Distribusi Spasial Akumulasi Timbal dan Kadmium pada Sedimen Tambak Pesisir Pasuruan: Studi Kasus Mikrolokasi

Chepy Dwi Kurniawan[1]
[1]Program Studi Magister Pengelolaan Sumberdaya Lingkungan dan Pembangunan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Brawijaya, Indonesia
Email korespondensi: chepydwi@student.ub.ac.id

Abstrak

Keberlanjutan budidaya bandeng di Pesisir Kota Pasuruan terancam oleh pencemaran logam berat Timbal dan Kadmium pada sedimen tambak akibat limbah antropogenik. Penelitian ini menganalisis pola distribusi spasial kedua logam berat tersebut untuk merumuskan strategi mitigasi risiko ekologis pesisir. Penentuan stasiun pengamatan menggunakan metode *purposive* sampling di area *inlet*, tengah, dan *outlet*. Sampel diuji dengan instrumen ICP-OES di Laboratorium Riset Terpadu Universitas Brawijaya (presisi *recovery* 80–120%). Hasil analisis menunjukkan akumulasi tertinggi kedua logam berada di lokasi *inlet* (Pb: 183,00 mg/kg; Cd: 42,13 mg/kg), disusul oleh area outlet, dan konsentrasi terendah di bagian tengah tambak. Seluruh titik pengamatan mencatatkan konsentrasi Pb (155,67–183,00 mg/kg) dan Cd (35,60–42,13 mg/kg) yang telah melampaui ambang batas *Probable Effect Levels* NOAA SQuiRTs, menandakan kondisi risiko ekologis yang kritis. Uji statistik One-Way ANOVA mengonfirmasi bahwa posisi spasial berpengaruh signifikan terhadap kadar Cd ($p < 0,05$), namun tidak berbanding lurus secara signifikan pada kadar Pb ($p > 0,05$). Riset ini menyimpulkan pentingnya tindakan intervensi seperti instalasi kolam pengendap, perlakuan zeolit/pengapuran, serta revitalisasi vegetasi mangrove sebagai biofilter alami untuk menjaga keamanan hayati dan mendukung pencapaian kelestarian lingkungan pesisir (SDGs).

Kata kunci: *Biosecurity* Pesisir; Distribusi Spasial; ICP-OES; Logam Berat; Sedimen Tambak

I. PENDAHULUAN

Sektor budidaya perikanan menjadi salah satu pilar dalam menopang ekonomi nasional (Darajati, 2023). Hal ini juga berdampak pada ketahanan pangan dan kesejahteraan masyarakat terutama di wilayah pesisir (Aini et al., 2026). Di Jawa Timur sendiri, pesisir Kota Pasuruan menjadi salah satu wilayah yang menopang sektor ini dengan komoditas unggulan ikan bandeng. Ikan bandeng sendiri memiliki peran terhadap pemenuhan protein hingga keberlanjutan lahan budidaya (Yusuf et al., 2023). Potensi besar ini menjadikan kawasan pesisir Kota Pasuruan sebagai fokus kebijakan pemerintah yang memerlukan respon aktif serta kolaborasi antara akademisi dan pemerintah daerah

Aktivitas antropogenik di sekitar hulu sungai Pasuruan seperti industri, pelayaran, urbanisasi, dan pertanian menjadi sumber utama masuknya limbah cair ke ekosistem pesisir. Polutan yang masuk akan memperkeruh lingkungan di wilayah perbatasan darat laut (Sri & Hasyim, 2022). Salah satu polutan yang diwaspadai adalah logam berat non-esensial Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) (Angraini et al., 2022; Hindarwati et al., 2023). Logam ini bersifat toksisitas dan karsinogenik bagi manusia lewat rantai makanan (Suryani et al., 2024). Secara biologis, kedua logam ini tidak memiliki fungsi pada jaringan tubuh. Jika terkonsumsi, Pb dapat merusak sistem pembentukan sela darah merah (Mandal, 2022). Sementara Cd, dapat menyebabkan kerusakan fungsi ginjal, testis, jantung, hati, dan otak (Charkiewicz et al., 2023).

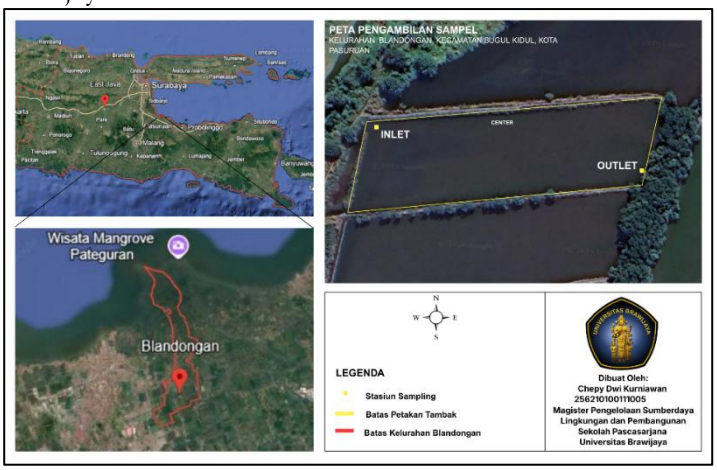
Sedimen menjadi salah satu faktor dalam menentukan tingkat pencemaran dan distribusi logam berat (Nielsen et al., 2024). Hal ini disebabkan karena sedimen berfungsi sebagai tempat pengendapan utama (*sink*) bagi sebagian besar polutan hidrofobik dan material antropogenik yang masuk ke kolom air. Karena sifat akumulatifnya, konsentrasi logam berat di dalam sedimen sering kali berkali-kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan

konsentrasinya di kolom air permukaan. Meskipun dalam air logam berat bersifat dinamis dan mudah berpindah arus, senyawa ini akan mengendap dalam sedimen (Chen et al., 2024). Logam berat akan berikatan dengan partikel sedimen dan mengendap secara jangka panjang. Kekuatan dalam menyerap polutan ini berbanding dengan tekstur dasar perairan. Yang mana semakin halus sedimen maka akan semakin kuat daya ikat absorsinya (Herath et al., 2023). Polutan yang terakumulasi pada sedimen bisa terlepas kembai ke badan air melalui proses resuspensi (Somma et al., 2026). Sehingga polutan ini juga dapat terakumulasi pada jaringan tubuh ikan bandeng. Melalui pemantauan kualitas air dan sedimen, tingkat ancaman ini sebenarnya dapat dievaluasi, meskipun penerapannya di lapangan masih terbentur oleh ketiadaan standar baku mutu sedimen nasional di Indonesia.

Distribusi logam berat di pada area budidaya memberikan gambaran yang tidak seragam. Area pintu mauk air mengambarkan karakter polutan yang masuk dari sumber luar melalui air baku (Mramba & Kahindi, 2023). Pada area tengah menggambarkan dinamika pengendapan internal selama proses budidaya berlangsung. Sedangkan area pintu keluar air menjadi titik akhir akumulasi bagi material sedimen. Pemetaan titik sampling ini sangat penting untuk mengambarkan jalur masuk serta titik jenuh kontaminan di ekosistem tambak. Oleh karena itu, penelitian mengenai distribusi spasial logam Pb dan Cd pada sedimen tambak ini penting dilakukan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan basis data esensial dalam perumusan strategi mitigasi risiko lingkungan sekaligus memperkuat tata kelola keamanan pangan (*food biosecurity*) di kawasan pesisir Pasuruan.

II. METODE

Penelitian ini berlangsung pada Desember 2025 di kawasan pesisir Pasuruan, Jawa Timur (koordinat: 7°37'29.50"S 112°56'50.43"E). Secara spasial, lokasi sampling ditentukan berdasarkan arah aliran hidrodinamika tambak dengan pendekatan *purposive sampling*. Stasiun 1 (IN) diposisikan dekat pintu masuk air baku untuk memantau pengaruh eksternal, Stasiun 2 (CT) berada di pusat petakan tambak untuk melihat deposisi internal, dan Stasiun 3 (OT) diletakkan di dekat pintu pembuangan air sebagai titik akhir. Seluruh rangkaian pengujian laboratorium untuk parameter logam berat diselesaikan di Laboratorium Riset Terpadu (LRT) Universitas Brawijaya.



Gambar 1. Peta lokasi pengambilan sampel sedimen pada petakan tambak di Kelurahan Blandongan, Kota Pasuruan.

Sampel sedimen permukaan diambil dengan pipa PVC steril pada kedalaman 0–10 cm dari dasar tambak. Prosedur pengambilan sampel ini dilakukan sebanyak tiga kali ulangan (replikasi) pada masing-masing stasiun pengamatan guna menjamin keterwakilan data. Setelah diekstraksi, sampel dimasukkan ke dalam plastik polietilen dan diberi label sesuai titik

sampling. Untuk menjaga kondisi selama menuju laboratorium sampel disimpan dalam *cool box*.

Pengujian logam berat dimulai dengan pengeringan sampel dengan oven pada suhu 60°C–105°C hingga mencapai berat konstan. Sampel kemudian didestruksi menggunakan *Microwave Digestion System* mengacu standar EPA 3051A (*half-scale*). Preparasi dilakukan dengan 500 mg sampel dilarutkan bersama 10 mL HNO_3 65% di dalam *vessel*. Filtrat hasil destruksi kemudian ditambahkan dengan *ultrapure water* hingga volume 50 mL dalam tabung Falcon. Sebanyak 15 mL filtrat disaring dengan *syringe filter* hidrofilik PTFE 0,22 µm untuk menghindari sumbatan partikulat pada instrumen ICP-OES. Tingkat akurasi dan presisi dari seluruh rangkaian prosedur pengujian ini dikontrol melalui parameter nilai *recovery* dengan standar pemantauan berada pada rentang 80–120%.

Data konsentrasi logam berat Pb dan Cd yang diperoleh disajikan dalam bentuk rata-rata (*mean*) ± standar deviasi (*standard deviation*/SD). Untuk mengetahui pengaruh posisi spasial stasiun sampling (IN, CT, OT) terhadap variasi konsentrasi logam berat pada sedimen dasar tambak, dilakukan analisis statistik inferensial menggunakan uji *One-Way Analysis of Variance* (ANOVA) pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Sebelum uji ANOVA dilakukan, uji prasyarat berupa uji kehomogenan varians (*Test of Homogeneity of Variances*) menggunakan metode *Levene's Test* telah terpenuhi. Jika hasil uji ANOVA menunjukkan pengaruh yang signifikan ($p < 0,05$), analisis dilanjutkan dengan uji lanjut *Post-Hoc Tukey's Honestly Significant Difference* (HSD) untuk menentukan perbedaan spesifik antar stasiun sampling. Seluruh analisis statistik diselesaikan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 25.0.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil

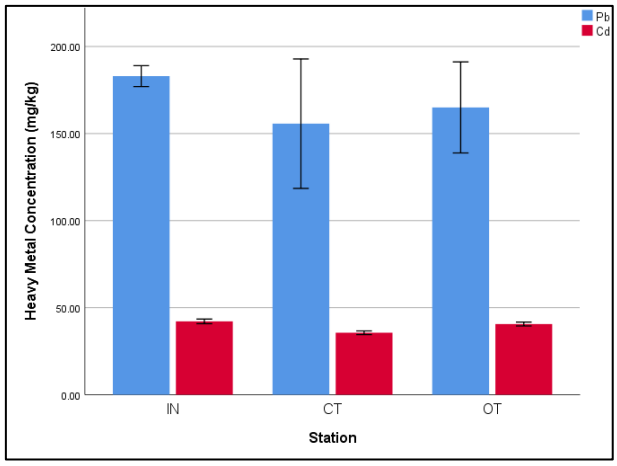
Hasil analisis menunjukkan konsentrasi logam berat Pb dan Cd pada sedimen dasar tambak memiliki pola distribusi spasial yang bervariasi. Kadar konsentrasi detail per titik pengamatan disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 2.

Tabel 1. Kadar Pb dan Cd (mg/kg) Per Titik Pengamatan dan Nilai Baku Mutu Lingkungan

Titik	Pb	Cd
IN	183.00 ± 3.00 [a]	42.13 ± 0.67 [a]
CT	155.67 ± 18.58 [a]	35.60 ± 0.53 [b]
OT	165.00 ± 13.07 [a]	40.60 ± 0.56 [c]
Total	167.89 ± 16.62	39.44 ± 3.00
TEL	30.24	0.68
PEL	112.0	4.21

Sumber: NOAA SQuiRTs (Buchman, 2008).

Keterangan: TEL (*Threshold Effect Level*), PEL (*Probable Effect Levels*). Huruf superskrip yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang signifikan berdasarkan uji lanjut *Tukey HSD* pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$).



Gambar 2. Distribusi Konsentrasi Logam Berat Pb dan Cd Berdasarkan Titik Pengamatan.

Konsentrasi Pb berkisar rentan 155.67 ± 18.58 mg/kg hingga 183.00 ± 3.00 mg/kg. Nilai tertinggi ditemukan pada area IN (titik 1) sebesar 183,00 ± 3,00 mg/kg dan OT (titik 3) sebesar 165,00 ± 13,07 mg/kg, sedangkan konsentrasi terendah pada area CT (titik 2) sebesar 155,67 ± 18,58 mg/kg. Hasil uji *One-Way ANOVA*, menunjukkan tidak pengaruh nyata yang signifikan terhadap variasi kadar Pb di sedimen ($F = 3{,}307$; $p = 0{,}108 > 0{,}05$). Uji lanjut Tukey HSD pada *Homogeneous Subsets* mengonfirmasi bahwa nilai rata-rata Pb masih berada dalam subset yang sama.

Logam Cd menunjukkan kisaran nilai antara 35,60 ± 0,53 mg/kg hingga 42,13 ± 0,67 mg/kg. Konsentrasi tertinggi tercatat pada area IN (42,13 ± 0,67 mg/kg) , diikuti OT (40,60 ± 0,56 mg/kg), dan CT (35,60 ± 0,53 mg/kg). Uji One-Way ANOVA menunjukkan adanya pengaruh posisi spasial yang sangat signifikan terhadap sebaran Cd ($F = 101{,}665$; $p = 0{,}000 < 0{,}05$). Uji lanjut Tukey HSD memperlihatkan bahwa ketiga stasiun pengamatan berbeda nyata satu sama lain ($p < 0{,}05$).

B. Diskusi

B.1 Dinamika Spasial dan Pengaruh Hidrodinamika Tambak

Tingginya konsentrasi Pb dan Cd pada area IN berkaitan erat dengan fungsi stasiun tersebut sebagai pintu masuk air baku tambak yang terkontaminasi limbah antropogenik dari aktivitas domestik maupun industri di pesisir Kota Pasuruan(Zhang et al., 2020). Sedimen di area IN bertindak sebagai perangkap partikel tersuspensi yang mengikat logam berat sebelum menyebar (Chilton et al., 2021).

Pada logam Pb, tidak adanya perbedaan signifikan antar stasiun mengindikasikan akumulasi yang terdistribusi merata di sepanjang zona hidrodinamika tambak (Sawant et al., 2019). Penurunan konsentrasi di area CT diduga disebabkan oleh proses pengenceran (*dilution*). Sifat Pb yang sangat persisten dan mudah terikat kuat pada fraksi sedimen menyebabkan partikel Pb yang masuk ke kolom perairan akan cepat mengalami proses adsorpsi oleh materi tersuspensi dan mengendap ke dasar tambak, membentuk depot polutan yang stabil (Al-hashem et al., 2022). Akibatnya, fluktuasi aliran air antara *inlet* dan *outlet* tidak secara signifikan mengubah konsentrasi Pb di lapisan dasar, sehingga memaparkan tingkat risiko yang sama bagi seluruh biota di setiap stasiun pengamatan.

Tingginya konsentrasi Cd pada area IN juga berkaitan dengan pintu masuk sebagai jalur utama masuknya polutan. Namun, penurunan pada area CT dan peningkatan area OT mengkonfirmasi adanya dinamika transpor yang dinamis. Di mana sebagian besar ion Cd akan bebas mengendap dengan cepat saat menyentuh IN. Kenaikan di area OT terjadi karena akumulasi berkala dari massa sedimen yang terseret arus internal serta dipengaruhi oleh

pasang surut air laut yang membawa kembali polutan ke pintu keluar air (T. Liu et al., 2023b). Interaksi hidrodinamika ini memicu terjadinya arus balik (*reverse flow*) yang menahan polutan agar tidak terbuang bebas ke laut lepas, melainkan terperangkap dan mengendap kembali di sekitar area pintu pengeluaran. Akibatnya, stasiun yang secara teoritis berfungsi sebagai tempat pembuangan justru memiliki beban akumulasi logam berat yang setara dengan stasiun lainnya.

B.2 Evaluasi Tingkat Risiko Ekologis Berdasarkan Baku Mutu NOAA

Untuk mengevaluasi tingkat risiko ekologis, hasil analisis dibandingkan dengan standar baku mutu sedimen *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) melalui pendekatan *Screening Quick Reference Tables* (SQuiRTs) (Buchman, 2008). Nilai ambang batas yang digunakan meliputi *Threshold Effect Level* (TEL) (Pb: 30,24 mg/kg; Cd: 0,68 mg/kg) & *Probable Effect Levels* (PEL) (Pb: 112,0 mg/kg; Cd: 4,21 mg/kg). Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi Pb dan Cd telah melampaui batas PEL pada seluruh titik. Hal ini mengindikasikan bahwa efek biologis yang merugikan pada biota akan sangat sering terjadi berdasarkan kriteria NOAA.

Kondisi ini memicu konsekuensi risiko lingkungan yang bersifat kronis pada lahan pesisir Kota Pasuruan. Logam Pb umumnya bermuara dari sisa pembakaran bahan bakar transportasi laut dan cat perahu nelayan, sementara Cd dapat bersumber dari limpasan pupuk fosfat dari lahan pertanian atas serta limbah cair industri tekstil atau elektroplating. Karakteristik perairan pesisir yang semi-tertutup menyebabkan logam-logam ini terjebak dalam kolom air dan sedimen, sehingga memperpanjang durasi paparan toksik terhadap organisme tambak.

Tabel 2. Perbandingan Konsentrasi Logam Berat Pb dan Cd pada Sedimen Tambak, Estuari, DAS, dan Pesisir di Berbagai Wilayah Indonesia dan Internasional

Lokasi Penelitian	Jenis Perairan/ Kawasan	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Potensi Sumber Polutan Utama	Referensi
11 Provinsi Utama (Tiongkok)	Kolam Akuakultur Air Tawar	10,02 – 66,76	0,14 – 1,31	Pakan ikan, pestisida /pupuk (44,29%), industri & elektroplating (36,66%)	(S. Liu et al., 2024)
Distrik Noakhali & Lakshmipur (Bangladesh)	Kolam Akuakultur Pesisir/Estuari	2,77 – 4,68	0,22 – 0,31	Pakan & obat akuakultur, limbah domestik, limpasan Sungai Meghna	(M. B. Hossain et al., 2023)
Teluk Shidugawa & Furue (Jepang)	Akuakultur Laut / Keramba	Shidugawa: 5,76 – 25,30 Furue: 5,74 – 26,00	Shidugawa: 0,07 – 0,26 Furue: 0,07 – 0,28	Residu pakan, cat anti-teritip (*antifouling*), limbah pengolahan ikan, deposisi alami	(Han et al., 2024)
Teluk Sansha, Ningde (Tiongkok)	Keramba Jaring Apung Laut	10,42 – 17,16	0,21 – 0,38	Overfeeding, ekskresi ikan, cat *antifouling*, kompleksasi bahan organik	(Gao et al., 2026)
Waduk Rosário, Ceará (Brasil)	Waduk Perairan Tawar / Keramba	18,13 – 43,13	0,38 – 0,59	Pakan, cat anti-karat/anti-teritip keramba, sirkulasi vertikal & dispersi	(Melo Júnior et al., 2023)
Muara Sungai Musi (Sumatera Selatan, Indonesia)	Sedimen Perairan Estuari	Tidak diukur	0,22 – 0,28	Limbah domestik perkotaan, cat *antifouling* kapal, operasional pelabuhan, limpasan pupuk	(Diansyah et al., 2025)

DAS Ciujung (Banten, Indonesia)	Sedimen Sungai / DAS	7,70 – 30,00	0,06 – 3,23	Tambang galena (Pb), pupuk fosfat (Cd), industri kulit/baterai, PLTU	(Nugraha et al., 2023)
Kep. Sangihe (Sulut, Indonesia)	Sedimen Pesisir / Tambang	< 0,005	0,01	Limbah pertambangan, terrestrial runoff, operasional kapal	(Aling et al., 2026)

Sumber: Data sekunder diolah, 2026

Berdasarkan hasil analisis, akumulasi logam berat Pb (155,67-183,00 mg/kg) dan Cd (35,60-42,13 mg/kg) di tambak Pesisir Kota Pasuruan tercatat berada pada tingkat yang sangat ekstrem jika dibandingkan dengan wilayah akuakultur dan pesisir lainnya di tingkat nasional maupun internasional. Di tingkat internasional, konsentrasi Pb dan Cd di Pasuruan berada jauh di atas temuan pada kolam akuakultur air tawar 11 provinsi Tiongkok (Pb: 21,94 mg/kg; Cd: 0,39 mg/kg), kolam pesisir Bangladesh (Pb: 4,35 mg/kg; Cd: 0,22 mg/kg), kawasan akuakultur laut Jepang di Teluk Shidugawa dan Furue (Pb < 26,00 mg/kg; Cd} < 0,28 mg/kg), Teluk Sansha Tiongkok (Pb < 17,16 mg/kg; Cd < 0,38 mg/kg), serta Waduk Rosário Brasil (Pb < 43,13 mg/kg; Cd < 0,59 mg/kg). Bahkan, kadar Cd di Pasuruan melebihi 90 hingga 100 kali lipat dari rata-rata konsentrasi Cd pada lokasi-lokasi akuakultur global tersebut.

Secara nasional, komparasi dengan wilayah perairan Indonesia lainnya mempertegas keunikan sekaligus keparahan pencemaran di lokasi penelitian. Pada Muara Sungai Musi, Sumatera Selatan, konsentrasi Cd rata-rata hanya sebesar 0,22 – 0,28 mg/kg, yang berada di bawah nilai TEL NOAA. Pada DAS Ciujung, Banten, konsentrasi Pb (7,70-30,00 mg/kg) dan Cd (0,06-3,23 mg/kg) sebagian besar masih berada di bawah atau baru menyentuh ambang TEL NOAA. Sementara di kawasan pesisir Kepulauan Sangihe, Sulawesi Utara, kadar Pb (< 0,005 mg/kg) dan Cd (0,01 mg/kg) pada sedimen tercatat sangat rendah karena akumulasi utama Pb berada pada fase terlarut di kolom air (21,66-22,15 mg/L) (Aling et al., 2026).

Perbedaan yang sangat kontras ini menjelaskan beberapa faktor hidro-ekologis utama:

1) Karakteristik Tipologi dan Pembagian Fase (*Partitioning*): Berbeda dengan pesisir Sangihe di mana logam Pb mendominasi kolom air akibat arus laut terbuka, sedimen tambak Pasuruan memiliki kapasitas penjerapan (*adsorption capacity*) yang jauh lebih tinggi. Tingginya kandungan bahan organik dan lempung menyebabkan sedimen Pasuruan bisa bertindak sebagai perangkap polutan utama (*major pollutant sink*) (Tang et al., 2025).
2) Dinamika Hidrodinamika (*Flushing vs Trapping*): Muara Sungai Musi dan DAS Ciujung merupakan sistem lotik/estuari terbuka dengan debit aliran (*river discharge*) tinggi yang secara kontinu membawa polutan menuju laut lepas (*flushing effect*). Sebaliknya, petakan tambak Pesisir Pasuruan merupakan ekosistem semi-tertutup yang dipengaruhi sirkulasi arus balik (*reverse flow*) dan pasang surut, sehingga menahan ion logam terperangkap di dasar perairan (*trapping effect*).
3) Intensitas Sumber Polutan Antropogenik: Jika pada studi luar negeri (seperti Jepang, Tiongkok, dan Brasil) kontaminasi logam dipicu oleh masukan internal akuakultur (residu pakan, ekskresi biota, dan *cat antifouling* keramba), pencemaran di Pesisir Pasuruan tidak lagi berada pada tingkat localized contamination. Tingginya angka Pb dan Cd di Pasuruan mengonfirmasi akumulasi komposit dari limpasan masif pupuk fosfat hulu, buangan cat perahu/bahan bakar armada pelabuhan, serta limbah cair (*effluent*) terkonsentrasi tinggi dari industri electroplating dan tekstil perkotaan yang dialirkan langsung ke saluran air baku tambak (*inlet*).

B.3 Karakteristik Geokimia Sedimen dan Mekanisme Remobilisasi

Kecepatan penyerapan logam dari fase sedimen sangat dipengaruhi oleh fluktuasi parameter lingkungan tambak seperti pH, salinitas, dan aktivitas bioturbasi oleh organisme dasar. Penurunan pH atau kondisi anoksik di dasar tambak dapat memicu proses remobilisasi, di mana logam Pb dan Cd yang terikat pada fraksi sedimen akan terlepas kembali menjadi ion bebas (*bioavailable fraction*) di air pori sedimen (*pore water*). Kondisi inilah yang mempermudah penetrasi logam secara langsung melalui membran insang maupun permukaan kulit biota budidaya.

Tabel 3. Ringkasan Parameter Lingkungan dan Mekanisme Geokimia Remobilisasi Logam Berat pada Sedimen

Parameter Lingkungan	Kondisi / Transisi Geokimia	Mekanisme Kimia-Fisika utama	Fraksi Logam Terlepas (*Bioavailable*)	Referensi
Dinamika Hidrodinamika & Resuspensi	Siklus resuspensi-deposisi (*bottom boundary layer*) oleh arus/gelombang	Pembasahan kembali dan transisi bentuk terikat (*stable*) menjadi bentuk terpertukarkan (*exchangeable*)	Pengayaan logam pada SPM (~2x lipat dari sedimen dasar) & desorpsi ke kolom air	(T. Liu et al., 2023a)
Struktur Fisik Tambak / Akuakultur	Hambatan fisik oleh rakit/keramba budidaya	Reduksi kecepatan arus pasang surut hingga ~40%, mempercepat pengendapan detritus organik	Pengendapan fluks logam (Cd & As) dan akumulasi lokal pada sedimen permukaan	(T. Liu et al., 2023a)
Tegangan Geser Kritis (τ_c) & Resuspensi	Zona Mouth Bar Estuari / *Mixed Zone* (τ > 0,15 N/m^2)	*Quick release* awal akibat desorpsi padatan tersuspensi saat resuspensi melebahi τ_c	Fluks pelepasan melonjak 1–3 orde magnitudo (0,55-4130,83 mg/m^2 / tahun)	(Q. Liu et al., 2023)
Kinetika Desorpsi DGT/DIFS (C_e/C_{sol})	Sedimen Kaya Organik & Estuari (Fraksi BCR-F1)	Kinetika desorpsi *partially sustained* (Pb, Cu, Zn) dengan kapasitas pasokan ulang (*resupply*) tinggi	Fraksi F1 (*acid-exchangeable*) mendominasi; pasokan ulang tinggi (C_e/C_{sol} Pb mencapai 7,22)	(Q. Liu et al., 2023)
Gradien Salinitas & Kompleksasi Klorida	Transisi Zona Air Tawar ke Zona Laut Lepas (0,2- 34,5 PSU)	Desorpsi Cd dipicu pembentukan kompleks kloro terlarut ($CdCl^+$)	Spesiasi Cd didominasi fraksi F1 (*acid-exchangeable*, 41,6%); kadar Cd sedimen merosot drastis *seaward*	(Liang et al., 2023)
Zona Maksimum Keruhan (*TMZ*)	Zona Pencampuran Estuari (0,2-31,2 PSU) & Partikel Halus Silt/Clay (23 μm)	Flokulasi intensif partikel tersuspensi kaya TOC (0,71%), menjadi *trapping zone* & *hotspot*	Puncak akumulasi DGT-*labile* di *TMZ*; fluks *sediment-water interface* (SWI) berubah dari *source* ke *sink* seiring kenaikan salinitas	(Liang et al., 2023)

Sumber: Data sekunder diolah, 2026

Berdasarkan sintesis mekanisme geokimia dan kinetika remobilisasi pada Tabel 3, proses remobilisasi logam berat di sedimen dasar tambak Pesisir Kota Pasuruan diduga kuat oleh serangkaian reaksi hidro-dinamik dan kimia-fisika yang saling terinterkonversi. Studi geokimia pada sedimen pesisir Semenanjung Shandong membuktikan keberadaan siklus resuspensi-deposisi (*resuspension-deposition loop*) pada lapisan batas dasar (*bottom boundary layer*) (T. Liu et al., 2023a). Gesekan arus pasang surut dan aktivitas pengadukan perairan meresuspensi sedimen dasar, yang secara langsung menggeser spesiasi geokimia logam dari bentuk terikat stabil (*stable forms*) menjadi bentuk terpertukarkan (*exchangeable/bioavailable forms*). Akibatnya, konsentrasi logam pada partikel tersuspensi dasar (*suspended particulate*

matter/SPM) dapat melonjak hingga dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan sedimen dasar. Selain itu, hambatan fisik dari struktur fisik tambak maupun rakit budidaya terbukti mereduksi kecepatan arus hingga ~40%, yang membatasi pengenceran (*dilution*) dan mempercepat pengendapan fluks logam (Cd dan As) bersama detritus organik di permukaan sedimen.

Temuan eksperimental dan pemodelan DIFS (DGT-*Induced Fluxes in Sediments*) di Estuari Modaomen memberikan bukti kuantitatif bahwa ketika dinamika perairan menghasilkan tegangan geser dasar yang melebihi ambang batas kritis (τ_c > 0,15 N/m^2), terjadi resuspensi mendadak yang memicu quick release (pelonjakan cepat) konsentrasi logam terlarut ke kolom air (Q. Liu et al., 2023). Efek resuspensi ini meningkatkan fluks pelepasan bentik (*benthic exchange fluxes*) hingga 1 sampai 3 orde magnitudo lebih tinggi (0,5-4130,83 mg/m^2/tahun) dibandingkan pada kondisi tenang (*undisturbed*). Skema ekstraksi bertahap BCR dan pengukuran in-situ DGT mengonfirmasi bahwa zona pencampuran yang kaya akan bahan organik total (TOC) didominasi oleh fraksi labil F1 (*acid-exchangeable*). Fraksi F1 ini memiliki rasio pasokan ulang (*resupply capacity*, C_e/C_{sol} Pb mencapai 7,22) yang sangat tinggi, mengindikasikan bahwa kolam labil pada fase padat secara kontinu melepaskan pasokan Pb baru ke air pori (*pore water*) guna menggantikan ion yang terserap oleh biota atau terdispersi.

Analisis spesiasi pada Estuari Sungai Yangtze mempertegas bahwa gradien salinitas (0,2-34,5 PSU) bertindak sebagai pengendali utama mobilitas Cd melalui pembentukan kompleks kloro terlarut ($CdCl^+$) yang sangat stabil, yang memicu desorpsi Cd dari fase padat dan menyebabkan fraksi labil F1 Cd mendominasi hingga 41,6% (Liang et al., 2023). Sementara itu, zona maksimum keruhan (*Turbidity Maximum Zone*/TMZ) yang kaya partikel halus lanau/lempung (23 μm) bertindak sebagai *trapping zone* dan *hotspot* akumulasi logam. Korelasi positif signifikan antara konsentrasi logam DGT-labile dengan fraksi F1 dan F2 (*reducible* Fe-Mn *oxides*) membuktikan bahwa teknik DGT sangat andal merefleksikan perubahan kinetika desorpsi akibat fluktuasi salinitas dan potensial redoks.

Bagi ekosistem tambak Pesisir Kota Pasuruan, kombinasi fenomena geokimia ini membuktikan bahwa petakan tambak semi-tertutup yang mengalami pembasahan pasang surut dan fluktuasi salinitas berada dalam ancaman remobilisasi yang nyata. Ion Pb^{2+} dan Cd^{2+} yang terperangkap pada fraksi terpertukarkan (F1) dan Fe-Mn oksida (F2) berada dalam kondisi pseudo-stable. Ketika terjadi pengadukan air tambak atau aktivitas pasang surut yang melebihi τ_c desorpsi instan dari padatan tersuspensi akan menyuplai kembali logam bioavailabel terlarut ke air pori dan kolom air tambak. Kondisi ini mengonfirmasi bahwa sedimen tambak Pasuruan bertindak sebagai sumber pencemaran internal sekunder yang sangat aktif (*highly active secondary internal pollution source*) yang memfasilitasi bioakumulasi kronis pada komoditas budidaya seperti ikan bandeng (*Chanos chanos*) dan udang.

B.4 Implikasi Ekotoksikologis: Bioakumulasi, Biomagnifikasi, dan Kesehatan Biota

Logam Pb dan Cd yang terakumulasi tinggi di sedimen dapat diserap oleh organisme bentik serta komoditas budidaya melalui proses bioakumulasi (El et al., 2024; Li et al., 2023; C. Liu et al., 2022). Selain itu logam ini dapat mengalami re-suspensi ke kolom air. Melalui rantai makanan, konsentrasi logam ini akan terus berlipat ganda hingga mencapai konsumen tingkat akhir, yaitu manusia yang mengonsumsi hasil panen tambak tersebut (*biomagnifikasi*). Paparan logam secara berlebih juga berperan sebagai stretor kimia yang merusak jaringan inang pada biota. Hal ini berakibat pada penurunan imun bawaan sehingga menjadi rentan terhadap infeksi patogen sekunder seperti virus (WSSV) atau bakteri (*Vibrio* spp.) (Bagheri et al., 2024; Steffy et al., 2022).

Mekanisme toksisitas logam Pb dan Cd pada tingkat seluler umumnya dimediasi oleh pembentukan Spesi Oksigen Reaktif (ROS) yang berlebihan, memicu kondisi stres oksidatif (Mansoor et al., 2023). Peningkatan ROS ini menyebabkan kerusakan oksidatif pada lipid, protein, dan DNA sel, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kematian sel (*apoptosis*) pada

organ-organ vital biota (Song et al., 2023). Secara spesifik, hepatopankreas pada krustasea (seperti udang) dan hati pada ikan merupakan organ target utama akumulasi dan detoksifikasi logam berat. Paparan kronis logam Pb dan Cd menyebabkan atrofi sel-sel hepatopankreas, degenarasi tubulus, dan infiltrasi hemosit, yang secara drastis mengganggu kemampuan pencernaan dan penyimpanan nutrisi organisme budidaya (M. A. Hossain et al., 2023). Gangguan pada organ-organ ini tidak hanya melemahkan biota, tetapi juga secara langsung berkontribusi pada penurunan laju pertumbuhan dan efisiensi pakan (FCR) yang buruk, yang pada gilirannya merugikan secara ekonomi bagi para pembudidaya tambak di Pesisir Kota Pasuruan.

Selain organ pencernaan, insang merupakan pintu masuk utama logam terlarut dari kolom air (akibat re-suspensi sedimen) sekaligus organ respirasi dan osmoregulasi yang sangat sensitif. Akumulasi Pb dan Cd pada jaringan insang menyebabkan fusi lamela, nekrosis epitel, dan hiperplasia (Reda et al., 2025). Kerusakan struktural ini mengganggu pertukaran gas (hipoksia) dan keseimbangan ionik tubuh, memaksa biota untuk mengalihkan energi metabolisme yang seharusnya untuk pertumbuhan menjadi energi untuk homoeostasis dan mekanisme pertahanan diri, sehingga menghambat pertumbuhan komoditas.

Implikasi ekotoksikologis yang paling mengkhawatirkan dari tingginya kadar Pb dan Cd di sedimen tambak Pasuruan adalah risiko bagi kesehatan manusia melalui biomagnifikasi di sepanjang rantai makanan pesisir. Sebagai konsumer tingkat akhir, manusia yang secara rutin mengkonsumsi ikan bandeng atau udang yang dipanen dari tambak tercemar memiliki risiko akumulasi logam berat di organ-organ tubuhnya sendiri. Akumulasi kronis Cadmium (Cd) pada manusia dapat menyebabkan disfungsi ginjal (nefrotoksik) dan kerapuhan tulang (*Itai-itai disease*), sementara Timbal (Pb) bersifat neurotoksik yang dapat mengganggu sistem saraf pusat, menghambat perkembangan kognitif pada anak-anak, serta menyebabkan anemia (Horiguchi et al., 2025). Kondisi ini menekankan urgensi pengelolaan lingkungan tambak pesisir secara berkelanjutan guna menjamin keamanan pangan hasil budidaya.

B.5 Strategi Mitigasi Ekologis dan Pengelolaan Tambak Berkelanjutan

Dalam hal ini diperlukan langkah intervensi taktis dalam upaya mempertahankan fungsi *biosecurity* dan keberlanjutan pangan di lahan pesisir. Rekomendasi strategi yang dapat diterapkan seperti fitoremediasi berbasis vegetasi mangrove. Mangrove di sekitar saluran tambak dapat mengimobilisasi logam berat melalui jaringan akar (M. B. Hossain et al., 2022). Selain itu, rekayasa kolam pengendap (*sedimentation pond*) di area IN (Titik 1) dan pengelolaan dasar tambak perlu diterapkan. Aplikasi zeolit mampu mengimobilisasi ion logam bebas melalui pertukaran kation dan presipitasi silikat, sehingga secara efektif menurunkan fraksi labil serta bioavailabilitas logam berat bagi organisme (Ma et al., 2022).

Secara lebih terperinci, penerapan fitoremediasi berbasis vegetasi mangrove seperti Rhizophora apiculata dan Avicennia marina memanfaatkan mekanisme phytostabilization dan phytoextraction (Yap & Al-Mutairi, 2023). Selain itu, Avicennia marina terbukti mampu menyerap dan mengakumulasi logam berat seperti Pb dan Cd dari sedimen melalui sistem perakarannya hingga mentranslokasikannya ke jaringan daun (Alharbi et al., 2023). Sementara itu, Rhizophora apiculata dengan akar tunjangnya mampu mereduksi energi gelombang dan kecepatan arus air pasang masukan, sehingga membantu mempercepat pengendapan lumpur dan mengikat logam berat sebelum air memasuki petakan tambak utama (Tsai et al., 2026). Pembentukan zona sabuk hijau (*greenbelt*) atau koridor vegetasi mangrove di sepanjang saluran intake/saluran pembawa (*inlet canal*) dapat menurunkan beban kontaminasi logam terlarut secara alami (Guo et al., 2025).

Pada aspek rekayasa fisik perairan, pembangunan kolam pengendap (*sedimentation pond atau settling basin*) di area masukan air utama (Titik 1 / area IN) harus didesain dengan waktu tinggal air (*hydraulic retention time*/HRT) yang memadai (minimal 24-48 jam). Waktu pasokan air yang tenang di kolam pengendap memfasilitasi proses gravimetris agar koagulat dan

partikel lanau-lempung halus pembawa ikatan Pb dan Cd mengendap sempurna sebelum air dialirkan ke petakan pembesaran. Integrasi kolam pengendap ini dapat dikombinasikan dengan unit biofilter yang memanfaatkan makroalga (*Gracilaria* sp.) atau bivalvia non-konsumsi guna memaksimalkan penyerapan ion terlarut sisa.

Pada tahap manajemen tanah dasar tambak, aplikasi bahan pembenah tanah (*soil conditioner*) seperti zeolit alam dan pengapuran (*liming*) berbasis kalsium karbonat ($CaCO_3$) atau dolomit ($CaMgCO_3)_2$) dilakukan secara berkala saat siklus pengeringan dasar tambak (Ma et al., 2024). Pemberian zeolit memanfaatkan struktur aluminosilikat berpori yang memiliki Kapasitas Tukar Kation (KTK) tinggi untuk mengikat ion Pb^{2+} dan Cd^{2+} melalui reaksi pertukaran ion yang stabil (Sukchit et al., 2025). Sementara itu, pengapuran berfungsi menaikkan pH sedimen dasar ke kisaran netral hingga sedikit basa (pH 7,5-8,2). Peningkatan pH ini menekan kompetisi ion H^+, mendorong pembentukan endapan hidroksida dan karbonat Logam yang tidak terlarut ($PbCO_3$ dan $CdCO_3$), sehingga mengunci fraksi labil F1 (*acid-exchangeable*) agar tidak mengalami remobilisasi saat tambak diisi air kembali (Yang et al., 2022).

Selain pendekatan teknis di tingkat tambak, keberlanjutan ekosistem pesisir Kota Pasuruan memerlukan strategi tata kelola terpadu berbasis kebijakan (*policy-driven mitigation*). Pemerintah daerah dan pengelola kawasan industri perlu menerapkan sistem pengawasan baku mutu limbah cair (*effluent monitoring*) yang ketat pada industri tekstil dan electroplating di area hulu DAS, memastikan diterapkannya instalasi pengolahan air limbah (IPAL) komunal yang tersertifikasi. Pendekatan pengelolaan pesisir terpadu (*Integrated Coastal Zone Management*/ICZM) juga harus mengatur zonasi spasial secara jelas untuk memisahkan saluran pembuangan limbah industri (*outlet*) dari saluran pengambilan air baku akuakultur (*inlet*). Kombinasi antara teknologi remediasi in-situ, manajemen operasional tambak yang presisi, dan regulasi tata ruang pesisir yang tegas merupakan fondasi utama dalam memulihkan daya dukung lingkungan (*carrying capacity*) serta menjamin keamanan pangan (*food safety*) produk akuakultur Pesisir Pasuruan secara berkelanjutan.

IV. KESIMPULAN

Studi kasus mikrolokasi pada sedimen dasar 1 unit tambak di pesisir Kota Pasuruan menunjukkan kontaminasi berat logam Pb (155,67-183,00 mg/kg) dan Cd (35,60-42,13 mg/kg) yang secara konsisten melampaui ambang batas *Probable Effect Levels* (PEL) NOAA SQuIRTs di seluruh titik pengamatan. Akumulasi tertinggi terpusat pada area masukan air baku (IN>OT>CT), mengonfirmasi bahwa pasokan air luar melalui saluran masukan (*inlet*) merupakan jalur utama masuknya polutan antropogenik eksternal ke dalam sistem petakan tambak. Kondisi ini mengindikasikan risiko biologis kronis serta ancaman terhadap *biosecurity* pangan lokal melalui potensi bioakumulasi dan biomagnifikasi di sepanjang rantai makanan. Untuk memitigasi ancaman ekologis pada skala tambak ini, intervensi taktis mendesak dilakukan melalui penambahan kolam pengendap (*sedimentation pond*) pada area *inlet*, aplikasi amandemen tanah (zeolit atau pengapuran) untuk menekan bioavailabilitas logam di dasar tambak, serta penguatan sabuk hijau (*greenbelt*) mangrove (Rhizophora apiculata dan Avicennia marina) sebagai biofilter alami..

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis menyampaikan terima kasih dan apresiasi yang setinggi-tingginya kepada Sekolah Pascasarjana Universitas Brawijaya atas dukungan akademis dan fasilitas penyelesaian studi yang diberikan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dinas Perikanan Kota Pasuruan beserta jajarannya atas bantuan perizinan, pendampingan lapangan, serta penyediaan data pendukung selama kegiatan penelitian dan pengambilan sampel tambak berlangsung.

REFERENCES

Aini, D. N., Aulia, M. A., & Sobakh, N. (2026). Peran SDM dalam Pengelolaan Sektor Perikanan Terhadap Pendapatan Masyarakat di Kota Pasuruan. *Indonesia Economic Journal*, *2*(1), 973–981.

Al-hashem, A. A., Beck, A. J., Krisch, S., Barraqueta, J. M., Steffens, T., & Achterberg, E. P. (2022). *Particulate Trace Metal Sources , Cycling , and Distributions on the Southwest African Shelf Global Biogeochemical Cycles*. https://doi.org/10.1029/2022GB007453

Alharbi, B. M., Abdulmajeed, A. M., Jabbour, A. A., & Hashim, A. M. (2023). Eco-Physiological Responses of Avicennia marina (Forssk.) Vierh. to Trace Metals Pollution via Intensifying Antioxidant and Secondary Metabolite Contents. *Metabolites*, *13*(7), 1–17. https://doi.org/10.3390/metabo13070808

Aling, D. F., Kepel, R. C., Makapedua, D. M., Kalalo, F. P., Paulus, J. J. H., Tumembow, S. S., Mantiri, D. M. H., & Tumbol, R. A. (2026). Water quality and heavy metal contents in sediments and sea cucumbers from the Sangihe Islands, North Sulawesi, Indonesia. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, *19*(4), 1820. https://doi.org/10.67784/0014

Angraini, N., Agustina, T. E., Hadiah, F., Kimia, T., Sriwijaya, U., Negara, J. S., Besar, B., & Selatan, S. (2022). *Pengaruh pH dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium Dengan Metode Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat Pb , Cu , dan Cd*. *20*(2), 345–355. https://doi.org/10.14710/jil.20.2.345-355

Bagheri, S., Gholamhosseini, A., Hoseinifar, S. H., Banaee, M., & Resources, N. (2024). Investigation of the effects of heavy metals (copper, cobalt, manganese, selenium, and zinc) on fish immune systems – an overview. *Annals of Animal Science*, *24*(4), 1025–1035. https://doi.org/10.2478/aoas-2024-0017

Buchman, M. F. (2008). *Screening quick reference tables (SQuiRTs)*.

Charkiewicz, A. E., Omeljaniuk, W. J., Nowak, K., & Garley, M. (2023). *Cadmium Toxicity and Health Effects — A Brief Summary*. 1–16.

Chen, J., Liu, M., Wang, F., Ding, Y., Fan, D., & Wang, H. (2024). Science of the Total Environment Accumulation and migration of particulate trace metals by artificial flood event of the Yellow River : From Xiaolangdi reservoir to estuary. *Science of the Total Environment*, *912*(November 2023), 168614. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168614

Chilton, D., Hamilton, D. P., Nagelkerken, I., Cook, P., Hipsey, M. R., Reid, R., Sheaves, M., Waltham, N. J., & Brookes, J. (2021). *Environmental Flow Requirements of Estuaries : Providing Resilience to Current and Future Climate and Direct Anthropogenic Changes*. *9*(November), 1–21. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.764218

Darajati, M. R. (2023). Ekonomi Biru : Peluang Implementasi Regulasi Di Indonesia. *TheJournalish: Social and Government*, *4*(5), 41–53.

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). https://doi.org/10.1007/s10661-025-14501-9

El, Y., Hasni, M., Agnaou, M., Nadir, M., Abou, J., Moukrim, A., & Ait, A. (2024). Chemosphere Assessment of trace metal bioaccumulation in Mytilus galloprovincialis of the central Atlantic ocean after installation of treatment sewage facilities. *Chemosphere*, *348*(August 2023), 140730. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140730

Gao, H., Li, H., Li, X., Yu, J., Fu, J., & Zhou, J. (2026). Trace element migration characteristics and ecological risk assessment in sediments under different cage culture

capacity: a case study of the Larimichthys crocea farming zone in Sansha Bay. *Journal of Soils and Sediments*, *26*(11). https://doi.org/10.1007/s11368-026-04533-0

Guo, H., Song, Z., Wang, S., Yan, S., Wang, Y., Gao, Y., & Xia, J. (2025). Assessment of Heavy Metal Contamination and Ecological Risk in Mangrove Marine Sediments Inside and Outside Zhanjiang Bay: Implications for Conservation. *Journal of Marine Science and Engineering*, *13*(4), 1–15. https://doi.org/10.3390/jmse13040708

Han, S., Tai, R., Masunaga, S., & Naito, W. (2024). Distribution and geochemical speciation of metals in the sediments of marine aquaculture areas in Japan. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(9). https://doi.org/10.1007/s10661-024-12918-2

Herath, A., Kanti, D., Bonyadinejad, G., & Salehi, M. (2023). Chemosphere Partitioning of heavy metals in sediments and microplastics from stormwater runoff. *Chemosphere*, *332*(May), 138844. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138844

Hindarwati, Y., Retnaningsih, T., Riset, P., Pangan, T., Riset, B., Izzati, M., Pascasarjana, S., Diponegoro, U., Teknik, D., Fakultas, K., & Universitas, T. (2023). *Kontaminan Logam Berat (Pb , Cd , Dan Cu) pada Tanah dari Pemupukan Berbasis Jerami Padi*. *21*(1), 8–14. https://doi.org/10.14710/jil.21.1.8-14

Horiguchi, H., Oguma, E., Miyamoto, K., Hosoi, Y., & Kayama, F. (2025). Effects of Environmental Cadmium Exposure Sufficient to Induce Renal Tubular Dysfunction on Bone Mineral Density Among Female Farmers in Cadmium-Polluted Areas in Northern Japan. *Toxics*, *13*(8), 1–21. https://doi.org/10.3390/toxics13080688

Hossain, M. A., Chowdhury, T., Chowdhury, G., Schneider, P., Hussain, M., Das, B., & Iqbal, M. M. (2023). Impact of Pb Toxicity on the Freshwater Pearl Mussel, Lamellidens marginalis: Growth Metrics, Hemocyto-Immunology, and Histological Alterations in Gill, Kidney, and Muscle Tissue. *Toxics*, *11*(6). https://doi.org/10.3390/toxics11060475

Hossain, M. B., Masum, Z., Rahman, M. S., Yu, J., Noman, M. A., Jolly, Y. N., Begum, B. A., Paray, B. A., & Arai, T. (2022). Heavy Metal Accumulation and Phytoremediation Potentiality of Some Selected Mangrove Species from the World's Largest Mangrove Forest. *Biology*, *11*(8). https://doi.org/10.3390/biology11081144

Hossain, M. B., Sultana, J., Pingki, F. H., Nur, A. A. U., Mia, M. S., Bakar, M. A., Yu, J., Paray, B. A., & Arai, T. (2023). Accumulation and contamination assessment of heavy metals in sediments of commercial aquaculture farms from a coastal area along the northern Bay of Bengal. *Frontiers in Environmental Science*, *11*(May), 1–12. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1148360

Li, D., Pan, B., Wang, Y., Han, X., & Lu, Y. (2023). Bioaccumulation and health risks of multiple trace metals in fish species from the heavily sediment-laden Yellow River. *Marine Pollution Bulletin*, *188*(December 2022), 114664. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114664

Liang, Y., Wang, R., Sheng, G. D., Pan, L., Lian, E., Su, N., Tang, X., Yang, S., & Yin, D. (2023). Geochemical controls on the distribution and bioavailability of heavy metals in sediments from Yangtze River to the East China Sea: Assessed by sequential extraction versus diffusive gradients in thin-films (DGT) technique. *Journal of Hazardous Materials*, *452*(March). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131253

Liu, C., Wang, R., Gao, H., Wu, X., & Yin, D. (2022). Science of the Total Environment Transport of trace metals and their bioaccumulation in zooplankton from Changjiang (Yangtze River) to the East China Sea. *Science of the Total Environment*, *851*(August), 158156. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158156

Liu, Q., Jia, Z., Liu, G., Li, S., & Hu, J. (2023). Assessment of heavy metals remobilization and release risks at the sediment-water interface in estuarine environment. *Marine Pollution Bulletin*, *187*(October 2022), 114517. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114517

Liu, S., Wu, K., Yao, L., Li, Y., Chen, R., Zhang, L., Wu, Z., & Zhou, Q. (2024). Characteristics and correlation analysis of heavy metal distribution in China's freshwater aquaculture pond sediments. *Science of the Total Environment*, *931*(May), 172909. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172909

Liu, T., Zhu, L., Bao, R., Hu, R., Jiang, S., Zhu, Y., & Song, Y. (2023a). Hydrodynamically–driven distribution and remobilization of heavy metals in surface sediments around the coastal area of Shandong Peninsula, China. *Science of the Total Environment*, *857*(June 2022), 159286. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159286

Liu, T., Zhu, L., Bao, R., Hu, R., Jiang, S., Zhu, Y., & Song, Y. (2023b). Science of the Total Environment Hydrodynamically – driven distribution and remobilization of heavy metals in surface sediments around the coastal area of Shandong Peninsula , China. *Science of the Total Environment*, *857*(October 2022), 159286. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159286

Ma, Y., Cheng, L., Zhang, D., Zhang, F., Zhou, S., Ma, Y., Guo, J., Zhang, Y., & Xing, B. (2022). Stabilization of Pb, Cd, and Zn in soil by modified-zeolite: Mechanisms and evaluation of effectiveness. *Science of the Total Environment*, *814*, 152746. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152746

Ma, Y., Li, C. C., Yan, J., Yu, H., Kan, H., Yu, W., Zhou, X., Meng, Q., & Dong, P. (2024). Application and mechanism of carbonate material in the treatment of heavy metal pollution: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(25), 36551–36576. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33225-w

Mandal, G. C. (2022). The toxic effect of lead on human health – A review. *Human Biology and Public Health*, *3*, 1–11.

Mansoor, S., Ali, A., Kour, N., Bornhorst, J., AlHarbi, K., Rinklebe, J., Abd El Moneim, D., Ahmad, P., & Chung, Y. S. (2023). Heavy Metal Induced Oxidative Stress Mitigation and ROS Scavenging in Plants. *Plants*, *12*(16), 1–17. https://doi.org/10.3390/plants12163003

Melo Júnior, H. do N., de Paula Filho, F. J., Menezes, J. M. C., de Araújo, J. A. S., Gonçalves Santana, J. E., Melo, H. V. S., Vieira, R. de S., de Morais Oliveira-Tintino, C. D., Tintino, S. R., Coutinho, H. D. M., & Teixeira, R. N. P. (2023). Impacts of the Residual Trace Metals of Aquaculture in Net Cages on the Quality of Sediment. *Life*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/life13020338

Mramba, R. P., & Kahindi, E. J. (2023). Heliyon Pond water quality and its relation to fish yield and disease occurrence in small-scale aquaculture in arid areas. *Heliyon*, *9*(6), e16753. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16753

Nielsen, T., Haghipour, N., Wacker, L., Kristian, A., Alstrup, O., Lajord, O., Rasmussen, T. L., Pearce, C., & Seidenkrantz, M. (2024). *Retreat patterns and dynamics of the former Norske Trough ice stream (NE Greenland): An integrated geomorphological and sedimentological approach Adri a. 325*(January). https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108477

Nugraha, W. C., Ishibashi, Y., & Arizono, K. (2023). Assessment of heavy metal distribution and contamination in the sediment of the Ciujung Watershed, Banten Province, Indonesia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *25*(5), 2619–2631. https://doi.org/10.1007/s10163-023-01661-4

Reda, R. M., Zaki, E. M., A. A. Aioub, A., Metwally, M. M. M., Yassin, A. M., & Mahsoub, F. (2025). Behavioral, biochemical, immune, and histological responses of Nile tilapia (Oreochromis niloticus Linnaeus, 1758) to lead, mercury, and pendimethalin exposure: individual and combined effects. *Environmental Sciences Europe*, *37*(1). https://doi.org/10.1186/s12302-024-01047-9

Sawant, S. S., Gosavi, S. N., Khadamkar, H. P., Mathpati, C. S., Pandit, R., & Lali, A. M. (2019). Energy ef fi cient design of high depth raceway pond using computational fl uid dynamics. *Renewable Energy*, *133*, 528–537.

https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.016

Somma, R., Yazdi, M. G., Abyat, M., Manguerra, R. K., Zaccaro, S., Marra, A. C., & Giacobbe, S. (2026). *Sedimentological and Ecological Controls on Heavy Metal Distributions in a Mediterranean Shallow Coastal Lake (Lake*. 1–26.

Song, C., Sun, C., Liu, B., & Xu, P. (2023). Oxidative Stress in Aquatic Organisms. *Antioxidants*, *12*(6), 1–5. https://doi.org/10.3390/antiox12061223

Sri, M., & Hasyim, A. (2022). *Kajian Kualitas Air Berdasarkan Keanekaragaman Meiofauna dan Parameter Fisika-Kimia di Pesisir Losari , Makassar*. *20*(1), 45–57. https://doi.org/10.14710/jil.20.1.45-57

Steffy, G., Lojuyo, G., Doinsing, J. W., & Ransangan, J. (2022). *Immune Responses of Bivalves to Environmental Pollution and Abiotic Stress*. *26*(6), 911–957. https://doi.org/https://doi.org/10.21608/ejabf.2022.276908

Sukchit, D., Prajuabsuk, M., Lumlong, S., Inntam, C., Punkvang, A., Wattanarach, S., Thavorniti, P., Jongsomjit, B., Wongyai, K., Gleeson, D., Shanmugam, P., Boonyuen, S., & Pungpo, P. (2025). Synthesis and Characterization of Zeolite A from Industrial Fly Ash as a Green, Cost-Effective Cd2+ and Pb2+ Adsorbent for Wastewater Applications. *ACS Omega*, *10*(6), 5981–5992. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09990

Suryani, I., Vandian, A., & Santika, K. (2024). *Penetapan Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) dan Timbal (Pb) pada Ikan Kakap Putih , Ikan Kerapu dan Ikan Tigawaja di Perairan Kota Pekalongan*. *9*(2), 58–64. https://doi.org/10.37033/fjc.v9i12.694

Tang, W., Sun, L., Zhu, Y., Ng, J. C., Huang, J., Xu, Z., & Zhang, H. (2025). Difference analysis of organic matter-mediated heavy metal pollution in the sediments of urban water bodies. *Science of the Total Environment*, *968*(November 2024), 178747. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178747

Tsai, Y. L., Chang, C. W., & Mori, N. (2026). Investigation of Wave Attenuation by Rhizophora apiculata Mangroves: Coupled Laboratory Experiments and Boussinesq Modeling. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *131*(3), 1–20. https://doi.org/10.1029/2025JC022836

Yang, Z., Ma, J., Liu, F., Zhang, H., Ma, X., & He, D. (2022). Mechanistic insight into pH-dependent adsorption and coprecipitation of chelated heavy metals by in-situ formed iron (oxy)hydroxides. *Journal of Colloid and Interface Science*, *608*(100), 864–872. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.10.039

Yap, C. K., & Al-Mutairi, K. A. (2023). Potentially Toxic Metals in the Tropical Mangrove Non-Salt Secreting Rhizophora apiculata: A Field-Based Biomonitoring Study and Phytoremediation Potentials. *Forests*, *14*(2). https://doi.org/10.3390/f14020237

Yusuf, Y. N., Wahyuni, F., Syamsul, M., Dian, I., & Masithah, S. (2023). *Uji Daya Terima , Analisis Kadar Protein Dan Zat Besi Nugget Sayur Bayam Dengan Substitusi Ikan Bandeng (Chanos Chanos)*. *18*, 8–16.

Zhang, X., Zhang, Y., Zhang, Q., Liu, P., Guo, R., & Jin, S. (2020). *Evaluation and Analysis of Water Quality of Marine Aquaculture Area*. 1–15.