

Pencemaran Lingkungan dan Bioakumulasi Timbal (Pb) pada *Perna viridis* L. di Pantai Teluk Penyu, Cilacap

Environmental Pollution and Bioaccumulation of Lead (Pb) in Perna viridis L. in Teluk Penyu Beach, Cilacap

Nadia Amanda Salsabilla^{1*}, Hartoyo¹, dan Ani Haryati^{1,2}

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. Dr. Suharso Purwokerto, 53122, Indonesia

²SDGs Center Universitas Jenderal Soedirman, Grendeng, Purwokerto Utara, Indonesia 53122, Indonesia

Korespondensi penulis: nadiamandaa25@gmail.com

Diterima ; Direvisi ; Disetujui:

ABSTRAK

Pantai Teluk Penyu sebagai destinasi wisata di Kabupaten Cilacap yang berdekatan dengan kawasan industri pengilangan minyak, menghadapi risiko peningkatan akumulasi limbah berbahaya, termasuk logam berat Pb yang dapat mencemari perairan pantai. Selain tumpahan minyak, air *ballast* dari aktivitas kapal di perairan Teluk Penyu dapat menyumbangkan Pb ke perairan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis cemaran logam berat Pb di lingkungan dan bioakumulasi kerang hijau (*Perna viridis*) di Pantai Teluk Penyu, dengan menggunakan alat *Flame Atomic Absorption Spectrometry* (FAAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan logam berat Pb air yaitu 0,007-0,009 mg/L, sementara kandungan Pb sedimen berkisar antara 12,44–29,95 mg/kg. Analisis statistika menunjukkan Pb air memiliki hubungan negatif yang cukup kuat dengan pH air, sedangkan Pb sedimen berhubungan kuat dengan liat. Perhitungan Indeks Pencemaran (PI) pada kolom air menunjukkan bahwa perairan Teluk Penyu dikategorikan tidak tercemar ($PI \leq 1$) hingga tercemar ringan ($1 < PI \leq 2$) dengan nilai PI rata-rata 1,00 dan pengukuran Indeks geoakumulasi (I-geo) rata-rata memiliki nilai -0,57 yang menunjukkan bahwa sedimen perairan Teluk Penyu tidak mengalami pencemaran (I-geo < 1). Sementara itu, kandungan logam berat Pb pada kerang hijau adalah 0,20–0,54 mg/kg dan tergolong pada akumulator rendah (BCF < 100). Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kerang hijau di Pantai Teluk Penyu masih tergolong aman untuk dikonsumsi sebagai produk pangan perikanan.

KATA KUNCI: kerang hijau, logam berat, sedimen, pencemaran laut

ABSTRACT

*Teluk Penyu Beach, as a tourism site in Cilacap Regency adjacent to the oil refining industrial area, faces the risk of increasing accumulation of hazardous waste, including heavy metal Pb, which can pollute coastal waters. In addition to oil spills, ballast water from maritime activities in the area may contribute to Pb contamination in coastal waters. This study aimed to analyze the content of heavy metal Pb in the aquatic environment and green mussels (*Perna viridis*) at Teluk Penyu Beach, using Atomic Absorption Spectrometry (AAS). The results showed that the concentration of heavy metal Pb in water was of 0,007-0,009 mg/L, while sediment Pb levels varied between 12,44–29,95 mg/kg. Statistical analysis showed a moderately strong negative correlation between Pb in water and pH ($\rho = -0,717$), and a strong positive correlation between Pb in sediment and clay ($\rho = -0,833$). Pollution Index (PI) for the water column indicated unpollution (average $PI=1,00$; $PI \leq 1$), and the Geoaccumulation Index (I-geo) average -0,57; signifying an unpolluted sedimen status (I-geo < 1). Pb concentration in green mussels was 0,20–0,54 mg/kg and was categorized as a low accumulator. The results showed that green mussels on Teluk Penyu Beach are still considered safe for consumption as fishery foodproducts.*

KEYWORDS: green mussels, heavy metal, sediment, marine pollution

PENDAHULUAN

Logam berat merupakan unsur logam dengan densitas lebih dari 5 g/cm³ dan bersifat toksik pada konsentrasi tertentu. Beberapa logam berat dapat bersifat esensial (Zn, Fe, Cu, Mn, Ni) atau nonesensial (Hg, Pb, Cr, dan Cd) yang sangat berbahaya bagi organisme. Pencemaran oleh logam berat dapat menurunkan kualitas air laut, seperti perubahan pada bau, warna, dan rasa (Fendjalang et al., 2023). Selain itu aktivitas antropogenik dapat menjadi sumber pencemaran logam berat di perairan (Rizkiana et al., 2017). Konsentrasi logam berat selain dipengaruhi sumber masukan, juga dipengaruhi oleh faktor fisik kimia perairan, seperti: pH, salinitas, suhu, oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*), fraksi sedimen, *Total Suspended Solid* (TSS), dan *Total Organic Matter* (TOM). Meningkatnya nilai pH dapat menurunkan konsentrasi logam berat, sementara penurunan salinitas dapat meningkatkan konsentrasi logam berat pada sedimen (Aphrodita et al., 2022). Suhu turut memengaruhi konsentrasi logam berat, yaitu suhu yang lebih rendah memudahkan logam berat untuk mengendap ke sedimen dasar.

Lebih jauh lagi, logam berat dapat terakumulasi dalam tubuh organisme laut termasuk ikan dan kerang dan berpotensi menyebabkan masalah kesehatan yang serius pada manusia yang mengonsumsinya. Organisme laut mampu menyaring partikel tersuspensi dalam air termasuk plankton, detritus, dan partikel anorganik atau organik lainnya yang mengandung logam berat. Selain itu, melalui difusi pasif di permukaan insang dan tubuh lainnya yang memungkinkan difusi logam terlarut ke jaringan. Setelah masuk ke tubuh biota, logam berat akan terikat pada protein dan senyawa pengikat logam berat seperti metallothionein dan organ pencernaan. Salah satu logam berat yang banyak ditemukan sebagai bahan pencemar adalah timbal (Pb), yang bersifat toksik, tidak dapat diuraikan oleh organisme, dan sangat mudah terakumulasi dalam rantai makanan (Utami et al., 2018).

Logam berat Pb dapat dihasilkan dari aktivitas industri, transportasi laut, air *ballast*, dan penggunaan bahan bakar minyak (Hoang & Pham, 2018). Secara umum, bahan bakar minyak mengandung zat tambahan tetraetil Pb (Nawaz et al., 2019). Limbah cair pengolahan minyak, tumpahan minyak, ceceran bahan bakar kapal, dan *runoff* permukaan yang mengandung logam Pb kemudian masuk ke badan perairan. Logam Pb terlarut dalam minyak akan terlepas ke kolom air seiring dengan pelapukan minyak melalui evaporasi, emulsi, dan

degradasi mikroba. Pada perairan Pb akan terpartisi menjadi Pb terlarut, tersuspensi dan terendapkan ke sedimen. Organisme laut dapat terpapar Pb dalam jangka waktu yang lama, sehingga meningkatkan penyerapan dan akumulasi yang menyebabkan keracunan kronis (Fendjalang et al., 2022). Logam Pb dapat menyebabkan gangguan metabolisme organisme akuatik, anemia, kerusakan sistem saraf pusat dan ginjal, serta memengaruhi sistem reproduksi pada konsentrasi tertentu (Collin et al., 2022). Oleh karena itu, logam Pb di lingkungan laut menjadi perhatian penting, karena berdampak langsung pada kesehatan organisme dan manusia.

Salah satu organisme laut yang potensial terpapar logam Pb adalah kerang hijau (*Perna viridis*). Kerang hijau termasuk ke dalam kelompok Bivalvia yang memiliki kemampuan memakan suspensi. Umumnya kerang hijau memiliki panjang antara 65-85 mm, namun dapat mencapai 165 mm untuk kerang hijau yang besar. Habitat kerang hijau adalah perairan laut yang relatif tenang pada kedalaman 3-10 m dengan salinitas antara 27–34, suhu perairan 27-37°C, dan pH 6–8 (Chaerunnisa & Supardi, 2021). Tingginya daya tahan terhadap tekanan ekologis menyebabkan kerang hijau mampu mengakumulasi logam berat Pb dalam tubuhnya. Kerang hijau merupakan hewan air yang hidup menetap (*sessile*) dan hewan penyaring (*filter feeder*), sehingga menjadi indikator ideal cemaran Pb di perairan (Yaqin et al., 2015).

Pantai Teluk Penyu yang terletak di kawasan utama Cilacap merupakan tempat wisata populer, sehingga sering dikunjungi banyak wisatawan. Kawasan Pantai Teluk Penyu memiliki luas sekitar 110.714 m², pantai ini membentang dari Pelabuhan Perikanan Samudra Cilacap di utara hingga Pulau Nusakambangan di selatan (Rahmawati & Sari, 2022). Lokasi pantai ini berdekatan dengan kawasan industri kilang minyak serta Dermaga Sleko dan Tanjung Intan yang diduga sebagai sumber masuknya limbah industri dan aktivitas pelabuhan yang mengandung logam Pb ke perairan. Penelitian mengenai logam Pb di perairan Cilacap telah banyak dilakukan seperti di wilayah Muara Sungai Serayu (Suwarsito & Sarjanti, 2014), Pantai Kemiren (Fadlilah et al., 2023), Sungai Donan (Fachrul et al., 2011) dan sisi barat dari Teluk Penyu yaitu Plawangan Timur dan Plawangan Barat (Hidayati et al., 2023), sedangkan di Teluk Penyu sendiri masih terbatas.

Kerang hijau banyak ditemukan di sekitar Teluk Penyu. Masuknya logam berat Pb di perairan Teluk Penyu dapat memberikan dampak pada kerang hijau sebagai sumber pangan. Beberapa wilayah

di Indonesia termasuk Cilacap menjadikan kerang hijau sebagai komoditas perikanan yang umum dijual dan dikonsumsi. Penelitian Ucros-Rodriguez et al. (2025) menunjukkan akumulasi Pb dalam jaringan kerang hijau antara 0,05-1,18 µg/g dengan variasi musim, serta tinjauan dari berbagai perairan Indonesia seperti akumulasi Pb di Demak ditemukan sebesar 29,4 mg/kg (Arifin et al., 2021); 28,9 mg/kg di Bali (Dharmadewi et al., 2019); dan 0,01-0,20 mg/kg di Semarang (Muhtaroh et al., 2024). Paparan Pb pada kerang hijau dapat menyebabkan gangguan biokimia serta perubahan sitologis di insang dan hepatopankreas dengan nilai 96h LC₅₀ = 2,6±0,12 mg/L (Hariharan et al., 2014).

Akumulasi logam berat Pb dalam tubuh kerang hijau dapat menjadi ancaman, karena konsumsi kerang yang tercemar dapat membahayakan kesehatan manusia. Selain itu, pencemaran ini juga berpotensi mengganggu ketersediaan dan akses pangan lokal serta mata pencaharian nelayan, yang pada akhirnya memengaruhi aspek ketahanan pangan masyarakat pesisir di Pantai Teluk Penyu secara keseluruhan. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian mengenai kualitas lingkungan perairan dan pengaruhnya pada organisme laut di Teluk Penyu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat pencemaran Pb pada air dan sedimen serta kemampuan bioakumulasi kerang hijau terhadap logam Pb di Pantai Teluk Penyu. Selain itu, untuk melihat hubungan variabel fisika kimia perairan dengan konsentrasi Pb di lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai potensi risiko pencemaran

logam berat Pb terhadap sumber pangan laut dan aplikasinya terhadap ketahanan pangan masyarakat pesisir Teluk Penyu Cilacap.

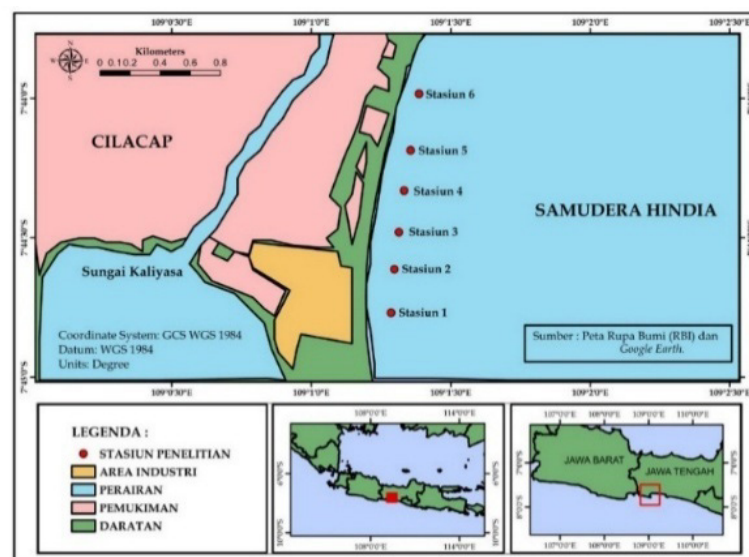
BAHAN DAN METODE

Lokasi dan Waktu Pengambilan Sampel

Penelitian dilakukan di Pantai Teluk Penyu dengan 6 titik stasiun dilakukan secara acak (*random sampling*) tanpa pertimbangan tertentu yang mencakup sepanjang area pantai. Hal ini bertujuan agar sampel air, sedimen, dan kerang hijau memiliki kesempatan yang sama untuk dipilih menjadi sampel. Sampel kerang hijau diambil di perairan bebas yang berada sekitar area lokasi stasiun. Pengambilan data dilakukan pada bulan November 2023. Setiap stasiun dilakukan pengambilan data satu kali yang mempertimbangkan waktu pasang surut. Pengukuran data kualitas air dilakukan secara insitu dan pengujian parameter fisika kimia lainnya, seperti: fraksi sedimen, TSS, TOM, logam berat Pb air, sedimen, dan kerang hijau dilakukan di Laboratorium Produktivitas dan Lingkungan Perairan, Institut Pertanian Bogor. Peta penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan, yaitu: *Flame Atomic Absorption Spectrometry* (FAAS) Perkin Elmer Type Pinnacle 900H, *Water Quality Checker* AMTAST PC900, *water sampler* 5 L, *ekman grab*, Garmin



Gambar 1. Peta penelitian logam berat Pb di Pantai Teluk Penyu.

Figure 1. Research Map of Lead (Pb) Contamination in the Teluk Penyu Beach.

GPS eTrex10, ayakan bertingkat, boks es, oven, *muffle furnace* Barnstead Thermolyne, desikator, mortar dan alu, erlenmeyer, serta timbangan Camry Ek5055. Bahan yang digunakan, yaitu: sampel air, sampel sedimen, sampel kerang hijau, kertas saring, akuades, NaOH 1 N, Metil Iso Butil keton (MIBK) 4%, Amonium Pirolidin Ditiokarbonat (APDC) 4%, HNO_3 65%, dan HCl.

Metode pengambilan sampel air, sedimen, kerang hijau beserta preservasinya

Sampel air laut diambil menggunakan *water sampler* sebanyak 1 L pada kedalaman 1-2 m, kemudian sampel air dimasukkan ke dalam botol HDPE yang terlebih dahulu direndam dalam larutan asam HNO_3 selama 24 jam lalu dibilas dengan menggunakan akuades. Sampel sedimen permukaan dan kerang hijau diambil pada kedalaman 3-5 m di area laut terbuka. Sedimen permukaan diambil menggunakan *ekman grab* dan kerang hijau langsung menggunakan tangan pada lokasi penelitian yang mewakili titik stasiun. Pengambilan sampel air, sedimen, dan kerang dilakukan sebanyak satu kali. Sampel sedimen dan kerang disimpan pada wadah plastik. Pengawetan sampel air, sedimen, dan kerang hijau dilakukan dengan pendingin di bawah 4 °C untuk mencegah terjadinya oksidasi sebelum analisis di laboratorium (Haryati et al., 2022). Sampel kerang yang diperoleh dikelompokkan menjadi tiga berdasarkan ukuran berat daging, yaitu: kecil (1-5 g/ekor), sedang (6-10 g/ekor), dan besar (>10 g/ekor).

Analisis karakteristik habitat

Analisis karakteristik habitat dapat dilihat dari kualitas perairan air yang terdiri atas variabel suhu, salinitas, pH air dan sedimen, DO, TSS, fraksi sedimen, serta TOM. Pengukuran TSS dilakukan di laboratorium dengan metode gravimetri (BSN, 2004) yang didasarkan pada pengukuran berat suatu unsur atau senyawa tertentu. Sampel air yang telah dihomogenkan kemudian disaring dengan kertas saring berpori 0,45 μm . Kertas saring yang berisi padatan suspensi (residu) tersebut lalu dikeringkan pada suhu 103-105 °C. Nilai TSS dinyatakan dalam satuan berat per volume (mg/L) yang diperoleh dari hasil keseluruhan berat residu (mg) yang terdapat dalam kertas saring pada setiap volume (L) sampel air yang disaring. Fraksi sedimen dilakukan dengan metode *Granulometri* dan klasifikasi jenis sedimen menggunakan skala *Wentworth* (Guntur et al., 2025). Ukuran sedimen dipisahkan menggunakan ayakan bertingkat dengan ukuran, yaitu: 1; 0,5; 0,25; 0,125; dan 0,063 mm dan jenis sedimen didasarkan pada diagram segitiga *Shepard* (Haryati

et al., 2022). Nilai persentase fraksi butir didasarkan atas berat sedimen yang tertahan pada setiap ayakan kemudian dibandingkan dengan total berat awal contoh sedimen yang diayak. Persentase TOM yang diperoleh didasarkan pada metode pengabuan (Saputra et al., 2024). Sedimen kering sebanyak 2-5 g dibakar pada tanur (*muffle furnace*) dengan suhu 500-550°C selama 2-4 jam (Heiri et al., 2001). Konsentrasi TOM diketahui berdasarkan perbandingan berat hasil pengabuan dengan berat awal, yang diasumsikan massa yang hilang terbakar merupakan bahan organik dan karbonatnya.

Analisis logam berat Pb

Analisis logam berat Pb pada air, sedimen, dan kerang hijau merujuk pada APHA 24th Edition (APHA, 2022). Uji logam berat Pb pada air laut dilakukan sesuai dengan APHA 3030-B. Sebanyak 100 mL sampel air laut dimasukkan ke dalam labu ukur kemudian ditambahkan HNO_3 pekat (65%) sampai pH 3. Setelah itu, ditambahkan 1 mL APDC dan dihomogenkan. Larutan APDC digunakan untuk membentuk senyawa organik kompleks yang tidak larut pada fase air. Dilanjutkan ke tahap ekstraksi dengan menambahkan 10 mL MIBK dan didiamkan hingga terpisah fase organik dan anorganik. Larutan MIBK merupakan pelarut organik yang berfungsi untuk memisahkan logam berat dari fase air ke fase organik (Siahaan et al., 2017). Pemisahan fase organik dan anorganik dilakukan dengan menambahkan akuades, dihomogenkan, diamkan selama 5 menit, kemudian dibuang fase anorganik.

Uji logam berat Pb sedimen dan kerang hijau mengacu pada APHA 3030-H melalui destruksi asam dengan larutan HNO_3 dan HCl. Sebanyak 1-2 g sampel sedimen dan kerang hijau kering ditambahkan 5-10 mL HNO_3 pekat sebagai oksidator utama kemudian dipanaskan (± 95 °C) hingga rekasi selesai. Penambahan HCl atau H_2O_2 dilakukan jika jaringan tinggi organik. Larutan HCl digunakan untuk mendukung pelarut logam klorida. Sampel air, sedimen, dan kerang hijau yang telah diekstraksi dilakukan pengukuran Pb dengan FAAS Perkin Elmer Type Pinaacle 900H mengacu pada APHA 3131-B melalui teknik analisis kadar suatu elemen logam dalam sampel dengan mengukur serapan cahaya pada panjang gelombang tertentu. Panjang gelombang optimal untuk logam berat Pb yaitu 283,3 nm.

Pengolahan Data

Penentuan kualitas perairan dilakukan dengan menggunakan metode Indeks Pencemaran (*Pollution Index/PI*). Keunggulan dari metode ini

yaitu pengoperasiannya sederhana dan mudah digunakan (Zhang & Wang, 2021). Perhitungan PI dapat dihitung dengan persamaan (Dadzie et al., 2020), yaitu perbandingan antara konsentrasi Pb di air dengan Si = nilai standar logam berat Pb di air (0,008 mg/L). Klasifikasi Indeks Pencemaran terbagi menjadi: $PI \leq 1$ tidak tercemar, $1 < PI \leq 2$ tercemar ringan, $2 < PI \leq 3$ tercemar sedang, $3 < PI \leq 5$ tercemar berat, dan $PI > 5$ tercemar sangat berat.

Pencemaran logam berat Pb pada sedimen dapat diketahui menggunakan persamaan Indeks Geoakumulasi (I-geo) yang diusulkan oleh Muller (1969), dimana faktor 1,5 pada menunjukkan faktor koreksi untuk memperhitungkan variasi alami kandungan logam berat yang berasal dari material terrigenous atau unsur-unsur yang secara alami terbawa dari daratan (Helen et al., 2016). Perhitungan I-geo dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini:

$$I\text{-geo} = \frac{\log_2 (C_n)}{1,5(B_n)}$$

Keterangan Cn = konsentrasi logam berat Pb pada sedimen; Bn = konsentrasi rerata normal logam berat Pb di alam = 20 mg/kg (Turekian & Wedepohl, 1961). Klasifikasi I-geo terdiri dari, yaitu: $I\text{-geo} \leq 0$ tidak tercemar, $0 < I\text{-geo} \leq 1$ tidak tercemar-sedang; $1 < I\text{-geo} \leq 2$ tercemar sedang, $2 < I\text{-geo} \leq 3$ tercemar sedang-tinggi, $3 < I\text{-geo} \leq 4$ tercemar tinggi, $4 < I\text{-geo} \leq 5$ tercemar tinggi hingga sangat berat, dan $I\text{-geo} > 5$ tercemar sangat berat (Förstner & Müller, 1981). Selain itu nilai konsentrasi Pb sedimen dibandingkan dengan baku mutu dari *Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand* (ANZECC & ARMCANZ, 2000), *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME, 2001), dan *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 1999).

Baku mutu logam Pb terlarut bagi biota menurut Standar Nasional Indonesia adalah 0,0008 (PP RI No 22, 2021) dan batas maksimum cemaran logam berat Pb dalam pangan yaitu 1,5 mg/kg (BSN, 2009). Mekanisme akumulasi logam berat Pb dalam biota laut dapat diketahui dengan menggunakan persamaan *Bioconcentration Factor* (BCF), sebagai nilai kecenderungan suatu bahan kimia yang diserap biota laut (Emilia et al., 2022). Perhitungan faktor biokonsentrasi dapat menggunakan persamaan:

$$BCF = \frac{C_{\text{biota}}}{C_{\text{media ambien}}}$$

Keterangan: C_{biota} = konsentrasi logam berat dalam biota (kerang hijau), $C_{\text{media ambien}}$ = konsentrasi logam berat dalam air atau sedimen. Klasifikasi BCF terbagi menjadi: $BCF > 1000$ akumulator tinggi, $100 < BCF \leq 1000$ akumulator sedang, dan $BCF < 100$ akumulator rendah.

Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk memahami hubungan antar parameter lingkungan dengan distribusi Pb di air dan sedimen. Pendekatan yang digunakan meliputi analisis korelasi sebagai tahap awal diikuti dengan analisis *Correspondence Analysis* (CA). Analisis korelasi digunakan untuk mengidentifikasi hubungan signifikan dua arah antara variabel lingkungan dengan konsentrasi Pb (Legendre & Legendre, 2012). Analisis CA digunakan untuk mengevaluasi hubungan multivariat dan pola keterkaitan antar variabel lingkungan serta distribusi Pb secara menyeluruh, seperti: kedekatan spasial antar variabel serta memahami pola keterkaitan yang tidak selalu linier (Greenacre, 2017). Perbedaan kandungan Pb berdasarkan ukuran kerang hijau menggunakan uji Kruskal-Wallis dan Dunn's post-hoc test Pengolahan data dilakukan dengan *software* PAST4.03.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Lingkungan Perairan Teluk Penyu

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kualitas Pantai Teluk Penyu masih tergolong baik, karena nilai parameter lingkungan, seperti: suhu, salinitas, pH, dan TTS masih sesuai dengan baku mutu yang ditetapkan (Tabel 1); sehingga lingkungan perairan ini masih mendukung kehidupan organisme laut. Suhu perairan di Teluk Penyu berkisar 28–32 °C (rata-rata $30 \pm 2,04$ °C). Variasi suhu antar stasiun diduga dipengaruhi oleh kondisi cuaca saat pengambilan sampel dan intensitas cahaya matahari. Pengambilan sampel di Stasiun 1-3 dan 4-6 dilakukan pada hari yang berbeda. Selama pengambilan sampel di stasiun 4-6 cuaca berawan dan sempat terjadi hujan ringan. Hal ini sejalan dengan pernyataan Hastuti et al. (2024) yang menyatakan bahwa lama penyinaran matahari memengaruhi suhu perairan.

Salinitas bervariasi antara 28–37 ppt (rata-rata $32 \pm 3,66$ ppt), menunjukkan pengaruh baik dari laut terbuka maupun masukan air tawar. Tingginya salinitas di Stasiun 3 berkaitan dengan kondisi laut yang pasang pada saat pengambilan

Tabel 1. Nilai variabel fisika kimia perairan di Pantai Teluk Penyu.

Table 1. Physicochemical parameters of Waters in Teluk Penyu Beach.

Stasiun/ Station	Parameter/Parameters						
	Suhu/ Temperature (°C)	Salinitas/ Salinity (ppt)	DO (mg/L)	pH-air/ pH-water	TSS (mg/L)	pH-sedimen/ pH-sediment	TOM (%)
1	32	34	3.31	6.58	20	8.42	4.96
2	32	35	2.99	8.04	13	8.63	4.24
3	31	37	2.74	8.28	17	8.70	5.15
4	28	28	3.06	6.70	8	7.26	5.54
5	28	29	3.64	6.78	8	8.52	5.21
6	28	30	3.45	6.98	8	7.08	5.25
Rata-rata/Average	30±2.04	32±3.66	3.20±0.33	7.23±0.74	12±5	8.10±0.73	5.06±0.44
Baku Mutu*/ Standard Quality*	28-32	28-33	>5.00	7.00-8.50	<20	-	-

*) Baku Mutu PP Nomor 22 Tahun 2021/ *Quality Standards of Government Regulation Number 22 of 2021*

sampel, sedangkan salinitas rendah di Stasiun 4 diduga akibat pengaruh hujan yang meningkatkan masukan air tawar. Salinitas yang tinggi cenderung berasosiasi dengan pH yang tinggi pula, sehingga terlihat di Stasiun 2 dan 3 memiliki pH>8 dan salinitas 34 ppt yang mencerminkan dominasi massa air laut. Sebaliknya, stasiun dengan salinitas rendah (23-30 ppt) umumnya menunjukkan pH yang lebih rendah (pH<7) yang mengindikasikan adanya pengaruh air tawar dan kondisi yang lebih asam.

Kadar DO berkisar antara 2,74–3,64 mg/L dengan rata-rata 3,20±0,33mg/L dan seluruhnya berada dibawah ambang baku mutu (>5 mg/L). Rendahnya ketersediaan oksigen di perairan menunjukkan indikasi hipoksia ringan yang berpotensi mengganggu kehidupan organisme, serta indikasi adanya pencemaran akibat masuknya limbah organik dari rumah tangga, pertanian, maupun aktivitas industri. Salah satu penyebab rendahnya DO di lokasi penelitian diduga oleh tingginya aktivitas dekomposisi bahan organik di kolom dan dasar perairan, yang mengonsumsi oksigen melalui proses respirasi mikroba. Proses ini terkait erat dengan kandungan TOM di sedimen dasar lokasi penelitian yang berkisar antara 4,24-5,54% (rata-rata 5,06±0,44%). Menurut Reynold (1971) TOM di sedimen Teluk Penyu termasuk ke dalam kategori rendah. Meskipun demikian kandungan ini cukup untuk mendorong aktivitas biologis, termasuk penguraian organik yang memengaruhi ketersediaan DO.

Nilai pH perairan di Teluk Penyu adalah 6,7-8,28. dengan rata-rata 7,23±0,74. Hanya dua stasiun

(2 dan 3) yang memenuhi baku mutu (7-8,5), sementara empat stasiun lainnya menunjukkan nilai di bawah ambang yang ditetapkan. Rendahnya pH diduga oleh pengaruh air tawar. Nilai pH yang mendekati 7 terjadi bersamaan dengan penurunan salinitas dan suhu yang mendukung dugaan adanya masukan air tawar yang dapat secara signifikan mengubah keseimbangan kimia air dan metabolisme organisme. Berbeda dengan pH air, pH sedimen menunjukkan nilai yang relatif lebih tinggi. Kadar pH relatif bervariasi antar stasiun dengan nilai terendah berada pada Stasiun 6 (7,08) dan tertinggi pada Stasiun 3 (8,70). Nilai pH sedimen dengan rata-rata 8,10±0,73 berada dalam rentang optimal untuk aktivitas organisme. Hal ini sejalan dengan pendapat Tarre & Green (2004) menyatakan bahwa aktivitas mikroorganisme pengurai dalam proses dekomposisi serasah mencapai kinerja optimal pada nilai pH 6,0– 8,0.

Hasil pengukuran TSS di Pantai Teluk Penyu berkisar antara 8-20 mg/L (rata-rata 12±5 mg/L). Nilai TSS tertinggi di Stasiun 1 (20 mg/L), sedangkan terendah di Stasiun 4-6. Penelitian Lestari et al. (2018) di perairan pantai Cilacap menunjukkan nilai TSS yaitu 33-479 mg/L, yang relatif lebih tinggi dibandingkan di lokasi penelitian, tetapi secara keseluruhan masih memenuhi baku mutu. Rendahnya nilai TSS di Teluk Penyu diduga oleh lokasi pengambilan sampel yang berhadapan langsung dengan laut terbuka, sehingga pengaruh aliran sungai atau *run off* dari daratan yang membawa material tersuspensi menjadi minimal. Kekeruhan yang disebabkan oleh TSS memiliki

pengaruh tidak langsung terhdap penurunan DO melalui reduksi penetrasi cahaya dan penurunan fotosintesis oleh fitoplankton.

Sedimen dasar perairan Teluk Penyu terdiri dari tiga fraksi utama, yaitu: pasir, debu, dan liat dengan nilai persentase yang berbeda pada setiap stasiun (Gambar 2). Komposisi sedimen dasar di perairan Teluk Panyu didominasi oleh fraksi halus yaitu debu (rata-rata $83,93 \pm 0,28\%$). Komposisi kasar seperti pasir (rata-rata $14,94 \pm 0,28\%$) relatif lebih banyak dibandingkan dengan liat (rata-rata $1,13 \pm 0,02\%$). Jenis fraksi sedimen di lokasi penelitian juga dipengaruhi oleh gelombang, arus, dan pasang surut. Rata-rata gelombang di Pantai Teluk Penyu pada bulan November adalah 1,4 m (Tama, 2023). Gelombang berenergi kuat ini mampu mengangkut sedimen kasar seperti pasir ke zona pantai, sedangkan fraksi halus cenderung terendapkan di perairan dangkal. Selain faktor oseanografi, masukan dari daratan melalui Sungai Kaliyasa juga berkontribusi terhadap peningkatan fraksi halus, terutama saat terjadi hujan lebat yang meningkatkan debit dan membawa material halus ke muara. Proses erosi dan sedimentasi yang berlangsung secara dinamis turut memengaruhi komposisi sedimen.

Konsentrasi Pb pada Air dan Sedimen

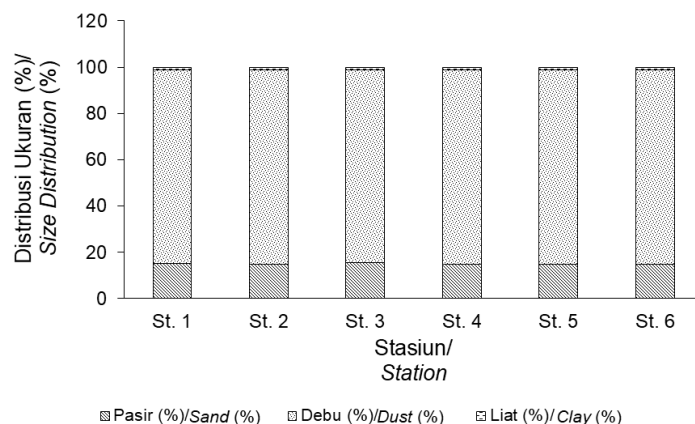
Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar rata-rata logam berat Pb di Pantai Teluk Penyu adalah $0.008 \pm 0.001 \text{ mg/L}$ (Tabel 2), dengan konsentrasi tertinggi di Stasiun 1 dan 5 ($0,009 \text{ mg/L}$) serta terendah di Stasiun 3 dan 6 ($0,007 \text{ mg/L}$). Nilai ini tepat berada diambang batas standar mutu yaitu $0,008 \text{ mg/L}$. Variasi konsentrasi Pb antar stasiun terlihat jelas, di mana Stasiun 2, 3, dan 6 mengalami penurunan, sementara Stasiun 4

dan 5 menunjukkan peningkatan. Aktivitas manusia seperti limbah industri termasuk pengilangan minyak, limbah rumah tangga, dan penggunaan bahan bakar kapal yang berada disekitar lokasi penelitian berpotensi menjadi sumber masuknya Pb ke perairan Teluk Penyu.

Sementara itu, kandungan Pb di sedimen (Tabel 2) juga bervariasi dengan rata-rata $19,48 \pm 703 \text{ mg/kg}$. Konsentrasi tertinggi tercatat di Stasiun 6 ($29,95 \text{ mg/kg}$) yang terletak berdekatan dengan dermaga PPS Cilacap, sedangkan konsentrasi terendah ditemukan di Stasiun 3 dan 4 ($12,50$ dan $12,40 \text{ mg/kg}$). Rata-rata konsentrasi Pb masih berada dalam ambang batas baku mutu yang ditetapkan oleh ANZECC & ARMCANZ (2000), CCME (2001), dan NOAA (1999). Walaupun masih berada di bawah baku mutu, akumulasi logam berat dalam sedimen dapat berpotensi meningkatkan konsentrasi dalam tubuh biota.

Hasil analisis statistik melalui uji korelasi dan CA menunjukkan tingkat konsistensi yang cukup tinggi terhadap teori-teori yang telah dikemukakan mengenai perilaku Pb di lingkungan perairan estuari. Hasil CA divisualisasikan dalam bentuk biplot dengan sumbu Axis 1–2 dan Axis 1–3 yang secara kumulatif menjelaskan 95,4% dan 71,5% variasi data (Gambar 3). Interpretasi dilakukan berdasarkan orientasi vektor antar variabel untuk memahami hubungan kedekatan dan arah pengaruh antar komponen.

Konsentrasi Pb air yang relatif tinggi terdeteksi pada Stasiun 1 ($0,009 \text{ mg/L}$) dan Stasiun 5 ($0,008 \text{ mg/L}$) yang secara bersamaan juga memiliki nilai TSS yang tinggi (20 mg/L dan 22 mg/L). Hal ini mengindikasikan bahwa TSS dapat berperan sebagai media transportasi logam berat dalam kolom air melalui proses adsorpsi dan koagulasi.



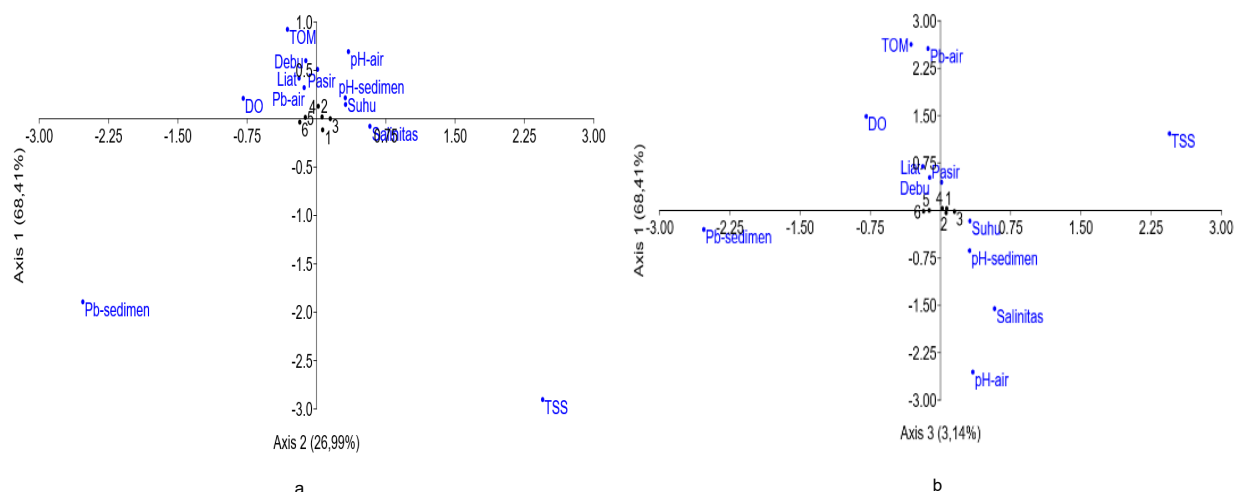
Gambar 2. Komposisi persentase (%) distribusi ukuran butir sedimen di Pantai Teluk Penyu
Figure 2. Percentage composition (%) of sediment grain size distribution at Penyu Bay Beach

Tabel 2. Konsentrasi logam berat Pb di air dan sedimen di Teluk Penyu.

Table 2. Concentration of lead (Pb) in the water and sediments in Teluk Penyu

Stasiun/Station	Parameter/Parameters	
	Pb Air/ Pb Water (mg/L)	Pb Sedimen/ Pb Sediment (mg/kg)
1	0.009	21.48
2	0.008	16.13
3	0.007	12.50
4	0.008	12.44
5	0.009	24.37
6	0.007	29.95
Rata-rata/Average	0.008±0.001	19.48±7.03
Standar Baku Mutu*/Standard Quality*	0.008	-
ANZECC & ARMCANZ (2000)	-	50-220
CCME (2001)	-	ISQG=30.2; PELs=112
NOAA (1999)	-	46.7

*) Baku Mutu PP Nomor 22 Tahun 2021/Quality Standards of Government Regulation Number 22 of 2021



Gambar 3. Biplot uji Correspondence Analysis: a) biplot Axis 1 dan Axis 2 dan b) biplot Axis 1 dan Axis 3

Figure 3. Correspondence Analysis biplot: a) biplot of Axis 1 and Axis 2 and b) biplot of Axis 1 and Axis 3

Meskipun nilai korelasi menunjukkan hubungan antara Pb air dan TSS tidak signifikan secara statistik ($p=0,127$; $p=0,81$) begitu pula dengan hasil analisis CA yang tidak memperlihatkan kedekatan spasial yang signifikan (Gambar 3a), meningkatnya TSS dapat memperluas permukaan kontak untuk pengikatan logam (Ghadiri et al., 2023).

Analisis korelasi juga menunjukkan bahwa pH air memiliki korelasi negatif cukup kuat terhadap

Pb air ($p=0,717$; $p=0,109$). Walaupun korelasi ini tidak signifikan secara statistik, perairan dengan pH rendah cenderung meningkatkan kelarutan Pb, sehingga memperbesar potensi bioavailabilitasnya. Konsentrasi Pb cenderung meningkat pada $pH < 7$, karena hilangnya muatan negatif pada koloid dan melemahnya afinitas pengikatan terhadap logam. Hal ini diperkuat dengan hasil analisis CA pada biplot Axis 1 dan Axis 3 (Gambar 3b)

yang menunjukkan vektor Pb air berlawanan arah dengan pH air. Hal ini menunjukkan kecenderungan konsisten bahwa kondisi asam berasosiasi dengan tingginya konsentrasi Pb terlarut. Selain itu, salinitas juga menunjukkan korelasi negatif terhadap Pb air ($p=0,359$), semakin tinggi kadar Na^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} menyebabkan peningkatan dalam pembentukan ion kompleks yang dapat menurunkan fraksi Pb terlarut dalam sistem estuari (Zheng et al., 2022).

Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa fraksi liat memiliki korelasi sangat kuat dan signifikan terhadap Pb sedimen ($p=0,833$; $p=0,039$). Sedimen dengan dominasi fraksi halus seperti liat memiliki kapasitas adsorpsi logam paling tinggi, karena luas permukaan spesifik yang besar dan keberadaan mineral lempung (montmorillonit dan illit) yang memiliki status pertukaran ion aktif (Fernandes & Baeyens, 2019). Pb-sedimen tertinggi ditemukan pada Stasiun 6 (29,95 mg/kg) yang juga memiliki kandungan liat tertinggi (1,15%) dibandingkan stasiun lainnya. Namun, hasil analisis CA vektor Pb sedimen tidak secara jelas berdekatan dengan fraksi liat pada Axis 1 dan 2 (Gambar 3a) tetapi menunjukkan kedekatan relatif dengan TSS. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi Pb dalam sedimen tidak hanya dipengaruhi oleh satu parameter, melainkan interaksi berbagai kondisi sedimen secara spasial.

Lokasi Stasiun 6 yang berdekatan dengan PPS Cilacap berpotensi sebagai sumber masukan Pb ke lingkungan. Emisi gas buangan dan tetesan oli mengandung tetraetil timbal kemudian masuk ke kolom air dan terserap ke dalam sedimen. Senyawa Pb tidak larut dalam air serta mudah terikat pada partikel tersuspensi dan bahan organik lalu terakumulasi di sedimen dasar. Selain itu, kegiatan perawatan rutin kapal seperti pengampelasan, pengecatan ulang, dan pembersihan lambung kapal turut berpotensi menyumbangkan Pb ke perairan. Lalu lintas kapal yang padat dapat menyebabkan resuspensi sedimen, sehingga dapat melepaskan Pb dari sedimen ke kolom air.

Indeks Pencemaran dan Geoakumulasi

Indeks Pencemaran merupakan suatu indikator kuantitatif yang digunakan untuk menilai tingkat pencemaran suatu media lingkungan seperti air dan sedimen yang diakibatkan oleh bahan pencemar seperti logam berat. Melalui indeks ini dapat diberikan informasi mengenai tercemar tidaknya suatu lingkungan. Menurut Tomlinson et al. (1980) kriteria klasifikasi Indeks pencemaran dapat dibagi menjadi tidak tercemar, tercemar ringan, tercemar sedang, dan tercemar berat. Hasil perhitungan PI

di Pantai Teluk Penyu menunjukkan nilai bervariasi antara 0,88 hingga 1,13 dengan rata-rata $1,00 \pm 0,11$ (Gambar 4). Stasiun 1 dan 5 menunjukkan nilai PI tertinggi (1,13), yang menandakan bahwa di kedua lokasi telah mengalami pencemaran ringan oleh Pb. Sementara Stasiun 2 dan 4 berada pada ambang batas dengan nilai PI sebesar 1,00; serta Stasiun 3 dan 6 masih dalam kategori aman dengan nilai PI sebesar 0,88. Meskipun beberapa stasiun menunjukkan kondisi tidak tercemar, keberadaan nilai $PI > 1,00$ di dua stasiun menunjukkan secara umum perairan Teluk Penyu telah mengalami tekanan pencemaran oleh logam Pb dan diklasifikasikan sebagai tercemar ringan.

Pencemaran ringan yang teridentifikasi di Stasiun 1 dan 5 erat kaitannya dengan lokasi di kawasan tinggi dengan aktivitas manusia, khususnya di sekitar pelabuhan dan area pemukiman padat penduduk. Masuknya Pb ke perairan dapat terjadi melalui aliran permukaan dari jalanan atau kawasan pemukiman yang membawa partikel logam berat, pembuangan limbah domestik dan cair industri, termasuk limbah aktivitas galangan kapal dan pelabuhan. Selain itu, pengendapan atmosferik melalui presipitasi debu atau asap kendaraan atau industri yang kemudian jatuh ke permukaan laut. Hal ini sesuai dengan temuan Xiao et al. (2019) di perairan industri pesisir China yang melaporkan bahwa kawasan dengan aktivitas pelabuhan dan kota padat menduduki menunjukkan konsentrasi Pb yang tinggi akibat kombinasi limbah cair dan limpasan permukaan. Sementara itu, menurut Liang et al. (2025) kontribusi utama pencemaran Pb di perairan pesisir berasal dari aktivitas antropogenik, terutama transportasi laut dan industri pengolahan.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai I-geo di Pantai Teluk Penyu berkisar antara -1,27 hingga -0,002, dengan rata-rata keseluruhan sebesar -0,70 (Gambar 5). Stasiun 3 dan 4 memiliki nilai I-geo paling rendah (-1,26 dan 1,27) yang menunjukkan bahwa di kedua lokasi ini masih dalam kategori tidak tercemar. Stasiun 1 dan 5 menunjukkan nilai I-geo yaitu -0,48 dan -0,30 yang masih tergolong tidak tercemar namun mendekati ambang batas. Sementara itu Stasiun 2 dan 6 memiliki nilai I-geo mendekati 0 (-0,09 dan -0,02), mencerminkan kondisi sedimen yang nyaris berada dalam kategori tidak tercemar hingga tercemar sedang. Nilai I-geo di Pantai Teluk Penyu menunjukkan bahwa sedimen tidak tercemar oleh logam berat Pb, karena semua stasiun memiliki nilai I-geo di bawah 0.

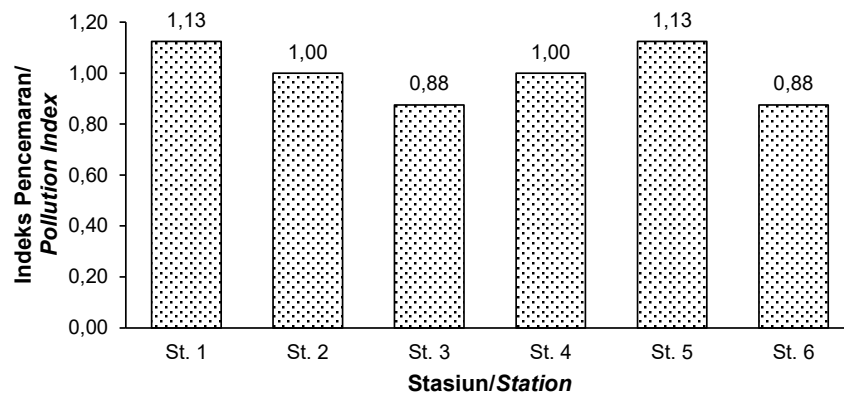
Sedimen dasar Pantai Teluk Penyu yang tidak tercemar oleh Pb menunjukkan bahwa kandungan Pb dalam sedimen masih berada di bawah ambang

pencemaran dan cenderung mencerminkan latar belakang geogenik alami daripada akumulasi pencemaran antropogenik. Keberadaan Pb dalam sedimen Pantai Teuk Penyu diduga berasal dari proses pelapukan batuan dan transportasi material alami dari daratan melalui aliran permukaan. Jika dibandingkan dengan nilai indeks PI pada Stasiun 1 dan 5 yang tercemar ringan (baku mutu 0,008; $PI=1,13$), nilai I-Geo semua stasiun bernilai kurang dari 0 ($I\text{-}geo<0$), sehingga tergolong tidak ada pencemaran signifikan pada sedimen. Hal ini diduga akibat sudah adanya masukan Pb melalui limpasan atau aktivitas antropogenik, tetapi logam Pb belum terikat secara tetap (permanen) atau belum cukup waktu untuk terjadinya deposisi. Faktor-faktor seperti resuspensi sedimen, dinamika arus, dan sifat logam Pb yang lebih *mobile* di kolom air dapat berperan dalam memperlambat proses akumulasi di dasar laut. Penelitian serupa oleh Zhu et al (2013) menyatakan bahwa nilai I-geo negatif pada lingkungan pesisir umumnya menunjukkan

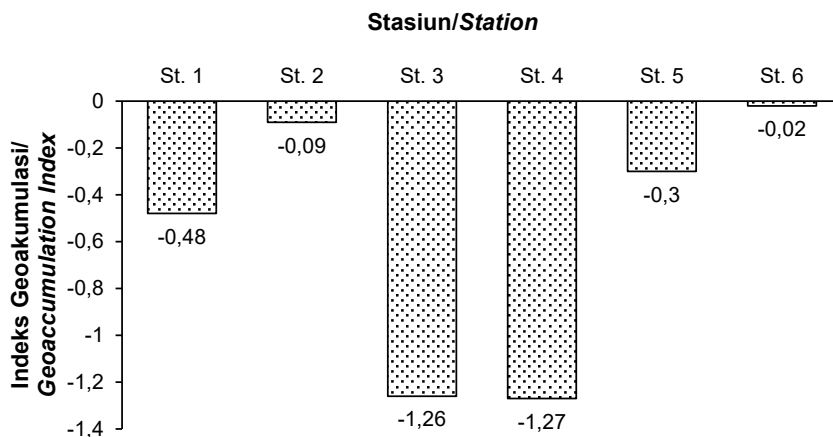
bahwa distribusi logam berat di sedimen didominasi oleh sumber alami seperti erosi dan pelapukan batuan dibandingkan input antropogenik aktif. Zhou et al. (2020) juga menyebutkan bahwa keterikatan logam dalam sedimen sangat dipengaruhi oleh karakteristik mineral sedimen dan waktu kontak dengan pencemaran, yang menjelaskan rendahnya akumulasi meskipun terdapat tekanan antropogenik.

Biakumulasi Pb oleh Kerang Hijau

Konsentrasi logam berat Pb pada sampel kerang hijau di Pantai Teluk Penyu menunjukkan variasi berdasarkan ukuran kerang, dengan pengukuran dibagi menjadi kategori kecil, sedang, dan besar (Gambar 5). Uji Kruskal-Wallis terdapat perbedaan yang signifikan antara Pb dengan kelompok ukuran kerang ($K=15,273$; derajat kebebasan=2; $p\text{-value}=0,000$). Selanjutnya, uji *Dunn's post-hoc test* menunjukkan bahwa kerang kecil berbeda nyata (rata-rata rangking 9,292) dengan kerang



Gambar 4. Indeks Pencemaran Pb-air di Teluk Penyu



Gambar 5. Indeks Geoakumulasi Pb di Pantai Teluk Penyu.

Figure 5. Geoaccumulation Index (*I-geo*) of Lead (Pb) in Teluk Penyu.

sedang (20,750), dan besar (25,458). Temuan ini menunjukkan adanya hubungan antara ukuran kerang hijau dan tingkat akumulasi logam berat, di mana kerang yang lebih besar cenderung menyimpan lebih banyak Pb (Gambar 6). Penelitian sebelumnya di perairan pantai Kelurahan Mangunharjo Kota Semarang juga menemukan pola serupa (Muhtaroh et al., 2024).

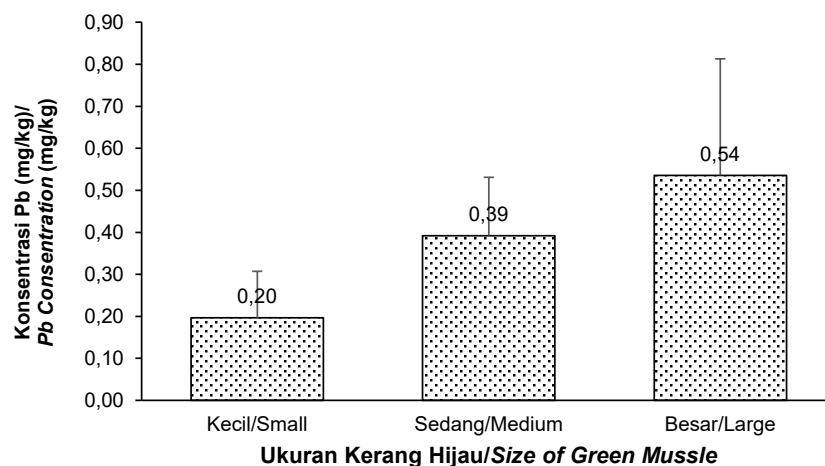
Ukuran tubuh kerang hijau memiliki keterkaitan dengan kemampuan akumulasi logam berat Pb di dalam tubuhnya. Kerang yang berukuran lebih besar umumnya memiliki usia yang lebih tua dan mengalami paparan lingkungan tercemar lebih lama, sehingga memungkinkan terjadinya bioakumulasi logam secara progresif dalam jaringan lunaknya. Penelitian Takarina et al. (2021) menunjukkan akumulasi logam berat pada kerang hijau seiring pertambahan ukuran dan panjang cangkang yang juga menggambarkan umur organisme yang menggambarkan kerang hijau dengan ukuran lebih besar memiliki volume filtrasi air yang lebih besar, sehingga meningkatkan jumlah logam berat yang masuk melalui respirasi dan pencernaan juga lebih tinggi. Jaringan lunak kerang hijau yang lebih besar menyediakan area pengikatan logam yang lebih luas, baik dalam ikatan protein maupun pengendapan dalam bentuk kompleks logam.

Meskipun kadar logam berat Pb pada kerang hijau belum melebihi ambang batas yang ditetapkan sebesar 1,5 mg/kg, kandungan logam tersebut tetap dipengaruhi oleh kualitas air dan sedimen di habitatnya. Selaras dengan pernyataan Zaynab et al. (2022) akumulasi logam dipengaruhi oleh variabel lingkungan, seperti: pH, salinitas, ketersediaan bahan organik, dan padatan tersuspensi yang

memengaruhi bioavailabilitas logam dalam perairan. Kerang hijau memiliki kemampuan untuk mengurangi akumulasi logam berat melalui proses ekskresi, namun pengurangan ini tidak signifikan, sehingga tetap terjadi akumulasi dalam jaringan (Wardani et al., 2014). Selain itu, aktivitas limbah manusia yang masuk ke perairan melalui aliran sungai berkontribusi terhadap peningkatan kadar logam berat di lingkungan. Akumulasi logam berat dapat berdampak negatif pada kelangsungan hidup kerang hijau, termasuk malformasi cangkang yang dapat menjadi hingga 1,5 kali lebih tebal dari normal dan pengaruh terhadap proses spermatogenesis yang dapat mengurangi jumlah pembentukan spermatosit (Jalius et al., 2008).

Nilai BCF menggambarkan kemampuan organisme dalam mengakumulasi logam berat di dalam tubuhnya, yang dihitung dengan membandingkan konsentrasi logam berat di tubuh organisme dengan konsentrasi logam berat di air atau sedimen tempat organisme tersebut berada (Balqis et al., 2021). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai BCF logam berat Pb di air pada kerang hijau berukuran kecil adalah 25,00, pada ukuran sedang 48,75, dan pada ukuran besar 67,50 (Tabel 3). Sementara itu, nilai BCF logam berat Pb di sedimen untuk kerang hijau berukuran kecil adalah 0,01; ukuran sedang 0,02; dan ukuran besar 0,03 (Tabel 3). Hal ini menunjukkan bahwa kerang hijau berukuran besar di Teluk Penyung mengakumulasi logam berat Pb lebih banyak dibandingkan dengan kerang hijau berukuran kecil, terlihat dari nilai BCF tertinggi pada kerang berukuran besar baik di air maupun sedimen.

Nilai BCF logam berat Pb di air dan sedimen untuk ketiga ukuran kerang hijau berada dalam kategori



Gambar 5. Konsentrasi logam berat Pb pada kerang hijau.

Figure 5. Concentration of heavy metals Pb in green mussels

Tabel 3. BCF logam Pb pada kerang hijau (Pb-K) dengan air (Pb-A) dan sedimen (Pb-S)

Table 3. BCF of Pb in green mussels (Pb-K) with water (Pb-A) and sediment (Pb-S)

Ukuran dan Jumlah Kerang Hijau/ Size and number of Green Mussels	Pb-K (rata-rata/ average) mg/kg	Pb-A (rata-rata/ average) mg/L	Pb-S (rata-rata/ average) mg/kg	Nilai BCF-A/ BCF-A Value	Nilai BCF-S/ BCF-S Value	Kategori Akumulasi/ Accumulation Category
Kecil/Small (n=44)	0.20±0.11	0.008±0.001	19.48±7.03	24.61±13.82	0.01±0.01	Rendah/ Low
Sedang/Medium (n=10)	0.39±0.14			49.03±17.38	0.02±0.01	Rendah/ Low
Besar/Large (n=6)	0.54±0.28			66.97±34.61	0.03±0.01	Rendah/ Low

rendah. Temuan ini sejalan dengan penelitian Potipat et al. (2015), yang menunjukkan bahwa nilai BCF pada sedimen lebih rendah dibandingkan dengan media air. Ulinuha & Perwira (2023) menjelaskan bahwa hal ini mungkin disebabkan oleh sifat logam berat Pb yang mudah terlarut dalam air dan pola makan kerang hijau sebagai *non-selective filter feeder*, yang memudahkan transisi logam berat dari air ke dalam tubuhnya.

Kerang hijau merupakan sumber protein hewani penting bagi masyarakat pesisir dan berpotensi mendukung ketahanan pangan produk laut. Namun, akumulasi logam berat dalam jaringan kerang menimbulkan risiko terhadap keamanan pangan. Meskipun kadar Pb dalam penelitian ini masih berada dibawah ambang batas, paparan kronis dalam dosis rendah tetap berisiko bagi kelompok rentan. Oleh karena itu, pemantauan kualitas lingkungan pesisir secara berkala diperlukan untuk menjamin keamanan konsumsi dan keberlanjutan sumber daya laut.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kandungan logam berat Pb air di perairan Teluk Penyu berada tepat pada nilai baku mutu yang ditetapkan dan tergolong tidak tercemar ($PI \leq 1$) hingga tercemar ringan ($1 < PI \leq 2$) berdasarkan nilai Indeks Pencemaran. Berbeda dengan air, sedimen perairan Teluk Penyu masih berada dalam ambang batas baku mutu dan termasuk dalam kategori tidak tercemar ($I\text{-geo} \leq 0$) berdasarkan nilai Indeks geoakumulasi. Keberadaan Pb air memiliki hubungan cukup kuat dengan pH air, sedangkan Pb sedimen memiliki hubungan kuat dengan fraksi liat. Kandungan logam berat Pb yang ditemukan pada kerang hijau

masih berada di bawah ambang batas baku mutu yang ditetapkan, sehingga aman untuk dikonsumsi masyarakat sebagai sumber pangan. Nilai BCF menunjukkan bahwa kerang hijau merupakan organisme laut yang memiliki kemampuan rendah dalam mengakumulasi Pb ($BCF < 100$).

Hubungan antara Pb dengan variabel lingkungan mengindikasikan bahwa distribusi Pb sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik kimia perairan yang dapat mendukung pembangunan model prediksi pencemaran logam berat. Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa kerang hijau merupakan bioindikator awal pencemaran Pb dengan risiko rendah, termasuk mempertahankannya sebagai sumber pangan laut yang aman bagi masyarakat. Pendekatan secara komprehensif memberikan kontribusi praktis dalam strategi pengelolaan dan mitigasi pencemaran di wilayah pesisir Teluk Penyu maupun pesisir lainnya dengan tekanan antropogenik serupa.

DAFTAR PUSTAKA

- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2022). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA Press.
- Aphrodita, S. V., Santoso, A., & Riniatsih, I. (2022). Analisis kandungan logam berat timbal (Pb) pada air, sedimen, dan lamun *Enhalus acoroides* di Perairan Pantai Sanur Kota Denpasar. *Journal of Marine Research*, 11(2), 227–236. doi:10.14710/jmr.v11i2.31978
- Arifin, A. A., Suryono, C. A., & Setyati, W. A. (2021). Amankah mengonsumsi kerang hijau *Perna viridis* Linnaeus, 1758 (Bivalvia: Mytilidae) yang ditangkap di perairan Morosari Demak. *Journal of Marine Research*, 10(3), 377–386. doi:10.14710/jmr.v10i3.31650

- Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, & Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ANZECC & ARMCANZ). (2000). *Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1: The guidelines* (No. 4). National Water Quality Management Strategy.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). (2009). Batas maksimum cemaran logam berat dalam pangan (SNI 7388:2009). Diambil dari https://sertifikasibbia.com/upload/logam_berat.pdf
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). 2004. Air dan air limbah-Bagian3: Cara uji padatan tersuspensi (*Total Suspended solid, TSS*) secara gravimetri (SNI 06-6989.3-2004). Diambil dari <https://sainstkim.teknik.ub.ac.id/wp-content/uploads/2016/12/SNI-06-6989.3-2004-TSS-secara-gravimetri.pdf>
- Balqis, Emiyarti, & Takwir, A. (2021). Konsentrasi logam berat timbal (Pb) pada sedimen dan kerang (*Pollymesoda erosa*) di Desa Totobo Sulawesi Tenggara. *Sapa Laut*, 6(4), 297–303.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2001). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Summary tables*. Winnipeg, MB: CCME.
- Chaerunnisa, R., & Supardi, U. (2021). Persentase penurunan kadar logam berat timbal pada kerang hijau (*Perna viridis*) pasca proses depurasi oleh nelayan Teluk Jakarta. *Biological Science and Education Journal*, 1(2), 121–127. doi:10.30998/edubiologia.v1i2.9573
- Collin, M. S., Venkatraman, S. K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S. M., Stacey, R. G. S., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G. I., Senatov, F., Koppala, S., & Swamiappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100094. doi:10.1016/j.hazadv.2022.100094
- Dadzie, A. A., Yuan, L., Xing, S., Liu, X., & Zhou, X. (2020). Survey and assessment of metals distribution in the overlying water of the representative lake and rivers in Zhenjiang, China. *Springer Nature Applied Sciences*, 2(776), 1–12. doi:10.1007/s42452-020-2567-9
- Dharmadewi, A. A. I. M., & Wiadnyana, I. G. A. G. (2019). Analisis kandungan logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) pada kerang hijau (*Perna viridis* L.) yang beredar di pasar Badung. *Jurnal Edukasi Matematika dan Sains*, 8(2), 161-169. doi:10.5281/zenodo.355207
- Emilia, I., Putri, Y. P., Jumingin, Rizal, S., & Ranga. (2022). Biokonsentrasi timbal dan kadmium terhadap *Penaeus merguensis* dalam air dan sedimen di Perairan Desa Sungsang I. *Jurnal Ilmiah Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 19(2), 215–227. doi:10.31851/sainmatika.v19i2.9874
- Fachrul, M. F., Iswanto, B., & Maruthi, D. (2011). Kajian konsentrasi logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) pada sedimen Sungai Donan, Cilacap, Jawa Tengah. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 5(5), 145-158. doi:10.25105/urbanenvirotech.v5i5.691
- Fadlilah, I., Triwuri, N. A., Prasadi, O. (2021). Biokonsentrasi faktor logam berat timbal (Pb) pada ikan di Pantai Kamiren Cilacap, Jawa Tengah. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(1), 94-99. doi:10.26418/jtllb.v11i1.59490
- Fendjalang, S. N. M., Krisye, & Rupilu, K. (2023). Konsentrasi Logam Berat Timbal (Pb) pada Sedimen di perairan Pantai Kupa-Kupa Kabupaten Halmahera Utara. *Journal of Coastal and Deep Sea*, 1(1), 13–21. doi:10.30598/jcds.v1i1.11196
- Fendjalang, S. N. M., Rupilu, K., Simange, S. M., & Paparang, A. (2022). Analisis kandungan timbal (Pb) pada perairan Pantai Desa Kupa Kupa, Kecamatan Tobelo Selatan, Kabupaten Halmahera Utara. *Jurnal Pengelolaan Perikanan Tropis*, 06(02), 126–133. doi:10.29244/jppt.v6i2.43894
- Fernandes, M. M., & Baeyens, B. (2019). Cation exchange and surface complexation of lead on montmorillonite and illite including competitive adsorption effects. *Applied Geochemistry*, 100, 190-202. doi:10.1016/j.apgeochem.2018.11.005
- Förstner, U., & Müller, G. (1981). Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact. *GeoJournal*, 5, 417–432. doi:10.1007/BF02484715
- Ghadiri, A., Hashemi, S. H., & Nasrabadi, T. (2023). Robust time-invariant relationships between metals concentration and total suspended solids at stormwater in a highly urbanized catchment. *Environmental Earth Science*, 82(236). doi:10.1007/s12665-023-10922-2
- Greenacre, M. (2017). Correspondence analysis in practice. (3rd edition). New York, US: Chapman and Hall/CRC.
- Guntur, S. C., Kurniawan, T. A., Sanjaya, I., Avanda, D. & Balfas, M. D. (2025). Analisis granulometri dan pengaruh pada logam berat cd, cu, dan zn dalam endapan sedimen Sungai Pampang, Samarinda. *Jurnal Teknik Geologi: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 7(2), 25-35. doi:10.30872/jtgeo.v7i2.18236
- Hariharan, G., Purvaja, R., & Ramesh, R. (2014). Toxic effects of lead on biochemical and histological alterations in green mussel (*Perna viridis*) induced by environmentally relevant concentrations. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, 77(5), 246-60. doi:10.1080/15287394.2013.861777
- Haryati, A., Prartono, T., & Hindarti, D. (2022). Konsentrasi merkuri (hg) di sedimen perairan Cirebon Jawa Barat pada musim peralihan timur. *Jurnal ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(3), 321-335. doi:10.29244/jitkt.v14i3.33788
- Hastuti, R. P. W., Widianingsih, W., & Nuraini, R. A. T. (2024). Kondisi meteorologi laut terhadap suhu permukaan laut di perairan Kota Surabaya tahun 2019 – 2021. *Journal of Marine Research*, 13(4), 701-712. doi:10.14710/jmr.v13i4.43227
- Heiri, O., Lotter, A.F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*,

- 25, 101–110. doi:10.1023/A:1008119611481
- Helen, D., Vaithyanathan, C., & Pillai, A. R. (2016). Assessment of heavy metal contamination and sediment quality of thengapattinam estuary in Kanyakumari District. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 5(1), 8–17. https://www.ijcps.org/OSite/v5n1/446_pdf.pdf
- Hidayati, N. V., Kartikaputri, A. D., Hernayanti, H., & Mahdiana, A. (2023). Water quality and pollution level in Plawangan Barat, Segara Anakan, Cilacap Based on pollution index approach. *Omni-Akuatika*, 19(2), 148-159. doi:10.20884/1.oa.2023.19.2.1045
- Hoang, A. T., & Pham, X. D. (2018). An investigation of remediation and recovery of oil spill and toxic heavy metal from maritime pollution by a new absorbent material. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(3), 159–169. doi:10.1080/20464177.2018.1544401
- Jalius, Setiyanto, D. D., Sumantadinata, K., Riani, E., & Ernawati, Y. (2008). Bioakumulasi logam berat dan pengaruhnya terhadap oogenesis kerang hijau (*Perna viridis*). *Jurnal Riset Akuakultur*, 3(1), 43-52. doi:10.15578/jra.3.1.2008.43-52
- Legendre, P., & Legendre, L. (2012). Numerical ecology. (3rd edition). Amsterdam, NL: Elsevier.
- Lestari, S., Trenggono, M., & Syakti, A D. (2019). Total Suspended Solid (TSS) pada tipe gelombang pecah yang berbeda di perairan pantai Kabupaten Cilacap. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Nasional Tahunan XV ISOI 2018*, 53-61.
- Liang, H., Wang, G., Guo, H., Niu, L., & Yang, Q. (2025). Evaluation of heavy metal accumulation and source in surface sediments of the Pearl River Estuary (China). *Marine Environmental research*, 204, 106948. doi:10.1016/j.marenvres.2025.106948
- Muhtaroh, N., Hidayat, W, J., & Muhammad, F. (2024). Kandungan logam berat timbal (Pb) dan seng (Zn) pada kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Pantai Kelurahan Mangunharjo Kota Semarang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 600-608. doi:10.14710/jil.22.3.600-608
- Muller, C. H. (1969). Allelopathy as a factor in ecological process. *Vegetatio*, 18(1/6), 348–357. <http://www.jstor.org/stable/20035472>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (1999). Screening quick reference table for inorganics in sediment. US: Office of Response and Restoration.
- Nawaz, W., Linke, P., & Koç, M. (2019). Safety and sustainability nexus: A review and appraisal. *Journal of Cleaner Production*, 216, 74-87. doi:10.1016/j.jclepro.2019.01.167.
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22. (2021). Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Diambil dari <https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021>
- 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. *Environment Asia*, 8(2), 118-128. doi:10.14456/ea.2015.30
- Rahmawati, S. A., & Sari, L. K. (2022). Daya dukung ekowisata pantai Teluk Penyu Kabupaten Cilacap. *Jurnal Ilmu Kelautan Lesser Sunda*, 2(2), 7–12. doi:10.29303/jikls.v2i2.58
- Reynold, S.G. (1971). A manual introductory soil science and sample soil analysis methods. Noumea, NC: North Pacific Commission.
- Rizkiana, L., Karina, S., & Nurfadillah. (2017). Analisis timbal (Pb) pada sedimen dan air laut di kawasan pelabuhan nelayan Gampong Deah Glumpang Kota Banda Aceh. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kelautan dan Perikanan Unsyiah*, 2(1), 89–96. <https://jim.usk.ac.id/fkp/article/view/2555/pdf>
- Saputra, H., Nugraha, M.S., & Hudatwi, M. (2024). Penilaian stok karbon ekosistem padang lamun di Pesisir Tukak, Kabupaten Bangka Selatan. *Journal of Marine Research*, 13(1), 1-10. doi:10.14710/jmr.v13i1.33988
- Siahaan, B., Mantiri, D. M., & Rimper, J. R. T. S. L. (2017). Analisis logam timbal (Pb) dan konsentrasi klorofil pada alga *Padina australis* Hauck dari Perairan Teluk Totok dan Perairan Blongko, Provinsi Sulawesi Utara. *Jurnal Pesisir Dan Laut Tropis*, 2(1), 31–37. doi:10.35800/jplt.5.3.2017.16937
- Suwarsito, S. & Sarjanti, E. (2014). Analisa spasial pencemaran logam berat pada sedimen dan biota air di muara Sungai Serayu Kabupaten Cilacap. *Geo Edukasi*, 3(1), 30-37. <https://jurnalnasional.ump.ac.id/index.php/GeoEdukasi/article/view/587>
- Takarina, N., Purwiyanto, A. I. S., & Suteja, Y. (2021). Cadmium (Cd), Copper (Cu), and Zinc (Zn) levels in commercial and non-commercial fishes in the Blanakan River Estuary, Indonesia: A preliminary study. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112607. doi:10.1016/j.marpolbul.2021.112607
- Tama, P. R. (2023). Analisis oseanografi perairan Teluk Penyu Cilacap. *Journal of Oceanography and Aquatic Science*, 1(3), 54–62. doi:10.56855/joane.v1i3.826
- Tarre, S., & Green, M. (2004). High rate nitrification at low pH in suspended and attached biomass reactor. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(11), 6481-6487. doi:10.1128/AEM.70.11.6481-6487.2004
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Jeffrey, D. W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters*, 33, 566-575. doi:10.1007/BF02414780
- Turekian, K. K., & Wedepohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the Earth's Crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 175–192. doi:10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2
- Ucros-Rodriguez, S., Araque-Romany, F., Mentero-Mendoza, L., Sarmiento-Nater, V. C., Calvo-Carrillo, O., Johnson-Restrepo, B., Gallego, J. L., & Romero-Murillo, P. (2025). Analysis of pollutant accumulation in the invasive bivalve *Perna viridis*: Current status in

- the Colombian Caribbean 2020–2023. *Toxics*, 13(2), 77. doi:10.3390/toxics13020077
- Ulinuha, D., & Perwira, I. Y. (2023). Bioakumulasi timbal (Pb) pada bivalvia (*Anadara antiquata*, *Anadara granosa* dan *Perna viridis*) dari perairan Lekok, Pasuruan. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(2), 179–185. doi:10.24843/jmas.2022.v08.i02.p02
- Utami, R., Rismawati, W., & Sapanli, K. (2018). Pemanfaatan mangrove untuk mengurangi logam berat di perairan. *Prosiding Seminar Nasional Hari Air Dunia*: 141–153. <https://conference.unsri.ac.id/index.php/seminashas/article/viewFile/799/428>
- Wardani, I., Ridlo, A., & Supriyanti, E. (2018). Kandungan cadmium (Cd) dalam air, sedimen, dan kerang hijau (*Perna viridis*) di perairan Trimulyo Semarang. *Journal of Marine Research*, 7(2), 151–158. doi:10.14710/jmr.v7i2.25904
- Xiao, R., Guo, D., Ali, A., Mi, S., Liu, T., Ren, C., Li, R., & Zhang, Z. (2019). Accumulation, ecological-health risks assessment, and source apportionment of heavy metals in paddy soils: A case study in Hanzhong, Shaanxi, China. *Environmental Pollution*, 248, 349–357. doi:10.1016/j.envpol.2019.02.045
- Yaqin, K., Fachruddin L., & Rahim, N. F. (2015). Studi kandungan logam timbal (Pb) kerang hijau *Perna viridis* terhadap indeks kondisinya. *Jurnal Lingkungan Indonesia*, 3(6), 309–317.
- Zaynab, M., Al-Yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M., Khan, K.A., & Li, S. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University-Science*, 23(1), 101653. doi:10.1016/j.jksus.2021.101653
- Zhang, Y., & Wang, X. (2021). Evaluation of heavy metal pollution in shallow Groundwater of farmland in Huaibei Plain, China. *E3S Web of Conferences*, 267, 1–6. doi:10.1051/e3sconf/202126702009
- Zheng, J. Zhang, X., Li, G., Fei, G., Jin, P., Liu, Y., Wouters, C., Meir, G., Li, & Van der Bruggen, B. (2022). Selective removal of heavy metals from saline water by nanofiltration. *Desalination*, 525, 115380. doi:10.1016/j.desal.2021.115380
- Zhou, Q., Liu, Y., Li, T., Zhao, H., Alessi, D. S., Liu, W., & Konhauser, K. O. (2020). Cadmium adsorption to clay-microbe aggregates: Implication for marine heavy metals cycling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 290, 124–136. doi:10.1016/j.gca.2020.09.002
- Zhu, X., Ji, H., Chen, Y., Qiao, M., & Tang, L. (2013). Assessment and sources of heavy metals in surface sediments of Miyun Reservoir, Beijing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 6049–6062. doi:10.1007/s10661-012-3005-2