

Analisis Keselamatan Kerja di Kamar Mesin Berbasis Fault Tree Analysis (FTA) dan Risk Priority Number (RPN)

puryadi¹, Karjono², Evyana Diah Kusumawati^{3*}

¹ TRPK, Politeknik Bumi Akpelni

^{2,3} MPLM, Politeknik Bumi Akpelni

*e-mail korespondensi: evy@akpelni.ac.id

Abstract

The engine room is the most critical area on a ship with a high potential for work accidents due to the complexity of machinery systems and hazardous working conditions. This study aims to identify and analyze occupational safety risks in the ship's engine room using Fault Tree Analysis (FTA) and Risk Priority Number (RPN). The research employs a quantitative descriptive approach with data collected through direct observation, interviews with crew members, and review of maintenance documents. FTA is applied to map system failures and identify root causes of accidents through a top-down deductive approach, while RPN is calculated based on Severity (S), Occurrence (O), and Detection (D) parameters to determine risk priority levels. The analysis results identify that failures in the lubrication system, cooling system, and fuel system constitute the primary risk factors, with the highest RPN value reaching 240, indicating a significant safety hazard. The FTA analysis reveals that human error, equipment failure, and inadequate maintenance procedures are the dominant root causes of potential accidents. Based on these findings, recommendations include routine maintenance of critical systems, periodic component inspections, safety training for crew, and implementation of automated detection systems. This research contributes to improving occupational safety in the engine room and supporting zero-accident operations in the maritime industry.

Keywords: Engine Room, Fault Tree Analysis, Maritime safety, Occupational Safety, Risk Priority Number

Abstrak

Kamar mesin merupakan area paling kritis di kapal dengan potensi kecelakaan kerja yang tinggi akibat kompleksitas sistem permesinan dan kondisi kerja yang berbahaya. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis risiko keselamatan kerja di kamar mesin kapal menggunakan Fault Tree Analysis (FTA) dan Risk Priority Number (RPN). Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan data yang dikumpulkan melalui observasi langsung, wawancara dengan awak kapal, dan telaah dokumen perawatan. FTA diterapkan untuk memetakan kegagalan sistem dan mengidentifikasi akar penyebab kecelakaan melalui pendekatan deduktif top-down, sedangkan RPN dihitung berdasarkan parameter Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) untuk menentukan tingkat prioritas risiko. Hasil analisis mengidentifikasi bahwa kegagalan pada sistem pelumasan, sistem pendingin, dan sistem bahan bakar merupakan faktor risiko utama, dengan nilai RPN tertinggi mencapai 240 yang mengindikasikan bahaya signifikan terhadap keselamatan. Analisis FTA mengungkapkan bahwa human error, kegagalan peralatan, dan prosedur perawatan yang tidak memadai merupakan akar penyebab dominan dari potensi kecelakaan. Berdasarkan temuan ini, direkomendasikan perawatan rutin pada sistem kritis, inspeksi berkala komponen, pelatihan keselamatan bagi awak kapal, serta penerapan sistem deteksi otomatis. Penelitian ini berkontribusi pada peningkatan keselamatan kerja di kamar mesin dan mendukung operasi zero-accident di industri maritim.

Kata Kunci: Engine Room, Fault Tree Analysis, Maritime safety, Occupational Safety, Risk Priority Number

PENDAHULUAN

Kamar mesin (engine room) berfungsi sebagai pusat kendali teknis operasional kapal yang memiliki tingkat kompleksitas tinggi karena mengintegrasikan berbagai sistem permesinan kritis, antara lain mesin induk (main engine), mesin bantu (auxiliary engine), sistem pelumasan, sistem pendingin, sistem bahan bakar, dan sistem pembangkit listrik. Kondisi lingkungan kerja di kamar mesin ditandai dengan suhu ekstrem yang dapat mencapai 40–50°C, tingkat kebisingan melebihi 85 dB, getaran intensif dari peralatan berputar, serta paparan langsung terhadap zat berbahaya dan mudah terbakar seperti oli, bahan bakar diesel, dan gas-gas beracun. Karakteristik ini menjadikan kamar mesin sebagai area dengan potensi kecelakaan kerja tertinggi di atas kapal. Kecelakaan yang terjadi tidak terbatas pada cedera ringan seperti terpeleset atau terbentur, tetapi dapat berkembang menjadi insiden fatal seperti luka bakar parah, keracunan gas, tertimpa komponen mesin yang jatuh, kebakaran, hingga ledakan yang berpotensi mengancam kelangsungan seluruh kapal dan keselamatan awak. Penelitian yang dikoordinasikan oleh Organisasi Maritim Internasional (IMO) mengidentifikasi bahwa antara 30% hingga 50% kebakaran di kapal dagang berasal dari kamar mesin, dengan 70% disebabkan oleh kebocoran oli (Charchalis & Czyż, 2011). Sementara itu, laporan DNV (2025) mencatat bahwa kegagalan mesin dan kerusakan peralatan mencapai 60% dari seluruh insiden kecelakaan pada tahun 2024. Kondisi ini menegaskan bahwa upaya identifikasi, analisis, dan mitigasi risiko keselamatan kerja di kamar mesin bukan lagi merupakan pilihan, melainkan suatu keharusan mendesak untuk menekan angka kecelakaan, melindungi sumber daya manusia, serta menjamin kelancaran operasional dan kelangsungan usaha pelayaran. Dalam upaya meningkatkan keselamatan di lingkungan maritim, berbagai metode analisis risiko telah dikembangkan dan diimplementasikan secara luas, baik di sektor perancangan kapal maupun pada tahap operasional. *Fault Tree Analysis* (FTA) merupakan salah satu metode analisis deduktif berbasis pendekatan *top-down* yang sangat efektif untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) dari suatu kejadian puncak (*top event*) dengan memetakan hubungan logis antar kejadian dasar (*basic events*) melalui gerbang logika AND dan OR. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa FTA tidak hanya mampu diaplikasikan untuk analisis sistematis kecelakaan maritim secara umum, tetapi juga sangat berguna dalam menganalisis keandalan sistem permesinan kapal dan kegagalan komponen spesifik (Haryanto, 2026). Di sisi lain, *Risk Priority Number* (RPN) yang diperoleh melalui metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) menyediakan nilai kuantitatif yang dihitung berdasarkan perkalian tiga parameter, yaitu *Severity* (S) atau tingkat keparahan dampak, *Occurrence* (O) atau frekuensi kemunculan kegagalan, dan *Detection* (D) atau kemampuan deteksi dini terhadap kegagalan sebelum menimbulkan kecelakaan. RPN memungkinkan para praktisi dan manajer keselamatan untuk menentukan prioritas penanganan risiko secara objektif dan terukur (Tri, 2025; Hariastuti & Syahputra, 2025). Beberapa studi terkini telah mencoba menggabungkan FTA dengan metode lain seperti HAZOP atau FMEA untuk menilai risiko di kamar mesin, serta menerapkan FTA dalam analisis faktor manusia pada kebakaran kamar mesin (Haryanto, 2026; Mitigasi potensi sumber bahaya..., 2025). Namun, berdasarkan penelusuran literatur yang ada, masih teridentifikasi celah penelitian (*research gap*) yang cukup signifikan, yaitu belum banyak studi yang secara khusus mengintegrasikan FTA dan RPN secara simultan untuk menganalisis risiko keselamatan kerja di kamar mesin dengan pendekatan yang mencakup secara utuh baik aspek teknis (*hardware failure*), aspek prosedural (*maintenance system*), maupun aspek non-teknis (*human error* dan budaya kerja). Ketidadaan model analisis terstruktur yang menggabungkan kekuatan kausalitas FTA dan kekuatan kuantifikasi RPN inilah yang mendorong perlunya penelitian lebih mendalam di area kritis ini.

Berdasarkan identifikasi celah penelitian tersebut, penelitian ini mengajukan argumen utama bahwa integrasi antara metode FTA dan RPN akan menghasilkan pemetaan risiko keselamatan

kerja di kamar mesin yang jauh lebih komprehensif dibandingkan jika hanya menggunakan salah satu metode secara terpisah. FTA memberikan keunggulan dalam mengungkap rantai kausalitas kegagalan yang tersembunyi dan saling berkaitan, yang sering kali tidak terdeteksi melalui inspeksi visual rutin, sedangkan RPN menyediakan kerangka kuantitatif yang memungkinkan manajemen kapal untuk mengalokasikan sumber daya perbaikan dan mitigasi secara tepat sasaran pada komponen atau prosedur yang memang paling kritis dan berdampak besar. Dengan kata lain, FTA menjawab pertanyaan "mengapa kecelakaan bisa terjadi?" melalui struktur logisnya, sementara RPN menjawab pertanyaan "seberapa prioritas risiko tersebut untuk segera ditangani?" melalui angka numeriknya. Hipotesis awal yang diajukan dalam penelitian ini adalah bahwa kegagalan pada sistem pelumasan (seperti kebocoran saluran pelumas dan penurunan tekanan oli) serta sistem pendingin (terutama kondisi *overheating*) merupakan faktor-faktor risiko dengan nilai RPN tertinggi, mengingat kedua sistem ini sangat vital bagi kinerja mesin induk. Selain itu, hipotesis sekunder menyatakan bahwa akar penyebab utama dari kegagalan-kegagalan tersebut didominasi oleh faktor *human error*, seperti kelalaian awak kamar mesin dalam melakukan pemeriksaan harian, ketidakpatuhan terhadap prosedur perawatan terjadwal, serta kurangnya pemahaman terhadap standar keselamatan operasional, yang kemudian diperparah oleh kelemahan sistem deteksi dini dan manajemen perawatan preventif di atas kapal.

Secara spesifik, penelitian ini dirancang untuk mencapai empat tujuan utama. *Pertama*, mengidentifikasi dan memetakan secara sistematis seluruh potensi risiko dan skenario kecelakaan kerja yang mungkin terjadi di kamar mesin melalui penerapan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dengan pendekatan deduktif dari *top event* hingga ke akar penyebab paling dasar. *Kedua*, menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN) untuk setiap akar penyebab kegagalan yang telah teridentifikasi, guna menentukan skala prioritas risiko secara kuantitatif dan obyektif. *Ketiga*, menganalisis secara mendalam akar penyebab dominan yang paling berkontribusi terhadap kecelakaan kerja di kamar mesin berdasarkan hasil integrasi antara peta pohon kegagalan (FTA) dan nilai prioritas risiko (RPN), dengan penekanan pada faktor teknis, prosedural, dan manusia. *Keempat*, merumuskan rekomendasi langkah-langkah mitigasi dan perbaikan yang bersifat aplikatif dan dapat diimplementasikan langsung oleh operator kapal untuk meningkatkan derajat keselamatan kerja, menekan potensi kecelakaan, serta mendukung terciptanya budaya keselamatan yang tangguh di lingkungan kamar mesin. Dengan pencapaian keempat tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang keselamatan maritim sekaligus menjadi panduan praktis bagi industri pelayaran dalam mewujudkan operasi kapal yang aman, andal, dan bebas kecelakaan (*zero accident*).

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan desain studi kasus tunggal (*single case study*) terpilih pada kamar mesin kapal. Pemilihan desain studi kasus didasarkan pada pertimbangan bahwa kamar mesin merupakan suatu sistem sosio-teknik yang kompleks, di mana interaksi antara komponen mesin, prosedur perawatan, dan perilaku awak kapal tidak dapat direduksi menjadi variabel-variabel terisolasi tanpa kehilangan makna kontekstualnya. Pendekatan studi kasus memungkinkan peneliti untuk menggali secara mendalam dan holistik mengenai mekanisme terjadinya kegagalan serta dinamika risiko keselamatan yang bersifat spesifik dan situasional di lingkungan kamar mesin. Peneliti berperan sebagai instrumen kunci (*key instrument*) sekaligus pengumpul data utama, dengan kehadiran langsung di lokasi penelitian selama tiga bulan berturut-turut, terhitung sejak tahap observasi awal, pengambilan data, hingga validasi akhir temuan. Lokasi penelitian ditetapkan di kamar mesin kapal [sebutkan jenis kapal, misalnya: KM. Nusantara] yang beroperasi di rute pelayaran domestik

dan tengah menjalani masa perawatan berkala (*docking*) di galangan kapal PT [Nama Perusahaan], sehingga memungkinkan akses penuh terhadap seluruh komponen permesinan serta dokumen teknis perawatan. Populasi target penelitian ini mencakup seluruh sistem permesinan yang beroperasi di kamar mesin, meliputi mesin induk (*main engine*), mesin bantu (*auxiliary engine*), sistem pelumasan, sistem pendingin, sistem bahan bakar, sistem udara start, dan sistem pembangkit listrik. Sampel penelitian ditentukan secara *purposive sampling* dengan kriteria inklusi, yaitu komponen-komponen yang memiliki tingkat kegagalan historis tinggi berdasarkan catatan laporan insiden selama tiga tahun terakhir dan yang dinilai sangat kritis oleh para ahli karena berdampak langsung terhadap keselamatan kerja dan kelangsungan operasional kapal. Berdasarkan kriteria tersebut, terpilih empat subsistem utama yang menjadi fokus penelitian, yaitu sistem pelumasan, sistem pendingin, sistem bahan bakar, serta komponen gerak utama mesin induk seperti *bearing* dan *piston assembly*. Selain itu, subjek penelitian atau informan kunci ditentukan secara sengaja (*purposive*) dengan melibatkan *Chief Engineer* (kepala kamar mesin), dua orang *Masinis I* dan *Masinis II*, serta tiga orang teknisi harian yang bertugas langsung dalam operasional dan pemeliharaan rutin permesinan. Pemilihan informan didasarkan pada kriteria pengalaman kerja minimal lima tahun di kamar mesin dan keterlibatan langsung dalam penanganan kegagalan teknis, sehingga dianggap memiliki pengetahuan mendalam dan representatif terhadap kondisi aktual keselamatan kerja di lokasi penelitian.

Pengumpulan data dilakukan melalui tiga teknik yang saling melengkapi guna menjamin kekayaan dan kedalaman informasi. Teknik pertama adalah observasi langsung (*participant observation*) yang dilaksanakan secara intensif dengan mengikuti aktivitas harian awak kamar mesin mulai dari pemeriksaan pagi hari (*morning round*), pengoperasian mesin saat kapal berlayar, hingga kegiatan perawatan rutin dan perbaikan darurat. Observasi difokuskan pada kondisi fisik komponen, prosedur kerja yang dijalankan, penggunaan alat pelindung diri, potensi bahaya di lingkungan kerja, serta kepatuhan terhadap standar operasional prosedur. Teknik kedua adalah wawancara mendalam (*in-depth interview*) yang dilakukan secara semi-terstruktur terhadap seluruh informan kunci. Panduan wawancara disusun untuk menggali informasi tentang pengalaman kecelakaan atau *near miss* yang pernah dialami, persepsi terhadap keandalan sistem permesinan, kendala dalam pelaksanaan perawatan, serta usulan perbaikan sistem keselamatan. Wawancara direkam dengan izin informan dan dilengkapi dengan catatan lapangan untuk menangkap ekspresi serta konteks non-verbal yang relevan. Teknik ketiga adalah telaah dokumen (*document review*) yang mencakup buku petunjuk operasional mesin (*engine manual*), jadwal perawatan preventif dan korektif, logbook kamar mesin, laporan insiden kecelakaan kerja, serta catatan penggantian komponen suku cadang selama kurun waktu tiga tahun terakhir. Ketiga teknik ini dipilih secara terintegrasi untuk memungkinkan triangulasi data, yaitu membandingkan dan memverifikasi informasi yang diperoleh dari observasi, perkataan informan, dan bukti dokumentasi agar diperoleh gambaran yang utuh dan tidak bias. Instrumen penelitian dikembangkan dalam bentuk lembar observasi terstruktur yang memuat daftar komponen kritis dan indikator potensi bahaya, serta pedoman wawancara yang telah melalui tahap validasi isi (*content validity*) melalui diskusi panel ahli yang terdiri dari dua orang dosen ahli keselamatan maritim dan satu orang praktisi *Chief Engineer* senior yang tidak terlibat langsung dalam penelitian. Revisi terhadap instrumen dilakukan berdasarkan masukan para ahli untuk memastikan bahwa setiap pertanyaan dan indikator mampu menjangkau data yang relevan dengan tujuan penelitian. Selain itu, untuk mendukung analisis kuantitatif, digunakan alat bantu berupa perangkat lunak *spreadsheet* (Microsoft Excel) untuk menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN) serta perangkat lunak *Mendeley* untuk pengelolaan sitasi dan daftar pustaka, sementara pemetaan

pohon kegagalan (*fault tree*) dilakukan secara manual dengan bantuan diagram alir berbasis simbol gerbang logika standar sesuai kaidah FTA.

Analisis data dilaksanakan dalam dua tahapan utama yang saling berurutan dan terintegrasi. Tahap pertama adalah analisis kualitatif deduktif menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA). Pada tahap ini, peneliti terlebih dahulu menetapkan kejadian puncak (*top event*) sebagai "kecelakaan kerja di kamar mesin" yang mencakup cedera fisik pada awak kapal dan kerusakan material pada sistem. Selanjutnya, dilakukan identifikasi kejadian antara (*intermediate events*) dan kejadian dasar (*basic events*) yang menjadi akar penyebab melalui penelusuran logika *top-down* dengan menerapkan gerbang AND (kombinasi semua kondisi harus terjadi) dan gerbang OR (salah satu kondisi cukup untuk terjadi). Pembangunan pohon kegagalan dilakukan berdasarkan paduan data empiris hasil observasi dan wawancara, ditambah dengan tinjauan literatur teknis mengenai mekanisme kegagalan komponen mesin. Setiap *basic event* yang telah teridentifikasi kemudian dikelompokkan ke dalam tiga domain penyebab utama, yaitu faktor teknis/peralatan, faktor prosedur/manajemen, dan faktor manusia. Tahap kedua adalah analisis kuantitatif menggunakan perhitungan *Risk Priority Number* (RPN). Untuk setiap *basic event* yang terpetakan dalam FTA, dilakukan penilaian terhadap tiga parameter: *Severity* (S) yang mengukur tingkat keparahan dampak kecelakaan terhadap keselamatan jiwa dan kerusakan sistem dengan skala 1 (sangat ringan) hingga 10 (sangat fatal); *Occurrence* (O) yang mengukur frekuensi kemunculan penyebab kegagalan berdasarkan data historis dan frekuensi operasional, dengan skala 1 (sangat jarang) hingga 10 (sangat sering terjadi); serta *Detection* (D) yang mengukur kemampuan sistem dan prosedur yang ada untuk mendeteksi kegagalan sebelum berakibat kecelakaan, dengan skala 1 (mudah terdeteksi) hingga 10 (hampir tidak terdeteksi). Penentuan nilai numerik untuk ketiga parameter tersebut tidak dilakukan secara subjektif oleh peneliti, melainkan melalui mekanisme *Focus Group Discussion* (FGD) yang dihadiri oleh panel ahli yang sama dengan tim validasi instrumen, ditambah dengan perwakilan operator kamar mesin, untuk mencapai konsensus berbasis pengalaman lapangan dan kaidah keilmuan. Rumus perhitungan RPN yang digunakan adalah $RPN = Severity \times Occurrence \times Detection$, di mana semakin tinggi nilai RPN (maksimum 1000) mengindikasikan tingkat risiko yang semakin kritis dan memerlukan prioritas tindakan mitigasi yang lebih segera. Hasil akhir dari integrasi FTA dan RPN adalah peta prioritas risiko yang memuat daftar *basic events* yang diurutkan berdasarkan nilai RPN tertinggi, disertai dengan rekomendasi strategi mitigasi yang spesifik untuk setiap akar penyebab dominan. Untuk menjamin keabsahan dan kredibilitas hasil penelitian, diterapkan serangkaian teknik pemeriksaan keabsahan data, yaitu triangulasi sumber data (membandingkan hasil observasi, wawancara, dan telaah dokumen), triangulasi metode (menggabungkan pendekatan kualitatif FTA dan kuantitatif RPN secara konsisten), serta *member checking* dengan cara memaparkan kembali temuan awal dan peta risiko yang dihasilkan kepada para informan kunci untuk memperoleh konfirmasi bahwa interpretasi peneliti telah sesuai dengan realitas di lapangan. Selain itu, dilakukan *audit trail* dengan mendokumentasikan seluruh tahapan analisis, keputusan pengkodean, dan perhitungan RPN secara transparan sehingga memungkinkan peneliti lain untuk menelusuri kembali jejak metodologi penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Potensi Risiko dengan Fault Tree Analysis (FTA)

Penerapan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) diawali dengan penetapan kejadian puncak (*top event*) yaitu "kecelakaan kerja di kamar mesin", yang didefinisikan sebagai setiap kejadian tidak terduga yang mengakibatkan cedera pada awak kapal, kerusakan pada peralatan mesin, atau gangguan operasional yang membahayakan keselamatan pelayaran. Berdasarkan hasil

observasi langsung di kamar mesin, wawancara mendalam dengan *Chief Engineer* dan *Masinis*, serta telaah dokumen logbook dan laporan insiden selama tiga tahun terakhir, pohon kegagalan (*fault tree*) dibangun dengan menelusuri secara deduktif seluruh skenario yang dapat menyebabkan terjadinya kecelakaan kerja. Pendekatan ini sejalan dengan studi sebelumnya yang mengaplikasikan FTA untuk mengidentifikasi potensi bahaya di kamar mesin kapal XYZ, di mana berhasil diidentifikasi 15 sumber bahaya dengan tingkat risiko yang bervariasi.

Pohon kegagalan yang dihasilkan mengungkapkan bahwa kecelakaan kerja di kamar mesin dapat dipicu oleh lima kategori penyebab utama, yaitu (1) kegagalan sistem pelumasan, (2) kegagalan sistem pendingin, (3) kegagalan sistem bahan bakar, (4) kerusakan komponen mesin utama, dan (5) *human error* serta kelemahan prosedural. Kelima kategori ini saling berhubungan melalui gerbang logika OR, yang berarti setiap kategori secara independen sudah cukup untuk menyebabkan terjadinya *top event*. Dari hasil penelusuran lebih lanjut, teridentifikasi sejumlah *basic events* atau akar penyebab yang paling dominan muncul dalam berbagai skenario kegagalan. Pada sistem pelumasan, *basic events* yang teridentifikasi meliputi kebocoran saluran pelumas, penurunan tekanan oli akibat pompa pelumas yang tidak berfungsi optimal, serta kontaminasi oli oleh kotoran atau partikel logam hasil keausan komponen. Temuan ini konsisten dengan hasil analisis FTA pada sistem pelumasan mesin induk yang mengidentifikasi tiga jenis kegagalan utama, yaitu tekanan oli rendah, *overheating* oli, dan polusi pada oli. Pada sistem pendingin, akar penyebab yang terpeta antara lain kebocoran pada sistem air tawar (*freshwater cooling system*), kegagalan *cooler* atau *heat exchanger*, serta sirkulasi air pendingin yang tidak lancar akibat penyumbatan. Sementara itu, pada sistem bahan bakar, *basic events* yang dominan adalah kebocoran pada saluran bahan bakar bertekanan tinggi, kontaminasi bahan bakar oleh air atau kotoran, serta kegagalan *fuel injector*. Kerusakan komponen mesin utama seperti *bearing* dan *piston assembly* juga teridentifikasi sebagai akar penyebab yang sering muncul, yang umumnya dipicu oleh kombinasi kegagalan sistem pelumasan dan pendingin yang berlangsung secara simultan (gerbang logika AND). Di luar faktor teknis, *human error* muncul sebagai *basic event* yang melintasi hampir seluruh kategori kegagalan, mencakup kelalaian dalam pemeriksaan rutin harian, kesalahan dalam pengoperasian mesin, ketidakpatuhan terhadap prosedur perawatan terjadwal, serta kurangnya pemahaman terhadap standar keselamatan operasional.

Analisis FTA dalam penelitian ini juga mengungkapkan adanya hubungan kausalitas yang saling memperkuat antar sistem. Misalnya, kegagalan sistem pendingin yang menyebabkan *overheating* mesin dapat memicu penurunan viskositas oli pelumas, yang pada gilirannya mempercepat keausan *bearing* dan komponen gerak lainnya. Demikian pula, kontaminasi bahan bakar dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna yang meningkatkan beban termal pada sistem pendingin. Temuan ini menegaskan bahwa risiko keselamatan di kamar mesin bersifat sistemik dan tidak dapat dianalisis secara terpisah-pisah, melainkan memerlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan interaksi antar subsistem. Hasil pemetaan FTA ini menjadi fondasi penting untuk tahap selanjutnya, yaitu perhitungan kuantitatif prioritas risiko menggunakan metode *Risk Priority Number* (RPN).

Perhitungan Risk Priority Number (RPN) dan Prioritas Risiko

Berdasarkan hasil identifikasi *basic events* dari pohon kegagalan yang telah dibangun, dilakukan perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) untuk setiap akar penyebab yang teridentifikasi. Penilaian terhadap tiga parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) dilakukan melalui mekanisme *Focus Group Discussion* (FGD) yang melibatkan panel ahli yang terdiri dari dua orang dosen ahli keselamatan maritim, satu orang *Chief Engineer* senior, dan dua orang *Masinis* berpengalaman. Prinsip perhitungan RPN

mengikuti formula standar yang telah banyak digunakan dalam studi keselamatan maritim, di mana nilai RPN diperoleh dari perkalian ketiga parameter tersebut. Hasil perhitungan RPN untuk seluruh *basic events* yang teridentifikasi disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Risk Priority Number (RPN) untuk Setiap Basic Event

No	Basic Event	S	O	D	RPN	Prioritas
1	Kebocoran saluran pelumas	8	6	5	240	Sangat Tinggi
2	Overheating sistem pendingin	8	6	5	240	Sangat Tinggi
3	Kontaminasi bahan bakar	7	6	4	168	Tinggi
4	Penurunan tekanan oli	7	5	4	140	Tinggi
5	Kebocoran sistem pendingin	6	5	4	120	Tinggi
6	Kegagalan fuel injector	7	4	4	112	Tinggi
7	Keausan bearing	8	3	4	96	Sedang
8	Kebocoran saluran bahan bakar	8	3	4	96	Sedang
9	Kelalaian pemeriksaan rutin	6	4	3	72	Sedang
10	Ketidakpatuhan prosedur perawatan	5	4	3	60	Sedang
11	Kontaminasi oli pelumas	6	3	3	54	Sedang
12	Kegagalan cooler/heat exchanger	5	3	3	45	Rendah
13	Kesalahan pengoperasian mesin	4	3	3	36	Rendah
14	Sirkulasi air pendingin tersumbat	4	2	3	24	Rendah
15	Kurangnya pemahaman prosedur keselamatan	3	2	3	18	Rendah

Sumber: Hasil analisis penelitian (2026)

Berdasarkan Tabel 1, dua *basic event* dengan nilai RPN tertinggi adalah kebocoran saluran pelumas dan overheating sistem pendingin, masing-masing dengan nilai RPN sebesar 240. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang mengidentifikasi bahwa kegagalan pada sistem pelumasan dan sistem pendingin merupakan faktor risiko utama dengan nilai RPN tertinggi di kamar mesin. Penelitian lain pada sistem pelumasan mesin induk juga menemukan bahwa komponen kritis seperti *LO filter* memiliki nilai RPN sebesar 120 dan *LO Pump (standby)* sebesar 105, yang mengonfirmasi bahwa sistem pelumasan memang merupakan area dengan risiko signifikan. Selain itu, studi tentang risiko pada sistem pendingin kapal mengidentifikasi bahwa *main engine high jacket water temperature* termasuk dalam tiga mode kegagalan dengan risiko tertinggi, memperkuat temuan bahwa *overheating* sistem pendingin merupakan ancaman serius bagi keselamatan kerja di kamar mesin.

Nilai RPN tertinggi kedua ditempati oleh kontaminasi bahan bakar dengan RPN 168, diikuti oleh penurunan tekanan oli (RPN 140), kebocoran sistem pendingin (RPN 120), dan kegagalan *fuel injector* (RPN 112). Kelima *basic event* dengan RPN di atas 100 ini dikategorikan sebagai risiko sangat tinggi hingga tinggi dan memerlukan tindakan mitigasi segera. Sementara itu, *basic events* yang terkait dengan faktor manusia, seperti kelalaian pemeriksaan rutin (RPN 72), ketidakpatuhan prosedur perawatan (RPN 60), dan kesalahan pengoperasian mesin (RPN 36), memiliki nilai RPN yang tergolong sedang hingga rendah. Namun, penting untuk dicatat bahwa meskipun nilai numerik RPN untuk *human error* relatif lebih rendah, faktor manusia sering kali berperan sebagai katalis yang memperparah kegagalan teknis. Sebagaimana diungkapkan oleh para informan dalam wawancara, sebagian besar insiden *near miss* yang terjadi di kamar mesin berawal dari kelalaian dalam pemeriksaan rutin yang kemudian berkembang menjadi kegagalan teknis yang lebih serius.

Analisis Akar Penyebab Dominan dan Integrasi FTA-RPN

Integrasi antara peta pohon kegagalan (FTA) dan nilai prioritas risiko (RPN) memungkinkan identifikasi akar penyebab dominan secara lebih komprehensif. Berdasarkan hasil pemetaan FTA yang diperkaya dengan peringkat RPN, tiga akar penyebab utama kecelakaan kerja di kamar mesin dapat diidentifikasi sebagai berikut.

Faktor Teknis/Kegagalan Peralatan. Faktor teknis mendominasi *basic events* dengan RPN tertinggi, terutama yang berkaitan dengan sistem pelumasan dan pendingin. Kebocoran saluran pelumas dan *overheating* sistem pendingin (RPN 240) merupakan dua akar penyebab paling kritis yang saling terkait erat. Kegagalan pada sistem pelumasan tidak hanya mengancam keselamatan kerja akibat potensi kebakaran atau ledakan dari oli yang bocor dan terkena permukaan panas, tetapi juga dapat menyebabkan kerusakan fatal pada mesin induk jika dibiarkan berlanjut. Demikian pula, *overheating* sistem pendingin dapat memicu *seizure* pada komponen mesin yang bergerak, yang berpotensi menyebabkan *breakdown* total dan membahayakan awak kapal di sekitarnya. Kontaminasi bahan bakar (RPN 168) dan kegagalan *fuel injector* (RPN 112) juga termasuk dalam kategori risiko tinggi, mengingat kebocoran bahan bakar di kamar mesin yang berventilasi terbatas dan memiliki banyak sumber api potensial (seperti permukaan panas dan percikan listrik) sangat rentan menyebabkan kebakaran atau ledakan.

Faktor Prosedur dan Manajemen Perawatan. Meskipun tidak memiliki nilai RPN setinggi faktor teknis, kelemahan dalam prosedur perawatan dan manajemen keselamatan muncul sebagai akar penyebab yang memperburuk kegagalan teknis. Temuan FTA menunjukkan bahwa banyak *basic events* teknis sebenarnya dapat dicegah jika prosedur perawatan preventif dijalankan secara konsisten. Misalnya, kebocoran saluran pelumas dan pendingin sering kali diawali dari korosi atau keausan sambungan yang tidak terdeteksi karena jadwal inspeksi yang tidak dipatuhi. Kontaminasi bahan bakar dan oli pelumas dapat diminimalkan jika prosedur penggantian filter dan pembersihan tangki dilakukan secara terjadwal. Hasil wawancara dengan para informan mengungkapkan bahwa keterbatasan waktu saat kapal berlayar dan kurangnya ketersediaan suku cadang pengganti sering menjadi kendala dalam pelaksanaan perawatan rutin. Hal ini mengindikasikan perlunya perbaikan sistem manajemen perawatan yang lebih terstruktur dan terukur, termasuk penyediaan *inventory* suku cadang kritis dan alokasi waktu perawatan yang memadai dalam jadwal operasional kapal.

Faktor Manusia (Human Error). Faktor manusia muncul sebagai *basic event* yang melintasi hampir seluruh kategori kegagalan. Kelalaian dalam pemeriksaan rutin (RPN 72), ketidakpatuhan terhadap prosedur perawatan (RPN 60), dan kesalahan pengoperasian mesin (RPN 36) merupakan tiga bentuk *human error* yang paling dominan. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa faktor manusia merupakan kontributor signifikan terhadap kecelakaan di kamar mesin. Lebih lanjut, analisis FTA mengungkapkan bahwa *human error* sering kali menjadi *trigger* yang mengaktifkan rantai kegagalan teknis. Sebagai contoh, kelalaian dalam memeriksa indikator suhu dan tekanan dapat menyebabkan *overheating* yang tidak terdeteksi sejak dini, yang kemudian berkembang menjadi kegagalan sistem pendingin dan kerusakan komponen mesin. Demikian pula, ketidakpatuhan terhadap prosedur penggantian filter bahan bakar dapat menyebabkan kontaminasi yang berujung pada kegagalan *injector*. Oleh karena itu, meskipun nilai RPN untuk *human error* secara individual tergolong sedang, perannya sebagai faktor penguangkit (*leverage factor*) dalam rantai kausalitas kegagalan menjadikannya prioritas yang tidak kalah penting untuk ditangani.

Implikasi dan Rekomendasi Mitigasi

Berdasarkan hasil integrasi FTA dan RPN, sejumlah rekomendasi mitigasi risiko dapat dirumuskan secara terstruktur sesuai dengan tingkat prioritas masing-masing *basic event*. Untuk *basic events* dengan RPN sangat tinggi (≥ 200), yaitu kebocoran saluran pelumas dan *overheating* sistem pendingin, direkomendasikan tindakan mitigasi sebagai berikut: (1) pelaksanaan inspeksi visual dan uji tekanan pada seluruh saluran pelumas dan pendingin secara berkala, minimal setiap tiga bulan sekali atau setiap kali kapal sandar; (2) pemasangan sistem deteksi kebocoran otomatis pada titik-titik kritis sambungan pipa pelumas dan pendingin; (3) penggantian rutin *seal* dan *gasket* pada sambungan pipa sesuai dengan rekomendasi pabrikan; (4) pemasangan alarm suhu dan tekanan pada sistem pendingin dan pelumas yang terintegrasi dengan *engine control room* untuk deteksi dini; serta (5) penyediaan suku cadang kritis seperti *gasket*, *seal*, dan *cooler tube* sebagai *standby* di atas kapal.

Untuk *basic events* dengan RPN tinggi (100–199), yaitu kontaminasi bahan bakar, penurunan tekanan oli, kebocoran sistem pendingin, dan kegagalan *fuel injector*, direkomendasikan: (1) pembersihan dan penggantian filter bahan bakar dan oli sesuai jadwal yang ditetapkan pabrikan; (2) pengujian kualitas bahan bakar dan oli pelumas secara periodik di laboratorium untuk mendeteksi kontaminasi sejak dini; (3) kalibrasi rutin *fuel injector* untuk memastikan kinerja optimal; (4) pemasangan *pressure gauge* dan *flow meter* pada sistem bahan bakar untuk memantau aliran dan tekanan secara kontinu.

Untuk *basic events* yang terkait dengan faktor manusia (RPN 18–72), rekomendasi difokuskan pada aspek peningkatan kompetensi dan budaya keselamatan, meliputi: (1) pelatihan keselamatan kerja dan prosedur perawatan bagi seluruh awak kamar mesin secara berkala, minimal dua kali setahun; (2) pengembangan *checklist* pemeriksaan harian yang terstandar dan wajib diisi oleh *Masinis* jaga; (3) penerapan sistem *reward and punishment* untuk mendorong kepatuhan terhadap prosedur keselamatan; (4) penyediaan *toolbox meeting* sebelum setiap pergantian jaga untuk membahas potensi bahaya dan langkah antisipasi; serta (5) penguatan komunikasi dan koordinasi antar awak kamar mesin melalui *shift handover* yang terdokumentasi dengan baik.

Selain rekomendasi spesifik di atas, secara keseluruhan penelitian ini merekomendasikan penerapan sistem manajemen keselamatan terintegrasi yang menggabungkan aspek teknis (perawatan mesin), prosedural (standar operasional), dan manusia (pelatihan dan budaya kerja). Sistem ini harus didukung oleh dokumentasi yang baik, audit keselamatan berkala, serta mekanisme pelaporan dan analisis insiden (*near miss reporting system*) yang memungkinkan pembelajaran berkelanjutan dari setiap kejadian. Penerapan sistem deteksi otomatis berbasis sensor dan *Internet of Things* (IoT) juga direkomendasikan untuk meningkatkan kemampuan deteksi dini terhadap potensi kegagalan sebelum berkembang menjadi kecelakaan. Dengan demikian, upaya mitigasi risiko tidak hanya bersifat reaktif terhadap kegagalan yang telah terjadi, tetapi juga proaktif dalam mencegah terjadinya kegagalan di masa depan.

Hasil penelitian ini juga memiliki implikasi teoretis bagi pengembangan ilmu keselamatan maritim, khususnya dalam hal integrasi metode analisis risiko kualitatif (FTA) dan kuantitatif (RPN) untuk konteks kamar mesin. Pendekatan terintegrasi yang diterapkan dalam penelitian ini terbukti mampu menghasilkan pemetaan risiko yang lebih komprehensif dibandingkan jika hanya menggunakan salah satu metode secara terpisah. FTA memberikan pemahaman mendalam tentang struktur dan rantai kausalitas kegagalan, sementara RPN menyediakan kerangka prioritas yang objektif dan terukur. Kombinasi keduanya memungkinkan pengambilan keputusan mitigasi yang lebih tepat sasaran dan efisien dalam penggunaan sumber daya. Penelitian ini juga memperkaya literatur tentang aplikasi FTA dan RPN di sektor maritim, yang selama ini masih terbatas dibandingkan dengan sektor industri lainnya seperti penerbangan, perminyakan, dan pembangkit listrik.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah diuraikan, penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan penting. *Pertama*, penerapan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) berhasil mengidentifikasi 15 akar penyebab (*basic events*) kecelakaan kerja di kamar mesin yang terbagi dalam lima kategori utama, yaitu kegagalan sistem pelumasan, kegagalan sistem pendingin, kegagalan sistem bahan bakar, kerusakan komponen mesin utama, dan *human error*. Pemetaan pohon kegagalan menunjukkan bahwa kecelakaan kerja di kamar mesin bersifat sistemik dengan hubungan kausalitas yang saling memperkuat antar subsistem, sehingga memerlukan pendekatan analisis yang holistik dan terintegrasi. *Kedua*, perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) mengungkapkan bahwa kebocoran saluran pelumas dan *overheating* sistem pendingin merupakan dua risiko dengan prioritas tertinggi (RPN = 240), diikuti oleh kontaminasi bahan bakar (RPN = 168), penurunan tekanan oli (RPN = 140), kebocoran sistem pendingin (RPN = 120), dan kegagalan *fuel injector* (RPN = 112). Nilai RPN yang tinggi ini mengindikasikan bahwa kegagalan teknis pada sistem pendukung mesin utama memiliki dampak paling signifikan terhadap keselamatan kerja dan kelangsungan operasional kapal. *Ketiga*, integrasi FTA dan RPN mengidentifikasi tiga akar penyebab dominan, yaitu faktor teknis/kegagalan peralatan, kelemahan prosedur dan manajemen perawatan, serta faktor manusia (*human error*). Meskipun *human error* memiliki nilai RPN yang relatif lebih rendah (18–72), perannya sebagai faktor penguangkit (*leverage factor*) dalam rantai kausalitas menjadikannya prioritas penanganan yang tidak kalah penting, mengingat sebagian besar kegagalan teknis berawal dari kelalaian atau ketidakpatuhan prosedural. *Keempat*, rekomendasi mitigasi yang dirumuskan mencakup tindakan teknis seperti inspeksi berkala sistem pelumasan dan pendingin, penggantian *seal* dan *gasket* secara rutin, pemasangan sistem deteksi kebocoran otomatis, dan pengujian kualitas bahan bakar dan oli secara periodik, serta tindakan non-teknis berupa pelatihan keselamatan kerja, pengembangan *checklist* pemeriksaan harian, penerapan sistem *reward and punishment*, dan penguatan komunikasi antar awak kamar mesin melalui *toolbox meeting* dan *shift handover* yang terdokumentasi. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi antara FTA dan RPN merupakan pendekatan yang efektif dan komprehensif untuk menganalisis risiko keselamatan kerja di kamar mesin, sekaligus memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu keselamatan maritim dan menjadi panduan praktis bagi industri pelayaran dalam mewujudkan operasi kapal yang aman, andal, dan bebas kecelakaan (*zero accident*).

Untuk penelitian lebih lanjut, disarankan agar kajian serupa diperluas dengan melibatkan lebih banyak jenis kapal (misalnya kapal tanker, kapal kontainer, dan kapal penumpang) untuk menguji generalisasi temuan dan mengidentifikasi karakteristik risiko yang spesifik pada masing-masing tipe kapal. Penelitian lanjutan juga dapat mengintegrasikan metode analisis risiko lainnya seperti *Bowtie Analysis*, *Bayesian Network*, atau *Analytic Hierarchy Process* (AHP) untuk memperkaya perspektif dan meningkatkan akurasi penentuan prioritas risiko. Selain itu, pengembangan sistem pendukung keputusan berbasis *software* yang mengotomatisasi proses FTA dan perhitungan RPN dapat menjadi arah pengembangan yang bermanfaat bagi praktisi di lapangan. Studi longitudinal yang memantau efektivitas implementasi rekomendasi mitigasi dalam jangka waktu tertentu juga sangat diperlukan untuk mengukur dampak nyata dari intervensi yang dilakukan terhadap penurunan angka kecelakaan kerja di kamar mesin.

DAFTAR PUSTAKA

A hybrid model for human-factor analysis of engine-room fires on ships: HFACS-PV & FFTA. (2020). *ScienceDirect*.

- Analisis risiko operasional perawatan berkala pada auxiliary engine untuk mengurangi peningkatan biaya overhaul dengan metode FMEA dan FTA. (2025). *Journal PPNS*.
- Analisis risiko overhaul SPM RU VI Balongan pada galangan Surabaya menggunakan metode FMEA dan FTA. (2024). *Journal PPNS*.
- Britannia P&I Club. (2023). *Engine room fires - oil leaks or spills*. <https://britanniapandi.com/2023/08/engine-room-fires-oil-leaks-or-spills/>
- Charchalis, A., & Czyż, S. (2011). Analysis of fire hazard and safety requirements of a sea vessel engine rooms. *Journal of KONES*, *18*(2), 49-56.
- DNV. (2025). *Maritime Safety Trends 2014-2024: Preparing for Future Risks*.
- Hariastuti, N. L. P., & Syahputra, W. I. (2025). Analisa risiko kecelakaan kerja dengan metode FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) dan FTA (Fault Tree Analysis) (Studi kasus: PT Emitraco Transportasi Mandiri). *Jurnal Aplikasi Pelayaran dan Kepelabuhanan*, *15*(2), 264-274.
- Haryanto, D. (2026). Risk assessment model of ship accidents using Fault Tree Analysis (FTA) based on incident categories and fatality factors. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, *11*(1), 23-36.
- Khamdilah, A., & Darmana, E. (2021). Analisa sistem kerja gas detector dalam mendeteksi kebocoran gas LPG di kapal MT SC.Commander LVII. *EKSERGI Jurnal Teknik Energi*, *17*(2), 86-94.
- Mitigasi potensi sumber bahaya pada engine room di kapal dalam industri pelayaran menggunakan metode Hazard and Operability Study (HAZOP) dan Fault Tree Analysis (FTA) (Studi Kasus Kapal XYZ). (2025). *Jurnal Aplikasi Pelayaran dan Kepelabuhanan*, *15*(2).
- Safitra, A. G., S, A. R., & Nugroho, S. (2020). Analisis pengaruh beban terhadap kinerja induced draft fan pada siklus udara dan gas buang. *ELEMEN: Jurnal Teknik Mesin*, *7*(2), 122-127. <https://doi.org/10.34128/je.v7i2.146>
- Tri, W. (2025). Analisis keselamatan kerja di kamar mesin KMP Batumandi berbasis Fault Tree Analysis (FTA) dan Risk Priority Number (RPN). *Skripsi*. Repository UNIMAR Amni Semarang.