.

Martin, P., Moynihan, M. A., Chen, S., Woo, O. Y., Zhou, Y., Nichols, R. S., Chang, K. Y. W., Tan, A. S. Y., Chen, Y.-H., Ren, H., & Chen, M. (2022). Monsoon-driven biogeochemical dynamics in an equatorial shelf sea: Time-series observations in the Singapore Strait. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *270*, 107855. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107855

McArley, T. J., Sandblom, E., & Herbert, N. A. (2021). Fish and hyperoxia—From cardiorespiratory and biochemical adjustments to aquaculture and ecophysiology implications. *Fish and Fisheries*, *22*(2), 324-355. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/faf.12522

McCleskey, R. B., Cravotta Iii, C. A., Miller, M. P., Tillman, F., Stackelberg, P., Knierim, K., & Wise, D. (2023). Salinity and total dissolved solids measurements for natural waters: An overview and a new salinity method based on specific conductance and water type. *Applied Geochemistry*, *154*. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105684

Mo, Z., Li, L., Ying, L., & Xiaolong, G. (2020). Effects of sudden drop in salinity on osmotic pressure regulation and antioxidant defense mechanism of Scapharca subcrenata. *Frontiers in physiology*, *11*, 884.

Nayeb Yazdi, M., Sample, D. J., Scott, D., Wang, X., & Ketabchy, M. (2021). The effects of land use characteristics on

urban stormwater quality and watershed pollutant loads. *Science of The Total Environment*, *773*, 145358. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145358

Noor, R. J., Kabangnga, A., & Fathuddin, F. (2021a). [heavy metal; sediment; water body; contamination factor]. *2021*, *24*(1), 9. https://doi.org/10.14710/jkt.v24i1.9619

Noor, R. J., Kabangnga, A., & Fathuddin, F. (2021b). Distribusi Spasial dan Faktor Kontaminasi Logam Berat di Pesisir Kota Makassar. *Jurnal Kelautan Tropis*, *24*(1), 93-101.

Oduor, N. A., Munga, C. N., Imbayi, L. K., Botwe, P. K., Nyanjong, E. O., Muthama, C. M., Mise, N. A., & Moosdorf, N. (2024). Anthropogenic nutrients and phytoplankton diversity in Kenya's coastal waters: An ecological quality assessment of sea turtle foraging sites. *Mar Pollut Bull*, *199*, 115897. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115897

Piatka, D. R., Wild, R., Hartmann, J., Kaule, R., Kaule, L., Gilfedder, B., Peiffer, S., Geist, J., Beierkuhnlein, C., & Barth, J. A. C. (2021). Transfer and transformations of oxygen in rivers as catchment reflectors of continental landscapes: A review. *Earth-Science Reviews*, *220*, 103729. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103729

Pinto, U., Rao, S., Phillip Svozil, D., Wright, A., & Goonetilleke, A. (2023). Understanding the role of land use for urban stormwater management in coastal waterways. *Water Research*, *245*, 120658. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120658

Polapa, F. S., Annisa, R. N., Yanuarita, D., & Ali, S. M. (2022). [Logam Berat; Perairan Laut; Sedimen Laut; Kota Makassar]. *2022*, *20*(2), 8. https://doi.org/10.14710/jil.20.2.271-278

Puspitasari, R., Eman, C. M., Pusparany, D. A., Azzah, N. R., Ratnasari, S., Heryati, S. H. A., & Takarina, N. D. (2022). Status Kontaminasi Fisik dan Kimia di Teluk Jakarta periode 2015-2021. *OLDI (Oseanologi dan Limnologi di Indonesia)*, *7*(1), 1-13.

Quinteiro, P., Dias, A. C., Araújo, A., Pestana, J. L., Ridoutt, B. G., & Arroja, L. (2015). Suspended solids in freshwater systems: characterisation model describing potential impacts on aquatic biota. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*, 1232-1242.

Ren, X., Wang, Q., Shao, H., Xu, Y., Liu, P., & Li, J. (2021). Effects of Low Temperature on Shrimp and Crab Physiology, Behavior, and Growth: A Review [Review]. *Frontiers in Marine Science*, *Volume 8 - 2021*. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.746177

Roibás-Rozas, A., Núñez, M., Mosquera-Corral, A., & Hospido, A. (2022). Modeling the impact of salinity variations on aquatic environments: including negative and positive effects in life cycle assessment. *Environmental Science & Technology*, *56*(2), 874-884.

Rossi, L., Fankhauser, R., & Chevre, N. (2006). Water quality criteria for total suspended solids (TSS) in urban wet-weather discharges. *Water Science and Technology*, *54*(6-7), 355-362.

Samawi, M., Werorilangi, S., & Selamat, M. (2019). Elevated phosphate, ammonia and total suspended solids near sewage outlets and reclamation sites in coastal waters of Makassar, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E. H., Rietkerk, M., & Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, *461*(7260), 53-59. https://doi.org/10.1038/nature08227

Scherpereel, C., Alosairi, Y., Lambrechts, J., & Hanert, E. (2025). Hydrodynamic impacts of bridge construction and land reclamation on water residence time and flushing processes in Kuwait Bay. *Mar Pollut Bull*, *214*, 117716. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117716

Simanjuntak, M. (2009). Hubungan faktor lingkungan kimia, fisika terhadap distribusi plankton di perairan Belitung Timur, Bangka Belitung [East Belitung Waters, nutrients, plankton]. *2009*, *11*(1), 15. https://doi.org/10.22146/jfs.2970

Smith, V. H., Joye, S. B., & Howarth, R. W. (2006). Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography*, *51*(1part2), 351-355.

St Romain, S. (2023). Impacts of Salinity on the Environmental Fate of Hydrophobic Organic Contaminants in Water.

Stojanovic, T., Ballinger, R. C., & Lalwani, C. S. (2004). Successful integrated coastal management: measuring it with research and contributing to wise practice. *Ocean & Coastal Management*, *47*(5), 273-298. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.08.001

Suleman, Y., Paotonan, C., & Rachman, T. (2018). Tinjauan degradasi lingkungan pesisir dan laut kota Makassar terhadap kebijakan pengelolaan kawasan pesisir. *Riset Sains dan Teknologi Kelautan*, 30-37.

Szalińska, E., Jarosińska, E., Orlińska-Woźniak, P., Jakusik, E., Warzecha, W., Ogar, W., & Wilk, P. (2024). Total nitrogen and phosphorus loads in surface runoff from urban land use (city of Lublin) under climate change. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(35), 48135-48153. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34365-9

Uddin, M. G., Nash, S., Rahman, A., & Olbert, A. I. (2022). A comprehensive method for improvement of water quality index (WQI) models for coastal water quality assessment. *Water Research*, *219*, 118532. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118532

Verma, J., Pant, H., Sign, S., & Tiwari, A. (2020). Marine pollution, sources, effect and management. *Three Major Dimensions of Life: Environment, Agriculture and Health; Society of Biological Sciences and Rural Development: Prayagraj, India*, 270-276.

Wang, L., Guo, Y., Liu, W., Shao, H., Dai, S., Mu, L., Mao, X., Bi, H., Zhou, K., & Lei, X. (2026). Coastal land reclamation induced estuarine nutrient-related eutrophication stressors: phenomena, evaluation and management strategies. *Journal of Hydrology*, *667*, 134867. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134867

Wang, L., Lei, X., Yuehua, G., Zhou, Y., Han, J.-C., Huang, Y., Li, B., Mao, X.-z., & Tang, Z. (2024). A novel method of identifying estuary high-nutrient zones for water quality management. *Science of The Total Environment*, *912*, 169578. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169578

Yan, W., Wang, Q., Gao, Y., Xu, M., Li, H., Zhou, Y., Liu, C., & Xiao, Y. (2023). Coupling between Increased Amounts of Microplastics and Dissolved Organic Compounds in Water. *Water*, *15*(23), 4126. https://www.mdpi.com/2073-4441/15/23/4126

Yang, Y.-Y., & Toor, G. S. (2018). Stormwater runoff driven phosphorus transport in an urban residential catchment: Implications for protecting water quality in urban watersheds. *Sci Rep*, *8*(1), 11681. https://doi.org/10.1038/s41598-018-29857-x

Yolanda, D. S., Muhsoni, F. F., & Siswanto, A. D. (2016). Distribusi nitrat, oksigen terlarut, dan suhu di perairan Socah-Kamal Kabupaten Bangkalan. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, *9*(2), 93-98.

Zainol, Z., Akhir, M. F., & Zainol, Z. (2021). Pollutant transport and residence time of a shallow and narrow coastal lagoon estimated using a numerical model. *Mar Pollut Bull*, *164*, 112011. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112011

Zamani, N. P., & Arifin, T. (2016). Hubungan parameter lingkungan terhadap gangguan kesehatan karang di pulau tunda-–banten. *Jurnal Kelautan Nasional*, *11*(2), 105-118.

Zhang, G., Wen, Y., Ding, C., Zhang, G., & Sun, J. (2023). Hypoxia in the Bohai Bay, China: distributions, causes and mechanisms [Original Research]. *Frontiers in Marine Science*, *Volume 10 - 2023*. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1199340

Zhang, J., Hou, X., Zhang, K., Deng, Y., Xiao, Q., Gao, Y., Zhou, X., & Yan, B. (2024). Deciphering fluorescent and molecular fingerprint of dissolved organic matter leached from microplastics in water. *Water Research*, *250*, 121047. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121047

Zhang, W., Pan, S., Yu, L., Zhang, H., Chen, F., Song, G., Hu, J., Wei, Q., Zhao, H., Chen, J., & Zhou, F. (2025). Dissolved oxygen depletion in Chinese coastal waters. *Water Research*, *272*, 123004. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.123004

Zheng, Q., Wang, Y., Chen, J., Li, Y., Zhao, F., Liu, D., Wei, M., Kong, D., Chen, Z., Zhang, Z., & Ma, Y. (2022). Effects of

Salinity on the Growth, Physiological Characteristics, and Intestinal Microbiota of the Echiura Worm (Urechis unicinctus) [Original Research]. *Frontiers in Marine Science*, *Volume 9 - 2022*. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.912023