



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Keandalan Sistem Pelumasan Mesin Induk Kapal Menggunakan Metode Rantai Markov Dan FMEA Berbasis Fuzzy

Gabe Katon Bancin S¹⁾, Hartono Yudo¹⁾, Kiryanto¹⁾

¹⁾Laboratorium Sistem Dan Permesinan Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

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

Abstrak

Sistem pelumasan mesin induk kapal berperan krusial dalam mencegah kerusakan akibat gesekan dan keausan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi komponen kritis penyebab kegagalan, meningkatkan keandalan sistem, serta menghitung peluang dan waktu menuju kegagalan sistem pelumasan. Metode yang digunakan meliputi *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) berbasis *Fuzzy*, *Fault Tree Analysis* (FTA), *Reliability Block Diagram* (RBD), dan Rantai Markov, dengan data diperoleh dari laporan operasional, buku manual, dan wawancara dengan kru kapal. Hasil analisis mengidentifikasi *LO Filter Duplex* dan *LO Cooler* sebagai komponen kritis, di mana penyumbatan pada *LO Filter Duplex* memiliki mode kegagalan berisiko tertinggi (FRPN 6,637), sementara kebocoran *LO Cooler* dapat memicu kegagalan sistem berdasarkan analisis FTA. Simulasi selama 5.000 jam menunjukkan bahwa *Mean Time to Failure* (MTTF) awal adalah 711,54 jam, yang meningkat menjadi maksimal 831,62 jam, sementara *Mean Time Between Failures* (MTBF) meningkat dari 975,89 jam menjadi 1.355,65 jam setelah dilakukan modifikasi dengan penambahan redundansi pada *LO Filter Duplex* dan *LO Cooler*. Analisis Rantai Markov menunjukkan bahwa probabilitas *steady state* sistem dalam kondisi normal 0,8268.

Kata Kunci : Sistem Pelumasan, Keandalan, FMEA, Fuzzy, Markov

1. PENDAHULUAN

Sistem penggerak kapal adalah elemen krusial dalam operasional kapal, terutama sistem pelumasan yang berperan untuk menyediakan pasokan minyak pelumas ke berbagai bagian yang bergerak di dalam mesin. Kegagalan dalam sistem pelumasan dapat menyebabkan kerusakan mesin dan bahkan kecelakaan kapal. Kegagalan sistem pelumasan menjadi penyebab paling umum kerusakan *main engine* kapal dan faktor utama penyebab kerusakan *auxiliary engine*[1].

Penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengevaluasi keandalan sistem pelumasan mesin induk kapal, dengan menggunakan metode Markov, *Fault Tree Analysis* (FTA), dan *Reliability Block Diagram* (RBD) dan hasilnya menunjukkan bahwa penambahan komponen *LO strainer* dan *LO Pump* dapat meningkatkan keandalan sistem [2].

Analisis keandalan sistem pelumasan kapal menggunakan metode FMECA, FTA dan *Reliability Block Diagram* (RBD) dibantu

menggunakan perangkat lunak MAde menghasilkan bahwa *strainer* dan *LO Pump* merupakan komponen paling kritis diikuti oleh filter dan *LO Pump Motor*. Keandalan sistem meningkat secara signifikan ketika *LO Pump* dan *strainer* ditambahkan ke sistem dengan beberapa tambahan sensor [3].

Penelitian terdahulu tentang kajian kegagalan pada komponen sistem pelumasan menggunakan metode FMEA menunjukan hasil beberapa komponen seperti *lubricating oil pump*, *lubricating oil filter*, *purifier*, *transfer pump* dan *lubricating purifier heater* memiliki risiko kegagalan tinggi [4]

Penelitian lainnya tentang analisis keandalan sistem pelumasan mesin utama kapal menggunakan pendekatan *bayesian network* menunjukkan bahwa *LO Cooler*, *valve* tiga arah, sistem penyaringan, pengaturan perpipaan, apabila mengalami kegagalan dapat membuat kegagalan pada sistem pelumasan [5].

Analisis rantai markov juga dapat digunakan untuk menganalisa sistem yang kompleks seperti

sistem pelumasan pada kapal dengan menghitung probabilitas transisi keadaan sebuah sistem. Penelitian tentang analisis risiko sistem *bilge - water separator* (BWS) yang menggunakan analisis rantai markov dipadukan dengan metode *Formal Safety Assesment* (FSA) menunjukkan bahwa penambahan unit pengukur kedua pada pemisah air bilge dapat signifikan mengurangi probabilitas pencemaran laut [6].

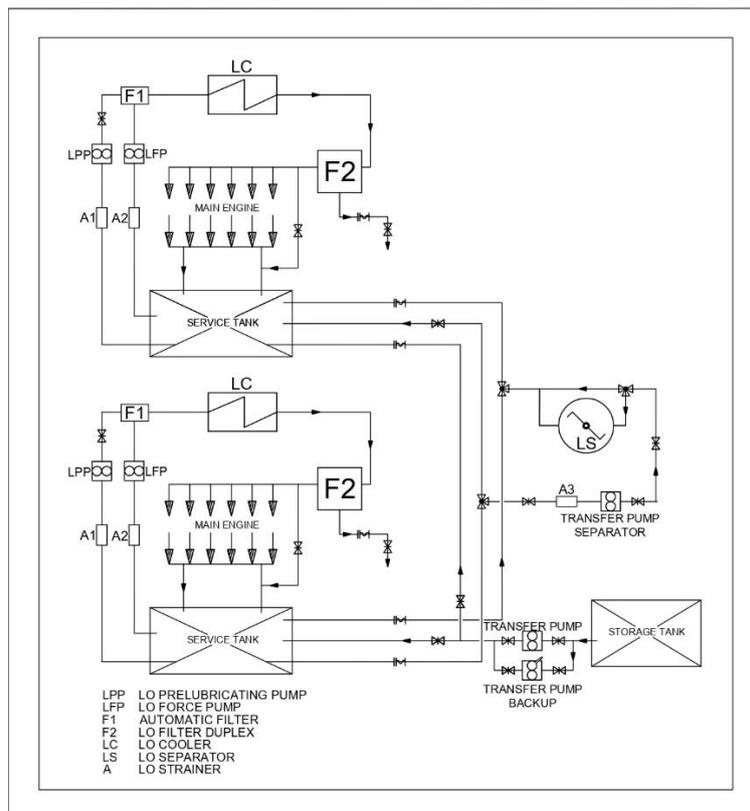
Penelitian sebelumnya tentang analisa risiko pada sistem *Cruise and Cargo Service Chain* juga menggunakan metode rantai markov dan dikombinasikan dengan *Set Pair Analysis* (SPA). Penelitian ini menghasilkan risiko tertinggi dari sistem *Cruise and Cargo Service Chain* yaitu risiko lingkungan sosial khususnya kondisi geopolitik, bencana alam, dan risiko dalam operasi pasar yang dapat menyebabkan kegagalan sistem pelayanan dan menyebabkan kerugian bagi perusahaan [7].

Analisis keandalan sistem sering menggunakan metode FMEA, yang kini banyak dikembangkan dengan sistem logika Fuzzy atau *rule-based Fuzzy* untuk mengatasi kelemahan FMEA konvensional. FMEA menghasilkan nilai RPN berdasarkan Occurrence (O), Severity (S), dan Detection (D) untuk menilai risiko kegagalan. Namun, nilai RPN sensitif terhadap perubahan kecil pada O, S, atau D, meskipun kombinasi berbeda dapat menghasilkan RPN sama tetapi tingkat risiko sebenarnya berbeda. Untuk meningkatkan akurasi, *Fuzzy Inference System* (FIS) digunakan sebagai alternatif untuk mengatasi

kelemahan RPN dan memberikan analisis risiko yang lebih akurat. Penelitian sebelumnya tentang analisis risiko sistem kompresor kapal menggunakan metode FMEA berbasis Fuzzy lima kegagalan dengan nilai Fuzzy RPN tertinggi: ring piston rusak (6.43), keausan piston-liner (6.29), knocking (5.59), operasi terus-menerus (5.56), overheating (5.55), dan karbon pada pelat katup (5.55) [8].

Berdasarkan penelitian tentang analisis risiko pada mesin LHD yang menggunakan metode FMEA berbasis fuzzy berhasil mengidentifikasi 16 potensi risiko dari berbagai sub-sistem, dengan RPN tertinggi 168 (fungsi kemudi tidak berfungsi) untuk sub-sistem listrik (SSE), dan FRPN tertinggi 117 (bantalan silinder rusak) untuk sub-sistem hidrolik [9].

Meskipun banyak penelitian sudah menggunakan metode seperti FMEA dan RBD untuk menganalisis sistem pelumasan, penggabungan metode FMEA berbasis Fuzzy dengan Rantai Markov masih jarang dilakukan, terutama untuk sistem pelumasan kapal besar. Penelitian ini mencoba mengatasi kekurangan tersebut dengan cara yang lebih menyeluruh. FMEA berbasis Fuzzy digunakan untuk menilai risiko dengan lebih akurat, FTA untuk menemukan penyebab utama kerusakan, RBD untuk melihat waktu kegagalan, dan Rantai Markov untuk mempelajari bagaimana kondisi sistem bisa berubah dari waktu ke waktu.



Gambar 1. Gambar Sistem Pelumasan Kapal X

2. METODE

Penelitian ini menganalisis sistem pelumasan mesin induk Kapal X seperti ditampilkan pada gambar 1. Sistem pelumasan mesin merupakan sistem yang menyediakan pasokan oli pelumas ke berbagai bagian yang bergerak di dalam mesin. Fungsi utamanya adalah untuk memungkinkan pembentukan lapisan minyak di antara bagian yang bergerak, yang mengurangi gesekan dan keausan. Pada umumnya sistem pelumasan memiliki [10].

Pada analisis ini data diperoleh dari laporan harian kamar mesin periode 1 Januari 2023 – 31 April 2024, *manual book*, dan diskusi dengan kru kapal yang bertanggung-jawab terkait operasional sistem mesin induk kapal.

2.1 FMEA Berbasis Fuzzy

Proses FMEA merupakan pendekatan bottom-up dalam menganalisis suatu sistem. Proses ini dimulai dengan mengidentifikasi mode kegagalan, potensi penyebab kegagalan, dan efek yang dapat ditimbulkan dari setiap mode kegagalan. Setelah identifikasi, data dievaluasi menggunakan parameter *Occurrence* (O), *Severity* (S), dan *Detection* (D), yang dinilai berdasarkan skala 1–10. Evaluasi terhadap parameter O, S, dan D dilakukan oleh para ahli berpengalaman, yaitu kru kapal yang bertugas dalam operasional sistem pelumasan mesin induk kapal. Hasil penilaian ini digunakan untuk menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN) menggunakan persamaan 1 [11].

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection \quad (1)$$

Selanjutnya, hasil evaluasi tersebut diolah menggunakan metode *Fuzzy Inference System* (FIS). Proses FIS diterapkan menggunakan perangkat lunak MATLAB *Free Trial* dengan memanfaatkan fitur *Fuzzy Logic Designer* untuk menganalisis risiko pada sistem pelumasan mesin induk kapal. Nilai O, S, dan D dari analisis FMEA digunakan sebagai input dalam proses fuzzifikasi, yang dikategorikan ke dalam tiga himpunan fuzzy utama. Skala penilaian standar FMEA diterjemahkan ke dalam variabel linguistik seperti *negligible*, *very low*, *low*, *relatively low*, *moderately low*, *moderate*, *moderately high*, *high*, *very high*, dan *extremely high*. Himpunan fuzzy yang digunakan berbentuk triangular, yang dipilih karena sifatnya yang sederhana namun efektif untuk merepresentasikan ketidakpastian dalam penilaian risiko.

Proses defuzzifikasi dilakukan menggunakan metode *centroid*, yang mengonversi data fuzzy menjadi nilai *Fuzzy Risk Priority*

Number (FRPN) yang lebih terukur. Hasil FRPN ini kemudian dikelompokkan ke dalam 10 tingkatan risiko, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Tingkatan risiko tersebut menjadi dasar dalam pembuatan aturan *if-then*, yang membantu mendefinisikan hubungan antara tingkat risiko dan prioritas tindakan.

Tabel 1. Klasifikasi Variabel Linguistik Fuzzy Risk Priority Number

Nilai	Variabel Linguistik	Rentang
10	<i>Extremely High</i>	$RPN > 500$
9	<i>Very High</i>	$350 < RPN \leq 500$
8	<i>High</i>	$250 < RPN \leq 350$
7	<i>Moderately High</i>	$150 < RPN \leq 250$
6	<i>Moderate</i>	$100 < RPN \leq 150$
5	<i>Moderately Low</i>	$50 < RPN \leq 100$
4	<i>Relatively Low</i>	$20 < RPN \leq 50$
3	<i>Low</i>	$10 < RPN \leq 20$
2	<i>Very Low</i>	$5 < RPN \leq 10$
1	<i>Negligible</i>	$0 < RPN \leq 5$

Sebagai referensi, penelitian sebelumnya mengenai analisis risiko pada *marine boiler* menggunakan FMECA berbasis fuzzy dengan 1000 aturan *if-then* pada FIS menunjukkan bahwa risiko dengan peringkat teratas adalah kebocoran pipa bahan bakar/gas. Aturan *if-then* FIS dari penelitian tersebut digunakan sebagai acuan dalam penyusunan aturan *if-then* pada penelitian ini untuk menilai risiko pada sistem pelumasan mesin induk kapal [12].

2.2 Fault Tree Analysis (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) adalah metode analisis risiko dengan pendekatan top-down untuk mengidentifikasi kombinasi potensi kegagalan yang menyebabkan kegagalan sistem. FTA dimulai dengan menganalisis mode kegagalan tertinggi dan melanjutkan ke tingkat yang lebih rendah, tergantung pada tingkat detail yang diperlukan, data yang tersedia, serta waktu dan sumber daya. FTA menghasilkan diagram *fault tree* yang merepresentasikan hubungan sebab-akibat secara grafis, yang dapat digunakan untuk membuat *cut set* dan minimum *cut set*. *Cut set* adalah kombinasi komponen sistem yang, jika gagal, dapat menyebabkan kegagalan keseluruhan sistem.

2.3 Penentuan Best Fit Distribution

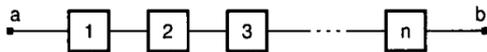
Best fit distribusi dalam analisis keandalan adalah proses menentukan distribusi probabilitas terbaik yang menggambarkan data waktu kegagalan (*failure time*) suatu komponen atau sistem. Tujuan utamanya adalah memilih distribusi yang paling sesuai untuk memodelkan pola

kegagalan berdasarkan data historis, sehingga dapat digunakan untuk menghitung *Mean Time to Failure* (MTTF), reliabilitas ($R(t)$), dan laju kegagalan.

Data *failure time* dihitung untuk interval kerusakan selama Januari 2023–April 2024 dengan asumsi sistem lainnya selain sistem pelumasan dianggap normal dan waktu perawatan dihitung sebagai waktu kegagalan. Penentuan distribusi menggunakan bantuan perangkat lunak Relyence *Free Trial*.

2.4 Pengonstruksian Reliability Block Diagram dan Simulasi

Reliability Block Diagram (RBD) menggambarkan hubungan antar komponen dalam suatu sistem untuk mengevaluasi keandalannya. Sistem pelumasan kapal induk disusun dalam bentuk blok diagram dengan susunan seri atau paralel yang kemudian akan dihitung nilai keandalan sistem secara keseluruhan.



Gambar 1. Struktur Seri Reliability Block Diagram

Struktur seri, seperti pada gambar 1, menggambarkan bahwa semua komponen harus berfungsi agar sistem bekerja, di mana kegagalan satu komponen menyebabkan kegagalan seluruh sistem.

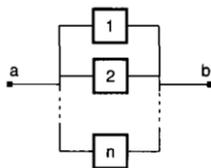
$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2)$$

Di mana :

$R(t)$ = Reliability Sistem

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

Berdasarkan persamaan 2, menunjukkan bahwa probabilitas sistem dalam konfigurasi seri adalah hasil kali dari probabilitas setiap komponen berfungsi



Gambar 2. Struktur Paralel Reliability Block Diagram

Struktur paralel, seperti gambar 2, menunjukkan sistem yang tetap beroperasi meskipun satu komponen gagal.

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

Persamaan 3, menunjukkan bahwa setidaknya satu komponen harus berfungsi untuk memastikan sistem tetap bekerja [13].

Analisis keandalan sistem pelumasan mesin induk menggunakan perangkat lunak Relyence *Free Trial* untuk mensimulasikan keandalan selama 5000 jam. Diagram yang telah dibuat dimodifikasi berdasarkan komponen paling kritis yang diidentifikasi melalui FMEA berbasis Fuzzy dan FTA, dengan tujuan meningkatkan nilai keandalan sistem secara keseluruhan.

2.5 Analisis Rantai Markov

Rantai Markov digunakan untuk menganalisis probabilitas transisi kondisi kegagalan sistem pelumasan, dengan mengidentifikasi semua kondisi operasional dan kegagalan. Analisis melibatkan pembangunan matriks transisi stokastik, yang menggambarkan probabilitas perpindahan antar kondisi berdasarkan data laporan harian kamar mesin pada kapal. Matriks probabilitas awal dihitung menggunakan persamaan 4.

$$P_{ij} = \frac{\text{Frekuensi Transisi dari } S_i \text{ ke } S_j}{\text{Total Transisi dari } S_i} \quad (4)$$

Di mana :

P_{ij} = nilai probabilitas transisi i ke j

Matriks probabilitas transisi kemudian diterasi sampai kondisi *steady state* dengan bantuan perangkat lunak POMQM atau menggunakan persamaan 5.

$$P_n = P_{n-1}P_0 \quad (5)$$

Di mana :

P_n = Matriks iterasi ke-n

P_{n-1} = Matriks transisi pada iterasi sebelum n

P_0 = Matriks transisi awal

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) Berbasis Fuzzy

Durasi kegagalan, interval waktu kegagalan, dan pendeteksian kegagalan dari komponen sistem pelumasan dapat diperoleh melalui analisis FMEA sebagai nilai dari (S), (O), dan (D) di mana pada lembar kerja FMEA juga berisi fungsi dari komponen, potensi keagalannya, penyebab kegagalan, efek kegagalan, dan deteksinya. Dari ketiga aspek tersebut akan diketahui nilai RPN dengan menggunakan persamaan (1).

Tabel 2. Mode Kegagalan Sistem Pelumasan Mesin Induk Kapal X

<i>Failure Mode</i>	<i>Potensi Mode Kegagalan</i>	<i>Komponen</i>	<i>Potensial Efek dari Mode Kegagalan</i>	<i>Potensi Penyebab Mode Kegagalan</i>
FM 1	<i>LO Cooler</i> Bocor	<i>LO Cooler</i> (P & S)	Air dan oli tercampur, oli terbuang ke laut, Temperatur Minyak Pelumas Tinggi	Pelat <i>cooler</i> atau <i>tube</i> bocor, O-ring/ <i>seal</i> rusak/putus
FM 2	Penyumbatan pada filter LO	<i>LO Filter Duplex</i> (P & S)	Penyaluran minyak pelumas terhenti	Penumpukan kotoran pada filter
FM 3	Penyaringan kotoran tidak maksimal	<i>LO Filter Duplex</i> (P & S)	Mesin induk mengalami kemacetan	Penyaringan tidak sempurna sehingga oli terkontaminasi kotoran
FM 4	Pompa tidak memompa oli pelumas	<i>LO Pump Prelubrication</i> (P & S) & <i>LO Force Pump</i> (P & S)	Minyak pelumas tidak tersirkulasi ke seluruh sistem	Impeller pompa mengalami pengikisan, pompa bocor
FM 5	<i>Overflow</i>	<i>LO Separator</i>	Terdapat polutan pada minyak pelumas yang menurunkan kualitas minyak pelumas	Adanya kotoran berlebih pada <i>bowl purifier</i> dan saluran pembuangan
FM 6	Kebocoran Separator	<i>LO Separator</i>	Minyak pelumas kembali ke sistem kondensat	Korosi atau kerusakan <i>seal separator</i>
FM 7	Kebocoran <i>Service Tank</i>	<i>LO Service Tank</i>	Oli Pelumas Terbuang	Korosi pada tangki
FM 8	Kebocoran <i>Sump Tank</i>	<i>LO Sump Tank</i> (P & S)	Oli Pelumas Terbuang	Korosi pada tangki atau retakan pada dinding tangki
FM 9	Penyumbatan Pada Penyaringan	<i>LO Strainer</i>	Penyaluran oli terhambat	Penumpukan Partikel Kotor Pada Saringan
FM 10	Impeler pompa rusak	<i>LO Transfer Pump</i>	Minyak Pelumas Tidak Berpindah Ke <i>Sump Tank</i>	Kerusakan impeller akibat keausan atau benda asing
FM 11	Kebocoran Pipa	Pipa	Minyak Pelumas Terbuang dan Menyebabkan Konsumsi Minyak Pelumas Boros	Korosi pada pipa
FM 12	Penyumbatan Pipa	Pipa	Penyumbatan Pada Saluran Pipa	Penumpukan Kotoran pada saluran pipa

Tabel 3. Hasil Penilaian FMEA

<i>Failure Mode</i>	<i>Occurrence</i>			<i>Severity</i>			<i>Detection</i>			<i>Rata-Rata</i>		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	O	S	D
FM 1	2	3	2	7	8	8	2	3	3	2,33	7,67	2,67
FM 2	8	7	8	7	6	7	2	4	4	7,67	6,67	3,33
FM 3	2	1	2	10	10	9	6	5	6	1,67	9,67	5,67
FM 4	5	3	4	7	9	9	4	5	3	4	8,33	4
FM 5	4	4	3	7	7	6	5	3	5	3,67	6,67	4,33
FM 6	1	2	1	8	9	9	2	1	1	1,33	8,67	1,33
FM 7	3	2	3	2	2	3	3	2	3	2,67	2,33	2,67
FM 8	2	3	3	2	3	2	3	3	2	2,67	2,33	2,67
FM 9	4	4	5	7	6	6	4	4	3	4,33	6,33	3,667
FM 10	3	2	1	5	6	6	2	1	2	2	5,67	1,67

Tabel 4. Hasil Penilaian FMEA (Lanjutan)

Failure Mode	Occurrence			Severity			Detection			Rata-Rata		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	O	S	D
FM 11	2	2	3	4	3	4	7	9	7	2,33	3,67	7,67
FM 12	2	2	3	1	3	1	2	3	5	2,33	1,67	3,33
FM 13	5	7	5	3	2	3	3	2	2	5,67	2,67	2,33

Tabel 5. Ranking FRPN

Failure Mode	RPN	FRPN	Ranking	
			RPN	FRPN
FM 1	47,704	4,363	7	7
FM 2	170,370	6,637	1	1
FM 3	91,296	5,215	5	5
FM 4	133,333	6,000	2	2
FM 5	105,926	5,637	3	3
FM 6	15,407	2,785	12	13
FM 7	16,593	3,000	10	10
FM 8	16,593	3,000	10	10
FM 9	100,630	5,363	4	4
FM 10	18,889	3,215	9	9
FM 11	65,593	4,637	6	6
FM 12	12,963	3,000	13	10
FM 13	35,259	4,000	8	8

Tabel 2. mendeskripsikan mode kegagalan yang mungkin terjadi pada sistem pelumasan Kapal X. Mode kegagalan didapatkan dari hasil diskusi dengan para ahli yang berpengalaman yaitu Masinis 1 (M1), Masinis 2 (M2), dan Masinis 3 (M3). Setiap mode kegagalan dianalisis lebih lanjut penyebab kegagalan, efek dari kegagalan, dan komponen sistem yang terdampak pada kegagalan sistem. jawab dan pengalaman tentang sistem pelumasan mesin induk. Penilaian dilakukan berdasarkan subjektivitas dan pengalaman penilai dengan parameter O, S, dan D.

Berdasarkan mode kegagalan pada tabel 2. dilakukan penilaian lanjutan dengan parameter O,S, dan D, untuk menilai mode kegagalan yang memiliki risiko tertinggi yang akan digunakan untuk tindakan berikutnya guna meningkatkan keandalan sistem. Penilaian dilakukan oleh ABK yang bertugas pada kamar mesin, khususnya yang memiliki tanggung langsung terhadap kelangsungan sistem pelumasan. Pada penelitian

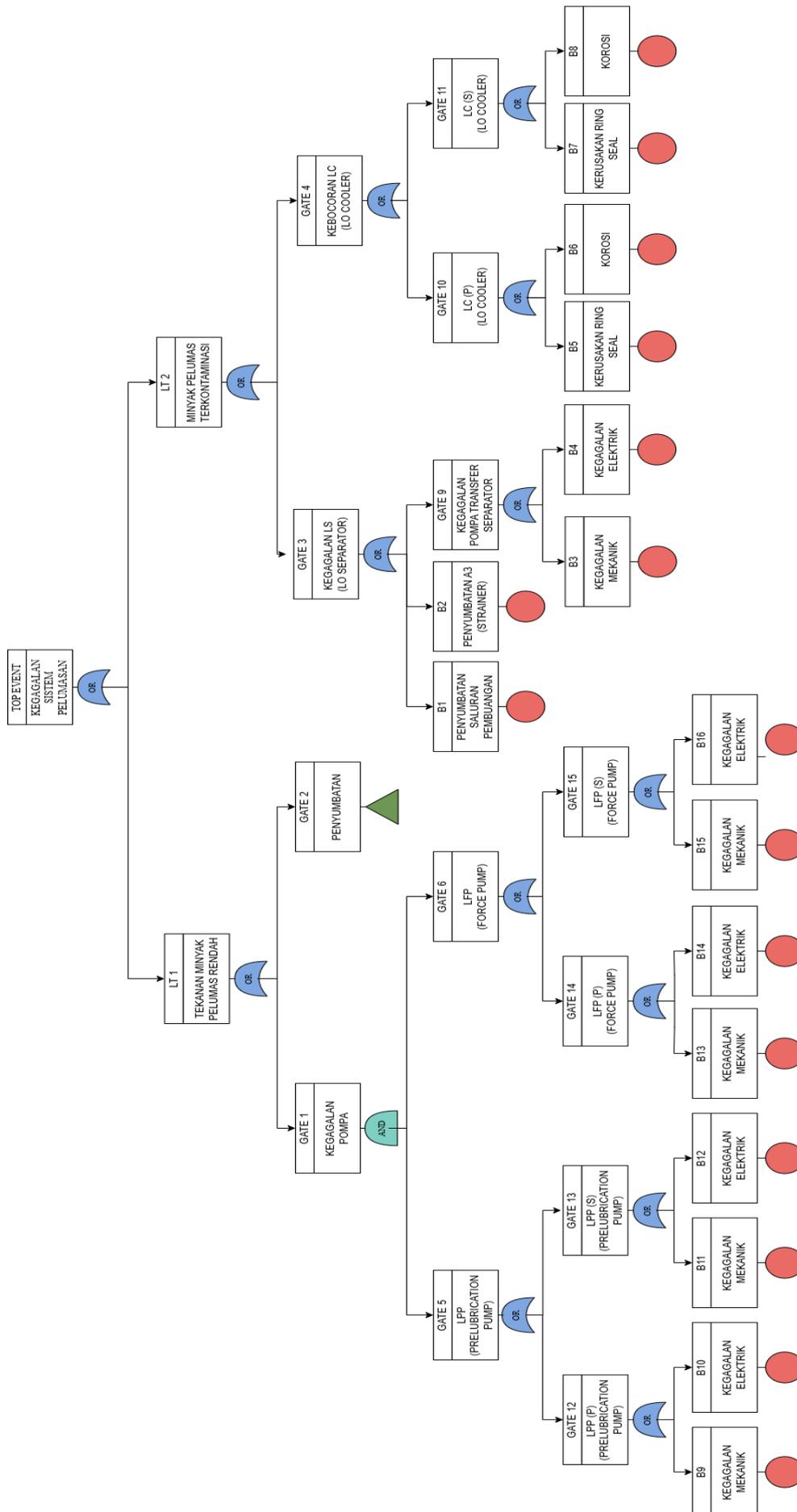
kali ini ABK yang dimaksud adalah Masinis 1(M1), Masinis 2 (M2), dan Masinis 3 (M3) yang dapat dilihat pada tabel 4.

Hasil Penilaian kemudian dirata-ratakan pada setiap indikator baik O, S, maupun D, sehingga didapatkan rata-rata O,S, dan D yang kemudian dengan persamaan 1 mendapatkan nilai RPN. Penilaian RPN digunakan untuk membuat aturan *if-then* fuzzy sehingga hasil penilaian dari Masinis 1,2 dan 3 akan menjadi input pada FIS yang menghasilkan output FRPN. Hasil penilaian RPN dan FRPN tiap penilaian dapat dilihat pada tabel 6.

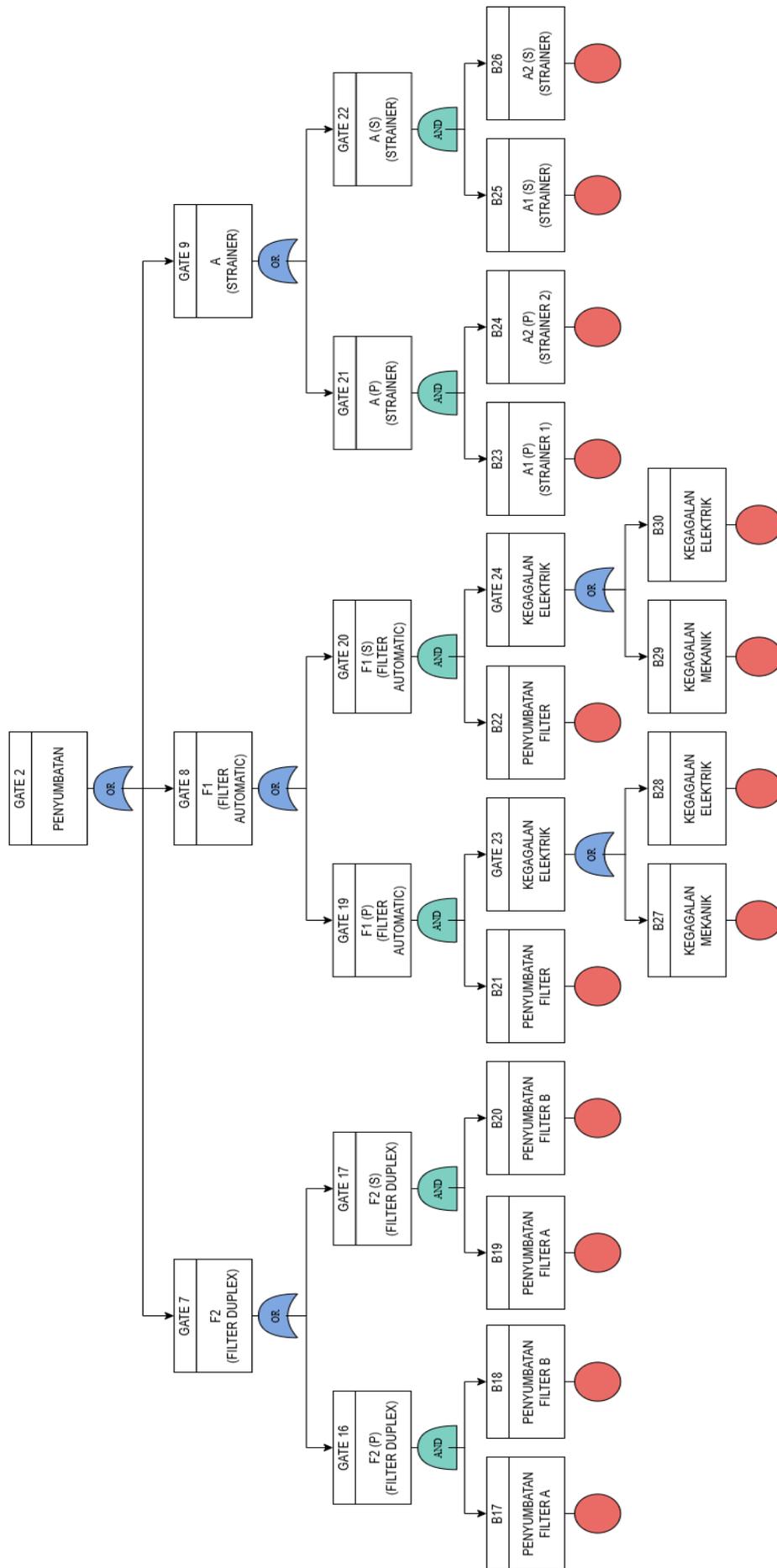
Hasil perangkangan menunjukkan bahwa mode kegagalan kedua (*Failure Mode 2*) memiliki risiko tertinggi dengan nilai FRPN sebesar 6,637 dan menduduki peringkat pertama. Mode kegagalan ini terjadi pada *LO Filter Duplex*, yang jika gagal dapat menyebabkan kerusakan sistem pelumasan secara keseluruhan. Penilaian pada *LO Filter Duplex* tinggi disebabkan dampak kegagalan yang berpotensi menimbulkan bahaya serta frekuensi terjadinya kegagalan cukup tinggi dibandingkan kegagalan lainnya. Komponen ini dianggap kritis dan membutuhkan tindakan tambahan untuk meningkatkan keandalan sistem. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya perawatan preventif pada komponen penyaringan untuk meminimalkan risiko kegagalan sistem..

3.2 Hasil Fault Tree Analysis

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan sebuah metode untuk mengidentifikasi kegagalan dari suatu sistem secara top approach. Hubungan kegagalan antara *top event* (kegagalan sistem) dengan sebab – sebab kegagalan dari dasar (*basic event*) dimodelkan secara grafis dan disimbolkan dengan gerbang logika *AND* dan *OR*. Hasil Analisis FTA pada sistem pelumasan mesin induk kapal X dapat dilihat pada gambar 3 dan gambar 4.



Gambar 3. Diagram FTA Sistem Pelumasan Kapal X



Gambar 4. Diagram *Transfer Gate 2* Sistem Pelumasan Kapal X

Dari diagram FTA pada gambar 3 dan 4 didapatkan kegagalan sistem pelumasan terbagi menjadi tekanan minyak pelumas rendah (LT 1) dan minyak pelumas terkontaminasi (LT 2). Setelah analisis *fault tree* langkah berikutnya adalah menentukan *Minimal Cut Set*. Dengan menganalisis *Minimal Cut Set*, jalur kegagalan yang paling rentan dapat dipahami dengan orde pada *Minimal Cut Set* yang kemudian dapat menetapkan komponen kritis. Tabel *Minimal cut set* kegagalan sistem pelumasan dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. *Minimum Cut Set* Sistem Pelumasan

Kode	<i>Minimum Cut Set</i>	Orde
{B1 atau B2}	Penyumbatan Saluran Pembuangan atau Penyumbatan <i>Strainer</i> 3 Kelistrikan <i>Pompa</i>	1
{B3 atau B4}	<i>Transfer Separator</i> atau Mekanis <i>Pompa Transfer Separator</i>	1
{B5, B6, B7 atau B8}	Kebocoran <i>LO Cooler</i> (P & S) akibat korosi atau Kebocoran <i>LO Cooler</i> (P & S) akibat kerusakan <i>ring seal</i>	1
{B9, B10, B11, B12, B13, B14, B15 atau B16}	Kegagalan Mekanik atau Elektrik <i>Pompa Force</i> (P & S) atau Kegagalan Mekanik atau Elektrik <i>Pompa Prelubrication</i> (P & S)	2
{B17, B18} atau {B19, B20}	Penyumbatan <i>Filter LO Duplex</i> (P) atau Penyumbatan <i>Filter LO Duplex</i> (S)	2
{B21 dan B27 atau B28} atau {B22 dan B29 atau B30}	Penyumbatan <i>Filter Automatic</i> (P) atau Penyumbatan <i>Filter Automatic</i> (S)	2
{B23 dan B24} atau {B25 dan B26}	Penyumbatan <i>Strainer</i> 1 & 2 (P) atau Penyumbatan <i>Strainer</i> 1 & 2 (S)	2

Minimum Cut Set dari diagram *Fault Tree Analysis* pada tabel 6. menunjukkan bahwa setiap kode *basic event* (B1 – B30) merupakan kombinasi terkecil yang dapat menyebabkan kegagalan sistem pelumasan atau *Top Event*. Seluruh *cut set* yang memiliki orde 1 berarti kegagalan tunggal dari salah satu *basic event* tersebut langsung dapat memicu terjadinya kegagalan utama. Sedangkan *cut set* yang memiliki orde 2 berarti membutuhkan 2 kegagalan

basic event untuk memicu terjadinya kegagalan sistem pelumasan.

Basic event dengan orde 1 merupakan kejadian dasar yang langsung berkontribusi pada kegagalan, sementara *basic event* dengan order 2 adalah penyebab lebih lanjut yang mengarah ke *basic event* lainnya. Dari tabel 4.5, terlihat bahwa kebocoran *LO Cooler* (B5, B6, B7 atau B8) merupakan salah satu faktor utama yang dapat menyebabkan kegagalan sistem pelumasan, menjadikannya salah satu komponen paling kritis dalam sistem pelumasan ini.

Pada analisis ini salah satu komponen yang dianggap kritis dalam sistem ini adalah *LO Cooler*, yang terlibat dalam LT 2. Kebocoran pada *LO Cooler* dapat menyebabkan tercampurnya minyak pelumas dengan air sehingga sistem akan mengganggu kinerja sistem pelumasan dan berpotensi merusak komponen lainnya yang berujung pada kegagalan sistem pelumasan secara langsung. Dalam diagram, kebocoran *LO Cooler* terbagi menjadi dua *event* dasar, yaitu kerusakan *ring seal* (B5 & B7) dan korosi *LO Cooler* (B6 & B8). Hal ini menunjukkan bahwa masalah pada *LO Cooler* dapat langsung menyebabkan kegagalan langsung.

3.3 Hasil *Best Fit Distribution*

Data yang didapatkan selama periode sampling yaitu dari tanggal 1 januari 2023 – 31 april 2024 di dalam *log book* harian kamar mesin dianalisis dengan bantuan perangkat lunak *Relyence Free Trial* untuk mendapatkan *best fit distribution* yang akan digunakan dalam proses simulasi pada konstruksi RBD. Hasil distribusi tiap komponen dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. *Best Fit Distribution* Komponen

Komponen	<i>Best Fit Distribution</i>	Parameter
<i>LO Strainer</i>	Weibul 3P	$\eta = 4728,555$ $\gamma = 13,778$ $\beta = 1,055$
<i>LO Filter Duplex</i> (P & S)	Normal	$\mu = 3186,095$ $\sigma = 1928,986$
<i>LO Force Pump</i> (P & S)	Weibul 3P	$\eta = 2359,725$ $\gamma = 315,768$ $\beta = 0,9396$
<i>Prelubricating Pump</i> (P & S)	Weibul 3P	$\eta = 865,019$ $\gamma = 259,680$ $\beta = 0,623$
<i>Oil Mist Detector</i> (P & S)	Gumbel-	$\delta = 1852,205$ $\xi = 5047,960$ $\eta = 64,042$
<i>LO Separator</i>	Weibul 3P	$\gamma = 3579,741$ $\beta = 1,253$

Tabel 8. *Best Fit Distribution* Komponen
(Lanjutan)

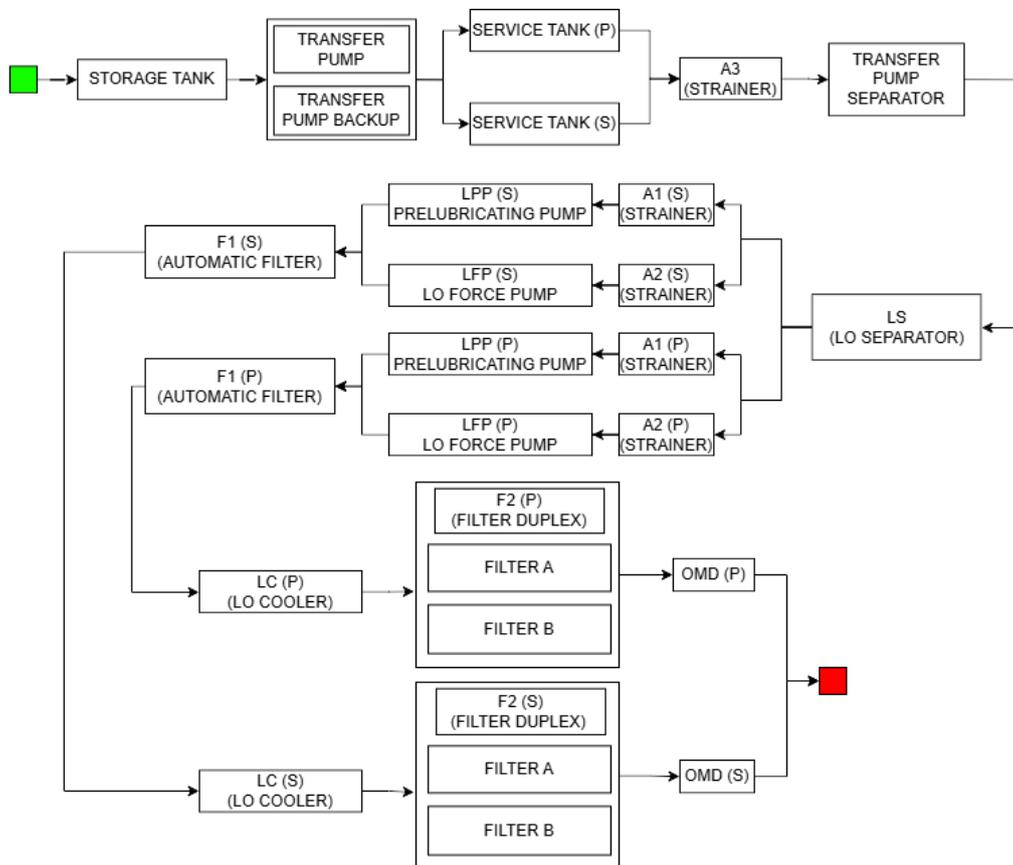
<i>LO Cooler (P & S)</i>	Weibul 3P	$\eta = 2195,452$ $\gamma = 22,317$ $\beta = 1,104$
<i>LO Storage Tank, LO Transfer Pump, LO Sump Tank (P&S), LO Transfer.Pump Separator, Automatic Filter (P&S)</i>	Tidak mengalami kegagalan selama periode sampling	

3.4 Hasil Analisis *Reliability Block Diagram*

Melihat sistematis pada operasional sistem pelumasan mesin induk yang kemudian setiap komponen dirangkai dengan struktur seri, dan

paralel sehingga didapatkan sebuah diagram sistem yang menyeluruh. *Reliability Block Diagram* sistem pelumasan dapat dilihat pada gambar 5.

Diagram pada Gambar 5 menunjukkan rancangan sistem pelumasan dengan penerapan redundansi pada berbagai komponennya untuk meningkatkan keandalan. Sistem dimulai dari *storage tank*, tempat penyimpanan minyak pelumas, yang kemudian dipindahkan menggunakan *LO transfer pump*. Pompa ini terdiri dari rangkaian paralel, yang berfungsi untuk memastikan minyak pelumas dapat dikirim ke *sump tank* dengan optimal. Berdasarkan diagram *Reliability Block Diagram* (RBD) pada gambar 4.3, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak *Relyence Free Trial* untuk menghitung *Mean Time To Failure* (MTTF), *Mean Time To Repair* (MTTR), dan *Mean Time Between Failure* (MTBF) dari sistem pelumasan mesin induk.



Gambar 5. Diagram RBD Sistem Pelumasan

Tabel 9 menunjukkan hasil simulasi sistem pelumasan mesin induk berdasarkan 1000 kali simulasi dengan total waktu operasi 5000 jam. Nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) adalah 711,54 jam, *Mean Time Between Failures* (MTBF) 975,89 jam, dan *Mean Time to Repair* (MTTR) 6,87 jam. *Mean availability* di akhir simulasi mencapai 0,9854, menunjukkan sistem memiliki ketersediaan tinggi. Reliabilitas sistem menurun dari 0,9343 di awal

menjadi 0 setelah 4000 jam, mengindikasikan kegagalan total. Namun, *availability* tetap di atas 0,98, menunjukkan sistem dapat diperbaiki dengan cepat. *Expected number of failure* meningkat hingga 6,4507 pada 5000 jam. Secara keseluruhan, meskipun keandalan menurun seiring waktu, sistem tetap beroperasi dengan perbaikan yang efisien, menjaga ketersediaan tinggi.

Tabel 9. Ringkasan Hasil Simulasi Sistem Pelumasan Mesin Induk Existing

<i>Simulation Summary</i>						
<i>Number of Simulation</i>		1000				
<i>Number of End Time</i>		5000 jam				
Perubahan Pada		<i>LO Filter Duplex</i>				
MTTF		722,19				
MTBF		976,86 jam				
MTTR		6,87 jam				
<i>Mean Availability at end time</i>		0,9854				
<i>Time (jam)</i>	<i>Reliability</i>	<i>Availability</i>	<i>Unreliability</i>	<i>Total Downtime (jam)</i>	<i>Mean Availability</i>	<i>Expected Number of Failure</i>
0	0,9343	0,9293	0,0657	0,0000	0,9293	0,0000
500	0,5406	0,9938	0,4594	3,1009	0,9938	0,4692
1000	0,2550	0,9937	0,7450	6,3397	0,9937	0,9803
1500	0,1127	0,9936	0,8873	9,5520	0,9936	1,4893
2000	0,0474	0,9936	0,9526	12,8363	0,9936	2,0162
2500	0,0190	0,9935	0,9810	16,1446	0,9935	2,5528
3000	0,0071	0,9935	0,9929	19,6153	0,9935	3,1179
3500	0,0025	0,9934	0,9975	23,0045	0,9934	3,6859
4000	0,0000	0,9834	1,0000	66,2348	0,9834	5,2277
4500	0,0000	0,9845	1,0000	69,6372	0,9845	5,8253
5000	0,0000	0,9854	1,0000	73,1729	0,9854	6,4507

Tabel 10. Ringkasan Hasil Simulasi Sistem Pelumasan Mesin Induk Existing

<i>Simulation Summary</i>						
<i>Number of Simulation</i>		1000				
<i>Number of End Time</i>		5000 jam				
Perubahan Pada		<i>LO Cooler</i>				
MTTF		831,62 jam				
MTBF		1355,65 jam				
976,86 jam						
<i>Time</i>	<i>Reliability</i>	<i>Availability</i>	<i>Total Downtime (jam)</i>	<i>Reliability</i>	<i>Availability</i>	<i>Total Downtime (jam)</i>
0	0,9343	0,9395	0,0000	0,9366	0,9386	0,0000
500	0,6169	0,9971	1,5973	0,5443	0,9945	3,1134
1000	0,3256	0,9967	3,1373	0,2592	0,9938	6,3493
1500	0,1571	0,9963	4,7363	0,1168	0,9925	9,6483
2000	0,0709	0,9964	6,3059	0,0509	0,9935	12,9926
2500	0,0299	0,9969	7,8942	0,0214	0,9935	16,3191
3000	0,0118	0,9961	9,5238	0,0087	0,9939	19,6951
3500	0,0043	0,9955	11,2076	0,0033	0,9929	23,1284
4000	0,0000	0,9966	52,8415	0,0000	0,9933	66,3186
4500	0,0000	0,9962	54,5883	0,0000	0,9923	69,8422
5000	0,0000	0,9966	56,3750	0,0000	0,9925	73,4051

Hasil simulasi menunjukkan reliabilitas sistem pelumasan menurun drastis seiring waktu, dengan kegagalan total setelah 4000 jam. Meskipun *availability* tinggi, frekuensi kegagalan masih signifikan. Analisis FMEA berbasis fuzzy dan *Fault Tree Analysis* mengidentifikasi *LO Filter Duplex* serta *LO Cooler* sebagai komponen kritis dengan nilai FRPN tinggi, sementara *LO Cooler* rentan karena memiliki orde 1 dan dapat menyebabkan

kegagalan langsung pada sistem pelumasan. Untuk meningkatkan keandalan, simulasi tambahan dilakukan dengan menambahkan komponen baru pada bagian kritis serta hanya dilakukan pada analisis RBD dengan asumsi komponen tambahan memiliki distribusi yang sama seperti komponen asli. Penambahan komponen terjadi pada pada komponen yang memiliki susunan seri, sehingga berdasarkan persamaan 2 dan 3 perubahan susunan

menjadi paralel dapat meningkatkan keandalan. Perubahan susunan dari seri menjadi paralel Simulasi tambahan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Relyence *Free Trial* selama 5000 jam dengan jumlah simulasi sebanyak 1000 kali. Hasil dari simulasi tambahan dapat dilihat pada tabel 10.

Berdasarkan hasil simulasi yang ditampilkan dalam tabel 10, penambahan komponen pada *LO Cooler* dan *LO Filter Duplex* dan membuatnya menjadi susunan paralel memberikan dampak yang bervariasi terhadap keandalan sistem pelumasan secara keseluruhan. Meskipun nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) dan *Mean Time Between Failures* (MTBF) mengalami peningkatan pada *LO Cooler* setelah penambahan komponen, sistem secara umum tetap menunjukkan ketersediaan (*availability*) yang tinggi, dengan nilai di atas 0,99 pada setiap konfigurasi.

Peningkatan MTBF pada *LO Cooler* setelah penambahan komponen dan membuatnya menjadi paralel menunjukkan bahwa komponen ini lebih tahan terhadap kegagalan dibandingkan *LO Filter Duplex*, dengan nilai MTBF sebesar 1355,65 jam dibandingkan 976,86 jam. Hal ini berarti *LO Cooler* dapat beroperasi lebih lama sebelum mengalami kegagalan.

Hasil ini juga serupa dengan penelitian sebelumnya yang menganalisis keandalan sistem pelumasan, bahwa peningkatan keandalan pada komponen tertentu dapat meningkatkan performa keseluruhan sistem. Namun, reliabilitas sistem tetap mengalami penurunan signifikan dari 0,9343 pada awal simulasi menjadi 0 setelah 4000 jam pada *LO Cooler* dan setelah 3500 jam pada *LO Filter Duplex*, menunjukkan bahwa kegagalan sistem pada akhirnya tidak dapat dihindari. Penambahan komponen kritis hanya memperlama waktu menuju kegagalan pertama dan memperpanjang waktu antar kegagalan dengan kegagalan selanjutnya.

4.5 Hasil Analisa Rantai Markov

Proses Rantai Markov merupakan Analisa probabilitas perpindahan setiap kondisi yang memungkinkan pada sebuah sistem. Sistem pelumasan Kapal X memiliki 4 kondisi yang memungkinkan yaitu kondisi sistem normal (S1), sistem mengalami kegagalan 1 komponen (S2), sistem mengalami kegagalan 2 komponen, sistem (S3) mengalami kegagalan 3 komponen. Kondisi ini didapatkan dari *log book* harian kamar mesin. Hasil rangkuman data pada *log book* untuk melihat total transisi ditunjukkan pada tabel 11.

Tabel 11. Frekuensi Transisi Antar *State*

Dari State	Ke State				Total
	S1	S2	S3	S4	
S1	327	63	10	1	401
S2	62	9	1	0	72
S3	11	0	0	0	11
S4	1	0	0	0	1
Total					485

Untuk menentukan probabilitas kondisi awal, dapat menggunakan persamaan 4, sehingga didapatkan probabilitas transisi awal yang ditunjukkan pada matriks P^1 .

$$P^1 = \begin{bmatrix} 0,8154 & 0,1571 & 0,0249 & 0,0024 \\ 0,8611 & 0,1250 & 0,0138 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Kemudian matriks P dilakukan iterasi dengan persamaan 5. melalui bantuan perangkat lunak POMQM.

Perhitungan matriks transisi n -langkah matriks P dilakukan sampai nilai matriks mencapai *steady state*, yaitu suatu kondisi yang menyatakan nilai transisi probabilitas tidak mengalami perubahan atau sama pada n tertentu. Transisi matriks berhenti pada nilai $n = 6$ karena nilai matriks pada $n = 6$ dan $n = 7$ adalah sama, yang berarti sistem dalam keadaan *steady state*.

$$P^6 = \begin{bmatrix} 0,8268 & 0,1485 & 0,0227 & 0,0021 \\ 0,8268 & 0,1485 & 0,0227 & 0,0021 \\ 0,8268 & 0,1485 & 0,0227 & 0,0021 \\ 0,8268 & 0,1485 & 0,0227 & 0,0021 \end{bmatrix}$$

Distribusi *steady state* (distribusi jangka panjang) untuk sistem pelumasan pada kondisi sistem normal (S1) sebesar 0,8268, kondisi kegagalan 1 komponen (S2) sebesar 0,1485 kondisi kegagalan 2 komponen (S3) sebesar 0,0227 kondisi kegagalan 3 komponen (S4) sebesar 0,0021. Artinya, setelah hari ke 6 dalam jangka panjang, sistem akan berada dalam status normal dengan peluang sebesar 0,8268 dan probabilitas untuk kondisi kegagalan lainnya berkurang secara proporsional.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang sudah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa terdapat beberapa komponen utama dalam sistem pelumasan kapal yang memiliki risiko kegagalan tinggi dan berpotensi menyebabkan gangguan terhadap sistem. Berdasarkan metode FMEA berbasis Fuzzy dan FTA, *LO Filter Duplex*

diidentifikasi sebagai komponen dengan risiko kegagalan tertinggi. Penyumbatan pada komponen ini dapat menghambat aliran minyak pelumas dan berpotensi menyebabkan kegagalan fungsi mesin utama. Selain itu, komponen lain yang turut berkontribusi terhadap risiko kegagalan adalah *LO Cooler*, di mana kebocoran pada komponen ini dapat mengurangi efisiensi pendinginan dan dapat mengakibatkan kegagalan pada sistem..

Evaluasi menggunakan RBD dengan modifikasi susunan sistem pelumasan dengan penambahan redundansi pada komponen kritis seperti *LO Filter Duplex* dan *LO Cooler* meningkatkan keandalan sistem secara signifikan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *Mean Time to Failure* (MTTF) meningkat dari 711,54 jam menjadi 722,19 hingga 831,62 jam, sementara *Mean Time Between Failure* (MTBF) meningkat dari 975,89 jam menjadi 1355,65 jam dalam konfigurasi terbaik. Peningkatan ini menunjukkan bahwa optimasi struktur sistem, terutama dengan redundansi *LO Cooler*, lebih efektif dalam menurunkan laju kegagalan dibandingkan *LO Filter Duplex*, sehingga mengurangi risiko kegagalan total serta meningkatkan keandalan operasional sistem pelumasan kapal.

Analisis Rantai Markov menunjukkan bahwa peluang sistem beroperasi normal dalam *steady state* adalah 0,8268, sedangkan peluang kegagalan satu, dua, dan tiga komponen masing-masing adalah 0,1485, 0,0227, dan 0,0021.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "TSC Main Engine Damage," The Swedish Club. Diakses : 2024. [Daring].
- [2] M. Anantharaman, F. Khan, V. Garaniya, and B. Lewarn, "A Step by Step Approach for Evaluating the Reliability of the Main Engine Lube Oil System for a Ship's Propulsion System," *TransNav, Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.*, vol. 8, no. 3, pp. 367–371, Oct. 2014.
- [3] K. Dionysiou, V. Bolbot, and G. Theotokatos, "A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 236, no. 1, pp. 228–244, Feb. 2022.
- [4] R. Indriyani and D. Dwisetiono, "Kajian Kegagalan Komponen Dan Perawatan Pada Sistem Pelumas Mesin Diesel Di Kapal," *Zo. Laut J. Inov. Sains Dan Teknol. Kelaut.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2021.
- [5] A. A. Allal, Y. Melhaoui, A. Kamil, K. Mansouri, and M. Youssfi, "Ship main engine lubricating oil system's reliability analysis by using bayesian network approach," *Int. J. Eng. Res. Africa*, vol. 48, no. 2, pp. 108–125, 2020.
- [6] E. Mennis, A. Platis, N. Nikitakos, and J. G. Fontaine, "Enhancing safety in ship's critical systems using Markov modeling," *Int. J. Reliab. Qual. Saf. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 59–72, 2009.
- [7] S. Meng and X. Wu, "Risk analysis of cruise ship supply chain based on the set pair analysis-Markov chain model," *Ocean Coast. Manag.*, vol. 245, no. June, p. 106855, 2023.
- [8] B. O. Ceylan, "Shipboard compressor system risk analysis by using rule-based fuzzy FMEA for preventing major marine accidents," *Ocean Eng.*, vol. 272, no. February, p. 113888, 2023.
- [9] J. Balaraju, M. Govinda Raj, and C. S. Murthy, "Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine-A case study," *J. Sustain. Min.*, vol. 18, no. 4, pp. 257–268, 2019, doi: 10.1016/j.jsm.2019.
- [10] F. D. A. Taylor, MSc, BSc, CENG, FIMarE, "Introduction to Marine Engineering," 1990.
- [11] M. Ben-Daya, S. O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic, and D. Ait-Kadi, *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Springer London, 2009.
- [12] S. Ahmed and X. C. Gu, "Accident-based FMECA study of Marine boiler for risk prioritization using fuzzy expert system," *Results Eng.*, vol. 6, no. April, p. 100123, 2020.
- [13] E. Zio, *An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*. World Scientific Publishing Company, 2007.