

Status Cemaran Logam Berat pada Sedimen Ekosistem Mangrove di Muara Sungai Banyuasin

Tri Ayu Novitasari¹, Tengku Zia Ulqodry^{2*}, Wike Ayu Eka Putri², Gusti Diansyah², Melki², Beta Susanto Barus², Riris Aryawati², Muhammad Hendri²

¹Program Studi Pengelolaan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Sriwijaya
Jl. Padang Selasa 524, Bukit Besar 30139, Palembang, Sumatra Selatan, Indonesia

²Jurusan Ilmu Kelautan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya
Jl. Raya Palembang-Prabumulih Km 32, Indralaya, Ogan Ilir 30662, Sumatra Selatan, Indonesia
Email: zia_uul@unsri.ac.id

Abstrak

Mangrove merupakan ekosistem pesisir yang penting karena mampu melindungi garis pantai, menyerap karbon, menyediakan habitat bagi biota, serta berperan sebagai penyaring polutan. Namun, tekanan aktivitas manusia di wilayah pesisir, seperti keberadaan pelabuhan, aktivitas perikanan, dan masukan limbah domestik dari daratan, dapat berkontribusi terhadap masukan logam berat baik di air maupun terakumulasi dalam sedimen. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi status cemaran Pb dan Cu pada sedimen mangrove di Muara Sungai Banyuasin yang berdekatan dengan Pelabuhan Tanjung Api-api. Pengukuran konsentrasi logam berat dilakukan dengan metode Flame Atomic Absorption Spectrophotometry. Rata-rata kandungan Pb (20,71–21,61 mg/kg) dan Cu (10,81–10,99 mg/kg) masih berada di bawah ambang batas baku mutu lingkungan (Pb 50 mg/kg; Cu 65 mg/kg). Nilai Faktor Kontaminasi menunjukkan Pb termasuk kategori sedang, dan Cu tergolong rendah. Nilai Indeks Geoakumulasi ≤ 0 menunjukkan sedimen berada pada kondisi tidak tercemar dan Indeks Beban Pencemaran $> 0-2$ mengindikasikan berada dalam kondisi tercemar ringan. Secara keseluruhan, kualitas sedimen di Muara Sungai Banyuasin tidak menimbulkan risiko signifikan terhadap biota perairan, serta menunjukkan peran penting mangrove sebagai penahan akumulasi logam berat. Hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah bagi pengelolaan lingkungan pesisir, khususnya sebagai acuan dalam pemantauan kualitas sedimen dan pencegahan potensi pencemaran logam berat di sekitar pelabuhan.

Kata kunci: Antropogenik, Pelabuhan Tanjung Api-api, Tembaga, Timbal, Ekosistem Pesisir

Abstract

Heavy Metal Contamination Status in Mangrove Sediments, Banyuasin Estuary

Mangroves are vital coastal ecosystems that protect shorelines, sequester carbon, provide habitats for aquatic organisms, and function as natural filters of pollutants. However, human activities such as port operations, fisheries, and domestic waste inputs may contribute to heavy metal enrichment in both water and sediments. This study evaluated the contamination status of Pb and Cu in mangrove sediments of the Banyuasin Estuary near Tanjung Api-api Port. Heavy metals were analyzed using Flame Atomic Absorption Spectrophotometry. Average concentrations of Pb (20.71–21.61 mg/kg) and Cu (10.81–10.99 mg/kg) were below environmental quality standards (Pb 50 mg/kg; Cu 65 mg/kg). Contamination Factor values indicated moderate contamination for Pb and low contamination for Cu. The Index of Geoaccumulation ($I_{geo} \leq 0$) classified sediments as uncontaminated, while the Pollution Load Index ($PLI > 0-2$) indicated slightly polluted conditions. Overall, sediment quality in the Banyuasin Estuary does not pose significant risks to aquatic biota and emphasizes the role of mangroves as buffers for heavy metal accumulation. These findings provide a scientific reference for coastal environmental management, particularly for monitoring sediment quality and preventing potential heavy metal pollution around port areas.

Keywords: Anthropogenic, Port of Tanjung Api-api, Copper, Lead, Coastal Ecosystems

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan zona transisi yang strategis antara daratan dan lautan (Lakshmi, 2021; Singh *et al.*, 2021). Pesisir menyediakan beragam jasa ekosistem, mulai dari perlindungan alami terhadap bencana, penyimpanan karbon, hingga penyediaan sumber daya yang menopang kehidupan jutaan masyarakat pesisir (Chakraborty *et al.*, 2020; Barbier *et al.*, 2024). Di antara ekosistem pesisir seperti padang lamun, terumbu

karang, dan rawa payau, mangrove menempati posisi paling strategis karena kemampuannya menahan abrasi, menyerap karbon biru dalam jumlah besar, menyediakan habitat esensial bagi biota akuatik, serta menyaring polutan dari daratan (Robin *et al.*, 2022; Choudhary *et al.*, 2024). Peran ganda ini menjadikan mangrove sebagai ekosistem kunci bagi ketahanan lingkungan sekaligus kesejahteraan sosial ekonomi masyarakat pesisir. Namun, dalam beberapa dekade terakhir, kawasan pesisir di berbagai belahan dunia, termasuk Indonesia, mengalami degradasi serius akibat tekanan aktivitas antropogenik (Yang *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2021; Irshad *et al.*, 2023; Putri *et al.*, 2025b). Industrialisasi, urbanisasi, pelabuhan, perikanan, serta buruknya pengelolaan limbah domestik dan pertanian, menjadi faktor utama pencemaran (Okerefor *et al.*, 2020; Kolarova and Napiórkowski, 2021). Salah satu bentuk pencemaran yang paling berbahaya dan persisten adalah akumulasi logam berat di perairan maupun sedimen (Kowalik *et al.*, 2021; Zeng *et al.*, 2024; Diansyah *et al.*, 2025).

Akumulasi logam berat dalam sedimen membawa implikasi serius, baik secara ekologis maupun sosial ekonomi. Dari sisi ekologi, logam berat dapat mengganggu komunitas mikroorganisme, menurunkan keanekaragaman hayati, serta menghambat regenerasi alami ekosistem pesisir (Rozirwan *et al.*, 2023b). Dari sisi ekonomi dan kesehatan, pencemaran ini berdampak langsung pada sektor perikanan dan konsumsi masyarakat. Biota akuatik yang terkontaminasi berpotensi menimbulkan risiko kesehatan, termasuk penyakit kronis seperti gangguan saraf, kanker, serta gangguan sistem reproduksi dan kardiovaskular (Yin *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2022). Ketidakmampuan mengendalikan pencemaran logam berat dapat memperburuk kemiskinan, memperlebar ketimpangan sosial, dan mengancam ketahanan pangan (Mulyadi, 2024; Rangel-Buitrago *et al.*, 2024).

Penelitian ini berfokus pada dua logam berat utama, yaitu timbal (Pb) dan tembaga (Cu). Keduanya bersifat toksik, tidak dapat terurai secara alami, serta mampu terakumulasi dalam jaringan organisme sehingga menimbulkan bioakumulasi dan biomagnifikasi di sepanjang rantai makanan (Lim *et al.*, 2022; Aguilera-Velázquez *et al.*, 2023; Bhuyan *et al.*, 2023). Pb terutama bersumber dari aktivitas transportasi laut melalui bahan bakar kapal serta kegiatan pemeliharaan seperti pengecatan dan pembersihan (Lim *et al.*, 2022). Sementara itu, Cu banyak dilepaskan melalui cat *anti-biofouling*, aktivitas pengiriman, dan pembuangan limbah industri (Hossain *et al.*, 2022).

Muara Sungai Banyuasin merupakan salah satu estuari terbesar di Indonesia yang bermuara ke Selat Bangka dan memiliki hamparan mangrove luas. Kawasan ini berada sangat dekat dengan Pelabuhan Tanjung Api-api, pusat aktivitas pelayaran, transportasi laut, dan perikanan. Menjadikan ekosistem mangrove lebih rentan terhadap akumulasi logam berat yang berasal dari aktivitas pelabuhan, bongkar muat kapal, serta limbah domestik (Islam *et al.*, 2022). Sedimen mangrove berfungsi sebagai penyimpan utama polutan, namun juga dapat menjadi sumber sekunder yang mengganggu kualitas ekosistem pesisir (Berde *et al.*, 2022; Azhar *et al.*, 2024).

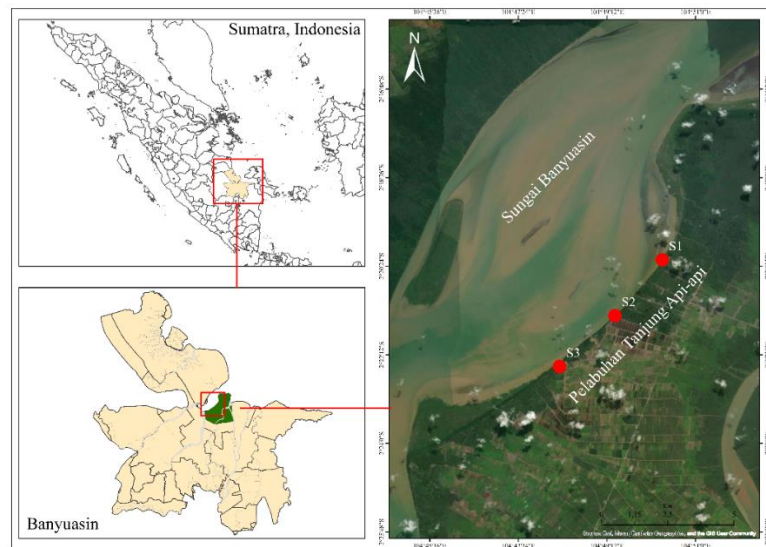
Berbagai studi di Indonesia maupun di wilayah tropis lainnya telah melaporkan tingginya kadar logam berat dalam sedimen mangrove (Rozirwan *et al.*, 2023b; Khotimah *et al.*, 2024; Rozirwan *et al.*, 2025). Kandungan logam berat tersebut terbukti mengganggu fisiologi mangrove, menurunkan tingkat regenerasi, serta meningkatkan risiko bioakumulasi dalam rantai makanan akuatik (Zhou *et al.*, 2022; Karangiya *et al.*, 2024). Kajian komprehensif terkait penilaian pencemaran logam berat pada sedimen mangrove di lokasi ini masih minim, padahal wilayah ini memiliki peranan ekologis dan ekonomi yang penting.

Penelitian ini sejalan dengan agenda Tujuan Pengembangan Berkelanjutan yang menekankan pentingnya pelestarian ekosistem pesisir dan laut. Studi ini bertujuan untuk mengkaji status cemaran logam berat pada sedimen ekosistem mangrove di Muara Sungai Banyuasin yang terletak di sekitar Pelabuhan Tanjung Api-api. Hasil penelitian diharapkan menjadi data dasar bagi penilaian risiko ekologis, memberikan masukan bagi pengambil kebijakan, serta menjadi bagian dari upaya pengelolaan pesisir secara berkelanjutan.

MATERI DAN METODE

Sampel penelitian diambil dari ekosistem mangrove di Muara Sungai Banyuasin (Gambar 1). Pengambilan dilakukan pada tiga stasiun yang merepresentasikan perbedaan kondisi perairan di sepanjang aliran muara.

Stasiun 1 terletak di bagian hilir yang berhubungan langsung dengan laut lepas (Selat Bangka), Stasiun 2 berada di bagian tengah aliran, sedangkan Stasiun 3 berada paling dekat dengan Pelabuhan Tanjung Api-api. Variasi lokasi tersebut dipilih untuk mencerminkan perbedaan karakteristik lingkungan perairan di kawasan penelitian.



Gambar 1. Peta Area Penelitian

Prosedur Pengambilan Sampel dan Analisis Parameter Lingkungan

Sedimen dikumpulkan menggunakan *pipe grab*, lalu ± 500 g sampel dimasukkan ke dalam kantong plastik steril guna mempertahankan integritas sampel dan mencegah kontaminasi. Seluruh sampel kemudian disimpan dalam *coolbox* berisi es untuk mempertahankan kondisi suhu selama transportasi ke laboratorium (Putri *et al.*, 2022). Parameter lingkungan diukur secara *in situ* dengan tiga kali pengulangan di setiap stasiun untuk meningkatkan akurasi data. Parameter yang dievaluasi meliputi suhu, oksigen terlarut/*dissolved oxygen* (DO), pH, dan salinitas. Pengukuran suhu, DO, dan pH dilakukan menggunakan Eutech PC 450 Multi-Parameter (PCWP45004K), sedangkan salinitas diukur dengan refraktometer optik manual dengan fitur ATC berdasarkan prinsip refraksi cahaya.

Analisis Logam Berat

Preparasi sampel sedimen mengacu pada SNI No. 06-6992.3-2004 untuk Pb dan SNI No. 06-6992.5-2004 untuk Cu. Sedimen dikeringkan menggunakan oven elektrik pada suhu 60°C selama 30 menit, kemudian digerus hingga berbentuk serbuk halus. Sebanyak ± 3 g sedimen kering dimasukkan ke dalam erlenmeyer 250 mL, ditambahkan 25 mL akuades dan 5 mL HNO_3 pekat, lalu dipanaskan di atas *hot plate* pada suhu $105\text{--}120^{\circ}\text{C}$ hingga volumenya tersisa sekitar 10 mL. Setelah didinginkan, larutan diberi tambahan HNO_3 pekat dan HClO_4 , lalu dipanaskan kembali hingga larutan jernih. Larutan hasil digesti kemudian disaring dengan kertas saring ($0,45\ \mu\text{m}$), dipindahkan ke dalam labu ukur 100 mL, dan diencerkan dengan akuades hingga tanda tera. Analisis kandungan Pb dan Cu dilakukan menggunakan *Flame Atomic Absorption Spectrophotometry* (FAAS, Shimadzu AA-7000) dengan panjang gelombang masing-masing 283,3 nm untuk Pb dan 324,8 nm untuk Cu.

Analisa Data

Tingkat pencemaran Pb dan Cu pada sedimen dievaluasi melalui tiga metode, yaitu Faktor Kontaminasi (*Contamination Factor*, CF), Indeks Geoakumulasi (*Index of Geoaccumulation*, Igeo) dan Indeks Beban Pencemaran (*Pollution Load Index*, PLI). Perhitungan dan kriteria evaluasi mengikuti pedoman yang dikemukakan oleh Rincon-Vasquez *et al.* (2025) yang ditampilkan pada Tabel 1.

CF adalah suatu kondisi dimana sesuatu tercemar oleh unsur lain yang memberikan dampak tertentu (Antoniadis *et al.*, 2019), persamaan merujuk pada (Hakanson, 1980).

$$CF = \frac{Cx}{Bn}$$

Keterangan: CF = menggambarkan tingkat kontaminasi; Cx = konsentrasi Pb dan Cu dalam sedimen; Bn = konsentrasi alami logam berat, yaitu 20 mg/kg untuk Pb dan 45 mg/kg untuk Cu (Ahmad, 2013).

Tabel 1. Klasifikasi status cemaran (Igeo, CF dan PLI)

Indeks geoakumulasi (Igeo)	Faktor kontaminasi (CF)	Indeks beban pencemaran (PLI)
≤ 0 (tidak tercemar)	$CF < 1$ (kontaminasi rendah)	0 (tidak tercemar)
$0 < Igeo < 1$ (tercemar ringan)	$1 < CF < 3$ (kontaminasi sedang)	$> 0-2$ (tercemar ringan)
$1 < Igeo < 2$ (tercemar sedang)	$3 < CF < 6$ (kontaminasi cukup tinggi)	$> 2-4$ (tercemar sedang)
$2 < Igeo < 3$ (tercemar cukup parah)	$CF > 6$ (kontaminasi sangat tinggi)	$> 4-6$ (tercemar parah)
$3 < Igeo < 4$ (tercemar parah)		$> 6-8$ (tercemar sangat parah)
$4 < Igeo < 5$ (tercemar sangat parah)		$> 8-10$ (tercemar ekstrem)
$Igeo \geq 5$ (tercemar ekstrem)		

Igeo digunakan untuk menentukan tingkat pencemaran dalam sedimen melalui perbandingan antara konsentrasi terukur dan nilai konsentrasi alami lingkungan (Zhang *et al.*, 2021), merujuk pada Förstner dan Müller (1981); Müller *et al.* (1997).

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{Cx}{1,5 Bn} \right)$$

Keterangan: Igeo = tingkat akumulasi pencemaran; 1,5 = faktor koreksi untuk perbedaan litologi.

PLI digunakan untuk menentukan kualitas pencemaran (Singh *et al.*, 2020), PLI merujuk pada Hakanson (1980):

$$PLI = [CF1 \times CF2 \times CF3 \dots \times CFn]^{1/n}$$

Keterangan: PLI = indeks beban pencemaran; n = jumlah logam berat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2 menyajikan data parameter lingkungan pada ekosistem mangrove di Muara Sungai Banyuasin. Secara umum, kondisi perairan pada ketiga stasiun masih kondusif untuk mempertahankan keberlangsungan ekosistem mangrove. Perbedaan nilai antarstasiun mencerminkan variasi alami yang dipengaruhi oleh posisi relatif terhadap muara sungai, keterbukaan terhadap laut, serta intensitas aktivitas antropogenik di sekitar pelabuhan. Variasi faktor lingkungan ini menjadi penting untuk diperhatikan karena berpotensi memengaruhi distribusi logam berat dalam sedimen, baik melalui mekanisme pelarutan, pengendapan, maupun interaksi dengan fraksi organik pada ekosistem mangrove. Secara umum, nilai parameter lingkungan yang terukur tetap sesuai dengan standar baku mutu air laut.

Suhu perairan tercatat berkisar antara 30,7–32,5 °C. Variasi antarstasiun kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan hidrodinamika dan intensitas cahaya matahari. Kisaran ini masih berada dalam batas toleransi ekosistem mangrove, yaitu 26–38,5°C (Vasanthkumar *et al.*, 2016; Raihan *et al.*, 2024; Vasanthi and Muthukumaravel, 2024). Hasil tersebut konsisten dengan laporan Rozirwan *et al.* (2024) di lokasi yang sama, yang melaporkan suhu perairan antara 24,35–30,3 °C. Salinitas perairan menunjukkan nilai 14–16 ppt. Perbedaan antarstasiun diduga terkait dengan posisi relatif terhadap muara dan intensitas pencampuran air tawar dari daratan dengan air laut saat pasang surut. Nilai ini termasuk kategori mesohalin yang mencerminkan karakteristik khas estuari (Rozirwan *et al.*, 2023a), dengan penelitian sebelumnya di lokasi serupa melaporkan salinitas 15-19 ppt. Oksigen terlarut terukur pada kisaran 7,07–8,30 mg/L. Nilai yang relatif tinggi ini kemungkinan dipengaruhi oleh sirkulasi air yang dinamis akibat aktivitas pelayaran di sekitar Pelabuhan Tanjung Api-api, yang meningkatkan proses aerasi. Nilai DO di atas 5 mg/L menunjukkan bahwa perairan berada dalam kondisi yang baik untuk kelangsungan hidup biota akuatik (Diniariwisman and Sumsanto, 2024), mengingat oksigen merupakan faktor pembatas utama dalam menentukan keberlangsungan organisme di perairan (Nugroho *et al.*, 2023).

Nilai pH berkisar antara 7,91–8,28, yang menunjukkan kondisi netral hingga sedikit basa. Rentang ini mencerminkan stabilitas sistem estuari, dengan vegetasi mangrove berperan penting dalam menjaga keseimbangan melalui proses fotosintesis dan dinamika karbon. Sebagai ekosistem karbon biru, mangrove menyerap CO₂ selama fotosintesis sehingga meningkatkan alkalinitas dan mendorong perairan ke arah pH yang lebih basa. Sebaliknya, pelepasan karbon anorganik terlarut dari sedimen mangrove dapat menurunkan pH, sebagaimana dilaporkan oleh Reithmaier *et al.* (2023).

Tabel 2. Parameter lingkungan ekosistem mangrove Muara Sungai Banyuasin

Parameter	Titik Stasiun (Rata-rata $\pm$ SD)			Baku mutu
	Stasiun 1	Stasiun 2	Stasiun 3	
Suhu ($^{\circ}$ C)	32,0 $\pm$ 0,2	30,7 $\pm$ 0,4	32,5 $\pm$ 0,2	Mangrove : 28–32
Salinitas (ppt)	14 $\pm$ 0	16 $\pm$ 1	16 $\pm$ 1	Mangrove : s/d 34
Oksigen terlarut (mg/L)	7,10 $\pm$ 0,10	7,07 $\pm$ 0,21	8,30 $\pm$ 0,17	>5
pH	7,91 $\pm$ 0,13	8,14 $\pm$ 0,04	8,28 $\pm$ 0,03	7–8,5

Sumber : Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004.

Kadar Logam Berat Pb dan Cu

Konsentrasi Pb dan Cu pada sedimen di ekosistem mangrove Muara Sungai Banyuasin ditunjukkan pada Gambar 2, dengan Pb cenderung memiliki nilai lebih tinggi daripada Cu di setiap stasiun pengukuran. Nilai Pb berkisar antara 20,71–21,61 mg/kg, dan Cu berada pada kisaran 10,81–10,99 mg/kg. Kedua logam berat, Pb dan Cu, tercatat masih dalam batas baku mutu lingkungan, yakni 50 mg/kg untuk Pb dan 65 mg/kg untuk Cu (ANZEC dan ARMCANZ, 2000). Hal ini menunjukkan bahwa sedimen di area penelitian tetap berada dalam kondisi yang mendukung kesehatan ekosistem mangrove serta kehidupan biota akuatik di sekitarnya. Berdasarkan penelitian sebelumnya, konsentrasi logam berat di kawasan Muara Sungai Banyuasin menunjukkan variasi yang cukup luas. Rozirwan *et al.* (2023b) melaporkan kisaran Pb 7,0104–11,8186 mg/kg dan Cu 3,7127–4,5954 mg/kg. Sementara itu, studi oleh Rozirwan *et al.* (2024) menemukan nilai yang lebih bervariasi, yaitu Pb 1,261–11,070 mg/kg dan Cu 0,193–19,300 mg/kg.

Konsentrasi Pb tertinggi terdeteksi pada Stasiun 3. Kondisi ini diduga berkaitan dengan kedekatan lokasi terhadap Pelabuhan Tanjung Api-api dan jalur pelayaran, yang berpotensi menjadi sumber utama masukan Pb melalui emisi bahan bakar maupun pembuangan limbah kapal. Zhang *et al.* (2020) melaporkan bahwa aktivitas transportasi laut, perikanan, serta buangan industri berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kadar Pb di pesisir. Kasus serupa ditemukan di Laut Bohai, di mana pelabuhan dan aliran sungai menjadi penyumbang utama kontaminasi Pb (Kang *et al.*, 2024).

Peran pelabuhan sebagai simpul perdagangan dan bongkar muat menjadikannya kawasan yang rentan terhadap tekanan lingkungan (Wang *et al.*, 2019). Aktivitas pelabuhan terbukti dapat melepaskan polutan ke dalam air dan sedimen (Lim *et al.*, 2022). Selain itu, keberadaan kapal penangkap ikan serta penggunaan air balas turut memperbesar masukan Pb di lokasi penelitian (Agustriani *et al.*, 2016; Mustafa *et al.*, 2022).

Distribusi Cu relatif homogen di ketiga stasiun dengan nilai tertinggi juga pada Stasiun 3. Persebaran ini menunjukkan bahwa masukan Cu kemungkinan berasal dari sumber yang merata, seperti limpasan pertanian, perkebunan, dan domestik di daerah aliran sungai. Cu diketahui memiliki afinitas tinggi terhadap fraksi organik dan oksida logam dalam sedimen, sehingga akumulasinya lebih stabil (Hung *et al.*, 2024). Temuan ini memperkuat fungsi ekosistem mangrove sebagai perangkap alami logam berat sekaligus indikator penting kualitas lingkungan pesisir. Masukan antropogenik dari limbah pupuk pertanian maupun domestik diperkirakan turut meningkatkan kadar Cu (Putri *et al.*, 2015; 2025). Limbah rumah tangga bahkan dilaporkan memberikan pengaruh lebih besar dibandingkan limbah industri (Abdel-Shafy and Mansour, 2018). Selain itu, pengambilan sampel pada saat surut dapat menyebabkan konsentrasi logam berat lebih tinggi karena terbatasnya proses pengenceran polutan (Rizk *et al.*, 2022).

Evaluasi Nilai CF dan Igeo dalam Sedimen Mangrove

Hasil analisis CF dan Igeo Pb dan Cu pada sedimen mangrove Muara Sungai Banyuasin diperlihatkan pada Tabel 3, dengan nilai CF Pb berada pada kisaran 1,036–1,080. Berdasarkan klasifikasi pada Tabel 2, nilai ini termasuk dalam kategori kontaminasi sedang, yang mengindikasikan bahwa sedimen di lokasi penelitian telah menerima masukan Pb dari aktivitas antropogenik, meskipun belum mencapai tingkat kontaminasi tinggi. Sebaliknya, nilai CF untuk Cu relatif rendah, yaitu 0,240–0,244 yang dikategorikan sebagai kontaminasi rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa keberadaan Cu di sedimen lebih banyak dipengaruhi oleh sumber alami atau masukan yang relatif kecil dari aktivitas manusia. Igeo memberikan gambaran yang konsisten dengan hasil CF. Nilai Igeo Pb berkisar antara –0,535 hingga –0,473, sedangkan Cu berkisar –2,643 hingga –

2,619. Menurut klasifikasi, nilai negatif menunjukkan bahwa sedimen masih tergolong tidak tercemar oleh Pb maupun Cu. Dengan demikian, meskipun analisis CF menunjukkan adanya kontaminasi sedang untuk Pb, nilai Igeo mengindikasikan bahwa konsentrasi logam tersebut masih relatif rendah dibandingkan nilai latar belakang alami (*background*), yaitu Pb 20 mg/kg dan Cu 45 mg/kg (Ahmad, 2013). Perbedaan hasil ini disebabkan oleh pendekatan metodologis yang digunakan, di mana CF lebih sensitif dalam mendeteksi kontribusi antropogenik, sementara Igeo mempertimbangkan faktor koreksi yang membandingkan konsentrasi logam dengan nilai geogenik (Hızlı *et al.*, 2023; Sanad *et al.*, 2025).

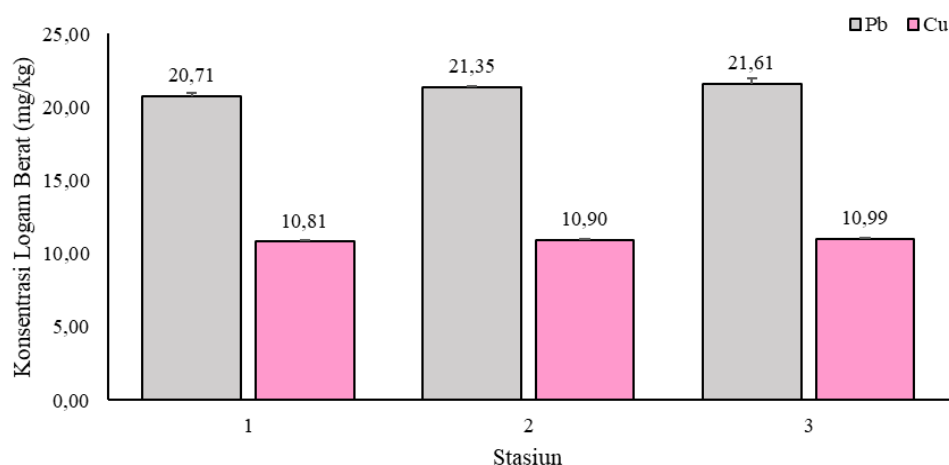
Temuan ini mengindikasikan bahwa aktivitas antropogenik di dekat Pelabuhan Tanjung Api-api dan sepanjang aliran Muara Sungai Banyuasin telah memberikan kontribusi terhadap peningkatan Pb. Namun, tingkat pencemarannya masih tergolong rendah hingga sedang. Sebaliknya, Cu menunjukkan distribusi yang stabil dan rendah. Dengan demikian, perbandingan antara kedua indeks tersebut memperlihatkan bahwa Pb lebih sensitif sebagai indikator awal pencemaran, sedangkan Cu masih berada pada kondisi aman. Berdasarkan penelitian sebelumnya di Banyuasin, baik pada ekosistem mangrove Pulau Payung maupun di Muara Sungai Musi, nilai Igeo menunjukkan kondisi sedimen tidak tercemar ($Igeo < 0$), dan nilai CF berkisar dari rendah ($CF < 1$) hingga sedang ($1 < CF < 3$) (Putri *et al.*, 2022; Khotimah *et al.*, 2024). Data dari lokasi yang sama dekat Tanjung Api-Api mendukung temuan ini, dimana nilai $Igeo < 0$ (tidak tercemar) dan $CF < 1$ (kontaminasi rendah) (Rozirwan *et al.*, 2024).

Evaluasi Nilai PLI dalam Sedimen Mangrove

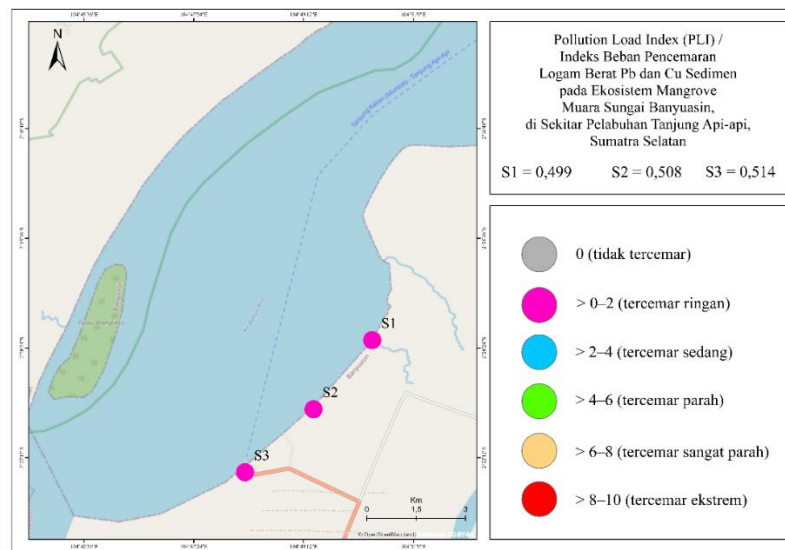
Visualisasi PLI untuk Pb dan Cu pada sedimen mangrove di Muara Sungai Banyuasin divisualisasikan pada Gambar 3. Hasil perhitungan menunjukkan nilai berkisar antara 0,499–0,514 pada ketiga stasiun. Berdasarkan klasifikasi pada Tabel 1, nilai $PLI < 1$ atau $PLI = 0-2$ mengindikasikan kondisi tercemar ringan. Dengan demikian, secara keseluruhan kualitas sedimen di lokasi penelitian masih tergolong aman, meskipun akumulasi logam berat Pb dan Cu tetap memerlukan perhatian khusus.

Tabel 3. Analisis CF dan Igeo untuk Pb dan Cu dalam sedimen

Stasiun	CF		Igeo	
	Pb	Cu	Pb	Cu
1	1,036	0,240	-0,535	-2,643
2	1,067	0,242	-0,491	-2,631
3	1,080	0,244	-0,473	-2,619
Rata-rata	1,061	0,242	-0,500	-2,631
Stdev	0,023	0,002	0,031	0,012



Gambar 2. Kadar Pb dan Cu dalam Sedimen



Gambar 3. Evaluasi PLI untuk logam berat pada Sedimen

Perbedaan nilai PLI antarstasiun relatif kecil, yang menunjukkan bahwa distribusi logam berat di sepanjang aliran muara cenderung seragam. Kenaikan PLI pada Stasiun 3 diduga terkait dengan lokasi yang berdekatan dengan pelabuhan, jalur transportasi laut, dan tingkat aktivitas manusia yang lebih tinggi dibanding stasiun lainnya.

Hasil ini konsisten dengan analisis CF dan Igeo, di mana Pb menunjukkan tingkat kontaminasi lebih tinggi dibandingkan Cu, meskipun keduanya masih berada pada kategori tercemar ringan. Nilai $PLI < 1$ menegaskan bahwa sedimen secara keseluruhan belum mencapai tingkat tercemar yang parah, meskipun nilai CF mengindikasikan adanya kontaminasi pada logam tertentu. Sehingga, variasi nilai CF dan PLI secara langsung berkaitan dengan konsentrasi logam dalam sedimen; peningkatan konsentrasi logam cenderung meningkatkan nilai indeks tersebut.

Nilai PLI logam berat pada sedimen laut di Mimika, Papua dilaporkan sangat rendah dan masih tergolong tidak tercemar ($PLI < 1$) (Tanjung *et al.*, 2019). Indeks ini penting karena memberikan gambaran tentang kualitas lingkungan, tren perubahannya, serta menjadi dasar bagi pemerintah dalam merumuskan strategi pengelolaan pencemaran. Sebaliknya, penelitian di Selat Madura menunjukkan nilai PLI sebesar 11,5, yang menandakan kondisi perairan telah tercemar berat, terutama di bagian barat yang memiliki beban kontaminasi jauh lebih tinggi akibat peningkatan kadar Cu (Afifudin *et al.*, 2025). Perbedaan antara kedua lokasi ini menegaskan bahwa tingkat pencemaran sangat dipengaruhi oleh intensitas aktivitas antropogenik di sekitarnya. Oleh karena itu, pengendalian masukan pencemar ke perairan perlu menjadi prioritas, terutama pada wilayah dengan tekanan aktivitas manusia yang tinggi, guna mencegah akumulasi logam berat yang lebih serius di masa mendatang.

KESIMPULAN

Analisis menunjukkan bahwa kualitas sedimen di Muara Sungai Banyuasin tetap tergolong baik dan aman bagi biota akuatik. Konsentrasi logam berat Pb dan Cu relatif rendah, dengan Faktor Kontaminasi (CF) menunjukkan kontaminasi sedang untuk Pb ($1 < CF < 3$) dan kontaminasi rendah untuk Cu ($CF < 1$). Nilai $I_{geo} \leq 0$ serta $PLI > 0-2$, yang mengindikasikan kondisi tidak tercemar. Secara keseluruhan, ekosistem mangrove di lokasi penelitian masih berfungsi sebagai penyaring alami logam berat, namun adanya peningkatan aktivitas antropogenik, terutama di sekitar Pelabuhan Tanjung Api-api, berpotensi meningkatkan akumulasi logam berat dalam jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini memperoleh dukungan dana dari Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, melalui Program Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Tahun 2025, No. 109/C3/DT.05.00/PL/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. 2018. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4): 1275-1290. <https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2018.07.003>
- Afifudin, A. F. M., Pramesti, H. N., Irawanto, R., Sari, A., Soegianto, A., Affandi, M., & Payus, C. M. 2025. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in western Madura strait sediments. *Results in Engineering*, 26: 105157. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105157>
- Aguilera-Velázquez, J. R., Calleja, A., Moreno, I., Bautista, J., & Alonso, E. 2023. Metal profiles and health risk assessment of the most consumed rice varieties in Spain. *Journal of Food Composition and Analysis*, 117: 105101. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2022.105101>
- Agustriani, F., Purwiyanto, A. I. S., & Suteja, Y. 2017. Penilaian pengkayaan logam Timbal (Pb) dan tingkat kontaminasi air ballast di perairan Tanjung Api-API, Sumatera Selatan. Prosiding Seminar Nasional Hasil-hasil Penelitian Perikanan dan Kelautan ke-VI. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan UNDIP, 14 Juli 2017. pp. 218-224.
- Ahmad, F. 2013. Distribution and Prediction on Heavy Metals Pollution Level (Pb, Cd, Cu, Zn, and Ni) in Sediment in Bangka Island Waters Using Load Pollution Index and Geoaccumulation Index. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 5(1): 170–181. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v5i1.7763>
- Antoniadis, V., Golia, E. E., Liu, Y.T., Wang, S.L., Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. 2019. Soil and maize contamination by trace elements and associated health risk assessment in the industrial area of Volos, Greece. *Environment International*, 124: 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.053>
- ANZEC, & ARMCANZ. 2000. *Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality. National Water Quality Management Strategy*
- Azhar, R., Husna, A., Ramadani, C. P. R., Irfannur, I., Nugrahawati, A., Izwar, A., & Akmal, Y. 2024. Mangrove areas, heavy metal (Pb) content in seawater and sediments in the Coastal Area of the Bireuen Fisheries Port. *Arwana: Jurnal Ilmiah Program Studi Perairan*, 6(2): 190-196. <https://doi.org/10.51179/jipsbp.v6i2.2885>
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. 2024. *Estuarine and Coastal Ecosystems and Their Services*. Treatise on Estuarine and Coastal Science (Second Edition). pp. 14 - 34. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90798-9.00104-9>
- Berde, C. V., Giriyan, A., Berde, V. B., & Bramhachari, P. V. 2022. *Mangrove Microbiomes: Biodiversity, Ecological Significance, and Potential Role in the Amelioration of Metal Stress BT*. Understanding the Microbiome Interactions in Agriculture and the Environment. pp. 45–62. Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3696-8_4
- Bhuyan, M. S., Haider, S. M., Meraj, G., Bakar, M. A., Islam, M. T., Kunda, M., Siddique, M. A., Ali, M. M., Mustary, S., Mojumder, I. A., & Bhat, M. A. 2023. Assessment of Heavy Metal Contamination in Beach Sediments of Eastern St. Martin's Island, Bangladesh: Implications for Environmental and Human Health Risks. *Water*, 15(13): 2494. <https://doi.org/10.3390/w15132494>
- Chakraborty, S., Gasparatos, A., & Blasiak, R. 2020. Multiple values for the management and sustainable use of coastal and marine ecosystem services. *Ecosystem Services*, 41: 101047. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101047>
- Choudhary, B., Dhar, V., & Pawase, A. S. 2024. Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: Its mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives. *Journal of Sea Research*, 199: 102504. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102504>
- Diansyah, G., Hermansyah, Rohendi, D., & Ulqodry, T. Z. 2025. Risk assessment of heavy metal pollution in water, sediment, and fish from the Musi River Estuary, Indonesia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(9): 1051. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14501-9>
- Diniariwisan, D., & Sumsanto, M. 2024. Analisis Kualitas Air Guna Mendukung Pengembangan Budidaya Ikan Berbasis Keramba Jaring Apung (KJA) di Perairan Pantai Elak-elak Sekotong. *Jurnal Perikanan Pantura (JPP)*, 7(2): 517-523. <https://doi.org/10.30587/jpp.v7i2.8412>
- 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(5): 417-432. <https://doi.org/10.1007/BF02484715>
- Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water*

- Research*, 14(8): 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Han, J. L., Pan, X. D., Chen, Q., & Huang, B. F. 2021. Health risk assessment of heavy metals in marine fish to the population in Zhejiang, China. *Scientific Reports*, 11(1): 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90665-x>
- Hızlı, S., Karaoğlu, A. G., Gören, A. Y., & Kobya, M. 2023. Identifying Geogenic and Anthropogenic Aluminum Pollution on Different Spatial Distributions and Removal of Natural Waters and Soil in Çanakkale, Turkey. *ACS Omega*, 8(9): 8557-8568. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07707>
- Hossain, M. B., Aftad, M. Y., Yu, J., Choudhury, T. R., Noman, M. A., Hossain, M. S., Paray, B. A., & Arai, T. 2022. Contamination and Ecological Risk Assessment of Metal(loid)s in Sediments of Two Major Seaports along Bay of Bengal Coast. *Sustainability*, 14(19): 12733. <https://doi.org/10.3390/su141912733>
- Huang, H., Li, Y., Zheng, X., Wang, Z., Wang, Z., & Cheng, X. 2022. Nutritional value and bioaccumulation of heavy metals in nine commercial fish species from Dachen Fishing Ground, East China Sea. *Scientific Reports*, 12(1): 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10975-6>
- Hung, M. Y., Huang, W. H., Tsai, H. C., Hsieh, C. Y., & Chen, T. C. 2024. Copper Distribution and Binding Affinity to Size-Fractioned Dissolved and Particulate Organic Matter in River Sediment. *Environments*, 11(6):129. <https://doi.org/10.3390/environments11060129>
- Irshad, M. A., Nawaz, R., Wojciechowska, E., Mohsin, M., Nawrot, N., Nasim, I., & Hussain, F. 2023. Application of Nanomaterials for Cadmium Adsorption for Sustainable Treatment of Wastewater: a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 234(1): 1-17. <https://doi.org/10.1007/S11270-023-06064-7>
- Islam, M. M., Akther, S. M., Hossain, M. F., & Parveen, Z. 2022. Spatial distribution and ecological risk assessment of potentially toxic metals in the Sundarbans mangrove soils of Bangladesh. *Scientific Reports*, 12(1): 10422. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13609-z>
- Kang, R., Zhou, S., Chen, T., Yin, H., Si, L., Deng, C., & Kaufmann, H. 2024. Extent and Sources of Heavy Metal Pollution from Discharging Rivers in the Bohai Region, China. *Water*, 16(7): 982. <https://doi.org/10.3390/w16070982>
- Karangiya, R. K., Dangar, K. B., Gadhvi, K. J., & Vyas, S. J. 2024. Assessment of heavy metals retention in sediments and mangroves along the Saurashtra coast, Gujarat. *Plant Science Today*, 11(2):38–43. <https://doi.org/10.14719/pst.2581>
- Khotimah, N. N., Rozirwan, R., Putri, W. A. E., Fauziyah, F., Aryawati, R., Isnaini, I., & Nugroho, R. Y. 2024. Bioaccumulation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination (Lead and Copper) Build Up in the Roots of *Avicennia alba* and *Excoecaria agallocha*. *Journal of Ecological Engineering*, 25(5): 101–113. <https://doi.org/10.12911/22998993/185716>
- Kolarova, N., & Napiórkowski, P. 2021. Trace elements in aquatic environment. Origin, distribution, assessment and toxicity effect for the aquatic biota. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(4): 655–668. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.02.002>
- Kowalik, R., Latosińska, J., & Gawdzik, J. 2021. Risk Analysis of Heavy Metal Accumulation from Sewage Sludge of Selected Wastewater Treatment Plants in Poland. *Water*, 13(15): 2070. <https://doi.org/10.3390/W13152070>
- Lakshmi, A. 2021. Coastal ecosystem services & human wellbeing. *The Indian Journal of Medical Research*, 153(3): 382–387. https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR_695_21
- Lim, Y. C., Chen, C. F., Tsai, M. L., Wu, C. H., Lin, Y. L., Wang, M. H., Albarico, F. P. J. B., Chen, C. W., & Dong, C. Di. 2022. Impacts of Fishing Vessels on the Heavy Metal Contamination in Sediments: A Case Study of Qianzhen Fishing Port in Southern Taiwan. *Water*, 14(7): 1174. <https://doi.org/10.3390/W14071174>
- Müller, M., Kruse, L., Tabrett, A. M., & Barbara, D. J. 1997. Detection of a single base exchange in PCR-amplified DNA fragments using agarose gel electrophoresis containing bisbenzimidide-PEG. *Nucleic Acids Research*, 25(24): 5125-5126. <https://doi.org/10.1093/nar/25.24.5125>
- Mulyadi, A. 2024. Adaptation of climate change and environmental pollution in Cirebon's coastal community. E3S Web of Conferences, 600. p. 05005. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202460005005>
- Mustafa, A., Paena, M., Athirah, A., Ratnawati, E., Asaf, R., Suwoyo, H. S., Sahabuddin, S., Hendrajat, E. A., Kamaruddin, K., Septiningsih, E., Sahrijanna, A., Marzuki, I., & Nisaa, K. 2022. Temporal and Spatial Analysis of Coastal Water Quality to Support Application of Whiteleg Shrimp *Litopenaeus vannamei* Intensive Pond Technology. *Sustainability*, 14(5): 2659. <https://doi.org/10.3390/SU14052659>

- Nugroho, R. Y., Diansyah, G., Putri, W. A. E., & Agussalim, A. 2023. Phytochemical composition, total phenolic content and antioxidant activity of *Anadara granosa* (Linnaeus, 1758) collected from the east coast of South Sumatra, Indonesia. *Baghdad Science Journal*, 20(4): 6. <https://doi.org/10.21123/bsj.2023.6941>
- Okereafor, U., Makhatha, M., Mekuto, L., Uche-Okereafor, N., Sebola, T., & Mavumengwana, V. 2020. Toxic Metal Implications on Agricultural Soils, Plants, Animals, Aquatic life and Human Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7): 2204. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072204>
- Putri, W. A. E., Agustriani, F., Harahap, D. N. S., Sunaryo, A. I. P., & Meiyerani, J. 2025a. Pb and Cu in by Catch of Stationary Lift Net Fisheries in Banyuasin Waters, South Sumatra. *Journal of Tropical Marine Science*, 8(1): 25-32
- Putri, W. A. E., Bengen, D. G., Prartono, T., & Riani, D. E. 2015. Konsentrasi Logam Berat (Cu dan Pb) di Sungai Musi Bagian Hilir Concentration Heavy Metals (Cu and Pb) in Musi River Estuary. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 7(2): 453-463
- Putri, W. A. E., Meiyerani, J., Ulqodry, T. Z., Aryawati, R., Purwiyanto, A., Rozirwan, R., & Suteja, Y. (2025b). Ecological risk assessment through heavy metal concentrations of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel in marine sediments of Maspari Island, South Sumatra Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 26(2): 297-310. <https://doi.org/10.12911/22998993/197413>
- Putri, W. A. E., Susanti, M. I., Rozirwan, R., Hendri, M., & Agustriani, F. 2022. Status Cemaran Logam Berat di Sedimen Muara Sungai Musi Sumatera Selatan. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(2): 177-184.
- Raihan, A., Ali, T., & Mortula, M. 2024. Unveiling coastal ecosystem dependencies: multifactorial analysis of climate change influencing mangrove system in the United Arab Emirates over the period 1990–2020. *Discover Sustainability*, 5(1): 498. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00620-9>
- Rangel-Buitrago, N., Galgani, F., & Neal, W. J. 2024. Addressing the global challenge of coastal sewage pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 201: 116232. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116232>
- Reithmaier, G. M. S., Cabral, A., Akhand, A., Bogard, M. J., Borges, A. V, Bouillon, S., Burdige, D. J., Call, M., Chen, N., Chen, X., Cotovicz, L. C., Eagle, M. J., Kristensen, E., Kroeger, K. D., Lu, Z., Maher, D. T., Pérez-Lloréns, J. L., Ray, R., Taillardat, P., & Santos, I. R. 2023. Carbonate chemistry and carbon sequestration driven by inorganic carbon outwelling from mangroves and saltmarshes. *Nature Communications*, 14(1): 8196. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44037-w>
- Rincon-Vasquez, I. V., Fohrer, N., & Rosado, D. 2025. Assessing sediment toxicity risks with bioavailable metal fractions: new factors and index applied to the Colombian tropical Andes hotspot. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(6): 222. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02536-3>
- Rizk, R., Juzsakova, T., Ben Ali, M., Rawash, M. A., Domokos, E., Hedfi, A., Almalki, M., Boufahja, F., Shafik, H. M., & Rédey, Á. 2022. Comprehensive environmental assessment of heavy metal contamination of surface water, sediments and Nile Tilapia in Lake Nasser, Egypt. *Journal of King Saud University Science*, 34(1):101748. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUS.2021.101748>
- Robin, S. L., Marchand, C., Mathian, M., Baudin, F., & Alfaro, A. C. 2022. Distribution and bioaccumulation of trace metals in urban semi-arid mangrove ecosystems. *Frontiers in Environmental Science*, 10: 1054554. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1054554>
- Rozirwan, Az-Zahrah, S. A. F., Khotimah, N. N., Nugroho, R. Y., Putri, W. A. E., Fauziyah, Melki, Agustriani, F., & Siregar, Y. I. 2024. Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Water, Sediment, and Polychaeta (*Neoleanira Tetragona*) from Coastal Areas Affected by Aquaculture, Urban Rivers, and Ports in South Sumatra. *Journal of Ecological Engineering*, 25(1): 303-319. <https://doi.org/10.12911/22998993/175365>
- Rozirwan, Khotimah, N. N., Putri, W. A. E., Fauziyah, Aryawati, R., Diansyah, G., & Nugroho, R. Y. 2025. Biomarkers of heavy metals pollution in mangrove ecosystems: Comparative assessment in industrial impact and conservation zones. *Toxicology Reports*, 14: 102011. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.102011>
- Rozirwan, R., Hananda, H., Nugroho, R. Y., Apri, R., Khotimah, N. N., Fauziyah, F., Putri, W. A. E., & Aryawati, R. 2023a. Antioxidant Activity, Total Phenolic, Phytochemical Content, and HPLC Profile of Selected Mangrove Species from Tanjung Api-Api Port Area, South Sumatra, Indonesia. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 7(7): 3482–3489. <https://doi.org/10.26538/tjnpr/v7i7.29>

- Rozirwan, Saputri, A. P., Nugroho, R. Y., Khotimah, N. N., Putri, W. A. E., Fauziyah, & Purwiyanto, A. I. S. 2023b. An Assessment of Pb and Cu in Waters, Sediments, and Mud Crabs (*Scylla serrata*) from Mangrove Ecosystem Near Tanjung Api-API Port Area, South Sumatra, Indonesia. *Science and Technology Indonesia*, 8(4): 675–683. <https://doi.org/10.26554/sti.2023.8.4.675-683>
- Sanad, H., Moussadek, R., Mouhir, L., Lhaj, M. O., Zahidi, K., Dakak, H., Manhou, K., & Zouahri, A. 2025. Ecological and Human Health Hazards Evaluation of Toxic Metal Contamination in Agricultural Lands Using Multi-Index and Geostatistical Techniques across the Mnasra Area of Morocco's Gharb Plain Region. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 18: 100724. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100724>
- Singh, G. G., Cottrell, R. S., Eddy, T. D., & Cisneros-Montemayor, A. M. 2021. Governing the Land-Sea Interface to Achieve Sustainable Coastal Development. *Frontiers in Marine Science*, 8: 709947. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.709947>
- Singh, J. K., Kumar, P., & Kumar, R. 2020. Ecological risk assessment of heavy metal contamination in mangrove forest sediment of Gulf of Khambhat region, West Coast of India. *SN Applied Sciences*, 2: 2027. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03890-w>
- SNI [Standar Nasional Indonesia]. 2004a. SNI 06-6992.3-2004: Sedimen – Bagian 3: Cara Uji Timbal (Pb) dengan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)
- SNI [Standar Nasional Indonesia]. 2004b. SNI 06-6992.5-2004: Sedimen – Bagian 5: Cara Uji Tembaga (Cu) dengan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)
- Tanjung, R. H. R., Hamuna, B., & Yonas, M. N. 2019. Assessing heavy metal contamination in marine sediments around the coastal waters of mimika regency, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering*, 20(11): 35-42. <https://doi.org/10.12911/22998993/113411>
- Vasanth kumar, B., Roopa, S. V., & Gangadhar, K. 2016. Hydrological and Nutrient Status of Mangrove Ecosystem of Kali Estuary, Karwar, Karnataka, West Coast of India. *Proceedings of the Zoological Society*, 69(1): 125-132. <https://doi.org/10.1007/s12595-014-0128-1>
- Vasanthi, N., & Muthukumaravel, K. 2024. Fish Fauna Diversity in Relation to Environmental Parameters in Muthukuda Mangroves Southeast Coast of Tamil Nadu, India. *Uttar Pradesh Journal of Zoology*, 45(16): 88 - 101. <https://doi.org/10.56557/upjz/2024/v45i164290>
- Wang, C., Chen, J., Li, Z., Nasr, E. S. A., & El-Tamimi, A. M. 2019. An indicator system for evaluating the development of land-sea coordination systems: A case study of Lianyungang port. *Ecological Indicators*, 98: 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.057>
- Yang, G., Song, Z., Sun, X., Chen, C., Ke, S., & Zhang, J. 2020. Heavy metals of sediment cores in Dachan Bay and their responses to human activities. *Marine Pollution Bulletin*, 150: 110764. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110764>
- Yin, J., Wang, L., Liu, Q., Li, S., Li, J., & Zhang, X. (2020). Metal concentrations in fish from nine lakes of Anhui Province and the health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(16): 20117 - 20124. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-08368-1>
- Zeng, H., Xu, X., Ding, M., Zhang, H., Jiang, Y., Wang, P., & Huang, G. 2024. Differential response of heavy metal accumulation in freshwater aquatic organisms to organic matter pathway ($\delta^{13}\text{C}$) and trophic level ($\delta^{15}\text{N}$). *Environmental Pollution*, 362: 124981. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124981>
- Zhang, D., Pei, S., Duan, G., Feng, X., Zhang, Y., & Wu, J. 2020. The pollution level, spatial and temporal distribution trend and risk assessment of heavy metals in Bohai Sea of China. *Journal of Coastal Research*, 115(SI): 354-360. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20-00097.1>
- Zhang, Q., Ren, F., Xiong, X., Gao, H., Wang, Y., Sun, W., Leng, P., Li, Z., & Bai, Y. 2021. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metal pollution of sediments in coastal reclamation areas: a case study in Shenzhen Bay, China. *Environmental Sciences Europe*, 33(1): 90. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00532-9>
- Zhou, X., Wang, Y.-P., & Song, Z. 2022. Heavy Metal Contamination and Ecological Risk Assessments in Urban Mangrove Sediments in Zhanjiang Bay, South China. *ACS Omega*, 7(24): 21306-21316. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02516>