

Optimalisasi *Ballast Water Management Plan* (BWMP) Dalam Upaya Pencegahan Pencemaran Air Laut (Studi Kasus: MV. Ocean Perkasa)

Nadya Nurul Azzah¹, Tri Haryanto², Henna Nurdiansari³, Dety Sutralinda⁴, Firdaus Sitepu⁵

^{1,2,3,4,5}Teknologi Rekayasa Operasi Kapal (TROK), Politeknik Pelayaran (Poltekpel) Surabaya

Jl. Gunung Anyar Boulevard No. 1, Gunung Anyar, Surabaya, Jawa Timur

Email: nadyazzah8@gmail.com, triharyanto083@gmail.com, henna.nurdiansari@poltekpel-sby.ac.id,
dety.sutralinda@poltekpel-sby.ac.id, firdaus.sitepu@poltekpel-sby.ac.id

ABSTRAK

Pengelolaan air *ballast* yang tidak optimal berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan laut akibat perpindahan organisme antar perairan. Oleh karena itu, penerapan *Ballast Water Management Plan* (BWMP) menjadi hal yang penting dalam mendukung kepatuhan terhadap ketentuan *Ballast Water Management Convention* (BWMC). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa gangguan pada sistem *Ballast Water Treatment System* (BWTS), khususnya pada komponen pengolahan kimia dapat memengaruhi efektivitas pengelolaan air *ballast*. Pada penelitian ini memiliki keterbaruan pada fokus kajian optimalisasi penerapan BWMP melalui identifikasi akar permasalahan malfungsi sistem *Total Residual Oxidant* (TRO) akibat sumbatan pada *T-strainer* serta keterkaitannya dengan aspek operasional dan perawatan di atas kapal. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kualitatif deskriptif dengan teknik pengumpulan data melalui observasi, wawancara, dan dokumentasi. Analisis data dilakukan menggunakan diagram *fishbone*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak optimalnya penerapan BWMP dipengaruhi oleh faktor manusia, mesin, metode, material, lingkungan, dan manajemen operasional. Sumbatan pada *T-strainer* sistem TRO akibat endapan yang tidak dibersihkan secara rutin menyebabkan kinerja sistem BWTS menjadi tidak stabil dan memicu *alarm* maupun kondisi *trip*. Selain itu, keterbatasan pemahaman kru terhadap pelaksanaan *ballast operation* turut memengaruhi efektivitas pengelolaan air *ballast*. Dengan peningkatan perawatan sistem secara berkala dan penguatan pemahaman awak kapal, penerapan BWMP dapat berjalan lebih optimal dan mendukung upaya pencegahan pencemaran air laut.

Kata kunci: *Ballast Water Management Plan* (BWMP), *Ballast water Treatment System* (BWTS), *Total Residual Oxidant* (TRO), Diagram *Fishbone*, Pencemaran Air Laut, MV. Ocean Perkasa

ABSTRACT

Suboptimal ballast water management has the potential to pollute the marine environment by facilitating the movement of organisms between waters. Therefore, implementing the *Ballast Water Management Plan* (BWMP) is important in support of compliance with the provisions of the *Ballast Water Management Convention* (BWMC). Previous research has shown that disturbances in the *Ballast Water Treatment System* (BWTS), especially in the chemical treatment component, can affect the effectiveness of ballast water management. This research offers a new focus on optimizing the implementation of BWMP by identifying the root cause of malfunction in the *Total Residual Oxidant* (TRO) system due to blockages in the *T-strainer*, and its relationship with operational and maintenance aspects on board. The research method is a descriptive qualitative method, with data collected through observation, interviews, and documentation. Data analysis was carried out using fishbone diagrams. The results of the study show that the non-optimal implementation of BWMP is influenced by human, machine, method, material, environment, and operational management factors. Blockages in the TRO system's *T-strainer* due to sediment that is not regularly cleaned cause the BWTS system's performance to become unstable, triggering alarms and tripping conditions. In addition, the crew's limited understanding of ballast operations' implementation also affects the effectiveness of ballast water management. With regular system maintenance and improvements to crew understanding, the implementation of BWMP can run more optimally and support efforts to prevent seawater pollution.

Keywords: *Ballast Water Management Plan* (BWMP), *Ballast water Treatment System* (BWTS), *Total Residual Oxidant* (TRO), *Fishbone Diagram*, *Seawater Pollution*, MV. Ocean Perkasa

Pendahuluan

Air *ballast* merupakan elemen krusial untuk menjaga stabilitas dan keseimbangan kapal saat berlayar dalam kondisi muatan kosong, meskipun proses operasionalnya melibatkan pengambilan dan pembuangan air di lokasi yang berbeda [1]. Aktivitas perpindahan air ini membawa risiko tinggi karena dapat mentransfer organisme mikroskopis dan spesies asing yang berpotensi merusak ekosistem serta ekonomi di perairan baru [2]. Sejarah mencatat dampak destruktif fenomena ini, seperti invasi *European Zebra mussel* di Great Lakes yang menyebabkan kerugian lingkungan dan ekonomi yang signifikan pada industri perikanan [3].

Guna menanggulangi masalah tersebut, *International Maritime Organization* (IMO) menetapkan *Ballast Water Management Convention* (BWMC) sebagai standar hukum internasional untuk mengatur prosedur pengelolaan air ballast kapal [4]. Implementasi aturan ini mewajibkan setiap armada memasang *Ballast Water Management System* (BWMS) yang mampu menetralkan spesies invasif melalui metode pengolahan fisik, kimiawi, maupun biologis [5]. Penerapan sistem manajemen yang efektif ini mutlak diperlukan demi menjamin kelestarian keanekaragaman hayati laut sekaligus keberlanjutan industri maritim global di masa depan [6].

Kepatuhan terhadap *Ballast Water Management Convention* (BWMC) diawasi secara ketat melalui inspeksi *Port State Control* untuk memverifikasi fungsionalitas sistem di atas kapal, baik yang menggunakan metode pertukaran (Standar D-1) maupun pengolahan berbasis teknologi (Standar D-2) [7]. Meskipun regulasi ini dirancang untuk mencegah degradasi ekosistem, kendala teknis di lapangan masih menjadi tantangan serius, seperti yang dialami MV. Ocean Perkasa pada Mei 2024 saat berlayar menuju Kanada [8]. Kapal tersebut mengalami kegagalan fungsi sensor *Total Residual Oxidant* (TRO) akibat penyumbatan filter, yang menyebabkan ketidakakuratan pengukuran dan memaksa pengalihan prosedur kembali ke standar D-1 disertai permohonan dispensasi operasional. Insiden ini menegaskan bahwa kegagalan peralatan tidak hanya menghambat efisiensi waktu, tetapi juga meningkatkan risiko pencemaran lingkungan akibat pengolahan limbah yang tidak optimal [9].

Untuk memitigasi risiko teknis dan operasional tersebut, manajemen kapal diwajibkan menyusun jadwal perawatan peralatan yang ketat serta strategi pemeliharaan preventif. Selain aspek teknis, peningkatan kompetensi sumber daya manusia melalui pelatihan berkala bagi awak kapal mengenai prosedur manajemen air balas dan rencana kontingensi menjadi elemen vital [10]. Langkah-langkah ini diperlukan untuk menjamin keberlangsungan operasional kapal yang efisien, sekaligus memastikan kepatuhan penuh terhadap standar lingkungan internasional guna menghindari sanksi regulasi.

Tinjauan terhadap literatur terdahulu memperlihatkan bahwa tantangan dalam pengelolaan air balas melibatkan aspek dampak lingkungan serta kepatuhan prosedural yang saling berkaitan. Hasan (2024) secara spesifik menganalisis dampak pembuangan air balas terhadap parameter pencemaran [9]. Sementara itu, Ismail (2021) menekankan optimalisasi kualitas air saat *ballast exchange* [8], Hatmoko (2019) mengkaji teknologi BWMS [6], dan Rahman (2017) menyoroti implementasi dokumen BWMP [11].

Namun, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) yang signifikan di mana mayoritas studi terdahulu cenderung berfokus pada kepatuhan regulasi makro atau dampak lingkungan hilir, tanpa menyentuh akar masalah teknis di level operasional kapal secara mendalam. Belum banyak literatur yang membedah kegagalan BWMP dari perspektif interaksi komponen kritis sistem pengolahan. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan memosisikan BWMP bukan sekadar dokumen kepatuhan statis, melainkan sebagai sistem operasional yang hidup (*living operational system*). Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada identifikasi komponen *Total Residual Oxidant* (TRO) dan *T-strainer* sebagai *critical control point* utama dalam optimalisasi BWMP, yang dianalisis menggunakan pendekatan *root-cause* berbasis diagram *fishbone*.

Mengacu pada urgensi isu teknis tersebut, penulis merumuskan solusi melalui Karya Ilmiah Terapan berjudul "*Optimalisasi Ballast Water Management Plan* (BWMP) Dalam Upaya Pencegahan Pencemaran Air Laut di MV. Ocean Perkasa". Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kendala spesifik penghambat BWMP dan menetapkan strategi optimalisasi guna mencegah pencemaran air laut secara efektif

Metode Penelitian

Landasan teori ini berpijak pada konsep optimalisasi yang didefinisikan sebagai tindakan strategis guna mencapai kinerja terbaik dalam batasan situasi yang ada [12]. Dalam operasional maritim, pengelolaan air balas menjadi fokus utama karena fungsinya menjaga stabilitas kapal berbanding lurus dengan risiko ekologis akibat penyebaran spesies invasif [10]. Guna memitigasi dampak tersebut, konvensi internasional mewajibkan penerapan standar pertukaran air atau penggunaan teknologi pengolahan yang ketat [4]. Kepatuhan ini esensial untuk mencegah pencemaran laut, yang secara hukum diartikan sebagai kerusakan lingkungan akibat introduksi materi atau energi oleh manusia yang membahayakan kehidupan hayati [13]. Implementasi aturan ini sangat krusial pada kapal jenis *bulk carrier* yang memiliki desain khusus untuk angkutan kargo curah bervolume besar [14]. Terakhir, efektivitas operasional juga bergantung pada proses bongkar muat di pelabuhan yang harus dikelola secara hati-hati untuk meminimalkan risiko lingkungan selama perpindahan muatan [15].

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus tunggal terbenam (*single embedded case study*) [16]. Desain ini dipilih untuk memahami fenomena kegagalan sistem BWTS secara mendalam dalam konteks unit

tunggal, yaitu MV. Ocean Perkasa, dengan fokus spesifik pada sub-unit analisis malfungsi sensor TRO [17]. Studi dilaksanakan selama periode praktik laut dari Oktober 2023 hingga Oktober 2024.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi partisipatif langsung terhadap kegiatan *ballast operation*, wawancara semi-terstruktur dengan Nakhoda, Mualim I, dan Masinis II, serta dokumentasi teknis (*Instruction Manual*, *Maintenance Log*) [18].

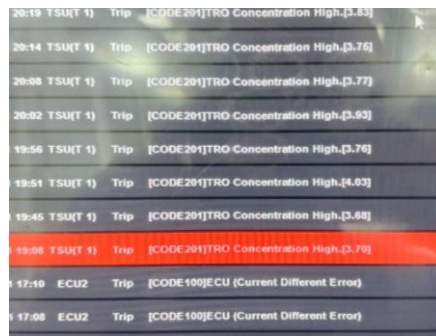
Analisis data dilakukan menggunakan diagram *fishbone* (Ishikawa Diagram) [19]. Metode ini dipilih dibandingkan metode lain seperti FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) karena penelitian ini bertujuan untuk memetakan kausalitas kualitatif dan menelusuri akar penyebab masalah secara terstruktur, bukan untuk mengukur bobot risiko kuantitatif [20]. Analisis dikategorikan ke dalam enam elemen standar manajemen industri (6M): *Man* (Manusia), *Method* (Metode), *Machine* (Mesin), *Material* (Material), *Environment* (Lingkungan), dan *Money* (Keuangan). Kategori ini digunakan untuk memastikan evaluasi yang komprehensif terhadap seluruh variabel yang berinteraksi dalam sistem operasional kapal [21].

Hasil Dan Pembahasan

Hasil Temuan Empiris

Analisis Log Alarm BWTS

Observasi terhadap log sistem *Ballast Water Treatment System* (BWTS) menunjukkan frekuensi gangguan yang tinggi. Sebagaimana terlihat pada Gambar 1, tercatat alarm berulang dengan kode "TRO Concentration High" yang memicu kondisi *trip* (penghentian sistem otomatis). Data menunjukkan bahwa kegagalan ini terjadi berulang kali dalam interval waktu yang singkat saat proses *deballasting*, mengindikasikan ketidakstabilan sistem yang persisten.



20:19 TSU(T 1)	Trip	[CODE 201]TRO Concentration High.(3.83)
20:14 TSU(T 1)	Trip	[CODE 201]TRO Concentration High.(3.76)
20:08 TSU(T 1)	Trip	[CODE 201]TRO Concentration High.(3.77)
20:02 TSU(T 1)	Trip	[CODE 201]TRO Concentration High.(3.83)
19:56 TSU(T 1)	Trip	[CODE 201]TRO Concentration High.(3.76)
19:51 TSU(T 1)	Trip	[CODE 201]TRO Concentration High.(4.03)
19:45 TSU(T 1)	Trip	[CODE 201]TRO Concentration High.(3.68)
19:06 TSU(T 1)	Trip	[CODE 201]TRO Concentration High.(3.70)
17:19 ECU2	Trip	[CODE 100]ECU (Current Different Error)
17:08 ECU2	Trip	[CODE 100]ECU (Current Different Error)

Gambar 1. Alarm Log BWTS

Analisis Wawancara

Pengumpulan data kualitatif diperoleh melalui wawancara terstruktur dengan personel kunci operasional, yakni Nakhoda (*Captain*), Mualim I (*Chief Officer*), dan Masinis II (*Second Engineer*). Pemilihan narasumber ini didasarkan pada signifikansi peran dan tanggung jawab mereka dalam rantai komando operasi *ballasting* serta pemeliharaan sistem. Metode ini ditujukan untuk mengeksplorasi dimensi praktis penerapan *Ballast Water Management Plan* (BWMP), mencakup evaluasi kepatuhan prosedur, kondisi teknis *Ballast Water Treatment System* (BWTS), serta tingkat pemahaman kru terhadap regulasi pengelolaan air *ballast*.

Hasil wawancara dengan Nakhoda mengidentifikasi adanya kesenjangan kompetensi yang signifikan pada kru dek, di mana pemahaman terhadap prosedur operasi *ballast* dinilai masih terbatas. Kondisi ini menyebabkan pelaksanaan tugas di lapangan tidak berjalan otonom, melainkan sangat bergantung pada instruksi langsung perwira tanpa didasari pemahaman sistem yang komprehensif. Defisiensi operasional ini diperburuk oleh minimnya pelatihan spesifik manajemen air *ballast* yang diterima kru, serta tingginya tekanan waktu operasional yang memicu kecenderungan personel untuk memprioritaskan penyelesaian target kerja dibandingkan kepatuhan prosedur secara menyeluruh.

Secara keseluruhan, data wawancara mengindikasikan bahwa inefisiensi penerapan BWMP bukan merupakan variabel tunggal, melainkan akumulasi dari interaksi kompleks antara faktor sumber daya manusia, metode kerja, dan kendala teknis. Temuan ini memvalidasi hasil observasi lapangan sebelumnya, menegaskan bahwa keterbatasan pemahaman prosedur berkorelasi linier dengan penyimpangan operasional yang terjadi. Data ini selanjutnya menjadi landasan empiris untuk menganalisis faktor determinan penyebab belum optimalnya implementasi manajemen air *ballast* di atas kapal.

Analisis Dokumentasi

Studi dokumentasi diterapkan sebagai metode validasi untuk memperkuat reliabilitas data yang diperoleh melalui observasi dan wawancara. Instrumen ini mencakup penelaahan terhadap dokumen teknis operasional, seperti *Instruction Manual* dan *BWTS Maintenance Schedule*, yang berfungsi sebagai referensi standar mekanisme kerja serta protokol perawatan sistem. Selain data tertulis, penelitian ini juga menghimpun bukti visual berupa citra fotografis komponen vital—

spesifiknya unit filter dan *T-strainer*—yang didokumentasikan selama kegiatan pemeliharaan berlangsung guna merekam kondisi fisik aktual perangkat pengolahan air *ballast*.



Gambar 2. Filter BWTS

Temuan visual tersebut memvisualisasikan adanya akumulasi sedimentasi pada sistem filtrasi serta kondisi material *T-strainer* sebelum dan sesudah penggantian, yang mengindikasikan status pemeliharaan komponen. Data dokumenter ini selanjutnya diintegrasikan dengan temuan observasi dan wawancara melalui mekanisme triangulasi data, bukan dianalisis secara parsial. Pendekatan holistik ini digunakan untuk mengidentifikasi korelasi kausal antara degradasi fisik komponen sistem dengan instabilitas kinerja BWTS yang terdeteksi selama operasi *ballasting* dan *deballasting*.



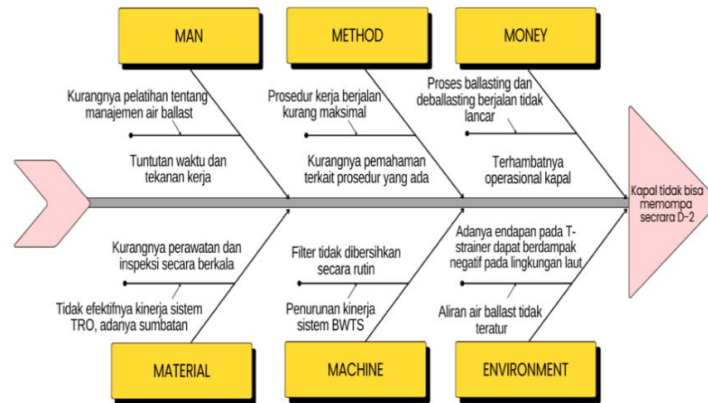
Gambar 3. T-Strainer

Kondisi Fisik Komponen (Material)

Inspeksi visual di lapangan mengonfirmasi korelasi antara alarm sistem dengan kondisi fisik komponen. Dokumentasi pada Gambar 2 dan Gambar 3 memperlihatkan akumulasi sedimen lumpur yang signifikan pada filter dan *T-strainer*. Temuan fisik ini merupakan bukti empiris bahwa aliran air menuju unit sensor TRO terhambat, yang secara teknis menyebabkan pembacaan konsentrasi oksidan menjadi tidak akurat dan memicu mekanisme proteksi sistem

Analisis Fishbone

Penelitian ini menerapkan analisis kausalitas menggunakan diagram *fishbone* untuk memetakan determinan inefisiensi operasi *ballast* di atas kapal. Instrumen ini dipilih karena kapabilitasnya dalam mengurai hubungan sebab-akibat secara sistematis berdasarkan triangulasi data observasi, wawancara, dan dokumentasi. Identifikasi masalah mengerucut pada enam variabel fundamental yang saling berinteraksi, yakni *Man*, *Method*, *Machine*, *Material*, *Environment*, dan *Money*, yang secara kolektif mempengaruhi kinerja sistem.



Gambar 4. Diagram Fishbone

Faktor Man (Sumber Daya Manusia)

Pada dimensi Sumber Daya Manusia (*Man*), ditemukan adanya defisiensi kompetensi kru dek yang signifikan dalam memahami mekanisme teknis *ballast operation*. Data wawancara dengan Nakhoda mengonfirmasi bahwa personel pelaksana cenderung bekerja secara pasif berdasarkan instruksi perwira tanpa pemahaman mendalam mengenai implikasi teknis setiap tahapan kerja. Kondisi ini diperparah oleh minimnya program pelatihan spesifik manajemen air *ballast*, sehingga kepatuhan prosedur sering kali terabaikan demi memenuhi tuntutan kecepatan operasional.

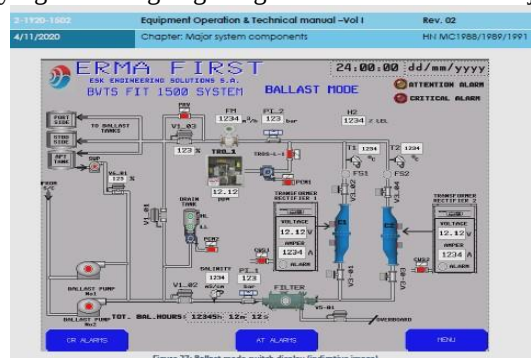
Kesenjangan Kompetensi (*man*), berdasarkan wawancara dengan Nakhoda, ditemukan fakta bahwa kru dek bekerja sangat bergantung pada instruksi perwira tanpa pemahaman otonom mengenai prinsip kerja BWTS. Tidak ada bukti rekaman pelatihan spesifik (*drill* atau *in-house training*) mengenai perawatan TRO yang dilakukan secara rutin sebelum insiden terjadi.

Faktor Method (Metode Kerja)

Analisis terhadap faktor Metode (*Method*) menunjukkan adanya inkonsistensi dalam implementasi *Ballast Water Management Plan* (BWMP) yang semestinya menjadi acuan standar. Prosedur pemeliharaan preventif, khususnya pembersihan *T-strainer*, teridentifikasi tidak dijalankan secara disiplin. Deviasi dari protokol standar ini berdampak langsung pada instabilitas kinerja sistem BWTS, yang memicu gangguan teknis berulang selama siklus *ballasting* dan *deballasting*.

Faktor Machine (Peralatan)

Tinjauan pada aspek Peralatan (*Machine*) menyoroti tingginya frekuensi kegagalan fungsi sistem BWTS saat proses *deballasting*. Berdasarkan keterangan personel operasional, sistem mengalami kondisi *trip* dan alarm aktif dengan frekuensi 2 hingga 3 kali per hari, yang memaksa penghentian operasi secara periodik. Fenomena ini mengindikasikan degradasi reliabilitas operasional perangkat yang secara langsung menghambat kelancaran alur kerja di atas kapal.



Gambar 4. Balast Mode Switch Diplay

Faktor Material (Kondisi Fisik Sistem)

Evaluasi terhadap faktor Material mengungkap bahwa akumulasi sedimen pada jalur filtrasi menjadi penyebab utama obstruksi aliran air menuju unit sensor *Total Residual Oxidant* (TRO). Konfirmasi dari Masinis II serta bukti dokumentasi visual memperlihatkan kondisi fisik *T-strainer* yang tersumbat akibat absennya perawatan rutin. Kontaminasi fisik ini mendisrupsi akurasi pembacaan sensor dan validitas kinerja sistem pengolahan secara keseluruhan.

Faktor Enviornment (Lingkungan)

Kegagalan fungsi sistem BWTS berimplikasi serius pada aspek Lingkungan (*Environment*), di mana air *ballast* yang dibuang berpotensi tidak memenuhi standar baku mutu yang dipersyaratkan. Pelepasan air yang tidak terolah sempurna

meningkatkan risiko bio-invasi organisme akuatik asing yang dapat mendestabilisasi ekosistem perairan tujuan. Oleh karena itu, gangguan teknis ini bukan sekadar isu operasional, melainkan ancaman nyata terhadap konservasi lingkungan laut.

Faktor *Money* (Operasional Kapal)

Terakhir, faktor Biaya (*Money*) terdampak oleh inefisiensi proses *ballasting* yang menghambat ritme operasional kapal secara makro. Gangguan sistem yang berujung pada penundaan aktivitas bongkar muat berpotensi menimbulkan kerugian finansial bagi perusahaan akibat keterlambatan jadwal. Selain dampak ekonomi, kondisi ini juga berkontribusi pada peningkatan beban kerja awak kapal akibat durasi operasi yang berkepanjangan.

Pembahasan dan Sintesis Masalah

(Man & Method): Inefisiensi bukan disebabkan oleh kegagalan teknologi semata, melainkan inkonsistensi prosedur. Absennya pemahaman kru (*Man*) menyebabkan prosedur pembersihan filter (*Method*) yang seharusnya preventif berubah menjadi kuratif (hanya dibersihkan saat macet).

(Machine & Material): Sumbatan pada *T-strainer* (*Material*) adalah penyebab langsung (*direct cause*) dari alarm TRO (*Machine*). Namun, akar masalahnya adalah kegagalan manajemen perawatan.

(Environment): Dampak akhir dari kegagalan ini adalah risiko pelepasan air balas yang tidak memenuhi standar D-2, yang secara langsung mengancam ekosistem laut lokal.

Implikasi Manajerial dan Strategi Optimalisasi

Berdasarkan analisis akar masalah, penelitian ini merumuskan implikasi manajerial yang bersifat praktis untuk mengembalikan fungsi BWMP sebagai *living operational system*.

Checklist Operasional BWMP (Tabel Rekomendasi) Untuk mencegah berulangnya sumbatan *T-strainer*, manajemen kapal direkomendasikan menerapkan *checklist* berikut:

Tabel 1. Checklist Operasional BWMP

Frekuensi	Item Pemeriksaan	Target Kondisi
Harian	Indikator Panel BWTS & Alarm Log	Tidak ada error code aktif; parameter stabil.
Mingguan	Inspeksi visual pipa & kebocoran	Tidak ada rembesan pada jalur pipa ballast.
Bulanan	Pembersihan Manual T-Strainer TRO	Filter bersih dari sedimen/lumpur; aliran lancar.
Triwulan	Kalibrasi Sensor TRO	Pembacaan sensor akurat sesuai manual book.

Rekomendasi Strategi optimalisasi dibagi ke dalam tiga fase waktu:

Jangka Pendek (Segera): Melakukan pembersihan total (*overhaul*) pada unit *T-strainer* dan penggantian elemen filter yang rusak untuk mematikan alarm TRO. Jangka Menengah (1-6 Bulan): Menjadwalkan *in-house training* wajib bagi seluruh *deck crew* dan *engine crew* mengenai cara kerja BWTS dan prosedur darurat. Jangka Panjang (>6 Bulan): Mengintegrasikan jadwal perawatan BWTS ke dalam *Planned Maintenance System* (PMS) perusahaan secara permanen dan menyediakan suku cadang kritis (*spare filter*) di atas kapal.

Simpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa ketidakefektifan penerapan BWMP di MV. Ocean Perkasa berakar pada kegagalan memosisikan dokumen tersebut sebagai sistem operasional yang hidup. Kebaruan temuan studi ini menegaskan bahwa sumbatan pada *T-strainer* sistem TRO merupakan *critical control point* yang selama ini terabaikan.

Analisis *fishbone* membuktikan bahwa alarm berulang pada BWTS bukan sekadar gangguan mesin, melainkan manifestasi dari kegagalan interaksi antara faktor manusia (kurangnya kompetensi) dan metode (kelalaian perawatan preventif). Oleh karena itu, optimalisasi BWMP tidak cukup hanya dengan kepatuhan dokumen, tetapi menuntut intervensi teknis berupa penerapan *checklist* operasional ketat pada komponen filtrasi serta intervensi manajerial melalui pelatihan kru berkelanjutan. Implementasi strategi ini diharapkan mampu menjamin kinerja sistem BWTS yang stabil, sehingga risiko pencemaran biologis di lingkungan laut dapat dimitigasi secara efektif.

Peneliti merekomendasikan departemen kapal untuk mengintensifkan program familiarisasi berkelanjutan serta memperketat kedisiplinan perawatan komponen vital sesuai manual instruksi. Upaya ini harus didukung oleh komitmen manajemen perusahaan dalam menjamin ketersediaan anggaran pemeliharaan, suku cadang, serta fasilitasi pelatihan awak kapal. Bagi pengembangan studi lanjutan, disarankan perluasan ruang lingkup penelitian melalui analisis komparatif pada variasi tipe kapal dan rute pelayaran, serta evaluasi jangka panjang terhadap efektivitas teknologi pengolahan air *ballast* guna memperkaya khazanah pengetahuan dan praktik di sektor keselamatan maritim

Daftar Pustaka

- [1] K. A. Hossain, "Tale Of Bulk Ship," *Global Scientific Journal*, 2023.
- [2] Z. Wang *Et Al.*, "Ballast Water-Mediated Species Spread Risk Dynamics And Policy Implications To Reduce The Invasion Risk To The Mediterranean Sea," *Mar Pollut Bull*, Vol. 174, P. 113285, Jan. 2022, Doi: 10.1016/J.Marpolbul.2021.113285.
- [3] D. C. Aldridge, P. Elliott, And G. D. Moggridge, "The Recent And Rapid Spread Of The Zebra Mussel (*Dreissena Polymorpha*) In Great Britain," *Biol Conserv*, Vol. 119, No. 2, Pp. 253–261, Sep. 2004, Doi: 10.1016/J.Biocon.2003.11.008.
- [4] Imo, *International Convention For The Control And Management Of Ships' Ballast Water And Sediments*. [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/International-convention-for-the-control-and-management-of-ships'-ballast-water-and-sediments-\(bwm\).aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/International-convention-for-the-control-and-management-of-ships'-ballast-water-and-sediments-(bwm).aspx), 2017.
- [5] Y. Arpianto And Hanna, "Ballas Water And Sediment Control And Management On Ship Using Method D-2: Auto Filter And Uv Disinfection Treatment Methods," *Influence: International Journal Of Science Review*, Vol. 5, No. 1, Pp. 198–210, Feb. 2023, Doi: 10.54783/Influencejournal.V5i1.118.
- [6] D. H. Bela, "Upaya Penggunaan Ballast Water Managment System Dalam Pengoperasian Ballast Guna Mencegah Pencemaran Air Laut Di Mv. Glovis Diamond," Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang, Semarang, 2019.
- [7] S. E. M. Prof. Dr. Herman Budi Sasono, *Manajemen Pelabuhan Dan Realisasi Ekspor Impor*. Penerbit Andi, 2021. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=N2tkbugpakyc>
- [8] Ismail, "Optimalisasi Kualitas Air Ballast Pada Proses Ballast Exchange Guna Menghindari Terjadinya Pencemaran Lingkungan Di Kapal Mv Jk Pioneer," Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang, Semarang, 2021.
- [9] A. F. Hasan, "Analisis Dampak Pembuangan Air Ballast Terhadap Pencemaran Air Laut Di Mv. V Lucky," Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Makassar, 2024.
- [10] I. Abdillah *Et Al.*, *Model Pengolahan Air Ballast Kapal Akibat Deballasting Di Pelabuhan Teluk Lamong Berbasis Risiko*. 2020.
- [11] S. Rahman, "Implementation Of Ballast Water Management Plan In Ships Through Ballast Water Exchange System," *Procedia Eng*, Vol. 194, Pp. 323–329, 2017, Doi: 10.1016/J.Proeng.2017.08.152.
- [12] W. J. S. Poerwadarminta And P. B. (Indonesia), *Kamus Umum Bahasa Indonesia*. Balai Pustaka, 2003. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=2l9kaaamaaj>
- [13] I. United Nations, "United Nations Convention On The Law Of The Sea (Unclos)," 1982
- [14] Sekretariat Menteri Perhubungan, *Pencegahan Pencemaran Lingkungan Maritim*. Indonesia, 2014.
- [15] P. Indah, "Analisis Terjadinya Benturan Antara Single Point Mooring (Spm) Dengan Hull Mt. Sungai Gerong Saat Bongkar Di Tanjung Manggis," Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang, 2022.
- [16] M. R. Fadli, "Memahami Desain Metode Penelitian Kualitatif," *Humanika*, Vol. 21, No. 1, Pp. 33–54, Apr. 2021, Doi: 10.21831/Hum.V21i1.38075.
- [17] L. J. . Moleong, *Metodologi Penelitian Kualitatif*. Pt Remaja Rosdakarya, 1989.
- [18] M. P. Dr. H. Salim, *Penelitian Pendidikan: Metode, Pendekatan, Dan Jenis*. Kencana, 2019. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=2fq1dwaaqbaj>
- [19] J. W. Creswell And C. N. Poth, *Qualitative Inquiry And Research Design: Choosing Among Five Approaches*. Sage Publications, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=Gx1zdwaqbaj>
- [20] R. K. Yin, *Case Study Research And Applications: Design And Methods*. Sage Publications, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=Ux1zdwaqbaj>
- [21] J. Heizer And B. Render, *Operations Management: Sustainability And Supply Chain Management*. Pearson Education, 2013. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=Szwvaaaaqbaj>