

Kontaminasi Kadmium (Cd) serta Analisis Risiko Kesehatan Manusia melalui Konsumsi Kerang Tahu (*Meretrix* spp.) di Pesisir Bangkalan

Muhammad Naufal Nurrisal, Eka Nurrahema Ning Asih, Ary Giri Dwi Kartika*

Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo Madura
Jl. Jl. Raya Telang, PO BOX 02 Kecamatan Kamal, Bangkalan Jawa Timur 69162
Email: arygiri.dwikartika@trunojoyo.ac.id

Abstract

Cadmium (Cd) Contamination and Human Health Risk Assessment through Consumption of Venus Clams (*Meretrix* spp.) in the Bangkalan Coastal Area

Venus clams are a fishery commodity on the coast of Bangkalan and a source of animal protein for the local people. However, the accumulation of cadmium in these clams could pose a health risk to humans through consumption. Therefore, this study aims to assess the level of cadmium contamination in the environment and analyze the health risks of consuming venus clams on the coast of Bangkalan. Seawater, sediment, and venus clams samples were taken at two stations (Bancaran and Sambilangan) in the coastal area of Bangkalan, then analyzed for cadmium (Cd) content using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The analysis results showed that cadmium in seawater at Bancaran Station (0.003 mg/L) and Sambilangan Station (0.008 mg/L) had exceeded the quality standard threshold. Conversely, the cadmium content in sediment and venus clams at both stations was still below the threshold. Based on Target Hazard Quotients (THQ) and Estimated Weekly Intakes (EWI), consumption of tofu clams from both stations did not pose a health risk.

Keywords: Bioaccumulation Factor; Target Hazard Quotients; Estimated Weekly Intakes; Sambilangan; Bancaran

Abstrak

Kerang tahu banyak dimanfaatkan sebagai komoditas perikanan di pesisir Bangkalan dan menjadi salah satu sumber protein hewani bagi masyarakat setempat. Namun, akumulasi kadmium dalam kerang tersebut dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia melalui konsumsi. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menilai tingkat cemaran kadmium pada lingkungan serta menganalisis risiko kesehatan dari konsumsi kerang tahu di Pesisir Bangkalan. Pengambilan sampel air laut, sedimen dan kerang laut dilakukan di dua stasiun (Bancaran dan Sambilangan) di lingkup pesisir Bangkalan, kemudian dilakukan analisis kandungan kadmium (Cd) dengan menggunakan alat Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). Hasil analisis menunjukkan kadmium pada air laut di Stasiun Bancaran (0,003 mg/L) dan Sambilangan (0,008 mg/L) telah melebihi ambang batas baku mutu. Sebaliknya kandungan kadmium di sedimen dan kerang tahu pada kedua stasiun masih dibawah ambang batas. Berdasarkan Target Hazard Quotients (THQ) dan Estiamted Weekly Intakes (EWI), konsumsi kerang tahu di kedua stasiun tidak berisiko terhadap kesehatan.

Kata kunci: Bioaccumulation Factor; Target Hazard Quotients; Estimated Weekly Intakes; Sambilangan; Bancaran

PENDAHULUAN

Kadmium memiliki massa molar relatif tinggi, yaitu 112,41 g/mol (lebih besar dibandingkan tembaga 63,5 g/mol), sehingga diklasifikasikan sebagai salah satu unsur logam berat (Meija *et al.*, 2016). Kadmium (Cd) merupakan unsur yang termasuk dalam logam dimana kadmium tersebut memiliki sifat toksik. Sifat toksik ini disebabkan karena kadmium merupakan logam non-esensial sehingga berbahaya bagi organisme akuatik dan manusia jika terakumulasi di dalam tubuhnya (Das *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2022). Selanjutnya ditambahkan, World Health Organization (WHO) mengklasifikasikan kadmium sebagai grup 1 bahan kimia toksik yang bersifat karsinogenik terhadap manusia (Nordberg *et al.*, 2018). Paparan kadmium dalam jangka waktu yang lama dapat menimbulkan resiko kesehatan penyakit ginjal kronis (Zhao *et al.*, 2023), kerusakan tulang (Charkiewicz *et al.*, 2023) dan penyakit paru-paru (Peana *et al.*, 2022).

Kadmium di lingkungan laut tidak hanya terdapat di air namun juga terkandung di sedimen laut (Bryan *et al.*, 2021). Hal tersebut disebabkan kadmium dapat teradsorpsi kuat pada partikel sedimen tersuspensi sehingga mempercepat proses pengendapannya ke dasar laut (Fu & Allen, 1992). Akumulasi kadmium dalam sedimen tidak hanya mencemari dasar perairan, tetapi juga

*) Corresponding author
www.ejournal2.undip.ac.id/index.php/jkt

berdampak langsung pada organisme bentik yang hidup menetap dan bersentuhan dengan sedimen serta air tercemar yang terbawa ke wilayah pesisir (Yona *et al.*, 2021). Sebagian besar akumulasi logam berat dalam perairan disebabkan oleh intensitas aktivitas manusia yang memicu rentannya wilayah pesisir terhadap berbagai bentuk pencemaran lingkungan, terutama pencemaran logam berat (El-Sharkawy *et al.*, 2025). Di Kabupaten Bangkalan, terdapat dua kawasan pesisir yang memiliki karakteristik ekologis serta aktivitas antropogenik yang berbeda, yaitu pesisir Bancaran dan Sambilangan.

Pesisir Bancaran merupakan jalur lalu lintas kapal nelayan yang berpotensi menjadi pintu masuk cemaran logam berat ke perairan laut. Meskipun demikian, pesisir bancaran memiliki ekosistem mangrove yang dapat berfungsi sebagai penyangga alami cemaran logam berat sehingga dapat menurunkan beban cemaran di wilayah ini. Berbeda dengan pesisir Bancaran, wilayah pesisir Sambilangan memiliki aktivitas antropogenik intensif seperti pelabuhan, galangan kapal, transportasi laut, dan permukiman yang padat. Aktivitas tersebut umumnya menghasilkan limbah cair maupun padat yang mengandung logam berat, termasuk logam berat kadmium (Alayyafi *et al.*, 2024). Pembuangan limbah operasional kapal, penggunaan cat anti-fouling untuk melindungi lambung kapal, serta limbah domestik dan industri menjadi sumber utama pencemaran logam berat kadmium di wilayah ini (Li *et al.*, 2025). Tingginya aktivitas ini meningkatkan potensi pencemaran lingkungan, terutama terhadap kualitas air, sedimen dan kerang yang dapat terakumulasi logam berat kadmium (Gu *et al.*, 2021).

Pesisir Sambilangan dan Bancaran merupakan tempat pencairan komoditas perikanan seperti rajungan, kepiting, dan kerang di Kabupaten Bangkalan. Salah satu komoditas yang melimpah dan di kedua pesisir tersebut adalah kerang tahu (*Meretrix* spp.). Dikarenakan hasil tangkapan kerang tahu yang melimpah sepanjang tahun dengan harga yang terjangkau, menjadikan kerang tahu menjadi sumber protein hewani utama yang banyak dikonsumsi oleh warga sekitar Bangkalan (Putri *et al.*, 2025; Rohmah & Muhsoni, 2020). Kerang ini dikonsumsi dalam bentuk olahan sederhana yaitu direbus dan diolah menjadi produk saus kerang tahu (Salsabila *et al.*, 2025). Namun demikian, kerang tahu memiliki kemampuan bioakumulasi logam berat yang tinggi karena mekanisme cara makannya yang menyaring air laut (*filter feeder*) dan kontak langsung dengan sedimen yang tercemar. Kondisi tersebut menjadikan kerang tahu berisiko terkontaminasi logam berat seperti kadmium, yang jika dikonsumsi berisiko menyebabkan gangguan kesehatan pada manusia (Yona *et al.*, 2021). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat cemaran kadmium pada berbagai media lingkungan, seperti air laut, sedimen, dan kerang, serta menganalisis estimasi risiko kesehatan yang dapat ditimbulkan dari konsumsi kerang tahu yang terkontaminasi kadmium di pesisir Bancaran dan Sambilangan.

MATERI DAN METODE

Pengambilan sampel air, sedimen dan kerang tahu dilakukan pada Mei 2025 di dua stasiun, yaitu stasiun Bancaran dan Sambilangan. Lokasi ini dipilih karena memiliki karakteristik lingkungan pesisir serta potensi sumber cemaran kadmium yang berbeda. Stasiun Bancaran merupakan kawasan pesisir yang terdapat muara sungai serta aktivitas manusia berupa penangkapan ikan oleh nelayan setempat. Aktivitas penangkapan ikan dan *run off* dari sungai tersebut dapat menjadi sumber masuknya kadmium ke laut (Yang *et al.*, 2018). Disamping memiliki sumber cemaran kadmium, stasiun Bancaran juga memiliki ekosistem mangrove yang diduga dapat menurunkan beban cemaran cadmium di wilayah perairan tersebut. Stasiun Sambilangan memiliki aktivitas manusia seperti pelabuhan kapal nelayan, galangan kapal dan lalu lintas perairan yang berpotensi mencemari perairan dengan kadmium (Guimarães *et al.*, 2022). Kondisi tersebut membuat stasiun Sambilangan menghadapi risiko tinggi terhadap cemaran kadmium akibat intensitas aktivitas manusia dan minimnya penyangga alami.

Setiap stasiun terdiri dari 3 titik pengambilan sampel. Penentuan titik pengambilan sampel ini berdasarkan pertimbangan yang telah ditentukan. Tiga titik pada stasiun Bancaran mewakili

perairan yang dekat dengan vegetasi mangrove. Sedangkan 3 titik pada stasiun sembilangan diasumsikan mewakili daerah perairan yang dekat dengan sumber cemaran kadmium (galangan kapal). Peta dan koordinat mengenai stasiun pengambilan sampel ditampilkan pada Gambar 1.

Pengambilan sampel dilakukan pada saat musim panen kerang tahu, hal tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa sampel yang diperoleh merepresentasikan kondisi lingkungan saat aktivitas panen sedang berlangsung secara intensif, sehingga hasil analisis dapat mencerminkan tingkat paparan cemaran yang mungkin masuk ke rantai makanan laut pada periode tersebut. Sampel yang dikumpulkan meliputi air laut, sedimen dasar, dan biota kerang tahu (*Meretrix* spp.). Sampel air laut diambil dengan menggunakan gayung bertangkai, kemudian dimasukkan ke dalam botol polietilen dan ditambahkan beberapa tetes HNO_3 pekat ($\text{pH} < 2$) yang berfungsi untuk pengawetan sampel. Pengambilan sampel sedimen laut dilakukan berdasarkan prosedur SNI 6989.72:2009 (BSN, 2009b). Sedimen laut diambil secara manual menggunakan sekop kemudian dimasukkan ke dalam kantong plastik kedap udara (*ziplock*) dengan bobot sekitar ± 1 kg untuk setiap titik sampel. Selanjutnya, pengambilan sampel kerang tahu dilakukan secara manual dengan memilih individu yang tampak sehat dan representatif. Kemudian, sampel kerang dimasukkan ke dalam kantong plastik kedap udara (*ziplock*) yang telah diberi label. Seluruh sampel air, sedimen dan kerang disimpan dalam kotak pendingin (*cool box*) berisi es hingga proses analisis di laboratorium.

Analisis kandungan kadmium pada air laut mengacu pada SNI 6869.16:2009 (BSN, 2009a), sedimen merujuk pada SNI 06-6992.4-2004 (BSN, 2004), serta pada kerang tahu mengikuti SNI 2354.5:2011 (BSN, 2011), selanjutnya sampel yang telah dipreparasi dianalisis dengan AAS (Thermo Fisher Scientific iCE 3000 series). Kandungan kadmium pada air, sedimen dan kerang tahu secara berurutan akan dibandingkan dengan baku mutu PP No. 22 Tahun 2021, ANZECC / ARMCANZ (2000) dan SNI 7387:2009. Jika konsentrasi aktual melampaui baku mutu, maka dianggap tercemar.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Penilaian tingkat cemaran kadmium pada sedimen dilakukan dengan menggunakan Indeks geoakumulasi (I_{geo}) yang dikembangkan oleh Muller (1969) dan nilai *Contamination Factor* (CF). I_{geo} didapatkan melalui persamaan:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right)$$

Dimana, C_n adalah Konsentrasi logam dalam sedimen yang terukur (mg/kg); B_n adalah background value kadmium (0,3 ppm) menurut Karl (1961); dan 1.5 adalah Faktor koreksi untuk mengatasi variasi geokimia alami. Kategori tingkatan cemaran berdasarkan I_{geo} disajikan pada Tabel 1.

Nilai CF didapatkan melalui persamaan berikut:

$$CF = \frac{C_{sedimen}}{B_b}$$

Contamination Factor (CF) dikategorikan menjadi 4 tingkatan yang disajikan pada Tabel 2.

Ecological Risk (ER) adalah suatu pendekatan kuantitatif yang digunakan untuk menilai tingkat potensi bahaya logam berat terhadap organisme akuatik melalui kontaminasi di sedimen. Pendekatan ini sangat efektif untuk mengevaluasi potensi dampak jangka panjang dari Cd di lingkungan benthik, seperti yang dilakukan oleh Gu *et al.* (2021). Berikut adalah persamaan ER.

$$ER = TR \times Cf = TR \times \left(\frac{C_{sedimen}}{B_n} \right)$$

Dimana faktor toksisitas biologis untuk logam berat, didefinisikan sebagai 30 untuk kadmium. Nilai $ER < 40$ menunjukkan risiko ekologi rendah akibat pencemaran logam; $40 \leq ER < 80$, yang menunjukkan risiko ekologi sedang; $80 \leq ER < 160$, yang menunjukkan risiko ekologi cukup besar; $160 \leq ER < 320$ - risiko ekologi tinggi; ≥ 320 - risiko ekologi sangat tinggi (Gu *et al.*, 2021; Hakanson, 1980).

Tabel 1. Kategori Indeks Geoakumulasi

Nilai I_{geo}	Kategori
$I_{geo} < 1$	Tidak tercemar
$1 < I_{geo} < 2$	Tercemar Sangat Sedikit
$2 < I_{geo} < 3$	Tercemar Sedikit
$3 < I_{geo} < 4$	Tercemar Sedang
$4 < I_{geo} < 5$	Tercemar Tinggi
$5 < I_{geo}$	Tercemar Sangat Tinggi

Tabel 2. Kategori *Contamination Factor* (CF)

Rentang <i>Contamination Factor</i> (CF)	Kategori
$CF < 1$	Terkontaminasi rendah
$1 < CF < 3$	Terkontaminasi sedang
$3 < CF < 6$	Terkontaminasi cukup tinggi
$CF > 6$	Terkontaminasi tinggi

* Hakanson (1980)

Bio-Water Accumulation Factor (BWAf) adalah rasio antara konsentrasi logam berat yang terakumulasi dalam jaringan biota terhadap konsentrasi logam berat dalam air. Nilai BWAf memberikan gambaran tentang kemampuan biota dalam mengakumulasi logam berat dari lingkungan perairannya. BWAf dihitung menggunakan persamaan:

$$BWAf = \frac{C_{biota}}{C_{air}}$$

Dimana C biota adalah konsentrasi kontaminan kadmium dalam organisme (biasanya dinyatakan dalam mg/kg atau µg/g berat kering); dan C air Konsentrasi kadmium dalam air laut (biasanya dalam mg/L atau µg/L). Berdasarkan nilai BWAf organisme dinyatakan mengakumulasi logam berat secara lemah jika $BWAf < 100$ (Thomann *et al.*, 1992; Zhang *et al.*, 2015)

Bio Sediment Accumulation Factor (BSAF) adalah suatu rasio yang digunakan untuk menggambarkan tingkat akumulasi logam berat dari sedimen ke dalam biota perairan. BSAF dihitung dengan menggunakan persamaan.

$$BSAF = \frac{C_{biota}}{C_{sedimen}}$$

Dimana, C sedimen adalah konsentrasi logam berat dalam sedimen (mg/kg). Jika $BSAF < 1$ mengindikasikan biota mampu mengakumulasi logam berat secara lemah (Thomann *et al.*, 1992; Zhang *et al.*, 2015).

Target Hazard Quotient (THQ) adalah parameter yang digunakan untuk menilai risiko kesehatan manusia terhadap paparan logam berat melalui konsumsi makanan, terutama makanan laut. THQ dan *Estimated Daily Intake* (EDI) dihitung melalui persamaan:

$$THQ = EDI / RfD$$

Dengan:

$$EDI = \frac{C_{biota} \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

Dimana RfD adalah *Reference Dose*, dosis referensi oral harian yang aman (untuk Cd = 1×10^{-3} mg/kg/hari; Cbiota adalah Konsentrasi logam dalam organisme laut (mg/kg); IR adalah Laju konsumsi (*Ingestion Rate*), jumlah kerang tahu yang dikonsumsi (diasumsikan dari ikan laut segar) adalah 0,359 kg/minggu (BPS, 2024). Sehingga laju konsumsi kerang tahu sebesar 0,051 kg/hari; EF adalah frekuensi paparan (*Exposure Frequency*), 365 hari/tahun; ED adalah durasi paparan (*Exposure Duration*) yaitu 68,3 tahun, nilai tersebut diasumsikan dari rata-rata umur (jangka hidup) kedua jenis kelamin di Indonesia yang diprediksi berdasarkan data dari tahun 2000-2021 (WHO, 2021); BW adalah Berat badan rata-rata (*Body Weight*), yaitu sebesar 60,9 kg. Nilai tersebut di estimasi dari BMI (*Body Mass Index*) orang dewasa Indonesia 23,06 kg/m² (Pengpid & Peltzer, 2017) dengan asumsi tinggi badan rata-rata 160-165 cm; AT adalah waktu rata-rata (*Average Time*), yaitu $ED \times 365$ hari. Jika nilai THQ < 1, maka risiko kesehatan dianggap dapat diabaikan. Namun, jika THQ ≥ 1, ada potensi risiko kesehatan karsinogenik (USEPA, 2011).

Estimated Weekly Intake (EWI) adalah metode untuk memperkirakan jumlah logam berat yang dikonsumsi oleh manusia dalam satu minggu melalui makanan, khususnya makanan laut seperti kerang tahu. EWI digunakan untuk menilai apakah konsumsi tersebut melebihi *Provisional Tolerable Weekly Intake* (PTWI). EWI sangat berguna dalam mengevaluasi paparan kadmium kronis dan menjadi dasar pengambilan keputusan dalam kebijakan keamanan pangan laut (JECFA, 2010). Berikut rumus EWI:

$$EWI = \frac{C_{biota} \times IR}{BW}$$

Dimana, EWI = estimasi asupan mingguan (mg/kg berat badan/minggu); C= konsentrasi kadmium dalam makanan laut (mg/kg); IR= laju konsumsi (Ingestion Rate), jumlah kerang tahu yang dikonsumsi (diasumsikan dari ikan laut segar) adalah 0,359 kg/minggu (BPS, 2024); BW= berat badan rata-rata (Body Weight), yaitu sebesar 60,9 kg. Selanjutnya nilai EWI tersebut dibandingkan dengan PTWI untuk kadmium, yaitu 7 µg/kg berat badan/minggu (JECFA, 2010) sehingga setara dengan 0,007 mg/kg berat badan/minggu. Jika nilai EWI < PTWI, maka asupan masih digolongkan aman.

Analisis statistik yang digunakan pada penelitian ini adalah Uji-T untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara rata-rata konsentrasi kadmium pada sedimen laut dan kerang tahu di kedua stasiun. Selanjutnya data kadmium air laut yang tidak memiliki sebaran normal dianalisis menggunakan uji man Whitney. Nilai *p-value* < 0,05 mengindikasikan perbedaan yang signifikan secara statistik. Seluruh analisis statistik dilakukan dengan menggunakan R versi 4.3.1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel perbandingan nilai kadar kadmium air laut, sedimen laut, dan kerang tahu dengan nilai baku mutu disajikan pada Tabel 3. Kandungan kadmium pada air laut di stasiun Sambilangan (0,0077 mg/L) lebih tinggi dibandingkan Bancaran (0,0027 mg/L). Demikian pula pada sedimen, konsentrasi kadmium di Sambilangan tercatat sebesar 0,83 mg/kg, lebih tinggi daripada Bancaran yang hanya 0,548 mg/kg. Pada biota, kerang tahu di Sambilangan mengandung 0,347 mg/kg kadmium, sedangkan di Bancaran 0,205 mg/kg. Perbedaan kadar kadmium pada ketiga media tersebut terbukti berbeda signifikan secara statistik ($p < 0,05$). Meskipun kadar kadmium dalam sedimen di kedua lokasi lebih tinggi dibandingkan media air dan biota, nilai tersebut masih relatif rendah jika dibandingkan dengan sedimen di Teluk Jiaozhou, Tiongkok, yang berkisar 0,03–0,18 mg/kg (Gu *et al.*, 2021a). Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi pencemaran kadmium di pesisir Bangkalan masih dalam tingkat yang lebih rendah dibandingkan wilayah pesisir dengan aktivitas industri yang lebih intensif.

Pada air laut, konsentrasi kadmium di Bancaran ($0,003 \pm 0,00058$ mg/L) dan Sambilangan ($0,008 \pm 0,00153$ mg/L) telah melampaui batas baku mutu untuk biota laut yang telah ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah (PP) Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa perairan laut di kedua stasiun sudah terkontaminasi kadmium, dengan tingkat pencemaran yang lebih tinggi di Sambilangan. Eskalasi kadmium di Sambilangan diduga berkaitan dengan kondisi antropogenik. Aktivitas manusia seperti pelabuhan, galangan kapal serta pembuangan limbah domestik dari pemukiman dapat menjadi sumber utama masukan cemaran kadmium ke perairan (Boudia *et al.*, 2022; Sharifuzzaman *et al.*, 2016). Kondisi tingginya konsentrasi logam berat kadmium di air laut berisiko memberikan tekanan toksik terhadap organisme laut, terutama organisme *filter-feeder* seperti kerang yang sangat rentan mengakumulasi logam berat dari lingkungan perairan (Yona *et al.*, 2021). Berbeda dengan air laut, kandungan kadmium di sedimen Bancaran ($0,548 \pm 0,06504$ mg/kg) dan Sambilangan ($0,830 \pm 0,09007$ mg/kg) masih berada di bawah nilai ambang batas bawah (1,0 mg/kg) yang direkomendasikan oleh ANZECC & ARMCANZ (2000). Meskipun demikian, nilai di Sambilangan relatif mendekati ambang batas, yang menunjukkan bahwa sedimen di lokasi ini telah berperan sebagai penyimpan kadmium dalam jumlah cukup signifikan.

Kadmium memiliki afinitas tinggi terhadap partikel tersuspensi seperti lumpur halus dan bahan organik, sehingga dengan cepat terikat dan mengendap ke dasar perairan (B. Li *et al.*, 2025; Paalman *et al.*, 1994). Logam berat seperti kadmium, timbal, merkuri, dan seng sangat mudah terakumulasi di sedimen pesisir dibandingkan air laut. Hal ini terjadi karena logam berat memiliki sifat tidak stabil dalam bentuk terlarut, sehingga cenderung berikatan dengan partikel organik dan anorganik di air, lalu mengendap ke dasar perairan (Sharifuzzaman *et al.*, 2016). Sedimen berfungsi sebagai reservoir utama logam berat di ekosistem pesisir, dan konsentrasi logam berat di sedimen sering kali jauh lebih tinggi daripada di air (Anbuselvan *et al.*, 2018). Di lokasi seperti Bancaran,

keberadaan ekosistem mangrove juga berperan dalam mengurangi konsentrasi kadmium di air melalui mekanisme penyerapan logam berat oleh akar tanaman dan fiksasi pada substrat mangrove (Abdul Syukur, 2018). Oleh karena itu, meskipun sumber pencemaran kadmium masih aktif, proses alami seperti pengendapan, adsorpsi, serta penyerapan oleh vegetasi pesisir menyebabkan kadmium lebih banyak terakumulasi di sedimen daripada terdistribusi di air.

Konsentrasi kadmium pada kerang tahu juga menunjukkan pola yang konsisten dengan kondisi lingkungan. Nilai rata-rata kadmium di Bancaran ($0,205 \pm 0,03811$ mg/kg) dan Sambilangan ($0,347 \pm 0,04371$ mg/kg) masih berada di bawah ambang batas aman untuk pangan laut menurut SNI 7387:2009 (1,0 mg/kg). Meskipun demikian, akumulasi logam berat dalam jaringan biota yang bersifat filter feeder tetap perlu diawasi karena dapat menjadi jalur masuk logam berat ke rantai makanan manusia (Yona *et al.*, 2021). Selanjutnya, kandungan kadmium pada kerang di Sambilangan lebih tinggi dibandingkan Bancaran, yang menunjukkan adanya hubungan erat antara cemaran lingkungan dengan bioakumulasi pada organisme filter feeder ini. Hal ini sejalan dengan sifat biologis kerang tahu yang menyaring partikel tersuspensi dan berpotensi mengakumulasi logam berat dari air maupun sedimen.

Guna mengetahui sejauh mana kontaminasi kadmium di dalam sedimen berlangsung secara ekologis, maka perlu dilakukan penilaian lebih lanjut menggunakan pendekatan Indeks Geoakumulasi (Igeo) sebagai salah satu indikator penting dalam menilai tingkat pencemaran sedimen secara kuantitatif. Indeks geoakumulasi pada lokasi Bancaran dan Sambilangan dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil penelitian menunjukkan nilai Igeo Bancaran (0,276) dan Sambilangan (0,878) mengindikasikan kondisi yang tidak tercemar ($0 < Igeo \leq 1$), sejalan dengan konsentrasi kadmium pada sedimen yang relatif rendah (Tabel 3). Walaupun nilai Igeo Sambilangan masih dibawah ambang batas 1, namun nilainya telah mendekati kategori tercemar ringan. Kondisi ini menandakan bahwa sedimen di Sambilangan berpotensi untuk terakumulasi kadmium yang lebih tinggi dibandingkan Bancaran jika pencemaran terus berlanjut.

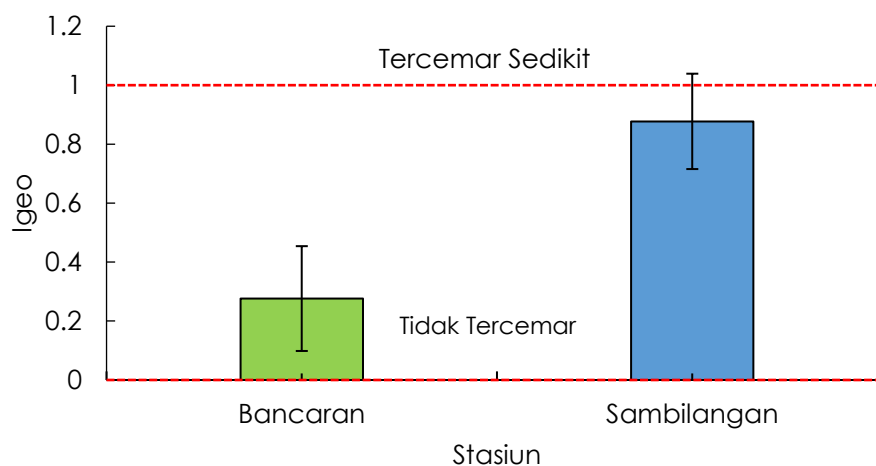
Penilaian pencemaran logam berat kadmium tidak hanya terbatas pada konsentrasi di sedimen, tetapi juga mencakup dampaknya terhadap lingkungan melalui pendekatan *Contamination Factor* (CF) dan *Ecological Risk* (ER). Kedua parameter ini saling melengkapi dalam menilai potensi bahaya kadmium terhadap ekosistem perairan di stasiun pengamatan, yaitu Bancaran dan Sambilangan. CF merupakan rasio antara konsentrasi logam berat pada sedimen dengan nilai latar belakang geokimia yang digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kontaminasi logam berat (Naik *et al.*, 2023).

Tabel 3. Perbandingan kandungan kadmium di air (mg/L), sedimen laut (mg/kg), dan kerang tahu (mg/kg) dengan standar baku mutu. Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan secara signifikan ($p < 0,05$) berdasarkan hasil uji *Man-Whitney* (air laut) dan uji-t (sedimen dan kerang tahu)

Stasiun	Jenis sampel	Kadar kadmium	Ambang batas
Bancaran	Air laut	$0,003 \pm 0,00058^a$	0,001 *
Sambilangan	Air laut	$0,008 \pm 0,00153^b$	
Bancaran	Sedimen laut	$0,548 \pm 0,06504^a$	1 (rendah)**
Sambilangan	Sedimen laut	$0,830 \pm 0,09007^b$	
Bancaran	Kerang tahu	$0,205 \pm 0,03811^a$	1,0 ***
Sambilangan	Kerang tahu	$0,347 \pm 0,04371^b$	

Keterangan: * PP No. 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk Biota Laut. **ANZECC & ARMCANZ (2000)

*** SNI 7387:2009



Gambar 2. Nilai Indeks Geoakumulasi (I_{geo}) untuk logam berat kadmium (Cd) di dua stasiun pengamatan, yaitu Bancaran dan Sambilangan.

Nilai CF kadmium di Bancaran menunjukkan rerata sebesar 1,83, sementara di Sambilangan lebih tinggi yaitu 2,77 yang ditampilkan pada Gambar 3a. Selanjutnya, baik stasiun Bancaran maupun Sambilangan masuk kedalam kategori tercemar sedang ($1 < CF < 3$) menurut kategori Hakanson (1980). Kedua stasiun memiliki sumber cemaran kadmium, stasiun Sambilangan dengan keberadaan galangan kapal yang menjadi sumber utama cemaran. Sedangkan stasiun Bancaran sumber cemarannya diduga berasal dari *run off* sungai dan aktivitas kapal nelayan. Namun stasiun Bancaran memiliki ekosistem mangrove yang diduga dapat menurunkan tingkat kontaminasi kadmium pada air dan sedimen laut disekitarnya (Lodeiro *et al.*, 2005). Pembahasan mengenai risiko ekologis kadmium di sedimen memiliki potensi dampak negatif yang ditimbulkan oleh keberadaan dan konsentrasi logam berat terhadap organisme. *Ecological Risk* (ER) kadmium pada sedimen dapat dilihat pada Gambar 3b.

Penilaian ER akibat keberadaan logam berat, khususnya kadmium dilakukan berdasarkan pendekatan indeks ER. Nilai ER dihitung dari konsentrasi logam berat dikalikan dengan faktor toksisitas spesifik logam, sebagaimana nilai ER yang melebihi 40 umumnya dianggap berpotensi berdampak signifikan pada organisme bentik, mengacu pada Hakanson (1980). Nilai ER Sambilangan lebih tinggi dibandingkan dengan Bancaran. Rata-rata nilai ER Bancaran yaitu 54,77 yang menunjukkan adanya resiko ekologis sedang ($40 < ER < 80$) nilai ini menunjukkan bahwa terdapat potensi gangguan terhadap kerang tahu, sedangkan rata-rata ER Sambilangan 83,00 yang menunjukkan resiko ekologis tinggi ($80 < ER < 160$). Hal ini mengindikasikan bahwa sedimen di wilayah Sambilangan memiliki resiko ekologis yang signifikan terhadap kerang tahu. Nilai ER di kedua stasiun lebih tinggi dibandingkan di Laut Bohai, Tiongkok, di mana kadmium memiliki kisaran nilai ER 8,12-34,78 yang menunjukkan risiko rendah terhadap biota laut (S. Li *et al.*, 2025). Meskipun demikian, nilai ER Sambilangan dan Bancaran relatif lebih kecil dibandingkan nilai ER di Teluk Bengal Barat Daya (147,7) (Naik *et al.*, 2023). Perbandingan ini memperkuat bahwa kadmium merupakan logam berat dengan potensi risiko ekologis tinggi meskipun konsentrasi absolutnya berbeda, tergantung pada kondisi lokal dan faktor toksisitas spesifik logam.

Bio Water Accumulation Factor (BWAf) dan *Bio Sediment Accumulation Factor* (BSAF) digunakan untuk mengetahui tingkat akumulasi kontaminan, seperti kadmium, dalam organisme dari media lingkungan air dan sedimen. Tabel indeks BWAf dan BSAf di kedua stasiun disajikan pada Tabel 4.

Nilai BWAf stasiun Bancaran (77,39) lebih tinggi dibandingkan BSAf (0,37), konsisten dengan dominasi jalur akumulasi melalui kolom air. Serupa dengan stasiun Bancaran, Sambilangan memiliki nilai BWAf (45,84) lebih besar daripada BSAf (0,418). Kedua stasiun menunjukkan nilai BWAf < 100

dan $BSAF < 1$, sehingga membuktikan kemampuan bioakumulasi kadmium yang rendah pada kerang tahu di wilayah tersebut. Beberapa faktor yang memungkinkan terbatasnya kadmium terakumulasi diantaranya keberadaan mangrove sebagai pengabsorpsi logam berat (MacFarlane *et al.*, 2007), respon fisiologis kerang terhadap paparan logam berat seperti penurunan laju filtrasi atau aktivasi mekanisme detoksifikasi yang menghambat penyerapan kadmium dari air laut (Neethu *et al.*, 2024), serta konsentrasi kadmium lingkungan yang tergolong rendah dibandingkan lokasi lainnya seperti Teluk Jiaozhou, Tiongkok (Gu *et al.*, 2021).

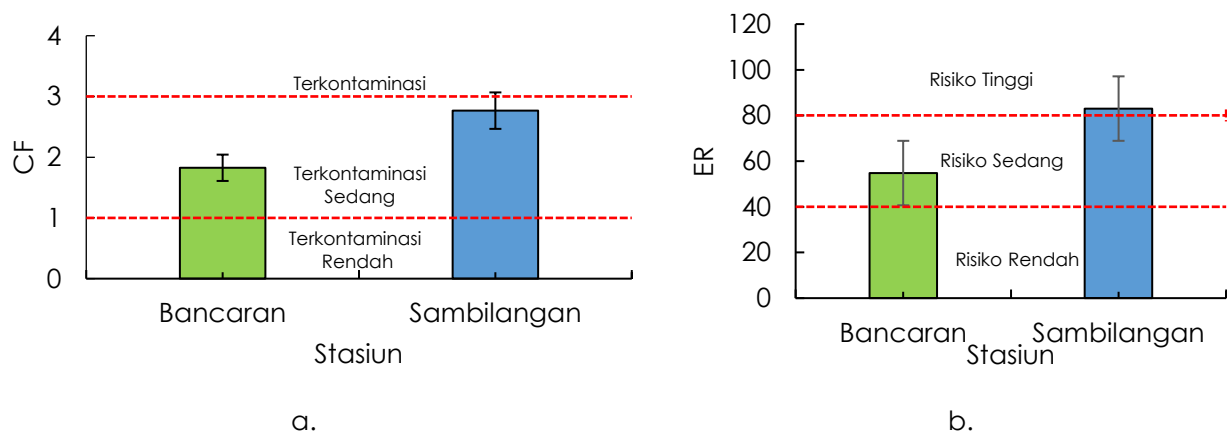
Selanjutnya untuk mengetahui risiko kesehatan dari konsumsi kerang tahu yang terpapar kadmium maka dilakukan analisis dengan menggunakan pendekatan *Estimated Daily Intake* (EDI), *Target Hazard Quotient* (THQ) dan *Estimated Weekly Intake* (EWI). Ketiga parameter tersebut memberikan gambaran sejauh mana logam berat Kadmium dapat menimbulkan efek toksik terhadap konsumen manusia secara harian maupun mingguan. Hasil penilaian EDI, THQ dan EWI pada lokasi bancaran dan sambilangan ditampilkan pada Tabel 5.

EDI digunakan untuk menilai tingkat paparan logam berat melalui pengonsumsi makanan seperti kerang tahu. Nilai EDI rata-rata di Bancaran sebesar $17,1 \times 10^{-5}$ mg/kg/hari, sedangkan di Sambilangan lebih tinggi yaitu 29×10^{-5} mg/kg/hari. Nilai ini mencerminkan bahwa paparan harian di Sambilangan hampir dua kali lebih besar dibandingkan Bancaran. Perbedaan tersebut kemungkinan terkait dengan kondisi lingkungan setempat, seperti tingkat urbanisasi (Jitar *et al.*, 2015), aktivitas antropogenik (Mbandzi-Phorego *et al.*, 2024), atau perbedaan dinamika oseanografi yang memengaruhi bioakumulasi logam dalam organisme (Hao *et al.*, 2019).

Tabel 4. Bio Water Accumulation Factor (BWAf) dan Bio Sediment Accumulation Factor (BSAF) kerang tahu di perairan Bancaran dan Sambilangan

Indeks	Nilai	Keterangan
Stasiun Bancaran		
BWAF	77,39	Lemah dalam akumulasi*
BSAF	0,37	Lemah dalam akumulasi*
Stasiun Sambilangan		
BWAF	45,84	Lemah dalam akumulasi*
BSAF	0,418	Lemah dalam akumulasi*

*Berdasarkan Thomann *et al.* (1992) dan Zhang *et al.* (2015)



Gambar 3. Contamination Factor (CF) (a) dan Ecological Risk (ER) kadmium (b) pada stasiun Bancaran dan Sambilangan

Tabel 5. Nilai *Estimated Daily Intake* (EDI), *Target Hazard Quotient* (THQ) dan *Estimated Weekly Intake* (EWI) Stasiun Bancaran dan Sambilangan

Stasiun		EDI (mg/kg/hari)	THQ	EWI (mg/kg/minggu)
Bancaran	Rentang	13 x10 ⁻⁵ – 17 x10 ⁻⁵	0,1381 – 0,2018	9,7 x 10 ⁻⁴ – 1,22 x 10 ⁻³
	Rata-rata	17,1 x10 ⁻⁵	0,1713	0,0012
Sambilangan	Rentang	24,9 x 10 ⁻⁵ – 31,9 x 10 ⁻⁵	0,2495 – 0,3199	1,76 x 10 ⁻³ – 2,25 x 10 ⁻³
	Rata-rata	29 x10 ⁻⁵	0,2905	0,0020

Jika ditinjau dari nilai THQ, kedua lokasi masih berada di bawah 1, yaitu 0,1713 (Bancaran) dan 0,2905 (Sambilangan). Menurut kriteria *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), nilai THQ < 1 menunjukkan bahwa konsumsi organisme laut dari lokasi tersebut tidak menimbulkan risiko non-karsinogenik signifikan pada populasi umum (USEPA, 2011). Namun demikian, nilai THQ di Sambilangan lebih tinggi dibandingkan Bancaran, yang mengindikasikan tingkat risiko relatif lebih besar. Walaupun masih < 1, akumulasi beberapa logam berat dapat meningkatkan total Hazard Index (HI), sehingga evaluasi komposit tetap perlu dilakukan (Sanaei et al., 2021).

Dari segi EWI, nilai rata-rata di Bancaran adalah 0,0012 mg/kg/minggu, sedangkan di Sambilangan 0,0020 mg/kg/minggu. Untuk menilai signifikansi kesehatan, nilai ini dibandingkan dengan *Provisional Tolerable Weekly Intake* (PTWI) kadmium yang ditetapkan oleh WHO/FAO yaitu sebesar 0,007 mg/kg/minggu (JECFA, 2010). Berdasarkan hal tersebut, EWI di stasiun Bancaran dan Sambilangan menunjukkan nilai dibawah PTWI sehingga dapat disimpulkan konsumsi kerang tahu pada tingkat normal, relatif aman dan tidak menimbulkan risiko kesehatan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis residu kadmium pada media lingkungan dan kerang tahu di dua pesisir Bangkalan serta mengevaluasi risiko kesehatan dari konsumsi kerang tahu yang terpapar kadmium. Stasiun Sambilangan menunjukkan kandungan kadmium yang signifikan lebih tinggi pada air, sedimen, dan kerang tahu dibandingkan dengan stasiun Bancaran. Selanjutnya, kedua stasiun menampilkan nilai kadmium air laut yang telah melampaui ambang batas (>0,001 mg/L) sehingga rentan memberikan tekanan toksik dan memungkinkan terakumulasi pada kerang tahu. Meskipun demikian, sedimen dan kerang tahu di semua stasiun masih masuk ke dalam kategori tidak tercemar berdasarkan nilai Igeo (Bancaran = 0,276 dan Sambilangan = 0,878) dan ambang batas baku mutu. Hasil analisis lanjut menggunakan pendekatan risiko ekologis menggunakan ER, Sambilangan memiliki risiko ekologis tinggi dengan nilai ER 83,00 yang mengindikasikan kontribusi tekanan antropogenik lebih tinggi dibandingkan Bancaran yang memiliki ER 54,77, yang menunjukkan risiko sedang. Hasil analisis risiko kesehatan dengan menggunakan EWI menunjukkan konsumsi kerang tahu dalam jumlah normal dari Stasiun Sambilangan (0,0020 mg/kg/minggu) maupun Bancaran (0,0012 mg/kg/minggu) relatif aman serta tidak menimbulkan risiko kesehatan non kasiogenik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Syukur, K. M. Y. (2018). Analisis Kandungan Logam Berat Pada Tumbuhan Mangrove. *Jurnal Biologi Tropis*, 18(1), 69–79. doi: 10.29303/jbt.v18i1.731
- Alayyafi, A., Ebqa' ai, M., Alboqai, O., Abotaleb, A., Eldesoky, A., & Shahawy, A. El. (2024). Pollution and health risk assessments related to heavy metals on three prominent beaches in Makkah

- Province, Kingdom of Saudi Arabia: Concerning levels of cadmium pollution. *PLOS ONE*, 19(10), e0311189. doi: 10.1371/journal.pone.0311189
- Anbuselvan, N., D., S. N., & Sridharan, M. (2018). Heavy metal assessment in surface sediments off Coromandel Coast of India: Implication on marine pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 712–726. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.04.074
- ANZECC, & ARMCANZ. (2000). Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality - Aquatic Ecosystems - Rationale and Background Information- Volume 2. *Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand*, 2(4), 678.
- Badan Standarisasi Nasional. (2009). *SNI 7387:2009 tentang Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Pangan*.
- Bouida, L., Rafatullah, M., Kerrouche, A., Qutob, M., Alosaimi, A. M., Alorfi, H. S., & Hussein, M. A. (2022). A Review on Cadmium and Lead Contamination: Sources, Fate, Mechanism, Health Effects and Remediation Methods. *Water*, 14(21), 3432. doi: 10.3390/w14213432
- BPS. (2024). *Rata-rata Konsumsi Perkapita Seminggu Menurut Kelompok Ikan per Kabupaten/Kota*. Badan Pusat Statistik. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MjA5NiMy/rata-rata-konsumsi-perkapita-secepat-menurut-komunikasi-ikan-per-kabupaten-kota.html>
- Bryan, A. L., Dickson, A. J., Dowdall, F., Homoky, W. B., Porcelli, D., & Henderson, G. M. (2021). Controls on the cadmium isotope composition of modern marine sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 565, 116946. doi: 10.1016/j.epsl.2021.116946
- BSN. (2004). *SNI 06-6992.4-2004 (Sedimen): Bagian 4 – Cara uji kadmium (Cd) secara destruksi asam dengan spektrofotometri serapan atom (SSA)*.
- BSN. (2009a). *SNI 6869.16:2009: Air dan air limbah – Bagian 16: Cara uji logam berat dengan spektrofotometer serapan atom (SSA)*.
- BSN. (2009b). *SNI 6989.72:2009: Air dan air limbah – Bagian 72: Cara uji parameter fisika dan kimia – Pengambilan contoh sedimen*.
- BSN. (2011). *SNI 2354.5:2011: SNI 2354.5:2011: Cara uji kimia – Bagian 5: Penentuan kadar logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) pada produk perikanan*.
- Charkiewicz, A. E., Omeljaniuk, W. J., Nowak, K., Garley, M., & Nikliński, J. (2023). Cadmium Toxicity and Health Effects—A Brief Summary. *Molecules*, 28(18), 6620. doi: 10.3390/molecules28186620
- Das, S., Kar, I., & Patra, A. K. (2023). Cadmium induced bioaccumulation, histopathology, gene regulation in fish and its amelioration – A review. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 79, 127202. doi: 10.1016/j.jtemb.2023.127202
- 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
- Fu, G., & Allen, H. E. (1992). Cadmium adsorption by oxic sediment. *Water Research*, 26(2), 225–233. doi: 10.1016/0043-1354(92)90222-P
- Gu, X., Xu, L., Wang, Z., Ming, X., Dang, P., Ouyang, W., Lin, C., Liu, X., He, M., & Wang, B. (2021a). Assessment of cadmium pollution and subsequent ecological and health risks in Jiaozhou Bay of the Yellow Sea. *Science of The Total Environment*, 774, 145016. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145016
- Guimarães, R. H. E., Wallner-Kersanach, M., & Correa, J. A. M. (2022). Assessment of anthropogenic metals in shipyard sediment in the Amazon delta estuary in northern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(51), 77007–77025. doi: 10.1007/s11356-022-20960-1
- 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
- Hao, Z., Chen, L., Wang, C., Zou, X., Zheng, F., Feng, W., Zhang, D., & Peng, L. (2019). Heavy metal distribution and bioaccumulation ability in marine organisms from coastal regions of Hainan and Zhoushan, China. *Chemosphere*, 226, 340–350. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.03.132
- JECFA. (2010). *Summary and Conclusions of the Seventy-third Meeting of JECFA*.
- Jitar, O., Teodosiu, C., Oros, A., Plavan, G., & Nicoara, M. (2015). Bioaccumulation of heavy metals in marine organisms from the Romanian sector of the Black Sea. *New Biotechnology*, 32(3), 369–378. doi: 10.1016/j.nbt.2014.11.004

- Li, B., Li, Z., Chen, J., Jin, C., Cao, W., & Peng, B. (2025). Humic-like components in dissolved organic matter inhibit cadmium sequestration by sediment. *Journal of Environmental Sciences*, 150, 645–656. doi: 10.1016/j.jes.2024.03.055
- Li, S., Chen, J., Zhang, X., Zhang, J., Xu, Y., & Xu, Y. (2025). Heavy metal distribution and ecological risk in surface sediments of the Bohai Sea. *PLOS One*, 20(6), e0326701. doi: 10.1371/journal.pone.0326701
- Li, Z.-L., Xu, T.-T., Yao, S.-S., Li, H.-X., Liu, S., Hou, R., Lin, L., Ni, Z.-X., Xie, Q., Huang, X.-P., & Xu, X.-R. (2025). Release kinetics and bioaccessibility of heavy metal from antifouling paint particles in simulated digestive fluids: An emerging threat to marine biota. *Marine Pollution Bulletin*, 221, 118596. doi: 10.1016/j.marpolbul.2025.118596
- Liu, Y., Chen, Q., Li, Y., Bi, L., Jin, L., & Peng, R. (2022). Toxic Effects of Cadmium on Fish. *Toxics*, 10(10), 622. doi: 10.3390/toxics10100622
- Lodeiro, P., Cordero, B., Barriada, J., Herrero, R., & Sastredevicente, M. (2005). Biosorption of cadmium by biomass of brown marine macroalgae. *Bioresource Technology*, 96(16), 1796–1803. doi: 10.1016/j.biortech.2005.01.002
- MacFarlane, G. R., Koller, C. E., & Blomberg, S. P. (2007). Accumulation and partitioning of heavy metals in mangroves: A synthesis of field-based studies. *Chemosphere*, 69(9), 1454–1464. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.04.059
- Mbandzi-Phorego, N., Puccinelli, E., Pieterse, P. P., Ndaba, J., & Porri, F. (2024). Metal bioaccumulation in marine invertebrates and risk assessment in sediments from South African coastal harbours and natural rocky shores. *Environmental Pollution*, 355, 124230. doi: 10.1016/j.envpol.2024.124230
- Meija, J., Coplen, T. B., Berglund, M., Brand, W. A., De Bièvre, P., Gröning, M., Holden, N. E., Irrgeher, J., Loss, R. D., Walczyk, T., & Prohaska, T. (2016). Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 88(3), 265–291. doi: 10.1515/pac-2015-0305
- Muller, G. (1969). *Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine river–ScienceOpen*.
- Naik, S., Pradhan, U., Karthikeyan, P., Bandyopadhyay, D., Sahoo, R. K., Panda, U. S., Mishra, P., & Murthy, M. V. R. (2023). Ecological risk assessment of heavy metals in the coastal sediment in the South-western Bay of Bengal. *Frontiers in Marine Science*, 10. doi: 10.3389/fmars.2023.1255466
- Neethu, K. V., Xavier, N., Praved, P. H., Sankar, N. D., Athira, P. A., Nandan, S. B., Joseph, K. J., Marigoudar, S. R., & Sharma, K. V. (2024). Toxicodynamics of cadmium in the green mussel *Perna viridis* (Linnaeus, 1758) using bioenergetic and physiological biomarkers. *Ecotoxicology*, 33(10), 1222–1241. doi: 10.1007/s10646-024-02814-3
- Nordberg, G. F., Bernard, A., Diamond, G. L., Duffus, J. H., Illing, P., Nordberg, M., Bergdahl, I. A., Jin, T., & Skerfving, S. (2018). Risk assessment of effects of cadmium on human health (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 90(4), 755–808. doi: 10.1515/pac-2016-0910
- Paalman, M. A. A., Van Der Weijden, C. H., & Loch, J. P. G. (1994). Sorption of cadmium on suspended matter under estuarine conditions; competition and complexation with major sea-water ions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 73(1), 49–60. doi: 10.1007/BF00477975
- Peana, M., Pelucelli, A., Chasapis, C. T., Perlepes, S. P., Bekiari, V., Medici, S., & Zoroddu, M. A. (2022). Biological Effects of Human Exposure to Environmental Cadmium. *Biomolecules*, 13(1), 36. doi: 10.3390/biom13010036
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Lampiran VIII: Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut*.
- Pengpid, S., & Peltzer, K. (2017). The Prevalence of Underweight, Overweight/Obesity and Their Related Lifestyle Factors in Indonesia, 2014–15. *AIMS Public Health*, 4(6), 633–649. doi: 10.3934/publichealth.2017.6.633
- Putri, R. R., Innaya, A., Putri, F. N. D. F., Abida, I. W., Pramithasari, F. A., & Nurdini, J. A. (2025). Eksplorasi Keanekaragaman Spesies Kerang (Bivalvia) di Wilayah Pesisir Socah, Kabupaten Bangkalan, Jawa Timur. *Juvenil*, 6(2), 113–124.
- Rohmah, A., & Muhsoni, F. F. (2020). Dinamika Populasi Kerang Tahu (*Meretrix meretrix*) di Perairan Bancaran Bangkalan Madura. *Juvenil:Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan*, 1(3), 331–338. doi: 10.21107/juvenil.v1i3.8561
- Salsabila, M., Asih, E. N. N., Kartika, A. G. D., Pratiwi, W. S. W., & Efendy, M. (2025). Mutu produk saus

- hidrolisat kerang tahu (*Meretrix* sp.) fortifikasi garam konsumsi kadar NaCl 87%. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 28(4), 406–420. doi: 10.17844/jphpi.v28i4.62321
- Sanaei, F., Amin, M. M., Alavijeh, Z. P., Esfahani, R. A., Sadeghi, M., Bandarrig, N. S., Fatehizadeh, A., Taheri, E., & Rezakazemi, M. (2021). Health risk assessment of potentially toxic elements intake via food crops consumption: Monte Carlo simulation-based probabilistic and heavy metal pollution index. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(2), 1479–1490. doi: 10.1007/s11356-020-10450-7
- Sharifuzzaman, S. M., Rahman, H., Ashekuzzaman, S. M., Islam, M. M., Chowdhury, S. R., & Hossain, M. S. (2016). Heavy Metals Accumulation in Coastal Sediments. In *Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils* (pp. 21–42). Springer Japan. doi: 10.1007/978-4-431-55759-3_2
- Thomann, R. V., Connolly, J. P., & Parkerton, T. F. (1992). An equilibrium model of organic chemical accumulation in aquatic food webs with sediment interaction. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 11(5), 615–629. doi: 10.1002/etc.5620110505
- USEPA. (2011). *Exposure Factor Handbook 2011 Edition*. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development.
- WHO. (2021). *Life expectancy at birth: The average number of years that a newborn could expect to live. Indonesia, both sexes, 2000–2021*. <https://data.who.int/countries/360>
- Yang, D., Zhang, X., Zhang, Y., Wang, Q., & Li, H. (2018). Input pathways of cadmium in Jiaozhou Bay 1989. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 382, 052042. doi: 10.1088/1757-899X/382/5/052042
- Yona, D., Sartimbul, A., Rahman, M. A., Sari, S. H. J., Mondal, P., Hamid, A., & Humairoh, T. (2021). Bioaccumulation and health risk assessments of heavy metals in mussels collected from madura strait, Indonesia. *Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan*, 13(1), 20–28. doi: 10.20473/jipk.v13i1.24677
- Zhang, L., Shi, Z., Jiang, Z., Zhang, J., Wang, F., & Huang, X. (2015). Distribution and bioaccumulation of heavy metals in marine organisms in east and west Guangdong coastal regions, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 101(2), 930–937. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.10.041
- Zhao, D., Wang, P., & Zhao, F.-J. (2023). Dietary cadmium exposure, risks to human health and mitigation strategies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(8), 939–963. doi: 10.1080/10643389.2022.2099192