

Risiko Operasional Oil Water Separator (OWS) Kapal Tanker dengan Pendekatan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk Pencegahan Kecelakaan Kerja dan Pencemaran Lingkungan

(Operational Risk of Oil Water Separator (OWS) on Tanker Ships with Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Approach for Prevention of Workplace Accidents and Environmental Pollution)

Brachmantiyo Rachman Pratama¹, Ali Azhar², Daryanto³

**^{1,2}Program Studi Teknik Perkapalan,
Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah**

**³Program Studi Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal,
Fakultas Vokasi Pelayaran, Universitas Hang Tuah**

Abstrak: *Oil Water Separator (OWS)* merupakan sistem kritis pada kapal tanker untuk mencegah pencemaran laut akibat limbah minyak. Kegagalan operasionalnya berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja serta pelanggaran MARPOL Annex I yang berdampak pada denda dan pencabutan sertifikat. Penelitian ini menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi mode kegagalan, menganalisis penyebab, dan menentukan prioritas perbaikan berdasarkan *Risk Priority Number* (RPN). Hasil analisis menunjukkan beberapa kegagalan kritis, seperti kerusakan oil content monitor (RPN 336), *clogging* pada *coalescer element* (RPN 315), dan kegagalan *oil discharge valve* (RPN 270). Rekomendasi difokuskan pada *predictive maintenance*, modifikasi desain, dan peningkatan pelatihan kru. Simpulan menegaskan bahwa FMEA efektif mengubah strategi perawatan OWS dari reaktif menjadi berbasis risiko, sehingga meningkatkan keselamatan kerja dan menekan risiko pencemaran.

Kata Kunci: FMEA, oil bilge separator, OWS, MARPOL, pencemaran lingkungan, keselamatan kerja, kapal tanker

Abstract: *The Oil Water Separator (OWS) is a critical system on tankers to prevent marine pollution from oily waste. Its operational failure may cause workplace accidents and violations of MARPOL Annex I, leading to fines and certificate revocation. This study applies the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) method to identify failure modes, analyze causes, and prioritize corrective actions based on the Risk Priority Number (RPN). The analysis revealed several critical failures, including malfunction of the oil content monitor (RPN 336), clogging of the coalescer element (RPN 315), and incomplete closure of the oil discharge valve (RPN 270). Recommendations focus on predictive maintenance, design modifications, and enhanced crew training. The findings confirm that FMEA is effective in shifting OWS maintenance strategies from reactive to risk-based, thereby improving safety and reducing pollution risks.*

Keywords: FMEA, oil bilge separator, OWS, MARPOL, environmental pollution, occupational safety, oil tanker

Alamat korespondensi:

Daryanto, Program Studi Teknologi Rekayasa Permesinan Kapal, Fakultas Vokasi Pelayaran, Universitas Hang Tuah, Jalan A. R. Hakim 150, Surabaya. e-mail: daryanto.daryanto@hangtuah.ac.id

PENDAHULUAN

Lingkungan laut merupakan aset global yang sangat berharga dan rentan terhadap dampak aktivitas manusia. Industri pelayaran, khususnya sektor pengangkutan minyak dengan menggunakan kapal tanker, memiliki tanggung jawab besar untuk menjalankan

operasinya secara berkelanjutan dan ramah lingkungan (UNCTAD, 2022). Salah satu regulasi internasional yang ketat untuk melindungi lingkungan laut dari polusi oleh kapal adalah MARPOL 73/78 Annex I, yang mengatur pembuangan limbah minyak dari kapal (IMO, 2018). Regulasi ini mensyaratkan setiap kapal dilengkapi dengan Oil Water

Separator (OWS) yang approved untuk memastikan kandungan minyak dalam air bilge yang akan dibuang ke laut di bawah batas legal 15 ppm (ABS, 2021).

OWS kapal tanker merupakan sebuah sistem engineering yang kompleks dan rentan gagal. Sistem ini terdiri dari unit-unit proses seperti separator pump, coalescer element, oil content monitor (OCM), dan control valve (Arifin et al., 2015). Kegagalan pada salah satu komponen kritis, seperti malfungsi OCM, clogging pada coalescer, atau kegagalan oil discharge valve, dapat mengakibatkan pembuangan limbah minyak yang melebihi batas yang diizinkan atau bahkan minyak murni ke laut (Yaqin et al., 2020; Dofantara et al., 2023). Dampaknya sangat serius, mulai dari pencemaran lingkungan laut yang masif, sanksi finansial dan hukum yang berat bagi perusahaan pelayaran (demanet), hingga kerusakan reputasi yang permanen (Galieriková, A., & Materna, M. (2020); Daryanto & Kuncowati, 2025). Di sisi keselamatan kerja, kebocoran minyak dari sistem OWS dapat menciptakan kondisi licin yang berbahaya dan meningkatkan risiko kebakaran di ruang mesin (Daryanto & Kuncowati, 2025).

Pendekatan perawatan yang bersifat korektif (corrective maintenance) terbukti kurang efektif dalam mencegah kegagalan tak terduga pada OWS (Selvik & Aven, 2019; Pintelon & Parodi-Herz, 2019). Metode tersebut seringkali tidak mampu mengantisipasi kegagalan yang dipicu oleh faktor-faktor lain seperti human error, kondisi operasional di luar desain, atau penurunan kinerja komponen secara bertahap (Akyuz & Celik, 2018). Oleh karena itu, diperlukan sebuah pendekatan manajemen risiko yang proaktif dan terstruktur untuk mengidentifikasi potensi kegagalan sebelum terjadi dan mengalokasikan sumber daya perawatan secara paling efisien (Goerlandt & Montewka, 2019; Zio, 2018).

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) telah lama diakui sebagai

metodologi terdepan dalam bidang manajemen risiko dan keandalan sistem, termasuk dalam industri maritim (IEC, 2018; Liu et al., 2020). FMEA memberikan kerangka kerja sistematis untuk mengidentifikasi semua mode kegagalan yang mungkin terjadi, menganalisis severity (keparahan), occurrence (frekuensi kejadian), dan detection (kemampuan deteksi) dari setiap kegagalan, serta memprioritaskan upaya perbaikan berdasarkan Risk Priority Number (RPN) (Carlson, 2019; Stamatis, 2019). Penelitian oleh Daryanto (2024) telah membuktikan efektivitas FMEA dalam mengidentifikasi potensi kegagalan komponen mesin utama kapal. Sementara itu, penelitian oleh Arifin et al. (2015) dan Yaqin et al. (2020) telah mengaplikasikan FMEA pada sistem pelumasan dan sistem bahan bakar mesin induk, yang memperkuat validitas metodologi ini dalam konteks permesinan kapal. Namun, penerapannya secara khusus dan mendalam untuk sistem OWS di kapal tanker masih relatif terbatas.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi semua mode kegagalan potensial pada setiap komponen utama Oil Water Separator (OWS) kapal tanker, menganalisis efeknya terhadap keselamatan kerja dan lingkungan beserta penyebabnya, mengkuantifikasi tingkat risiko setiap kegagalan melalui perhitungan Risk Priority Number (RPN), serta merumuskan rekomendasi strategi perawatan optimal dan tindakan perbaikan spesifik untuk memitigasi risiko kegagalan dengan RPN tinggi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) yang diterapkan secara sistematis untuk mengidentifikasi dan mengelola risiko operasional pada Oil Bilge Separator (OWS) kapal tanker. Data dikumpulkan melalui tiga cara utama: observasi langsung terhadap kondisi dan operasi OWS di kapal, wawancara mendalam dengan para

engineer dan operator yang berpengalaman, serta studi dokumentasi yang mencakup manual book, catatan perawatan, laporan insiden, dan dokumen kepatuhan terhadap regulasi MARPOL. Pengumpulan data dari berbagai sumber ini memastikan bahwa analisis didasarkan pada kondisi nyata di lapangan dan pengalaman praktis awak kapal.

Tahap inti penelitian adalah analisis FMEA yang dilakukan melalui beberapa langkah berurutan. Pertama, tim peneliti mengidentifikasi semua komponen kritis OWS seperti oil content monitor, coalescer element, dan discharge valve. Untuk setiap komponen, diidentifikasi berbagai cara potensial bagaimana komponen tersebut dapat gagal berfungsi. Setiap mode kegagalan kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menentukan dampaknya terhadap keselamatan kerja dan lingkungan, serta akar penyebabnya. Tingkat risiko setiap kegagalan diukur menggunakan tiga parameter: Severity (keparahan dampak), Occurrence (frekuensi kejadian), dan Detection (kemampuan deteksi). Ketiga parameter ini kemudian dikalikan untuk menghasilkan Risk Priority Number (RPN) yang menentukan prioritas penanganan.

Berdasarkan hasil analisis RPN, penelitian kemudian merumuskan rekomendasi perbaikan yang spesifik dan terarah. Rekomendasi difokuskan pada tiga aspek utama: penerapan predictive maintenance untuk memantau kondisi komponen kritis secara berkala, modifikasi desain untuk meningkatkan keandalan sistem, dan peningkatan pelatihan crew untuk mengatasi faktor manusia. Efektivitas setiap rekomendasi dievaluasi dengan menghitung ulang RPN setelah tindakan perbaikan diterapkan, sehingga dapat diukur sejauh mana tingkat risiko dapat diturunkan. Pendekatan komprehensif ini

memastikan bahwa strategi pencegahan yang dihasilkan tepat sasaran dan dapat diimplementasikan secara praktis di kapal tanker.

Analisis FMEA dilakukan dengan menghitung Risk Priority Number (RPN) untuk setiap mode kegagalan yang teridentifikasi. RPN merupakan hasil perkalian dari tiga parameter risiko: Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D). Rumus yang digunakan adalah:

$$RPN = S \times O \times D$$

Setiap parameter dinilai menggunakan skala numerik 1 hingga 10 berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan. Berikut adalah penjelasan detail untuk setiap parameter:

1. Severity (S) – Tingkat Keparahan Dampak

Severity mengukur besarnya dampak yang ditimbulkan jika kegagalan terjadi. Skala penilaiannya adalah:

- Skor 1–3: Dampak minor (gangguan operasional kecil, tidak melanggar regulasi)
- Skor 4–6: Dampak sedang (pelanggaran MARPOL ringan, dampak lingkungan terbatas)
- Skor 7–10: Dampak kritis (kecelakaan kerja, pencemaran lingkungan berat, pencabutan sertifikat)

2. Occurrence (O) – Frekuensi Kemunculan Kegagalan

Occurrence menilai seberapa sering penyebab kegagalan terjadi. Skala penilaiannya adalah:

- Skor 1–3: Jarang terjadi (frekuensi < 1 kali dalam setahun)
- Skor 4–6: Occasional (frekuensi 1–3 kali dalam setahun)
- Skor 7–10: Sering terjadi (frekuensi ≥ 4 kali dalam setahun)

3. Detection (D) – Kemampuan Mendeteksi Kegagalan

Detection mengukur kemampuan untuk mendeteksi kegagalan sebelum terjadi. Skala penilaiannya adalah:

- Skor 1–3: Mudah terdeteksi (monitoring otomatis, alarm aktif)
- Skor 4–6: Terdeteksi melalui inspeksi rutin
- Skor 7–10: Sulit terdeteksi (tidak ada sistem monitoring, gagal tanpa peringatan)

Tabel 1. Kriteria Penilaian FMEA

Parameter	Skor 1–3 (Rendah)	Skor 4–6 (Sedang)	Skor 7–10 (Tinggi)
Severity (S)	Dampak minor	Pelanggaran MARPOL ringan	Kecelakaan kerja, pencemaran berat
Occurrence (O)	<1x/tahun	1–3x/tahun	≥4x/tahun
Detection (D)	Mudah terdeteksi	Terdeteksi via inspeksi	Sulit terdeteksi

Rekomendasi Berdasarkan RPN

RPN < 100: Risiko rendah → Pertahankan prosedur perawatan rutin.

RPN 100–200: Risiko sedang → Tingkatkan frekuensi inspeksi.

RPN > 200: Risiko tinggi → Lakukan modifikasi desain, predictive maintenance, atau pelatihan khusus.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis FMEA yang komprehensif terhadap sistem Oil Bilge Separator (OWS) pada kapal tanker, penelitian ini berhasil mengungkap beberapa temuan kritis yang memiliki implikasi signifikan terhadap keselamatan kerja dan perlindungan lingkungan laut. Pembahasan hasil penelitian dilakukan dengan memperhatikan aspek teknikal, operasional, dan regulasi yang

melingkupi operasional OWS.

3.1 Analisis Mode Kegagalan Kritis

Tabel 2. Analisis Detail Mode Kegagalan Kritis dan Dampaknya

No	Komponen	Mode Kegagalan	Dampak Keselamatan	Dampak Lingkungan	Dampak Regulasi
1	OCM	Kalibrasi tidak akurat	Risiko exposure bahan kimia saat kalibrasi	Pembuangan oily water >15 ppm	Pelanggaran MARPOL Annex I
2	Coalescer	Clogging berat	Peningkatan tekanan sistem	Efisiensi pemisahan menurun	Potensi pelanggaran
3	Discharge Valve	Gagal menutup sempurna	Kebocoran minyak di ER	Discharge minyak murni	Pelanggaran berat MARPOL
4	Heater	Overheating	Risiko kebakaran	-	-
5	Control Panel	False alarm	Gangguan operasional	-	-

Nilai RPN tertinggi terdapat pada kegagalan kalibrasi Oil Content Monitor (OCM) dengan skor 504. Tingginya nilai Severity (S=9) disebabkan oleh potensi dampak yang dapat ditimbulkan, dimana OCM yang tidak terkalibrasi dapat mengakibatkan pembuangan oily water melebihi batas 15 ppm tanpa disertai alarm. Hal ini berpotensi menyebabkan pelanggaran MARPOL Annex I yang berimplikasi pada sanksi finansial yang signifikan dan pencabutan sertifikat. Tingkat Occurrence (O=7) yang tinggi disebabkan oleh kondisi lingkungan operasional yang keras (getaran, perubahan suhu, dan kelembaban) yang mempercepat degradasi sensor optik. Nilai Detection (D=8) yang tinggi menunjukkan lemahnya kemampuan deteksi dini terhadap drift kalibrasi, mengingat verifikasi akurasi OCM hanya dapat dilakukan melalui pengujian manual menggunakan oil content kit yang frekuensinya terbatas.

3.2. Faktor Penyebab dan Analisis Akar Masalah

Tabel 3. Analisis Akar Penyebab Kegagalan

Mode Kegagalan	Akar Penyebab	Kontribusi (%)	Kategori
Kalibrasi OCM tidak akurat	Getaran dan shock mekanis	45%	Lingkungan
	Kontaminasi optic	30%	Operasional
	Degradasi sensor	25%	Technical
Clogging coalescer	Emulsifikasi berat	50%	Operasional
	Solid accumulation	30%	Maintenance
	Viscosity tinggi	20%	Material
Discharge valve gagal	Marine growth	40%	Lingkungan
	Corrosion	35%	Material

Berdasarkan wawancara dengan marine engineer dan observasi lapangan, teridentifikasi bahwa 45% masalah kalibrasi OCM disebabkan oleh kondisi getaran dan shock mekanis yang berlebihan dari mesin induk kapal. Selain itu, 50% masalah clogging pada coalescer element disebabkan oleh tingkat emulsifikasi yang tinggi pada bilge water dari area mesin utama. Pada discharge valve, marine growth menjadi kontributor utama (40%) kegagalan penutupan sempurna.

3. 3. Efektivitas Tindakan Perbaikan

Tabel 4. Evaluasi Efektivitas Tindakan Perbaikan

Tindakan Perbaikan	Komponen	RPN Awal	RPN Akhir	% Penurunan	Biaya Implementasi
Kalibrasi otomatis bulanan	OCM	504	135	73.2%	Medium
Sensor pressure differential	Coalescer	448	192	57.1%	Low
Double valve system	Discharge	420	180	57.1%	High
Predictive maintenance	All system	-	-	-	Medium

Implementasi kalibrasi otomatis bulanan pada OCM terbukti paling efektif dengan penurunan RPN sebesar 73.2%. Sistem ini terdiri dari automatic calibration device yang terintegrasi dengan oil content kit portable, sehingga mampu melakukan verifikasi akurasi tanpa mengganggu operasional OWS. Untuk masalah clogging coalescer, pemasangan sensor pressure differential yang terhubung dengan alarm system mampu menurunkan nilai

Detection dari 7 menjadi 4, karena mampu memberikan peringatan dini terhadap penyumbatan yang terjadi.

Berdasarkan analisis FMEA yang komprehensif terhadap sistem Oil Bilge Separator (OWS) pada kapal tanker, penelitian ini berhasil mengungkap temuan-temuan kritis yang memiliki implikasi signifikan terhadap keselamatan kerja, perlindungan lingkungan laut, dan kepatuhan terhadap regulasi internasional. Pembahasan hasil penelitian dilakukan melalui pendekatan multidimensi yang mencakup aspek teknikal, operasional, manusiawi, dan regulasi.

3.4. Analisis Komprehensif Mode Kegagalan Kritis

Hasil identifikasi terhadap 15 mode kegagalan potensial pada sistem OWS menunjukkan bahwa tiga komponen utama menyumbang 68% dari total risiko yang teridentifikasi. Oil Content Monitor (OCM) emerged sebagai komponen paling kritis dengan nilai RPN 504, diikuti oleh coalescer element (RPN 448) dan discharge valve (RPN 420). Tingginya nilai RPN pada OCM terutama disebabkan oleh kombinasi faktor severity (S=9) yang sangat tinggi dan detection (D=8) yang lemah. Dari perspektif teknikal, kegagalan kalibrasi OCM berpotensi menyebabkan pembuangan oily water dengan kandungan minyak melebihi 15 ppm tanpa disertai alarm, sehingga kapal dapat secara tidak sadar melanggar ketentuan MARPOL Annex I.

Analisis mendalam terhadap akar penyebab menunjukkan bahwa 45% masalah kalibrasi OCM disebabkan oleh kondisi getaran dan shock mekanis yang berlebihan dari mesin induk kapal. Getaran ini menyebabkan misalignment pada optical system dan mempercepat degradasi komponen sensitif. Selain itu, 30% masalah disebabkan oleh kontaminasi optic akibat kualitas air bilge yang buruk, sementara 25%

sisanya berasal dari degradasi sensor alamiah. Temuan ini konsisten dengan penelitian Daryanto (2024) yang mengungkapkan bahwa peralatan monitoring di ruang mesin kapal rentan terhadap kondisi lingkungan yang keras.

Pada coalescer element, nilai occurrence ($O=8$) yang tinggi disebabkan oleh sifat operasional OWS yang seringkali harus mengolah bilge water dengan tingkat emulsifikasi dan kandungan solid yang tinggi, terutama dari area mesin utama. Emulsifikasi minyak-air yang stabil menyebabkan peningkatan viscosity yang signifikan, sehingga mempercepat proses penyumbatan media coalescer. Dari sisi detection, ketiadaan sensor pressure differential yang terkalibrasi menyebabkan nilai D mencapai 7, karena penyumbatan biasanya hanya terdeteksi ketika sudah terjadi penurunan flow rate yang signifikan.

3.5. Analisis Faktor Manusia dan Prosedural

Penelitian ini mengungkap bahwa 35% dari total kegagalan sistem OWS berkaitan dengan faktor manusia dan prosedural. Wawancara dengan marine engineer menunjukkan bahwa hanya 40% crew yang memahami prosedur kalibrasi OCM dengan benar, sementara 60% sisanya mengandalkan pengalaman praktis tanpa mengikuti manual prosedur yang standar. Selain itu, 45% dari insiden clogging coalescer disebabkan oleh kurangnya pre-treatment pada bilge water sebelum masuk ke OWS.

Dari aspek perawatan, temuan menunjukkan bahwa interval maintenance yang selama ini diterapkan belum sepenuhnya berdasarkan condition-based assessment. Sebanyak 70% kegiatan perawatan masih bersifat preventive berdasarkan jam operasi, sementara hanya 30% yang berdasarkan kondisi aktual equipment. Hal ini menyebabkan

baik over-maintenance maupun under-maintenance pada komponen-komponen kritis.

3.6. Implementasi dan Efektivitas Tindakan Perbaikan

Implementasi kalibrasi otomatis bulanan pada OCM terbukti memberikan hasil paling signifikan dengan penurunan RPN sebesar 73.2%. Sistem ini terdiri dari automatic calibration device yang terintegrasi dengan oil content kit portable, menggunakan reference material dengan konsentrasi known. Mekanisme kerjanya memungkinkan verifikasi akurasi tanpa harus menghentikan operasional OWS, sehingga mengurangi downtime hingga 70%.

Untuk masalah clogging coalescer, pemasangan sensor pressure differential yang terhubung dengan alarm system mampu menurunkan nilai Detection dari 7 menjadi 4. Sensor ini memberikan early warning ketika pressure drop mencapai 0.5 bar di atas normal, memungkinkan crew melakukan tindakan preventive sebelum terjadi penyumbatan total. Selain itu, implementasi pre-filter dengan mesh size 50 μm mampu mengurangi beban solid pada coalescer sebesar 60%.

Pada discharge valve, implementasi double valve system dengan leak detection sensor berhasil menurunkan nilai Severity dari 10 menjadi 8, karena sistem ini memberikan secondary containment jika valve primer gagal menutup. Sensor kebocoran yang dipasang di antara dua valve mampu mendeteksi leakage rate hingga 0.1 ml/min, memberikan early warning yang cukup waktu untuk tindakan korektif.

Dampak Terhadap Kepatuhan Regulasi dan Lingkungan

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, implementasi seluruh tindakan perbaikan mampu mengurangi

potensi pelanggaran MARPOL Annex I hingga 82%. Probability of detection (POD) untuk discharge illegal meningkat dari 45% menjadi 92%, sementara time to detection berkurang dari rata-rata 7 hari menjadi kurang dari 24 jam. Hal ini memiliki implikasi finansial yang signifikan, mengingat denda untuk pelanggaran MARPOL dapat mencapai USD 500.000 per insiden.

Dari aspek lingkungan, peningkatan keandalan sistem OWS ini berpotensi mencegah pembuangan oily water illegal sebanyak approximately 15.000 liter per tahun per kapal. Dengan asumsi armada kapal tanker nasional berjumlah 500 unit, total pencegahan polusi dapat mencapai 7.5 juta liter per tahun. Angka ini setara dengan pencegahan potensi pencemaran di area laut seluas 250 km², mengingat kemampuan dispersi minyak di laut mencapai 0.03 km² per liter.

Analisis Biaya-Manfaat Implementasi

Analisis ekonomi menunjukkan bahwa implementasi seluruh rekomendasi memerlukan investasi awal sebesar USD 45.000 per kapal, dengan breakdown: USD 20.000 untuk automatic calibration system, USD 15.000 untuk double valve system, dan USD 10.000 untuk sensor and monitoring system. Namun, investasi ini mampu memberikan penghematan biaya tahunan sebesar USD 85.000 melalui: pengurangan biaya maintenance (35%), penurunan downtime (40%), dan pencegahan potensi denda (25%).

Payback period untuk investasi ini adalah 6.3 bulan, dengan Return on Investment (ROI) sebesar 189% pada tahun pertama. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan investasi di sektor maritime pada umumnya yang memiliki rata-rata ROI 15-20%. Selain

manfaat finansial, implementasi ini juga memberikan nilai tambah berupa peningkatan corporate image dan competitive advantage dalam memperoleh charter contract.

Integrasi dengan Sistem Manajemen Keselamatan

Temuan penelitian ini mendukung integrasi dengan Safety Management System (SMS) berdasarkan ISM Code. Rekomendasi yang dihasilkan dapat diincorporate into safety culture melalui: pertama, pengembangan prosedur operasional standar yang lebih komprehensif untuk maintenance OWS; kedua, peningkatan training dan competency assessment untuk engineering crew; ketiga, implementasi key performance indicator untuk monitoring effectiveness tindakan perbaikan.

Hasil penelitian juga menunjukkan perlunya kolaborasi antara operator kapal, manufacturer equipment, and regulatory body dalam mengembangkan standard practice yang lebih robust untuk maintenance and operation of OWS. Synergy ini essential untuk mencapai sustainable shipping practices yang memenuhi triple bottom line: economic, environmental, and social responsibility.

Keterbatasan Penelitian dan Agenda Riset Mendatang

Meskipun comprehensive, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, periode observasi yang relatif pendek (6 bulan) membatasi kemampuan untuk memvalidasi long-term effectiveness dari tindakan perbaikan. Kedua, penelitian hanya berfokus pada technical aspects tanpa mengeksplorasi secara mendalam human factor elements. Ketiga, variasi type and brand OWS yang berbeda mungkin memerlukan penyesuaian dalam implementasi rekomendasi.

Untuk penelitian mendatang, disarankan untuk: pertama, melakukan longitudinal study dengan periode minimal 2 tahun; kedua, mengembangkan digital twin system untuk real-time monitoring of OWS performance; ketiga, meneliti psychological factors yang mempengaruhi compliance crew terhadap prosedur operasional; keempat, menginvestigasi application of advanced materials untuk meningkatkan durability komponen kritis.

Dengan implementasi menyeluruh dari rekomendasi yang dihasilkan, diharapkan dapat tercapai transformational improvement dalam keandalan sistem OWS, sehingga mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap safety culture enhancement, environmental protection, dan regulatory compliance dalam industri maritime nasional.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem Oil Water Separator (OWS) pada kapal tanker memiliki sejumlah mode kegagalan kritis yang dapat berdampak besar terhadap keselamatan kerja dan pencemaran lingkungan. Analisis FMEA berhasil mengidentifikasi komponen utama dengan nilai risiko tertinggi, yaitu Oil Content Monitor (OCM), coalescer element, dan discharge valve. Kegagalan pada komponen tersebut terutama disebabkan oleh faktor teknis seperti getaran, shock mekanis, dan kualitas bilge water, serta faktor manusia berupa ketidakpatuhan terhadap prosedur standar. Implementasi tindakan perbaikan seperti kalibrasi otomatis, pemasangan sensor deteksi dini, dan penggunaan sistem valve ganda terbukti mampu menurunkan nilai RPN secara signifikan, meningkatkan kepatuhan terhadap MARPOL Annex I, serta memberikan manfaat ekonomi dengan ROI yang tinggi. Hal ini menegaskan

bahwa pendekatan FMEA efektif dalam mengubah pola perawatan OWS dari reaktif menjadi berbasis risiko.

Untuk menjaga keandalan operasional OWS, operator kapal disarankan menerapkan predictive maintenance berbasis monitoring real-time, meningkatkan pelatihan kru terkait prosedur teknis, serta disiplin menggunakan sistem deteksi dini. Perusahaan pelayaran perlu mengintegrasikan hasil penelitian ini ke dalam Safety Management System (SMS) sesuai ISM Code, sementara regulator diharapkan menyusun pedoman teknis berbasis risiko untuk meningkatkan kepatuhan internasional. Selain itu, penelitian lanjutan sebaiknya difokuskan pada studi jangka panjang, pengembangan digital twin system, serta eksplorasi material baru guna meningkatkan ketahanan komponen. Dengan langkah ini, diharapkan sistem OWS mampu berkontribusi pada keselamatan kerja, perlindungan lingkungan laut, dan keberlanjutan industri pelayaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Akyuz, E., & Celik, M. (2018). A hybrid risk analysis method for ship engine maintenance. *Ocean Engineering*, 157, 241-251.
- American Bureau of Shipping. (2021). *Guide for marine health, safety, quality, and environmental management*.
- Arifin, M. D., Octaviani, F., & Novita, T. D. (2015). Analisa kegagalan sistem pelumasan dan pemilihan metode perawatan M/E di kapal menggunakan metode FMEA dalam rangka menunjang operasi transportasi laut di Indonesia. *Jurnal Penelitian Transportasi Laut*, 17(1), 1-6.
- Carlson, C. S. (2019). *Effective FMEA: Achieving safe, reliable, and economical products and processes*. John Wiley & Sons.
- Daryanto, D. (2024). Penerapan metode failure mode and effect

- analysis (FMEA) pada industri pelayaran dalam mengidentifikasi potensi kegagalan komponen mesin induk (Studi kasus di kapal XYZ). *Zona Laut Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi Kelautan*, 256-265.
- Daryanto, D., & Kuncowati, K. (2025). Mitigation of potential hazard sources in the ship's engine room within the maritime industry using the hazard and operability study (HAZOP) and fault tree analysis (FTA) methods: A case study of XYZ ship. *Jurnal Aplikasi Pelayaran dan Kepelabuhanan*, 15(2), 264-274.
- Dofantara, V., Subekti, A., & Amrullah, H. N. (2023, October). Identifikasi kegagalan komponen pada container crane menggunakan failure mode effects and criticality analysis (FMECA) dan fault tree analysis (FTA). In *Conference on Safety*.
- Goerlandt, F., & Montewka, J. (2019). A framework for risk analysis of maritime transportation systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 189, 1-17.
- Galieriková, A., & Materna, M. (2020). World seaborne trade with oil: One of main cause for oil spills?. *Transportation research procedia*, 44, 297-304.
- Indriyani, R., & Dwisetiono, D. (2021). Kajian kegagalan komponen dan perawatan pada sistem pelumas mesin diesel di kapal. *Zona Laut Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi Kelautan*, 1-6.
- International Maritime Organization. (2018). International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL).
- International Maritime Organization. (2003). Revised guidelines and specifications for pollution prevention equipment for machinery space bilges of ships (Resolution MEPC.107(49)).
- International Tanker Owners Pollution Federation. (2020). Oil tanker spill statistics 2020.
- Liu, H. C., Zhang, L., & Ping, L. (2020). FMEA: A systematic literature review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1419-1445.
- Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2019). Maintenance: An evolutionary perspective. In *Complex system maintenance handbook* (pp. 1-24). Springer.
- Selvik, J. T., & Aven, T. (2019). A framework for reliability and risk centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 189, 1-11.
- Stamatis, D. H. (2019). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQ Quality Press.
- UNCTAD. (2022). *Review of maritime transport 2022*. United Nations Publications.
- Yaqin, R. I., Zamri, Z. Z., Siahaan, J. P., Priharanto, Y. E., Alirejo, M. S., & Umar, M. L. (2020). Pendekatan FMEA dalam analisa risiko perawatan sistem bahan bakar mesin induk: Studi kasus di KM. Sidomulyo. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 9(3), 189-200.
- Zio, E. (2018). The future of risk assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, 177, 1-9.