

Analisis Perawatan Berbasis Keandalan Sistem Pendingin *Main Engine* pada KMP Madani Nusantara

Siti Aswidia Yanti ^{1,*}, Surya Hariyanto ¹

¹ Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa, 92171, Indonesia

Kata kunci

Sistem pendingin
Keandalan
FMEA dan FTA
RBD

ABSTRAK

Sistem pendingin *main engine* merupakan komponen vital yang mengendalikan temperatur mesin induk. Gangguan pada sistem ini dapat menyebabkan *overheating*, penurunan kinerja, hingga kerusakan komponen utama. Penelitian ini menganalisis tingkat keandalan sistem pendingin serta mengidentifikasi komponen kritis dan strategi perawatan yang tepat menggunakan FMEA, FTA, RBD, dan simulasi *Monte Carlo* dengan perangkat lunak *Relyence* berdasarkan data historis kegagalan periode 15 April 2024–6 Mei 2026. Hasil FMEA menetapkan *cooler* sebagai komponen paling kritis dengan RPN 144, diikuti *valve* (108) dan pompa air laut (75). Analisis FTA mengidentifikasi *minimum cut set*, dengan *cooler*, *sea chest*, dan *thermostat* termasuk orde satu; kegagalan tunggal pada salah satu komponen tersebut sudah cukup menyebabkan hilangnya fungsi pendinginan. Simulasi 5.000 jam operasi menghasilkan MTTF 2.877,64 jam, MTBF 431,42 jam, dan steady-state *availability* 98%. Keandalan menurun signifikan setelah 2.000 jam dan mencapai nol pada 4.600 jam, sedangkan ketersediaan tetap stabil di atas 98%. Rekomendasi perawatan prioritas meliputi pembersihan kerak dan inspeksi *fouling* pada *cooler*, pemeriksaan rutin *impeller* dan *bearing* pompa, serta pembersihan berkala *strainer* dan *sea chest*. Penerapan *preventive maintenance* terjadwal diharapkan dapat meningkatkan keandalan dan ketersediaan sistem serta meminimalkan risiko kegagalan operasional.

* Corresponding author:

Siti Aswidia Yanti (email: sitiaswidiayanti@gmail.com)

Diterima: 24 Juni 2026

Disetujui: 11 Juli 2026

Dipublikasikan: 12 September 2026

1 Pendahuluan

Kapal penumpang merupakan salah satu transportasi laut yang berperan penting dalam menjamin mobilitas penumpang, distribusi kendaraan, dan kelancaran logistik antarpulau di Indonesia. Tingginya frekuensi pelayaran menuntut kapal memiliki tingkat keandalan operasional yang tinggi agar jadwal pelayaran tetap terpenuhi serta keselamatan pelayaran dapat terjaga. Salah satu faktor utama yang menentukan keberlangsungan operasi kapal adalah kinerja *main engine* sebagai sistem propulsi utama. Apabila *main engine* mengalami gangguan atau berhenti beroperasi (*downtime*), kapal dapat kehilangan kemampuan bermanuver, mengalami keterlambatan pelayaran, meningkatkan biaya operasional akibat perbaikan darurat, bahkan berpotensi menimbulkan risiko keselamatan bagi penumpang, awak kapal, dan muatan. Oleh karena itu, menjaga keandalan sistem pendukung *main engine* menjadi aspek penting dalam menjamin kontinuitas operasi kapal. Sistem pendingin (*cooling system*) merupakan salah satu subsistem vital pada *main engine* yang berfungsi mempertahankan temperatur kerja mesin pada kondisi optimum sehingga proses pembakaran, pelumasan, dan perpindahan panas berlangsung secara efisien. Kegagalan sistem pendingin dapat menyebabkan *overheating* yang mengakibatkan penurunan performa mesin, peningkatan laju keausan komponen, kerusakan mesin induk, hingga penghentian operasi kapal secara tidak terencana (*unscheduled downtime*) [1].

Sistem pendingin *main engine* terdiri atas beberapa komponen utama seperti *sea chest*, *strainer*, *sea water pump*, *fresh water pump*, *cooler*, *thermostat*, *valve*, dan sistem perpipaan yang bekerja secara terintegrasi dalam proses pelepasan panas mesin [1]. Dalam operasional kapal penumpang, sistem pendingin sering mengalami gangguan akibat kondisi lingkungan laut, seperti tingginya kandungan garam, lumpur, pasir, serta organisme laut yang terbawa masuk melalui *sea chest* menuju sistem pendingin. Kondisi tersebut menyebabkan *fouling*, korosi, penyumbatan aliran, dan penurunan efisiensi perpindahan panas pada *cooler* sehingga meningkatkan potensi kegagalan sistem [2]. Untuk menjaga keandalan sistem, diperlukan strategi perawatan (*maintenance*) yang tepat.

Perawatan merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan atau mengembalikan kondisi peralatan agar tetap berfungsi sesuai dengan yang diharapkan. Salah satu strategi yang banyak diterapkan adalah *preventive maintenance*, yaitu pemeliharaan yang dilakukan secara terjadwal untuk mencegah terjadinya kerusakan. *Preventive maintenance* yang mampu mencegah terjadinya kegagalan sebelum mengakibatkan gangguan operasional. Namun, pelaksanaan *preventive maintenance* tidak cukup hanya dilakukan secara berkala berdasarkan interval waktu, melainkan perlu diprioritaskan berdasarkan tingkat kekritisan komponen, pola kegagalan, serta konsekuensi yang ditimbulkan apabila komponen tersebut mengalami kegagalan. Komponen dengan tingkat risiko tinggi dan dampak besar terhadap operasi kapal memerlukan frekuensi inspeksi serta tindakan pemeliharaan yang lebih intensif dibandingkan komponen dengan tingkat risiko yang lebih rendah [3].

Keandalan (*reliability*) menjadi salah satu indikator penting dalam sistem pemeliharaan karena menunjukkan kemampuan suatu komponen atau sistem untuk beroperasi sesuai fungsi dalam periode waktu tertentu tanpa mengalami kegagalan. Semakin tinggi tingkat keandalan suatu peralatan, maka semakin kecil peluang terjadinya downtime yang dapat mengganggu proses produksi [4]. Gangguan pada sistem pendingin dapat menyebabkan overheating yang berdampak pada penurunan performa mesin hingga kerusakan komponen utama mesin induk [2]. Kegagalan pada sistem pendingin dapat menyebabkan penurunan efisiensi operasi kapal serta meningkatkan risiko kerusakan mesin induk apabila tidak dilakukan inspeksi dan maintenance secara berkala.

Analisis keandalan menggunakan pendekatan probabilistik mampu menggambarkan perilaku kegagalan sistem selama periode operasi tertentu [5]. Analisis ini penting diterapkan pada sistem permesinan kapal karena dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem, mengidentifikasi komponen kritis, serta menentukan strategi perawatan yang tepat. Semakin rendah tingkat keandalan suatu sistem, semakin besar kemungkinan terjadinya waktu henti (*downtime*) dan gangguan operasional kapal. Waktu henti terjadi akibat kegagalan (*failure*) komponen sehingga sistem tidak dapat beroperasi secara optimal. Oleh karena itu, diperlukan analisis keandalan untuk meningkatkan kinerja sistem dan mencegah kegagalan mendadak [6]. Penelitian ini menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi komponen kritis berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN), *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk menganalisis hubungan penyebab kegagalan sistem, *Reliability Block Diagram* (RBD) untuk memodelkan konfigurasi keandalan sistem, serta simulasi *Monte Carlo* [7].

Salah satu metode yang sering digunakan dalam analisis keandalan adalah *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Metode ini dapat mengidentifikasi mode kegagalan komponen serta menentukan prioritas perawatan berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) yang diperoleh dari parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection*. FMEA membantu proses identifikasi komponen kritis sehingga tindakan pencegahan kegagalan dapat dilakukan sejak dini [8]. Selain FMEA, *Fault Tree Analysis* (FTA) digunakan untuk mengetahui hubungan logis antarp penyebab kegagalan sistem melalui pendekatan *top-down analysis*. FTA menggambarkan hubungan sebab-akibat kegagalan dalam bentuk diagram pohon kesalahan sehingga akar penyebab kegagalan sistem dapat diketahui secara sistematis. Metode ini efektif digunakan pada sistem yang memiliki hubungan antarkomponen kompleks, seperti sistem pendingin kapal [9]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menganalisis keandalan sistem pendingin utama KMP Madani Nusantara melalui penentuan RPN dengan metode FMEA, identifikasi *minimum cut set* dengan FTA, pemodelan RBD, dan perumusan rekomendasi perawatan terintegrasi. Penelitian ini menggunakan pendekatan FMEA, FTA, RBD, dan simulasi *Monte Carlo* dengan perangkat lunak *Relyence* untuk mengevaluasi keandalan dan ketersediaan sistem pendingin kapal penumpang.

2 Metode Penelitian

Penelitian ini menganalisis tingkat keandalan sistem pendingin *main engine* pada KMP Madani Nusantara. Pengumpulan data dilakukan menggunakan data primer dan sekunder. Data sekunder meliputi studi literatur yang berasal dari jurnal, buku, dan aturan klasifikasi sebagai dasar teori penelitian. Beberapa penelitian terdahulu terkait sistem keandalan dan perawatan digunakan sebagai referensi dalam menentukan metode analisis yang sesuai. Data primer diperoleh melalui observasi langsung, wawancara dengan teknisi kapal yang bertanggung jawab, serta pengumpulan data historis kerusakan sistem pendingin selama periode 15 April 2024–6 Mei 2026.

Data historis kegagalan komponen sistem pendingin selama periode operasi yang diamati disajikan pada Tabel 1. Data tersebut mencakup waktu terjadinya kegagalan, interval waktu operasi komponen hingga terjadi kegagalan *Time to Failure* (TTF), durasi waktu yang diperlukan untuk memperbaiki komponen yang gagal *Time to Repair* (TTR), serta mode kegagalan yang terjadi pada masing-masing komponen. Data ini menjadi dasar dalam identifikasi komponen kritis melalui pendekatan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan digunakan dalam penentuan distribusi kegagalan pada tahap analisis keandalan (*reliability analysis*). Data TTF dan TTR yang tercatat secara historis selanjutnya diolah untuk memodelkan perilaku kegagalan komponen terhadap waktu, menghitung nilai keandalan (*reliability*), serta memprediksi ketersediaan (*availability*) sistem pendingin secara keseluruhan melalui simulasi *Reliability Block Diagram* (RBD) dan *Monte Carlo*.

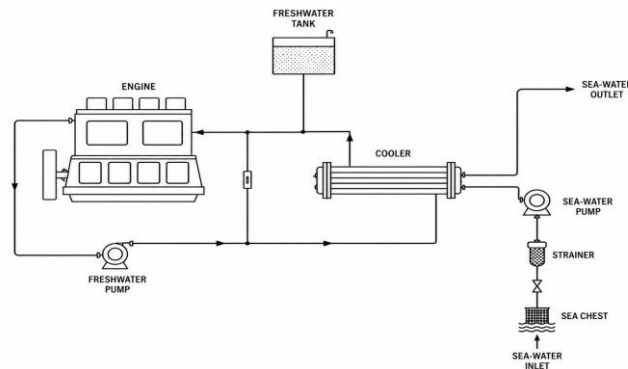
Tabel 1. Data Kegagalan Sistem Pendingin KMP Madani Nusantara

Komponen	Tanggal Kegagalan	TTF (Jam)	TTR (Jam)	Kegagalan yang Terjadi
Cooler	15 April 2024	–	–	
	7 Oktober 2024	3.850	3	Terjadi fouling pada tube cooler akibat penumpukan kerak dan organisme laut yang menghambat perpindahan panas
	18 Februari 2025	2.948	3	Korosi pada dinding pipa cooler akibat kandungan garam air laut yang tinggi menyebabkan kebocoran
	27 Juli 2025	3.498	3	Pembentukan kerak pada permukaan tube mengurangi efisiensi pendinginan
	15 April 2026	5.764	3	Pembentukan kerak pada permukaan tube mengurangi efisiensi pendinginan
SW Pump	15 April 2024	–	–	
	7 Oktober 2024	3.190	3	Keausan bearing pada poros pompa akibat getaran berlebih saat operasi
	15 Februari 2025	2.882	3	Kerusakan mechanical seal menyebabkan kebocoran pada rumah pompa, dan ganti karet couple
	18 Juli 2025	3.366	3	Impeller aus akibat kavitasi dan partikel pasir dalam air laut
	10 November 2025	2.530	3	Keausan bearing pada poros pompa akibat getaran berlebih saat operasi
	6 Mei 2026	3.894	3	Impeller aus akibat kavitasi dan partikel pasir dalam air laut
FW Pump	24 April 2024	–	–	
	7 Oktober 2024	3.652	3	Keausan bearing akibat umur pakai dan getaran
	12 Februari 2025	2.816	3	Kebocoran seal pada poros pompa
	20 Agustus 2025	4.158	3	Impeller aus akibat kavitasi
	6 Mei 2026	5.698	3	Keausan bearing akibat umur pakai dan getaran
Strainer	15 April 2024	–	–	
	6 Februari 2025	6.534	2	Penyumbatan total oleh sampah dan organisme laut yang terbawa aliran air laut
	16 April 2026	9.548	2	Korosi pada housing strainer akibat paparan air laut terus-menerus
Sea Chest	15 April 2024	–	–	
	6 Februari 2025	6.534	2	Penyumbatan oleh sampah, plastik, dan organisme laut yang menempel pada grating
	16 April 2026	9.548	2	Korosi grating akibat paparan air laut yang menyebabkan kerapuhan dan lubang
Valve	15 April 2024	–	–	
	7 Oktober 2024	3.850	2	Keausan seat valve menyebabkan kebocoran internal
	16 Februari 2025	2.904	2	Korosi pada stem valve akibat paparan air laut
	8 Juli 2025	3.124	2	Kerusakan handle/aktuator valve sehingga tidak dapat dioperasikan
	10 November 2025	2.750	2	Kebocoran packing gland pada sambungan valve
	15 April 2026	3.432	2	Keausan total pada komponen internal valve
Thermostat			1	Pergantian thermostat jika mengalami kerusakan

2.1 Pemodelan Sistem Pendingin

Pemodelan sistem pendingin dilakukan berdasarkan konfigurasi aktual sistem pendingin *main engine* pada KMP Madani Nusantara. Sistem pendingin yang digunakan merupakan sistem pendingin tertutup (*closed cooling system*) yang terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu *sea chest*, *strainer*, *sea water pump*, *cooler*, *fresh*

water pump, *thermostat*, dan *valve* yang saling terhubung membentuk konfigurasi seri dan paralel. Konfigurasi sistem pendingin *main engine* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi Sistem Pendingin *Main Engine*

2.2 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan setiap komponen sistem pendingin serta menentukan tingkat kekritisan komponen berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN). FMEA mengidentifikasi tiga hal utama, yaitu penyebab kegagalan potensial sistem selama siklus operasi, efek kegagalan, dan tingkat kekritisan efek kegagalan terhadap fungsi sistem. Metode ini banyak digunakan dalam analisis keandalan karena mampu mengidentifikasi potensi kegagalan sejak dini sehingga risiko kerusakan sistem dapat diminimalkan [8]. Menurut Nugraha [9], penilaian tingkat kekritisan dalam FMEA dilakukan melalui perhitungan RPN yang diperoleh dari perkalian tiga parameter utama, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). Secara matematis, nilai RPN dinyatakan dengan persamaan berikut [10]:

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Parameter *Severity* (S) menunjukkan tingkat keparahan dampak kegagalan komponen terhadap sistem, nilai *Severity* (S) diberikan pada skala 1–10, di mana skor 1 menunjukkan dampak yang dapat diabaikan, skor 4–6 menunjukkan gangguan terhadap operasi sistem, skor 7–8 menunjukkan penurunan fungsi utama sistem, dan skor 9–10 menunjukkan kegagalan total sistem. Parameter *Occurrence* (O) menggambarkan kemungkinan terjadinya kegagalan berdasarkan frekuensi kerusakan selama periode operasi, di mana dinilai pada skala 1–10, dengan skor 1 menunjukkan kegagalan sangat jarang terjadi, skor 4–6 menunjukkan kegagalan terjadi sesekali, skor 7–8 menunjukkan kegagalan sering terjadi, sedangkan skor 9–10 menunjukkan kegagalan sangat sering terjadi berdasarkan data historis. Parameter *Detection* (D) mengukur kemampuan sistem dalam mendeteksi kegagalan sebelum menjadi kerusakan serius; dinilai berdasarkan kemampuan mendeteksi kegagalan, di mana skor 1 menunjukkan kegagalan sangat mudah dideteksi melalui inspeksi atau pemantauan rutin, skor 4–6 menunjukkan kegagalan masih dapat dideteksi melalui inspeksi berkala, skor 7–8 menunjukkan kegagalan sulit dideteksi, dan skor 9–10 menunjukkan kegagalan hampir tidak dapat dideteksi sebelum menimbulkan kerusakan [11]. Evaluasi Terhadap parameter S, O dan D dilakukan oleh Crew dan KKM kamar mesin kapal.

2.3 Fault Tree Analysis (FTA)

Menurut Gabe [12], *Fault Tree Analysis* (FTA) merupakan metode analisis risiko dengan pendekatan top-down yang bertujuan mengidentifikasi kombinasi kegagalan potensial yang dapat menyebabkan kegagalan sistem secara keseluruhan. Analisis dimulai dari kegagalan tingkat paling atas (*top event*), kemudian dilanjutkan ke tingkat kegagalan yang lebih rendah sesuai dengan tingkat kedetailan yang dibutuhkan, ketersediaan data, serta keterbatasan waktu dan sumber daya. Hasil analisis FTA berupa diagram pohon kegagalan (*fault tree diagram*) yang menggambarkan hubungan sebab-akibat secara grafis. Diagram ini selanjutnya digunakan untuk menentukan *cut set* dan *minimum cut set*. *Cut set* adalah serangkaian kegagalan komponen yang dapat menyebabkan kegagalan sistem, sedangkan *minimum cut set* adalah himpunan minimal yang menyebabkan kegagalan tersebut. Untuk memperolehnya, digunakan algoritma MOCUS. Tingkat kekritisan *cut set* bergantung pada jumlah *basic event* (orde) di dalamnya. *Cut set* orde satu lebih kritis karena *top event* terjadi segera setelah *basic event* terjadi, sedangkan *cut set* orde dua memerlukan dua event terjadi secara bersamaan [13].

2.4 Best Fit Distribution

Penentuan distribusi kegagalan terbaik merupakan tahapan penting dalam analisis keandalan untuk memilih distribusi probabilitas yang paling tepat dalam memodelkan data waktu kegagalan (*failure time*) suatu komponen atau sistem. Proses ini bertujuan memperoleh distribusi yang paling sesuai dengan pola kegagalan berdasarkan data historis sehingga hasil perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF), nilai keandalan $R(t)$, dan laju kegagalan dapat diprediksi secara akurat.

Dalam penelitian ini, *failure time* dihitung berdasarkan interval waktu antar-kerusakan komponen sistem pendingin selama periode April 2024 hingga Mei 2026. Perhitungan dilakukan dengan asumsi bahwa seluruh komponen di luar sistem pendingin beroperasi dalam kondisi normal dan waktu yang diperlukan untuk perbaikan diperlakukan sebagai bagian dari waktu kegagalan. Identifikasi distribusi terbaik dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Relyence Free Trial* yang secara komputasional membandingkan berbagai distribusi probabilitas untuk menentukan distribusi yang paling sesuai dengan karakteristik data yang tersedia.

2.5 Reliability Block Diagram (RBD)

Metode *Reliability Block Diagram* (RBD) merupakan metode analisis keandalan yang digunakan untuk menggambarkan hubungan antarkomponen dalam suatu sistem guna mengevaluasi keandalan sistem secara keseluruhan [12]. Metode ini memodelkan hubungan logis antarkomponen berdasarkan konfigurasi operasi sistem, baik dalam bentuk seri, paralel, maupun *standby redundancy*. Konfigurasi paralel pada subsistem pompa memberikan redundansi yang meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan karena kegagalan satu pompa masih dapat diatasi oleh pompa cadangan [14]. Pada penelitian ini, sistem pendingin *main engine* KMP Madani Nusantara dimodelkan ke dalam bentuk RBD berdasarkan konfigurasi aktual sistem pendingin kapal. Komponen seperti *sea water pump*, *fresh water pump*, *cooler*, *strainer*, *sea chest*, *thermostat*, dan *valve* disusun sesuai dengan hubungan operasional antarkomponen untuk mengetahui pengaruh kegagalan komponen terhadap keandalan sistem pendingin secara keseluruhan. Komponen yang tersusun secara seri mengharuskan seluruh komponen berfungsi agar sistem dapat berjalan normal. Apabila satu komponen mengalami kegagalan, sistem akan mengalami kegagalan total.

Persamaan reliability sistem seri:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2)$$

Dengan keterangan: $R(t)$ = keandalan sistem; $R_i(t)$ = keandalan komponen ke- i ; dan N = jumlah komponen dalam sistem.

$R_i(t)$ = Reliability komponen ke- i ,

N = jumlah komponen dalam sistem.

Sedangkan sistem paralel atau *standby redundancy* digunakan pada komponen yang memiliki cadangan operasi. Sistem tetap dapat beroperasi meskipun salah satu komponen mengalami kegagalan karena terdapat komponen pengganti (*backup component*).

Persamaan reliability sistem paralel:

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (3)$$

Analisis *Reliability Block Diagram* pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *Relyence Free Trial* untuk menyimulasikan keandalan sistem selama 5.000 jam operasi. Simulasi *Monte Carlo* digunakan untuk memprediksi kinerja keandalan sistem berdasarkan probabilitas kegagalan komponen. Sebelum simulasi dilakukan, terlebih dahulu dianalisis distribusi kegagalan (*best-fit distribution*) terhadap data *time to failure* (TTF) dan *time to repair* (TTR) setiap komponen sistem pendingin. Distribusi probabilitas digunakan untuk memodelkan perilaku kegagalan komponen terhadap waktu. Untuk menghitung nilai MTTR dan MTTF pada setiap distribusi, digunakan persamaan [15]:

- Distribusi Weibull

$$MTTF = \theta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (4)$$

- Distribusi Eksponensial

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

Berdasarkan data historis kerusakan sistem pendingin selama dua tahun operasi, dilakukan perhitungan best-fit untuk setiap komponen. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Distribusi Terbaik untuk Setiap Komponen

Komponen	Distribusi Terbaik	B	H	Γ
Cooler	Weibull 3P	0,86	1418,144	2762
Pompa Air Laut	Weibull 3P	2,46	1495,435	1862
Pompa Air Tawar	Weibull 3P	1,47	3215,64	2115
Thermostat	-	-	-	-
Strainer	Eksponensial	-	3396	5362
Sea Chest	Eksponensial	-	3396	5362
Valve	Weibull 3P	1,11	666,66	2634

Berdasarkan Tabel 2, komponen *valve*, pompa air laut, dan pompa air tawar mengikuti distribusi Weibull 3P dengan nilai $\beta > 1$ yang mengindikasikan pola *wear-out failure* (kegagalan akibat keausan). Sementara itu, *cooler* dengan $\beta = 0,86$ menunjukkan pola *infant mortality* (kegagalan dini akibat kualitas atau instalasi). *Strainer* dan *sea chest* mengikuti distribusi eksponensial yang mengindikasikan pola kegagalan acak.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan setiap komponen sistem pendingin serta menentukan tingkat kekritisannya berdasarkan hasil risk priority number (RPN). Nilai RPN diperoleh dari hasil perkalian *severity*, *occurrence*, dan *detection* pada setiap mode kegagalan komponen.

Tabel 3. Hasil Analisis FMEA Sistem Pendingin

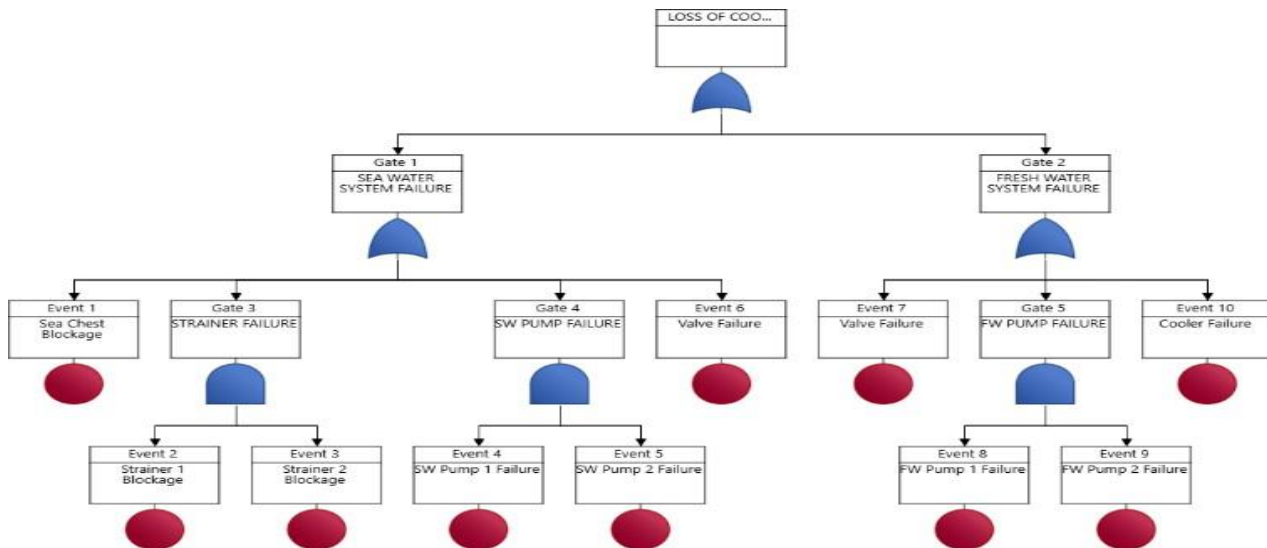
Komponen	S	O	D	RPN
Cooler	6	6	4	144
Pompa Air Laut	5	5	3	75
Pompa Air Tawar	5	4	3	60
Thermostat	1	1	1	1
Strainer	4	5	2	40
Sea Chest	1	4	1	4
Valve	6	6	3	108

Berdasarkan Tabel 3, *cooler* memiliki nilai RPN tertinggi, yaitu 144, sehingga menjadi komponen paling kritis pada sistem pendingin *main engine*. Tingginya RPN ini disebabkan oleh dampak kegagalan yang besar (*severity* = 6) dan frekuensi kejadian yang signifikan (*occurrence* = 6) akibat *fouling*, korosi, dan *scaling* pada

pipa karena kandungan garam dan organisme laut. Kondisi tersebut menurunkan efisiensi perpindahan panas dan berisiko menyebabkan *overheating* pada *main engine*.

3.2 Pemodelan Fault Tree Analysis

Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) digunakan untuk menentukan hubungan antar kegagalan komponen yang menyebabkan terjadinya *top event* pada sistem pendingin. *Top event* didefinisikan secara operasional sebagai hilangnya kemampuan sistem pendingin untuk menjaga temperatur *main engine* pada rentang operasi normal (80–95 °C), yang ditandai dengan kenaikan temperatur air pendingin keluar *main engine* melebihi batas aman yang ditentukan. Dengan demikian, *top event* tidak hanya mencakup berhentinya aliran pendingin secara total, tetapi juga mencakup kondisi di mana *cooler* gagal melepas panas secara efektif, sehingga *main engine* berisiko mengalami *overheating*.



Gambar 2. Diagram FTA Sistem Pendingin

Dengan mengamati struktur pohon kegagalan pada Gambar 2 yang menggambarkan sistem pendingin, *minimum cut set* dapat diturunkan dengan menyederhanakan setiap gerbang logika AND dan OR yang ada.

Tabel 4. *Minimum Cut Set* Sistem Pendingin

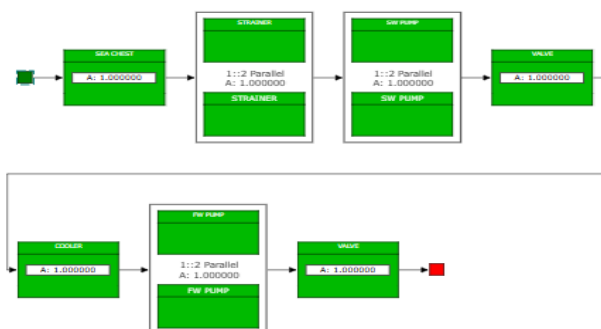
Kode	Minimum Cut Set
{E1}	Penyumbatan pada Sea Chest yang menghambat masuknya air laut ke sistem pendingin.
{E2}, {E3}	Penyumbatan pada Strainer 1 atau Strainer 2 yang menyebabkan aliran air laut menuju sistem pendingin terganggu.
{E4}, {E5}	Kegagalan mekanis atau elektrik pada Sea Water Pump 1 atau Sea Water Pump 2 sehingga sirkulasi air laut terhenti.
{E6}	Kerusakan Sea Water Valve yang menyebabkan aliran air laut tidak dapat mengalir menuju sistem pendingin.
{E7}	Kerusakan Fresh Water Valve yang mengganggu sirkulasi air tawar dalam sistem pendingin.
{E8}, {E9}	Kegagalan mekanis atau elektrik pada Fresh Water Pump 1 atau Fresh Water Pump 2 sehingga sirkulasi air tawar tidak dapat berlangsung.
{E10}	Kegagalan pada Cooler (Heat Exchanger) yang menyebabkan proses perpindahan panas tidak berlangsung sehingga sistem mengalami kehilangan fungsi pendinginan (<i>Loss of Cooling</i>).

Berdasarkan hasil analisis *minimum cut set* pada Tabel 4, telah diidentifikasi tujuh *minimum cut set* yang merupakan kombinasi terkecil dari *basic event* (E1–E10) yang dapat menyebabkan kegagalan sistem pendingin atau *top event*: *Loss of Cooling*. Dari ketujuh *cut set* tersebut, lima komponen tergolong dalam orde satu, yaitu sea water valve, fresh water valve, thermostat, sea chest, dan cooler. Artinya, kegagalan tunggal pada salah satu komponen tersebut sudah cukup untuk menyebabkan kegagalan sistem secara keseluruhan karena komponen-komponen ini tidak memiliki redundansi. Sementara itu, sea water pump, strainer, dan fresh water pump tergolong dalam orde dua. Artinya, sistem baru akan mengalami kegagalan apabila dua komponen mengalami kegagalan secara bersamaan karena sistem memiliki redundansi ganda yang memungkinkan sistem tetap

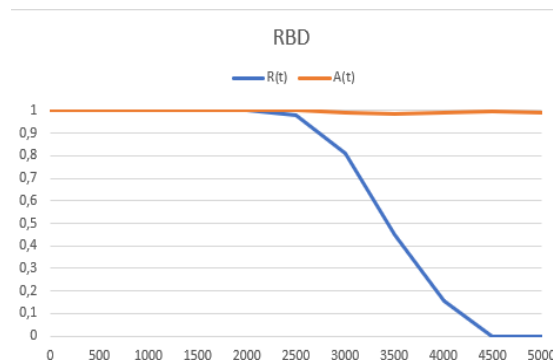
beroperasi meskipun salah satu komponen mengalami kegagalan. Komponen yang paling kritis adalah *cooler* atau heat exchanger (E10) karena kegagalan pada komponen ini menyebabkan proses perpindahan panas tidak berlangsung optimal sehingga fungsi pendinginan (*Loss of Cooling*) pada *main engine* hilang.

3.3 RBD dan Simulasi Monte Carlo

Model *Reliability Block Diagram* (RBD) disusun berdasarkan konfigurasi aktual sistem pendingin pada KMP Madani Nusantara. Konfigurasi sistem terdiri dari susunan seri dan paralel di mana sea water pump dan *fresh water* pump menggunakan sistem redundancy untuk menjaga sirkulasi pendingin selama operasi kapal. Desain konfigurasi yang ditampilkan pada Gambar 3 bukan sekadar gambar skematik biasa, melainkan sebuah model formal yang dijadikan sebagai *input* utama dalam menjalankan simulasi berbasis *Reliability Block Diagram*.



Gambar 3. RBD Sistem Pendingin



Gambar 4. Perbandingan Keandalan dan Ketersediaan terhadap Waktu

Berdasarkan hasil analisis FMEA, FTA, RBD, dan simulasi *Monte Carlo*, *cooler* merupakan komponen yang memerlukan prioritas utama dalam program perawatan karena memiliki nilai RPN tertinggi. Tindakan perawatan yang direkomendasikan meliputi pembersihan kerak (*cleaning*), inspeksi *fouling*, dan pemeriksaan kondisi pipa pendingin secara berkala untuk menjaga efisiensi perpindahan panas. Selain itu, pompa air laut dan pompa air tawar perlu diinspeksi secara rutin, terutama pada bagian *impeller*, *bearing*, dan sistem penggerak, guna memastikan kelancaran sirkulasi fluida pendingin. Komponen *strainer* dan *sea chest* juga perlu dibersihkan secara berkala untuk mencegah penyumbatan akibat lumpur, pasir, maupun organisme laut. Penerapan *preventive maintenance* secara terjadwal diharapkan mampu mengurangi risiko kegagalan sistem, meningkatkan ketersediaan, serta mempertahankan kinerja *main engine* selama operasi kapal.

Tabel 5. Hasil Simulasi

Ringkasan Simulasi		Nilai	
Jumlah Simulasi		1000	
Waktu Akhir		5000 jam	
MTTF		2877,64 jam	
MTBF		431,42 jam	
MTTR		3,03 jam	
Ketersediaan Kondisi Tunak		0,980	
Waktu (Jam)	Keandalan	Ketersediaan	Total Waktu Henti (Jam)
0	1,0000	1,0000	0,0000
500	1,0000	1,0000	0,0000
1000	1,0000	1,0000	0,0000

1500	1,0000	1,0000	0,0000
2000	0,99999	1,0000	0,0000
2500	0,98208	1,0000	0,0000
3000	0,81054	0,9910	0,4113
3500	0,45123	0,9870	2,2735
4000	0,15789	0,9890	5,2452
4500	0,00001	0,9960	7,8188
5000	0,00000	0,9900	8,2055

3.4 Rekomendasi Perawatan

Berdasarkan hasil analisis FMEA, FTA, RBD, dan simulasi Monte Carlo, cooler merupakan komponen yang memerlukan prioritas utama dalam program perawatan karena memiliki nilai RPN tertinggi. Tindakan perawatan yang direkomendasikan meliputi pembersihan kerak (cleaning), inspeksi fouling, dan pemeriksaan kondisi pipa pendingin secara berkala untuk menjaga efisiensi perpindahan panas. Selain itu, pompa air laut dan pompa air tawar perlu dilakukan inspeksi rutin terhadap impeller, bearing, dan sistem penggerak guna memastikan kelancaran sirkulasi fluida pendingin. Komponen strainer dan sea chest juga perlu dibersihkan secara berkala untuk mencegah penyumbatan akibat lumpur, pasir, maupun organisme laut. Penerapan preventive maintenance secara terjadwal diharapkan mampu mengurangi risiko kegagalan sistem, meningkatkan availability, serta mempertahankan performa main engine selama operasi kapal.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa *cooler* merupakan komponen dengan prioritas tertinggi dalam penanganan risiko berdasarkan analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), dengan nilai RPN tertinggi sebesar 144 yang disebabkan oleh tingkat *severity* (6), *occurrence* (6), dan *detection* (4). Hasil analisis *Fault Tree Analysis* (FTA) mengidentifikasi tujuh *minimum cut set* dari sepuluh *basic event* (E1–E10) yang dapat menyebabkan *top event* (*loss of cooling system*). Komponen *cooler*, *sea chest*, *sea water valve*, dan *fresh water valve* tergolong dalam *minimum cut set* orde satu, yang berarti kegagalan tunggal pada salah satu komponen tersebut sudah cukup untuk menyebabkan hilangnya fungsi pendinginan karena tidak memiliki redundansi. Sementara itu, *sea water pump*, *strainer*, dan *fresh water pump* tergolong dalam orde dua yang memerlukan kombinasi dua kegagalan secara bersamaan karena sistem memiliki redundansi ganda (*standby redundancy*). Hasil simulasi RBD dan *Monte Carlo* selama 5.000 jam operasi kontinu menunjukkan nilai rata-rata ketersediaan sistem sebesar 0,980 atau sekitar 98%, dengan nilai MTTF sebesar 2.877,64 jam, MTBF sebesar 431,42 jam, dan MTTR sebesar 3,03 jam. Nilai keandalan sistem menurun signifikan setelah 2.000 jam dan mencapai nol pada sekitar 4.600 jam, sementara ketersediaan tetap stabil pada kisaran 98–100%. Kondisi ini mengindikasikan kemampuan pemulihan sistem yang baik setelah dilakukan tindakan perbaikan. Rekomendasi perawatan prioritas meliputi pembersihan kerak dan inspeksi *fouling* pada *cooler*, pemeriksaan rutin *impeller* dan *bearing* pada pompa air laut serta pompa air tawar, dan pembersihan berkala pada *strainer* serta *sea chest*. Penerapan *preventive maintenance* secara terjadwal sebelum sistem mencapai waktu operasi rata-rata diharapkan dapat meningkatkan keandalan dan ketersediaan sistem serta meminimalkan risiko kegagalan operasional kapal.

5 Referensi

- [1] B. W. I. M. Y. E. P. dkk Ziliwu, "Pengoperasian Dan Perawatan Sistem Pendingin Pada Mesin Induk Operation and Maintenance of Cooling System on Main Engine Km. Sido Mulyo Santoso Di PPN Siboga," *Aurelia J.*, vol. 2, no. Apri, pp. 93–100, 2021.
- [2] A. A. Pratama, N. Astriawati, P. S. Waluyo, and R. Wahyudiyana, "Optimalisasi Perawatan Sistem Pendingin Mesin Utama Di Kapal MV. Nusantara Pelangi 101," *Maj. Ilm. Bahari Jogja*, vol. 20, no. 1, pp. 1–11, 2022, doi: 10.33489/mibj.v20i1.289.
- [3] Suryo, Bunyamin, Lutfiananda, and Delfian, "Jurnal Flywheel Rencana Preventive Maintenance CWSM (

- Cathodewashing Striping,” vol. 15, no. 2, p. 39, 2024.
- [4] F. V. No, P. T. Sims, and J. Kaltim, “Jurnal Flywheel Analisa Kegagalan Suspensi Cylinder pada Unit CAT 777D dan Dampak,” vol. 17, no. 1, pp. 10–16, 2026.
- [5] C. E. Ebeling, “An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering (3rd ed.),” <https://www.waveland.com/browse.php?T=392>. 2019.
- [6] R. I. Rosihan and H. A. Yuniarto, “Analisis Sistem Reliability dengan Pendekatan Reliability Block Diagram,” *J. Teknosains*, vol. 9, no. 1, p. 57, 2019, doi: 10.22146/teknosains.36758.
- [7] A. I. Pratiwi, B. Sihombing, M. Sayuti, N. Pradana, and D. Adetia, “DMB Machine Reliability Analysis Through Failure Mode Effect Analysis and Reliability Block,” *Opsi*, vol. 14, no. 1, p. 81, 2021, doi: 10.31315/opsi.v14i1.4745.
- [8] C. F. Prasetyo, H. Yudo, A. F. Zakki, and A. H. Muhammad, “Analisa Perawatan Berbasis Keandalan Sistem Bahan Bakar pada Main Engine di Kapal KM. Kelimutu,” *J. Penelit. Enj.*, vol. 25, no. 2, pp. 132–140, 2022, doi: 10.25042/jpe.112021.08.
- [9] E. Nugraha and R. M. Sari, “Analisis Defect dengan Metode Fault Tree Analysis dan Failure Mode Effect Analysis,” *Organum J. Saintifik Manaj. dan Akunt.*, vol. 2, no. 2, pp. 62–72, 2019, doi: 10.35138/organum.v2i2.58.
- [10] A. E. Dara, R. D. E. Witjonarko, and E. Haryono, “Strategi Pemeliharaan Berdasarkan Failure Mode Effect and Critically Analysis (FMECA) dan Reliability Centered Maintenance (RCM) Pada Cooling System Mesin Diesel Daihatsu DK28E MV . Meratus Kapuas,” no. 2655, pp. 4–8.
- [11] N. Budi Puspitasari, G. Padma Arianie, and P. Adi Wicaksono, “ANALISIS IDENTIFIKASI MASALAH DENGAN MENGGUNAKAN METODE FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) DAN RISK PRIORITY NUMBER (RPN) PADA SUB ASSEMBLY LINE (Studi Kasus : PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia),” *J@ti Undip J. Tek. Ind.*, vol. 12, no. 2, p. 77, 2017, doi: 10.14710/jati.12.2.77-84.
- [12] K. Gabe Katon Bancin, Hartono Yudo, “Jurnal teknik perkapalan,” vol. 13, no. 1, pp. 1–13, 2025.
- [13] E. S. H, B. Untung, P. Studi, T. Perkapalan, F. Teknik, and U. Diponegoro, “MOTOR INDUK PADA KM . LEUSER mode kegagalan dari tiap-tiap komponen sistem dapat dipresentasikan kedalam sebuah Failure Mode Classification Matrix .,” vol. 5, no. 3, pp. 123–135, 2008.
- [14] G. P. Setiawan *et al.*, “ANALISIS KEANDALAN INTEGRATED ELECTRIC PNEUMATIC PUMP PADA BUS LISTRIK MENENGAH MENGGUNAKAN RELIABILITY BLOCK DIAGRAM DAN,” vol. 13, no. 3, pp. 65–70, 2025.
- [15] R. Islam and S. Martin, “A Reliability Assessment of a Vessel’s Main Propulsion Engine,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 7, pp. 1–19, 2025, doi: 10.3390/jmse13071278.