



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Penerapan FMEA dan FTA pada *Main Engine* Kapal Ikan untuk Identifikasi Komponen Kritis dan Prioritas Perawatan

Hafidz Maulana Andro Kusumo¹⁾, Untung Budiarto¹⁾, Eko Sasmito Hadi¹⁾,

¹⁾Laboratorium Teknologi Sistem dan Permesinan Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*}e-mail : hafidzmaulanaandro@students.undip.ac.id

Abstrak

Keandalan main engine kapal ikan menjadi faktor penting dalam menunjang kelancaran operasi penangkapan ikan, keselamatan awak kapal, dan efisiensi perawatan. Praktik perawatan kapal ikan di Kabupaten Brebes masih banyak dilakukan secara konvensional berdasarkan pengalaman, sehingga diperlukan analisis risiko yang sistematis untuk mengidentifikasi komponen kritis. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi mode kegagalan, menentukan komponen kritis, menelusuri akar penyebab kegagalan, serta menyusun prioritas perawatan main engine kapal ikan pada tiga kelompok Gross Tonnage (GT). Metode yang digunakan adalah Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) untuk menghitung nilai Severity, Occurrence, Detection, dan Risk Priority Number (RPN), serta Fault Tree Analysis (FTA) untuk menganalisis hubungan sebab-akibat kegagalan. Objek penelitian terdiri atas sembilan kapal ikan di Kabupaten Brebes yang dikelompokkan menjadi GT 30–40, GT 60–70, dan GT 90–100. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komponen kritis berbeda pada setiap kelompok GT, yaitu heat exchanger pada GT 30–40 dengan RPN 240, fuel filter pada GT 60–70 dengan RPN 336, dan injector pada GT 90–100 dengan RPN 252. Integrasi FMEA dan FTA dapat digunakan untuk menentukan komponen kritis dan menyusun prioritas perawatan berbasis risiko pada main engine kapal ikan.

Kata Kunci : FMEA; FTA; Main Engine; Kapal Ikan; Analisis Risiko; Komponen Kritis; Prioritas Perawatan

1. PENDAHULUAN

Kapal ikan merupakan sarana utama dalam kegiatan penangkapan ikan sehingga keandalan operasionalnya sangat dipengaruhi oleh kinerja *main engine* sebagai sistem penggerak utama. Mesin diesel pada kapal ikan umumnya bekerja dalam durasi yang panjang dan pada kondisi operasi yang cukup berat, sehingga komponen-komponennya rentan mengalami keausan, penurunan kinerja, hingga kegagalan. Kegagalan *main engine* dapat menghambat proses penangkapan ikan, meningkatkan biaya perbaikan, mengurangi produktivitas, serta membahayakan keselamatan awak kapal [1].

Keandalan *main engine* tidak hanya ditentukan oleh kondisi komponen, tetapi juga oleh efektivitas sistem perawatan. Pada kapal ikan skala kecil dan menengah, kegiatan perawatan masih banyak dilakukan berdasarkan pengalaman operator atau awak kapal sehingga kerusakan

sering ditangani setelah terjadi kegagalan. Kondisi tersebut menyebabkan tindakan perawatan cenderung bersifat korektif dan belum mampu mengidentifikasi komponen yang memiliki risiko kegagalan tertinggi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang sistematis untuk menentukan prioritas perawatan berdasarkan tingkat risiko kegagalan komponen [2].

Main engine terdiri atas beberapa subsistem utama, yaitu *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system*. Kegagalan pada salah satu subsistem dapat menurunkan performa mesin, menyebabkan gangguan pembakaran, *overheating*, kesulitan saat proses penyalaan, bahkan menghentikan operasi kapal. Subsistem seperti *fuel system*, *lubrication system*, dan *cooling system* memberikan kontribusi besar terhadap tingkat keandalan *main propulsion engine*, sehingga identifikasi komponen kritis perlu

dilakukan secara menyeluruh pada seluruh subsistem pendukung [3].

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengevaluasi risiko kegagalan adalah *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi failure mode, penyebab kegagalan, dampak kegagalan, serta menentukan tingkat prioritas risiko melalui nilai *Risk Priority Number* (RPN) yang diperoleh dari perkalian parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) [1]. Semakin tinggi nilai RPN, semakin tinggi pula prioritas komponen untuk mendapatkan tindakan perawatan.

Meskipun demikian, FMEA memiliki keterbatasan karena hanya menunjukkan tingkat prioritas risiko tanpa menjelaskan hubungan sebab-akibat antar penyebab kegagalan. Untuk melengkapi analisis tersebut digunakan *Fault Tree Analysis* (FTA) yang mampu menggambarkan hubungan logis antara *top event*, *intermediate event*, dan *basic event*, sehingga akar penyebab kegagalan dapat diidentifikasi secara lebih sistematis [3]. Pengembangan metode FTA, termasuk *Fuzzy Fault Tree Analysis*, juga telah banyak diterapkan pada sistem permesinan kapal untuk mengatasi keterbatasan data kegagalan dan meningkatkan akurasi analisis risiko [4], [5].

Beberapa penelitian telah mengombinasikan metode analisis kegagalan untuk mendukung pengambilan keputusan perawatan. Daya dan Lazakis [6] mengembangkan kerangka analisis keandalan berbasis DFTA, FMECA, dan *Bayesian Belief Network* guna menentukan strategi perawatan sistem kelautan. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa pengembangan FMEA berbasis pembobotan mampu meningkatkan objektivitas penentuan prioritas risiko dibandingkan metode FMEA konvensional [7], [8]. Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi beberapa metode memberikan analisis yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu metode saja.

Berdasarkan penelitian terdahulu, FMEA terbukti efektif dalam menentukan prioritas risiko kegagalan, sedangkan FTA mampu mengidentifikasi akar penyebab kegagalan secara sistematis. Namun, penelitian yang mengintegrasikan kedua metode tersebut pada main engine kapal ikan dengan membandingkan karakteristik risiko berdasarkan variasi *Gross Tonnage* (GT) masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada kapal niaga, subsistem tertentu, atau hanya menganalisis sistem bahan bakar tanpa membandingkan karakteristik risiko antar ukuran kapal. Kondisi tersebut menunjukkan masih adanya peluang untuk

mengembangkan analisis yang lebih spesifik pada kapal ikan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menerapkan integrasi *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk mengidentifikasi komponen kritis main engine pada kapal ikan di Kabupaten Brebes yang dikelompokkan menjadi GT 30–40, GT 60–70, dan GT 90–100. Analisis dilakukan pada *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system*. Tujuan penelitian ini adalah: (1) mengidentifikasi mode kegagalan dan tingkat risiko komponen *main engine* kapal ikan menggunakan metode FMEA; (2) menentukan komponen kritis serta membandingkan karakteristik risiko kegagalan pada tiga kelompok GT; dan (3) menganalisis hubungan sebab-akibat kegagalan menggunakan FTA sebagai dasar penyusunan prioritas perawatan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam penerapan strategi perawatan berbasis risiko sehingga keandalan main engine dan kontinuitas operasi kapal ikan dapat ditingkatkan.

2. METODE

2.1 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek penelitian adalah *main engine* pada kapal ikan yang beroperasi di Kabupaten Brebes. Sistem yang dianalisis meliputi *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system* karena merupakan subsistem yang berpengaruh terhadap keandalan operasi mesin. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa keandalan sistem propulsi dipengaruhi oleh kondisi setiap subsistem, termasuk *starting system*, sehingga analisis risiko perlu dilakukan secara menyeluruh [9], [10].

Penelitian dilakukan pada sembilan kapal ikan yang dikelompokkan berdasarkan *Gross Tonnage* (GT), yaitu GT 30–40, GT 60–70, dan GT 90–100. Masing-masing kelompok terdiri atas tiga kapal. Pengelompokan tersebut bertujuan membandingkan karakteristik risiko kegagalan *main engine* berdasarkan ukuran kapal. Komponen yang dianalisis meliputi *injector*, *fuel pump*, *fuel filter*, *oil pump*, *oil filter*, *water pump*, *heat exchanger*, *starter motor*, dan *battery*.



Gambar 1. Lokasi Penelitian Kab. Brebes

Rincian objek penelitian berdasarkan kelompok *GT* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Objek Penelitian Berdasarkan Variasi *GT*

No	Kelompok <i>GT</i>	Jumlah Kapal	Variasi <i>GT</i>
1	GT 30–40	3 kapal	38 <i>GT</i> , 34 <i>GT</i> , 32 <i>GT</i>
2	GT 60–70	3 kapal	65 <i>GT</i> , 67 <i>GT</i> , 61 <i>GT</i>
3	GT 90–100	3 kapal	99 <i>GT</i> , 92 <i>GT</i> , 95 <i>GT</i>

2.2 Variabel dan Komponen yang Dianalisis

Variabel tetap dalam penelitian ini adalah metode analisis yang digunakan, yaitu *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA), serta komponen *main engine* yang dianalisis. FMEA digunakan untuk mengidentifikasi *failure mode*, penyebab, dampak, dan tingkat risiko berdasarkan parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) [11]. Metode ini telah banyak diterapkan pada berbagai sistem kapal untuk menentukan komponen kritis sebagai dasar penyusunan strategi perawatan berbasis risiko [12].

Variabel pembanding adalah kelompok *Gross Tonnage* (GT) yang terdiri atas GT 30–40, GT 60–70, dan GT 90–100. Komponen penelitian dikelompokkan ke dalam empat sistem utama, yaitu *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Pengelompokan tersebut dilakukan karena setiap subsistem memiliki karakteristik kegagalan dan kebutuhan perawatan yang berbeda [10], [11].

Tabel 2. Sistem dan Komponen yang Dianalisis

No	Sistem	Komponen yang Dianalisis
1	<i>Fuel System</i>	<i>Injector, fuel pump, fuel filter</i>
2	<i>Lubrication System</i>	<i>Oil pump, oil filter</i>
3	<i>Cooling System</i>	<i>Water pump, heat exchanger</i>
4	<i>Starting System</i>	<i>Starter motor, battery/aki</i>

2.3 Teknik Pengumpulan Data

Penelitian menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan dan wawancara terstruktur dengan pemilik kapal, nahkoda, ABK, dan teknisi untuk memperoleh informasi mengenai *failure mode*, *failure effect*, *failure cause*, serta penilaian *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D).

Data sekunder diperoleh dari catatan perawatan kapal, riwayat kerusakan komponen, dokumentasi kondisi mesin, spesifikasi teknis *main engine*, serta literatur yang mendukung penelitian. Seluruh data kemudian dikelompokkan berdasarkan sistem dan kelompok *GT* sebagai dasar analisis FMEA dan penyusunan diagram FTA.

2.4 Analisis FMEA dan FTA

Analisis data dilakukan menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA). FMEA digunakan untuk mengidentifikasi *failure mode*, penyebab, dampak, serta menentukan prioritas risiko berdasarkan parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) [12].

Nilai setiap parameter diberikan menggunakan skala 1–10 berdasarkan hasil observasi dan wawancara. Selanjutnya, Risk Priority Number (RPN) dihitung menggunakan Persamaan (1).

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

dimana RPN adalah *Risk Priority Number*, S adalah *Severity*, O adalah *Occurrence*, dan D adalah *Detection*.

Komponen dengan nilai RPN tertinggi ditetapkan sebagai komponen kritis pada masing-masing kelompok *GT*. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi komponen yang memerlukan prioritas perawatan berdasarkan tingkat risiko keagalannya [10].

Tabel 3. Parameter Penilaian FMEA

No	Parameter	Keterangan	Skala
1	<i>Severity</i>	Tingkat keparahan dampak kegagalan terhadap sistem	1–10
2	<i>Occurrence</i>	Tingkat kemungkinan atau frekuensi terjadinya kegagalan	1–10
3	<i>Detection</i>	Tingkat kemampuan mendeteksi kegagalan sebelum berdampak besar	1–10

Setelah komponen kritis diperoleh, analisis dilanjutkan menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA). Analisis diawali dengan menentukan *top event*, yaitu kegagalan operasional *main engine*, kemudian diuraikan menjadi *intermediate event* berupa kegagalan pada subsistem. Selanjutnya, setiap *basic event* disusun berdasarkan hasil FMEA, observasi lapangan, dan wawancara. Hubungan antar kejadian digambarkan menggunakan gerbang logika *AND* dan *OR* untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan [13].

2.5 Penentuan Prioritas Perawatan

Prioritas perawatan ditentukan berdasarkan hasil integrasi FMEA dan FTA. Nilai *Risk Priority Number* (RPN) digunakan untuk menentukan urutan prioritas komponen, sedangkan FTA digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan sehingga tindakan perawatan dapat difokuskan pada komponen yang paling kritis [6], [14].

Komponen dengan nilai RPN tertinggi ditetapkan sebagai prioritas utama perawatan. Selanjutnya, tindakan perawatan disusun berdasarkan akar penyebab kegagalan yang diperoleh dari diagram FTA, meliputi pembersihan komponen, pemeriksaan sistem pendinginan dan pelumasan, penggantian filter, pemeriksaan kualitas bahan bakar, serta penggantian komponen yang mengalami keausan.

Hasil akhir penelitian berupa rekomendasi prioritas perawatan *main engine* pada setiap kelompok GT berdasarkan tingkat risiko kegagalan dan akar penyebab yang teridentifikasi. Pendekatan tersebut sejalan dengan penerapan FMEA pada sistem kapal yang menunjukkan bahwa strategi

perawatan berbasis risiko dapat meningkatkan efektivitas pemeliharaan komponen kritis [15].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Identifikasi *Failure Mode* pada *Main Engine* Kapal Ikan

Engine Kapal Ikan

Identifikasi *failure mode* dilakukan terhadap komponen *main engine* yang termasuk dalam *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system*. Data diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara dengan pemilik kapal, nahkoda, dan ABK, serta peninjauan riwayat kerusakan pada kapal ikan kelompok GT 30–40, GT 60–70, dan GT 90–100.

Secara umum, hasil identifikasi menunjukkan bahwa penyebab kegagalan didominasi oleh kualitas bahan bakar dan pelumas yang kurang baik, kontaminasi kotoran, korosi akibat lingkungan laut, keausan komponen, serta kurang optimalnya kegiatan inspeksi dan perawatan. Rincian *failure mode*, *failure effect*, dan *failure cause* pada setiap komponen disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Identifikasi *Failure Mode*, *Failure Effect*, dan *Failure Cause* pada *Main Engine* Kapal Ikan

Sistem	Komponen	<i>Failure Mode</i>	<i>Failure Effect</i>	<i>Failure Cause</i>
<i>Fuel System</i>	<i>Injector</i>	Tersumbat, bocor, pengabutan tidak sempurna	Tenaga mesin menurun, konsumsi bahan bakar meningkat	Solar kurang bersih, pegas <i>injector</i> melemah, dan penumpukan karbon
<i>Fuel System</i>	<i>Fuel Pump</i>	Tekanan pompa menurun	Suplai bahan bakar tidak stabil	Keausan komponen pompa, kotoran
<i>Fuel System</i>	<i>Fuel Filter</i>	Tersumbat	Aliran bahan bakar terhambat	Endapan dan kontaminasi bahan bakar
<i>Lubrication System</i>	<i>Oil Pump</i>	Tekanan oli rendah	Pelumasan tidak optimal	Keausan pompa, kebocoran
<i>Lubrication System</i>	<i>Oil Filter</i>	Tersumbat	Sirkulasi oli terganggu	Kotoran dan endapan pada oli
<i>Cooling System</i>	<i>Water Pump</i>	Debit air pendingin menurun	Pendinginan tidak optimal	<i>Impeller</i> aus, <i>seal</i> bocor, dan korosi
<i>Cooling System</i>	<i>Heat Exchanger</i>	Tersumbat, berkerak	Temperatur mesin meningkat	Kerak air laut, korosi
<i>Starting System</i>	<i>Starter Motor</i>	Putaran lemah atau tidak berfungsi	Mesin sulit dihidupkan	Keausan <i>brush</i> , gangguan kelistrikan
<i>Starting System</i>	<i>Battery/Aki</i>	Tegangan menurun	Starter tidak bekerja optimal	Umur pakai, kurang pengisian daya

3.2 Hasil Analisis FMEA Berdasarkan

Kelompok GT

Analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dilakukan untuk menentukan tingkat risiko kegagalan setiap komponen *main engine* berdasarkan parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). Nilai ketiga parameter tersebut digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN) sehingga diperoleh komponen yang menjadi prioritas perawatan pada masing-masing kelompok GT.

Tabel 5. Hasil Analisis FMEA GT 30–40

Komponen	S	O	D	RPN
<i>Injector</i>	7	6	4	168
<i>Fuel Pump</i>	8	4	5	160
<i>Fuel Filter</i>	6	8	2	96
<i>Oil Pump</i>	9	3	5	135
<i>Oil Filter</i>	6	6	3	108
<i>Water Pump</i>	8	6	3	144
<i>Heat Exchanger</i>	8	5	6	240
<i>Starter Motor</i>	6	5	4	120
<i>Battery</i>	6	6	2	72

Berdasarkan Tabel 5, komponen dengan nilai RPN tertinggi pada kelompok GT 30–40 adalah *heat exchanger* dengan nilai 240, sehingga menjadi komponen paling kritis pada kelompok ini.

Tabel 6. Hasil Analisis FMEA GT 60–70

Komponen	S	O	D	RPN
<i>Injector</i>	7	6	6	252
<i>Fuel Pump</i>	8	5	5	200
<i>Fuel Filter</i>	6	8	7	336
<i>Oil Pump</i>	9	3	5	135
<i>Oil Filter</i>	6	5	5	150
<i>Water Pump</i>	8	6	5	240
<i>Heat Exchanger</i>	7	5	5	175
<i>Starter Motor</i>	6	5	4	120
<i>Battery</i>	5	6	3	90

Berdasarkan Tabel 6, *fuel filter* memiliki nilai RPN tertinggi sebesar 336, yang menunjukkan bahwa sistem bahan bakar merupakan sumber risiko utama pada kelompok GT 60–70.

Tabel 7. Hasil Analisis FMEA GT 90–100

Komponen	S	O	D	RPN
<i>Injector</i>	7	6	6	252
<i>Fuel Pump</i>	9	4	6	216
<i>Fuel Filter</i>	7	7	5	245
<i>Oil Pump</i>	9	3	7	189
<i>Oil Filter</i>	6	6	6	216
<i>Water Pump</i>	8	6	4	192
<i>Heat Exchanger</i>	8	5	5	200
<i>Starter Motor</i>	7	4	4	112
<i>Battery</i>	6	6	4	144

Berdasarkan Tabel 7, komponen dengan nilai RPN tertinggi adalah *injector* sebesar 252. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem injeksi menjadi komponen paling kritis pada kelompok GT 90–100.

Secara keseluruhan, hasil analisis FMEA menunjukkan bahwa komponen kritis berbeda pada setiap kelompok GT. Pada kelompok GT 30–40, risiko terbesar berasal dari *cooling system*, sedangkan pada kelompok GT 60–70 dan GT 90–100 risiko didominasi oleh *fuel system*.

3.3 Hasil Analisis FTA Berdasarkan Kelompok GT

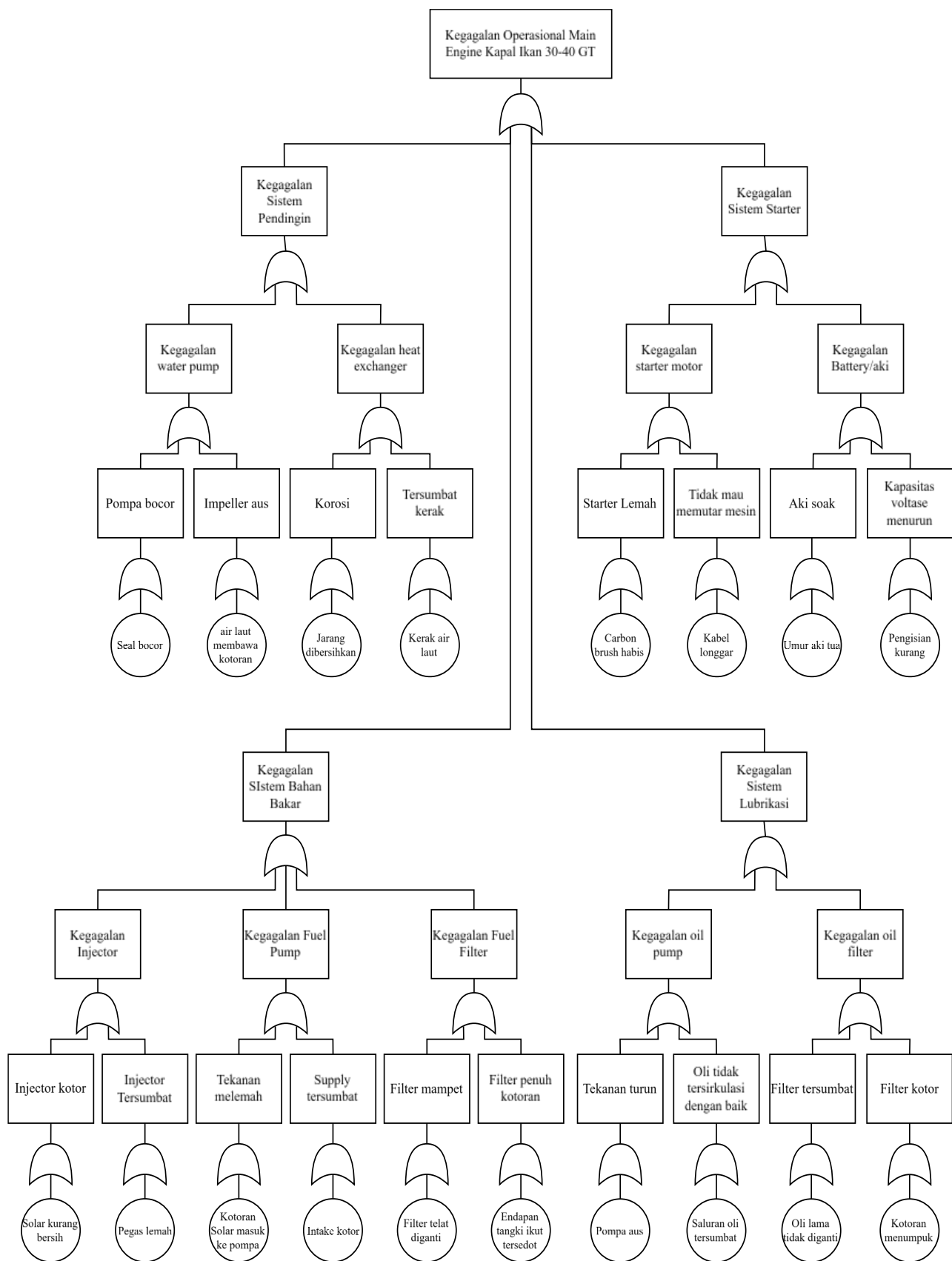
Analisis *Fault Tree Analysis* (FTA) dilakukan untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat kegagalan *main engine* berdasarkan hasil identifikasi *failure mode* dan analisis FMEA. *Top event* pada penelitian ini adalah kegagalan operasional *main engine*, yang diuraikan menjadi empat *intermediate event*, yaitu kegagalan pada *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system*. Selanjutnya, setiap *basic event* disusun berdasarkan hasil observasi lapangan, wawancara, dan riwayat kerusakan komponen.

Secara keseluruhan, hasil FTA menunjukkan bahwa kegagalan *main engine* pada ketiga kelompok GT merupakan kombinasi kegagalan pada *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system*. Setiap subsistem memiliki beberapa jalur kegagalan yang berasal dari kondisi komponen maupun faktor operasional. Akar penyebab yang dominan meliputi kontaminasi bahan bakar, penumpukan kerak air laut, keausan komponen, korosi, serta kurang optimalnya inspeksi dan perawatan berkala. Meskipun pola kegagalan antar kelompok GT relatif serupa, komponen yang menjadi sumber risiko dominan menunjukkan perbedaan, sehingga karakteristik kegagalan pada masing-masing kelompok perlu diperhatikan dalam penentuan prioritas perawatan.

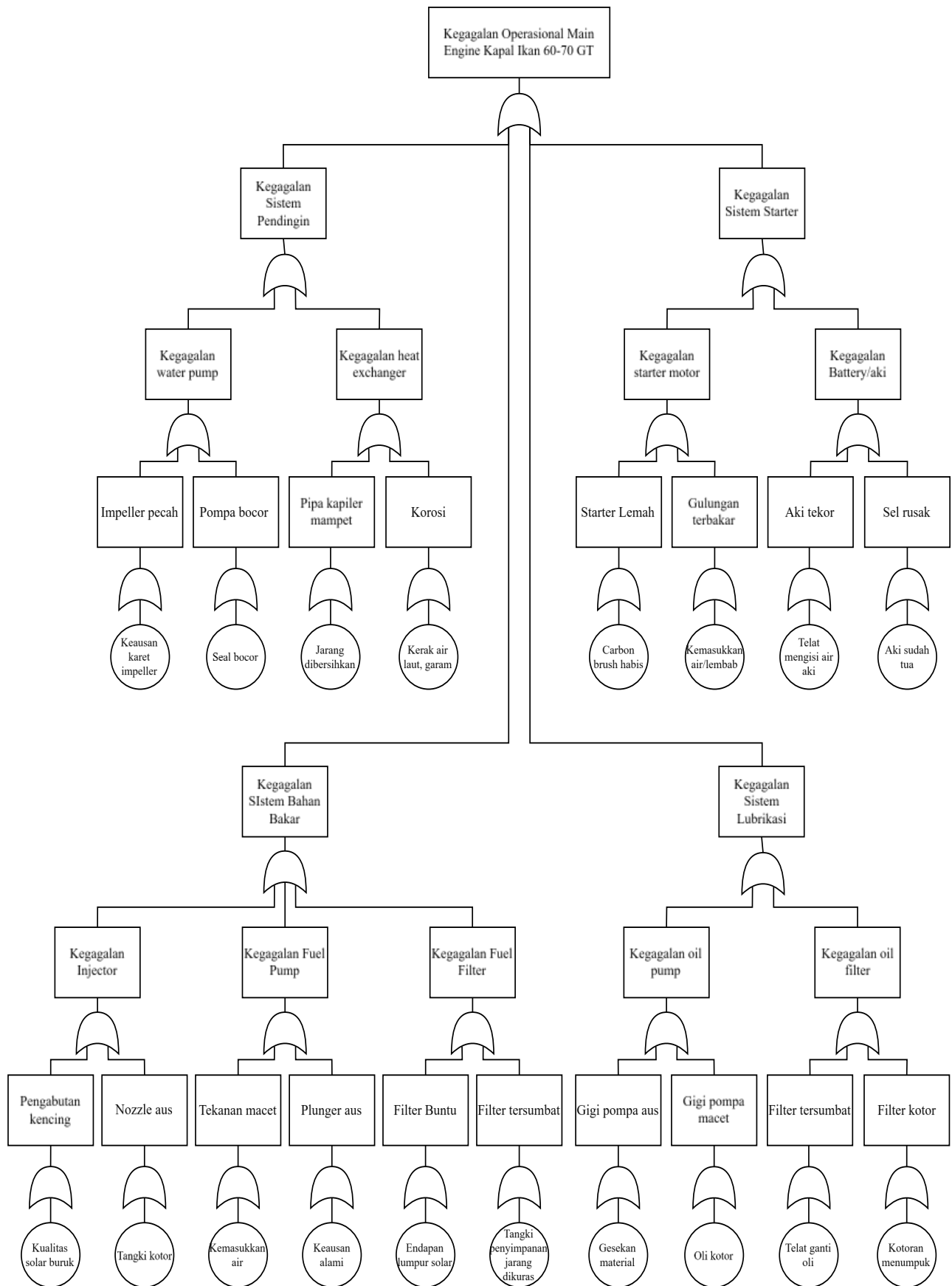
Pada kelompok GT 30–40, kegagalan *main engine* dipengaruhi oleh empat subsistem utama, yaitu *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system*. Berdasarkan hasil FTA, akar penyebab dominan berasal dari *cooling system*, khususnya *heat exchanger* yang mengalami penyumbatan akibat penumpukan kerak air laut dan kurangnya pembersihan berkala. Kondisi tersebut dapat mengurangi efektivitas proses perpindahan panas sehingga temperatur mesin meningkat. Selain itu, kegagalan juga dipengaruhi oleh kontaminasi pada *fuel system*, keausan komponen *lubrication system*, serta penurunan performa *starting system* akibat kondisi *starter motor* dan *battery*. Hubungan antara berbagai penyebab tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada kelompok GT 60–70, kegagalan *main engine* juga dipengaruhi oleh empat subsistem utama. Hasil FTA menunjukkan bahwa penyebab dominan berasal dari *fuel system*, khususnya *fuel filter* yang mengalami penyumbatan akibat endapan lumpur solar dan tangki bahan bakar yang jarang dibersihkan. Faktor lain yang turut berkontribusi meliputi keausan komponen *lubrication system*, korosi pada *cooling system*, serta gangguan kelistrikan pada *starting system*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

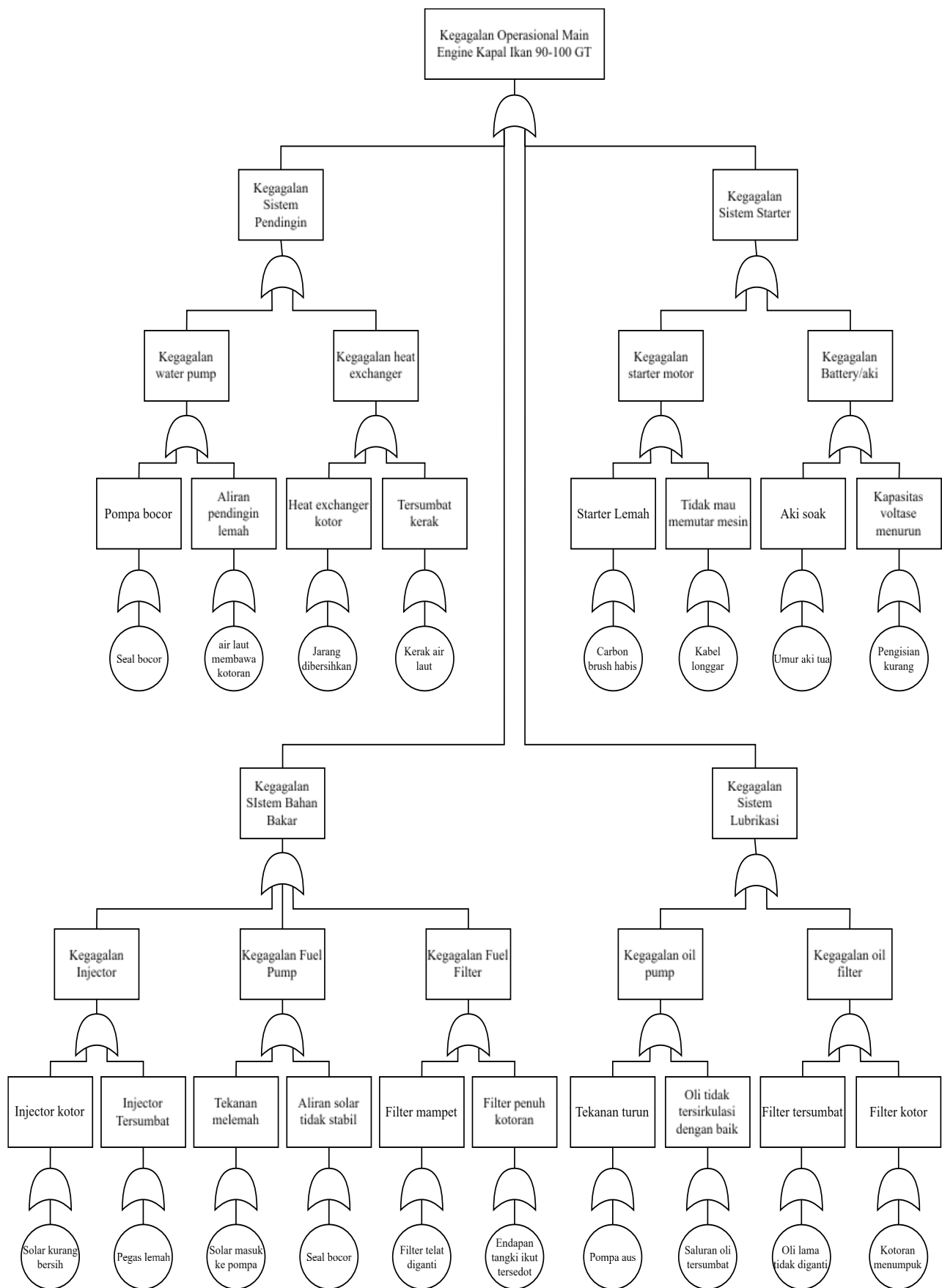
Pada kelompok GT 90–100, kegagalan *main engine* dipengaruhi oleh empat subsistem utama. Akar penyebab dominan terdapat pada *injector*, yang mengalami gangguan akibat kualitas bahan bakar yang kurang baik dan melemahnya pegas *injector* sehingga proses pengabutan tidak berlangsung optimal. Selain itu, kegagalan dipengaruhi oleh kontaminasi pada *fuel system*, penurunan performa *cooling system*, keausan *lubrication system*, serta gangguan pada *starting system*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 2. FTA Main Engine GT 30-40



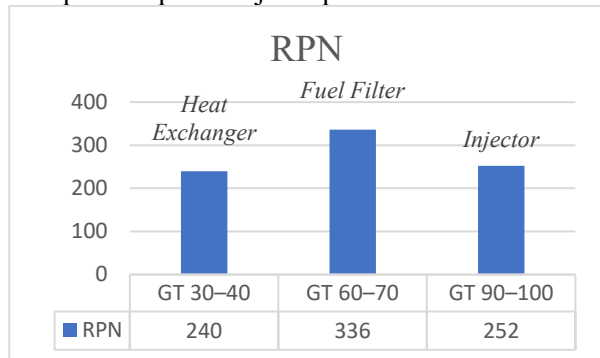
Gambar 3. FTA Main Engine GT 60–70



Gambar 4. FTA Main Engine GT 90-100

3.4 Perbandingan Komponen Kritis Antar Kelompok GT

Hasil analisis FMEA menunjukkan bahwa setiap kelompok GT memiliki komponen kritis yang berbeda berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya variasi karakteristik risiko kegagalan *main engine* pada masing-masing kelompok kapal. Perbandingan nilai RPN tertinggi setiap kelompok disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan Nilai RPN Tertinggi Antar Kelompok GT

Berdasarkan Gambar 5, kelompok GT 60–70 memiliki nilai RPN tertinggi, yaitu 336 pada *fuel filter*, lebih tinggi dibandingkan GT 30–40 dengan *heat exchanger* (240) dan GT 90–100 dengan *injector* (252). Hasil ini menunjukkan bahwa tingkat risiko kegagalan pada kelompok GT 60–70 lebih tinggi dibandingkan dua kelompok lainnya.

Rincian komponen kritis pada masing-masing kelompok GT disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan Komponen Kritis Antar Kelompok GT

Kelompok GT	Komponen Kritis	Sistem	RPN
GT 30–40	Heat Exchanger	Cooling System	240
GT 60–70	Fuel Filter	Fuel System	336
GT 90–100	Injector	Fuel System	252

Berdasarkan Tabel 8, komponen kritis pada GT 30–40 berasal dari *cooling system*, sedangkan pada GT 60–70 dan GT 90–100 berasal dari *fuel system*. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik risiko *main engine* berbeda pada setiap kelompok GT sehingga memerlukan prioritas perawatan yang berbeda.

Hasil analisis FTA menunjukkan bahwa perbedaan komponen kritis tersebut dipengaruhi oleh akar penyebab kegagalan yang berbeda pada setiap kelompok GT. Ringkasan akar penyebab dominan disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbandingan Akar Penyebab Kegagalan Komponen Kritis

GT	Komponen Kritis	Failure Mode Dominan	Akar Penyebab Dominan
GT 30–40	Heat Exchanger	Tersumbat kerak	Kerak air laut dan jarang dibersihkan
GT 60–70	Fuel Filter	Filter buntu/tersumbat	Endapan lumpur solar dan tangki jarang dikuras
GT 90–100	Injector	Pengabutuan tidak sempurna	Solar kurang bersih dan pegas injector melemah

Berdasarkan Tabel 9, penyebab dominan kegagalan pada ketiga kelompok GT sebagian besar berkaitan dengan kontaminasi, penumpukan endapan, korosi, dan kurang optimalnya kegiatan inspeksi maupun perawatan. Namun, bentuk penyebab tersebut berbeda pada setiap kelompok. Pada GT 30–40, risiko didominasi oleh kerak air laut pada *heat exchanger*. Pada GT 60–70, risiko berasal dari endapan lumpur solar yang menyebabkan penyumbatan *fuel filter*. Sementara itu, pada GT 90–100, risiko utama berasal dari kualitas bahan bakar dan penurunan performa *injector*.

Secara keseluruhan, perbandingan hasil FMEA dan FTA menunjukkan bahwa *cooling system* menjadi sumber risiko utama pada kelompok GT yang lebih kecil, sedangkan *fuel system* mendominasi risiko pada kelompok GT yang lebih besar. Temuan ini menunjukkan bahwa strategi perawatan *main engine* perlu disesuaikan dengan karakteristik kegagalan pada masing-masing kelompok GT.

3.5 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Untuk memperkuat pembahasan, hasil penelitian ini dibandingkan dengan beberapa penelitian terdahulu yang menerapkan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Fault Tree Analysis* (FTA), maupun pendekatan keandalan pada sistem permesinan kapal.

1.) Dominansi Risiko Sistem Bahan Bakar (*Fuel System*) Hasil penelitian menunjukkan bahwa komponen kritis pada kelompok GT 60–70 dan GT 90–100 berada pada *fuel system*, yaitu *fuel filter* dan *injector*. Temuan ini sejalan dengan penelitian Surya Hadi dkk. [1] dan Yasin [14], yang menyatakan bahwa sistem bahan bakar merupakan salah satu subsistem dengan tingkat risiko kegagalan tinggi sehingga memerlukan prioritas perawatan.

2.) Sistem Pendingin pada Kapal Ukuran Kecil Pada kelompok GT 30–40, komponen kritis adalah *heat exchanger*, sehingga *cooling system* menjadi sumber risiko utama. Hasil ini mendukung penelitian Islam dan Martin [3] yang menunjukkan bahwa *cooling system* berpengaruh terhadap keandalan *main propulsion engine*. Penelitian ini melengkapi temuan tersebut dengan mengidentifikasi *heat exchanger* sebagai komponen paling kritis pada kapal ikan berukuran kecil.

variasi *Gross Tonnage* (GT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa komponen kritis berbeda

pada setiap kelompok GT, yaitu *heat exchanger* pada GT 30–40, *fuel filter* pada GT 60–70, dan *injector* pada GT 90–100. Temuan ini menunjukkan bahwa strategi perawatan *main engine* perlu disesuaikan dengan karakteristik risiko masing-masing kelompok GT.

3.6 Prioritas Perawatan *Main Engine* Berdasarkan FMEA dan FTA

Ringkasan prioritas perawatan *main engine* berdasarkan hasil integrasi FMEA dan FTA disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Prioritas Perawatan *Main Engine* Berdasarkan Hasil FMEA dan FTA

Kelompok GT	Komponen Kritis	RPN	Akar Penyebab Dominan	Prioritas Perawatan
GT 30–40	<i>Heat Exchanger</i>	240	Kerak air laut dan jarang dibersihkan	Pembersihan <i>heat exchanger</i> , pemeriksaan saluran pendingin, pengendalian kerak
GT 60–70	<i>Fuel Filter</i>	336	Endapan lumpur solar dan tangki jarang dikuras	Pembersihan tangki bahan bakar, penggantian <i>fuel filter</i> , pemeriksaan kualitas bahan bakar
GT 90–100	<i>Injector</i>	252	Solar kurang bersih dan pegas <i>injector</i> melemah	Pembersihan <i>injector</i> , pemeriksaan pegas <i>injector</i> , dan penyaringan bahan bakar

Berdasarkan Tabel 10, prioritas perawatan berbeda pada setiap kelompok GT sesuai komponen kritis dan akar penyebab kegagalannya. Oleh karena itu, strategi *risk-based maintenance* perlu disesuaikan dengan karakteristik risiko masing-masing kelompok GT untuk meningkatkan keandalan *main engine*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai penerapan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) pada *main engine* kapal ikan di Kabupaten Brebes, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

Analisis FMEA berhasil mengidentifikasi mode kegagalan pada *fuel system*, *lubrication system*, *cooling system*, dan *starting system*. Penyebab kegagalan didominasi oleh kontaminasi bahan bakar, penumpukan kerak dan kotoran, korosi, keausan komponen, serta kurang optimalnya inspeksi dan perawatan. Hasil perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) menunjukkan tingkat risiko yang berbeda pada setiap komponen sehingga dapat digunakan sebagai dasar penentuan prioritas perawatan.

Komponen kritis berbeda pada setiap kelompok *Gross Tonnage* (GT). Pada GT 30–40, komponen dengan nilai RPN tertinggi adalah *heat exchanger* (240), sedangkan pada GT 60–70 dan GT 90–100 berturut-turut adalah *fuel filter* (336) dan *injector* (252). Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik risiko kegagalan *main engine* berbeda pada setiap kelompok GT sehingga

strategi perawatan tidak dapat diterapkan secara seragam.

Analisis FTA menunjukkan bahwa kegagalan *main engine* merupakan hasil hubungan sebab-akibat dari beberapa subsistem. Integrasi FMEA dan FTA memungkinkan identifikasi komponen kritis sekaligus akar penyebab kegagalan, sehingga dapat digunakan sebagai dasar penyusunan prioritas perawatan berbasis risiko untuk meningkatkan keandalan operasi *main engine* kapal ikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. S. Surya Hadi, Y. Endri Priharanto, and M. A. Zaki Latif, “Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) applied for Risk Assessment of Fuel Oil System on Diesel Engine of Fishing Vessel,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, no. 21, 2018, [Online]. Available: www.arpnjournals.com
- [2] W. Busse, N. Siswantoro, and M. N. Bintang, “Dynamic Information System for Failure Analysis with It’s Application on Ship Main Engine,” *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol. 8, no. 3, p. 570, 2023.
- [3] R. Islam and S. Martin, “A Reliability Assessment of a Vessel’s Main Propulsion

- Engine,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.3390/jmse13071278.
- [4] B. Ünver, S. Gürgen, B. Sahin, and İ. Altın, “Crankcase explosion for two-stroke marine diesel engine by using fault tree analysis method in fuzzy environment,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 97, pp. 288–299, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.007.
- [5] S. Gürgen, D. Yazır, and O. Konur, “Fuzzy fault tree analysis for loss of ship steering ability,” *Ocean Engineering*, vol. 279, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114419.
- [6] A. A. Daya and I. Lazakis, “Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance,” *Ocean Engineering*, vol. 272, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113766.
- [7] K. Cicek, S. Mahmud Esad Demirci, and D. Sengul, “A hybrid failure analysis model design for marine engineering systems: A case study on alternative propulsion system,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 167, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108929.
- [8] E. Akdamar, G. Elidolu, M. Gögebakan, and B. O. Ceylan, “Entropy-based borda extended weighted expert FMEA approach: Comparison with classical and fuzzy FMEA on a ship system,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 188, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.asoc.2025.114424.
- [9] T. Van Ta, D. Minh Thien, and V. Trong Cang, “Marine Propulsion System Reliability Assesment by Fault Tree Analysis,” *International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Special Issue: Transportation Engineering Technology-Part III*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2017, doi: 10.11648/j.ijmea.s.2017050401.11.
- [10] F. Şarkı, A. Ekmekçioğlu, K. Yiğit, and Ö. Savaş, “Risk ratio assessment of key parameters affecting main engine starting system failures on container ships,” *Ocean Engineering*, vol. 349, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.oceaneng.2026.124213.
- [11] P. Mulyatno, O. Mursid, H. Yudo, and S. Nurhumairoh, “Maintenance Analysis Based on Reliability of Main Engine Lubrication System with Markov Method,” *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol. 7, no. 4, p. 300, 2022.
- [12] B. O. Ceylan and S. Memiş, “Fuzzy parameterized fuzzy soft matrices-based failure mode and effects analysis (FPFS-FMEA) with ship lubricating oil system risk assessment,” *Ocean Engineering*, vol. 342, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.123049.
- [13] I. Lazakis, Y. Raptodimos, and T. Varelas, “Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks,” *Ocean Engineering*, vol. 152, pp. 404–415, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.017.
- [14] T. Yasin, “Reliability-Based Predictable Maintenance of the 2800 GT Container Ship Fuel System,” *International Journal of Marine Engineering and Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2025, doi: 10.30649/ijmea.v2i1.383.
- [15] V. Karanović, B. O. Ceylan, and M. Jcanović, “Reliable ships: A fuzzy FMEA based risk analysis on four-ram type hydraulic steering system,” *Ocean Engineering*, vol. 314, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.119758.