

Analisis Pencemaran Logam Berat dan Risiko Ekologis di Sedimen Estuaria Sungai Comal

Ani Haryati^{1*}, Diva Nasywaa Ashari¹, Isnaini Prihatiningsih¹, Hedi Indra Januar²

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Dr Soeparno, Kec. Purwokerto Utara, Kabupaten Banyumas 53122 Indonesia

²Pusat Riset Ekologi dan Ethnobiologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Jl. KST Soekarno Cibinong, Bogor 16911 Indonesia
Email: ani.haryati@unsoed.ac.id

Abstrak

Aktivitas antropogenik di kawasan pesisir Desa Mojo, Estuari Sungai Comal, berpotensi meningkatkan masukan logam berat ke lingkungan perairan. Sedimen di muara berperan sebagai penyerap dan penyimpan utama logam berat, sehingga mencerminkan tingkat pencemaran dan risiko ekologis perairan. Penelitian ini bertujuan menilai status pencemaran dan potensi risiko ekologis logam timbal (Pb), arsen (As), kobalt (Co), dan kromium (Cr) pada sedimen permukaan Estuari Sungai Comal, Pemalang. Sebanyak sepuluh stasiun pengambilan sampel ditentukan secara acak sepanjang muara. Analisis logam dilakukan menggunakan metode *aqua regia* dan diukur dengan *Flame Atomic Absorption Spectrophotometry* (FAAS). Evaluasi kontaminasi dilakukan melalui perhitungan *Contamination Factor* (CF), *Geoaccumulation Index* (Igeo), *Pollution Load Index* (PLI), dan *Ecological Risk Index* (RI). Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi Pb (0,10–0,23 mg/kg), As (0,38–0,59 mg/kg), Co (0,10–0,14 mg/kg), dan Cr (0,25–0,58 mg/kg) berada jauh di bawah nilai *Interim Sediment Quality Guidelines* (ISQG). Nilai CF<1, Igeo≤0, dan PLI<1 menandakan kontaminasi rendah, sedangkan RI (0,37–0,55) menunjukkan risiko ekologis sangat rendah. Secara spasial, akumulasi logam cenderung meningkat ke arah laut akibat transportasi dan deposisi sedimen. Hasil ini menunjukkan bahwa sedimen Estuari Sungai Comal belum tercemar signifikan, namun pemantauan berkala tetap diperlukan terhadap perubahan kualitas sedimen akibat dinamika pasang surut dan aktivitas antropogenik.

Kata kunci : geoakumulasi indeks, konsentrasi faktor, risiko ekologis, unsur kelumit

Abstract

Assessment of Heavy Metal Contamination and Ecological Risk in the Estuarine Sediments of the Comal River

Anthropogenic activities in the coastal area of Mojo Village, at the Comal River estuary, potentially increase heavy metal inputs into the aquatic environment. Estuarine sediments act as major sinks and reservoirs of heavy metals, reflecting the degree of contamination and ecological risk. This study aims to assess the pollution status and potential ecological risk of lead (Pb), arsenic (As), cobalt (Co), and chromium (Cr) in surface sediments of the Comal River estuary, Pemalang. Ten sampling stations were randomly selected along the estuary. Metal concentrations were determined using aqua regia digestion followed by Flame Atomic Absorption Spectrophotometry (FAAS). Contamination was evaluated using the Contamination Factor (CF), Geoaccumulation Index (Igeo), Pollution Load Index (PLI), and Ecological Risk Index (RI). The concentrations of Pb (0,10–0,23 mg/kg), As (0,38–0,59 mg/kg), Co (0,10–0,14 mg/kg), and Cr (0,25–0,58 mg/kg) were well below the Interim Sediment Quality Guidelines (ISQG). Values of CF<1, Igeo≤0, and PLI<1 indicated low contamination, while RI (0,37–0,55) suggested a very low ecological risk. Spatially, metal accumulation increased seaward, associated with sediment transport and deposition. Overall, the Comal River estuarine sediments remain unpolluted, though continuous monitoring is recommended due to tidal dynamics and ongoing anthropogenic pressures.

Keyword : concentration factor, ecological risk, geoaccumulation index, trace elements

*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v15i1.78550

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 16-10-2025

Disetujui/Accepted : 24-12-2025

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat di lingkungan laut telah menjadi permasalahan global sejak beberapa dekade terakhir yang disebabkan oleh peningkatan aktivitas antropogenik, seperti: pertanian, urbanisasi, dan industri (Looi *et al.*, 2019; Ardila *et al.*, 2023). Logam berat yang dihasilkan dari aktivitas antropogenik pada awalnya masuk ke perairan laut dalam fase terlarut serta teradsorpsi pada sedimen tersuspensi dan partikel koloid organik-anorganik, kemudian mengendap di dasar sedimen (Fernandes & Nayak, 2012). Penelitian mengenai logam berat pada sedimen dasar di beberapa perairan Indonesia telah dilakukan, diantaranya yaitu: di Sungai Musi Bagian Hilir (Putri *et al.*, 2024), Pulau Kalih Selatan Banten (Nurjanah *et al.*, 2025), pesisir Semarang (Suryono & Rochaddi, 2017), dan perairan Makassar (Polapa *et al.*, 2022). Oleh karena itu, sedimen berperan penting sebagai media transport, penyimpan, dan indikator akumulasi logam berat dalam jangka waktu tertentu (Najamuddin *et al.*, 2020). Akumulasi logam berat dalam sedimen sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik-kimia sedimen, terutama ukuran partikel sedimen dan kandungan bahan organik (*Total Organic Matter/TOM*) (Wang *et al.*, 2022). Fraksi halus yang kaya mineral lempung (*clay*) dan sedimen dengan kandungan organik tinggi memiliki kapasitas adsorpsi lebih besar, sehingga dapat mengikat logam berat dalam jumlah lebih tinggi (Zhang *et al.*, 2021).

Logam berat bersifat persisten dan tidak dapat terurai, sehingga berpotensi menyebabkan efek toksik ketika konsentrasinya melebihi ambang batas. Beberapa logam berat, seperti: timbal (Pb), arsen (As), dan kromium (Cr) merupakan logam berat nonesensial yang keberadaanya belum diketahui manfaatnya dalam tubuh organisme. Walaupun logam kobalt (Co) termasuk ke dalam logam esensial, tetapi tetap berbahaya pada kadar tinggi. Sifat-sifat ini memungkinkan logam berat mengalami biokonsentrasi, bioakumulasi, dan biomagnifikasi dalam organisme akuatik.

Estuari Sungai Comal di Desa Mojo, Kecamatan Ulujami, merupakan hilir drainase yang melewati permukiman, kawasan pertanian, dan aktivitas ekonomi lokal; sehingga menerima limpasan pupuk–pestisida, limbah domestik, serta residu usaha kecil-menengah yang berpotensi membawa logam berat ke estuari (Puspita *et al.*, 2018). Penelitian di wilayah Sungai Comal

menunjukkan peningkatan TSS dan perubahan dinamika sedimen akibat limpasan darat (Aini *et al.*, 2024), degradasi hutan mangrove yang memengaruhi keberlanjutan perikanan estuari (Wijaya & Sanjoto, 2024), serta deteksi Pb pada sedimen dan jaringan mangrove (Latupeirissa *et al.*, 2025). Aktivitas perkapalan dan perikanan di muara turut menambah potensi masukan Pb, Co, dan Cr melalui residu bahan bakar, cat kapal, dan keausan material logam (Fernandes & Nayak, 2012; Looi *et al.*, 2019). Namun, studi mengenai logam berat di Estuari Sungai Comal masih terbatas. Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada ekologi mangrove (Rifandi, 2021; Haryati *et al.*, 2024; Pahlevi *et al.*, 2024) serta aspek sosial ekonomi (Sakuntaladewi & Sylviani, 2019; Alamsyah, 2021). Melihat tingginya aktivitas antropogenik di wilayah Desa Mojo dan terbatasnya informasi mengenai konsentrasi logam berat, maka perlu dilakukan penelitian terkait status pencemaran logam berat di sedimen Estuari Sungai Comal.

Kuantifikasi konsentrasi logam berat dalam sedimen tidak cukup memberikan informasi mengenai tingkat kontaminasi dan pencemaran. Hal ini disebabkan oleh peningkatan konsentrasi tidak dapat menjelaskan sumber peningkatan akibat aktivitas antropogenik atau alami (Barbieri, 2016). Evaluasi tingkat pencemaran sedimen diperlukan untuk menilai kondisi lingkungan pesisir, yang dapat dilakukan melalui *Contamination Factor* (CF), *Pollution Load Index* (PLI), dan *Geoaccumulation Index* (Igeo). Ketiga indeks ini membantu membedakan sumber logam berat dari aktivitas antropogenik maupun proses alami, serta menilai tingkat kontaminasi dan intensitas akumulasi unsur melalui perbandingan nilai latar dan tingkat akumulasinya dalam sedimen (Shafie *et al.*, 2013; Barbieri, 2016). Penilaian pencemaran logam berat penting dilakukan, karena berpotensi menimbulkan dampak pada organisme dan ekosistem perairan (Buhari & Ismail, 2016), sehingga analisis risiko ekologi diperlukan untuk menilai dampak potensialnya (Guo *et al.*, 2010).

Berbagai studi di Indonesia telah menggunakan indeks-indeks ini, seperti: di Estuari Baturusa Bangka (Nugraha *et al.*, 2023), Daerah Aliran Sungai Serayu Hilir (Sukarjo *et al.*, 2021), Perairan Panceng Gresik (Retnosari *et al.*, 2024), Teluk Benoa-Pulau Lembongan Bali (Putri *et al.*, 2024), dan Konawe Utara Sulawesi Tenggara (Adidharma *et al.*, 2023). Penggunaan indeks tersebut menjadi sesuai, karena Indonesia belum

memiliki baku mutu logam berat pada sedimen. Logam Pb, As, Co, dan Cr merupakan logam berisiko tinggi yang banyak digunakan dalam kajian kualitas sedimen. Pb dan As memiliki sumber antropogenik dominan, seperti aktivitas domestik dan pertanian (Zhang *et al.*, 2022), sedangkan Cr bersumber dari campuran geogenik–antropogenik (Spahić *et al.*, 2019). Logam Co dipilih sebagai logam jejak dari sumber masukan seperti residu kendaraan dan pupuk (Liu *et al.*, 2024). Keempat logam ini juga memiliki faktor toksisitas dalam *Ecological Risk Index* (Hakanson, 1980), sehingga relevan untuk menilai status pencemaran dan risiko ekologi secara komprehensif. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis status pencemaran logam Pb, As, Co, dan Cr pada sedimen Estuari Sungai Comal. Selain itu, menganalisis indeks potensi risiko ekologi yang ditimbulkan dari pencemaran logam Pb, As, Co, dan Cr.

MATERI DAN METODE

Area penelitian berada di Estuari Sungai Comal, Kabupaten Pemalang, Jawa Tengah yang merupakan sistem estuari terbuka dan berinteraksi langsung dengan Laut Jawa. Muara ini dipengaruhi oleh dinamika pasang surut, aliran sungai, serta aktivitas antropogenik di sekitarnya, seperti: permukiman, pertanian, serta kegiatan perikanan dan pelayaran. Secara hidrodinamika, bagian hulu muara didominasi perairan berenergi rendah yang memungkinkan pengendapan sedimen halus, sedangkan bagian yang lebih dekat dengan laut dipengaruhi oleh gelombang dan arus pasang surut yang menyebabkan resuspensi dan pemilahan sedimen. Kondisi tersebut menghasilkan gradien lingkungan dari bagian dalam hingga menuju laut. Pengambilan sampel sedimen dilakukan pada Agustus 2023 sebanyak 10 titik stasiun. Penentuan titik stasiun dilakukan dengan metode *random sampling* pada sepanjang estuari. Titik koordinat setiap stasiun dicatat dengan menggunakan *GPSMAP Garmin 64s*. Peta lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Pengambilan Sampel dan Prosedur Analisis

Sampel sedimen diambil pada bagian permukaan (0-5 cm) dengan menggunakan *grab sampler* di setiap stasiun. Sampel sedimen diambil pada bagian tengah *grab sampler* untuk menghindari kontaminasi dan dihomogenkan di lapangan kemudian disimpan pada plastik *ziplock* yang telah dibersihkan selanjutnya disimpan dalam kotak pendingin *ice box* (<4 °C) untuk menghindari

kontaminasi dan proses oksidasi (Haryati *et al.*, 2022). Sampel sedimen selanjutnya dibawa ke laboratorium untuk analisis fisika-kimia sedimen di laboratorium.

Parameter fisika kimia sedimen yang diukur, yaitu: jenis butir sedimen dan *Total Organic Matter*. Distribusi butir sedimen dilakukan dengan metode Granulometri (Bayhaqi & Dunga, 2015) dan klasifikasi ukuran butir sedimen berdasarkan pada skala *Wentworth* (Wentworth, 1922; Flemming, 2012; Haryati *et al.*, 2022). Pengayakan butir (*wire-mesh*) menggunakan pengukuran dimensi *intermediate* antarpartikel yang menunjukkan dapat atau tidaknya suatu partikel melewati ukuran *mesh* tertentu. Pemisahan ukuran butir sedimen menggunakan ayakan bertingkat (*sieve analysis*). Persentase TOM diukur menggunakan metode *Loss of Ignition* (LOI) dengan membakar 10 g sedimen kering pada suhu 300-500 °C dalam tanur (*muffle furnace*) selama 2-4 jam (Dierriska *et al.*, 2024).

Pengukuran Logam Berat

Pengukuran logam berat dalam sedimen dilakukan dengan metode aqua regia merujuk pada Metoda EPA 3502 (USEPA, 1995). Sampel sedimen yang diperoleh kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C selama 24 jam untuk menghilangkan kadar air. Sekitar 1 g sedimen kering dilarutkan dengan 15 mL aqua regia (HCl-HNO₃ perbandingan 3:1) pada *digestion vessel* (polypropylene) dan dibiarkan selama 24 jam. Sampel sedimen kemudian dipanaskan pada suhu 180 °C selama 9,5 menit. Setelah dingin, sampel disaring dengan filter membran selulosa nitrat 0,45 µm dan ditepatkan hingga 50 mL pada labu ukur dengan menambahkan 0,25 M HNO₃. Pengukuran konsentrasi logam berat Pb, As, Co, dan Cr mengacu pada APHA 24th Edition 2540-G, 3030-H, 3111-B (APHA, 2022) dilakukan dengan menggunakan *Flame Atomic Absorption Spectrometry* (FAAS) dengan panjang gelombang optimal untuk Pb 216,9 nm; As 193,7 nm; Co 240,7 nm; dan Cr 357,8 nm. Wadah sampel yang digunakan dibersihkan terlebih dahulu dengan merendamnya dalam larutan HNO₃ 10% selama 24 jam, kemudian dibilas dengan akuades sebelum digunakan

Faktor Kontaminasi dan Indeks Beban Pencemar

Faktor kontaminasi (*Contamination Factor/CF*) digunakan untuk menjelaskan kontaminasi pada sedimen. Selain itu, CF

digunakan untuk mengevaluasi pencemaran pada lingkungan dengan menggunakan satu substansi melalui rasio antar konsentrasi terukur setiap logam dengan konsentrasi latar belakang logam tersebut. Perhitungan kontaminasi logam berat dan indeks beban pencemar (*Pollution Load Index/PLI*) merujuk pada Tomlinson *et al.* (1980) (Persamaan 1 dan 2).

$$CF = \frac{C_n \text{ Sample}}{B_n} \quad (1)$$

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

Di mana C_n menunjukkan konsentrasi logam berat pada sampel sedimen (mg.kg^{-1}), B_n menunjukkan nilai konsentrasi latar belakang (mg.kg^{-1}). Nilai konsentrasi latar belakang logam Pb 20 mg.kg^{-1} , As 13 mg.kg^{-1} , Co 19 mg.kg^{-1} , dan Cr 90 mg.kg^{-1} (Turekian & Wedepohl, 1961). Nilai CF dapat dikategorikan menjadi empat, yaitu: $CF < 1$ kontaminasi rendah; $1 \leq CF < 3$ kontaminasi sedang; $3 \leq CF < 6$ kontaminasi tinggi; dan $CF \geq 6$ kontaminasi sangat tinggi (Kabir *et al.*, 2021). Sedimen dikategorikan tidak mengalami cemaran oleh logam berat jika $PLI < 1$ dan tercemari logam

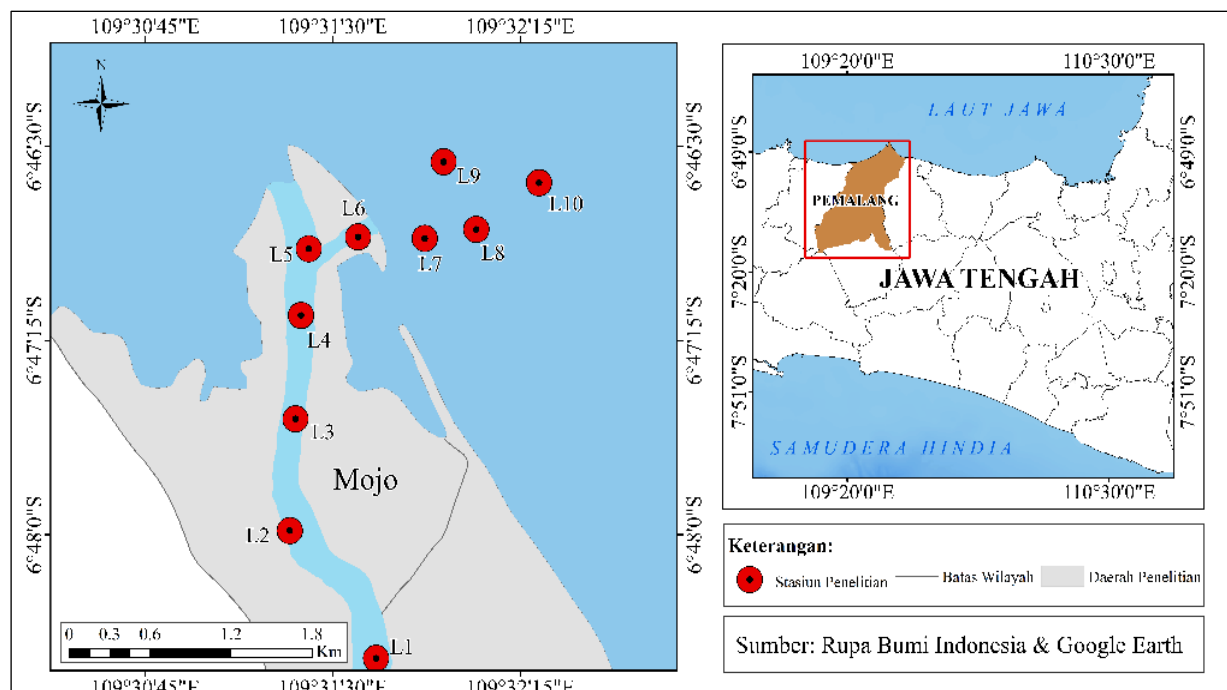
berat jika $PLI > 1$ (Syakti *et al.*, 2015; Onjefu *et al.*, 2020).

Indeks Geoakumulasi

Indeks geoakumulasi menjelaskan tingkatan cemaran pada sedimen pantai akibat aktivitas pada lapisan bumi. Perhitungan indeks geoakumulasi merujuk pada Muller (1969) yang membandingkan konsentrasi unsur yang dianalisis dengan konsentrasi latar belakangnya (Persamaan 3).

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1,5 \times B_n} \quad (3)$$

Pada Persamaan (3) nilai konstanta (yaitu 1,5) yang dikalikan dengan konsentrasi unsur latar belakang untuk memperhitungkan fluktuasi alami unsur-unsur di lingkungan. Nilai I_{geo} dikategorikan kedalam tujuh kelompok, yaitu: yaitu $I_{geo} \leq 0$: tidak tercemar; $0 < I_{geo} < 1$: tidak tercemar hingga tercemar sedang; $1 < I_{geo} < 2$: tercemar sedang; $2 < I_{geo} < 3$: tercemar sedang hingga tinggi; $3 < I_{geo} < 4$: tercemar tinggi; $4 < I_{geo} < 5$: tercemar tinggi hingga ekstrim; dan $I_{geo} > 5$: tercemar ekstrim (Förstner & Müller, 1981).



Gambar 1. Peta lokasi penelitian dan stasiun pengambilan contoh sedimen di estuaria Sungai Comal, Pemalang

Indeks Potensi Risiko Ekologi

Indeks potensi risiko ekologi (*risk index/RI*) ditujukan untuk melihat potensi ekologis pada lingkungan akuatik dan RI merupakan penjumlahan dari faktor risiko (*risk factor/Er*) (Persamaan 4). Faktor risiko merupakan penjumlahan dari faktor kontaminasi pada setiap elemen (Persamaan 5).

$$RI = \sum_{i=1}^{i=n} Er \quad (4)$$

$$Er = Tr \times C_f \quad (5)$$

Dimana n adalah jumlah elemen (logam berat) pada sampel, i adalah elemen, Er adalah faktor risiko setiap elemen, dan Tr adalah faktor respon terhadap racun untuk setiap elemen. Nilai Tr dari masing-masing logam berat menurut yaitu Pb = 5, As = 10, Co = 5, dan Cr = 2 (Hakanson, 1980; Sukarjo *et al.*, 2021). Menurut Hakanson (1980) Er dapat dikategorikan menjadi lima dan RI menjadi empat, yaitu $Er < 40$: potensial risiko ekologi rendah; $40 \leq Er < 80$: potensial risiko ekologi sedang; $80 \leq Er < 160$: potensial risiko ekologi cukup tinggi; $160 \leq Er < 320$: potensial risiko ekologi tinggi; dan $Er \geq 320$: potensial risiko ekologi sangat tinggi. Kategori RI , yaitu: $RI < 150$: risiko ekologi rendah; $150 \leq RI < 300$: risiko ekologi sedang; $300 \leq RI < 600$: risiko ekologi cukup tinggi; dan $RI \geq 600$: risiko ekologi sangat tinggi.

Analisis Statistika

Analisis statistika digunakan untuk mengetahui sebaran data dan hubungan antara karakteristik fisik-kimia sedimen yaitu komposisi ukuran sedimen dan TOM dengan konsentrasi logam berat Pb, As, Co, dan Cr. Sebelumnya dilakukan uji homogenitas dan normalitas data pada setiap variabel menggunakan uji Shapiro–Wilk untuk memastikan keseragaman dan pola distribusi data. Analisis dilanjutkan menggunakan korelasi non-parametrik Spearman's rank (ρ). Uji korelasi Spearman digunakan untuk mengidentifikasi tingkat keeratan hubungan antarvariabel lingkungan dengan konsentrasi logam berat, baik yang bersifat positif maupun negatif, serta untuk menilai potensi keterkaitan fraksi sedimen dan TOM terhadap akumulasi logam berat. Seluruh analisis statistik dilakukan menggunakan *XL-Stat*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik sedimen di Estuari Sungai Comal dapat ditentukan berdasarkan komposisi ukuran butir sedimen dan kandungan bahan organik atau TOM. Berdasarkan Tabel 1 komposisi jenis sedimen didominasi oleh kelompok fraksi halus yaitu liat dan debu. Fraksi liat merupakan komponen terbesar (29,01–61,14%) yang diikuti fraksi debu (10,40–23,18%). Fraksi pasir halus bervariasi antara 13,81–38,27%, sedangkan fraksi pasir sedang berkisar 6,08–19,81%. Pasir kasar relatif menempati proporsi terkecil yaitu 0,02–2,49%. Perbedaan spasial antarstasiun menunjukkan bahwa L1–L7 didominasi oleh fraksi halus seperti liat dan debu, sedangkan stasiun L8–L10 didominasi oleh fraksi pasir halus dan sedang.

Berdasarkan hasil granulometri, area penelitian dapat dibagi menjadi dua zona tekstur. Zona halus (L1–L7) didominasi fraksi debu–liat dan menunjukkan karakter deposisi halus yang khas bagian dalam muara, sedangkan zona lebih kasar (L8–L10) didominasi oleh pasir halus, sehingga secara granulometrik menggambarkan bagian mulut muara. Perbedaan spasial ini menunjukkan variasi mekanisme transport–deposisi sedimen sepanjang muara. Tingginya nilai pasir halus di L8–L10 mengindikasikan adanya proses adveksi atau transport dominan dari laut terbuka atau pengaruh arus pasang surut yang mengangkut partikel kasar dan menghambat pengendapan partikel halus. Sebaliknya, pada L1–L7 yang didominasi fraksi halus diduga lebih dipengaruhi oleh besarnya masukan suspensi dari aliran sungai dan kemampuan retensi partikel yang lebih tinggi. Stasiun L7 berada sedikit di sisi dalam sebelum zona pecah gelombang, sehingga terlindungi dari energi gelombang langsung. Kondisi ini menciptakan lingkungan berenergi rendah yang memungkinkan liat dan debu dapat mengendap.

Kandungan TOM relatif homogen antarstasiun dengan kisaran 6,15–8,47% dan rata 7,62% (Tabel 1). Nilai TOM tertinggi berada pada L8 (8,47%) dan terendah pada L2 (6,15%), tetapi secara keseluruhan fluktuasi antar lokasi tidak berbeda jauh. Klasifikasi bahan organik dibagi menjadi 5 kategori, yaitu: sangat rendah (<3,5%) rendah (3,5–7%), sedang (7–17%), tinggi (17–35%), dan sangat tinggi (>35%) (Reynolds, 1971 dalam Gurning *et al.*, 2020). Berdasarkan klasifikasi tersebut menunjukkan bahwa kandungan TOM di sedimen Estuari Sungai Comal berada pada kategori sedang.

Tabel 1. Nilai salinitas perairan, persentase jenis butir sedimen, dan *Total Organic Matter*

Stasiun	Salinitas (PSU)	Jenis Butir Sedimen (%)					TOM (%)
		Pasir Kasar	Pasir Sedang	Pasir Halus	Debu	Liat	
L1	15,10	0,05	6,56	13,81	19,74	59,84	8,20
L2	21,70	0,02	6,96	14,12	19,06	59,84	6,15
L3	25,65	0,06	6,15	13,59	19,06	61,14	7,17
L4	29,60	0,02	7,10	14,22	19,67	58,99	7,98
L5	26,20	0,05	6,08	13,91	19,82	60,14	8,09
L6	28,20	0,04	7,03	14,07	23,18	55,68	8,38
L7	17,70	0,06	7,47	14,01	19,30	59,16	7,75
L8	29,00	2,71	19,16	36,61	10,64	30,88	8,47
L9	27,00	2,56	18,28	38,27	11,88	29,01	6,68
L10	24,70	2,49	19,81	36,33	10,40	30,97	7,30
Rata-rata ($\bar{x}$)	24,90	0,81	10,46	20,89	17,28	50,57	7,62
SD	4,86	1,23	5,98	11,17	4,52	14,07	0,77

Walaupun tekstur sedimen berbeda, kandungan TOM relatif seragam pada seluruh stasiun (6,15-8,47%). TOM di Estuari Sungai Comal tidak menunjukkan keterkaitan yang jelas dengan fraksi sedimen, karena sistem ini lebih dikendalikan oleh suplai bahan organik dibandingkan karakteristik teksturnya. Pola ini konsisten dengan konsep *supply-driven organic matter* (Jiang *et al.* 2024) serta variasi TOM yang ditentukan oleh besarnya input dari sungai dan limpasan daratan. Selain itu, data salinitas 15,10–29,60 PSU menunjukkan adanya zona pencampuran air tawar–laut yang memungkinkan terjadinya flokulasi partikel halus, sehingga ukuran butir awal tidak menjadi pengendali utama proses sedimentasi. Pada sistem estuari, mekanisme pascapengendapan seperti degradasi mikroba, resuspensi pasang surut, dan bioturbasi diduga dapat memperhalus distribusi bahan organik; meskipun tidak diukur secara langsung pada penelitian ini. Dinamika fisik pada muara berpotensi berkontribusi pada homogenisasi TOM di lokasi tersebut. Variasi TOM di Estuari Sungai Comal lebih mencerminkan dinamika suplai dan pencampuran fisik estuari daripada perbedaan ukuran butir sedimen.

Konsentrasi Logam Berat

Berdasarkan hasil analisis konsentrasi logam berat pada sedimen di Estuari Sungai Comal (Gambar 2) kandungan logam berat menunjukkan variasi yang relatif sempit antarstasiun. Unsur As memperlihatkan konsentrasi tertinggi

dibandingkan logam lainnya, berkisar antara 0,38–0,59 mg.kg⁻¹ (0,48±0,07 mg.kg⁻¹), diikuti oleh Cr dengan rentang 0,25–0,58 mg.kg⁻¹ (0,41±0,11 mg.kg⁻¹). Sementara itu, Pb dan Co menunjukkan nilai yang relatif lebih rendah, masing-masing berkisar 0,10–0,23 mg.kg⁻¹ (0,17±0,05 mg.kg⁻¹) dan 0,10–0,14 mg.kg⁻¹ (0,12±0,02 mg.kg⁻¹). Secara spasial konsentrasi logam berat cenderung meningkat ke arah laut (L6–L10), terutama pada unsur As, Pb, dan Cr. Stasiun L8 menunjukkan konsentrasi tertinggi untuk semua unsur (As 0,53 mg.kg⁻¹; Cr 0,58 mg.kg⁻¹; Pb 0,23 mg.kg⁻¹; Co 0,14 mg.kg⁻¹), diikuti L9 dan L10 yang menunjukkan pola serupa. Sebaliknya, stasiun di bagian dalam sungai seperti L1–L4 memiliki konsentrasi logam berat yang relatif lebih rendah dengan Cr yang menurun tajam pada L4–L5.

Perbedaan pola distribusi logam di sedimen Comal disebabkan oleh sifat kimiawi masing-masing unsur. Logam dengan sifat berbeda akan bereaksi berbeda terhadap kondisi sedimen yang sama, sehingga pola distribusinya menjadi tidak seragam walaupun terdapat pengaruh hidrodinamika pasang surut air laut. Beberapa logam yang lebih mudah larut atau teradsorpsi lemah pada fraksi halus cenderung tersuspensi lebih lama, sementara logam yang kuat teradsorpsi pada fraksi kasar akan tetap mengendap. Konsentrasi logam berat yang relatif seragam mengindikasikan proses deposisi yang stabil di sepanjang area penelitian. Dengan demikian, peningkatan konsentrasi pada stasiun bagian luar (L8–L10) menunjukkan pengaruh hidrodinamika

pasang surut dan kondisi lingkungan berenergi tinggi yang mentransportkan dan mengendapkan sedimen berukuran lebih kasar di estuari daerah tropis (Mathew & Winterwerp, 2020; Pradhan *et al.*, 2020).

Hasil analisis korelasi Spearman pada Tabel 2 menunjukkan bahwa parameter sedimen dengan logam berat menunjukkan keterkaitan erat antar ukuran butir sedimen dan akumulasi logam. Logam Pb berkorelasi positif sangat signifikan dengan pasir sedang ($\rho = 0,87$; $p < 0,01$) dan pasir halus ($\rho = 0,92$; $p < 0,01$), namun berkorelasi negatif kuat dengan fraksi liat ($\rho = -0,94$; $p < 0,01$). Pola ini berbeda dari teori umum yang menyatakan bahwa logam berat akan lebih banyak terakumulasi pada partikel halus, karena luas permukaannya yang lebih besar. Hal ini dimungkinkan oleh keberadaan Pb lebih banyak dalam bentuk partikel atau *presipitant* yang menempel pada mineral karbonat (Zheng *et al.*, 2024). Fraksi halus seperti liat menunjukkan korelasi negatif, yang mengindikasikan terdapat faktor lain selain luas permukaan partikel, seperti jenis mineral, kandungan organik, pH, redoks, dan interaksi kimia yang memengaruhi distribusi Pb di lokasi ini. Sementara itu, As dan Co menunjukkan korelasi positif kuat terhadap Pb ($\rho = 0,66$ dan $\rho = 0,80$; $p < 0,05$) serta hubungan positif sangat signifikan antara As dan Co ($\rho = 0,93$; $p < 0,01$). Hal ini mengindikasikan bahwa ketiga logam tersebut memiliki sumber atau mekanisme deposisi yang sama, seperti adsorpsi bersama mineral Fe oksihidroksida atau partikel organik (Yao *et al.*, 2021). Logam berat berkorelasi negatif dengan fraksi halus (liat dan debu) pada stasiun L1-L7. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada stasiun berenergi rendah (L1-L7) fraksi halus mudah

teresusponsi, sehingga logam Pb, As, Co dan Cr yang teradsorpsi lepas kembali ke kolom air dan menurunkan kandungannya dalam sedimen.

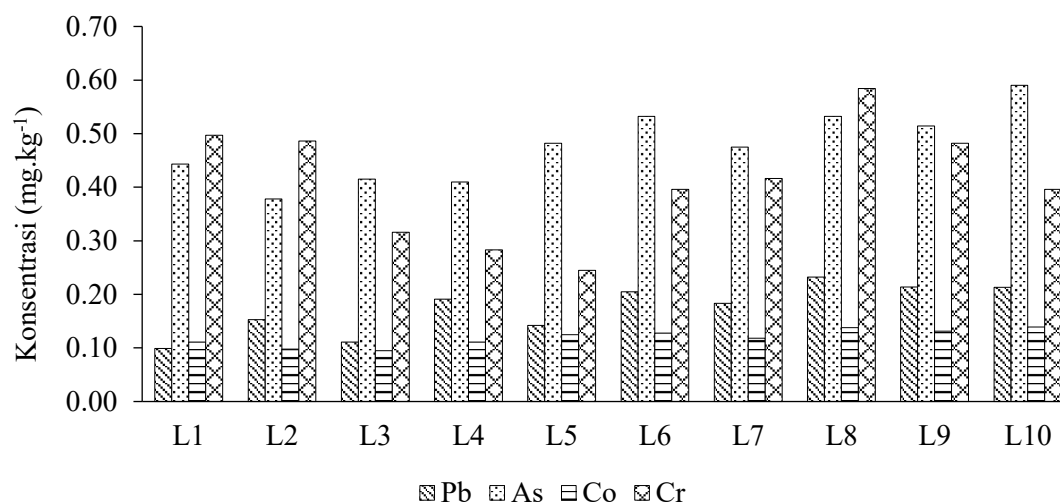
Hubungan TOM menunjukkan korelasi lemah dengan logam berat ($\rho = 0,13-0,41$). Hasil penelitian di Estuari Sungai Comal diduga bahwa akumulasi logam tidak hanya dipengaruhi oleh TOM melainkan oleh tekstur sedimen, kondisi reduksi oksidasi, dan kapasitas pertukaran ion di mineral halus atau kasar. Menurut Lin *et al.* (2022) dan Que *et al.* (2024) sedimen halus dapat mengalami adsorpsi lebih rendah jika kandungan Fe-Mn oksida aktif berkurang terutama pada kondisi reduksi. Kondisi reduksi oksidasi memengaruhi perilaku logam berat secara berbeda-beda. Fe dan Mn cenderung mengendap pada kondisi oksidasi dan terlarut pada kondisi reduksi, sedangkan Cr dan Co memiliki perilaku sebaliknya. Logam Cr dapat mengendap pada kondisi reduksi dan larut saat oksidasi. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme kimia logam di sedimen bersifat spesifik terhadap unsur dan kondisi lingkungan.

Selain faktor kimia, faktor fisik juga berperan penting dalam menentukan distribusi logam di dasar perairan. Proses fisik seperti turbulensi, resuspensi, dan sedimentasi berperan dalam mendistribusikan logam di permukaan dasar (Wilkes *et al.*, 2019). Pada daerah berenergi tinggi (L8-L10) partikel halus cenderung tersuspensi dan tertransportasi, sedangkan fraksi kasar yang lebih stabil berperan sebagai pengendap utama bagi logam yang terasosiasi dengan partikel mineral oksida atau karbonat. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi logam di sedimen merupakan hasil interaksi antara mekanisme kimiawi dan proses fisik di lapisan dasar.

Tabel 2. Koefisien korelasi Spearman pada sedimen Estuari Sungai Comal

Variabel	Pasir Kasar	Pasir Sedang	Pasir Halus	Debu	Liat	TOM	Pb	As	Co	Cr
Pasir Kasar	1									
Pasir Sedang	0,56	1								
Pasir Halus	0,38	0,83**	1							
Debu	-0,68*	-0,69*	-0,60	1						
Liat	-0,50	-0,89**	-0,91**	0,47	1					
TOM	0,06	0,01	-0,09	0,42	-0,15	1				
Pb	0,51	0,87**	0,92	-0,53	-0,94**	0,13	1			
As	0,64*	0,58	0,43	-0,26	-0,65*	0,41	0,66*	1		
Co	0,62	0,73*	0,68	-0,37	-0,80*	0,33	0,80*	0,93**	1	
Cr	0,35	0,38	0,32	-0,38	-0,38	0,10	0,24	0,09	0,16	1

Keterangan: *) korelasi signifikan pada $p < 0,05$ dan **) korelasi signifikan pada $p < 0,01$



Gambar 2. Konsentrasi logam Pb, As, Co, dan Cr di sedimen Estuari Sungai Comal

Sumber masukan logam berat Pb, As, Co, dan Cr di Estuari Sungai Comal diduga berasal dari masukan alami dan antropogenik melalui limpasan Daerah Aliran Sungai (DAS) Comal. Secara alami, pelapukan tanah dan sedimentasi di DAS Comal dapat menjadi sumber masukan logam berat khususnya As yang terdistribusi relatif homogen di sedimen muara. Aktivitas antropogenik di turut memberikan tambahan masukan logam berat di DAS dan Estuari Sungai Comal. Perubahan penggunaan lahan di area DAS dan Estuari Sungai Comal, seperti: pertanian intensif dan pertambahan pemukiman dapat meningkatkan erosi dan volume sedimen yang terbawa ke laut. Material ini dapat menambah kandungan As melalui sisa pupuk, petisida, pengawet kayu, dan kontaminan lainnya yang kemudian terikat pada partikel sedimen. Studi serupa di wilayah tropis menunjukkan bahwa limpasan pertanian dan penggunaan pupuk fosfat menjadi sumber utama kontaminasi As, Pb, dan Co di sedimen estuari (Huang *et al.*, 2023). Selain itu, Estuari Sungai Comal menerima limpasan sedimen relatif lebih besar pada musim hujan, Astjario dan Darian (2016) menyebutkan bahwa dinamika pesisir Comal menunjukkan adanya akresi garis pantai akibat limpasan sungai dan sedimen yang terbawa air banjir. Berdasarkan data pengamatan di area penelitian terdapat aktivitas pertambakan dan pelayaran kapal nelayan. Tambak dan aktivitas budidaya dapat memberikan masukan logam melalui pakan dan limbah organik; sedangkan aktivitas pelayaran kapal nelayan dapat melepaskan Pb, Co, dan Cr dari cat kapal, pelumas, atau pembakaran bahan bakar fosil. Hal ini mengindikasikan bahwa kontaminan di Estuari

Sungai Comal tidak banyak berasal dari industri, melainkan masukan pertanian, pupuk, aktivitas pelayaran, dan erosi tanah.

Konsentrasi Pb (0,10-0,23 mg.kg⁻¹) di sedimen permukaan Estuari Sungai Comal relatif lebih tinggi jika dibandingkan di perairan Matras Sungailiat Bangka yaitu 0,12-0,18 mg.kg⁻¹ (Nugraha *et al.*, 2022) dan perairan Pulau Maspari yaitu 0,01-0,10 mg.kg⁻¹ (Putri *et al.*, 2025), tetapi masih lebih rendah dari muara Sungai Tiram Jakarta Utara yaitu 20,19-55,68 mg.kg⁻¹ (Fitroh *et al.*, 2019), perairan Pulau Untung Jawa 14,12-24,20 mg.kg⁻¹ (Alisa *et al.*, 2020), serta estuari Bondet Cirebon yaitu 18,86-22,15 mg.kg⁻¹ (Wahyuningsih *et al.*, 2021). Begitupula dengan konsentrasi logam Cr hasil penelitian ini (0,25-0,58 mg.kg⁻¹) relatif lebih rendah dibandingkan dengan sedimen di Sungai Banjir Kanal Barat Semarang yaitu 36,14-49,92 mg.kg⁻¹ (Suyatno *et al.*, 2021). Jika dibandingkan dengan Selat Berhala Provinsi Jambi, konsentrasi Co relatif lebih rendah yaitu 21-23 mg.kg⁻¹ dan di sedimen Sungai Comal memiliki konsentrasi As yang relatif lebih tinggi (Susantoro *et al.*, 2015). Secara umum, konsentrasi logam berat di sedimen Estuari Sungai Comal masih berada pada kisaran rendah dan menunjukkan kondisi lingkungan yang relatif baik, karena konsentrasinya relatif lebih rendah dibandingkan lokasi-lokasi estuari lain yang mengalami tekanan antropogenik tinggi.

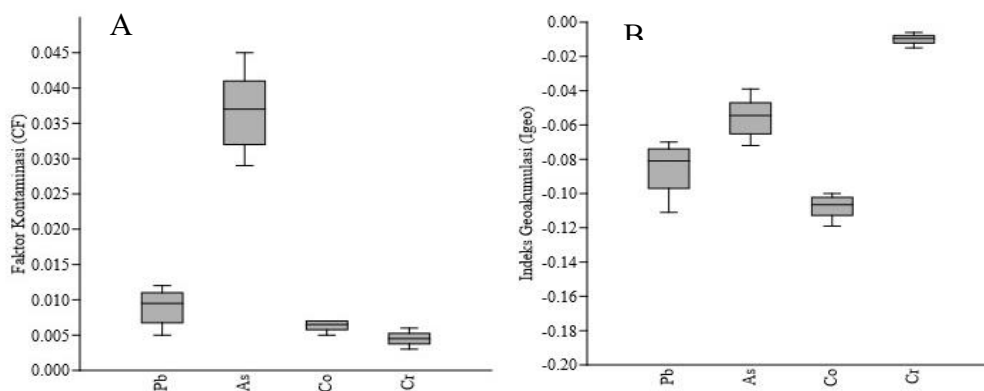
Status Pencemaran

Penilaian kualitas sedimen penting untuk dilakukan karena sedimen berfungsi sebagai penyerap dan penyimpan logam berat (Pb, As, Co,

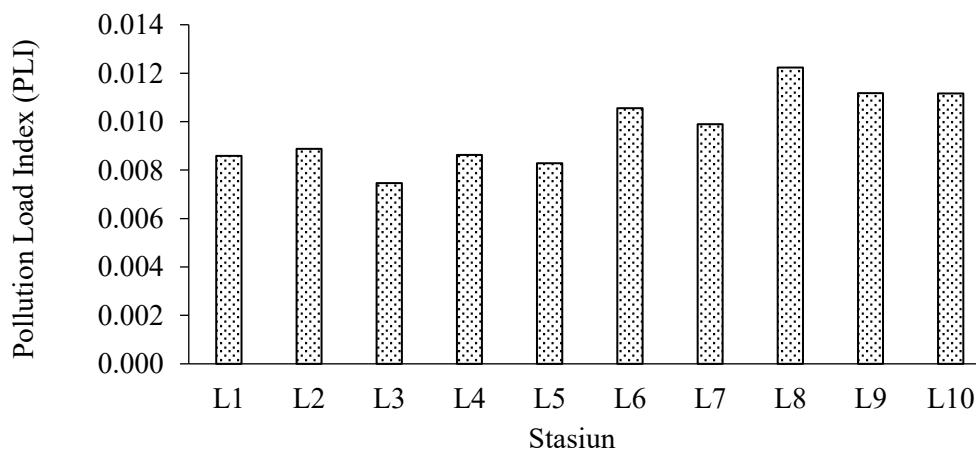
dan Cr) yang dapat memengaruhi kualitas air dan ekosistem perairan laut. Dalam penelitian ini, nilai CF untuk Pb, As, Co, dan Cr pada seluruh stasiun berkisar antara 0,01-0,05 yang seluruhnya berada di bawah ambang batas $CF < 1$ (Gambar 3a). Dengan demikian, seluruh logam berat yang dianalisis termasuk kedalam kategori kontaminasi rendah yang menunjukkan bahwa sedimen di area penelitian Estuari Sungai Comal belum terkontaminasi secara signifikan oleh logam berat.

Nilai Igeo untuk Pb, As, Co, dan Cr di seluruh stasiun berkisar antara -8,74 hingga -5,05 yang seluruhnya berada di bawah ambang batas $Igeo \leq 0$ (Gambar b). Dengan demikian, seluruh logam berat yang dianalisis di area penelitian Estuari Sungai Comal termasuk dalam kategori tidak tercemar yang menunjukkan bahwa sedimen di area penelitian belum menunjukkan akumulasi logam berat yang signifikan. Nilai $Igeo \leq 0$ juga ditemukan di sedimen perairan Pulau Maspari Sumatera Selatan (Putri *et al.*, 2025) dan Delta Neil (Hassaan *et al.*, 2025).

Berdasarkan nilai indeks tingkat pencemaran sedimen pada seluruh stasiun berkisar 0,007-0,012 ($\bar{x}=0,01 \pm 0,002$) yang berada jauh di bawah ambang batas $PLI = 1,0$ (Gambar 4). Dengan demikian, sedimen di area penelitian termasuk dalam kategori tidak tercemar oleh logam berat Pb, As, Co, dan Cr dan menunjukkan bahwa beban pencemaran logam berat secara keseluruhan di sedimen sangat rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa ekosistem pesisir Estuari Sungai Comal masih resilien terhadap akumulasi logam berat, mengurangi resiko bioakumulasi biota laut, dan gangguan rantai trofik. Parameter lingkungan seperti salinitas tetap memiliki peran dalam mengatur mobilitas dan pengendapan logam di estuari. Salinitas memiliki hubungan positif sedang dengan Pb, As, dan Co, yang menunjukkan peningkatan salinitas dapat mendorong pengendapan logam melalui proses flokulasi. Nilai CF, Igeo, dan PLI yang konsisten rendah menunjukkan kondisi Estuari Sungai Comal tidak tercemar.



Gambar 3. Nilai faktor kontaminasi (a) dan indeks geoakumulasi (b) sedimen Estuari Sungai Comal



Gambar 4. Nilai *Pollution Load Index* (PLI) logam berat di sedimen Estuari Sungai Comal

Tabel 3. Nilai faktor risiko (Er) dan *Ecological Risk Index* (RI)

Stasiun	Er				RI
	Pb	As	Co	Cr	
L1	0,02	0,34	0,03	0,01	0,41
L2	0,04	0,29	0,03	0,01	0,37
L3	0,03	0,32	0,03	0,01	0,38
L4	0,05	0,32	0,03	0,01	0,40
L5	0,04	0,37	0,03	0,01	0,44
L6	0,05	0,41	0,03	0,01	0,50
L7	0,05	0,37	0,03	0,01	0,45
L8	0,06	0,41	0,04	0,01	0,52
L9	0,05	0,40	0,03	0,01	0,49
L10	0,05	0,45	0,04	0,01	0,55
Rata-rata ($\bar{x}$)	0,04	0,37	0,03	0,01	0,45
SD	0,01	0,05	0,00	0,00	0,06

Resiko Ekologis

Berdasarkan hasil perhitungan *Ecological Risk Index* (RI) yang berkisar antara 0,37-0,55 (Tabel 3), seluruh nilai berada jauh di bawah kategori risiko rendah ($RI < 150$) berdasarkan klasifikasi (Hakanson, 1980). Hal ini mengindikasikan bahwa tingkat risiko ekologis dari akumulasi logam berat di sedimen sangat rendah. Rendahnya nilai RI menunjukkan bahwa kontribusi toksisitas logam terhadap biota dasar laut bersifat minimal. Jika dibandingkan dengan baku mutu yang ditetapkan oleh *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME, 2001) konsentrasi Pb, As, Co, dan Cr berada jauh di bawah nilai *Interim Sediment Quality Guidelines* (ISQG). Nilai Pb berkisar antara 0,10–0,23 mg.kg⁻¹, As antara 0,38–0,59 mg.kg⁻¹, Co antara 0,10–0,14 mg.kg⁻¹, dan Cr antara 0,25–0,58 mg.kg⁻¹. Jika dibandingkan dengan ambang ISQG, yaitu: 30,2 mg.kg⁻¹ untuk Pb; 7,24 mg.kg⁻¹ untuk As; 17 mg.kg⁻¹ untuk Co; dan 52,3 mg.kg⁻¹ untuk Cr, maka konsentrasi seluruh logam berat tersebut berada jauh di bawah ambang batas efek biologis minimal. Dengan demikian, potensi risiko toksik terhadap biota bentik, seperti: polichaeta, bivalvia, dan *deposit feeder* lainnya sangat kecil; karena bioavailabilitas logam di sedimen tergolong rendah (Jankowska *et al.*, 2024; El-Sharkawy *et al.*, 2025).

Secara spasial, nilai RI menunjukkan peningkatan yang relatif kecil dari stasiun L2 (0,37) ke L9 (0,55). Dengan demikian, sedimen di Estuari Sungai Comal tergolong tidak tercemar secara signifikan oleh logam berat dan belum menimbulkan potensi efek toksik terhadap biota bentik yang berasosiasi dengan sedimen. Hal ini

berakitan dengan peran sedimen sebagai penyerap sementara (*temporary sink*) bagi logam berat, yang secara ekologis mampu meminimalkan bioavailabilitas logam bagi biota dasar.

KESIMPULAN

Sedimen permukaan di Estuari Sungai Comal didominasi oleh fraksi halus dengan kandungan bahan organik yang tergolong kategori sedang. Distribusi logam berat menunjukkan bahwa unsur As memiliki konsentrasi tertinggi yang diikuti oleh Cr, Pb, dan Co dengan kisaran nilai yang relatif rendah. Secara spasial, konsentrasi logam berat cenderung meningkat ke arah laut, mengindikasikan adanya akumulasi logam di sedimen akibat pengaruh transportasi dan deposisi di zona pecah gelombang daripada sumber masukan daratan. Konsentrasi logam Pb, As, Co, dan Cr dalam sedimen Estuari Sungai Comal berada jauh di bawah ambang batas ISQG sedimen laut yang menandakan kondisi lingkungan yang belum tercemar. Nilai $CF < 1$, $I_{geo} \leq 0$, dan $PLI < 1$ pada seluruh stasiun memperkuat bahwa sedimen tergolong dalam kategori kontaminasi rendah dan tidak tercemar. Nilai indeks risiko ekologi menunjukkan risiko yang sangat rendah secara spasial dan seragam pada seluruh stasiun. Kondisi ini menunjukkan logam berat termobilisasi dalam sedimen dan belum menimbulkan dampak pada ekologi perairan. Walaupun demikian, perlu dilakukan pemantauan secara berkala terhadap konsentrasi logam berat akibat tingginya dinamika Estuari Sungai Comal, seperti: pasang surut, limpasan daratan, dan aktivitas antropogenik. Spesiasi kimia logam dan bioavailabilitas terhadap

biota bentik perlu dianalisis lebih lanjut untuk memperkuat hubungan antara proses geokimia sedimen dan dampak ekologis jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Produktivitas dan Lingkungan Perairan IPB University dan *Integrated Laboratory of Bioproduct* Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas penyediaan fasilitas penelitian, bantuan analisis laboratorium, dan dukungan ilmiah yang berkontribusi terhadap penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adidharma, M.A., Takarina, N.D., Supriatna, S., Emiyarti, E., & Pratikino, A.G. 2023. Sebaran dan Kontaminasi Logam Berat Nikel (Ni) pada sedimen di pesisir Desa Tapuemea dan Tapunggaya, Kabupaten Konawe Utara, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Kelautan Nasional*, 18(3): 233–242. doi: 10.15578/jkn.v18i3.13234
- Aini, F.N., Indarjo, A., Zainuri, M., Endrawati, H., Redjeki, S., Pribadi, R., Setiyono, H., Anugroho, A., & Suryoputro, D. 2024. Total Suspended Solid Concentration Dynamics and Distribution Based on Geospatial Models in Mojo River Estuary, Pemalang. *Buletin Oseanografi Marina*, 13(2): 303–310. doi: 10.14710/buloma.v13i2.64406
- Alisa, C.A.G., Albirqi P, M.S., & Faizal, I. 2020. Kandungan Timbal dan Kadmium pada Air dan Sedimen di Perairan Pulau Untung Jawa, Jakarta. *Akuatika Indonesia*, 5(1): 21–26. doi: 10.24198/jaki.v5i1.26523
- Ardila, P.A.R., Alonso, R.Á., Valsero, J.J.D., García, R.M., Cabrera, F.Á., Cosío, E.L., & Laforet, S.D. 2023. Assessment of Heavy Metal Pollution in Marine Sediments From Southwest of Mallorca Island, Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7): 16852–16866. doi: 10.1007/s11356-022-25014-0
- Astjario, P. & Darlan, Y. 2016. Penelitian Dinamika Pesisir Muara Sungai Comal dan Sekitarnya, Jawa Tengah, Ditunjang oleh Penafsiran Data Foto Udara dan Citra Satelit. *Jurnal Geologi Kelautan*, 7(1): 1–10. doi: 10.32693/jgk.7.1.2009.165
- Barbieri, M. 2016. The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. *Journal of Geology & Geophysics*, 5(1): 1000237. doi: 10.4172/2381-8719.1000237
- Bayhaqi, A. & Dunga, C.M.A. 2015. Distribusi Butiran Sedimen di Pantai Dalegan, Gresik, Jawa Timur. *Depik*, 4(3): 153–159. doi: 10.13170/depik.4.3.3054
- Buhari, T.R. & Ismail, A. 2016. Heavy Metals Pollution and Ecological Risk Assessment in Surface Sediments of West Coast of Peninsular Malaysia. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(10): 750–756. doi: 10.18178/ijesd.2016.7.10.874
- Dierrisska, P.H.N., Maslukah, L., Rochaddi, B., & Zainuri, M. 2024. Distribusi Logam Berat (Pb dan Cd) Sedimen di Perairan Pantai Loji Pekalongan, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 13(3): 568–576. doi: 10.14710/jmr.v13i3.45041
- El-Sharkawy, M., Alotaibi, M.O., Li, J., Du, D., & Mahmoud, E. 2025. Heavy Metal Pollution in Coastal Environments: Ecological Implications and Management Strategies: a Review. *Sustainability*, 17(2): 701. doi: 10.3390/su17020701
- Fernandes, L.L. & Nayak, G.N. 2012. Geochemical Assessment in a Creek Environment in Mumbai, West Coast of India. *Environmental Forensics*, 13(1): 45–54. doi: 10.1080/15275922.2011.643340
- Fitroh, I.S., Subardjo, P., & Maslukah, L. 2019. Hubungan Logam Berat Pb terhadap Fraksi Sedimen dan Bahan Organik di Muara Sungai Tiram, Marunda, Jakarta Utara. *Buletin Oseanografi Marina*, 8(2): 61–66. doi: 10.14710/buloma.v8i1.25209
- Flemming, B.W. 2012. Geology, Morphology, and Sedimentology of Estuaries and Coasts. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 3: 7–38. doi: 10.1016/B978-0-12-374711-2.00302-8
- 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. doi: 10.1007/BF02484715
- Guo, W., Liu, X., Liu, Z., & Li, G. 2010. Pollution and Potential Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in the Sediments Around Dongjiang Harbor, Tianjin. *Procedia*

- Environmental Sciences*, 2: 729–736. doi: 10.1016/j.proenv.2010.10.084
- Gurning, M., Nedi, S., & Tanjung, A. 2020. Sediment Organic Matter and Makrozoobenthos Abundance in Waters of Purnama Dumai. *Asian Journal of Aquatic Sciences*, 2(3): 214–223. doi: 10.31258/ajaoas.2.3.214-223
- Hakanson, L. 1980. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach. *Water Research*, 14(8): 975–1001. doi: 10.1016/0043-1354(80)90143-8
- Haryati, A., Fikriyya, N., & Prihatiningsih, I. 2024. Estimasi Simpanan Karbon Organik pada Ekosistem Mangrove di Desa Mojo, Kecamatan Ulujami, Pemalang. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 16(1): 75–88. doi: 10.29244/jitkt.v16i1.51920
- Haryati, A., Prartono, T., & Hindarti, D. 2022. Konsentrasi Merkuri (Hg) di Sedimen Perairan Cirebon, Jawa Barat pada Musim Peralihan Timur. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 14(3): 321–335. doi: 10.29244/jitkt.v14i3.33788
- Hassaan, M.A., Dardeer, A.G., & El Nemr, A. 2025. Elements Pollution and Ecological Risk Assessment of Coastal Sediments Along the Nile Delta. *Scientific Reports*, 15(1): 20222. doi: 10.1038/s41598-025-06801-4
- Huang, W.H., Chang, Y.J., Wu, R.M., Chang, J.S., Chuang, X.Y., & Lee, D.J. 2023. Type-Wide Biochars Loaded with Mg/Al Layered Double Hydroxide as Adsorbent for Phosphate and Mixed Heavy Metal Ions in Water. *Environmental Research*, 224: 115520. doi: 10.1016/j.envres.2023.115520
- Jankowska, E., Montserrat, F., Romaniello, S.J., Walworth, N.G., & Andrews, M.G. 2024. Metal Bioaccumulation and Effects of Olivine sand Exposure on Benthic Marine Invertebrates. *Chemosphere*, 358: 142195. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.142195
- Jiang, L., Hu, L., Bai, Y., Du, J., Bi, N., Wu, X., Sun, X., Guo, Z., Wang, H., & Yang, Z. 2024. Coupled Impact of Climate Change and Anthropogenic Activity on the Changes of Terrestrial Organic Carbon Accumulation in the River-Dominated Coastal Margin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129(12): e2024JC021114. doi: 10.1029/2024JC021114
- Kabir, M.H., Kormoker, T., Islam, M.S., Khan, R., Shammi, R.S., Tusher, T.R., Proshad, R., Islam, M.S., & Idris, A.M. 2021. Potentially Toxic Elements in Street dust from an urban city of a developing country: ecological and probabilistic health risks assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40): 57126–57148. doi: 10.1007/s11356-021-14581-3
- Latupeirissa, C.M.E., Haryati, A., Winanto, T., Fikriyya, N., Prihatiningsih, I., Januar, H.I., & Putri, W.A.E. 2025. Lead (Pb) Contamination in Sediments and the Potential of Gastropods as Bioindicators of Pb in Mangrove Forests, Mojo Village, Pemalang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 28(1): 139–150. doi: 10.14710/jkt.v28i1.25143
- Lin, J., Fu, Z., Yao, J., Wei, X., Wang, D., Ning, D., & Chen, M. 2022. Behavior of Iron and Other Heavy Metals in Passivated Sediments and the Coupling Effect on Phosphorus. *Science of The Total Environment*, 808: 152151. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152151
- Liu, Y., Kuang, W., Sun, X., Wang, W., Lin, C., & Lin, H. 2024. Fractionation, Spatial Distribution, Ecological and Health Risk Assessment of Cobalt and Nickel in Surface Sediment of a Bay Along the Southeast Coast of China. *Marine Pollution Bulletin*, 206: 116786. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116786
- Looi, L.J., Aris, A.Z., Yusoff, F.M., Isa, N.M., & Haris, H. 2019. Application of Enrichment Factor, Geoaccumulation Index, and Ecological Risk Index in Assessing The Elemental Pollution Status of Surface Sediments. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(1): 27–42. doi: 10.1007/s10653-018-0149-1
- Mathew, R. & Winterwerp, J.C. 2020. Sediment Dynamics and Transport Regimes in a Narrow Microtidal Estuary. *Ocean Dynamics*, 70(4): 435–462. doi: 10.1007/s10236-020-01345-9
- Najamuddin, N., Tahir, I., Paembonan, R.E., & Inayah, I. 2020. Pengaruh Karakteristik Sedimen Terhadap Distribusi dan Akumulasi Logam Berat Pb dan Zn di Perairan Sungai, Estuaria, dan Pantai. *Jurnal Kelautan Tropis*, 23(1): 1-14. doi: 10.14710/jkt.v23i1.5315
- Nugraha, M.A., Akhrianti, I., Pratiwi, F.D., & Priyambada, A. 2023. Geokimia dan Asesmen Pencemaran Logam Berat Cd, Cu dan Zn pada Sedimen Permukaan Estuari Baturusa, Bangka. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(1): 35–48. doi: 10.14710/jkt.v26i1.16467

- Nugraha, M.A., Pamungkas, A., Syari, I.A., Sari, S.P., Umroh, U., Hudatwi, M., Utami, E., Akhrianti, I., & Priyambada, A. 2022. Penilaian Pencemaran Logam berat Cd, Pb, Cu, dan Zn pada Sedimen Permukaan Perairan Matras, Sungailiat, Bangka. *Jurnal Kelautan Tropis*, 25(1): 70–78. doi: 10.14710/jkt.v25i1.12317
- Nurjanah, S., Nazwasyawinka, K., Abrar, C.B., Nasution, I.A., Dida, E.N., Sasongko, A.S., Widiyanto, K., & Cahyarini, S.Y. 2025. Kandungan Logam Berat Besi (Fe) pada Sedimen Ekosistem Terumbu Karang di Perairan Pulau Kalih Selatan Banten. *Buletin Oseanografi Marina*, 14(2): 231–240. doi: 10.14710/buloma.v14i2.69313
- Onjefu, S.A., Shaningwa, F., Lusilao, J., Abah, J., Hess, E., & Kwaambwa, H.M. 2020. Assessment of Heavy Metals Pollution in Sediment at the Omaruru River Basin in Erongo Region, Namibia. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 32(1): 187–193. doi: 10.1080/26395940.2020.1842251
- Pahlevi, M.R., Poedjirahajoe, E., Mahayani, N.P.D., Jihad, A.N., & Satria, R.A. 2024. Struktur Vegetasi Mangrove di Pantai Utara Mojo Pemalang Jawa Tengah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(2): 431–438. doi: 10.14710/jil.22.2.431-438
- Polapa, F.S., Annisa, R.N., Yanuarita, D., & Ali, S.M. 2022. Quality Indeks dan Konsentrasi Logam Berat dalam Perairan dan Sedimen di Perairan Kota Makassar. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2): 271–278. doi: 10.14710/jil.20.2.271-278
- Pradhan, U.K., Mishra, P., Mohanty, P.K., Panda, U.S., & Ramanamurthy, M.V. 2020. Modeling of Tidal Circulation and Sediment Transport Near Tropical Estuary, East Coast of India. *Regional Studies in Marine Science*, 37: 101351. doi: 10.1016/j.rsma.2020.101351
- Puspita, L.V.J., Norma, A., & Purnomo, P.W. 2018. Kelayakan Kualitas Air bagi Beberapa Peruntukan di Kawasan Pesisir (Studi Kasus: Desa Pesantren dan Desa Mojo, Kecamatan Ulujami Kabupaten Pemalang). *Management of Aquatic Resources Journal*, 7(1): 110–120. doi: 10.14710/marj.v7i1.22531
- Putri, P.Y.A., Rastina, Prartono, T., & Ismet, M.S. 2024. Heavy Metals Concentration in Sediment and Their Bioaccumulation in Several Organisms in Benoa Bay and Lembongan Island, Bali, Indonesia. *Biodiversitas*, 25(7): 3230–3238. doi: 10.13057/biodiv/d250744
- Putri, W.A.E., Meiyerani, J., Ulqodry, T.Z., Aryawati, R., Purwiyanto, A., Rozirwan, R., & Suteja, Y. 2025. 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. doi: 10.12911/22998993/197413
- Putri, W.A.E., Purwiyanto, A.I.S., Diansyah, G., Rozirwan, R., Fauziyah, F., Agustriani, F., Haryati, A., & Gusri, A.A. 2024. Logam Berat Cd di Sungai Musi Bagian Hilir, Sumatera Selatan. *Buletin Oseanografi Marina*, 13(1): 13–20. doi: 10.14710/buloma.v13i1.56751
- Que, W., Yi, L., Wu, Y., & Li, Q. 2024. Analysis of Heavy Metals in Sediments with Different Particle Sizes and Influencing Factors in a Mining Area in Hunan Province. *Scientific Reports*, 14(1): 1–12. doi: 10.1038/s41598-024-71502-3
- Retnosari, F.D., Andriyono, S., & Dewi, N.N. 2024. Bioaccumulation of Heavy Metals Lead, Copper, and Zinc in Mangrove Roots *Avicennia marina*, Water, and Sediment in Panceng Waters, Gresik, Jawa Timur. *Journal of Marine and Coastal Science*, 13(2): 78–92. doi: 10.20473/jmcs.v13i2.52524
- Shafie, N.A., Aris, A.Z., Zakaria, M.P., Haris, H., Lim, W.Y., & Isa, N.M. 2013. Application of Geoaccumulation Index and Enrichment Factors on The Assessment of Heavy Metal Pollution in the Sediments. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 48(2): 182–190. doi: 10.1080/10934529.2012.717810
- Spahić, M.M.P., Sakan, S.M., Glavaš-trbić, B.M., Tančić, P.I., Škrivanj, S.B., Kovačević, J.R., & Manojlović, D.D. 2019. Natural and Anthropogenic Sources of Chromium, Nickel and Cobalt in Soils Impacted by Agricultural and Industrial Activity (Vojvodina, Serbia). *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54(3): 219–230. doi: 10.1080/10934529.2018.1544802
- Sukarjo, S., Zulaehah, I., Harsanti, E., & Ardiwinata, A. 2021. Penilaian Spasial Potensi Risiko Ekologis Logam Berat di Lapisan olah Tanah Sawah DAS Serayu Hilir,

- Jawa Tengah. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 45(1): 69–77. doi: 10.21082/jti.v45n1.2021.69-77
- Suryono, C.A. & Rochaddi, B. 2017. Deteksi Logam Berat di Kawasan Wilayah Pesisir Semarang. *Buletin Oseanografi Marina*, 6(1): 69–73. doi: 10.14710/buloma.v6i1.15745
- Susantoro, T.M., Sunarjanto, D., & Andayani, A. 2015. Distribusi Logam Berat pada Sedimen di Perairan Muara dan Laut Propinsi Jambi. *Jurnal Kelautan Nasional*, 10(1): 1–11. doi: 10.15578/jkn.v10i1.4
- Syakti, A.D., Demelas, C., Hidayati, N.V., Rakasiwi, G., Vassalo, L., Kumar, N., Prudent, P., & Doumenq, P. 2015. Heavy Metal Concentrations in Natural and Human-Impacted Sediments of Segara Anakan Lagoon, Indonesia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(1): 4079. doi: 10.1007/s10661-014-4079-9
- Wahyuningsih, S., Fatimuzzahroh, F., & Gitarama, A.M. 2021. Distribution and Estimation of Heavy Metal (Pb) Contamination Levels in the Water and Sediment Bondet Estuary, Cirebon. *Aquasains*, 9(2): 923–936. doi: 10.23960/aqs.v9i2.p923-936
- Wang, Z., Lin, K., & Liu, X. 2022. Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediment of the Yellow River Estuary, China. *Marine Pollution Bulletin*, 174: 113286. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.113286
- Wilkes, M.A., Gittins, J.R., Mathers, K.L., Mason, R., Casas-Mulet, R., Vanzo, D., McKenzie, M., Murray-Bligh, J., England, J., Gurnell, A., & Jones, J.I. 2019. Physical and Biological Controls on Fine Sediment Transport and Storage in Rivers. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(2): e1331. doi: 10.1002/wat2.1331
- Yao, W., Hu, C., Yang, X., & Shui, B. 2021. Spatial Variations and Potential Risks of Heavy Metals in Sediments of Yueqing Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 173: 112983. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112983
- Zhang, M., Xian, S., Yuan, H., Guo, C., & Jilin, X. 2022. The Influence of Anthropogenic Activities on Heavy Metal Pollution of Estuary Sediment from The Coastal East China Sea in the Past Nearly 50 Years. *Marine Pollution Bulletin*, 181: 113872. doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113872
- Zhang, Y., Li, H., Yin, J., & Zhu, L. 2021. Risk Assessment for Sediment Associated Heavy Metals Using Sediment Quality Guidelines Modified by Sediment Properties. *Environmental Pollution*, 275: 115844. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115844
- Zheng, J., Xie, Y., Ping, Y., Xu, H., Li, Q., Liao, Q., Li, Q., Yang, Z., Yang, W., & Si, M. 2024. Crystal Phase Conversion of Amorphous Fe–Mn Binary Oxides Promote the Sequestration and Redistribution of Arsenic, Cadmium, and Lead in the Soil: Comparison with Crystalline Form. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5): 113342. doi: 10.1016/j.jece.2024.113342