

ANALISIS RISIKO EKOLOGIS ARSEN (As) PADA SEDIMENT DAN KERANG DI TELUK MANADO

Trisha Chatlea Louisa Triyono^{1*}, Sri Seprianto Maddusa², Odie R. Pinontoan³

Kesehatan Masyarakat, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Sam Ratulangi^{1,2,3}

*Corresponding Author : trishatriyono24@gmail.com

ABSTRAK

Teluk Manado merupakan kawasan pesisir yang memiliki nilai ekologis dan ekonomi tinggi, tetapi rentan terhadap pencemaran logam berat, salah satunya arsen (As), yang berasal dari aktivitas antropogenik seperti limbah domestik, industri, dan aliran sungai. Arsenik dikenal bersifat toksik dan karsinogenik, sehingga berpotensi menimbulkan risiko terhadap ekosistem maupun kesehatan masyarakat. Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko ekologis arsen pada sedimen dan kerang di Teluk Manado, dengan fokus pada konsentrasi arsen, nilai *Ecological Risk* (Er), serta *Pollution Load Index* (PLI). Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui survei lapangan dan analisis laboratorium. Sampel sedimen diambil dari 10 titik, sedangkan sampel kerang dikumpulkan dari 3 titik lokasi penelitian. Analisis dilakukan di Balai Standarisasi dan Pelayanan Jasa Industri (BARISTAND) Manado menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Hasil penelitian menunjukkan rata-rata konsentrasi arsen pada sedimen sebesar 0,79 mg/kg dan pada kerang sebesar 1,24 mg/kg. Nilai Er yang diperoleh adalah 9,94 dan tergolong dalam kategori risiko ekologis rendah ($Er < 40$). Nilai PLI sebesar 0,9382 juga menunjukkan bahwa sedimen tidak tercemar ($PLI < 1$). Berdasarkan *Sediment Quality Guidelines* (SQGs) dari NOAA, kadar arsen pada sedimen masih jauh di bawah ambang batas 7,24 mg/kg. Namun, ditemukan satu titik sampel kerang dengan kadar 3,39 mg/kg yang melebihi ambang batas SNI 7387:2009 sebesar 1,0 mg/kg. Simpulan penelitian ini adalah risiko ekologis arsen di Teluk Manado tergolong rendah, sedimen tidak tercemar, namun terdapat potensi bahaya konsumsi kerang pada titik tertentu sehingga perlu pengawasan dan pengelolaan berkelanjutan.

Kata kunci : arsen, kerang, risiko ekologis, sedimen, Teluk Manado

ABSTRACT

Manado Bay is a coastal area with high ecological and economic value but is vulnerable to heavy metal pollution, particularly arsenic (As), originating from anthropogenic activities such as domestic waste, industrial discharge, and river inflows. Arsenic is known to be toxic and carcinogenic, posing potential risks to both ecosystems and public health. This study aims to analyze the ecological risk of arsenic in sediments and shellfish in Manado Bay, focusing on arsenic concentration, the Ecological Risk (Er) index, and the Pollution Load Index (PLI). The research employed a descriptive quantitative approach through field surveys and laboratory analysis. Sediment samples were collected from 10 locations, while shellfish samples were taken from 3 sites. The analysis was conducted at the Industrial Standardization and Services Center (BARISTAND) Manado using the Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) method. The results showed that the average arsenic concentration in sediments was 0.79 mg/kg and in shellfish was 1.24 mg/kg. The calculated Er value was 9.94, which falls into the low ecological risk category ($Er < 40$). The PLI value of 0.9382 also indicated that the sediments were unpolluted ($PLI < 1$). Based on the Sediment Quality Guidelines (SQGs) from NOAA, arsenic levels in sediments were well below the threshold of 7.24 mg/kg. However, one shellfish sample point showed an arsenic concentration of 3.39 mg/kg, exceeding the Indonesian National Standard (SNI 7387:2009) limit of 1.0 mg/kg. In conclusion, the ecological risk of arsenic in Manado Bay is classified as low, with sediments remaining unpolluted, but there is a potential health risk from shellfish consumption at certain sites, highlighting the need for monitoring and sustainable management.

Keywords : arsenic, ecological risk, manado bay, sediment, shellfish

PENDAHULUAN

Teluk Manado yang terletak di Sulawesi Utara, Indonesia, merupakan salah satu kawasan pesisir yang memiliki nilai ekologis dan ekonomi yang sangat tinggi. Kawasan ini berperan penting dalam menjaga keberlangsungan ekosistem pesisir serta menunjang kegiatan sosial ekonomi masyarakat sekitar, seperti perikanan, transportasi laut, dan pariwisata (Hudha dkk., 2019). Namun, perkembangan pesat aktivitas manusia di wilayah ini bisa menyebabkan peningkatan tekanan terhadap lingkungan pesisir, khususnya melalui masuknya berbagai polutan dari darat ke laut. Salah satu contoh nyata adalah pencemaran mikroplastik, di mana zona transisi antara darat dan laut sangat rentan terhadap akumulasi sampah plastik yang terbawa aliran sungai dan aktivitas pesisir (Chen, 2022). Teluk Manado menerima limpasan dari lima sungai besar, yaitu Sungai Tondano, Bailang, Tikala, Sario, dan Malalayang. Sungai-sungai tersebut membawa berbagai bahan pencemar, baik dari aktivitas domestik, pertanian, hingga industri, yang kemudian terakumulasi di perairan dan sedimen Teluk Manado (Ronoko dkk., 2019).

Salah satu kontaminan utama yang menjadi perhatian adalah logam berat, khususnya arsen (As). Arsen dikenal sebagai unsur semi-logam yang bersifat toksik, non-degradable, dan karsinogenik (Pinontoan., 2023). Beberapa studi di wilayah pesisir lain, seperti di Teluk Totok, Sulawesi Utara, menunjukkan konsentrasi arsen dalam sedimen hampir mencapai ambang batas baku mutu (Ilahude, 2010), sementara penelitian di Bangladesh melaporkan risiko ekologi arsen sedang hingga tinggi pada sedimen pesisir (Rahman dkk., 2023). Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kontaminasi arsen di Teluk Manado telah melampaui ambang batas aman. Studi oleh (Lumi., 2024) menemukan bahwa kadar arsen dalam kerang jenis *Tridacna squamosa* dan *Conomurex luhuanus* di beberapa lokasi di Teluk Manado mencapai rata-rata 4,26 mg/kg, bahkan hingga 6,0 mg/kg, jauh melebihi ambang batas maksimum 1,0 mg/kg berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 7387:2009). Hal ini menunjukkan potensi risiko serius terhadap kesehatan masyarakat akibat konsumsi kerang yang terkontaminasi arsenik dalam jangka panjang. Studi di muara Sungai Tallo, Makassar, menemukan bahwa kadar arsenik dalam sedimen melebihi baku mutu meskipun kerang masih aman dikonsumsi berdasarkan SNI, sehingga masyarakat perlu waspada terhadap akumulasi arsenik (Putri dkk., 2021).

Sumber arsen di lingkungan pesisir berasal dari dua kategori utama: alami (geogenik) dan aktivitas manusia (antropogenik). Secara alami, arsen dilepaskan melalui aktivitas vulkanik dan pelupukan batuan, sementara secara antropogenik berasal dari limbah pertanian (penggunaan pupuk dan pestisida), limbah industri, serta limbah domestik (Irianti dkk., 2017). Kontaminasi arsen di perairan menyebabkan bioakumulasi pada organisme bentik seperti kerang, yang menyaring partikel air dan dapat menyerap logam berat yang terlarut maupun terikat pada plankton dan sedimen (Tang dkk., 2023). Paparan logam berat seperti arsen juga berdampak pada kesehatan masyarakat, terutama bagi komunitas pesisir yang bergantung pada hasil laut sebagai sumber pangan utama. Risiko paparan jangka panjang mencakup gangguan pada kulit, sistem saraf, ginjal, serta peningkatan risiko kanker (Sukarjo dkk., 2021). Selain itu, pencemaran logam berat di lingkungan juga menurunkan kualitas ekosistem, mempengaruhi keseimbangan rantai makanan, dan merusak fungsi ekosistem secara menyeluruh (Choudri dkk., 2019). Fenomena bioakumulasi ini sangat penting untuk diperhatikan karena logam berat yang terakumulasi pada organisme dasar rantai makanan dapat berpindah ke tingkat trofik yang lebih tinggi hingga ke manusia (Lasut dkk., 2016; Sukarjo dkk., 2021).

Untuk menilai sejauh mana dampak pencemaran arsen terhadap ekosistem, diperlukan pendekatan ilmiah yang sistematis. Analisis risiko ekologis adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak buruk terhadap lingkungan akibat paparan zat pencemar. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi potensi risiko terhadap organisme dan ekosistem

melalui indikator seperti *Ecological Risk* (Er) dan *Pollution Load Index* (PLI). Parameter ini tidak hanya mengukur tingkat kontaminasi, tetapi juga memberikan gambaran tentang sejauh mana logam berat seperti arsen dapat menimbulkan gangguan pada ekosistem akuatik (Hakanson., 1980). Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko ekologis arsen (As) pada sedimen dan kerang di Teluk Manado melalui pengukuran kadar arsen, perhitungan nilai Er dan PLI, serta perbandingan dengan standar kualitas sedimen dan pangan yang berlaku secara nasional maupun internasional.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif dengan desain survei. Populasi penelitian adalah sedimen dan kerang yang terdapat di perairan Teluk Manado, Sulawesi Utara. Sampel terdiri dari sedimen yang diambil pada 10 titik lokasi dan kerang (kepah, tiram batu *Saccostrea echinata*, dan kerang darah) yang dikumpulkan dari 3 titik lokasi. Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif untuk mengetahui konsentrasi arsen pada sedimen dan kerang, serta dievaluasi menggunakan parameter *Ecological Risk* (Er) dan *Pollution Load Index* (PLI).

HASIL

Logam Berat Arsen (As) pada Sedimen di Teluk Manado

Tabel 1. Kadar Arsen (As) pada Sedimen di Teluk Manado

Titik Sampel	Jumlah Sedimen	Kadar Arsen (As) (mg/kg)	NOAA Sediment Quality Guidelines (mg/kg)
Titik 1	200 gr	0,67	
Titik 2	200 gr	0,72	
Titik 3	200 gr	1,07	
Titik 4	200 gr	1,16	
Titik 5	200 gr	0,43	
Titik 6	200 gr	1,31	7,24
Titik 7	200 gr	0,41	
Titik 8	200 gr	0,60	
Titik 9	200 gr	0,72	
Titik 10	200 gr	0,84	
Rata - rata		0,79	

Hasil analisis terhadap 10 titik pengambilan sampel sedimen di Pantai Molas, Tumumpa, DAS Tondano, Pasar Bersehati, Sungai Sario, Taman Berkat (*Godbless Park*), Depan Lion Hotel Plaza Manado, Sungai Malalayang, *Vandive Centre*, Malalayang *Beach Walk* menunjukkan bahwa konsentrasi arsen (As) berada pada kisaran 0,41–1,31 mg/kg, dengan rata-rata 0,79 mg/kg. Nilai ini masih berada di bawah ambang batas *Threshold Effect Level* (TEL) dari NOAA sebesar 7,24 mg/kg, yang berarti kondisi sedimen tergolong aman dari pencemaran arsen secara umum.

Logam Berat Arsen (As) pada Kerang di Teluk Manado**Tabel 2. Kadar Arsen (As) pada Kerang di Teluk Manado**

Titik Sampel	Jumlah Kerang	Kadar Arsen (As) (mg/kg)	Standar Indonesia 2009	Nasional (SNI)	Keterangan
Titik 1 (Kerang Kepah)	200gr	0,04			MS
Titik 3 (Kerang Tiram Batu)	200gr	3,39		1,0	TMS
Titik 8 (Kerang Darah)	200gr	0,31			MS
Rata – rata		1,24			

Hasil analisis kandungan arsen (As) pada kerang menunjukkan bahwa dari tiga titik pengambilan sampel di Teluk Manado, satu titik memiliki konsentrasi arsen yang melebihi ambang batas aman konsumsi, yaitu Titik 3 (DAS Tondano) dengan nilai 3,39 mg/kg. Nilai ini jauh di atas ambang batas maksimum yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) 7387:2009, yaitu 1,0 mg/kg untuk bahan pangan asal laut. Sementara itu, dua titik lainnya, yaitu Pantai Molas (Titik 1) dan Sungai Malalayang (Titik 8) menunjukkan konsentrasi arsen yang relatif rendah, masing-masing sebesar 0,04 mg/kg dan 0,31 mg/kg, masih dalam batas aman konsumsi. Rata-rata kandungan arsen pada ketiga titik tersebut adalah 1,24 mg/kg, yang berarti secara umum telah melampaui ambang batas aman.

Ecological Risk (Er)

Penilaian risiko ekologis arsen (As) pada sedimen Teluk Manado dilakukan dengan menggunakan metode yang dikembangkan oleh (Hakanson., 1980), yang memperhitungkan koefisien kontaminasi (CF) dan faktor toksitas (Tr) dari setiap logam. Untuk arsen, nilai Tr ditetapkan sebesar 10, karena sifatnya yang sangat toksik, persisten, dan berpotensi karsinogenik.

$$CF = \frac{cs}{cb} \text{ dan } Er = Tr - CF$$

Tr = Faktor respon toksik untuk elemen yang sudah ada, As= 10

CF = Faktor kontaminasi dari logam berat

Cs = Nilai mean kadar logam yang terdeteksi di lokasi penelitian

Cb = Nilai acuan, As = 15

Tabel 3. Klasifikasi Ecological Risk (Er)

Er	Klasifikasi
Er < 40	Potensial risiko ekologi rendah
40 ≤ Er < 80	Potensial risiko ekologi sedang
80 ≤ Er < 160	Potensial risiko ekologi besar
160 ≤ Er < 320	Potensial risiko ekologi tinggi
Er ≥ 320	Potensial risiko ekologi sangat tinggi

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa nilai *Ecological Risk* (Er) sebesar 9,94, yang berdasarkan klasifikasi dari Hakanson termasuk dalam kategori risiko ekologis rendah (Er < 40).

Pollution Load Index (PLI)

Pencemaran sedimen juga dianalisis menggunakan Pollution Load Index (PLI). PLI merupakan indikator kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kumulatif pencemaran logam berat dalam sedimen suatu wilayah. Rumus PLI menurut (Sukarjo et al 2021) adalah:

$$PLI = (C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n)^{1/n}$$

PLI = Indeks beban pencemaran

CF = Faktor Kontaminasi logam berat

n = Jumlah logam berat

Tabel 4. Klasifikasi Pollution Load Index (PLI)

PLI	Klasifikasi
PLI < 1	Tidak ada polusi
1 < PLI < 2	Polusi sedang
2 < PLI < 3	Polusi berat
3 < PLI	Polusi sangat berat

Dengan demikian, nilai PLI = 0,9382 menunjukkan bahwa sedimen di Teluk Manado secara umum belum tercemar arsen.

PEMBAHASAN

Logam Berat Arsen (As) pada Sedimen di Teluk Manado

Hasil analisis menunjukkan bahwa rata-rata konsentrasi arsen (As) pada sedimen dari 10 titik di Teluk Manado adalah 0,79 mg/kg, dengan rentang nilai antara 0,41–1,31 mg/kg. Seluruh nilai ini masih berada di bawah ambang batas *Threshold Effect Level* (TEL) yang ditetapkan oleh NOAA (7,24 mg/kg), sehingga secara umum kualitas sedimen Teluk Manado masih tergolong aman dari pencemaran arsen berdasarkan standar internasional. Meskipun demikian, terdapat variasi kadar antar lokasi, di mana beberapa titik memiliki kadar arsen lebih tinggi dibandingkan titik lainnya. Kadar tertinggi tercatat di Taman Berkat (Titik 6) sebesar 1,31 mg/kg, disusul Pasar Bersehati (Titik 4) sebesar 1,16 mg/kg, dan DAS Tondano (Titik 3) sebesar 1,07 mg/kg. Titik-titik ini berada di kawasan dengan aktivitas manusia yang tinggi, seperti pusat perdagangan, permukiman padat, serta muara sungai utama, yang berpotensi besar menjadi sumber masuknya arsen ke lingkungan pesisir.

Secara umum, arsen masuk ke lingkungan melalui dua jalur utama, yaitu alami dan antropogenik. Sumber alami meliputi pelapukan batuan, aktivitas vulkanik, hingga proses hidrotermal yang dapat melepaskan arsen ke sedimen (Ulrich dkk., 2018). Namun, berbagai kajian menunjukkan bahwa kontribusi antropogenik sering kali lebih dominan, terutama di kawasan pesisir dengan aktivitas manusia yang intensif. Menurut Wang dkk. (2023), pelepasan arsen ke perairan banyak dipengaruhi oleh kegiatan manusia seperti pertanian (pupuk dan pestisida), pembuangan limbah domestik, maupun aktivitas industri. Hal ini mendukung temuan penelitian di Teluk Manado, di mana titik dengan nilai arsen lebih tinggi berdekatan dengan kawasan permukiman padat, pasar tradisional, serta muara sungai yang menerima limpasan limbah dari hulu.

Peningkatan arsen di DAS Tondano kemungkinan besar dipengaruhi oleh aliran limbah pertanian dari daerah Minahasa. Penelitian oleh Irianti dkk. (2017) menunjukkan bahwa

penggunaan pestisida dan pupuk secara intensif dapat meningkatkan kadar arsen dalam tanah hingga 17,5 mg/kg, yang berpotensi terbawa ke badan air melalui erosi dan limpasan permukaan. Hal yang sama juga ditegaskan oleh Xing dkk. (2024), bahwa aktivitas agroindustri dan domestik merupakan salah satu faktor utama yang memperkaya arsen dalam sedimen pesisir.

Di sisi lain, titik dengan konsentrasi arsen lebih rendah, seperti Depan Lion Hotel (0,41 mg/kg) dan Sungai Sario (0,43 mg/kg), memiliki karakteristik arus laut yang lebih terbuka. Arus laut yang kuat pada kawasan tersebut memungkinkan pencemar terdilusi dan terbawa keluar lebih cepat, sehingga akumulasi arsen dalam sedimen relatif rendah. Kondisi ini konsisten dengan temuan Wang dkk. (2023) yang menyatakan bahwa faktor arus laut dan sirkulasi air merupakan mekanisme alami yang dapat menekan akumulasi arsen di ekosistem pesisir. Faktor lain yang juga perlu diperhatikan adalah pengaruh reklamasi lahan pesisir terhadap pelepasan arsen. Studi terbaru oleh Zhang dkk. (2025) menunjukkan bahwa tanah reklamasi yang mengandung mineral sulfida dapat melepaskan arsen dalam bentuk yang tidak stabil, sehingga lebih rentan meningkatkan konsentrasi arsen di perairan.

Logam Berat Arsen (As) pada Kerang di Teluk Manado

Hasil penelitian menunjukkan adanya proses bioakumulasi logam berat arsen (As) dalam jaringan kerang, terutama pada lokasi yang dekat dengan muara sungai. Kerang merupakan organisme bentik dengan sifat *filter feeder*, sehingga mampu menyaring air laut dan partikel tersuspensi untuk mendapatkan makanan. Dalam proses tersebut, logam berat baik yang terlarut maupun yang terikat pada partikel sedimen dapat masuk dan terakumulasi dalam tubuh kerang seiring waktu. Hal ini sejalan dengan temuan Tang dkk. (2023) yang menjelaskan bahwa bivalvia memiliki kemampuan tinggi dalam mengakumulasi arsen, terutama dalam bentuk anorganik yang bersifat toksik bagi manusia. Lokasi DAS Tondano teridentifikasi sebagai titik paling rentan, karena merupakan muara utama yang menerima aliran dari berbagai aktivitas di hulu, seperti pertanian, pemukiman padat, pasar tradisional, dan fasilitas pelabuhan. Limbah domestik, pupuk, serta pestisida yang terbawa aliran sungai dapat meningkatkan beban pencemar arsen di sedimen dan biota laut. Penelitian Irianti dkk. (2017) menunjukkan bahwa penggunaan pestisida dan pupuk kimia secara intensif berkontribusi terhadap meningkatnya kadar arsen dalam tanah, yang kemudian berpotensi terbawa ke badan air melalui erosi dan limpasan. Temuan serupa juga dilaporkan Sukarjo dkk. (2021) pada DAS Serayu, di mana aktivitas manusia di sepanjang aliran sungai meningkatkan risiko ekologis akibat kontaminasi logam berat.

Akumulasi arsen pada biota konsumsi seperti kerang menimbulkan potensi risiko kesehatan masyarakat. Menurut WHO (2022), paparan arsen anorganik secara kronis dapat mengakibatkan gangguan neurologis, kerusakan ginjal, perubahan kulit, serta meningkatkan risiko kanker kulit, paru-paru, dan kandung kemih. Studi Traven dkk. (2023) di Kroasia menemukan bahwa meskipun konsentrasi logam berat pada makanan laut relatif rendah, konsumsi berkelanjutan tetap berisiko karena sifat akumulatif logam berat dalam jaringan tubuh manusia. Fenomena serupa juga tercatat pada penelitian di Sungai Kuning, Tiongkok. Meskipun konsentrasi logam berat dalam ikan masih berada di bawah ambang batas, evaluasi risiko menunjukkan adanya potensi karsinogenik jangka panjang akibat konsumsi rutin (Marine Pollution Bulletin, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan hanya berdasarkan konsentrasi tidak cukup, karena bioakumulasi dan paparan kronis justru menjadi faktor kunci dalam menilai risiko kesehatan.

Ecological Risk (Er)

Meskipun nilai *Ecological Risk (Er)* arsen di Teluk Manado berada dalam kategori rendah, keberadaannya pada semua titik pengambilan sampel menunjukkan adanya paparan kronis

yang berasal dari aktivitas manusia. Hal ini terutama terlihat pada area sekitar muara sungai dan kawasan dengan aktivitas padat. Jika tidak dilakukan pengendalian, paparan arsen yang berkelanjutan berpotensi meningkatkan nilai *Contamination Factor* (CF) di masa mendatang, yang pada akhirnya dapat mendorong nilai Er masuk dalam kategori risiko yang lebih tinggi. Sebagai bandingan, penelitian di wilayah pesisir Papua melaporkan nilai Er arsen sebesar 5,7, sedangkan di Teluk Manado tercatat lebih tinggi yaitu 9,94, meskipun keduanya masih dalam kategori rendah (Hamuna dkk., 2021). Perbedaan ini menunjukkan bahwa Teluk Manado menghadapi tekanan pencemaran yang lebih besar, yang erat kaitannya dengan intensitas aktivitas urbanisasi, transportasi laut, serta penggunaan lahan pertanian di wilayah sekitarnya.

Hasil serupa juga dilaporkan di Meghna River Estuary, Bangladesh, dengan nilai *Potential Ecological Risk Index (PERI)* arsen berkisar 1,32–10,75. Nilai tersebut menunjukkan risiko rendah, namun konsentrasi arsen pada beberapa lokasi mencapai lebih dari 2 mg/kg, menandakan adanya akumulasi kronis yang perlu diwaspadai (Bhuiyan dkk., 2025). Di Laguna Ebrié, Pantai Gading, kadar arsen dalam sedimen mencapai 2,92–5,42 mg/kg, dan meskipun risiko ekologinya rendah, potensi dampak jangka panjang tetap ada, terutama pada wilayah dengan aktivitas antropogenik tinggi (Coulibaly dkk., 2022). Sementara itu, penelitian di Tanguar Haor Wetland, Bangladesh menemukan bahwa nilai *Contamination Factor (CF)* arsen berada pada tingkat sedang (1–3), menandakan adanya peningkatan risiko dibandingkan kategori rendah, khususnya di area yang mendapat masukan limbah pertanian (Alam dkk., 2023). Hasil lain dari Laut Kuning dan Laut Bohai, Tiongkok, juga memperlihatkan nilai median Er arsen <10, yang berarti risiko rendah, tetapi peneliti menekankan perlunya pemantauan berkelanjutan mengingat sifat bioakumulatif arsen di lingkungan laut (Li dkk., 2022).

Kondisi yang lebih mengkhawatirkan terlihat di Malaysia, di mana kadar arsen dalam topsoil dan sedimen mangrove mencapai 9,38–68,2 mg/kg. Nilai tersebut menunjukkan potensi risiko ekologis dan kesehatan yang lebih tinggi, meskipun dampak non-karsinogenik dinilai minimal. Namun demikian, risiko karsinogenik akibat paparan jangka panjang tetap signifikan (Zulkifli dkk., 2022). Jika dibandingkan, Teluk Manado masih berada pada kondisi relatif aman. Namun, bukti dari berbagai studi internasional menunjukkan bahwa meskipun nilai Er rendah, paparan arsen kronis akibat aktivitas manusia dapat mengarah pada peningkatan risiko di masa mendatang. Oleh karena itu, pemantauan kualitas lingkungan pesisir dan pengendalian pencemaran berbasis daerah aliran sungai sangat diperlukan untuk mencegah akumulasi arsen yang lebih tinggi dan menjaga keberlanjutan ekosistem serta kesehatan masyarakat.

Pollution Load Index (PLI)

Berdasarkan hasil analisis, nilai *Pollution Load Index (PLI)* di Teluk Manado sebesar 0,9382. Nilai ini termasuk kategori tidak ada polusi karena masih di bawah angka 1. Artinya, tingkat pencemaran arsen di sedimen Teluk Manado masih dalam kondisi aman dan belum menimbulkan risiko lingkungan yang serius. Hasil ini sejalan dengan penelitian Hamuna dkk. (2021) di Teluk Youtefa, Papua, yang mendapatkan nilai PLI jauh lebih rendah, yaitu 0,158. Perbedaan nilai ini menunjukkan bahwa kualitas sedimen di Teluk Youtefa lebih baik dibandingkan Teluk Manado. Salah satu faktor yang berpengaruh adalah kondisi ekosistemnya. Teluk Youtefa masih memiliki kawasan konservasi dan mangrove yang cukup luas, sehingga mampu menahan masuknya logam berat ke perairan.

Sementara itu, Teluk Manado merupakan wilayah dengan aktivitas perkotaan, aliran limbah domestik, serta kegiatan transportasi dan perikanan yang cukup tinggi. Aktivitas tersebut bisa menambah masukan logam berat ke perairan, sehingga nilai PLI-nya lebih tinggi dibandingkan Teluk Youtefa. Hal yang sama juga ditemukan pada penelitian di kawasan mangrove Laut Merah, Mesir, di mana ekosistem mangrove terbukti mampu menahan akumulasi logam berat dalam sedimen sehingga nilai PLI tetap rendah (Environmental Science

and Pollution Research, 2024). Selain itu, penelitian di ekosistem mangrove Sicanang juga menunjukkan bahwa mangrove jenis *Acanthus ilicifolius* dapat menyerap logam berat meskipun konsentrasi di sedimen relatif rendah. Hal ini membuktikan bahwa mangrove punya peran penting sebagai penyerap alami logam berat dan membantu menjaga kualitas sedimen (Emerging Science Journal, 2025). Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa kondisi lingkungan pesisir sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia dan keberadaan ekosistem mangrove.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan di Teluk Manado, maka peneliti menyimpulkan bahwa, hasil perhitungan *Ecological Risk* (*Er*) dapat diketahui bahwa < 40 yaitu potensial risiko ekologis rendah. Untuk perhitungan *Polution Load Index* (*PLI*) adalah 0,9382 merupakan dibawah < 1 dengan keterangan tidak ada polusi. Kandungan kadar Arsen (*As*) pada sedimen di 10 titik di Teluk Manado masih memenuhi syarat berdasarkan pedoman dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (*NOAA*) kualitas sedimen dievaluasi menggunakan *Sediment Quality Guidelines* (*SQGs*) yakni 7,24 mg/kg. Kandungan kadar Arsen (*As*) pada kerang kerang kepah, kerang tiram batu (*Saccostrea Echinata*), dan kerang kepah di 3 titik di Teluk Manado, terdapat 1 titik yang telah melebihi ambang batas berdasarkan peraturan Standar Nasional Indonesia 7387:2009, batas maksimum cemaran logam berat arsen (*As*) dalam pangan kekerangan (*Bivalve*) moluska adalah 1.0 mg/kg.

UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing atas segala bimbingan, arahan, masukan, serta motivasi yang diberikan sejak awal hingga akhir penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2009). Standar Nasional Indonesia (SNI) 7387:2009 – Batas maksimum cemaran logam berat dalam pangan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Bhuiyan, T., Rahman, M., Hasan, M., & Ahmed, S. (2025). *Spatial distribution and potential health risks of arsenic in sediments from the lower Meghna River estuary, Bangladesh. Scientifica*, 2025, 1–12.
- Chen, D. (2022). Dampak pencemaran mikroplastik di wilayah pesisir laut. *Jurnal Studi Akademik I-Pikunipa. Retrieved from https://ejournalfpikunipa.ac.id/index.php/JSAI/article/download/309/199/2648*
- Choudri, B. S., dkk. (2019). *Environmental risk assessment of heavy metals contamination in soil and groundwater. Environmental Monitoring and Assessment*, 191(5), 1–13.
- Coulibaly, M., Kouassi, N. L. B., N'goran, K. P. D. A., Diabate, D., & Trokourey, A. T. (2022). *Distribution, ecological and health risks of arsenic in sediments of the Comoé River estuary and Ebrié Lagoon, Côte d'Ivoire. American Journal of Applied Chemistry*, 10(4), 75–84.
- El-Nemr, A., Khaled, A., Abd-Allah, A. M. A., & Ragab, S. (2024). *Assessment of heavy metals at mangrove ecosystem, southern Red Sea, Egypt. Environmental Science and Pollution Research*, 31(2), 2741–2761. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31625>
- Hakanson, L. (1980). *An ecological risk index for aquatic pollution control. Water Research*, 14(8), 975–1001.

- Hamuna, B., dkk. (2021). *Pollution Load Index of Heavy Metals in Youtefa Bay, Papua. Journal of Ecological Risk Assessment*, 6(2), 55–64.
- Hudha, A., dkk. (2019). Manfaat ekologi Teluk Manado. *Jurnal Kelautan Tropis*, 22(3), 201–210.
- Ilahude, A. G. (2010). Distribusi logam berat di perairan Teluk Totok, Sulawesi Utara. *Buletin of Marine Geology*, 25(2), 59–70.
- Irianti, D., dkk. (2017). Dampak pupuk dan pestisida terhadap kontaminasi arsen. *Jurnal Agroekoteknologi*, 5(1), 45–53.
- Lasut, M. T., Kawung, N. J., & Lasut, T. (2016). *Arsenic in suspended particulate matter and dissolved phases in Manado Bay, North Sulawesi. Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 3(1), 39–46.
- Li, X., Zhang, Y., Wang, J., & Chen, L. (2022). *Ecological risk assessment of arsenic and heavy metals in sediments of the northern Bohai and Yellow Seas. International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4454.
- Lumi, F. (2024). Kandungan arsen pada kerang di Teluk Manado (Skripsi).
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2010). *Sediment quality guidelines*. Washington, D.C.: NOAA.
- Pinontoan, R. O. (2023). Pencemaran lingkungan. Deepublish Publisher.
- Putri, N. A., Kurniawan, E., & Pribadi, T. D. (2025). *Bioaccumulation of heavy metals by Acanthus ilicifolius in polluted mangrove ecosystems. Emerging Science Journal*, 9(1), 21–32.
- Rahman, M. A., Hossain, M. S., & Karim, M. R. (2023). *Ecological risk of heavy metals in sediments from coastal Bangladesh. Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 801.
- Ronoko, S., dkk. (2019). Sungai dan potensi pencemaran Teluk Manado. *Jurnal Kelautan Tropis*, 22(3), 211–218.
- Sukarjo, S., dkk. (2021). *Ecological risk of heavy metal contamination in Serayu Watershed. Environmental Risk Journal*, 11(2), 120–131.
- Tang, X., dkk. (2023). *Bioaccumulation of arsenic in bivalves. Ecotoxicology and Environmental Safety*, 256, 114874.
- Traven, L., Pupavac, S. M., Zurga, P., Linsak, Z., Zezelj, S. P., Glad, M., & Lusic, D. V. (2023). *Assessment of health risks associated with heavy metal concentration in seafood from North-Western Croatia. Scientific Reports*.
- Ulrich, A., Kramar, U., & Puchelt, H. (2018). *Arsenic cycling in the Earth's crust and hydrosphere: Interaction between global and local processes. Progress in Earth and Planetary Science*, 5(1), 68.
- Wang, S., Wang, Y., Zhang, Y., & Chen, J. (2023). *Arsenic occurrence and cycling in the aquatic environment: A comparison between freshwater and seawater. Water*, 15(1), 147.
- Xing, Y., Liu, J., Wang, Q., & Zhang, L. (2024). *Arsenic contamination in sludge and sediment: Sources, transformations, and ecological risks. Water*, 16(24), 3633.
- Zhang, X., Li, Y., Chen, Q., & Huang, W. (2025). *Unstable geogenic arsenic in reclaimed coastal soils poses environmental risks. Communications Earth & Environment*, 6(1), 52.
- Zulkifli, S. Z., Rahman, H. A., & Abdullah, N. (2022). *Ecological and health risks of arsenic in topsoils and mangrove sediments in Peninsular Malaysia. Frontiers in Environmental Science*, 10, 939860.