Jurnal Biologi Tropis

Original Research Paper

Seawater Quality and Heavy Metal (Cd, Pb, Zn) Accumulation in Green Mussels (*Perna viridis*), Cilincing, North Jakarta

Aisyah Nurhalimah[1*], Titin Herawati[1,2], Mochamad Untung Kurnia Agung[1], Eri Bachtiar[1]

[1]Department of Marine Science, Faculty of Fishery and Marine Science, Universitas Padjadjaran, Sumedang, West Java, Indonesia;

[2]Master of Marine Conservation, Universitas Padjadjaran, Sumedang, West Java, Indonesia;

Article History

Received : September 27th, 2026

Revised : October 15th, 2026

Accepted : October 23th, 2026

*Corresponding Author: **Aisyah Nurhalimah**, Department of Marine Science, Faculty of Fishery and Marine Science, Universitas Padjadjaran, Sumedang, West Java, Indonesia; Email: aisyah22015@mail.unpad.ac.id

Abstract: Anthropogenic pressure in the coastal waters of Cilincing, North Jakarta, degrades water quality and threatens green mussel (*Perna viridis*) aquaculture safety. This study analyzed water quality status using the Pollution Index (PI), environmental parameter interactions via Principal Component Analysis (PCA), and Cd, Pb, and Zn bioaccumulation based on the Bioconcentration Factor (BCF) in *P. viridis* across five sampling stations representing estuary, reclamation, and nearest, middle, and farthest aquaculture zones. Water, sediment, and biota samples were analyzed using ICP-OES following SNI and APHA standards. Results showed seawater quality ranged from lightly to moderately polluted (Stations 1, 2, and 5 were moderately polluted; Stations 3 and 4 were lightly polluted). PCA explained 94.3% of total data variability through two principal components (PC1: TSS, oil and grease, ammonia, nitrate, phosphate, salinity, TDS, and transparency; PC2: temperature, pH, and DO). Cd and Pb were undetected in *P. viridis*, whereas Zn accumulated at a low category (BCF < 100). This study concludes that Cilincing coastal waters are degraded; although Zn bioaccumulation remains low, its concentration exceeds BPOM safe consumption limits. Stricter land-based waste control and periodic surveillance are recommended to ensure food safety and ecosystem sustainability.

Keywords: BCF; Heavy Metals; *Perna viridis*; Pollution Indeks; Seawater Quality.

Pendahuluan

Wilayah pesisir merupakan zona peralihan (*interface*) antara daratan dan lautan yang sangat produktif serta bernilai ekonomis tinggi. Di Indonesia, sekitar 60% penduduk bergantung pada ekosistem ini untuk memenuhi kebutuhan hidup (Budiyanto, 2021). Namun, pesatnya aktivitas antropogenik memicu tekanan pencemaran perairan, di mana sekitar 80% polutan diperkirakan berasal dari aktivitas daratan (*land-based sources*) (NOAA, 2024). Akumulasi bahan pencemar organik maupun anorganik secara bertahap menurunkan kualitas air pesisir dan mengancam keberlanjutan ekosistem (Frid & Caswell, 2017). Di sisi lain, jaminan kualitas perairan menjadi syarat mutlak untuk mendukung sektor perikanan tangkap maupun budidaya, terutama mengingat angka konsumsi ikan nasional yang terus meningkat dari tahun 2022 hingga 2024 hingga mencapai 58,76 kg/kapita (KKP, 2025).

Kerang hijau (*Perna viridis*) merupakan komoditas ekonomis dengan kandungan protein tinggi (21,9%) yang banyak dibudidayakan di pesisir Indonesia (Nurbani *et al.*, 2022). Budidaya ini bahkan pernah mencatatkan angka produksi sebesar 31.100 ton dengan melibatkan 1.626 nelayan di Cilincing (Hikmah *et al.*, 2018). Secara ideal, lokasi budidaya *P. viridis* harus terbebas dari paparan bahan pencemar berbahaya, khususnya logam berat persisten dan

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

© 2026 The Author(s). This article is open access

toksik seperti kadmium (Cd), timbal (Pb), dan seng (Zn). Sifat biologis *P. viridis* sebagai *filter feeder*, *sessile*, dan *sedentary* menjadikannya biota indikator (*sentinel organism*) yang sangat sensitif dalam mengakumulasi polutan dari kolom air maupun sedimen (Triantoro *et al.*, 2017). Namun, fakta di lapangan menunjukkan bahwa kawasan pesisir Cilincing, Jakarta Utara yang dikenal sebagai sentra budidaya *P. viridis* sekaligus muara DAS Sunter dan Cakung telah menghadapi tekanan ekologis yang sangat berat akibat limbah domestik, industri, serta aktivitas reklamasi dan konstruksi pelabuhan (Ambari, 2025; Wahyuni *et al.*, 2022).

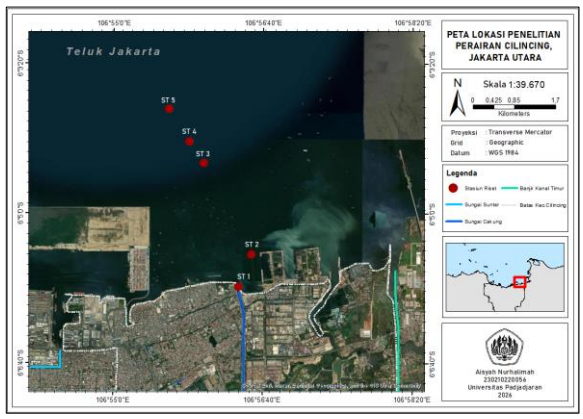
Secara riil, perairan Cilincing telah dikategorikan mengalami pencemaran tingkat sedang berdasarkan metode STORET (Simbolon, 2016), dengan keberadaan polutan anorganik seperti Pb dan Zn terdeteksi di kolom air Teluk Jakarta (Maisalda *et al.*, 2024). Kesenjangan (*gap*) muncul ketika beberapa studi melaporkan bahwa akumulasi logam berat pada jaringan *P. viridis* di lokasi budidaya tersebut masih berada di bawah batas maksimum keamanan pangan SNI 7387:2009 (Putri *et al.*, 2023). Ketidaksesuaian antara tingginya beban pencemaran perairan dengan rendahnya tingkat bioakumulasi pada kerang hijau menunjukkan adanya dinamika kompleks dalam pasokan, pengenceran, dan interaksi fisika-kimia perairan yang belum terjelaskan secara komprehensif.

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis statistik multivariat untuk menjembatani kesenjangan tersebut. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya terfokus pada evaluasi korelasi parsial atau status mutu tunggal, penelitian ini mengombinasikan pemetaan status mutu air berbasis Indeks Pencemaran (IP) KepMen LH No. 115/2003 dengan *Principal Component Analysis* (PCA) untuk mengidentifikasi pola sebaran serta faktor pengendali utama kualitas air berdasarkan parameter fisika-kimia sesuai PP No. 22 Tahun 2021. Selain itu, perhitungan *Bioconcentration Factor* (BCF) dilakukan pada lokasi budidaya kerang hijau dengan ICP-OES. Pendekatan ini memberikan pemahaman mengenai mekanisme bioakumulasi logam berat Cd, Pb, dan Zn pada *P. viridis* dalam merespons tekanan antropogenik di perairan pesisir Cilincing.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat Penelitian

Pengambilan sampel air laut, sedimen, dan kerang hijau (*Perna viridis*) dilaksanakan pada bulan April 2026 di perairan pesisir Cilincing, Jakarta Utara, yang terbagi ke dalam lima stasiun pengamatan berdasarkan koordinat geografisnya, yaitu Stasiun 1 (106,939897° BT; -6,097470° LS) di area muara Cilincing, Stasiun 2 (106,942240° BT; -6,090583° LS) di area tanggul dekat reklamasi Pelabuhan Marunda, Stasiun 3 (106,933398° BT; -6,074215° LS) di lokasi budidaya terdekat, Stasiun 4 (106,930743° BT; -6,070355° LS) di lokasi budidaya tengah, serta Stasiun 5 (106,926947° BT; -6,064397° LS) di lokasi budidaya terjauh dari garis pantai (Gambar 1). Selanjutnya, analisis sampel secara *ex situ* dilakukan di Laboratorium *Production Chemistry* PT Geoservices, Cikarang Utara, serta Laboratorium Kualitas Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

Alat dan Bahan

Alat penelitian terdiri atas peralatan lapangan dan peralatan laboratorium. Alat lapangan meliputi botol HDPE 1 L, botol kaca *amber*, *coolbox*, DO meter Lutron, ember, *ekman grab*, gayung, GPS, kamera, kertas label, *logsheet*, meteran jahit, *nansen bottle*, perahu, plastik *ziplock*, pH meter Lutron, *secchi disk*, dan termometer. Alat laboratorium meliputi blender, cawan penguap, corong gelas, corong pisah, desikator, erlenmeyer, *electronic repeater pipette*, gelas kimia, gelas ukur, *hotplate*, ICP-OES (PerkinElmer Avio 220 Max), kuvet, kolom reduksi, labu ukur (100 mL), tanur, neraca analitik (0,0001 g), oven, pH/Cond meter Mettler

Toledo SevenGo, pipet tetes, pipet ukur, serta spektrofotometer UV-Vis (Jasco V730). Sementara itu, bahan yang digunakan meliputi sampel air laut, sampel sedimen, sampel kerang hijau (*Perna viridis*), akuades, *aluminium foil*, *argentous nitrate* ($AgNO_3$), asam nitrat (HNO_3), asam sulfat (H_2SO_4), asam perklorat ($HClO_4$), asam klorida (HCl), *Cu-Cd granules*, es batu, fenolftalein, gas argon, *glass wool*, *ICP Multi element standard solution IV*, kertas saring Whatman no. 42, larutan alkalin sitrat, larutan amonium klorida-EDTA, larutan amonium molibdat I, larutan sulfanilamida-NED, larutan fenol (C_6H_5OH), larutan KCl 0,01 M, larutan natrium hipoklorit 5%, larutan natrium nitroprusida, pH 4, 7, dan 10, larutan *stannous* klorida I, n-Heksana, natrium hidroksida (NaOH), natrium sulfat anhidrat, dan parafilm.

Metode Penelitian

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan *purposive sampling* jenis *maximum variation sampling* berdasarkan gradien aktivitas antropogenik di pesisir Cilincing, Jakarta Utara. Lokasi pengamatan terdiri atas Stasiun 1 (muara Cilincing), Stasiun 2 (tanggul/reklamasi Pelabuhan Marunda), serta Stasiun 3, 4, dan 5 di kawasan budidaya kerang hijau (*Perna viridis*) berdasarkan jarak dari garis pantai (terdekat, tengah, jauh).

Pengambilan sampel air dilakukan sesuai SNI 6989.57:2008 menggunakan *Nansen bottle* pada kedalaman 5–10 m untuk analisis TSS, TDS, salinitas, nutrien (amonia, nitrat, dan fosfat), dan logam berat (Cd, Pb, dan Zn), serta gayung pada kedalaman 0–30 cm untuk analisis minyak-lemak. Parameter suhu, kecerahan, pH, dan DO diukur secara *in situ*. Sampel sedimen diambil menggunakan *Ekman Grab* dan dikemas dalam plastik *ziplock*. Sampel *P. viridis* (100 individu/stasiun) diperoleh melalui teknik penyelaman, lalu dibagi menjadi kategori ukuran kecil (<4 cm) dan besar (>4 cm) masing-masing 50 individu. Seluruh sampel air, sedimen, dan *P.viridis* disimpan dalam *coolbox* selama transportasi menuju laboratorium. Metode analisis parameter fisika-kimia air diukur sesuai standar (Tabel 1).

Preparasi logam berat air laut dilakukan melalui destruksi asam nitrat mengacu pada APHA 3030 E dengan memanaskan 100 mL sampel dan 5 mL HNO_3 pekat hingga volume 30 mL, lalu diencerkan hingga 100 mL. Daging *P. viridis* dan sedimen dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 18–24 jam, dihaluskan dengan blender, dan khusus sampel *P. viridis* dilanjutkan pengabuan dalam tanur pada suhu 750 °C selama 1 jam sebelum didinginkan dalam desikator. Destruksi sampel sedimen dan biota mengacu pada SNI 06-6992.3-2004 (Tabel 2), dengan memanaskan 3 g serbuk sampel bersama 25 mL akuades dan 10 mL HNO_3 pekat pada suhu 105 °C hingga volume tersisa 10 mL, kemudian ditambahkan 5 mL HNO_3 pekat dan 3 mL $HClO_4$, dipanaskan kembali selama 30 menit, serta disaring dan diencerkan hingga 100 mL. Konsentrasi logam berat Cd, Pb, dan Zn pada seluruh sampel diukur menggunakan instrumen ICP-OES mengacu pada APHA 3120 (Tabel 2).

Tabel 1. Metode analisis parameter fisika-kimia kualitas air laut

Parameter	Satuan	Metode Analisis	Lokasi Pengamatan
Fisika			
Suhu	°C	SNI 06-6989.23-2005	Lapangan
Kecerahan	m	*Secchi disk*	Lapangan
Arus	m/s	ODV	*Copernicus*
TSS	mg/L	APHA 2540-D	Laboratorium
TDS	mg/L	SNI 06-6989.1-2004	Laboratorium
Kimia			
Salinitas	‰	APHA 2520 B	Laboratorium
pH	-	SM 4500-H+	Lapangan
Oksigen Terlarut	mg/L	SM 4500-O-G	Lapangan
Minyak & Lemak	mg/L	SNI 06-6989.10-2004	Laboratorium
Amonia	mg/L	APHA 4500-NH_3-F	Laboratorium
Nitrat	mg/L	APHA 4500-NO_3-E	Laboratorium

Parameter	Satuan	Metode Analisis	Lokasi Pengamatan
Fosfat	mg/L	APHA 4500-P-D	Laboratorium
Kadmium (Cd)	mg/L	APHA 3120	Laboratorium
Timbal (Pb)	mg/L	APHA 3120	Laboratorium
Seng (Zn)	mg/L	APHA 3120	Laboratorium

Tabel 2. Metode analisis parameter logam berat pada sedimen dan *P. viridis*

Parameter Logam Berat Cd, Pb, & Zn	Satuan	Metode Analisis	Lokasi Pengamatan
Sedimen	mg/kg	SNI 06-6992.3-2004 & APHA 3120	Laboratorium
Perna viridis	mg/kg		

Analisis Data

Indeks Pencemaran

Data kualitas air laut (13 parameter fisika-kimia, tanpa TDS dan arus) dianalisis secara deskriptif komparatif dan dievaluasi status mutunya menggunakan metode Indeks Pencemaran (IP) berdasarkan KepMenLH No. 115 Tahun 2003 (Tabel 3) dengan rumus:

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

Keterangan:
PIj = Indeks Pencemaran bagi peruntukkan (j).
Ci = Variabel hasil uji parameter (i).
Lij = Batas baku mutu yang diizinkan (PP No.22 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut, yang disajikan pada Lampiran 8).
Ci/Lij = Perbandingan hasil uji parameter dengan baku mutu.
$(Ci/Lij)_R$ = Hasil rerata dari *Ci/Lij*
$(Ci/Lij)_M$ = Hasil maksimum dari *Ci/Lij*

Jika nilai (Ci/Lij) > 1 atau = 1, maka perlu dilakukan perhitungan kembali, yaitu:
Ci/Lij (baru) = 1,0 + P.log (*Ci/Lij*)
dengan,
P = konstanta umum, P = 5
Jika baku mutu (*Lij*) memiliki rentang:

a. Untuk *Ci* < *Lij* rata-rata
(*Ci/Lij*) baru = $\frac{[C_i/L_{ij\,rata-rata}]}{L_{ij\,min} - L_{ij\,rata-rata}}$

a. Untuk *Ci* > *Lij* rata-rata
(*Ci/Lij*) baru = $\frac{[C_i/L_{ij\,rata-rata}]}{L_{ij\,max} - L_{ij\,rata-rata}}$

Jika penurunan nilai parameter menunjukkan peningkatan pencemaran (misalnya pada Oksigen Terlarut/DO), maka digunakan rumus:
(*Ci/Lij*) baru = $\frac{C_{im}/C_i}{C_{im}/L_{ij}}$, dimana C_{im}= nilai teoritik

Tabel 3. Klasifikasi mutu air laut berdasarkan Indeks Pencemaran (IP)

Nilai Indeks	Keterangan
$0 \leq PIj \leq 1{,}0$	Kondisi Baik
$1{,}0 < PIj \leq 5{,}0$	Tercemar ringan
$5{,}0 < PIj \leq 10$	Tercemar sedang
$PIj > 10$	Tercemar berat

Kandungan Logam Berat pada Sedimen

Kandungan logam berat sedimen (mg/kg) dievaluasi secara komparatif mengacu pada standar mutu *Australian and New Zealand Environment and Conservation Council* (ANZECC, 2000) (Tabel 4).

Tabel 4. Baku mutu logam berat pada sedimen

Logam Berat	Nilai Baku Mutu (mg/kg)
Kadmium (Cd)	1,5
Timbal (Pb)	50
Seng (Zn)	200

Bioconcentration Factor (BCF)

Tingkat akumulasi logam berat pada jaringan *P. viridis* dievaluasi menggunakan nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) berdasarkan rasio konsentrasi logam pada jaringan tubuh terhadap media lingkungan (air dan sedimen) mengacu pada Potipat *et al*. (2015) dengan persamaan:

$$BCF = C_{biota} / C_{media}$$

Keterangan:
BCF = nilai *Bioconcentration Factor*
C_{biota} = konsentrasi logam berat dalam jaringan biota (mg/kg)
C_{media} = konsentrasi logam berat di kolom air (mg/L) atau sedimen (mg/kg).

Kapasitas akumulasi logam berat oleh *P. viridis* diklasifikasikan dalam tingkat penyerapan mengacu pada Esch (1977) (Tabel 5).

Tabel 5. Klasifikasi kapasitas akumulasi

Rasio Konsentrasi	Nilai Baku Mutu (mg/kg)
BCF < 100	*Low Accumulation*
100 ≤ BCF ≤ 1000	*Moderate Accumulation*
BCF > 1000	*High Accumulation*

Principal Component Analysis (PCA)

Principal Component Analysis (PCA), merupakan metode statistik multivariat untuk mereduksi dimensi data melalui transformasi variabel asli yang berkorelasi menjadi sekumpulan variabel baru yang tidak saling berkorelasi, yang disebut komponen utama (Sarkar, 2023). Untuk mengidentifikasi pola hubungan dan pengelompokan spasial antarparameter kualitas air laut, data variabel lingkungan terlebih dahulu ditransformasi melalui proses standardisasi (*z-score*). Kelayakan dataset untuk analisis multivariat dievaluasi menggunakan uji *Kaiser-Meyer-Olkin* (KMO) dan *Bartlett's Test of Sphericity* dengan perangkat lunak SPSS, di mana dataset dinyatakan layak apabila nilai KMO > 0,5 dan nilai signifikansi $p < 0,05$ (Chen *et al*., 2023). Komponen Utama (*Principal Component*/PC) yang dipertahankan ditentukan berdasarkan kriteria *eigenvalue* ≥ 1,0 dan mampu menjelaskan varians kumulatif data minimal sebesar 80% (Mayapada *et al.*, 2019). Ekstraksi matriks korelasi, *scree plot*, *loading plot*, serta *biplot* diproses menggunakan perangkat lunak statistik Minitab untuk mengidentifikasi variabel pencemar utama yang paling berpengaruh di lokasi penelitian.

Hasil dan Pembahasan

Kualitas Air Laut

Kualitas air laut di pesisir Cilincing, Jakarta Utara, dievaluasi berdasarkan baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut, dengan hasil pengukuran yang disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil data pengamatan kualitas air laut, perairan pesisir Cilincing

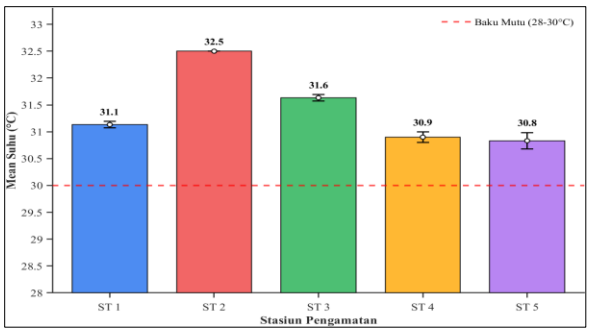
No.	Parameter	Satuan	Stasiun Pengamatan					Baku Mutu*
			ST 1	ST 2	ST 3	ST 4	ST 5	
	Fisika							
1.	Suhu	ºC	31,1	32,5	31,6	30,9	30,8	28-30
2.	Kecerahan	m	0,57	1,17	1,17	1,75	2,17	> 5
3.	Arus	m/s	0,02045	0,02045	0,02045	0,02045	0,02045	-
4.	TSS	mg/L	325,8	243,0	184,0	94,5	40,2	20
5.	TDS	mg/L	12.573	19.763	20.433	20.800	20.900	-
	Kimia							
6.	Salinitas	‰	15,8	26,1	27,0	27,6	27,6	33-34
7.	pH	-	7,46	8,66	8,46	8,14	8,18	7-8,5
8.	Oksigen Terlarut	mg/L	2,7	16,3	11,9	6,3	8,3	> 5
9.	Minyak & Lemak	mg/L	37,0	8,0	11,0	3,0	2,0	1
10.	Amonia	mg/L	3,970	< 0,01	< 0,01	0,014	0,296	0,3
11.	Nitrat	mg/L	0,300	0,435	0,493	0,541	0,744	0,06
12.	Fosfat	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,022	0,465	0,015
13.	Kadmium (Cd)	mg/L	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	0,001
14.	Timbal (Pb)	mg/L	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	0,008
15.	Seng (Zn)	mg/L	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	0,05

Keterangan:
*Baku Mutu Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (Lamp. VIII, baku mutu bagi biota laut); < DL = *Below Detection Limit*; tanda - = tidak ada baku mutu.

Suhu Permukaan Laut

Hasil pengukuran *in situ* suhu perairan pesisir Cilincing berkisar antara 30,8–32,5 °C (Gambar 2), dengan nilai tertinggi di Stasiun 2 (32,5 °C, 11.37 WIB) dan terendah di Stasiun 5 (30,8 °C, 13.40 WIB). Rata-rata suhu ini sedikit melampaui baku mutu biota laut (28–30 °C; PP No. 22/2021), lebih rendah dari temuan Simbolon (2016; 33–35 °C), namun lebih tinggi dari Putri *et al.* (2023; 28,6–30 °C) pada musim

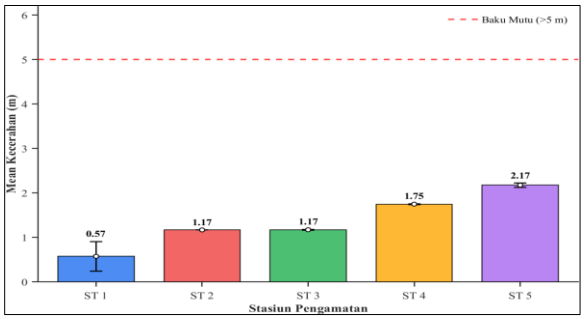
yang sama. Variasi antarstasiun dipengaruhi oleh waktu *sampling* dan intensitas penyinaran matahari selama musim pancaroba (Rosalina *et al.*, 2024; Fofied *et al.*, 2024). Secara ekologis, rentang suhu ini masih dalam toleransi termal *Perna viridis* (27–35 °C; Soon & Ransangan, 2016; Ahmed *et al.*, 2016) sehingga tetap mendukung aktivitas budidaya kerang hijau.



Gambar 2. Suhu Permukaan Laut (SPL) di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Kecerahan

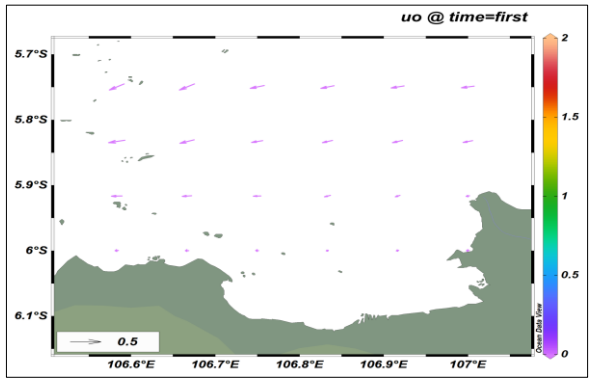
Kecerahan perairan pesisir Cilincing menunjukkan pola gradien yang meningkat ke arah laut lepas (*offshore*), berkisar antara 0,57–2,17 m (Gambar 3). Nilai terendah berada di Stasiun 1 (0,57 m), diikuti Stasiun 2 dan 3 (1,17 m), Stasiun 4 (1,75 m), serta tertinggi di Stasiun 5 (2,17 m). Seluruh lokasi belum memenuhi baku mutu biota laut (> 5 m; PP No. 22/2021). Fluktuasi ini sejalan dengan Simbolon (2016; 1–2 m) dan lebih tinggi dari interior Teluk Jakarta (Nastiti *et al.*, 2016; 0,43–1,1 m). Peningkatan kecerahan menuju *offshore* dikendalikan oleh penurunan konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) akibat pengenceran massa air laut terbuka yang meminimalkan masukan sedimen daratan.



Gambar 3. Kecerahan di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Arus

Simulasi arus residual rata-rata musim peralihan I (April 2026) menunjukkan pola arah arus dominan dari timur ke barat dengan kecepatan lemah sebesar 0,02045 m/s di kelima stasiun pengamatan pesisir Cilincing (Gambar 4). Pola ini selaras dengan Nugraha *et al.* (2025) yang menyatakan sirkulasi massa air Teluk Jakarta dikendalikan angin muson (0,01–0,15 m/s), bergerak ke barat saat musim timur dan ke timur saat musim barat.



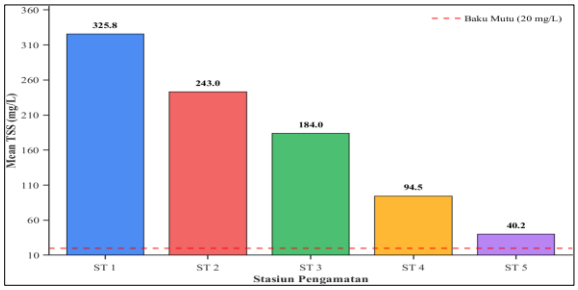
Gambar 4. Pola sebaran spasial arus di Teluk Jakarta pada April (2026)

Lemahnya kecepatan arus residual menurunkan kapasitas transpor sedimen, sehingga material tersuspensi dari hilir sungai dan proyek reklamasi cenderung terakumulasi memicu pendangkalan. Kondisi ini diperkuat oleh tipe pasang surut tunggal (*diurnal*) dengan tunggang pasut rendah (1,26 m) yang menghasilkan energi arus pasut lemah untuk mentranspor sedimen keluar perairan (Nugraha *et al.*, 2025).

Total Suspended Solids (TSS)

Konsentrasi *Total Suspended Solids* (TSS) di perairan pesisir Cilincing membentuk pola gradien yang menurun seiring bertambahnya jarak dari pantai, berkisar antara 40,2–325,8 mg/L (Gambar 5). Konsentrasi tertinggi terdeteksi di Stasiun 1 dekat muara (325,8 mg/L), diikuti Stasiun 2 dekat kawasan reklamasi (243,0 mg/L), Stasiun 3 (184,0 mg/L), Stasiun 4 (94,5 mg/L), dan terendah di Stasiun 5 area budidaya *P. viridis* (40,2 mg/L). Seluruh stasiun telah melampaui baku mutu biota laut (20 mg/L; PP No. 22/2021). Nilai TSS ini lebih tinggi dibanding temuan Simbolon (2016; 43,33–59,56 mg/L), namun masih berada dalam rentang Teluk Jakarta (Edward *et al.*, 2023; 8–627 mg/L).

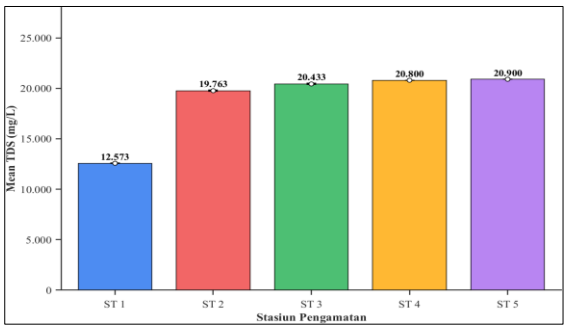
Tinggi-rendahnya TSS di dekat pantai dipengaruhi oleh resuspensi sedimen akibat batimetri dangkal (Setyawati *et al.*, 2023), kondisi pasang rendah saat sampling, serta pasokan limbah domestik dan reklamasi yang tertransportasi arus pantai menuju laut lepas (Fanela *et al.*, 2019; Ridarto *et al.*, 2023).



Gambar 5. *Total Suspended Solids* (TSS) di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Total Dissolved Solids (TDS)

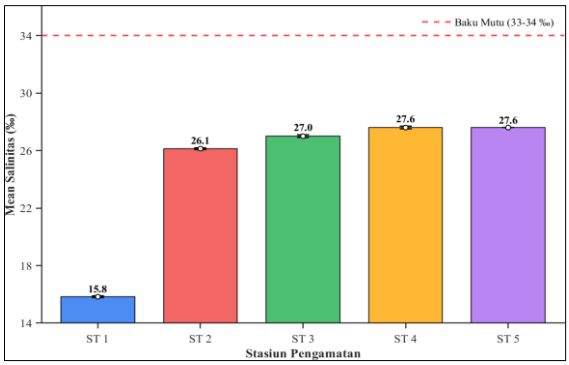
Konsentrasi *Total Dissolved Solids* (TDS) di perairan pesisir Cilincing menunjukkan pola gradien spasial yang meningkat menuju laut lepas, berkisar antara 12.573–20.900 mg/L (Gambar 6). Konsentrasi terendah berada di Stasiun 1 dekat muara (12.573 mg/L) dan Stasiun 2 (19.763 mg/L), kemudian meningkat secara bertahap di Stasiun 3 (20.433 mg/L), Stasiun 4 (20.800 mg/L), hingga puncaknya di Stasiun 5 (20.900 mg/L). Berdasarkan klasifikasi Rusydi (2018), seluruh lokasi pengamatan tergolong ke dalam kategori air asin (*saline* water, 10.000–100.000 mg/L). Peningkatan TDS menuju *offshore* didorong oleh dominasi massa air laut terbuka yang kaya akan ion terlarut (Na^+ dan Cl^-) dibandingkan dengan pasokan air muara.



Gambar 6. *Total Dissolved Solids* (TDS) di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Salinitas

Salinitas di perairan pesisir Cilincing menunjukkan gradien spasial linear yang sejalan dengan pola TDS, yaitu meningkat seiring bertambahnya jarak dari daratan dengan kisaran 15,8–27,6 ‰ (Gambar 7). Nilai terendah terdeteksi di Stasiun 1 dekat muara (15,8 ‰) akibat pengenceran massa air tawar (*freshwater discharge*) dari Sungai Cakung/Kali Rawa Malang di zona pencampuran, lalu meningkat di Stasiun 2 kawasan reklamasi (26,1 ‰) sebagai area transisi, hingga mencapai nilai tertinggi di area budidaya *P. viridis* yaitu Stasiun 3 (27,0 ‰), Stasiun 4 (27,6 ‰), dan Stasiun 5 (27,6 ‰) yang didominasi massa air laut.

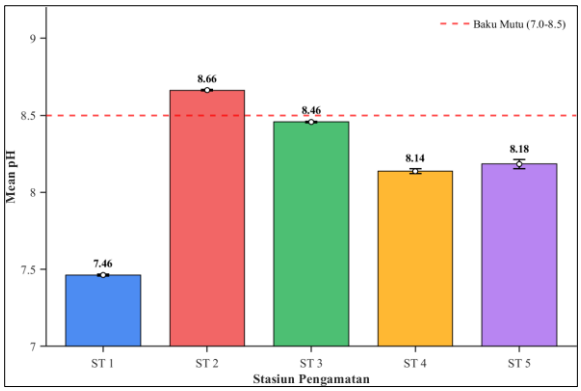


Gambar 7. Salinitas di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Meskipun seluruh nilai tersebut berada di bawah baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 (33–34 ‰), temuan ini selaras dengan hasil penelitian Putri *et al*. (2023; 11–27 ‰). Tingkat salinitas di area budidaya (Stasiun 3–5) tersebut masih tergolong optimal untuk pertumbuhan serta laju filtrasi *P. viridis* (27–32 ‰; Soon & Ransangan, 2016), sehingga mampu mencegah beban energi berlebih pada proses osmoregulasi akibat fluktuasi ekstrem (Nisa *et al.*, 2025).

pH

Nilai derajat keasaman (pH) di perairan pesisir Cilincing berkisar antara 7,46–8,66 (Gambar 8), di mana nilai terendah ditemukan pada Stasiun 1 dekat muara (7,46), tertinggi di Stasiun 2 kawasan reklamasi (8,66), serta relatif stabil pada area budidaya *P. viridis* yaitu Stasiun 3 (8,46), Stasiun 4 (8,14), dan Stasiun 5 (8,18). Kecuali Stasiun 2 yang mengalami anomali basa akibat material reklamasi, nilai pH pada Stasiun 1, 3, 4, dan 5 masih memenuhi baku mutu biota laut (7,0–8,5; PP No. 22/2021) dan relatif lebih tinggi dibanding studi Simbolon (2016; 7,2–8,0) maupun Putri *et al.* (2023; 7,40–8,44).



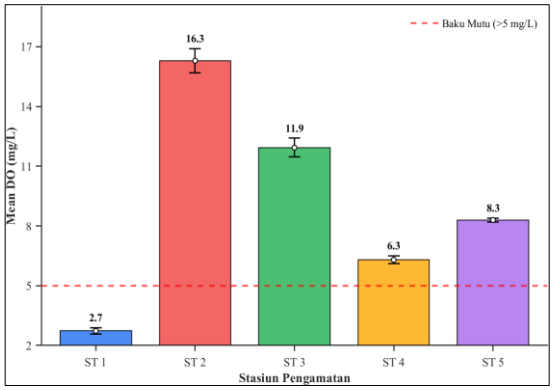
Gambar 8. pH di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Peningkatan pH menuju *offshore* dikontrol oleh konsentrasi salinitas tinggi dan aktivitas fotosintesis yang menurunkan pCO_2 (Li *et al.*, 2023), sedangkan pH rendah di Stasiun 1 dipicu oleh limpasan air tawar yang menurunkan *buffering capacity* dan meningkatkan akumulasi pCO_2 yang memicu asidifikasi lokal (Cameselle *et al.*, 2024). Ditinjau dari aspek akuakultur, kondisi pH pada Stasiun 4 dan 5 tergolong sangat optimal (7,9–8,2) untuk mendukung metabolisme dan pertumbuhan *P. viridis* (Soon & Ransangan, 2016).

Oksigen Terlarut

Kadar oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen*/DO) di perairan pesisir Cilincing menunjukkan variasi spasial berkisar antara 2,7–16,3 mg/L (Gambar 9). Kecuali Stasiun 1 dekat muara yang tergolong hipoksik (2,7 mg/L) akibat konsumsi oksigen tinggi oleh bakteri aerob dalam mendekondisi masukan beban bahan organik limbah domestik (Zheng *et al.*, 2023), seluruh stasiun pengamatan telah memenuhi baku mutu biota laut (>5 mg/L; PP No. 22/2021) dan nilainya cenderung lebih tinggi dibanding temuan Simbolon (2016; 0,13–7,4 mg/L) serta Putri *et al.* (2023; 0,58–5,05 mg/L).

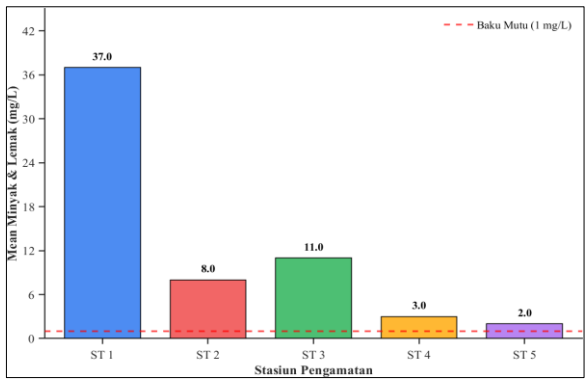
Tingginya DO di Stasiun 2 diduga dipicu oleh aktivitas fotosintesis intensif yang beriringan dengan penurunan pCO_2 dan kenaikan pH (Li *et al.*, 2023; Zheng *et al.*, 2023), sebaliknya DO rendah di Stasiun 1 disebabkan oleh tingginya dekomposisi beban bahan organik limbah domestik oleh bakteri aerob (Zheng *et al.*, 2023). Fluktuasi DO di lokasi budidaya (Stasiun 3–5) dipengaruhi oleh dinamika pencampuran massa air dan fotosintesis (Putri *et al.*, 2023), yang secara umum berkategori layak (>8 mg/L) untuk mendukung kehidupan dan pertumbuhan *P. viridis* (Soon & Ransangan, 2016).



Gambar 9. Oksigen terlarut di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Minyak dan Lemak

Kadar minyak dan lemak di perairan pesisir Cilincing menunjukkan pola gradien spasial yang menurun menuju laut lepas dengan kisaran 2,0–37,0 mg/L (Gambar 10). Konsentrasi puncak terdeteksi pada Stasiun 1 dekat muara (37,0 mg/L), lalu menurun di Stasiun 2 kawasan reklamasi (8,0 mg/L), sedikit berfluktuasi di Stasiun 3 area budidaya terdekat (11,0 mg/L), serta menyusut hingga titik terendah pada Stasiun 4 (3,0 mg/L) dan Stasiun 5 (2,0 mg/L).



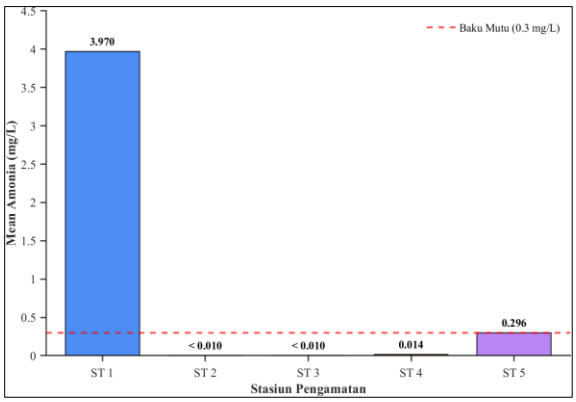
Gambar 10. Minyak dan lemak di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Seluruh stasiun pengamatan terbukti melampaui baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 (1 mg/L), di mana Stasiun 1 menjadi lokasi tercemar terparah akibat tingginya aktivitas lalu lintas kapal nelayan <10 GT yang membuang oli, limbah bahan bakar, dan air pendingin mesin. Penurunan konsentrasi minyak ke arah laut

terbuka dipicu oleh proses pengenceran (*dilution*) akibat pengaruh arus, angin, dan energi gelombang yang lebih intensif di laut terbuka (Bitner-Gregersen, 2018; Lee *et al.*, 2020), yang diperkuat oleh mekanisme pelapukan (*weathering*) meliputi penguapan, pelarutan, foto-oksidasi, hingga biodegradasi mikroba (Wang *et al.*, 1999).

Amonia

Konsentrasi amonia (NH_3-N) di perairan pesisir Cilincing berfluktuasi kontras antarstasiun dengan kisaran 0,014–3,970 mg/L (Gambar 11). Kadar maksimum terdeteksi di Stasiun 1 dekat muara (3,970 mg/L), lalu anjlok hingga di bawah limit deteksi alat (<0,010 mg/L) pada Stasiun 2 (reklamasi) dan Stasiun 3 (budidaya terdekat), sebelum kembali meningkat bertahap ke arah *offshore* di Stasiun 4 (0,014 mg/L) dan Stasiun 5 (0,296 mg/L).

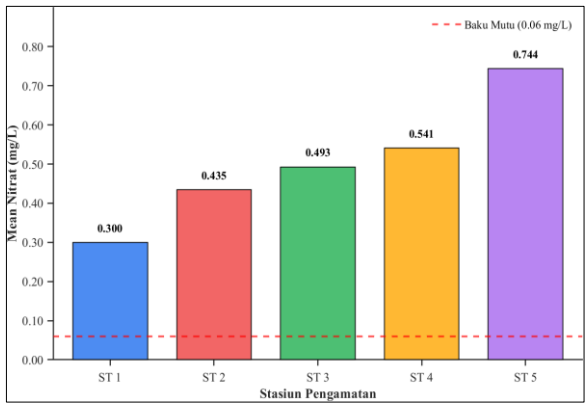


Gambar 11. Amonia di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Stasiun 1 terbukti melampaui baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 (0,3 mg/L), sejalan dengan pola estuari Teluk Jakarta (Prismayanti *et al.*, 2019; 0,040–1,721 mg/L) akibat masukan limbah domestik, limbah industri, limpasan pupuk, dan aktivitas TPI (Hardikar *et al.*, 2019; Wijaya *et al*., 2023) yang terdekomposisi dalam kondisi hipoksia sehingga laju akumulasi amonia melampaui nitrifikasi (Aprilia *et al.*, 2024). Tidak terdeteksinya amonia di Stasiun 2 dan 3 mencerminkan minimnya dampak limbah muara yang terencerkan massa air laut. Sementara itu, tren kenaikan amonia di Stasiun 4 dan 5 (<0,3 mg/L) dipicu oleh peningkatan ekskresi terlarut, serta deposisi feses dari populasi *P. viridis* (Tantanasarit & Babel, 2014), di mana tingginya kepadatan budidaya mampu melampaui kapasitas penyisihan nutrien (*nutrient removal*) alami kerang hingga memicu akumulasi amonia (Widowati *et al.*, 2021).

Nitrat

Konsentrasi nitrat (NO_3-N) di perairan pesisir Cilincing berkisar antara 0,300–0,744 mg/L, menunjukkan gradien spasial yang meningkat secara linear menuju laut lepas (Gambar 12). Nilai minimum ditemukan pada Stasiun 1 dekat muara (0,300 mg/L), lalu meningkat bertahap pada Stasiun 2 area reklamasi (0,435 mg/L), Stasiun 3 (0,493 mg/L), Stasiun 4 (0,541 mg/L), dan mencapai puncaknya pada Stasiun 5 area budidaya terjauh (0,744 mg/L).

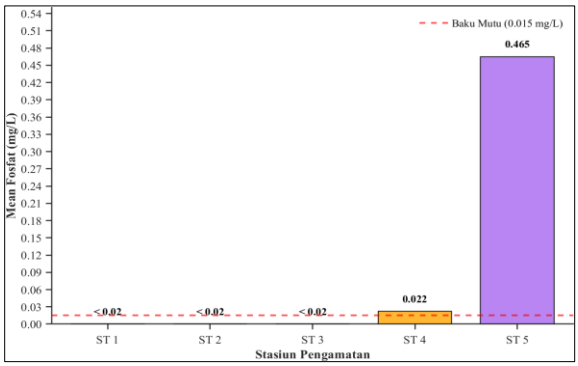


Gambar 12. Nitrat di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Seluruh stasiun terbukti melampaui baku mutu air laut PP No. 22 Tahun 2021 (0,06 mg/L). Berbeda dari pola estuari Teluk Jakarta pada umumnya yang memuncak di muara (Prismayanti *et al.*, 2019; 0,109–0,237 mg/L), peningkatan nitrat menuju laut terbuka di Cilincing dipicu oleh aktivitas budidaya *Perna viridis* pada Stasiun 3, 4, dan 5. Kepadatan populasi *P. viridis* mengekskresikan amonium serta mengendapkan feses organik yang teroksidasi melalui nitrifikasi lanjutan menjadi nitrat (Tantanasarit & Babel, 2014). Selain itu, tingginya laju nitrifikasi di laut terbuka didukung oleh kecukupan oksigen terlarut, berbeda dengan kondisi Stasiun 1 dekat muara yang cenderung hipoksia sehingga menghambat kerja bakteri nitrifikasi (Huang *et al.*, 2024).

Fosfat

Konsentrasi fosfat (PO_4^{3-}) di perairan pesisir Cilincing berkisar antara 0,022–0,465 mg/L, menunjukkan pola distribusi linear yang meningkat menuju laut lepas (Gambar 13). Kadar fosfat di wilayah dekat pantai, Stasiun 1 (muara), Stasiun 2 (reklamasi), dan Stasiun 3 (budidaya terdekat) berada di bawah limit deteksi alat (<0,020 mg/L). Akumulasi fosfat baru terdeteksi di laut lepas, yaitu meningkat menjadi 0,022 mg/L di Stasiun 4 dan memuncak pada Stasiun 5 (0,465 mg/L).



Gambar 13. Fosfat di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Stasiun pengamatan 4 dan 5 terbukti melampaui baku mutu PP No. 22 Tahun 2021 (0,015 mg/L), dengan konsentrasi maksimum yang jauh lebih tinggi dibanding temuan Sidabutar *et al.* (2020) di Teluk Jakarta (0,0025 mg/L). Rendahnya fosfat terlarut di dekat daratan (Stasiun 1–3) dipicu oleh tingginya proses penyerapan (*sorption*) oleh sedimen non-salin dari muara (Tee *et al.*, 2021). Sebaliknya, lonjakan fosfat di laut lepas (Stasiun 4–5) terjadi akibat proses desorpsi (*pelepasan*) fosfat dari sedimen yang dipicu oleh peningkatan salinitas; interaksi ion sulfat pada air laut memutus ikatan besi-fosfat (Fe-P) pada sedimen sehingga melepaskan fosfat ke kolom air (Jordan *et al.*, 2008; Tee *et al.*, 2021). Peningkatan ini juga dipercepat oleh aktivitas biologis *P. viridis* melalui filtrasi dan ekskresi fosfat terlarut yang melampaui kapasitas asimilasi pertumbuhannya (Meitei *et al.*, 2025).

Logam Berat pada Air Laut

Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi logam berat kadmium (Cd), timbal (Pb), dan seng (Zn) pada air laut di seluruh stasiun pengamatan berada di bawah limit deteksi instrumen (< DL; Tabel 6). Temuan ini sejalan dengan Putri *et al.* (2023) mengenai tidak terdeteksinya kadar Pb dan Cd di perairan Cilincing, yang mengindikasikan bahwa seluruh lokasi masih memenuhi baku mutu air laut untuk biota laut (PP No. 22 Tahun 2021: Cd 0,001 mg/L; Pb 0,008 mg/L; Zn 0,05 mg/L). Rendahnya konsentrasi logam berat di kolom air dipicu oleh efek pengenceran (*dilution*) akibat dinamika iklim regional dan pasokan massa air. Pengambilan sampel pada musim peralihan I (April) di bawah kondisi *Indian Ocean Dipole* (IOD) netral memicu pengenceran oleh debit air tawar dari daratan (Nadia *et al.*, 2017; Saputri, 2026). Selain fluktuasi antropogenik seperti aktivitas pelayaran dan budidaya (Zhu *et al.*, 2022), logam berat terlarut memiliki afinitas tinggi untuk terikat pada material partikulat tersuspensi dan mengalami sedimentasi. Akibatnya, akumulasi logam berat cenderung berpindah dan terendapkan pada sedimen serta biota bentik daripada bertahan di kolom air (Li *et al.*, 2020).

Logam Berat pada Sedimen

Hasil analisis logam berat pada sedimen perairan pesisir Cilincing menunjukkan bahwa konsentrasi kadmium (Cd) berada di bawah limit deteksi (< DL) di seluruh stasiun pengamatan (Gambar 14), mengindikasikan minimnya paparan polutan berbasis industri baterai, pigmen, maupun pupuk fosfat (Tamele & Loureiro, 2020). Timbal (Pb) hanya terdeteksi di Stasiun 1 (muara Cilincing) sebesar 14,59 mg/kg, sedangkan seng (Zn) terkuantifikasi di seluruh lokasi dengan konsentrasi tertinggi di Stasiun 1 (245,03 mg/kg), diikuti Stasiun 4 (145,89 mg/kg), Stasiun 5 (103,79 mg/kg), Stasiun 3 (56,45 mg/kg), dan terendah di Stasiun 2 area reklamasi (1,55 mg/kg).

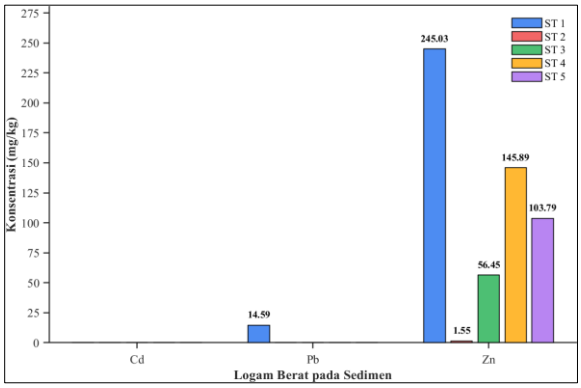
Berdasarkan baku mutu ANZECC (2000) (Tabel 7), kadar Zn di Stasiun 1 telah melampaui ambang batas aman (200 mg/kg), sedangkan Pb masih memenuhi standar (<50 mg/kg), sejalan dengan temuan Sindern *et al.* (2016) di Teluk Jakarta (Zn 64,2–209,4 mg/kg; Pb <1–15,4 mg/kg). Tingginya akumulasi Zn dan Pb di muara dipicu oleh fungsi kawasan sebagai retensi akhir limpasan Sungai Cakung atau Kali Rawa Malang yang membawa beban antropogenik dari zona industri, pemukiman, aktivitas transportasi

(*fine road dust*), peleburan logam, emisi bahan bakar kapal, serta degradasi cat *antifouling* (Abdel-Shafy *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2020; Jeong *et al.*, 2023; Nour, 2019). Distribusi Zn membentuk gradien menurun dari muara menuju laut lepas akibat pengenceran (*dilution*) 2 – 4 kali lipat pada *mixing zone* melalui pembentukan senyawa hidroksida atau karbonat dan proses adsorpsi (Tokar' *et al.*, 2023), sementara nilai Zn yang sangat rendah di Stasiun 2 diduga dipengaruhi oleh struktur tanggul reklamasi yang mengubah arus lokal dan membatasi deposisi partikulat halus pembawa logam (Liu *et al.*, 2022).

Tabel 7. Hasil analisis logam berat pada sedimen di perairan pesisir Cilincing

No	Stasiun Pengambilan	Logam Berat (mg/kg)		
		Cd	Pb	Zn
1	Stasiun 1	< DL	14,59	245,03
2	Stasiun 2	< DL	< DL	1,55
3	Stasiun 3	< DL	< DL	56,45
4	Stasiun 4	< DL	< DL	145,89
5	Stasiun 5	< DL	< DL	103,79
	Baku Mutu*	1,5	50	200

Keterangan:
*Baku Mutu ANZECC (2000); < DL = *Below Detection Limit*



Gambar 14. Konsentrasi logam berat (Cd, Pb, dan Zn) pada sedimen di lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Logam Berat pada Kerang Hijau (*P. viridis*)

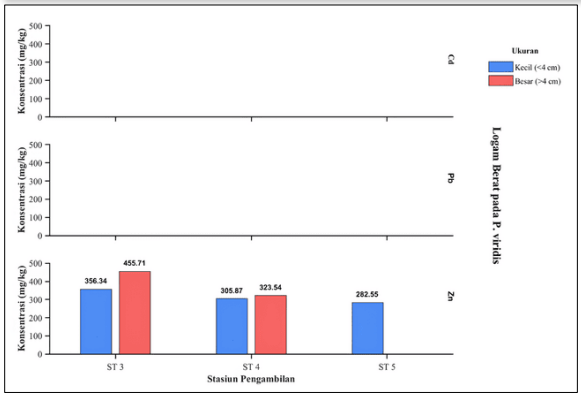
Hasil analisis jaringan lunak kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan pesisir Cilincing menunjukkan bahwa konsentrasi kadmium (Cd) dan timbal (Pb) berada di bawah limit deteksi (< DL) pada kedua kelompok ukuran (<4 cm dan >4 cm; Tabel 8), sejalan dengan temuan Koagouw *et al.* (2022) di Teluk Jakarta (Cd <0,01 mg/kg; Pb <0,1 mg/kg). Kondisi ini memastikan keamanan konsumsi *P. viridis* dari cemaran Cd dan Pb berdasarkan standar SNI 7387:2009 (batas maksimum Cd 1,0 mg/kg; Pb 1,5 mg/kg). Sebaliknya, seng (Zn) terakumulasi secara masif dengan tren spasial yang menurun ke arah laut lepas (Gambar 15). Konsentrasi Zn tertinggi ditemukan di Stasiun 3 dekat daratan (455,71 mg/kg pada ukuran besar; 356,34 mg/kg pada ukuran kecil), diikuti Stasiun 4 (323,54 mg/kg pada ukuran besar; 305,87 mg/kg pada ukuran kecil), dan Stasiun 5 terjauh (282,55 mg/kg pada ukuran kecil; < DL pada ukuran besar).

Tabel 8. Hasil analisis logam berat pada *P. viridis* di perairan pesisir Cilincing

No	Stasiun Budidaya	*Size*	Logam Berat (mg/kg)		
			Cd	Pb	Zn
1	Stasiun 3	Kecil	< DL	< DL	356,34
		Besar	< DL	< DL	455,71
2	Stasiun 4	Kecil	< DL	< DL	305,87
		Besar	< DL	< DL	323,54
3	Stasiun 5	Kecil	< DL	< DL	282,55
		Besar	< DL	< DL	< DL
Batas Aman Konsumsi (mg/kg)			1,0*	1,5*	40**

Keterangan:
*Batas Aman Konsumsi (SNI 7387:2009); **Batas Aman Konsumsi (BPOM RI No. 03725/B/SK/VII/89); < DL = *Below Detection Limit*; Kecil (< 4 cm) & Besar (> 4 cm).

Variasi akumulasi antar-ukuran individu mencerminkan dinamika antara penyerapan (*uptake*) dan ekskresi, di mana individu besar mampu mengekskresikan Zn lebih efisien daripada individu kecil (Alauddin *et al.*, 2025; Balzani *et al.*, 2022). Namun, tingginya paparan antropogenik telah melampaui *baseline* biologis *P. viridis* (100 mg/kg; Chan, 1988) dan ambang batas keamanan pangan BPOM RI No. 03725/B/SK/VII/89 (40 mg/kg), serta jauh melonjak dibandingkan data Teluk Jakarta tahun 2017 (5,5 mg/kg; Koagouw *et al.*, 2022). Paparan kronis Zn berlebih dari pangan berisiko mengganggu sistem imun, profil lipid, serta metabolisme Cu dan Fe yang memicu anemia pada manusia (Stiles *et al.*, 2024).



Gambar 15. Konsentrasi logam berat (Cd, Pb, dan Zn) pada *P. viridis* di tiga stasiun budidaya perairan pesisir Cilincing

Bioconcentration Factor

Faktor biokonsentrasi (*Bioconcentration Factor*/BCF) kerang hijau (*Perna viridis*) terhadap medium air laut ($BCF_{b/a}$) untuk logam Cd, Pb, dan Zn tidak dapat ditentukan akibat konsentrasinya pada kolom air yang berada di bawah limit deteksi (< DL; Tabel 9). Sebaliknya, BCF biota terhadap medium sedimen ($BCF_{b/s}$) berhasil terkuantifikasi pada logam Zn di seluruh lokasi budidaya sebagai dampak peran sedimen sebagai *sink* utama logam berat yang pekat dan stabil.

Tabel 9. Nilai BCF logam berat pada *P. viridis* dan sedimen di perairan pesisir Cilincing

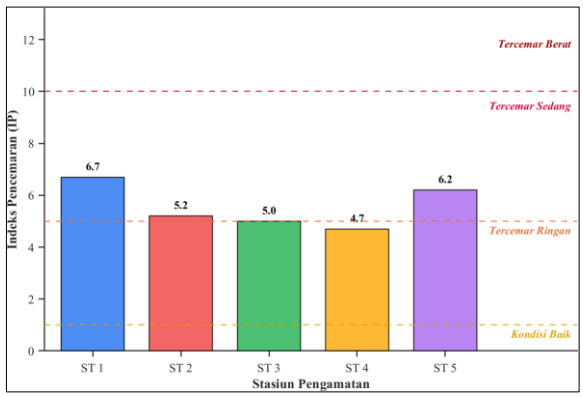
Stasiun Budidaya	*Size*	Nilai $BCF_{(b/s)}$			*Range* BCF*
		Cd	Pb	Zn	
ST 3	Kecil	< DL	< DL	6,31	BCF < 100
	Besar	< DL	< DL	8,07	BCF < 100
ST 4	Kecil	< DL	< DL	2,10	BCF < 100
	Besar	< DL	< DL	2,22	BCF < 100
ST 5	Kecil	< DL	< DL	2,72	BCF < 100
	Besar	< DL	< DL	< DL	BCF < 100

Keterangan:
< DL = *Below Detection Limit*; Kecil (< 4 cm) & Besar (> 4 cm); *Sumber: (Esch, 1977).

Nilai $BCF_{b/s}$ Zn tertinggi ditemukan di Stasiun 3 yaitu 6,31 (ukuran kecil) dan 8,07 (ukuran besar), yang kemudian menurun ke arah *offshore* di Stasiun 4 menjadi 2,10 (kecil) dan 2,22 (besar), serta Stasiun 5 sebesar 2,72 (kecil) dan < DL (besar). Pola penurunan $BCF_{b/s}$ ke arah laut lepas mencerminkan transisi gradien spasial pencemaran dari daratan, sedangkan variasi antar-ukuran mengindikasikan pengaruh durasi paparan (*exposure time*). Adapun nilai $BCF_{b/s}$ untuk Cd dan Pb tidak teridentifikasi karena kadarnya di sedimen juga berada di bawah limit deteksi (< DL). Berdasarkan kriteria Esch (1977), seluruh nilai $BCF_{b/s}$ Zn tergolong dalam kategori akumulasi rendah (BCF < 100), menandakan bahwa jaringan lunak *P. viridis* belum mengalami pengayaan logam yang ekstrem dari fase sedimen; temuan ini sejalan dengan hasil studi Alauddin *et al.* (2025) pada BCF kerang hijau di Teluk Jakarta (BCF < 100).

Indeks Pencemaran

Penentuan status mutu air di perairan pesisir Cilincing menggunakan metode Indeks Pencemaran (IP) berdasarkan Kepmen LH No. 115 Tahun 2003 menghasilkan nilai berkisar antara 4,7–6,7, di mana Stasiun 1 dekat muara (6,7), Stasiun 5 area budidaya terjauh (6,2), dan Stasiun 2 area reklamasi (5,2) tergolong tercemar sedang ($5,0 < PIj \leq 10$), sedangkan Stasiun 3 (5,0) dan Stasiun 4 (4,7) tergolong tercemar ringan ($1,0 < PIj \leq 5,0$) (Gambar 16).



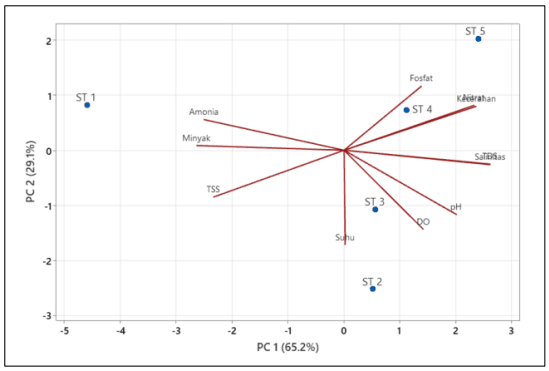
Gambar 16. Grafik Indeks Pencemaran (IP) pada lima stasiun pengamatan perairan pesisir Cilincing

Tingginya tingkat pencemaran di Stasiun 1 sejalan dengan studi Simbolon (2016) dengan metode STORET, di mana pola spasial secara umum memperlihatkan penurunan gradien polutan dari muara menuju *offshore* akibat pengenceran (*dilution*) dan pencampuran massa air. Meskipun demikian, anomali lonjakan IP yang memicu status tercemar sedang di Stasiun 5 diduga disebabkan oleh tingginya kadar fosfat akibat resuspensi sedimen dasar atau *upwelling* yang berpotensi memicu eutrofikasi. Secara keseluruhan, penetapan status tercemar di seluruh perairan Cilincing didorong oleh tingginya parameter yang melampaui baku mutu

biota laut (PP No. 22 Tahun 2021), meliputi konsentrasi minyak dan lemak di Stasiun 1, salinitas di Stasiun 2, 3 dan 4, serta fosfat di Stasiun 5.

Principal Component Analysis

Analisis Komponen Utama (PCA) digunakan untuk mengeksplorasi hubungan antar parameter kualitas air di pesisir Cilincing, dengan kelayakan matriks korelasi yang terbukti valid (*Kaiser-Meyer-Olkin*/KMO = 0,504; *Bartlett's Test*, p = 0,046). PCA mereduksi dimensi data menjadi dua komponen utama (PC1 65,2% dan PC2 29,1%) dengan variansi kumulatif 94,3%, di mana parameter kecepatan arus serta logam Cd, Pb, dan Zn dieksklusi akibat variansi nol atau < DL. Visualisasi biplot (Gambar 17) membagi lima stasiun menjadi tiga kelompok: Stasiun 1 (muara) terpisah di kuadran kiri atas karena tingginya amonia, minyak dan lemak, serta TSS; Stasiun 4 dan 5 (budidaya *P. viridis*) mengelompok di kuadran kanan atas yang dicirikan oleh tingginya kecerahan, TDS, salinitas, nitrat, dan fosfat; sedangkan Stasiun 2 (reklamasi) dan Stasiun 3 (budidaya) mengelompok di kuadran bawah karena didominasi variabel suhu, pH, dan DO.



Gambar 17. Hasil *Principal Component Analysis* (PCA) dari 11 parameter kualitas air laut di perairan pesisir Cilincing, Jakarta Utara

Berdasarkan sudut antar vektor dan nilai korelasi, hubungan antar parameter terbagi menjadi korelasi positif (<90°), negatif (180°), dan tanpa korelasi (90°). Korelasi positif mencerminkan tiga karakteristik utama: karakteristik laut lepas yang ditunjukkan oleh hubungan sempurna salinitas–TDS (r = 1,000) berasosiasi dengan kecerahan (r = 0,787) serta nutrien (nitrat–kecerahan, r = 0,967; fosfat–nitrat, r = 0,846) akibat pengaruh massa air dan *upwelling* (Ismail & Al Shehhi, 2022; El-Rawy *et al.*, 2023); karakteristik antropogenik muara yang diperlihatkan oleh korelasi TSS–minyak (r = 0,849) akibat adsorpsi minyak pada partikel tersuspensi (Zhaowei *et al.*, 2019) serta TSS–amonia (r = 0,687) akibat persaingan mikroba heterotrof yang menghambat nitrifikasi (Fernandes *et al.*, 2026); serta korelasi suhu–DO (r = 0,842) dan DO–pH (r = 0,942) yang mengindikasikan kontrol biologis (*biologically-driven*) di mana suhu memicu fotosintesis masif fitoplankton yang mendongkrak DO sekaligus pH dengan konsumsi CO_2 (Frieder *et al.*, 2012; Nagalakshmi *et al.*, 2025).

Sementara itu, korelasi negatif terjadi antara pencemar daratan dan hidrologi laut, seperti amonia–salinitas (r = -0,985) serta minyak–salinitas (r = -0,980) yang menandakan masukan air tawar sebagai pengendali utama transformasi nitrogen dan pengenceran polutan (Paudel *et al.*, 2019), disamping korelasi TSS–kecerahan (r = -0,981) yang menegaskan pembatasan penetrasi cahaya oleh padatan tersuspensi. Adapun kondisi tanpa korelasi terlihat pada pH–fosfat (r = -0,002) dan suhu–minyak (r = -0,039), mengindikasikan bahwa variabilitas fosfat dan minyak tidak dikontrol oleh pH maupun suhu mikro, melainkan murni oleh dinamika sedimen dan pasokan antropogenik eksternal (*point source*).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, perairan pesisir Cilincing memiliki status mutu tercemar ringan hingga sedang dengan nilai Indeks Pencemaran (IP) sebesar 4,7–6,7. Kondisi tersebut terutama berkaitan dengan parameter fosfat, minyak dan lemak, serta salinitas yang melampaui baku mutu PP No. 22 Tahun 2021. Analisis *Principal Component Analysis* (PCA) menghasilkan dua komponen utama yang mampu menjelaskan 94,3% total keragaman data, dengan PC1 dicirikan oleh TSS, minyak dan lemak, amonia, nitrat, fosfat, salinitas, TDS, dan kecerahan, sedangkan PC2 dicirikan oleh suhu, pH, dan DO. Analisis bioakumulasi menunjukkan bahwa Cd dan Pb tidak terdeteksi pada jaringan kerang hijau (*Perna viridis*), sedangkan Zn terakumulasi di seluruh lokasi budidaya. Meskipun tingkat akumulasi Zn dari

sedimen tergolong rendah berdasarkan nilai BCF <100, konsentrasi Zn pada jaringan kerang hijau telah melampaui batas aman konsumsi menurut standar BPOM.

Ucapan Terima Kasih

Ungkapan terima kasih yang mendalam penulis tujukan kepada orang tua tercinta atas doa dan dukungan yang tiada terputus selama proses penelitian ini berlangsung. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sani, Bapak Dartiwa, dan seluruh tim laboratorium *Production Chemistry* PT. Geoservices, yang telah memberikan bantuan sarana, prasarana, serta pendampingan selama kegiatan penelitian.

Referensi

Abdel-Shafy, H. I., Morsy, R. M. M., Hewehy, M. A. I., Razek, T. M. A., & Hamid, M. M. A. (2022). Treatment of industrial electroplating wastewater for metals removal via electrocoagulation continous flow reactors. *Water Practice and Technology*, *17*(2), 555–566. https://doi.org/10.2166/wpt.2022.001

Ahmed, Y., Fabritzek, A., Zamani, N. P., Juterzenka, K. Von, & Lenz, M. (2016). Korelasi antara resistensi *survival rate* dan *Body Condition Index* (BCI) dengan stress suhu pada kerang hijau di Muara Kamal, Jakarta. *Jurnal Ilmiah Satya Minabahari*, *2*(1), 67–76. https://doi.org/10.53676/jism.v2i1.22

Alauddin, M. D. A. F., Sulistiono, S., & Zairion, Z. (2025). Heavy metal content of lead (Pb) and copper (Cu) in green mussels (*Perna viridis*) in the Ancol waters. *BIO Web of Conferences*, *176*, 01011. https://doi.org/10.1051/bioconf/202517601011

Ambari, M. (2025). Beton laut Cilincing persulit nelayan, tingkatkan risiko ekologi [online]. https://mongabay.co.id/2025/09/27/beton-laut-di-cilincing-tingkatkan-risiko-ekologis/ [diakses 10 Januari 2026].

Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, & Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (2000). Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality (Vol. 1). www.waterquality.gov.au/anz-guidelines/resources/previous-guidelines/anzecc-armcanz-2000

Aprilia, M., Effendi, H., Hariyadi, S., & Permatasari, P. A. (2024). Spatial and temporal distribution of nutrients in the Ciliwung River, DKI Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1328*(1), 012005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1328/1/012005

Badan Standardisasi Nasional. (2009). Standar Nasional Indonesia No. 7387:2009 Tentang Batas Maksimum Cemaran Logam Berat Dalam Pangan. Jakarta.

Balzani, P., Kouba, A., Tricarico, E., Kourantidou, M., & Haubrock, P. J. (2022). Metal accumulation in relation to size and body condition in an all-alien species community. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(17), 25848–25857. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17621-0

Bitner-Gregersen, E. M. (2018). Comparison of wind and wave climate in open sea and coastal waters. *Ocean Engineering*, *170*, 199–208. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.016

Budiyanto, B. (2021). Pendekatan sosio-spasial masyarakat pesisir dalam pemanfaatan zona perikanan tangkap nelayan di Kabupaten Morotai, Maluku Utara. *Habitus Aquatica*, *2*(2), 55–70. https://doi.org/10.29244/haj.2.1.55

Cameselle, S., Velo, A., Doval, M. D., Broullón, D., & Pérez, F. F. (2024). Long-term trends of pH, alkalinity, and hydrogen ion concentration in an upwelling-dominated coastal ecosystem: Ría de Vigo, NW Spain. *Scientific Reports*, *14*(1), 17929. https://doi.org/10.1038/s41598-024-68694-z

Chan, H. M. (1988). Accumulation and tolerance to cadmium, copper, lead and zinc by the green mussel *Perna viridis*. *Marine Ecology Progress Series*, *48*, 295–303. https://doi.org/10.3354/meps048295

Chen, Y., Sun, Y., Shi, H., Zhao, H., Gao, H.,

Pan, G., & Tian, K. (2023). Environmental capacity and fluxes of land-sourced pollutants around the Leizhou Peninsula in the summer. *Frontiers in Marine Science*, *10*, 1280753. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1280753

Direktorat Jenderal Pengawas Obat dan Makanan. (1989). Keputusan Direktur Jenderal Pengawas Obat dan Makanan No. 03725/B/SK/VII/1989 Tentang Batas Maksimum Cemaran Logam dalam Makanan. Jakarta.

Edward, Lusyana, Walewowan, D. Y., & Rugebregt, M. J. (2023). Observation on Total Suspended Solid (TSS) and sediment composition in the seawaters of Jakarta Bay. *BIO Web of Conferences*, *74*, 05006. https://doi.org/10.1051/bioconf/20237405006

El-Rawy, M., Fathi, H., Abdalla, F., Alshehri, F., & Eldeeb, H. (2023). An integrated principal component and hierarchical cluster analysis approach for groundwater quality assessment in Jazan, Saudi Arabia. *Water*, *15*(8), 1466. https://doi.org/10.3390/w15081466

Esch, V. G. J. (1977). Aquatic pollutants and their potential ecological effects. In O. Hutzinger, I. Lelyveld, & B. Zoeteman (Eds.), *Aquatic pollution*: *Transformation and biological effects* (pp: 1–12). Oxford. Pergamon Press. 519 pp.

Fanela, M. A. P., Takarina, N. D., & Supriatna. (2019). Distribution of total suspended solids (TSS) and chlorophyll-a in Kendari Bay, Southeast Sulawesi. *Journal of Physics: Conference Series*, *1217*(1), 012150. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1217/1/012150

Fernandes, P. M., Fiksdal, L. W. F., Rojas-Tirado, P., Stenhaug, S. R., Khadka, S., Calabrese, S., Powell, M. D., Dahle, H., Bakke, I., Hess-Erga, O. K., & Fredriksen, S. (2026). Biofilter performance, water quality, and microbial dynamics in RAS operated under high or low suspended solids load. *Aquaculture*, *614*, 743559. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.743559

Fofied, F. G., Hartoko, A., & Saputra, S. W. (2024). Analisis sebaran suhu permukaan laut, klorofil-a, dan zona potensial penangkapan ikan cakalang di perairan Jayapura. *Buletin Oseanografi Marina*, *13*(3), 409–423. https://doi.org/10.14710/buloma.v13i3.63007

Frid, C. L. J., & Caswell, B. A. (2017). *Marine Pollution*. Oxford. Oxford University Press. 288 pp.

Frieder, C. A., Nam, S. H., Martz, T. R., & Levin, L. A. (2012). High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest. *Biogeosciences*, *9*(10), 3917–3930. https://doi.org/10.5194/bg-9-3917-2012

Hardikar, R., Haridevi, C. K., Ram, A., Khandeparker, R., Amberkar, U., & Chauhan, M. (2019). Inter-annual variability of phytoplankton assemblage and *Tetraspora gelatinosa* bloom from anthropogenically affected harbour, Veraval, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(2), 87. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7192-y

Hikmah, Zulham, A., & Nasution, Z. (2018). Reklamasi di Teluk Jakarta dan perubahan sosial pada masyarakat nelayan di Cilincing, Jakarta Utara. *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan Dan Perikanan*, *8*(1), 1–12. https://doi.org/10.15578/jksekp.v8i1.6849

Hu, J., Long, Y., Zhou, W., Zhu, C., Yang, Q., Zhou, S., & Wu, P. (2020). Influence of different land use types on hydrochemistry and heavy metals in surface water in the lakeshore zone of the Caohai wetland, China. *Environmental Pollution*, *267*, 115454. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115454

Huang, Y., Song, B., Zhang, Q., Park, Y., Wilson, S. J., Tobias, C. R., & An, S. (2024). Seawater intrusion effects on nitrogen cycling in the regulated Nakdong River Estuary, South Korea. *Frontiers in Marine Science*, *11*, 1369421. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1369421

Ismail, K. A., & Al Shehhi, M. R. (2022). Upwelling and nutrient dynamics in the Arabian Gulf and sea of Oman. *PLoS ONE*,

17(10), e0276260. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276260

Jeong, H., Lee, Y., Moon, H. B. & Ra, K. (2023). Characteristics of metal pollution and multi-isotopic signatures for C, Cu, Zn, and Pb in coastal sediments from special management areas in Korea. *Marine Pollution Bulletin*, *188*, 114642. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114642

Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2025). Angka konsumsi ikan [online]. https://portaldata.kkp.go.id/portals/data-statistik/aki/tbl-dinamis [diakses 11 Januari 2026].

Koagouw, W., Phadmacanty, N. L. P. R., Iskandar, M. R., Hindarti, D., & Arifin, Z. (2022). Metals in green mussels: Is there any effect on their reproduction? A preliminary study of Muara Angke, Jakarta Bay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1027*(1), 012004. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1027/1/012004

Lee, K., Kim, T., & Cho, Y. (2020). Influence of tidal current, wind, and wave in hebei spirit oil spill modeling. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(2), 69. https://doi.org/10.3390/jmse8020069

Li, C. L., Wu, Y., Chen, K., Lin, H., Chen, L., & Qi, D. (2023). Spatial symmetry and contrasting controls of surface pH and aragonite saturation state in the western North Pacific. *Frontiers in Marine Science*, *10*, 1197977. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1197977

Li, R., Tang, X., Guo, W., Lin, L., Zhao, L., Hu, Y., & Liu, M. (2020). Spatiotemporal distribution dynamics of heavy metals in water, sediment, and zoobenthos in mainstream sections of the middle and lower Changjiang River. *Science of the Total Environment*, *714*, 136779. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136779

Liu, B., Cai, T., Chen, Y., Yuan, B., Wang, R., & Xiao, M. (2022). Sediment dynamic changes induced by the presence of a dyke in a Scirpus mariqueter saltmarsh. *Coastal Engineering*, *174*, 104119. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104119

Maisalda, D. R., Yonvitner, Y., & Effendi, H. (2024). Sebaran logam berat terlarut di Perairan Teluk Jakarta. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan, 8*(3), 246–254. https://doi.org/10.36813/jplb.8.3.246-254

Mayapada, R., Tinungki, G. M., & Sunusi, N. (2019). Penerapan *sparse principal component analysis* dalam menghasilkan matriks *loading* yang sparse. *Jurnal Matematika Statistika Dan Komputasi*, *15*(2), 44–54. https://doi.org/10.20956/jmsk.v15i2.5713

Meitei, M. M., Muralidhar, A. P., Syamala, K., Sureesh, S., Biswas, G., Megarajan, S., & Munilkumar, S. (2025). Assessment of filtration capacity of different bivalve species suitable for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) systems vis-à-vis waste valorization for sustainable environment. *Discover Sustainability*, *6*(1), 240. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01104-0

Nadia, N., Rudiyanti, S., & Haeruddin, H. (2017). Sebaran spasial logam berat Pb dan Cd pada kolom air dan sedimen di perairan Muara Cisadane, Banten. *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, *6*(4), 455–462. https://doi.org/10.14710/marj.v6i4.21336

Nagalakshmi, R., Aswath Balaji, V., Saichand, V., & Mishra, P. (2025). Water quality investigation using GIS-based interpolation: A comparison of the Kollidam and Palar river estuaries. *Rasayan Journal of Chemistry*, *18*(1), 573–584. https://doi.org/10.31788/RJC.2025.1819083

Nastiti, A. S., Putri, M., & Hartati, S. (2016). Hubungan antara kelimpahan meroplankton dengan kualitas perairan di Teluk Jakarta. *BAWAL*, *8*(2), 91–98. https://doi.org/10.15578/bawal.8.2.2016.91-100

Nisa, M., Amalia, H., Paramitha, L., & Dyahruri, S. (2025). Karakteristik fisika kimia perairan di Randusanga Kulon, Brebes untuk kelayakan kultur kerang hijau (*Perna viridis*). *Jurnal Sains Dan*

Teknologi Perikanan, *5*(2), 87–99. https://doi.org/10.55678/jikan.v5i2.2342

NOAA. (2024). What is the biggest source of pollution in the ocean? [online]. https://oceanservice.noaa.gov/facts/pollution.html [diakses 10 Januari 2026].

Nour, H. E. S. (2019). Distribution, ecological risk, and source analysis of heavy metals in recent beach sediments of Sharm El-Sheikh, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(9), 546. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7728-1

Nugraha, T., Nurjaya, I. W., Rastina, & Susanti, S. (2025). Characteristics of current pattern in Jakarta Bay in the west and east monsoons. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, *17*(1), 41–62. https://doi.org/10.29244/jitkt.v17i1.41406

Nurbani, S. Z., Afifah, R. A., & Handayani, P. N. (2022). Diversifikasi pengolahan kerang hijau (*Perna viridis*) sebagai tambahan sumber protein pada produk tortilla. *Prosiding Seminar Nasional Perikanan Indonesia*, 27–42. https://doi.org/10.15578/psnp.11930

Paudel, B., Montagna, P. A., & Adams, L. (2019). The relationship between suspended solids and nutrients with variable hydrologic flow regimes. *Regional Studies in Marine Science*, *29*, 100657. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100657

Potipat, J., Tangkrock-Olan, N., & Helander, H. F. (2015). Bioconcentration factor (BCF) and depuration of heavy metals of oysters (*Saccostrea cucullata*) and mussels (*Perna viridis*) in the river basins of coastal area of Chanthaburi Province, Gulf of Thailand. *EnvironmentAsia*, *8*(2), 118–128. https://doi.org/10.14456/ea.2015.30

Prismayanti, A. D., Damar, A., & Pratiwi, N. T. M. (2019). Distributions of dissolved inorganic nitrogen to estimate trophic state in Jakarta Bay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *241*(1), 012023. https://doi.org/10.1088/1755-1315/241/1/012023

Putri, A., Cahyadi, F. D., & Rudi, M. (2023). Analisis kandungan logam kadmium dan timbal pada kerang hijau (*Perna viridis*) di Cilincing, Jakarta Utara. *Fish Scientiae*, *13*(1), 1–17. https://doi.org/10.20527/fishscientiae.v13i1.200

Ridarto, A. K. Y., Zainuri, M., Helmi, M., Kunarso, K., Baskoro, B., Maslukah, L., Endrawati, H., Handoyo, G., & Koch, M. (2023). Assessment of total suspended solid concentration dynamics based on geospatial models as an impact of anthropogenic in Pekalongan waters, Indonesia. *Buletin Oseanografi Marina*, *12*(1), 142–152. https://doi.org/10.14710/buloma.v12i1.51454

Rosalina, D., Rizkiah, R., Wardono, S., Sutrisno, B. O., Ismail, R. M., Leilani, A., & Amiluddin, M. (2024). Pola arus dan sebaran klorofil-a di Perairan Laut Flores pada tahun 2021. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, *17*(3), 201–212. https://doi.org/10.21107/jk.v17i3.25907

Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *118*(1), 012019. https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019

Sarkar, S. (2023). Principal component analysis. In S. Rathod, B. Sailaja, N. Bandumula, S. A. Kumar, P. A. Prasanna, P. Jeyakumar, A. Waris, P. Muthuraman & R. M. Sundaram (Eds.), *Statistical procedures for analyzing agricultural data using R* (pp: 139–156). Hyderabad. ICAR-Indian Institute of Rice Research. 295 pp.

Saputri, R. E. (2026). Analisis dinamika atmosfer dasarian I April 2026 [online]. https://www.bmkg.go.id/iklim/analisis-dinamika-atmosfer-dasarian-i-april-2026 [diakses 21 Juni 2026].

Setyawati, D. A., Nuzula, N. I., Jayanthi, O. W., Kartika, A. G. D., & Rahayu, E. P. (2023). Pola persebaran vertikal dan horizontal total suspended solid di Perairan Padelegan, Pamekasan. *Buletin Oseanografi Marina*, *12*(2), 213–222. https://doi.org/10.14710/buloma.v12i2.49510

Sidabutar, T., Srimariana, E. S., & Wouthuyzen,

S. (2020). The potential role of eutrophication, tidal and climatic on the rise of algal bloom phenomenon in Jakarta Bay. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *429*(1), 012021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012021

Simbolon, A. R. (2016). Status pencemaran di Perairan Cilincing, Pesisir DKI Jakarta. *Proceeding Biology Education Conference*, *13*(1), 677–682. https://doi.org/10.33541/pro-life.v3i3.97

Sindern, S., Tremöhlen, M., Dsikowitzky, L., Gronen, L., Schwarzbauer, J., Siregar, T. H., Ariyani, F., & Irianto, H. E. (2016). Heavy metals in river and coast sediments of the Jakarta Bay region (Indonesia) — Geogenic versus anthropogenic sources. *Marine Pollution Bulletin*, *110*(2), 624–633. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.003

Soon, T. K., & Ransangan, J. (2016). Feasibility of green mussel, *Perna viridis* farming in Marudu Bay, Malaysia. *Aquaculture Reports*, *4*, 130–135. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2016.06.006

Stiles, L. I., Ferrao, K., & Mehta, K. J. (2024). Role of zinc in health and disease. *Clinical and Experimental Medicine*, *24*(1), 38. https://doi.org/10.1007/s10238-024-01302-6

Tamele, I. J., & Loureiro, P. V. (2020). Lead, mercury and cadmium in fish and shellfish from the Indian ocean and Red sea (African countries): Public health challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(5), 344. https://doi.org/10.3390/JMSE8050344

Tantanasarit, C., & Babel, S. (2014). Simulation of "net" nutrients removal by green mussel (*Perna viridis*) in estuarine and coastal areas. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, *8*(1), 1–4. https://doi.org/10.5281/zenodo.1326795

Tee, H. S., Waite, D., Lear, G., & Handley, K. M. (2021). Microbial river-to-sea continuum: gradients in benthic and planktonic diversity, osmoregulation and nutrient cycling. *Microbiome*, *9*(1), 190. https://doi.org/10.1186/s40168-021-01145-3

Tokar', E., Kuzmenkova, N., Rozhkova, A., Egorin, A., Shlyk, D., Shi, K., Hou, X., & Kalmykov, S. (2023). Migration features and regularities of heavy metals transformation in fresh and marine ecosystems (Peter the Great Bay and Lake Khanka). *Water*, *15*(12), 2267. https://doi.org/10.3390/w15122267

Triantoro, D., Suprapto, D., & Rudiyanti, S. (2017). The condition of iron (Fe), zinc (Zn) in the sediment and soft tissue of mussels (Perna viridis) at Tambak Lorok Waters, Semarang. *Management of Aquatic Resources Journal*, *6*(3), 173–180. https://doi.org/10.14710/marj.v6i3.20573

Wahyuni, D., Abubakar, & Nur, L. (2022). Analisis tingkat kesejahteraan rumah tangga nelayan berdasarkan nilai tukar nelayan (NTN) di Kecamatan Cilincing Jakarta Utara. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, *8*(11), 80–92. https://doi.org/10.5281/zenodo.6830269

Wang, Z., Fingas, M., & Page, D. (1999). Oil spill identification. *Journal of Chromatography A*, *843*, 369–411. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(99)00120-X

Widowati, L. L., Budi Prayitno, S., Rejeki, S., Elfitasari, T., Purnomo, P. W., Ariyati, R. W., Bosma, R. H., & Aubin, J. (2021). Organic matter reduction using four densities of seaweed (*Gracilaria verucosa*) and green mussel (*Perna viridis*) to improve water quality for aquaculture in Java, Indonesia. *Aquatic Living Resources*, *34*(5), 1–11. https://doi.org/10.1051/alr/2021002

Wijaya, I. M. W., Partama, I. G. Y., & Sumantra, I. K. (2023). Study on nutrients concentration trends in Tukad Badung River toward nutrient recovery potential. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1268*(1), 012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1268/1/012002

Zhaowei, W., Yanqiu, Z., Zhiyu, Y., Bing, S., & Hui, L. (2019). Adsorption model of oil droplets interacting with suspended particulate materials in marine coastal environments. *Continental Shelf Research*,

173, 87–92. https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.12.010

Zheng, Q., Zhao, H., Shi, Y., & Duan, M. (2023). Distribution characteristics of dissolved oxygen in spring in the northern coastal Beibu Gulf, a typical subtropical bay. *Water*, *15*(5), 970. https://doi.org/10.3390/w15050970

Zhu, Z., Wei, H., Guan, Y., Zhang, L., Sun, P., & Zhang, Q. (2022). Spatial and seasonal characteristics of dissolved heavy metals in the seawater of Beibu Gulf, the Northern South China Sea. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 996202. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.996202