

Zinc (Zn) as the predominant heavy metal in ship ballast water: a case study of the Laksamana Muda John Lie Vessel

Adista D. Pramassetya¹, Natalie D.C. Rumampuk², James J.H. Paulus², Vivanda O.J. Modaso³,
Deiske A. Sumilat¹, Markus T. Lasut¹

¹ Aquatic Science Study Program, Postgraduate Program, Sam Ratulangi University, Jl. Kampus UNSRAT Bahu, Manado 95115, Indonesia

² Marine Science Study Program, Faculty of Fisheries and Marine Science, Sam Ratulangi University, Jl. Kampus UNSRAT Bahu, Manado 95115, Indonesia

³ Utilization of Fishery Resources Study Program, Faculty of Fisheries and Marine Science, Sam Ratulangi University, Jl. Kampus UNSRAT Bahu, Manado 95115, Indonesia

*Correspondence: dizta49@gmail.com

Received: 8 April 2026 – Revised: 25 April 2026 – Accepted: 26 April 2026

ABSTRACT: Ballast water is essential for ship stability and navigational safety, yet it can facilitate the transboundary transport of chemical pollutants, including heavy metals. This study investigated the concentrations of lead (Pb), cadmium (Cd), copper (Cu), zinc (Zn), and nickel (Ni) in source seawater, pre-voyage ballast water, post-voyage ballast water, and destination seawater associated with the Laksamana Muda John Lie vessel. A quantitative before-after descriptive design was employed, with 14 samples collected across four conditions in triplicate, plus two controls. Temperature, pH, and salinity were measured as supporting parameters, while heavy metals were analyzed using ICP-MS following APHA Method 3125 after 0.45 µm membrane filtration at the WLN Laboratory. Results showed that Pb, Cd, Cu, and Ni were predominantly below detection limits across all sampling points. Zinc, however, was consistently detected in all conditions. Mean Zn concentrations in source seawater, pre-voyage ballast water, post-voyage ballast water, and destination seawater were 0.023, 0.275, 0.159, and 0.039 mg/L, respectively. Zn levels in ballast water exceeded the port water quality standard of 0.1 mg/L, indicating a potential pollution concern. Nevertheless, Wilcoxon signed-rank tests revealed no statistically significant differences in Zn concentrations across sampling stages ($p = 0.109$). These findings confirm that Zn is the predominant trace metal of concern in the studied ballast water, though its concentration remains relatively stable throughout the voyage. The study emphasizes the importance of routine Zn monitoring in ballast water and advocates for stricter discharge regulations to mitigate heavy metal pollution from maritime operations.

Keywords: ballast water; heavy metals; marine pollution; ICP-MS

PENDAHULUAN

Air ballast memiliki peranan penting dalam menjaga stabilitas, trim, draft, dan keselamatan kapal selama pelayaran. Namun, air ballast juga dapat menjadi media perpindahan organisme akuatik, patogen, sedimen, partikel tersuspensi, dan bahan pencemar kimia dari satu perairan ke perairan lain apabila tidak dikelola sesuai ketentuan (IMO, 2017; Kurniawan et al., 2022; Onyena and Nwaogbe, 2024).

Permasalahan air ballast di Indonesia perlu mendapat perhatian karena wilayah perairannya dilalui aktivitas pelayaran nasional dan internasional. Kapal yang masuk ke pelabuhan Indonesia berpotensi melakukan ballasting dan deballasting, sehingga air ballast dari perairan asal dapat masuk ke perairan tujuan. Kajian sebelumnya menunjukkan bahwa air ballast di pelabuhan aktif dapat berkaitan dengan risiko lingkungan dan kandungan logam berat, seperti yang dilaporkan di Pelabuhan Tanjung Emas, Tanjung Perak, dan pelabuhan Indonesia lainnya (Anisyah et al., 2016; Prakaatmaja et al., 2020; Basuki et al., 2022). Pengawasan terhadap hal tersebut diperkuat melalui KP-DJPL 627 Tahun

2022, yang mengatur pemeriksaan dan kepatuhan sistem manajemen air balas bagi kapal yang beroperasi di perairan Indonesia (Direktorat Jenderal Perhubungan Laut, 2022).

Selain membawa karakteristik perairan asal, air ballast dapat mengalami perubahan komposisi selama berada di dalam tangki kapal. Logam berat bersifat persisten dan dapat berada dalam bentuk terlarut, terikat pada partikel tersuspensi, atau tersimpan dalam sedimen (Pratiwi, 2020; Siregar et al., 2020). Pada lingkungan pelabuhan, aktivitas kapal dan dinamika sedimen dapat meningkatkan potensi akumulasi logam berat (Anggraini and Puryanti, 2019; Wibisono et al., 2022; Sulistyowati et al., 2023). Di dalam tangki ballast, interaksi air laut dengan material baja, korosi, degradasi lapisan pelindung, sistem proteksi korosi, dan sedimen dapat memengaruhi perubahan kadar logam berat (Tjahjono and Handoko, 2018; Wibowo and Cerlyawati, 2021; De Baere et al., 2014; Tolian et al., 2020; Bao et al., 2024).

Kajian mengenai logam berat dalam air ballast pada rute domestik Indonesia masih terbatas, termasuk pada wilayah Sulawesi Utara. Pelabuhan Bitung relevan dikaji karena berperan dalam aktivitas kapal niaga, kapal perintis,

kapal penumpang, kapal perikanan, dan konektivitas antar-pulau (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2020). Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis kadar Pb, Cd, Cu, Zn, dan Ni pada air laut asal di Pelabuhan Bitung, air ballast sebelum pelayaran, air ballast setelah pelayaran, dan air laut tujuan di Pelabuhan Biaro pada Laksamana Muda John Lie vessel.

MATERIAL DAN METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan di Pelabuhan Bitung dan Pelabuhan Biaro pada Laksamana Muda John Lie vessel. Kegiatan penelitian berlangsung pada Februari-April 2026, meliputi observasi lapangan, pengambilan sampel, analisis laboratorium, dan pengolahan data.

Sampel dan Teknik Pengambilan Sampel

Sampel penelitian terdiri atas air laut asal di Pelabuhan Bitung, air ballast sebelum pelayaran, air ballast setelah pelayaran, dan air laut tujuan di Pelabuhan Biaro. Masing-masing kondisi terdiri atas tiga kali pengulangan, ditambah dua sampel kontrol, sehingga total sampel berjumlah 14 sampel. Sampel kontrol digunakan sebagai pembanding untuk memastikan bahwa hasil pengukuran sampel utama tidak dipengaruhi oleh kontaminasi dari wadah, penanganan, maupun transportasi sampel.

Sampel air laut diambil dari sisi lambung kapal pada kedalaman kurang lebih 50 cm dari permukaan air. Sampel air ballast sebelum dan setelah pelayaran diambil dari titik yang sama pada tangki ballast kapal. Sampel dalam botol sampel dimasukkan ke dalam cool box berisi ice gel dan dikirim ke Laboratorium WLN untuk analisis logam berat. Sampel yang diambil menggunakan botol plastik kemudian disaring dengan membran filter 0,45 µm untuk memisahkan partikel tersuspensi, sedimen halus, dan material padatan dari fraksi air yang dianalisis sebagai logam terlarut.

Prosedur Laboratorium dan Analisis Data

Parameter fisika-kimia yang diamati meliputi suhu, pH, dan salinitas. Parameter utama yang dianalisis adalah kadar Pb, Cd, Cu, Zn, dan Ni. Pengujian kadar logam berat dilakukan di Laboratorium WLN menggunakan metode Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) yang mengacu pada APHA 3125 (APHA, 2017). Sampel yang telah dipreparasi dimasukkan ke dalam sistem ICP-MS, kemudian unsur logam dalam sampel mengalami ionisasi di dalam plasma argon bersuhu tinggi. Ion logam yang terbentuk selanjutnya dipisahkan berdasarkan rasio massa terhadap muatan dan dideteksi untuk menentukan konsentrasi Pb, Cd, Cu, Zn, dan Ni dalam sampel.

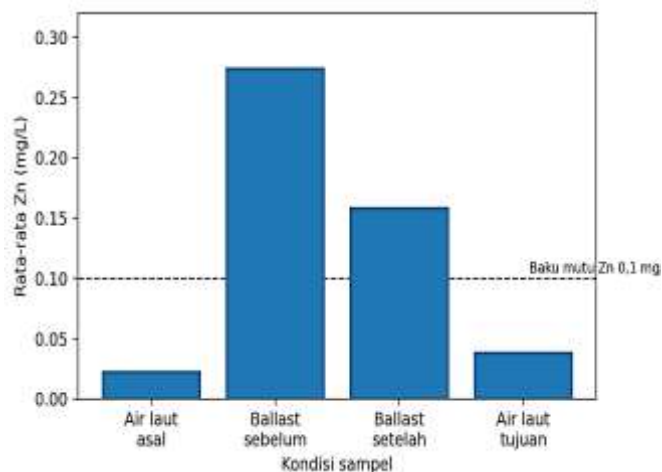


Figure 1. Mean Zn concentration in each sampling condition

Analisis data dilakukan secara deskriptif melalui perhitungan rentang nilai, rata-rata, dan status kesesuaian terhadap baku mutu. Hasil pengukuran logam berat dibandingkan dengan baku mutu air laut untuk perairan pelabuhan berdasarkan PP RI No. 22 Tahun 2021 (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, 2021). Uji Wilcoxon Signed-Rank Test digunakan sebagai analisis pendukung terhadap kadar Zn pada dua perbandingan, yaitu air ballast sebelum pelayaran dengan air ballast setelah pelayaran, serta air laut asal dengan air laut tujuan. Pengujian dilakukan pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Mengingat jumlah ulangan terbatas, hasil uji inferensial ditafsirkan secara hati-hati dan tidak digunakan sebagai satu-satunya dasar penarikan kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar logam berat pada air laut dan air ballast

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa Pb, Cd, Cu, dan Ni pada sebagian besar sampel berada di bawah batas deteksi alat. Nilai BDL mengacu pada batas deteksi yang tercantum dalam laporan hasil uji laboratorium, sehingga hasil tersebut tidak ditafsirkan sebagai ketiadaan mutlak logam dalam sampel. Oleh karena itu, pembahasan kuantitatif difokuskan pada Zn karena logam ini merupakan parameter yang terukur pada seluruh kondisi pengambilan sampel.

Kadar Zn pada air laut asal berkisar antara 0,022-0,024 mg/L dengan rata-rata 0,023 mg/L. Pada air ballast sebelum pelayaran, kadar Zn berkisar antara 0,245-0,326 mg/L dengan rata-rata 0,275 mg/L. Pada air ballast setelah pelayaran, kadar Zn berkisar antara 0,123-0,229 mg/L dengan rata-rata 0,159 mg/L.

Table 1. Summary of heavy metal concentrations in each sampling condition

Kondisi sampel	n	Pb, Cd, Cu, Ni	Rentang Zn (mg/L)	Rata-rata Zn (mg/L)	Kesesuaian Zn
Air laut asal (Pelabuhan Bitung)	3	BDL	0,022-0,024	0,023	Memenuhi baku mutu
Air ballast sebelum pelayaran	3	BDL	0,245-0,326	0,275	Melebihi baku mutu
Air ballast setelah pelayaran	3	BDL	0,123-0,229	0,159	Melebihi baku mutu
Air laut tujuan (Pelabuhan Biaro)	3	BDL	0,033-0,048	0,039	Memenuhi baku mutu

mg/L. Sementara itu, kadar Zn pada air laut tujuan berkisar antara 0,033-0,048 mg/L dengan rata-rata 0,039 mg/L. Berdasarkan baku mutu Zn untuk perairan pelabuhan sebesar 0,1 mg/L, kadar Zn pada air laut asal dan air laut tujuan masih memenuhi baku mutu. Sebaliknya, kadar Zn pada air ballast sebelum pelayaran dan air ballast setelah pelayaran melampaui baku mutu tersebut. Ringkasan hasil disajikan pada Table 1 dan rerata konsentrasi Zn ditampilkan pada Figure 1.

Hasil uji Wilcoxon Signed-Rank Test menunjukkan bahwa kadar Zn pada air ballast sebelum dan setelah pelayaran tidak berbeda signifikan secara statistik ($p = 0,109$; $\alpha = 0,05$). Perbandingan kadar Zn antara air laut asal dan air laut tujuan juga menunjukkan hasil yang tidak signifikan ($p = 0,109$; $\alpha = 0,05$). Dengan demikian, perbedaan nilai Zn antar kondisi lebih tepat ditafsirkan sebagai kecenderungan deskriptif hasil pengukuran, bukan sebagai perbedaan yang signifikan secara inferensial.

Konsentrasi Zn dan implikasi terhadap kualitas air ballast

Konsentrasi Zn pada air laut asal masih berada di bawah baku mutu, namun meningkat secara deskriptif setelah air laut masuk ke dalam tangki ballast, yaitu dari rata-rata 0,023 mg/L pada air laut asal menjadi 0,275 mg/L pada air ballast sebelum pelayaran. Kondisi ini menunjukkan bahwa air yang telah berada dalam sistem tangki ballast memiliki karakteristik kimia berbeda dibandingkan air laut asal. Peningkatan tersebut dapat dijelaskan secara konseptual melalui kemungkinan kontribusi proses internal tangki, seperti interaksi air laut dengan material baja, lapisan pelindung, dan sistem proteksi korosi. De Baere et al. (2014) menjelaskan bahwa anoda korban digunakan sebagai salah satu perlindungan korosi pada tangki ballast, sedangkan Jelmert and van Leeuwen (2000) menunjukkan bahwa penggunaan anoda seng dapat berkaitan dengan pelepasan Zn dalam sistem tangki ballast. Temuan ini juga sejalan dengan Xin et al. (2019) dan Wibowo and Cerlyawati (2021), yang menunjukkan bahwa air ballast dapat memiliki kandungan logam berbeda dari air laut sekitar pelabuhan. Dalam penelitian ini, dugaan kontribusi proses internal tangki tetap dipahami sebagai interpretasi berbasis konsep dan pustaka, bukan sebagai hasil pengujian langsung terhadap material tangki, coating, anoda korban, atau sedimen.

Rata-rata konsentrasi Zn menurun dari 0,275 mg/L pada air ballast sebelum pelayaran menjadi 0,159 mg/L setelah pelayaran. Penurunan ini dapat dikaitkan dengan kemungkinan proses adsorpsi, kompleksasi, presipitasi, dan pengendapan pada partikel atau sedimen di dalam tangki. Tolian et al. (2020) menunjukkan bahwa logam berat dalam tangki ballast dapat berkaitan dengan sedimen dan proses selama penyimpanan, sedangkan Bao et al. (2024) serta Xiong et al. (2024) menjelaskan bahwa logam, termasuk Zn, dapat berinteraksi dengan fraksi partikulat, kompleks sedimen alami, mineral, dan bahan organik. Namun, hasil Wilcoxon menunjukkan bahwa penurunan tersebut tidak signifikan secara statistik, sehingga perubahan konsentrasi Zn selama pelayaran perlu ditafsirkan sebagai kecenderungan deskriptif hasil pengukuran.

Meskipun secara deskriptif terjadi penurunan setelah pelayaran, konsentrasi Zn pada air ballast setelah pelayaran masih melampaui baku mutu 0,1 mg/L. Hal ini penting dari sudut pandang pengelolaan lingkungan karena air ballast yang

dibuang ke perairan tujuan tetap berpotensi menambah beban Zn di perairan pelabuhan. Onyena and Nwaogbe (2024) menekankan bahwa ballast water dapat memiliki implikasi terhadap ekosistem laut dan kesehatan manusia apabila membawa kontaminan kimia, sedimen, atau logam berat. Oleh karena itu, pengelolaan air ballast perlu memperhatikan aspek kimia selain aspek biologis, sejalan dengan penguatan pengawasan sistem manajemen air ballast melalui BWM Convention dan KP-DJPL 627 Tahun 2022 (IMO, 2017; Direktorat Jenderal Perhubungan Laut, 2022). Tindakan teknis yang relevan meliputi pemeliharaan tangki ballast, pemeriksaan lapisan pelindung, pengendalian korosi, evaluasi sistem proteksi korosi, pembersihan sedimen tangki, dan pemantauan kualitas air ballast secara berkala.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa Pb, Cd, Cu, dan Ni pada sebagian besar sampel berada di bawah batas deteksi alat, sedangkan Zn terukur pada seluruh kondisi pengambilan sampel. Konsentrasi Zn pada air laut asal dan air laut tujuan masih berada di bawah baku mutu perairan pelabuhan, sedangkan air ballast sebelum dan setelah pelayaran melampaui baku mutu Zn sebesar 0,1 mg/L. Meskipun konsentrasi Zn secara deskriptif meningkat setelah air masuk ke tangki ballast dan menurun setelah pelayaran, hasil Wilcoxon Signed-Rank Test menunjukkan tidak terdapat perbedaan signifikan, sehingga perubahan tersebut ditafsirkan sebagai kecenderungan deskriptif. Hasil ini menegaskan perlunya pemeliharaan tangki ballast, pengendalian korosi, pemeriksaan lapisan pelindung, pembersihan sedimen, dan pemantauan kualitas air ballast secara berkala untuk meminimalkan potensi pencemaran logam berat di perairan pelabuhan.

Ucapan Terima Kasih. Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu proses pengambilan sampel, analisis laboratorium, dan penyusunan artikel ini. *“Kami menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan dengan organisasi manapun mengenai bahan yang didiskusikan dalam naskah ini.”*

REFERENSI

- ANGGRAINI, W. and PURYANTI, D. (2019) Identifikasi pencemaran logam berat tembaga (Cu), timbal (Pb), dan kadmium (Cd) air laut di sekitar Pelabuhan Teluk Bayur Kota Padang. *Jurnal Ilmu Fisika*, 11(2), pp. 95-101.
- ANISYAH, A.U., JOKO, T. and NURJAZULI. (2016) Studi kandungan dan beban pencemaran logam Pb dari air balas kapal di Pelabuhan Tanjung Emas. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4(4), pp. 843-851.
- APHA. (2017) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, DC: American Public Health Association.
- BAO, T., WANG, P., HU, B., JIN, Q., ZHENG, T. and LI, D. (2024) Adsorption and distribution of heavy metals in aquatic environments: The role of colloids and effects of environmental factors. *Journal of Hazardous Materials*, 474, 134725.

- BASUKI, M., LUKMANDONO. and ZAU BEU, M.M. (2022) Ballast water management in Indonesian port based on environmental risk assessment. *Ecology, Environment and Conservation*, 28(1), pp. 86-90.
- DE BAERE, K., VERSTRAELEN, H., LEMMENS, L., LENAERTS, S., DEWIL, R., VAN INGELGEM, Y. and POTTERS, G. (2014) A field study of the effectiveness of sacrificial anodes in ballast tanks of merchant ships. *Journal of Marine Science and Technology*, 19(1), pp. 116-123.
- DIREKTORAT JENDERAL PERHUBUNGAN LAUT. (2022) Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Laut Nomor KP-DJPL 627 Tahun 2022 tentang pemberlakuan buku panduan nasional mengenai pengawasan kepatuhan dan penegakan aturan terhadap pelaksanaan pemeriksaan pengendalian sistem anti teritip dan sistem manajemen air balas oleh pejabat pemeriksa keselamatan kapal/pejabat pemeriksa kelaiklautan dan keamanan kapal asing di Indonesia. Jakarta: Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- IMO. (2017) *Ballast Water Management Convention (Regulation D-2)*. London: International Maritime Organization.
- JELMERT, A. and VAN LEEUWEN, J.H. (2000) Harming local species or preventing the transfer of exotics? Possible negative and positive effects of using zinc anodes for corrosion protection of ballast water tanks. *Water Research*, 34(6), pp. 1937-1940.
- KURNIAWAN, S.B., PAMBUDI, D.S.A., AHMAD, M.M., ALFANDA, B.D., IMRON, M.F. and ABDULLAH, S.R.S. (2022) Ecological impacts of ballast water loading and discharge: insight into the toxicity and accumulation of disinfection by-products. *Heliyon*, 8(3), e09107.
- ONYENA, A.P. and NWAOGBE, O.R. (2024) Assessment of water quality and heavy metal contamination in ballast water: Implications for marine ecosystems and human health. *Maritime Technology and Research*, 6(4), 270227.
- PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA. (2021) Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.
- PRAKAATMAJA, D.D., BASUKI, M. and PRANATAL, E. (2020) Penilaian risiko lingkungan akibat air pembuangan air balas di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. Prosiding Seminar Teknologi Kebumihan dan Kelautan (SEMITAN), 2(1), pp. 54-60.
- PRATIWI, D.Y. (2020) Dampak pencemaran logam berat (timbal, tembaga, merkuri, kadmium, krom) terhadap organisme perairan dan kesehatan manusia. *Jurnal Akuatek*, 1(1), pp. 59-65.
- SIREGAR, A.S., SULISTYO, I. and PRAYOGO, N.A. (2020) Heavy metal contamination in water, sediments and Planiliza subviridis tissue in the Donan River, Indonesia. *Journal of Water and Land Development*, 45, pp. 157-164.
- SULISTYOWATI, L., YOLANDA, Y. and ANDARESWARI, N. (2023) Harbor water pollution by heavy metal concentrations in sediments. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(4), pp. 885-898.
- TJAHJONO, A. and HANDOKO, W. (2018) The implementation of ballast water management in Port of Tanjung Emas Semarang: Strategy and model. *AAFL Bioflux*, 11(4), pp. 1231-1247.
- TOLIAN, R., JAVADZADEH, N., SANATI, A.M., MOHAMMADI ROOZBAHANI, M. and NOORINEJAD, M. (2020) The effectiveness of the ballast water exchange method in removal of the heavy metals in the ballast tanks of the ships, Bushehr Port-Persian Gulf. *Pollution*, 6(2), pp. 295-306.
- WIBISONO, Y., TJAHJONO, A., SUGIHARTO, R. and WAHYUNI, O. (2022) Factors affecting water quality and surface sediment at the Port of Tanjung Emas Semarang during the East Asian Monsoon. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 49(10), pp. 219-231.
- WIBOWO, A.B. and CERLYAWATI, H. (2021) Analisa kandungan logam Cd, Pb, Zn dan Cu pada tangki ballast kapal niaga di Pelabuhan Kendal dan Tanjung Mas Semarang. *Jurnal Maritim Polimarin*, 7(1), pp. 32-39.
- XIN, J.C.K., ABU HANIFAH, S., SALLEH, N.A., ROZI, N. and PADLI, N. (2019) Analysis of heavy metal concentrations in ballast water and seawater at Tanjung Pelepas Port. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 23(4), pp. 736-747.
- XIONG, H.Q., DU, Y.Y., FANG, Y.C., XIANG, H., QU, J.Z. and SUN, X.L. (2024) Understanding zinc transport in estuarine environments: Insights from sediment composition. *Sustainability*, 16(14), 6113.