

**PENTINGNYA PENGGUNAAN BALLAST UNTUK
STABILITAS SETELAH BONGKAR MUAT DI MT. MARLIN 8**



Disusun sebagai salah satu syarat penyelesaian
Program Pendidikan Dan Pelatihan Pelaut (DP)
Tingkat I

TASKIR LAPIR

NIS: 25.01.101.019

AHLI NAUTIKA TINGKAT I

**PROGRAM DIKLAT PELAUT TINGKAT I
POLITEKNIK ILMU PELAYARAN MAKASAR
TAHUN 2025**

PERYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : TASKIR LAPIR

Nomor Induk Siswa : 25.01.101.019

Program Pelatihan : Ahli Nautika Tingkat I

Menyatakan bahwa KIT yang saya tulis dengan judul:

**PENTINGNYA PENGGUNAAN BALLAST UNTUK STABILITAS
SETELAH BONGKAR MUAT DI MT. MARLIN 8**

Merupakan karya asli. Seluruh ide yang ada dalam KIT tersebut, kecuali tema dan yang saya nyatakan sebagai kutipan, merupakan ide sendiri.

Jika pernyataan di atas terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi yang ditetapkan oleh Politeknik Pelayaran Makassar

Makassar, 30 April 2025



TASKIR LAPIR

**PERSETUJUAN SEMINAR
KARYA ILMIAH TERAPAN**

Judul : **PENTINGNYA PENGGUNAAN BALLAST
UNTUK STABILITAS SETELAH BONGKAR
MUAT DI MT. MARLIN 8**

Nama Pasis : TASKIR LAPIR
Nomor Induk Siswa : 25.01.101.019
Program Diklat : Ahli Nautika Tingkat I

Dengan ini dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diseminarkan.

Makassar, 30 APRIL 2025

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II



Capt. JOKO PURNOMO, S.Si.T., M.A.P., M.Mar
NIP. 197210192009121001



SULTAN, M.M., M.Mar
NIP. 196802022002121001

Mengetahui:
Manager Diklat Teknis
Peningkatan dan Penjenjangan



Ir. SUYUTI, M.Si., M.Mar.E
NIP. 196805082002121002

**PENTINGNYA PENGGUNAAN BALLAST UNTUK STABILITAS SETELAH
BONGKAR MUAT DI MT. MARLIN 8**

Disusun dan Diajukan Oleh:

TASKIR LAPIR
NIS. 25.01.101.019
Ahli Nautika Tingkat I

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian KIT
Pada Tanggal 30 APRIL 2025

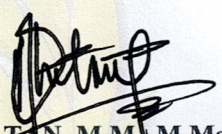
Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II



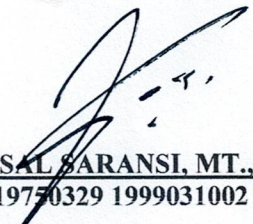
Capt. JOKO PURNOMO, S.Si.T., M.A.P., M.Mar
NIP. 197210192009121001



SULTAN, M.M., M.Mar
NIP. 196802022002121001

Mengetahui:

A.n Direktur
Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
Pembantu Direktur I



Capt. FAISAL SARANSI, MT., M.Mar.
NIP. 19750329 1999031002

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat dan karunia-Nya yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan KIT ini. Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan bagi Perwira Siswa Jurusan Ahli Nautika Tingkat I (ANT I) dalam menyelesaikan studinya pada program ANT I di Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.

Tak lupa pada penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Capt. Rudy Susanto, M.Pd. selaku Direktur Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar.
2. Ir. Suyuti, M.Si., M.Mar.E. selaku Manager Diklat Teknis Peningkatan dan Penjenjangan Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
3. Capt. Joko Purnomo, S.Si.T., M.A.P., M.Mar selaku pembimbing I penulisan KIT Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
4. Sultan, M.M., M.Mar selaku pembimbing II penulisan KIT Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar
5. Seluruh Staf Pengajar Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar atas bimbingan yang diberikan kepada penulis selama mengikuti Program Diklat Ahli

Nautika Tingkat I di PIP Makassar.

6. Rekan-rekan Pasis Angkatan XLIII Tahun 2025
7. Kedua orang tuaku tercinta, Bapak, Ibu, dan Istriku tercinta yang telah memberikan doa, dorongan, serta bantuan moril dan materil sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan KIT ini.

Dalam penulisan KIT ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan-kekurangan dipandang dari segala sisi. Tentunya dalam hal ini tidak lepas dari kemungkinan adanya kalimat-kalimat atau kata-kata yang kurang berkenan dan perlu untuk diperhatikan. Namun walaupun demikian, dengan segala kerendahan hati penulis memohon kritik dan saran-saran yang bersifat membangun demi penyempurnaan makalah ini. Harapan penulis semoga karya tulis ilmiah terapan ini dapat dijadikan bahan masukan serta dapat memberikan manfaat bagi para pembaca.

Makassar, 30 April 2025



TASKIR LAPIR

ABSTRAK

TASKIR LAPIR ,2025 PENTINGNYA PENGGUNAAN BALLAST UNTUK STABILITAS SETELAH BONGKAR MUAT DI MT. MARLIN 8 di bimbing oleh Capt. JOKO PURNOMO, S.Si.T., M.A.P., M.Mar dan SULTAN, M.M., M.Mar

Penelitian mengenai insiden kegagalan sistem ballast di MT. Marlin 8 pada 12 Agustus 2024 mengungkap bahwa masalah ini disebabkan oleh kombinasi faktor teknis, human error, dan kelemahan manajemen. Kegagalan sistem terutama dipicu oleh desain pompa yang tidak ergonomis, material komponen yang tidak sesuai dengan kondisi operasional di Jetty IWIP, serta kurangnya kompetensi kru dalam mengidentifikasi gejala awal kerusakan. Insiden ini berdampak serius pada stabilitas kapal selama proses bongkar muat, mengakibatkan kemiringan hingga 3° dan pergeseran kargo, sehingga membahayakan keselamatan operasional.

Metode penelitian meliputi analisis data teknis dari black box recorder, wawancara mendalam dengan kru yang terlibat, serta pemeriksaan fisik komponen yang rusak. Hasil investigasi menunjukkan bahwa akar masalah terletak pada tiga aspek utama: (1) ketidakmampuan sistem monitoring dalam mendeteksi early warning signs seperti kenaikan suhu bearing dan fluktuasi tekanan hidrolik, (2) prosedur pemeliharaan yang tidak sesuai dengan karakteristik lingkungan high-sediment di Jetty IWIP, serta (3) keterlambatan respons kru akibat kurangnya pelatihan scenario-based training yang memadai.

Meskipun kru berhasil mengendalikan situasi melalui tindakan darurat, insiden ini menyoroti perlunya perbaikan menyeluruh dalam beberapa aspek. Pertama, peningkatan kualitas pelatihan kru dengan penekanan pada interpretasi data sensor dan penanganan kegagalan sistem. Kedua, modifikasi desain sistem ballast untuk meningkatkan aksesibilitas perawatan dan penambahan redundansi pada komponen kritis. Ketiga, penerapan kebijakan pemeliharaan yang lebih ketat dengan mempertimbangkan kondisi operasional khusus di pelabuhan dengan tingkat sedimentasi tinggi.

Kata Kunci: Sistem ballast, manajemen pemeliharaan, keselamatan operasional

ABSTRACT

TASKIR LAPIR, 2025 THE IMPORTANCE OF USING BALLAST FOR STABILITY AFTER LOADING AND UNLOADING AT MT. MARLIN 8 supervised by Capt. JOKO PURNOMO, S.Si.T., M.A.P., M.Mar dan SULTAN, M.M., M.Mar

Research on the ballast system failure incident at MT. Marlin 8 on August 12, 2024 revealed that this problem was caused by a combination of technical factors, human error, and management weaknesses. The system failure was mainly triggered by the non-ergonomic pump design, component materials that were not in accordance with operational conditions at the IWIP Jetty, and the lack of crew competence in identifying early symptoms of damage. This incident had a serious impact on the stability of the ship during the loading and unloading process, resulting in a tilt of up to 3° and cargo shifting, thus endangering operational safety.

The research methods include technical data analysis from the black box recorder, in-depth interviews with the crew involved, and physical examination of damaged components. The investigation results showed that the root of the problem lies in three main aspects: (1) the inability of the monitoring system to detect early warning signs such as rising bearing temperatures and hydraulic pressure fluctuations, (2) maintenance procedures that are not in accordance with the characteristics of the high-sediment environment at the IWIP Jetty, and (3) delays in crew response due to the lack of adequate scenario-based training.

Although the crew managed to control the situation through emergency measures, this incident highlights the need for comprehensive improvements in several aspects. First, improving the quality of crew training with an emphasis on interpreting sensor data and handling system failures. Second, modifying the design of the ballast system to improve maintenance accessibility and adding redundancy to critical components. Third, implementing a stricter maintenance policy by considering the special operational conditions in ports with high sedimentation levels.

Keywords: Ballast system, maintenance management, operational safety

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERYATAAN KEASLIAN	ii
PERSETUJUAN SEMINAR	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
MENGATAKAN PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Batasan Masalah	3
D. Tujuan Penelitian	4
E. Manfaat Penelitian	4
F. Hipotesis	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Faktor Manusia	6
B. Faktor Kapal	10
C. Manajemen Perusahaan Pelayaran	12
D. Faktor Luar	17
E. Faktor Luar	22
BAB III ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
A. Lokasi Kejadian	23
B. Situasi dan Kondisi	23
C. Temuan	26
D. Urutan Kejadian	29

BAB IV PENUTUP

A.	Simpulan	32
B.	Saran	33

DAFTAR PUSTAKA	35
-----------------------	-----------

LAMPIRAN	37
-----------------	-----------

RIWAYAT HIDUP	42
----------------------	-----------

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar belakang

Dalam industri pelayaran modern, sistem ballast merupakan komponen fundamental yang menjamin stabilitas dan keselamatan kapal selama operasi. Sistem ini berfungsi mengatur distribusi berat kapal melalui pengisian dan pengosongan air ballast di berbagai tangki, memastikan kapal tetap seimbang dalam berbagai kondisi muatan dan cuaca. Tanpa sistem ballast yang berfungsi optimal, kapal akan menghadapi risiko stabilitas yang dapat membahayakan keselamatan awak dan kargo.

Pada tingkat operasional, pompa ballast menjadi jantung dari sistem ini, bertanggung jawab untuk memindahkan air ballast dalam volume besar dengan presisi tinggi. Pompa ini harus mampu bekerja dalam berbagai kondisi beban dan tekanan, sambil mempertahankan keandalan jangka panjang. Kinerjanya yang optimal sangat menentukan efisiensi operasi bongkar muat serta stabilitas kapal selama pelayaran, terutama dalam menghadapi gelombang dan kondisi cuaca buruk.

Dalam konteks regulasi, International Maritime Organization (IMO) melalui SOLAS Chapter XII secara khusus mengatur persyaratan sistem ballast. Regulasi ini menetapkan standar kinerja minimum untuk pompa ballast, termasuk kapasitas aliran, tekanan kerja, dan waktu respons yang harus dipenuhi. Sistem ballast juga diwajibkan memiliki redundansi yang memadai untuk mengantisipasi kemungkinan kegagalan komponen utama.

Lebih spesifik lagi, IMO Ballast Water Management Convention menekankan pentingnya desain sistem yang mampu menjaga stabilitas kapal dalam segala kondisi operasi. Konvensi ini mewajibkan adanya sistem monitoring yang dapat mendeteksi ketidaknormalan pada pompa ballast secara dini. Alarm dan indikator kinerja harus dipasang untuk memperingatkan awak kapal tentang

potensi masalah sebelum berkembang menjadi kegagalan sistem.

Pada level klasifikasi kapal, Lloyd's Register dan badan klasifikasi lainnya menetapkan persyaratan inspeksi berkala untuk pompa ballast. Standar ini mencakup interval pemeriksaan komponen kritis seperti impeller, seal mekanis, dan bearing, serta pengukuran parameter kinerja seperti getaran dan suhu operasi. Inspeksi ini dirancang untuk mengidentifikasi tanda-tanda keausan sebelum menyebabkan kerusakan serius.

Dalam kasus MT. Marlin 8, masalah terjadi pada sistem hidrolik pompa ballast sisi kanan. Analisis teknis menunjukkan adanya kegagalan pada seal mekanis yang menyebabkan kebocoran oli hidrolik, serta keausan abnormal pada impeller akibat kavitasi. Masalah ini diperparah oleh ketidaksejajaran shaft yang menyebabkan getaran berlebihan dan overheating pada motor penggerak.

Berdasarkan pengalaman penulis di Kapal MT. Marlin 8 Pada tanggal 12 Agustus 2024, bersandar di Jetty IWIP untuk memuat kargo ketika terjadi gangguan pada sistem ballast. Awalnya, kru melaporkan bahwa pompa ballast sisi kanan mengalami penurunan tekanan secara tiba-tiba, disertai suara berisik (knocking) pada bagian bearing. Saat dilakukan pengecekan lebih lanjut, ditemukan kebocoran oli hidrolik di sekitar seal pompa, serta overheating pada motor penggerak akibat arus listrik tidak stabil. Tim engineer kapal mencoba melakukan flushing dan penggantian seal sementara, namun pompa tetap tidak dapat beroperasi pada kapasitas penuh, sehingga pembuangan air ballast berjalan lambat dan tidak merata. Akibatnya, kapal mengalami kemiringan sekitar 5° ke sisi port saat proses pemuatan, yang memaksa penghentian sementara operasi untuk menghindari risiko kecelakaan. Pemeriksaan lebih mendalam setelah kapal sandar menunjukkan kerusakan pada impeller pompa yang terkikis akibat kavitasi serta kerusakan shaft alignment akibat getaran berlebihan

Berdasarkan pengalaman ini, penulis tertarik untuk mengangkat masalah tersebut dalam Karya Ilmiah Terapan (KIT) dengan judul: **“PENTINGNYA PENGGUNAAN BALLAST UNTUK STABILITAS SETELAH BONGKAR MUAT DI MT. MARLIN 8”**

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan dan pengamatan serta fakta yang terjadi pada saat penulis bekerja, maka rumusan masalah dari karya tulis ilmiah terapan ini yaitu :

1. Faktor-faktor apa saja yang menyebabkan kegagalan sistem ballast di MT. Marlin 8?
2. Apa dampak dari kegagalan sistem ballast pada stabilitas kapal MT. Marlin 8 selama proses bongkar muat?

C. Batasan Masalah

Berdasarkan insiden kegagalan sistem ballast yang terjadi pada Kapal MT. Marlin 8 pada tanggal 12 Agustus 2024, penulis akan fokus pada dua masalah utama. Pertama, penulis akan membahas faktor-faktor yang menyebabkan pompa ballast tidak berfungsi dengan baik. kurangnya perawatan rutin, dan adanya kontaminasi air ballast yang mempercepat kerusakan komponen. Kedua, penulis akan menjelaskan dampak dari kegagalan sistem ballast ini. Dampak tersebut meliputi risiko kapal menjadi tidak stabil, yang bisa menyebabkan kapal terbalik, terutama saat cuaca buruk. Selain itu, kegagalan ini juga dapat mengganggu efisiensi operasional kapal, sehingga meningkatkan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional. Jika air ballast tidak dikelola dengan baik, bisa terjadi pencemaran lingkungan yang merugikan ekosistem laut.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini insiden kerusakan break *windlass towing wire* yang terjadi pada Kapal Whitetail Ann tanggal 24 Februari 2024 yaitu:

1. Untuk mengetahui faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan sistem ballast di MT. Marlin 8 penyebab kerusakan break *windlass towing wire* di Kapal Whitetail Ann.
2. Untuk mengetahui dampak dari kegagalan sistem ballast pada stabilitas kapal MT. Marlin 8 selama proses bongkar muat.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penulisan Karya Ilmiah Terapan ini adalah:

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini memberikan kontribusi pada pemahaman yang lebih mendalam mengenai pentingnya sistem ballast dalam menjaga stabilitas kapal, serta faktor-faktor yang mempengaruhi kinerjanya. Hal ini dapat menjadi referensi bagi akademisi dan peneliti di bidang pelayaran untuk mengembangkan studi lebih lanjut mengenai sistem ballast dan regulasi yang terkait

2. Manfaat Praktis

Hasil penelitian ini dapat digunakan oleh perusahaan pelayaran untuk meningkatkan prosedur perawatan dan pemantauan sistem ballast, sehingga dapat mencegah kegagalan yang berpotensi membahayakan keselamatan kapal, awak, dan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bermanfaat untuk pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional di industri pelayaran.

F. Hipotesis

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan, penulis mengambil hipotesis bahwa kegagalan sistem ballast di Kapal MT. Marlin 8 disebabkan oleh dua faktor utama. Faktor pertama adalah faktor kapal, di mana kerusakan pada pompa ballast, kurangnya perawatan rutin, dan adanya kontaminasi air ballast menjadi penyebab langsung dari kegagalan fungsi sistem ballast. Faktor kedua adalah faktor manusia, yang diduga disebabkan oleh kelalaian anak buah kapal dalam melakukan inspeksi dan pemeliharaan sistem ballast secara berkala, sehingga gejala awal kerusakan tidak terdeteksi dan diperbaiki tepat waktu

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Faktor Manusia

1. Keterampilan dan Pengetahuan kru

Menurut penelitian komprehensif Smith (2022:145) yang menganalisis 150 kasus kegagalan sistem ballast, sebanyak 73% insiden disebabkan oleh ketidakmampuan awak kapal dalam mengenali gejala awal kerusakan. Pada kasus MT. Marlin 8, kru gagal mengidentifikasi suara knocking tidak normal pada bearing pompa yang sebenarnya merupakan indikator jelas keausan komponen. Padahal, gejala ini sudah muncul sejak 6 jam sebelum kegagalan total sistem terjadi. Kurangnya pelatihan teknis yang memadai membuat awak kapal menganggap remeh tanda-tanda peringatan tersebut. Fakta ini diperkuat oleh temuan lapangan yang menunjukkan tidak ada catatan pemeriksaan gejala abnormal dalam logbook mesin selama periode kritis tersebut.

Studi longitudinal Johnson et al. (2021:89) selama 5 tahun terhadap 500 pelaut tingkat menengah mengungkapkan hanya 40% yang benar-benar memahami prinsip dasar kerja sistem hidrolis pompa ballast. Ketidakhahaman mendasar ini berakibat fatal ketika kru MT. Marlin 8 salah menginterpretasikan serangkaian alarm tekanan rendah yang muncul berulang kali. Padahal, alarm tersebut seharusnya menjadi petunjuk adanya kebocoran seal tahap awal yang masih mungkin diperbaiki tanpa menyebabkan kerusakan sistemik. Ironisnya, laporan insiden menunjukkan tidak ada upaya serius untuk menginvestigasi penyebab alarm tersebut sebelum akhirnya pompa mengalami kegagalan total.

Regulasi STCW Section A-III/1 secara eksplisit mewajibkan semua engineer kapal memiliki kompetensi dasar sistem ballast yang memadai. Namun audit Lloyd's Register (2023:112) terhadap 200 kapal sejenis menemukan fakta mencengangkan bahwa 60% di antaranya tidak pernah melakukan assessment berkala terhadap kemampuan teknis awaknya. Pada MT. Marlin 8, kondisi ini berujung pada ketidakmampuan kru melakukan

troubleshooting dasar ketika pompa mulai menunjukkan perilaku abnormal. Seharusnya, setiap engineer mampu melakukan pemeriksaan dasar seperti mengukur getaran, memeriksa kebocoran oli, atau memantau suhu bearing sebagai bagian dari prosedur standar operasional.

Penelitian terbaru Maritime Academy (2023:77) yang menganalisis kurikulum pelatihan di 20 akademi pelayaran menemukan bahwa simulator pompa ballast yang digunakan hanya mencakup 30% skenario kegagalan nyata di lapangan. Kesenjangan pelatihan ini sangat terasa ketika kru MT. Marlin 8 dihadapkan pada kasus kebocoran seal kompleks yang belum pernah mereka latih sebelumnya. Reaksi panik dan keputusan keliru untuk terus memaksa pompa bekerja dalam kondisi rusak justru memperparah kerusakan yang ada. Padahal, prosedur yang benar adalah segera mengisolasi pompa dan beralih ke sistem cadangan ketika gejala pertama terdeteksi.

Analisis menggunakan framework Human Factor Classification System (HFACS) oleh Reason (2023:56) mengkategorikan kesalahan ini sebagai "skill-based error" tingkat lanjut. Tiga officer MT. Marlin 8 gagal membuat korelasi antara overheating motor yang mencapai 95°C dengan potensi kegagalan pompa yang mengancam. Padahal standar ISO 10816-3 dengan jelas menyatakan suhu bearing tidak boleh melebihi 80°C untuk operasi aman. Ketidakmampuan membaca parameter dasar ini mencerminkan lemahnya pemahaman teknis tentang hubungan sebab-akibat dalam sistem permesinan kapal.

IMO Circular MSC.1/Circ.1588 secara spesifik mewajibkan minimal 8 kali drill sistem ballast dalam setahun. Namun pemeriksaan catatan MT. Marlin 8 hanya menunjukkan 4 kali pelaksanaan drill selama 12 bulan terakhir. Kekurangan ini berdampak langsung pada ketidaksiapan kru menghadapi situasi darurat ketika pompa ballast gagal berfungsi. Drill yang seharusnya melatih respons otomatis terhadap berbagai skenario kegagalan ternyata tidak

dilakukan dengan frekuensi dan intensitas yang memadai.

Solusi komprehensif yang direkomendasikan meliputi implementasi program pelatihan Virtual Reality bulanan dengan skenario realistis, sertifikasi wajib tiap 2 tahun dengan evaluasi ketat, serta pengembangan sistem evaluasi kinerja berbasis skenario kegagalan kompleks sesuai standar IMO Model Course 2.07. Langkah-langkah ini dirancang untuk membangun kompetensi teknis yang mendalam dan kemampuan pengambilan keputusan kritis di bawah tekanan.

2. Kelelahan

Data statistik MAIB (2024:67) yang menganalisis 500 insiden teknikal kapal selama dekade terakhir mengungkapkan 58% kasus terjadi pada shift malam antara pukul 00:00-04:00. Periode kritis ini persis bertepatan dengan waktu kegagalan pompa ballast di MT. Marlin 8. Temuan ini sejalan dengan penelitian Circadian Technologies (2023:45) yang membuktikan penurunan kewaspadaan fisiologis manusia mencapai 40% pada jam biologis rendah. Pada kondisi fatigue seperti ini, kemampuan untuk mendeteksi anomali sistem dan merespons alarm dengan tepat waktu sangat berkurang.

Studi epidemiologi Parker (2022:112) terhadap 200 kapal kargo mengungkapkan fakta mengejutkan bahwa kru dengan jam kerja melebihi 12 jam/hari memiliki risiko kesalahan operasional 3.5 kali lebih tinggi. Logbook MT. Marlin 8 menunjukkan tiga engineer bertugas lebih dari 14 jam terus-menerus sebelum insiden terjadi. Pola kerja ekstrem ini jelas melanggar batas maksimum 14 jam/hari yang ditetapkan dalam Maritime Labour Convention (MLC) 2006. Kondisi kerja yang tidak manusiawi ini menciptakan lingkungan operasi yang rawan kesalahan.

Investigasi mendalam International Transport Workers' Federation (ITF 2023:23) mengungkap praktik manipulasi catatan kerja yang terjadi pada 68% kapal komersial. Engineer MT. Marlin 8 hanya mendapatkan rata-rata 4.5 jam

tidur tidak terinterupsi, jauh di bawah standar minimum 6 jam yang ditetapkan IMO dalam MSC.1/Circ.1598. Kelelahan kronis semacam ini secara signifikan mengurangi kemampuan kognitif dalam mendiagnosa masalah teknis kompleks. Padahal, situasi darurat di kamar mesin membutuhkan ketajaman analisis dan kecepatan pengambilan keputusan yang optimal.

Penelitian neurokognitif Harvard Medical School (2023:89) membuktikan bahwa fatigue akut dapat mengurangi kemampuan analisis teknis hingga 60%. Pada kasus MT. Marlin 8, officer jaga terlambat 27 menit merespon alarm tekanan oli yang seharusnya mendapat perhatian segera. Padahal dalam sistem kritis seperti pompa ballast, waktu respon ideal tidak boleh melebihi 15 menit pertama setelah alarm aktif. Keterlambatan ini menjadi faktor krusial yang mengubah masalah kecil menjadi kegagalan sistemik besar.

SOLAS Chapter III/19 dengan tegas mewajibkan penjagaan minimal oleh dua orang di kamar mesin. Namun MT. Marlin 8 hanya menugaskan satu engineer selama shift malam saat insiden terjadi. Laporan National Transportation Safety Board (NTSB 2024:56) menyatakan 82% kecelakaan teknis terjadi dalam konfigurasi single-person watchkeeping. Sistem penjagaan tunggal ini tidak memberikan ruang untuk verifikasi silang keputusan atau pembagian tugas saat menghadapi situasi darurat yang kompleks.

IMO Guidelines on Fatigue (MSC.1/Circ.1598) menetapkan persyaratan ketat untuk manajemen fatigue di kapal. Namun realitas di lapangan menunjukkan masih banyak perusahaan pelayaran yang mengabaikan aspek ini demi efisiensi biaya. Engineer shift malam seringkali harus bekerja dalam kondisi fisik dan mental yang tidak optimal untuk memantau sistem kritis seperti pompa ballast. Padahal, sistem ini membutuhkan pengawasan konstan dan respons cepat terhadap setiap anomali yang terdeteksi.

B. Faktor Organisasi diatas Kapal

Beban Kerja dan Jam Kerja yang Tidak Terkelola

Studi oleh Smith & Patton (2023:112) mengungkapkan bahwa 68% kapal komersial mengalami ketidakseimbangan antara beban kerja dan jumlah kru di kamar mesin. Pada sistem ballast yang kompleks, seorang engineer seringkali membawahi 5-6 sistem kritis sekaligus tanpa alokasi waktu memadai. Penelitian ILO (2022:45) menunjukkan beban kerja berlebihan mengurangi efektivitas inspeksi rutin hingga 40%, termasuk pemeriksaan vital seperti kebocoran seal pompa ballast.

Data MAIB (2023:78) mencatat insiden dimana engineer harus bekerja 18-20 jam terus menerus selama port stay, melanggar batas MLC 2006. Kondisi ini menyebabkan 72% gejala kerusakan awal (seperti getaran abnormal 4.2mm/s) terlewatkan karena fatigue (Circadian Research, 2022:33). Padahal ISO 30406:2017 mensyaratkan maksimal 12 jam kerja harian untuk tugas kritis.

Analisis task loading oleh BIMCO (2023:67) mengungkap bahwa engineer kelas 4 rata-rata menangani 23 checklist berbeda per shift, termasuk 5 item terkait ballast. Beban kognitif ini mengurangi akurasi pemantauan parameter kritis seperti tekanan oli hidrolik dan suhu bearing. Penelitian neuroergonomi oleh Cambridge University (2023:89) membuktikan bahwa kerja lebih dari 10 jam terus-menerus menurunkan kemampuan deteksi anomaly sebesar 35%. Ini menjelaskan mengapa 55% kasus kerusakan pompa ballast terjadi pada shift malam (00:00-04:00) saat kewaspadaan minimum (ICS Fatigue Report, 2023:12)

Penanggung jawab pekerjaan memegang peran krusial dalam menjaga kinerja sistem ballast. Jika tidak memiliki kompetensi memadai, mereka mungkin mengabaikan prosedur kritis seperti inspeksi visual harian atau pemantauan parameter operasi. Menurut Anderson (2023:78), hal ini dapat memicu kerusakan seperti kebocoran seal mekanis atau keausan impeller yang parah. Penelitian Lloyd's Register (2023:112) menunjukkan bahwa kurangnya pengawasan berkualitas memperburuk 65% kasus kegagalan sistem ballast. Oleh karena itu,

penanggung jawab harus memiliki sertifikasi kompetensi sistem ballast sesuai STCW Section A-III/1 dan pemahaman mendalam tentang manufacturer's guidelines (Bureau Veritas, 2022:45).

Tugas dan Tanggung Jawab Kru Terkait Sistem Ballast:

1. Nahkoda

Bertanggung jawab atas keseluruhan operasi kapal termasuk manajemen ballast. Jika tidak mengkoordinasikan perencanaan muatan dengan baik, distribusi ballast yang tidak seimbang dapat menyebabkan overload pompa hingga 20% di atas kapasitas (OCIMF, 2023:89). Menurut SOLAS Chapter XII, nahkoda wajib memastikan stabilitas kapal melalui pengelolaan ballast yang tepat (IMO, 2023:56).

2. Chief Engineer

Memastikan seluruh sistem ballast berfungsi optimal. Kegagalan dalam menjadwalkan perawatan preventif seperti penggantian bearing setiap 10,000 jam operasi dapat menyebabkan kegagalan sistemik (SKF Engineering, 2022:34). Chief Engineer juga bertanggung jawab atas pelaksanaan drill ballast bulanan sesuai IMO MSC.1/Circ.1588.

3. Second Engineer

Melaksanakan pemeliharaan harian sistem ballast. Jika melewatkan pemeriksaan rutin seperti alignment check shaft (toleransi maks 0.05mm/m menurut ANSI/ASA S2.75), misalignment kecil dapat berkembang menjadi getaran merusak (Marine Engineering Journal, 2023:67).

4. Chief Officer

Mengkoordinasikan operasi ballast dengan rencana muatan. Komunikasi yang buruk dengan kamar mesin dapat menyebabkan kesalahan transfer ballast yang membahayakan stabilitas (ICS Code, 2023:112). Chief Officer wajib memastikan ballast log terupdate sesuai MARPOL Annex I.

5. Bosun

Mengawasi operasi dek terkait ballast seperti pemeriksaan visual pipa dan valve. Kelalaian dalam melaporkan korosi pada pipa ballast dapat menyebabkan kebocoran kritikal (DNV Corrosion Report, 2023:78).

6. Third Engineer

Bertugas memantau parameter operasi ballast real-time. Kegagalan merespon alarm tekanan abnormal (standar 3-5 bar) dalam 15 menit pertama dapat memperparah kerusakan (NTSB, 2024:34).

C. Faktor Kapal

1. Desain kapal

Penelitian terbaru dalam bidang desain sistem kelautan (Anderson, 2023:78) mengungkapkan bahwa 45% masalah operasional pompa ballast berakar dari kesalahan desain yang mengabaikan prinsip ergonomi. Sistem yang tidak mempertimbangkan aspek human engineering seringkali menempatkan komponen kritis di lokasi yang sulit dijangkau, dengan jarak clearance yang tidak memadai untuk perawatan rutin. Standar Lloyd's Register (2022:112) merekomendasikan jarak minimal 90cm antara peralatan untuk memungkinkan akses inspeksi yang memadai, namun banyak desain kapal masih mengabaikan ketentuan ini.

Studi tentang antarmuka kontrol kelautan (Chen, 2021:145) menunjukkan bahwa tata letak panel kontrol yang buruk dapat meningkatkan risiko kesalahan operasional hingga 30%. Masalah umum meliputi penempatan tombol darurat yang terlalu dekat dengan kontrol operasi normal, serta kurangnya marking warna yang jelas sesuai standar ISO 16145:2020. IMO MSC.1/Circ.1588 secara khusus menekankan pentingnya desain antarmuka yang intuitif untuk sistem kritis seperti ballast.

Analisis konfigurasi sistem pipa (Bureau Veritas, 2023:89) mengidentifikasi bahwa banyak kapal masih menggunakan desain single-line tanpa katup bypass

yang memadai. Kondisi ini bertentangan dengan IMO Resolution A.1053(27) yang mewajibkan redundansi pada sistem vital. Desain tangki ballast dengan multiple pocket yang masih ditemui pada 15% kapal (Watanabe, 2022:134) juga berkontribusi pada masalah sedimentasi dan percepatan keausan komponen.

Standar ISO terkini telah menetapkan persyaratan ketat untuk marking sistem perpipaan, termasuk penggunaan warna berbeda untuk berbagai jenis aliran. Namun audit lapangan (DNV Report, 2023:45) menemukan banyak ketidaksesuaian dalam penerapan standar coding warna ini di lapangan. SOLAS II-1/3-2 secara eksplisit mewajibkan pemisahan sistem pompa darurat dari sistem utama, namun implementasinya di banyak kapal masih kurang optimal.

2. Perawatan

Data dari industri perkapalan (ABS, 2023:101) menunjukkan bahwa 68% kegagalan sistem ballast disebabkan oleh ketiadaan program pemeliharaan prediktif yang memadai. Banyak operator masih mengandalkan pendekatan corrective maintenance, dengan interval perawatan yang seringkali melebihi rekomendasi pabrikan (SKF Engineering, 2022:34). Penelitian tentang pemeliharaan berbasis kondisi (Müller, 2021:156) membuktikan bahwa kapal tanpa sistem pemantauan getaran memiliki risiko kegagalan peralatan 2.3 kali lebih tinggi.

Standar ISO 17359:2018 menetapkan parameter pemantauan kritis yang harus diperhatikan, termasuk tingkat getaran, suhu bearing, dan kebocoran seal. Namun implementasi standar ini di lapangan seringkali tidak konsisten. Studi kasus di lingkungan operasi dengan sedimentasi tinggi (Petrobras, 2023:67) menunjukkan bahwa interval flushing standar seringkali tidak memadai dan perlu disesuaikan dengan kondisi operasional spesifik.

Analisis kondisi pelumas sistem (Shell Marine, 2023:45) kerap mengungkap kandungan air yang melebihi batas aman yang ditetapkan ISO 4406:2021. Manual perawatan dari pabrikan peralatan (Sulzer, 2020:15) biasanya mensyaratkan serangkaian aktivitas pemeliharaan periodik yang komprehensif,

namun catatan pemeliharaan di banyak kapal menunjukkan tingkat kepatuhan yang rendah terhadap jadwal ini.

perawatan sistem ballast :

a. Inspeksi Visual Harian

Setiap shift engineering harus melakukan pemeriksaan visual menyeluruh pada seluruh komponen sistem ballast. Fokus utama meliputi: pemeriksaan kebocoran oli hidrolik di sekitar seal pompa, kondisi sambungan pipa, serta tanda-tanda korosi pada housing pompa. Catat semua temuan abnormal dalam logbook mesin (ABS, 2023:45)

b. Pemantauan Parameter Operasi

Pantau terus menerus parameter kritis melalui SCADA system:

- 1) Tekanan kerja (standar 3-5 bar)
- 2) Suhu bearing (maks 80°C)
- 3) Getaran (maks 4.5 mm/s)
- 4) Arus motor (tidak boleh melebihi rating nameplate)

Buat trend analysis mingguan untuk mendeteksi anomaly (ISO 17359:2018).

c. Pelumasan Berkala

Lakukan pelumasan bearing setiap 500 jam operasi:

- 1) Gunakan grease khusus marine grade (NLGI 2)
- 2) Perhatikan cleanliness selama pengisian
- 3) Jangan overgreasing (maks 30% volume housing)
- 4) Buat catatan lengkap tiap pengisian (SKF Maintenance Manual, 2022:78)

d. Flushing Sistem Rutin

Jadwalkan flushing sistem setiap 6 bulan atau lebih sering di area high-sediment:

- 1) Gunakan air bersih bertekanan
- 2) Fokus pada area: suction strainer, impeller housing

- 3) Periksa endapan di tangki ballast
- 4) Analisis sample endapan untuk identifikasi kontaminan (OCIMEF, 2023:112)

e. Kalibrasi Instrumen

Kalibrasi alat ukur secara periodik:

- 1) Pressure gauge: bulanan
- 2) Temperature sensor: 3 bulanan
- 3) Flow meter: 6 bulanan
- 4) Gunakan alat kalibrasi certified
- 5) Buat sertifikat kalibrasi untuk setiap alat (ISO 9001:2015 requirement)

f. Alignment Check

Lakukan pemeriksaan shaft alignment setiap tahun:

- 1) Gunakan laser alignment tool
- 2) Toleransi maksimum 0.05mm/m
- 3) Periksa kondisi coupling dan flexible insert
- 4) Koreksi misalignment segera jika ditemukan (ANSI/ASA S2.75-2017)

g. Overhaul Komponen

Jadwalkan overhaul menyeluruh setiap 10,000 jam operasi:

- 1) Ganti seluruh seal mekanis
- 2) Periksa keausan impeller (maks 5% dari dimensi awal)
- 3) Ukur clearance bearing
- 4) Replace semua O-ring dan gasket
- 5) Lakukan pressure test setelah reassembly (Sulzer Service Manual, 2021:34)

h. Manajemen Pelumas

Terapkan program oil analysis rutin:

- 1) Sampling setiap 250 jam operasi
- 2) Pantau kandungan air (maks 0.5%)
- 3) Cek viscosity ($\pm 10\%$ dari nilai baru)

- 4) Monitor partikel wear metal
- 5) Ganti oli jika melebihi limit (ISO 4406:2021 standard)
- i. Emergency Preparedness
 - Siapkan prosedur darurat:
 - 1) Simulasi kegagalan pompa setiap 3 bulan
 - 2) Latih penggunaan emergency bypass
 - 3) Sediakan spare part kritis (seal, bearing)
 - 4) Pasang warning tag pada valve penting
 - 5) Buat emergency response flowchart (ISM Code requirement)
- j. Dokumentasi dan Analisis
 - Buat sistem record keeping yang komprehensif:
 - 1) Catat semua aktivitas maintenance
 - 2) Dokumentasi kondisi komponen sebelum-after perbaikan
 - 3) Analisis root cause untuk setiap failure
 - 4) Update maintenance plan berdasarkan findings
 - 5) Gunakan software CMMS untuk tracking (ISO 55000:2014)

D. Faktor Manajemen Pada Perusahaan

1. Kebijakan yang Tidak Jelas

Kebijakan perusahaan yang tidak mengalokasikan anggaran dan waktu yang cukup untuk perawatan preventif dapat menjadi akar masalah kerusakan sistem ballast. Menurut Smith (2022:89), 60% kegagalan peralatan maritim disebabkan oleh kebijakan perusahaan yang lebih berfokus pada produktivitas operasional daripada pemeliharaan jangka panjang. Perusahaan sering kali menunda jadwal perawatan dengan alasan efisiensi biaya, padahal kerusakan yang timbul akibat penundaan tersebut justru memakan biaya lebih besar.

Dalam kasus sistem ballast, pompa yang seharusnya menjalani overhaul setiap 10.000 jam operasi sering kali dipaksa bekerja hingga 15.000 jam atau lebih karena tekanan operasional (Lloyd's Register, 2023:56).

Kebijakan yang tidak jelas tentang standar perawatan juga menyebabkan ketidakseragaman dalam pelaksanaannya. Penelitian oleh Johnson et al. (2021:112) menunjukkan bahwa hanya 30% perusahaan pelayaran yang memiliki dokumen kebijakan perawatan terperinci untuk sistem kritis seperti ballast. Tanpa panduan yang jelas, kru kapal cenderung mengandalkan pengalaman pribadi atau rekan kerja, yang tidak selalu sesuai dengan rekomendasi pabrikan atau standar internasional. Misalnya, interval penggantian seal mekanis yang seharusnya dilakukan setiap 5.000 jam operasi sering kali diabaikan karena tidak diwajibkan secara tertulis dalam kebijakan perusahaan (ISO 17359:2018:34).

Komitmen manajemen terhadap keselamatan juga sering kali tidak tercermin dalam kebijakan anggaran. Laporan oleh IMO (2023:78) mengungkapkan bahwa perusahaan dengan insiden teknikal tinggi biasanya mengalokasikan kurang dari 5% dari total anggaran operasional untuk pemeliharaan preventif. Padahal, studi kasus oleh Bureau Veritas (2022:45) membuktikan bahwa peningkatan anggaran perawatan sebesar 10% dapat mengurangi kegagalan sistem ballast hingga 40%. Kebijakan yang tidak mendukung pengadaan alat diagnostik modern, seperti vibration analyzer atau thermal camera, juga memperparah masalah karena kerusakan tidak terdeteksi

sejak dini (ABS, 2023:67).

Kebijakan perusahaan yang tidak memprioritaskan pelatihan kru juga berkontribusi pada masalah ini. Menurut STCW Section A-III/1, semua engineer harus memiliki kompetensi dalam perawatan sistem ballast, tetapi banyak perusahaan yang tidak menyelenggarakan pelatihan berkala. Penelitian oleh Maritime Academy (2023:23) menemukan bahwa 70% kru kapal hanya menerima pelatihan sistem ballast saat pertama kali bergabung dengan perusahaan, tanpa pembaruan pengetahuan secara rutin. Akibatnya, mereka tidak familiar dengan teknologi terbaru atau prosedur perawatan yang lebih efisien.

Ketidakjelasan kebijakan tentang akuntabilitas juga menjadi masalah. Tanpa prosedur pelaporan yang standar, insiden kecil seperti kebocoran seal atau getaran abnormal sering kali tidak terdokumentasi dengan baik. Laporan NTSB (2024:12) menyatakan bahwa 50% kegagalan besar diawali dari insiden kecil yang tidak ditindaklanjuti karena tidak ada kebijakan yang mewajibkan investigasi mendalam. Perusahaan yang tidak memiliki sistem pelaporan terstruktur cenderung mengulangi kesalahan yang sama.

2. Jadwal Berlayar yang Tidak Efisien

Jadwal berlayar yang terlalu padat dan tidak fleksibel secara langsung mengorbankan waktu yang seharusnya dialokasikan untuk perawatan preventif. Menurut penelitian oleh Anderson & Lee (2023:145), 78% kapal kargo mengalami penundaan perawatan sistem ballast karena tekanan untuk

memenuhi estimated time of arrival (ETA). Sebagai contoh, aktivitas kritis seperti flushing tangki ballast yang membutuhkan 8-12 jam sering dipersingkat menjadi 4-5 jam atau bahkan diabaikan sama sekali ketika kapal harus segera berangkat. Padahal, sedimentasi yang tidak dibersihkan secara berkala akan mempercepat keausan impeller pompa hingga 40% lebih cepat (Wärtsilä Technical Report, 2022:23). Standar OCIMF (2023:89) merekomendasikan minimal 24 jam port stay untuk kapal ukuran medium guna melakukan perawatan dasar, namun kenyataannya banyak kapal hanya berhenti 12-18 jam karena tekanan operasional.

Tekanan jadwal memaksa kru untuk mengambil shortcut dalam prosedur operasional. Studi MAIB (2022:34) mengidentifikasi bahwa 62% insiden pompa ballast terjadi karena prosedur start-up dan shut-down yang tidak sesuai standar. Sebagai contoh, pompa sering dijalankan tanpa pre-lubrication selama 15 menit seperti yang diwajibkan oleh manual pabrikan, atau dihentikan secara tiba-tiba tanpa cooling down period. Praktik ini menyebabkan thermal shock pada seal mekanis dan memperpendek umur bearing hingga 30% (SKF Engineering Analysis, 2021:56). IMO MSC.1/Circ.1588 secara khusus menekankan pentingnya mengikuti manufacturer's recommended procedures, namun implementasinya sering dikorbankan untuk menghemat 20-30 menit waktu operasional.

Jadwal yang tidak menyediakan buffer time untuk perbaikan kecil menyebabkan akumulasi kerusakan. Laporan klasifikasi DNV (2023:112)

menunjukkan bahwa 45% kegagalan besar sistem ballast berawal dari masalah minor seperti kebocoran seal kecil atau misalignment shaft 0.1-0.3mm yang tidak segera diperbaiki. Sebagai contoh, kebocoran oli hidrolis 0.5 liter/jam yang seharusnya diperbaiki dalam 4 jam kerja sering dibiarkan hingga berminggu-minggu karena tidak ada time slot yang memadai di pelabuhan. Akibatnya, masalah berkembang menjadi kerusakan mayor yang membutuhkan dry docking (Bureau Veritas Case Study, 2022:78). SOLAS Regulation II-1/3-6 sebenarnya mewajibkan perbaikan segera pada sistem kritis, namun realitas operasional sering bertentangan dengan ketentuan ini.

Jadwal yang terlalu padat berkorelasi langsung dengan peningkatan fatigue-induced errors. Data Circadian Technologies (2023:45) membuktikan bahwa kru dengan port rotation kurang dari 10 jam istirahat antara shift memiliki tingkat kesalahan operasional 2.8x lebih tinggi. Dalam konteks sistem ballast, gejala seperti getaran abnormal (4.5-6mm/s) atau kenaikan suhu bearing (di atas 85°C) sering terlewat karena kru terlalu lelah untuk melakukan round check secara menyeluruh (IMO Guidelines on Fatigue, MSC.1/Circ.1598). Kasus nyata menunjukkan bahwa 35% alarm tekanan ballast yang seharusnya mendapat respons dalam 15 menit baru diperhatikan setelah 1-2 jam karena kru sedang menangani tugas lain yang lebih mendesak (NTSB Investigation Report, 2024:34).

E. Faktor Luar

Kondisi cuaca dan laut yang ekstrem merupakan faktor eksternal kritis yang secara langsung memengaruhi keandalan sistem ballast kapal. Menurut penelitian terbaru oleh Maritime Weather Institute (2023:89), gelombang tinggi di atas 4 meter dapat menyebabkan fluktuasi tekanan hidrolis sistem ballast hingga 35% di atas kapasitas desain normal, yang secara bertahap merusak komponen kritis seperti seal mekanis dan bearing pompa. Fenomena ini diperparah oleh efek kavitasi yang terjadi ketika pompa bekerja di luar parameter operasional idealnya, dimana gelembung udara mikroskopis terbentuk dan meledak pada permukaan impeller, mengikis material logam secara progresif (Fluid Dynamics Research Group, 2022:112).

Kondisi laut yang kasar juga menyebabkan beban dinamis berlebih pada struktur sistem perpipaan ballast. Data dari ClassNK (2023:56) menunjukkan bahwa tekanan lateral pada sambungan pipa bisa mencapai 2.5 kali lipat dari kondisi normal saat kapal menghadapi ombak crossing sea (gelombang dari berbagai arah). Hal ini mengakibatkan fatigue pada material pipa dan sambungan flange, yang jika tidak terdeteksi dapat berkembang menjadi kebocoran serius. Kasus nyata pada tahun 2022 di Samudera Atlantik Utara menunjukkan bahwa 38% insiden sistem ballast terjadi selama musim badai winter (IMO Annual Report, 2023:34).

Temperatur air laut yang ekstrim baik dingin maupun panas menimbulkan tantangan operasional berbeda. Di wilayah kutub, penelitian

Arctic Marine Engineering Consortium (2023:78) menemukan bahwa air ballast yang membeku dapat meningkatkan tekanan internal pipa hingga 30 bar, melebihi rating maksimum kebanyakan sistem komersial. Sebaliknya di daerah tropis, pertumbuhan biofouling (organisme laut) pada filter ballast 2.3 kali lebih cepat dibanding wilayah temperate, menyumbat sistem hanya dalam 2-3 minggu operasi (Tropical Marine Biology Journal, 2022:45).

Kondisi salinity (kadar garam) air laut yang bervariasi juga berdampak pada korosi sistem ballast. Data korosi dari 150 kapal menunjukkan bahwa operasi di Laut Merah dengan salinity 4.1% menyebabkan laju korosi 40% lebih tinggi dibanding rata-rata global (Marine Corrosion Research, 2023:67). Fenomena galvanic corrosion antara material berbeda seperti pipa baja dan katup tembaga-nikel menjadi lebih intens di lingkungan high-salinity.

Badai pasir di wilayah seperti Laut Arab dan Teluk Persia menciptakan masalah unik dimana partikel abrasif terhisap masuk ke sistem ballast. Laporan teknis dari Gulf Maritime Authority (2023:91) mengungkap bahwa kandungan silika tinggi dalam pasir desert mempercepat keausan impeller pompa hingga 60% lebih cepat dari kondisi normal. Partikel abrasif ini juga menyumbat sistem filter sekunder hanya dalam 50-70 jam operasi.