Analisis Kandungan Timbal (Pb) Pada Sedimen Di Teluk Buyat

Glorya Rondonuwu*[1], Sri Seprianto Maddusa[2], Jootje Umboh[3]
Fakultas Kesehatan Masyarakat,Universitas Sam Ratulangi [1,2,]
*e-mail: gloriarondonuwu121@student.unsrat.ac.id

ABSTRAK
Teluk Buyat merupakan wilayah perairan pesisir yang berpotensi mengalami pencemaran logam berat akibat aktivitas pertambangan emas dan masukan dari daratan melalui aliran sungai. Salah satu logam berat yang berbahaya bagi lingkungan perairan dan organisme akuatik adalah timbal (Pb), yang cenderung terakumulasi pada sedimen. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan logam berat timbal (Pb) pada sedimen di perairan Teluk Buyat serta membandingkannya dengan baku mutu yang berlaku. Penelitian ini menggunakan pendekatan survei deskriptif dengan metode survei lapangan dan analisis laboratorium. Pengambilan sampel sedimen dilakukan pada 16 titik menggunakan teknik purposive sampling, sedangkan analisis kadar Pb dilakukan menggunakan metode Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP-MS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa logam berat Pb terdeteksi pada seluruh sampel sedimen dengan kisaran konsentrasi 2,6145–30,2800 µg/g. Jika dibandingkan dengan nilai Effects Range Low (ERL) berdasarkan NOAA Sediment Quality Guidelines, seluruh kadar Pb pada sedimen masih berada di bawah nilai ambang batas. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat pencemaran Pb pada sedimen Teluk Buyat tergolong rendah, namun keberadaan Pb pada seluruh titik menunjukkan adanya masukan logam berat ke lingkungan perairan. Oleh karena itu, diperlukan pemantauan kualitas lingkungan secara berkelanjutan untuk mencegah peningkatan pencemaran di masa mendatang.

Kata kunci : Timbal (Pb); Sedimen;Teluk Buyat; Logam Berat

ABSTRACT
Buyat Bay is a coastal marine area that has the potential to experience heavy metal pollution due to gold mining activities and land-based inputs transported through river flows. One of the heavy metals that poses a serious threat to aquatic environments and organisms is lead (Pb), which tends to accumulate in sediments. This study aimed to analyze the concentration of lead (Pb) in sediments from Buyat Bay waters and to compare the results with applicable sediment quality guidelines. The research employed a descriptive survey approach involving field sampling and laboratory analysis. Sediment samples were collected at 16 sampling stations using purposive sampling techniques, while Pb concentrations were analyzed using Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP-MS). The results showed that Pb was detected in all sediment samples, with concentrations ranging from 2.6145 to 30.2800 µg/g. When compared with the Effects Range Low (ERL) values based on the NOAA Sediment Quality Guidelines, all measured Pb concentrations were below the threshold limits. These findings indicate that Pb contamination levels in the sediments of Buyat Bay are relatively low; however, the presence of Pb at all sampling stations suggests continuous heavy metal input into the marine environment. Therefore, continuous environmental quality monitoring is necessary to prevent potential increases in pollution in the future.

Keywords **:** *Lead (Pb); Sediment; Buyat Bay; Heavy Metals*

PENDAHULUAN

Pencemaran logam berat merupakan salah satu permasalahan lingkungan dan kesehatan masyarakat yang masih menjadi perhatian global hingga saat ini, khususnya di wilayah pesisir dan laut. United Nations Environment Programme (UNEP) menyatakan bahwa aktivitas manusia seperti pertambangan, industri, transportasi laut, serta pembuangan limbah domestik telah meningkatkan pelepasan logam berat berbahaya ke lingkungan perairan. Logam berat bersifat persisten, sulit terdegradasi, dan dapat bertahan dalam lingkungan dalam jangka waktu lama, sehingga berpotensi menimbulkan dampak jangka panjang terhadap ekosistem dan kesehatan manusia (UNEP, 2025).

Salah satu logam berat yang menjadi perhatian utama adalah timbal (Pb). World Health Organization (WHO) menegaskan bahwa tidak terdapat ambang batas paparan timbal yang aman bagi manusia. Paparan timbal, bahkan pada konsentrasi rendah, dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan seperti gangguan sistem saraf, penurunan fungsi kognitif, anemia, kerusakan ginjal, gangguan kardiovaskular, serta berdampak serius pada pertumbuhan dan perkembangan anak serta kesehatan ibu hamil (WHO, 2024).

Pencemaran logam berat di wilayah laut dan pesisir Indonesia menjadi isu lingkungan yang semakin serius. Berbagai aktivitas antropogenik termasuk limbah industri, pertambangan, transportasi laut, serta pembuangan limbah domestik dan budidaya perairan berkontribusi terhadap peningkatan kadar logam berat di kolom air, sedimen, dan biota perairan. Kondisi ini berpotensi memicu akumulasi logam dalam jaringan organisme akuatik, yang selanjutnya dapat berdampak pada kesehatan ekosistem dan manusia melalui rantai makanan (El-Sharkawy 2025). Keberadaan logam berat dalam lingkungan akuatik bersifat persisten dan mudah terbioakumulasi dalam jaringan organisme, serta berpotensi mengalami biomagnifikasi sepanjang rantai makanan, terutama pada organisme tingkat trofik yang lebih tinggi seperti ikan (Oros 2025).

Teluk Buyat merupakan sebuah teluk kecil yang terletak di bagian pantai selatan Semenanjung Minahasa, Sulawesi Utara. Meskipun ukurannya tidak luas, kawasan ini cukup dikenal akibat adanya aktivitas pertambangan yang dilakukan oleh PT. Newmont Minahasa Raya sejak tahun 1996. Teluk tersebut dijadikan sebagai lokasi pembuangan limbah hasil operasi penambangan emas. Pada tahun 2004, kegiatan pertambangan dihentikan seiring berakhirnya produksi emas, namun proses pemantauan kondisi lingkungan pasca tambang tetap dilaksanakan hingga tahun 2009 (Rayhan dan Pramesty 2023).

Data kesehatan di Puskesmas Ratatotok dan Buyat menunjukkan bahwa keluhan vertigo, dispepsia, dan gastritis merupakan masalah kesehatan yang cukup sering dialami masyarakat yang tinggal di sekitar Teluk Totok dan Teluk Buyat pada periode 2023–2025. Kondisi ini mengarah pada kemungkinan adanya faktor risiko lingkungan yang mempengaruhi kesehatan masyarakat, salah satunya pajanan logam berat dari aktivitas perairan dan rantai makanan laut setempat. Hal ini sejalan dengan laporan masyarakat dan nelayan yang mengamati meningkatnya jumlah ikan yang mati secara mendadak dengan kondisi tubuh mengalami pembengkakan. Selain itu, warga sekitar juga melaporkan gejala kesehatan yang tidak biasa seperti tremor, sakit kepala, dan pembengkakan pada beberapa bagian tubuh. Investigasi pasca-penutupan kegiatan pertambangan kemudian menemukan adanya kontaminasi logam berat seperti arsen, antimon, merkuri, dan mangan di wilayah perairan Teluk Buyat. Hal ini sejalan dengan penelitian Arlinda, Mukhlis, Suksmerri, Lindawati dan Darwel (2023) bahwa paparan timbal (Pb) melalui air sumur di kawasan pertanian berisiko menimbulkan gangguan kesehatan pada masyarakat, termasuk pusing, mual, muntah, gatal-gatal, dan sesak napas. Gejala-gejala tersebut menunjukkan dampak toksik timbal yang memengaruhi berbagai sistem tubuh,

sehingga pemantauan kadar Pb di lingkungan dan sumber air menjadi sangat penting untuk melindungi kesehatan masyarakat.

Berdasarkan paparan tersebut, pencemaran timbal (Pb) di ekosistem pesisir Teluk Buyat berpotensi menimbulkan dampak lingkungan dan risiko kesehatan bagi masyarakat. Sedimen berperan sebagai media utama akumulasi Pb.

Penelitian ini dilaksanakan untuk mengetahui tingkat pencemaran timbal (Pb) di Teluk Buyat dengan menganalisis kandungan timbal pada sedimen. Fokus utama penelitian ini adalah mengukur kadar timbal (Pb) pada sedimen di Teluk Buyat serta membandingkan hasil pengukuran tersebut dengan baku mutu lingkungan yang berlaku. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi kualitas lingkungan perairan Teluk Buyat serta potensi risiko pencemaran logam berat terhadap ekosistem dan organisme perairan.

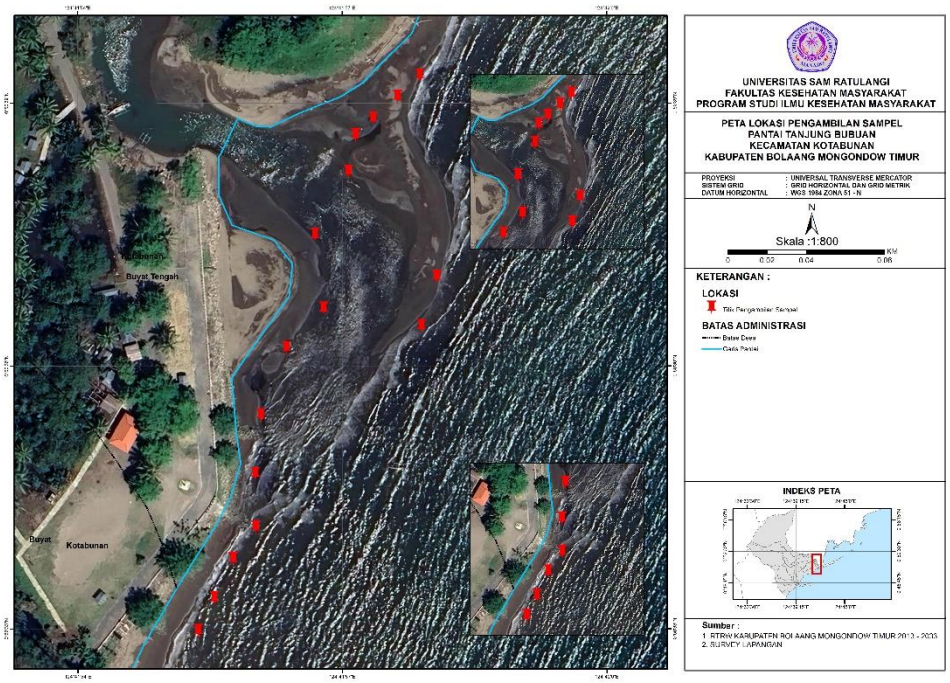
METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan survei deskriptif dengan metode survei lapangan dan analisis laboratorium yang bertujuan untuk menggambarkan kondisi pencemaran timbal (Pb) pada sedimen dan ikan di perairan Teluk Buyat. Lokasi penelitian berada di Teluk Buyat, Kabupaten Minahasa Tenggara (Bolaang Mongondow Timur), Provinsi Sulawesi Utara, yang dikenal sebagai wilayah pesisir dengan potensi pencemaran logam berat akibat aktivitas pertambangan emas dan kegiatan pesisir lainnya. Pengambilan sampel dilakukan pada bulan November, sedangkan analisis laboratorium kadar timbal (Pb) dilaksanakan di Laboratorium Kesehatan Masyarakat Makassar.

Tabel 1. Tempat/lokasi pengambilan sampel

Titik Sampel	Titik Koordinat	Sampel Lingkungan
Titik 1	0°50'38,61"N 124°41'57,48"E	Sedimen
Titik 2	0°50'38,784"N 124°41'56,982"E	Sedimen
Titik 3	0°50'38,778"N 124°41'57,252"E	Sedimen
Titik 4	0°50'38,82"N 124°41'57,144"E	Sedimen
Titik 5	0°50'36,78"N 124°41'58,074"E	Sedimen
Titik 6	0°50'36,456"N 124°41'57,69"E	Sedimen
Titik 7	0°50'38,88"N 124°41'56,91"E	Sedimen
Titik 8	0°50'38,466"N 124°41'57,216"E	Sedimen
Titik 9	0°50'35,298"N 124°41'55,488"E	Sedimen
Titik 10	0°50'34,26"N 124°41'55,638"E	Sedimen
Titik 11	0°50'36,654"N 124°41'56,586"E	Sedimen
Titik 12	0°50'36,204"N 124°41'56,16"E	Sedimen
Titik 13	0°50'33,36"N 124°41'55,32"E	Sedimen
Titik 14	0°50'34,158"N 124°41'55,812"E	Sedimen
Titik 15	0°50'33,216"N 124°41'55,356"E	Sedimen
Titik 16	0°50'33,348"N 124°41'55,344"E	Sedimen

Objek penelitian berupa sedimen dasar perairan yang diambil dari 16 titik sampling menggunakan teknik purposive sampling, dengan pertimbangan kedekatan terhadap sumber pencemar potensial seperti muara sungai, aktivitas dermaga, dan kawasan pertambangan. Variabel yang diamati dalam penelitian ini adalah kandungan timbal (Pb) pada sedimen dan ikan, yang didefinisikan sebagai konsentrasi logam berat Pb dalam sampel dan dianalisis menggunakan metode Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP-MS), dengan hasil pengukuran dinyatakan dalam satuan mikrogram per gram (µg/g). Sampel sedimen diambil pada kedalaman sekitar 10–15 cm dari permukaan sedimen, kemudian dilakukan proses pengeringan, penimbangan, dan analisis laboratorium.



Gambar 1. Peta Lokasi Sampel Buyat

Penentuan lokasi sampling dilakukan dengan bantuan Global Positioning System (GPS) untuk memastikan ketepatan dan keterwakilan lokasi penelitian, serta didukung oleh penggunaan peralatan lapangan seperti cool box, timbangan analitik, kamera, dan alat pelindung diri. Data yang dikumpulkan meliputi data primer yang diperoleh melalui observasi lapangan dan wawancara dengan masyarakat sekitar lokasi penelitian, serta data sekunder yang bersumber dari buku, jurnal ilmiah, dan referensi terkait sebagai pendukung analisis. Data hasil pemeriksaan laboratorium selanjutnya diolah secara deskriptif menggunakan komputer dan disajikan dalam bentuk tabel distribusi frekuensi, kemudian dibandingkan dengan nilai ambang batas logam timbal (Pb) berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) atau standar internasional yang relevan untuk menilai tingkat pencemaran. Tahapan penelitian meliputi tahap persiapan berupa pengurusan izin penelitian, tahap pelaksanaan pengambilan sampel dan analisis laboratorium, serta tahap pelaporan yang mencakup penyusunan laporan hasil penelitian dan konsultasi dengan dosen pembimbing.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Tabel 2. Kadar Timbal (Pb) Pada Sedimen di Teluk Buyat

No	Titik Pengambilan Sampel	Kadar Pb (µg/g)	NOAA Sediment Quality (µg/g)	Keterangan
1	Buyat (Titik 1)	3,3515	46,7	Di bawah baku mutu
2	Buyat (Titik 2)	4,8172	46,7	Di bawah baku mutu
3	Buyat (Titik 3)	5,9467	46,7	Di bawah baku mutu
4	Buyat (Titik 4)	4,1129	46,7	Di bawah baku mutu
5	Buyat (Titik 5)	6,0217	46,7	Di bawah baku mutu
6	Buyat (Titik 6)	2,6145	46,7	Di bawah baku mutu
7	Buyat (Titik 7)	4,3637	46,7	Di bawah baku mutu
8	Buyat (Titik 8)	2,8219	46,7	Di bawah baku mutu
9	Buyat (Titik 9)	30,2823	46,7	Di bawah baku mutu
10	Buyat (Titik 10)	5,4064	46,7	Di bawah baku mutu
11	Buyat (Titik 11)	7,4052	46,7	Di bawah baku mutu
12	Buyat (Titik 12)	4,7037	46,7	Di bawah baku mutu
13	Buyat (Titik 13)	4,3122	46,7	Di bawah baku mutu
14	Buyat (Titik 14)	5,0966	46,7	Di bawah baku mutu
15	Buyat (Titik 15)	3,1763	46,7	Di bawah baku mutu
16	Buyat (Titik 16)	3,4156	46,7	Di bawah baku mutu

Sumber: Hasil Analisis Balai Besar Laboratorium Kesehatan (BBLK) Makassar

Teluk Buyat terletak di bagian selatan Semenanjung Minahasa, Pulau Sulawesi, tepatnya di Kabupaten Bolaang Mongondow Timur, Provinsi Sulawesi Utara. Perairan Teluk Buyat berhadapan langsung dengan Laut Maluku dan memiliki karakteristik perairan yang relatif tenang karena bentuk teluk yang semi tertutup. Kondisi hidrodinamika tersebut menyebabkan Teluk Buyat berpotensi menjadi daerah akumulasi sedimen dan berbagai bahan pencemar, termasuk logam berat, yang terendapkan dalam jangka waktu panjang.

Secara geologi dan geomorfologi, wilayah Buyat dan sekitarnya tersusun atas satuan batuan vulkanik dan sedimen yang terbentuk akibat aktivitas magmatis dan proses tektonik regional. Struktur geologi daerah ini dipengaruhi oleh aktivitas sesar serta proses pelapukan yang menghasilkan material sedimen dari daratan. Material hasil erosi tersebut terbawa oleh aliran permukaan dan sungai menuju wilayah pesisir, kemudian terakumulasi di perairan Teluk Buyat. Kondisi geomorfologi berupa perbukitan vulkanik dan dataran rendah pesisir turut mendukung proses sedimentasi, terutama pada wilayah pesisir yang berfungsi sebagai daerah pengendapan sedimen halus. Proses sedimentasi ini semakin diperkuat oleh kondisi perairan teluk yang relatif tenang, sehingga memungkinkan terjadinya akumulasi sedimen secara berkelanjutan (Mokoagow et al., 2023).

Selain faktor geologi, masukan bahan pencemar dari daratan juga berperan dalam memengaruhi kualitas perairan Teluk Buyat. Penelitian terbaru pada tahun 2025 mengenai kualitas air Sungai Buyat yang bermuara langsung ke Teluk Buyat menunjukkan adanya indikasi pencemaran logam berat, seperti merkuri (Hg). Logam berat tersebut berpotensi terbawa melalui aliran sungai menuju perairan pesisir dan selanjutnya

terakumulasi pada sedimen dasar perairan, mengingat sedimen berfungsi sebagai media penyimpan logam berat dalam jangka panjang (Lagoari et al., 2025). Secara geografis, Teluk Buyat berbatasan dengan Laut Maluku di sebelah utara, wilayah daratan Kabupaten Bolaang Mongondow Timur di sebelah selatan, kawasan pesisir Desa Buyat di sebelah barat, serta kawasan pesisir dan perairan terbuka Laut Maluku di sebelah timur.

Berdasarkan hasil analisis laboratorium, kandungan timbal (Pb) terdeteksi pada seluruh titik pengambilan sampel sedimen yang berjumlah 16 titik. Konsentrasi Pb yang terukur menunjukkan variasi antar lokasi, dengan nilai berkisar antara 2,6145 µg/g hingga 30,2800 µg/g. Nilai terendah ditemukan pada Titik 6, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada Titik 9. Variasi kadar Pb antar titik ini mengindikasikan bahwa distribusi logam berat Pb dalam sedimen Teluk Buyat tidak merata, yang diduga dipengaruhi oleh perbedaan kondisi lingkungan, kedekatan dengan sumber pencemar, serta dinamika sedimentasi di masing-masing lokasi.

Jika dibandingkan dengan nilai ambang batas Effects Range Low (ERL) untuk timbal (Pb) pada sedimen sebesar 46,7 µg/g berdasarkan NOAA Sediment Quality Guidelines, seluruh konsentrasi Pb yang terukur masih berada di bawah nilai tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum potensi terjadinya efek biologis yang merugikan terhadap organisme bentik akibat paparan logam berat Pb di sedimen perairan Teluk Buyat masih tergolong rendah pada saat penelitian dilakukan.

PEMBAHASAN

Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa logam berat timbal (Pb) terdeteksi pada seluruh sampel sedimen yang diambil dari perairan Teluk Buyat. Konsentrasi Pb yang terukur bervariasi antar titik pengambilan sampel, yang mengindikasikan bahwa distribusi Pb dalam sedimen tidak merata secara spasial. Variasi ini mencerminkan adanya perbedaan kondisi lingkungan lokal, karakteristik perairan, serta intensitas aktivitas manusia di sekitar masing-masing lokasi. Sedimen perairan pesisir memiliki kemampuan tinggi dalam mengikat dan menyimpan logam berat, sehingga sering digunakan sebagai indikator utama untuk menilai tingkat pencemaran logam berat di suatu perairan. Masukan logam berat ke dalam sedimen dapat berasal dari proses alami maupun aktivitas antropogenik, termasuk aliran sungai yang membawa material dari daratan menuju wilayah pesisir.

Temuan dalam penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Afu dan Luturmas (2022) di perairan pesisir Tanjung Tiram, Sulawesi Tenggara, yang melaporkan bahwa Pb terdeteksi pada sedimen dengan kadar yang bervariasi antar lokasi pengambilan sampel. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Sastra et al. (2023) di Pantai Sampur, Bangka, yang menunjukkan bahwa Pb tetap terdeteksi pada sedimen pantai meskipun tingkat kontaminasinya tergolong rendah. Kondisi ini menegaskan bahwa sedimen pesisir berperan sebagai media

akumulasi logam berat dan mampu merekam keberadaan Pb yang masuk ke lingkungan perairan, baik dari sumber alami maupun aktivitas antropogenik.

Variasi kadar Pb antar titik sedimen di Teluk Buyat juga konsisten dengan hasil penelitian di perairan utara Semarang yang menunjukkan perbedaan konsentrasi Pb pada sedimen antar stasiun sampling. Hal ini mempertegas bahwa proses sedimentasi, dinamika perairan, serta kondisi lingkungan lokal berpengaruh terhadap distribusi Pb secara spasial di sedimen perairan pesisir (Tamba, Yulianto, & Widowati, 2025). Selain itu, penelitian di Selat Cunda, Lhokseumawe, melaporkan bahwa Pb yang terdeteksi pada sedimen memiliki hubungan positif dengan konsentrasi Pb pada organisme akuatik, menunjukkan bahwa sedimen berperan sebagai media akumulasi logam berat yang berpotensi memberikan dampak ekologis dalam jangka panjang (Ekamaida et al., 2025).

Hasil penelitian ini juga diperkuat oleh temuan Al Fauzan et al. (2024) di lingkungan terumbu karang Pulau Panjang, Banten, yang melaporkan bahwa Pb terdeteksi pada sedimen dengan konsentrasi yang bervariasi antar stasiun pengambilan sampel. Variasi tersebut dipengaruhi oleh faktor hidrodinamika perairan, seperti arus laut dan musim, serta intensitas aktivitas manusia di wilayah pesisir. Penelitian Triyanto, Nuraini, dan Haryanti (2024) menunjukkan bahwa Pb tidak hanya terakumulasi pada sedimen, tetapi juga pada jaringan lamun *Thalassia hemprichii*, dengan konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan sedimen dan air. Temuan ini menegaskan bahwa sedimen dapat berfungsi sebagai reservoir logam berat yang selanjutnya diakumulasikan oleh organisme laut melalui rantai makanan.

Berdasarkan perbandingan dengan nilai acuan kualitas sedimen menurut NOAA Sediment Quality Guidelines, kadar Pb pada sedimen Teluk Buyat masih berada di bawah nilai ambang batas Effects Range Low (ERL). Kondisi ini menunjukkan bahwa tingkat pencemaran Pb pada sedimen Teluk Buyat tergolong rendah dan belum berpotensi menimbulkan efek biologis yang merugikan bagi organisme bentik. Namun demikian, terdeteksinya Pb pada seluruh titik pengambilan sampel mengindikasikan bahwa perairan Teluk Buyat telah menerima masukan logam berat secara berkelanjutan. Oleh karena itu, sedimen tetap berpotensi menjadi sumber Pb bagi organisme perairan, terutama melalui proses resuspensi sedimen dan akumulasi dalam rantai makanan, sehingga pemantauan kualitas lingkungan secara berkala tetap diperlukan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa logam berat timbal (Pb) terdeteksi pada sedimen dan ikan di perairan Teluk Buyat, yang menunjukkan adanya masukan logam berat ke dalam lingkungan perairan tersebut. Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa kadar Pb pada seluruh sampel sedimen yang dianalisis masih berada di bawah nilai ambang batas yang ditetapkan dalam NOAA Sediment Quality Guidelines, sehingga secara umum tingkat pencemaran Pb pada sedimen Teluk Buyat tergolong rendah dan belum berpotensi

menimbulkan dampak biologis yang merugikan terhadap organisme perairan. Meskipun demikian, terdeteksinya Pb pada seluruh titik pengambilan sampel mengindikasikan bahwa sedimen Teluk Buyat telah berperan sebagai media akumulasi logam berat, sehingga diperlukan upaya pemantauan kualitas lingkungan secara berkala untuk mengantisipasi peningkatan pencemaran di masa mendatang.

SARAN

1. Perlu dilakukan pemantauan rutin kandungan logam berat timbal (Pb) pada sedimen di perairan Teluk Buyat.
2. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperluas jumlah sampel dan jenis ikan serta menambahkan parameter logam berat lainnya sebagai bahan perbandingan.

DAFTAR PUSTAKA

Adhani, R. & Husaini, H. 2017, *Logam Berat Sekitar Manusia*, Cetakan II, Banjarmasin: Lambung Mangkurat University Press.

Afu, L.O.A. & Luturmas, A. (2022) 'Content of heavy metals lead (Pb) and cadmium (Cd) in sediments in Tanjung Tiram waters, South Konawe', *Journal of Fish Health*, 1(2), pp. 45–52. (ADA)

Al Fauzan, A., Utami, D.A., Rachmayani, R. and Nurhidayati, A.U. (2024) Study of heavy metal lead (Pb) content in the coral reef environment of Panjang Island, Banten. *Bulletin of the Marine Geology*, 39(1), pp. 42–58.

Arlinda, S., Mukhlis, Suksmerri, Lindawati & Darwel, 2023. Analisis risiko kandungan timbal (Pb) pada air sumur kawasan pertanian di Kenagarian Simpang Tanjung Nan IV Kabupaten Solok. *Jurnal Sehat Mandiri*, 18(2).

Ekamaida, E., Kusmana, C., et al. (2025). Cadmium (Cd) and lead (Pb) levels in oysters, water, and sediment in the Cunda Strait, Lhokseumawe City. Indonesian *Journal of Marine Sciences*, 30(2).

Elfidasari, D. 2023, *Pterygoplichthys pardalis dan potensinya sebagai agen bioremediasi cemaran logam berat di perairan*, Depok: Penerbit Karya Bakti Makmur Indonesia.

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.

Fendjalanga, S.N.M., Krisyeb, Y. & Abubakar, A. 2023, 'Konsentrasi Logam Berat Timbal (Pb) pada Sedimen di Perairan Pantai Kupa-Kupa Kabupaten Halmahera Utara', *Journal of Coastal and Deep Sea*, 1(1), pp. 13–21.

Hamzah, A. & Priyadarshini, R. 2019, *Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat*, Cetakan pertama, Malang: UNITRI Press.

Handayani, C.O., Zu'amah, H. & Sukarjo, S. 2025, 'Human health risk assessment of heavy metals in the Serayu River water, Central Java-Indonesia', *Journal of Environmental Health*, 17(2).

Irianti, T.T., Kuswandi, K., Nuranto, S. & Budiyatni, A. 2017, *Logam Berat dan Kesehatan*, Yogyakarta.

Jusuf, D. D., Pinontoan, O. R., & Akili, R. H. (2021). Analisis Kandungan Timbal.(Pb) Dan Seng.(Zn) Pada Air. Dan Ikan. Di Tambak Ikan Kecamatan Remboken Kabupaten Minahasa Tahun 2021. KESMAS: Jurnal Kesehatan Masyarakat Universitas Sam Ratulangi, 10(6).

Kementerian Negara Lingkungan Hidup 2004, *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 179 Tahun 2004 tentang Perubahan atas Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut*, Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.

Lagoari, M. C., Riogilang, H., & Hendratta, L. A. (2025). *Analisis kualitas air Sungai Buyat sebagai dampak kegiatan pertambangan emas rakyat.* TEKNO, 23(91).

Mokoagow, D., Kasim, M., Hutagalung, R., & Akasea, N. (2023). Geologi daerah Buyat dan sekitarnya, Kecamatan Kotabunan, Kabupaten Bolaang Mongondow Timur, Provinsi Sulawesi Utara. *Journal of Applied Geoscience and Engineering*, 2(2), 94-107.

Mulia, B.I.D., Muskananfola, M.R. & Purnomo, P.W. 2023, 'Potensi pencemaran timbal (Pb) dan kadmium (Cd) berdasarkan analisis faktor pengayaan dan faktor kontaminasi di perairan Teluk Jepara', *Management of Aquatic Resources Journal (MAQUARES)*, 10(1), pp. 1–10.

Mustofa, A. 2022, *Ekologi Perairan*, Jepara: UNISNU Press.

NOAA (2022) *Sediment Quality Guidelines*. National Oceanic and Atmospheric Administration.

Oros, A. 2025, 'Bioaccumulation and trophic transfer of heavy metals in marine fish: Ecological and ecosystem-level impacts', *Journal of Xenobiotics*, 15(2), pp. 59.

Pinotoan, O.R., Mawo, F.H.M., Dwisel, F. dan Lapian, L.G. (2025) *Pencemaran Lingkungan (Khusus Logam Berat)*. Cetakan pertama. Manado: Yayasan Bina Lentera Insan.

Rayhan, A. & Pramesty, W.A. 2023, 'Implementasi Minamata Convention on Mercury terhadap kasus pencemaran merkuri dan arsen di Teluk Buyat Indonesia', *Tirtayasa Journal of International Law*, 2(1).

Rumoey, D.S., Umar, N. & Hadijah 2022, *Pencemaran Logam Berat pada Ekosistem Perairan*, Gowa: Pusaka Almaida.

Rusnam, R. & Efrizal, E. 2020, *Logam Berat, Penyebab dan Penanggulangannya*, Cetakan pertama, Jawa Timur: Uwais Inspirasi Indonesia.

Sastra, K., Nugraha, M.A. and Pamungkas, A. (2023) 'Status kontaminasi logam berat timbal (Pb) dan tembaga (Cu) pada sedimen permukaan Pantai Sampur, Kabupaten Bangka Tengah', *Journal of Tropical Marine Science*, 6(2), pp. 137–146.

Simatupang, M.M., Veronika, E., Irfandi, A. & Azteria, V. 2024, 'Potential impacts of lead on health: a review of environmental exposure, population at risk, and toxic effects', *Journal of Environmental Health*, 16(3), pp. 277–288.

Siregar, R.S., Putra, D.P.E. and Nugraha, A. (2025) 'Distribution and accumulation of lead (Pb) in coastal sediments of Belitung waters', *Bulletin of Marine Geology*, 40(1), pp. 15–27. Available at:

Sugiarto, K.P., Kilawati, Y. & Mahmudi, M. 2025, 'Accumulation of Cd, Cu, Cr, and Pb in whiteleg shrimp and pond environment of traditional aquaculture systems in Sidoarjo, Indonesia', *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 27(1).

Sulistyo, A.A.H., Suprijanto, J. & Yulianto, B. 2024, 'Analisis kualitas air dan kandungan logam berat timbal (Pb) pada air laut di Perairan Pelabuhan Tanjung Emas Kota Semarang Jawa Tengah', *Journal of Marine Research*, 13(1), pp. 108–114.

Tamba, S.N., Yulianto, B. and Widowati, I. (2025) 'Kandungan timbal (Pb) pada air laut, sedimen, dan kerang hijau (*Perna viridis* Linnaeus, 1758) di Pantai Utara, Semarang', *Journal of Marine Research*, 14(4), pp. 759–772.

Tamburini, M., Badocco, D., Ercadi, R., Turicchia, E., Zampa, G., Gasparini, F., ... & Ponti, M. 2022, 'Bioaccumulation of mercury and other trace elements in the edible Holothurian *Holothuria (Halodeima) atra* in relation to gold mining activities in North Sulawesi, Indonesia', *Frontiers in Marine Science*, 9, 863629.

Tiwow, V.A., Rampe, M.J. & Sulistiawaty, S. 2022, 'Suseptibilitas magnetik dan konsentrasi logam berat sedimen Sungai Tallo di Makassar', *Jurnal Ilmiah Sains*, pp. 60–66.

Triyanto, H.C., Nuraini, R.A.T. & Haryanti, D., 2024. *Akumulasi logam berat timbal (Pb) pada air, sedimen, dan lamun (Thalassia hemprichii) di Pulau Kelapa Dua, Kepulauan Seribu*. *Journal of Marine Research*, 13(1), pp.37–44.

UNEP 2025, *Heavy Metals*, United Nations Environment Programme, diakses 19 November 2025, https://www.unep.org/cep/heavy-metals.

Widiyanto, T., Pratiwi, N.T.M. and Setyobudiandi, I. (2024) 'Bioaccumulation of lead (Pb) in edible marine fish and its potential health risk in Indonesian coastal waters', *Journal of Environmental Health*, 16(4), pp. 301–312.

World Health Organization 2024, *Lead poisoning and health*, Geneva: World Health Organization, diakses 20 November 2025, https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health.