

Chlorine Dose Optimization for Ballast Water Treatment on the Rear Admiral John Lie Training Ship: Compliance with IMO D-2 Standard and Control of Chlorine Residues

(Optimasi Dosis Klorin untuk Pengolahan Air Ballast pada Kapal Latih Laksamana Muda John Lie: Kesesuaian dengan Standar IMO D-2 dan Pengendalian Residu Klorin)

Moh. Ridwan^{1,2*}, Elvy Like Ginting³, Veibe Warouw³, Suzanne Lydia Undap³, Sandra Olivia Tilaar³, Deiske Adeliene Sumilat³

¹Master of Aquatic Science Program, Postgraduate Program, Sam Ratulangi University, Manado

²North Sulawesi Maritime Polytechnic

³Faculty of Fisheries and Marine Sciences, Sam Ratulangi University, Manado

*Corresponding author: muhammadridwan180396@gmail.com

Manuscript received: 19 April. 2026. Revision accepted: 27 June 2026

Abstract. Ballast water is one of the main routes for the movement of aquatic organisms, microorganisms, and potentially invasive species between ports. This study evaluated the effectiveness of chlorine in reducing biological indicators in the ballast water of the Rear Admiral John Lie Training Ship and assessed the safety of the remaining chlorine residue after treatment. Ballast water samples were taken while the ship was docked at Bitung Port, North Sulawesi, then treated with sodium hypochlorite at concentrations of 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 5.0; and 10.0 ppm for 60 minutes. Parameters observed included Total Plate Count (TPC), *Escherichia coli*, free chlorine residual, temperature, pH, and salinity. Data were analyzed descriptively by comparing the treatment results to the IMO D-2 Standard and the oxidant residue threshold. Untreated ballast water contained a TPC of 1,780 colonies/mL and 76 CFU of *E. coli*/100 mL. The TPC value decreased with increasing chlorine dose and reached <25 colonies/mL only at 10 ppm. *E. coli* decreased to <1 CFU/100 mL at 2, 5, and 10 ppm. Free chlorine residuals were recorded at 0.07 mg/L at 2 ppm, 0.28 mg/L at 5 ppm, and 1.30 mg/L at 10 ppm. The 2 ppm treatment was the most balanced dose, meeting the tested IMO D-2 biological parameters while maintaining chlorine residuals below 0.1 mg/L. Higher doses provided stronger biological suppression but resulted in excess chlorine residuals, requiring neutralization before discharge.

Keywords: ballast water; *E. coli*; IMO D-2; invasive species; Total Plate Count

Abstrak. Air ballast merupakan salah satu jalur utama perpindahan organisme akuatik, mikroorganisme, dan spesies berpotensi invasif antar pelabuhan. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas klorin dalam menurunkan indikator biologis pada air ballast Kapal Latih Laksamana Muda John Lie serta menilai keamanan residu klorin yang tersisa setelah perlakuan. Sampel air ballast diambil saat kapal sandar di Pelabuhan Bitung, Sulawesi Utara, kemudian diberi perlakuan natrium hipoklorit pada konsentrasi 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 5,0; dan 10,0 ppm selama 60 menit. Parameter yang diamati meliputi Angka Lempeng Total (Total Plate Count/TPC), *Escherichia coli*, residu klorin bebas, suhu, pH, dan salinitas. Data dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan hasil perlakuan terhadap Standar IMO D-2 dan ambang residu oksidan. Air ballast tanpa perlakuan mengandung TPC 1.780 koloni/mL dan *E. coli* 76 CFU/100 mL. Nilai TPC menurun seiring peningkatan dosis klorin dan mencapai <25 koloni/mL hanya pada 10 ppm. *E. coli* menurun menjadi <1 CFU/100 mL pada 2, 5, dan 10 ppm. Residu klorin bebas tercatat 0,07 mg/L pada 2 ppm, 0,28 mg/L pada 5 ppm, dan 1,30 mg/L pada 10 ppm. Perlakuan 2 ppm merupakan dosis paling seimbang karena memenuhi parameter biologis IMO D-2 yang diuji sekaligus mempertahankan residu klorin di bawah 0,1 mg/L. Dosis yang lebih tinggi memberikan penekanan biologis lebih kuat, tetapi menghasilkan residu klorin berlebih sehingga memerlukan netralisasi sebelum pembuangan.

Kata kunci: air ballast; *E. Coli*, IMO D-2; spesies invasif, Total Plate Count

PENDAHULUAN

Air ballast berperan penting dalam menjaga stabilitas kapal, trim, dan keselamatan operasional. Namun, air ballast juga dapat menjadi vektor perpindahan mikroorganisme, taksa planktonik, larva, dan organisme akuatik lain melintasi batas biogeografis. Ketika air ballast yang tidak diolah atau diolah secara tidak memadai dibuang ke pelabuhan penerima, organisme yang masih hidup berpotensi menetap, mengubah struktur komunitas lokal, memengaruhi perikanan dan akuakultur, serta membawa patogen ke perairan pesisir. Peran air ballast sebagai jalur invasi biologis global telah didokumentasikan selama beberapa dekade, dan studi terbaru tentang konektivitas pelabuhan tetap menunjukkan bahwa pergerakan kapal merupakan salah

satu penggerak utama risiko biosekuriti laut (Bailey, 2015; Costello et al., 2022; Kurniawan et al., 2022).

International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments mewajibkan pengelolaan air ballast untuk mengurangi penyebaran organisme akuatik berbahaya dan patogen. Standar Kinerja Air Ballast D-2 menetapkan kriteria numerik pembuangan, yaitu kurang dari 10 organisme viabel per meter kubik untuk organisme $\geq 50 \mu\text{m}$, kurang dari 10 organisme viabel per mL untuk organisme ≥ 10 dan $< 50 \mu\text{m}$, serta mikroba indikator di bawah ambang tertentu, termasuk *Escherichia coli* < 250 CFU/100 mL dan enterokokus usus < 100 CFU/100 mL (International Maritime Organization [IMO], 2004). Indonesia telah meratifikasi konvensi tersebut melalui Peraturan Presiden No. 132 Tahun 2015. Dengan demikian, pengelolaan air ballast menjadi relevan langsung bagi pelabuhan Indonesia, perairan pesisir, dan operasi kapal domestik dalam kerangka perlindungan lingkungan laut nasional.

Sistem pengolahan air ballast dapat menggunakan pemisahan fisik, filtrasi, iradiasi ultraviolet, deoksigenasi, elektroklorinasi, klorin dioksida, natrium hipoklorit, ozonasi, atau kombinasi beberapa mekanisme. Oksidan kimia banyak digunakan karena mampu menginaktivasi bakteri dan organisme planktonik melalui kerusakan oksidatif pada membran, protein, enzim, asam nukleat, dan sistem fotosintesis. Meskipun demikian, efektivitas pengolahan berbasis klorin tidak selalu seragam karena dipengaruhi oleh dosis klorin, waktu kontak, suhu air, pH, salinitas, kekeruhan, bahan organik, dan ketahanan biologis organisme target (Casas-Monroy et al., 2019; Sayinli et al., 2022; Stehouwer et al., 2015).

Tantangan utama dalam pengolahan berbasis klorin adalah menemukan keseimbangan antara inaktivasi biologis dan keamanan lingkungan. Dosis klorin yang lebih tinggi umumnya meningkatkan penurunan bakteri yang dapat dikultur dan organisme planktonik, tetapi dapat meninggalkan klorin bebas atau oksidan residual total (total residual oxidants/TRO) yang tinggi pada air hasil perlakuan. Residu oksidan di atas 0,1 mg/L dapat bersifat toksik bagi biota akuatik dan umumnya memerlukan netralisasi sebelum pembuangan (First et al., 2025). Di air laut, klorin juga dapat bereaksi dengan bahan organik alami dan bromida, lalu membentuk produk samping desinfeksi, terutama senyawa terbrominasi seperti bromoform. Senyawa tersebut menjadi perhatian lingkungan penting dalam pengolahan air ballast berbasis oksidan (Grote et al., 2022; Jang & Cha, 2020; Werschkun et al., 2012).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa klorinasi dapat menurunkan kelimpahan atau viabilitas organisme air ballast, tetapi tingkat penurunan risiko berbeda antar taksa dan kondisi operasional. Kajian berbasis DNA dan tingkat komunitas juga menunjukkan bahwa penurunan kelimpahan total tidak selalu identik dengan penurunan tekanan kolonisasi secara proporsional pada semua taksa (Lin et al., 2020). Oleh karena itu, penilaian dosis spesifik pada kapal tetap diperlukan, terutama untuk kapal yang beroperasi pada rute regional, ketika pertukaran dan pembuangan air ballast dapat terjadi berulang pada ekosistem pesisir yang saling terhubung.

Kapal Latih Laksamana Muda John Lie yang dioperasikan oleh Politeknik Pelayaran Sulawesi Utara berfungsi sebagai sarana pendidikan maritim sekaligus kapal operasional yang melayani rute di Sulawesi Utara. Praktik pengelolaan air ballast pada kapal ini berkaitan langsung dengan keselamatan kapal, operasi pelatihan, dan perlindungan lingkungan laut lokal. Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengukur TPC dan *Escherichia coli* pada air ballast kapal; (2) mengevaluasi penurunan indikator biologis tersebut setelah perlakuan klorin; dan (3) mengidentifikasi konsentrasi klorin yang memberikan keseimbangan praktis antara pemenuhan parameter biologis IMO D-2 yang diuji dan pengendalian residu klorin.

BAHAN DAN METODE

Desain penelitian dan lokasi pengambilan sampel

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen deskriptif kuantitatif. Air ballast dikumpulkan dari tangki ballast Kapal Latih Laksamana Muda John Lie saat kapal sandar di Pelabuhan Bitung, Sulawesi Utara, Indonesia. Penelitian dilaksanakan pada Januari-Juni 2026. Analisis TPC dilakukan di Laboratorium Pengujian Produk Perikanan dan Kelautan (LP3K), Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Manado. Analisis *Escherichia coli* dan residu klorin bebas dilakukan di Water Laboratory Nusantara (WLN), Manado.



Gambar 1. Konteks pengambilan sampel Kapal Latih Laksamana Muda John Lie di Pelabuhan Bitung, Sulawesi Utara, Indonesia.

Tabel 1. Karakteristik utama dan konteks operasional Kapal Latih Laksamana Muda John Lie.

Parameter	Deskripsi
Kapal	KL. Laksamana Muda John Lie
Panjang keseluruhan	63,00 m
Lebar konstruksi (moulded)	12,00 m
Tinggi konstruksi (moulded)	4,00 m
Sarat konstruksi (draft moulded)	2,80 m
Tonase kotor	1.200 ton
Kecepatan	12 knot
Tangki air ballast	83,464 m ³
Rute operasi	Bitung-Likupang-Biaro-Tagulandang-Buhias-Ulu Siau-Pehe-Makalehi-Para-Kahitang dan kembali ke Bitung

Rancangan perlakuan klorin

Perlakuan menggunakan larutan stok natrium hipoklorit (NaOCl) cair yang mengandung 12% klorin aktif. Larutan stok diencerkan berdasarkan persamaan $C_1V_1 = C_2V_2$ untuk menyiapkan larutan kerja klorin. Eksperimen utama menggunakan konsentrasi klorin 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 5,0; dan 10,0 ppm, dengan air ballast tanpa perlakuan sebagai kontrol. Waktu kontak ditetapkan selama 60 menit setelah penambahan klorin. Volume perlakuan disesuaikan dengan target analisis, yaitu 500 mL untuk analisis *Escherichia coli* dan residu klorin, serta 500 mL untuk analisis TPC.

Pengambilan dan penanganan sampel

Sampel untuk analisis TPC, *Escherichia coli*, dan residu klorin yaitu diambil dengan aseptik menggunakan sarung tangan dan masker serta menggunakan timba yang diberi tali untuk mengambil air yang ada di dalam tanki ballast. Kemudian air tersebut dimasukkan ke wadah steril, kemudian diangkut dalam kotak pendingin.

Tabel 2. Rancangan eksperimen dan parameter analisis.

Parameter	Konsentrasi klorin	Volume sampel	Catatan analisis
TPC	0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 5,0, 10,0 ppm	500 mL	3 ulangan; SNI 2332.3:2015
<i>E. coli</i>	0, 2,0, 5,0, 10,0 ppm	500 mL	2 ulangan; filtrasi membran
Residu klorin bebas	2,0, 5,0, 10,0 ppm	500 mL	Metode kolorimetri DPD
Kualitas air	Air ballast tanpa perlakuan	Sampel lapangan	Suhu, pH, salinitas

Analisis mikrobiologi dan organisme planktonik

Analisis TPC mengikuti SNI 2332.3:2015. Sebanyak 1 mL dari setiap sampel diencerkan secara bertingkat, diinokulasikan pada Plate Count Agar, diinkubasi pada 37 °C selama 24 jam, kemudian dihitung menggunakan alat penghitung koloni. Hasil dinyatakan sebagai koloni/mL. Analisis *Escherichia coli* dilakukan menggunakan filtrasi membran: sebanyak 100 mL sampel disaring melalui membran 0,45 µm, diletakkan pada media selektif, diinkubasi pada 44-44,5 °C, lalu dihitung sebagai CFU/100 mL.

Residu klorin dan kualitas air

Residu klorin bebas setelah perlakuan diukur menggunakan metode kolorimetri DPD dengan pembacaan spektrofotometri pada panjang gelombang 515 nm. Parameter kualitas air pendukung, meliputi suhu, pH, dan salinitas, diukur secara in situ. Hasil biologis diinterpretasikan terhadap kriteria kinerja IMO D-2, sedangkan residu klorin diinterpretasikan menggunakan ambang operasional 0,1 mg/L untuk sistem pengolahan air ballast berbasis oksidan.

Analisis data

Data dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan nilai sebelum dan sesudah perlakuan terhadap kriteria kinerja yang relevan. Nilai rata-rata dihitung untuk ulangan TPC. Persentase penurunan dihitung relatif terhadap kontrol tanpa perlakuan bila diperlukan. Nilai yang dilaporkan berada di bawah ambang deteksi laboratorium, seperti <25 koloni/mL atau <1 CFU/100 mL, dipertahankan menggunakan notasi asli laboratorium untuk menghindari interpretasi berlebihan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Uji pendahuluan klorin

Uji pendahuluan menggunakan klorin 10 ppm menurunkan TPC dari 970-1.400 koloni/mL pada air ballast tanpa perlakuan menjadi <25 koloni/mL setelah perlakuan. Hasil ini menunjukkan bahwa 10 ppm berfungsi sebagai perlakuan dosis tinggi dan mendukung penggunaan konsentrasi klorin yang lebih rendah dalam eksperimen utama untuk mengidentifikasi dosis yang lebih efisien Tabel 3.

Respons Angka Lempeng Total (TPC)

TPC menurun secara progresif seiring peningkatan konsentrasi klorin. Air ballast tanpa perlakuan memiliki rata-rata TPC 1.780 koloni/mL. Nilai rata-rata TPC menurun menjadi 1.276 koloni/mL pada 0,5 ppm, 925 koloni/mL pada 1,0 ppm, 808 koloni/mL pada 1,5 ppm, 676 koloni/mL pada 2,0 ppm, 500 koloni/mL pada 5,0 ppm, dan <25 koloni/mL pada 10,0 ppm. Penekanan TPC terkuat terjadi pada 10 ppm; namun, dosis tersebut menghasilkan residu klorin yang berlebih Tabel 4.

Tabel 3. Respons TPC pendahuluan terhadap perlakuan klorin 10 ppm.

Sampel	Perlakuan	TPC (koloni/mL)
AB 1	0 ppm	970
AB 2	0 ppm	1.400
ABK 1	10 ppm	<25
ABK 2	10 ppm	<25

Tabel 4. Angka Lempeng Total (TPC) pada air ballast sebelum dan sesudah perlakuan klorin.

Dosis klorin (ppm)	Ulangan	TPC (koloni/mL)
0	1	1.840
0	2	1.730
0	3	1.770
0	Rata-rata	1.780
0,5	1	1.290
0,5	2	1.300
0,5	3	1.240
0,5	Rata-rata	1.276
1,0	1	895
1,0	2	965
1,0	3	915
1,0	Rata-rata	925
1,5	1	790
1,5	2	835
1,5	3	800
1,5	Rata-rata	808
2,0	1	675
2,0	2	695
2,0	3	660
2,0	Rata-rata	676
5,0	1	500
5,0	2	502
5,0	3	500
5,0	Rata-rata	500
10,0	1	<25
10,0	2	<25
10,0	3	<25
10,0	Rata-rata	<25

Respons *Escherichia coli*

Air ballast tanpa perlakuan mengandung *Escherichia coli* sebesar 73 dan 79 CFU/100 mL, dengan rata-rata 76 CFU/100 mL. Nilai tersebut telah berada di bawah ambang IMO D-2 sebesar 250 CFU/100 mL. Setelah perlakuan klorin 2, 5, dan 10 ppm, *Escherichia coli* menurun menjadi <1 CFU/100 mL pada seluruh sampel yang diukur.

Tabel 5. Jumlah *Escherichia coli* pada air ballast sebelum dan sesudah perlakuan klorin.

Dosis klorin (ppm)	Ulangan	E. coli (CFU/100 mL)	Batas IMO D-2	Interpretasi
0	1	73	250	Memenuhi
0	2	79	250	Memenuhi
2,0	1	<1	250	Memenuhi
2,0	2	<1	250	Memenuhi
5,0	1	<1	250	Memenuhi
5,0	2	<1	250	Memenuhi
10,0	1	<1	250	Memenuhi
10,0	2	<1	250	Memenuhi

Residu klorin bebas dan kualitas air

Residu klorin bebas meningkat seiring peningkatan dosis klorin. Pada 2 ppm, residu klorin tercatat 0,07 mg/L, di bawah ambang 0,1 mg/L. Pada 5 ppm dan 10 ppm, residu klorin meningkat masing-masing menjadi 0,28 mg/L dan 1,30 mg/L, sehingga melampaui ambang. Hasil ini menunjukkan bahwa dosis klorin yang lebih tinggi meningkatkan penekanan biologis, tetapi juga meningkatkan risiko lingkungan yang terkait dengan residu oksidan. Pengukuran kualitas air pendukung menunjukkan suhu 28,2 °C, pH 8,1, dan salinitas 30,9 ppt.

Tabel 6. Residu klorin bebas setelah perlakuan.

Dosis klorin (ppm)	Residu klorin bebas (mg/L)	Ambang batas (mg/L)	Interpretasi
2,0	0,07	0,1	Memenuhi
5,0	0,28	0,1	Tidak memenuhi
10,0	1,30	0,1	Tidak memenuhi

Tabel 7. Kondisi kualitas air pendukung pada sampel air ballast.

Parameter	Satuan	Hasil	Catatan interpretatif
Suhu	°C	28,2	Kondisi alami air laut
pH	-	8,1	Dalam kisaran kualitas air laut Indonesia yang digunakan dalam laporan
Salinitas	ppt	30,9	Kondisi alami air laut

Pembahasan

Hasil penelitian menegaskan bahwa air ballast Laksamana Muda John Lie mengandung bakteri yang dapat dikultur dan organisme planktonik, sehingga mendukung premis bahwa air ballast dapat menjadi media perpindahan biologis, termasuk pada konteks operasi domestik. Temuan ini sejalan dengan bukti global bahwa tangki ballast dapat mengangkut kumpulan mikroba dan plankton antarpelabuhan, serta bahwa rute kapal dapat membentuk jalur penyebaran sekunder bagi spesies asing atau non-indigen (Bailey, 2015; Costello et al., 2022). Kepentingan lokal dari hasil ini terlihat pada karakter Bitung dan rute kepulauan di sekitar Sulawesi Utara sebagai sistem pesisir yang saling terhubung, tempat aktivitas ballasting dan deballasting berulang dapat memfasilitasi perpindahan organisme pada skala regional.

Penurunan TPC yang bergantung pada dosis menunjukkan bahwa klorin efektif menekan bakteri heterotrofik yang dapat dikultur pada sampel air ballast. Rata-rata TPC menurun dari 1.780 koloni/mL pada air tanpa perlakuan menjadi 676 koloni/mL pada 2 ppm dan <25 koloni/mL pada 10 ppm. Pola ini konsisten dengan mekanisme umum desinfeksi berbasis klorin, yaitu asam hipoklorit dan ion hipoklorit mengoksidasi struktur seluler serta mengganggu fungsi metabolik (Sayinli et al., 2022). Namun, TPC perlu ditempatkan sebagai indikator mikrobiologi pendukung, bukan sebagai parameter langsung IMO D-2. Hasil ini berguna untuk menunjukkan penurunan bakteri secara luas, tetapi tidak menggantikan kriteria mikroba indikator D-2 atau kriteria ukuran organisme viabel.

Hasil *Escherichia coli* perlu diinterpretasikan secara proporsional. Air ballast tanpa perlakuan sebenarnya telah memenuhi ambang D-2 karena nilai kontrol 73-79 CFU/100 mL berada di bawah batas 250 CFU/100 mL. Perlakuan klorin 2 ppm menurunkan *E. coli* menjadi <1 CFU/100 mL, dan tidak ada perbedaan praktis lebih lanjut pada 5 atau 10 ppm karena seluruh nilai perlakuan berada di bawah ambang deteksi laboratorium. Hasil ini mendukung sensitivitas *E. coli* terhadap klorin dan memperkuat bukti bahwa perlakuan klorin rendah hingga sedang dapat mengendalikan bakteri indikator fekal pada matriks air ballast ini. Dari perspektif

kesehatan masyarakat, hasil tersebut tetap relevan karena *E. coli* merupakan organisme indikator yang diakui dan mencakup strain dengan potensi patogenik serta resistensi antimikroba (Naidoo & Zishiri, 2025).

Meskipun hasil biologis cenderung mendukung konsentrasi klorin yang lebih tinggi, hasil residu klorin menunjukkan pentingnya optimasi dosis. Pada 2 ppm, residu klorin bebas sebesar 0,07 mg/L dan tetap berada di bawah ambang operasional 0,1 mg/L. Sebaliknya, 5 ppm dan 10 ppm menghasilkan residu masing-masing 0,28 mg/L dan 1,30 mg/L. Nilai tersebut bermasalah secara lingkungan karena oksidan reaktif di atas 0,1 mg/L dapat bersifat toksik bagi organisme akuatik dan mungkin memerlukan netralisasi sebelum pembuangan (First et al., 2025). Oleh karena itu, penilaian perlakuan yang hanya bertumpu pada penurunan organisme dapat menghasilkan rekomendasi yang tidak aman; pengendalian residu oksidan harus menjadi bagian dari setiap protokol praktis pengolahan air ballast.

Temuan bahwa 2 ppm merupakan dosis paling seimbang juga didukung oleh karakter kimia klorin dalam air laut. Air laut mengandung bromida dan bahan organik alami yang dapat bereaksi dengan oksidan membentuk produk samping desinfeksi terbrominasi. Tinjauan dan studi eksperimental menunjukkan bahwa pengolahan berbasis oksidan terhadap air laut dan air ballast simulasi dapat menghasilkan trihalometana, asam haloasetat, dan senyawa terhalogenasi lainnya (Grote et al., 2022; Jang & Cha, 2020; Werschkun et al., 2012). Dengan demikian, dosis klorin efektif yang lebih rendah lebih disukai apabila mampu mencapai titik akhir biologis sekaligus meminimalkan risiko residu oksidan dan produk samping.

Generalisasi hasil penelitian ini perlu dibatasi pada titik akhir yang diuji. Penelitian ini tidak mengevaluasi organisme viabel $\geq 50 \mu\text{m}$, *Vibrio cholerae* O1/O139 toksigenik, enterokokus usus, klorat, bromat, trihalometana, atau toksisitas kronis. Analisis juga dilakukan secara deskriptif, bukan dengan statistik inferensial. Keterbatasan tersebut tidak melemahkan kesimpulan utama untuk parameter yang diuji, tetapi menetapkan batas klaim. Dengan demikian, klorin 2 ppm dapat dinyatakan optimal pada kondisi sampel yang diuji dan waktu kontak 60 menit, bukan sebagai dosis universal untuk seluruh matriks air ballast atau semua kondisi operasi kapal.

Secara operasional, hasil penelitian mendukung klorinasi terkendali sebagai pilihan perlakuan yang layak untuk Kapal Latih Laksamana Muda John Lie. Implementasi perlu mencakup penentuan dosis terkalibrasi, pencampuran yang memadai, pengendalian waktu kontak, pemantauan rutin residu klorin, dan netralisasi ketika residu klorin melampaui ambang pembuangan. Validasi lanjutan di atas kapal perlu menguji kondisi air ballast yang berbeda, variasi musiman, volume perlakuan yang lebih besar, serta titik akhir biologis IMO D-2 tambahan. Langkah ini diperlukan karena kinerja pengolahan air ballast dapat berubah sesuai salinitas, pH, bahan organik, kekeruhan, dan komposisi komunitas biologis (Lin et al., 2020; Sayinli et al., 2022).

KESIMPULAN

Air ballast dari Kapal Latih Laksamana Muda John Lie mengandung bakteri yang dapat dikultur dan organisme planktonik yang terukur, meliputi rata-rata TPC 1.780 koloni/mL dan *Escherichia coli* 76 CFU/100 mL. Perlakuan klorin menurunkan seluruh indikator biologis yang diuji. TPC menurun secara bergantung dosis dan mencapai <25 koloni/mL hanya pada 10 ppm. *Escherichia coli* menurun menjadi <1 CFU/100 mL pada 2, 5, dan 10 ppm. Dengan mempertimbangkan kinerja biologis dan residu klorin, 2 ppm merupakan dosis paling seimbang karena menurunkan *Escherichia coli* hingga memenuhi kriteria IMO D-2 yang diuji serta mempertahankan residu klorin bebas pada 0,07 mg/L, di bawah ambang 0,1 mg/L. Dosis 5 dan 10 ppm menghasilkan penekanan biologis lebih kuat, tetapi melampaui ambang residu klorin

dan memerlukan netralisasi sebelum pembuangan. Klorinasi terkendali pada dosis 2 ppm dengan pemantauan residu direkomendasikan sebagai titik awal operasional yang paling sesuai untuk pengolahan air ballast pada kapal ini, dengan tetap memerlukan validasi lanjutan di atas kapal pada kondisi kualitas air yang lebih luas dan titik akhir D-2 tambahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Pelayaran Sulawesi Utara atas akses terhadap informasi kapal dan pengambilan sampel air ballast, LP3K FPIK Universitas Sam Ratulangi atas dukungan laboratorium, serta Water Laboratory Nusantara Manado atas dukungan analisis. Informasi pendanaan, perizinan, dan pernyataan etik disesuaikan dengan ketentuan jurnal tujuan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2015). SNI 2332.3:2015: Cara uji mikrobiologi - Bagian 3: Penentuan angka lempeng total pada produk perikanan. BSN.
- Bailey, S. A. (2015). An overview of thirty years of research on ballast water as a vector for aquatic invasive species to freshwater and marine environments. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 18(3), 261-268. <https://doi.org/10.1080/14634988.2015.1027129>
- Costello, K. E., Lynch, S. A., McAllen, R., O'Riordan, R. M., & Culloty, S. C. (2022). Assessing the potential for invasive species introductions and secondary spread using vessel movements in maritime ports. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 113496. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113496>
- First, M. R., et al. (2025). Assessing the performance of shipboard instruments used to monitor total residual oxidants. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(11), 2068. <https://doi.org/10.3390/jmse13112068>
- Grote, M., et al. (2022). Inputs of disinfection by-products to the marine environment from various industrial activities: Comparison to natural production. *Water Research*, 217, 118383. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118383>
- International Maritime Organization. (2004). *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments*, 2004. IMO.
- International Maritime Organization. (2024). *Implementing the Ballast Water Management Convention*. IMO.
- Jang, P.-G., & Cha, H.-G. (2020). Long-term changes of disinfection byproducts in treatment of simulated ballast water. *Ocean Science Journal*, 55, 265-277. <https://doi.org/10.1007/s12601-020-0015-9>
- Kurniawan, S. B., Pambudi, D. S. A., Ahmad, M. M., Alfanda, B. D., Imron, M. F., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09107>
- Lin, Y., Zhan, A., Hernandez, M. R., Paolucci, E., MacIsaac, H. J., & Briski, E. (2020). Can chlorination of ballast water reduce biological invasions? *Journal of Applied Ecology*, 57(2), 332-343. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13528>
- Naidoo, N., & Zishiri, O. T. (2025). Presence, pathogenicity, antibiotic resistance, and virulence factors of *Escherichia coli*: A review. *Bacteria*, 4(1), 16. <https://doi.org/10.3390/bacteria4010016>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 132 Tahun 2015 tentang Pengesahan The International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, 2004.
- Sayinli, B., Dong, Y., Park, Y., Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2022). Recent progress and challenges facing ballast water treatment: A review. *Chemosphere*, 291, 132776. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132776>
- Werschkun, B., Sommer, Y., & Banerji, S. (2012). Disinfection by-products in ballast water treatment: An evaluation of regulatory data. *Water Research*, 46(16), 4884-4901. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.034>