

## PERANCANGAN DAN ANALISIS SISTEM BALLAST WATER TREATMENT UNTUK MEMENUHI STANDAR INTERNASIONAL

Ramdhani Yusli Arbain Sugoro<sup>1\*</sup>, Moh. Hafidz Efendy<sup>2</sup>, Deza Zalia Permata Dewi<sup>3</sup>, Nafsta  
Rahmadani<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia

e-mail: \*<sup>1</sup>...@uis.ac.id

### Abstrak

Air ballast yang dibuang tanpa pengolahan dapat membawa organisme invasif ke perairan lain sehingga kapal wajib memenuhi standar D-2 IMO BWMC. Penelitian ini merancang sistem Ballast Water Treatment (BWT) untuk kapal bulk carrier 20.000 DWT milik PT Jasa Armada Indonesia Tbk., Batam. Desain mengintegrasikan filtrasi mekanik 50  $\mu\text{m}$  dan disinfeksi UV (dosis minimum 186  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ , IMO BWM.2/Circ.65) berkapasitas 1.000  $\text{m}^3/\text{jam}$ , dimodelkan dengan EPANET 2.2 dan ANSYS Fluent 2024 R2. Hasil analisis menunjukkan seluruh parameter standar D-2 terpenuhi: organisme  $\geq 50 \mu\text{m} < 10 \text{ org}/\text{m}^3$ , koliform tinja  $< 250 \text{ CFU}/100 \text{ mL}$ , dan *Vibrio cholerae*  $< 1 \text{ CFU}/100 \text{ mL}$ . Dosis UV rata-rata 198  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  dengan uniformitas  $\text{CV} = 8,4\%$  (batas IMO  $< 15\%$ ). Simulasi Monte Carlo 10.000 iterasi menghasilkan probabilitas kepatuhan D-2 sebesar 98,7%. Total Cost of Ownership 15 tahun Rp 4,8 miliar, jauh lebih rendah dibandingkan estimasi denda PSC Rp 36 miliar.

Kata kunci : ballast water treatment; IMO BWMC; UV disinfection; standar D-2; kapal bulk carrier

### Abstract

Untreated ballast water discharge can carry invasive organisms to other waters, so ships must comply with the IMO BWMC D-2 standard. This study designs a Ballast Water Treatment (BWT) system for a 20,000 DWT bulk carrier owned by PT Jasa Armada Indonesia Tbk., Batam. The design integrates 50  $\mu\text{m}$  mechanical filtration and UV disinfection (minimum dose 186  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ , IMO BWM.2/Circ.65) with a capacity of 1,000  $\text{m}^3/\text{hour}$ , modeled with EPANET 2.2 and ANSYS Fluent 2024 R2. The analysis shows that all D-2 parameters are met: organisms  $\geq 50 \mu\text{m} < 10 \text{ org}/\text{m}^3$ , fecal coliform  $< 250 \text{ CFU}/100 \text{ mL}$ , and *Vibrio cholerae*  $< 1 \text{ CFU}/100 \text{ mL}$ . The average UV dose is 198  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  with a uniformity of  $\text{CV} = 8.4\%$  (IMO limit  $< 15\%$ ). A 10,000-iteration Monte Carlo simulation gives a D-2 compliance probability of 98.7%. The 15-year Total Cost of Ownership is IDR 4.8 billion, far below the estimated PSC fines of IDR 36 billion.

Keywords : ballast water treatment; IMO BWMC; UV disinfection; D-2 standard; bulk carrier

## 1. PENDAHULUAN

Air ballast digunakan untuk menjaga stabilitas dan sarat kapal, tetapi saat dibuang di pelabuhan lain dapat membawa organisme asing yang menjadi spesies invasif dan merusak ekosistem (Carlton, 2014; Inaba et al., 2017). Karena itu *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments* (BWM Convention) mewajibkan kapal mengolah air ballast hingga memenuhi standar D-2 (IMO, 2004).

Standar D-2 membatasi jumlah organisme hidup dan bakteri indikator dalam air ballast yang dibuang (Liebich et al., 2012). Pemilihan teknologi pengolahan perlu mempertimbangkan efektivitas, kapasitas, dan biaya (Moen & Klauer, 2020), serta persyaratan penerimaan sistem oleh IMO dan otoritas negara pelabuhan seperti USCG (2019).

Penelitian ini bertujuan merancang sistem BWT dua tahap (filtrasi dan disinfeksi UV) untuk kapal *bulk carrier* 20.000 DWT di Batam, menganalisis kinerjanya terhadap standar D-2, dan menilai kelayakan ekonominya.

## 2. METODE PENELITIAN

### Objek Penelitian

Objek penelitian adalah sistem ballast eksisting MV. Samudera Jaya I, kapal *bulk carrier* 20.000 DWT milik PT Jasa Armada Indonesia Tbk., Batam. Audit sistem eksisting dilakukan dengan dukungan data spesifikasi teknis dari mitra.

### Pemodelan

Karakterisasi sistem perpipaan dimodelkan dengan EPANET 2.2, sedangkan aliran pada unit UV dimodelkan dengan ANSYS Fluent 2024 R2. Kepatuhan terhadap standar D-2 diuji dengan simulasi Monte Carlo sebanyak 10.000 iterasi.

### Acuan Standar

Kinerja dibandingkan dengan standar D-2 IMO BWMC dan pedoman persetujuan sistem IMO BWM.2/Circ.65. Sampel biologis tambahan di perairan Batam diambil secara independen karena data yang tersedia terbatas.

### Analisis Biaya

*Total Cost of Ownership* (TCO) 15 tahun dihitung dan dibandingkan dengan estimasi denda *Port State Control* (PSC) jika terjadi ketidakpatuhan.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Audit Sistem Eksisting dan Rancangan

Tabel 1. Sistem ballast eksisting dan target rancangan

| Parameter                | Eksisting                       | Target rancangan                         |
|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|
| Kapasitas tangki ballast | 8.500 m <sup>3</sup>            | 8.500 m <sup>3</sup>                     |
| Laju pengisian maksimum  | 1.200 m <sup>3</sup> /jam       | 1.000 m <sup>3</sup> /jam (dibatasi BWT) |
| Densitas organisme masuk | 8.500–12.000 org/m <sup>3</sup> | < 10 org/m <sup>3</sup> (D-2)            |
| Sistem kontrol           | Manual                          | Otomatis PLC                             |

Rancangan terdiri atas dua tahap, yaitu (1) *pre-filtration* dengan *automatic back-flush filter* 50 µm berkapasitas 1.000 m<sup>3</sup>/jam, dan (2) disinfeksi UV dengan 4 modul × 250 m<sup>3</sup>/jam pada dosis minimum 186 mJ/cm<sup>2</sup> dan transmitansi 65%.

### Kinerja terhadap Standar D-2

Tabel 2. Kinerja BWT terhadap standar IMO D-2

| Parameter              | Hasil                   | Syarat                   | Status    |
|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|
| Organisme ≥ 50 µm      | < 10 org/m <sup>3</sup> | < 10 org/m <sup>3</sup>  | Terpenuhi |
| Organisme 10–50 µm     | < 10 org/mL             | < 10 org/mL              | Terpenuhi |
| Koliform tinja         | < 250 CFU/100 mL        | -                        | Terpenuhi |
| <i>Vibrio cholerae</i> | < 1 CFU/100 mL          | -                        | Terpenuhi |
| Efisiensi filter 50 µm | 99,4%                   | ≥ 95%                    | Terpenuhi |
| Dosis UV rata-rata     | 198 mJ/cm <sup>2</sup>  | ≥ 186 mJ/cm <sup>2</sup> | Terpenuhi |
| Pressure drop          | 0,82 bar                | ≤ 1,0 bar                | Terpenuhi |

Seluruh parameter terpenuhi. Uniformitas dosis UV dengan CV = 8,4% berada di bawah batas IMO (< 15%), dan simulasi Monte Carlo 10.000 iterasi menghasilkan probabilitas kepatuhan D-2 sebesar 98,7%.

### Total Cost of Ownership

Tabel 3. Total cost of ownership 15 tahun

| Komponen biaya                  | Biaya (Rp juta) | Proporsi |
|---------------------------------|-----------------|----------|
| CAPEX (peralatan dan instalasi) | 2.800           | 58,3%    |
| Komisioning dan sertifikasi IMO | 280             | 5,8%     |
| Biaya energi listrik 15 tahun   | 680             | 14,2%    |
| Penggantian lampu UV            | 320             | 6,7%     |
| Perawatan dan suku cadang       | 480             | 10,0%    |
| Inspeksi PSC                    | 240             | 5,0%     |
| Total TCO                       | 4.800           | 100%     |

Dengan estimasi denda PSC akibat ketidakpatuhan sebesar USD 80.000 per insiden  $\times$  2 insiden per tahun  $\times$  15 tahun atau sekitar Rp 36 miliar, TCO sistem BWT sebesar Rp 4,8 miliar jauh lebih rendah sehingga kelayakan ekonominya kuat.

#### **Kendala Penelitian**

Sertifikasi rancangan BWT oleh BKI dan verifikasi IMO BWM.2/Circ.65 memerlukan 8 bulan, lebih lama dari 5 bulan yang direncanakan. Ketersediaan data biologis air ballast di perairan Batam terbatas sehingga tim melakukan pengambilan sampel independen tambahan.

### **4. KESIMPULAN**

1. Sistem BWT dua tahap (filtrasi 50  $\mu$ m dan disinfeksi UV 1.000 m<sup>3</sup>/jam) memenuhi seluruh parameter standar IMO D-2, dengan dosis UV rata-rata 198 mJ/cm<sup>2</sup> dan efisiensi filter 99,4%.
2. Uniformitas dosis UV (CV = 8,4%) memenuhi batas IMO, dan probabilitas kepatuhan D-2 berdasarkan simulasi Monte Carlo adalah 98,7%.
3. TCO 15 tahun sebesar Rp 4,8 miliar jauh lebih rendah daripada estimasi denda PSC sebesar Rp 36 miliar, sehingga rancangan layak secara ekonomi.

### **5. SARAN**

Berikut beberapa saran dari penelitian ini:

1. Perlu dikaji integrasi teknologi ozonisasi sebagai suplemen UV untuk kondisi turbiditas tinggi pada musim hujan.
2. Perlu dikembangkan sensor optik *real-time* untuk densitas organisme agar kepatuhan terhadap standar D-2 dapat dipantau secara berkelanjutan.

### **DAFTAR PUSTAKA**

- Carlton, J. T. (2014). Bioinvasions in the Great Lakes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(4), 246–247.
- IMO. (2004). *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM Convention)*.
- IMO. (2016). *BWM.2/Circ.62 – Guidance on Methodologies for Enumerating Viable Organisms*.
- IMO. (2020). *BWM.2/Circ.65 – Guidance for the Approval of Ballast Water Management Systems*.
- Inaba, K., Gollasch, S., & David, M. (2017). Ballast water port baseline assessments. *Ocean & Coastal Management*, 148, 36–45.
- Liebich, V., Nehring, S., & Gollasch, S. (2012). Analysis of the IMO D-2 standard options. *Journal of Sea Research*, 70, 12–21.
- Moen, A., & Klauer, B. (2020). Cost-benefit analysis of ballast water treatment. *Transportation Research Part D*, 83, 102349.
- USCG. (2019). *Ballast Water Management Program: Final Rule*. Federal Register Vol. 84, No. 172.
- Wright, D. A., et al. (2007). Bacterial deflocculation for UV treatment of ballast water. *Environmental Pollution*, 145(2), 550–554.