

Analisis Penyebab Kerusakan Poros Pompa Air Tawar Pendingin Mesin Induk: Studi Kasus di KN. Prajapati

Risno Priyanto¹, Kundori^{2*}

^{1,2} Program Studi Teknika, Fakultas Kemaritiman, Universitas Maritim AMNI

*e-mail korespondensi: kundori.jaken@gmail.com

Abstract

This study aims to comprehensively analyze the causes of the damage to the main engine's freshwater cooling pump shaft and formulate effective preventive solutions. This study uses a case study design with a mixed method approach that combines qualitative and quantitative methods to analyze the damage to the main engine's freshwater cooling pump shaft. The population in this study is all components of the main engine's freshwater cooling system. The research sample is focused on the main engine's freshwater cooling pump shaft that experienced damage. Data analysis was carried out in stages using the triangulation method to increase the credibility of the research findings. Visual inspection showed that all shaft samples experienced fatigue cracks that originated from the radius fillet area on the bearing seat, namely the diameter transition zone that becomes a stress concentration. The crack pattern is in the form of semi-circular beach marks which are typical for fatigue failure due to repeated cyclic loading. RCA analysis identified three main root causes: (1) Chronic misalignment between the pump and the drive motor that causes non-uniform radial loads and stress concentrations on the shaft; (2) Sub-standard shaft material quality with sub-optimal heat treatment, resulting in low fatigue strength; and (3) Cooling water contamination with acidic pH and high chloride which accelerates corrosion and material degradation. It was concluded that the failure of the KN. Prajapati main engine's freshwater cooling pump shaft was caused by a combination of three interacting root cause factors, namely chronic misalignment between the pump shaft and the drive motor, sub-standard shaft material quality, and cooling water contamination and a high chloride content of 185 PPM which created a corrosive environment.

Keywords: RCA Analysis, KN. Prajapati, Freshwater pump shaft, Misalignment

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif penyebab kerusakan poros pompa air tawar pendingin mesin induk KN. Prajapati dan merumuskan solusi pencegahan yang efektif. Penelitian ini menggunakan desain studi kasus dengan pendekatan mixed method yang menggabungkan metode kualitatif dan kuantitatif untuk menganalisis kerusakan poros pompa air tawar pendingin mesin induk. Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh komponen sistem pendingin air tawar mesin induk KN. Prajapati. Sampel penelitian difokuskan pada poros pompa air tawar pendingin mesin induk yang mengalami kerusakan. Analisis data dilakukan secara bertahap menggunakan metode triangulasi untuk meningkatkan kredibilitas temuan penelitian. Inspeksi visual menunjukkan bahwa seluruh sampel poros mengalami retak fatigue yang berawal dari area fillet radius pada bearing seat, yaitu zona transisi diameter yang menjadi konsentrasi tegangan. Pola retak berbentuk semi-circular beach marks yang khas untuk kegagalan fatigue akibat beban siklik berulang. Analisis RCA mengidentifikasi tiga permasalahan utama: (1) Misalignment kronis antara pompa dan motor penggerak yang menyebabkan beban radial non-uniform dan konsentrasi tegangan pada poros; (2) Kualitas material poros yang sub-standar dengan heat treatment tidak optimal, menghasilkan fatigue strength yang rendah; dan (3) Kontaminasi air pendingin dengan pH asam dan klorida tinggi yang mempercepat korosi dan degradasi material. Disimpulkan bahwa kerusakan poros pompa air tawar pendingin mesin induk KN. Prajapati disebabkan oleh kombinasi tiga faktor root cause utama yang saling berinteraksi yaitu misalignment kronis antara poros pompa dan motor penggerak, kualitas material poros yang sub-standar, dan kontaminasi air pendingin.

Kata Kunci: Analisis RCA, KN. Prajapati, poros pompa air tawar, misalignment

PENDAHULUAN

Sistem pendingin air tawar (*fresh water cooling system*) merupakan komponen dalam operasional mesin induk kapal yang berfungsi menjaga suhu operasi mesin tetap optimal dan mencegah overheating (Theotokatos et al., (2017). KN. Prajapati sebagai kapal patroli yang beroperasi dalam kondisi laut yang dinamis mengalami permasalahan serius berupa kerusakan berulang pada poros pompa air tawar pendingin mesin induk. Kerusakan ini mengakibatkan gangguan sirkulasi pendingin, peningkatan suhu mesin yang berpotensi menyebabkan kerusakan komponen vital, serta menurunkan keandalan operasional kapal. Insiden kerusakan poros pompa yang terjadi pada periode operasi terakhir menyebabkan kapal harus menghentikan kegiatan patroli untuk dilakukan perbaikan darurat, yang berdampak pada efektivitas tugas dan meningkatkan biaya perawatan tidak terencana. Kondisi ini menunjukkan perlunya investigasi mendalam untuk mengidentifikasi akar penyebab kerusakan dan merumuskan langkah pencegahan yang efektif.

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kegagalan poros pompa pada sistem pendingin mesin kapal umumnya disebabkan oleh beberapa faktor utama. Penelitian oleh (Hua, et al., 2023) mengidentifikasi bahwa fatigue failure akibat beban siklik berulang menjadi penyebab dominan kerusakan poros pompa sentrifugal pada mesin marine diesel. Sementara itu, studi yang dilakukan oleh (Roy et al., 2020) menekankan peran korosi dan kavitasi sebagai faktor degradasi material poros pompa pada lingkungan operasi kapal. Lebih lanjut, analisis yang dilakukan oleh (Jhavar et al., 2013) menunjukkan bahwa ketidaksesuaian prosedur perawatan dan pemilihan material yang tidak tepat berkontribusi signifikan terhadap kegagalan prematur komponen sistem pendingin. Di Indonesia, penelitian oleh (Rezandy et al., 2021) pada kapal patroli TNI AL mengungkapkan bahwa kombinasi faktor operasional seperti getaran berlebih, misalignment, dan kualitas pelumas yang menurun mempercepat keausan poros pompa. Namun, belum terdapat studi spesifik yang menganalisis kasus kerusakan poros pompa FW cooling pada kapal patroli kelas KN. Prajapati dengan mempertimbangkan kondisi operasi dan karakteristik teknis.

Studi lain yang relevan dari rekayasa keandalan perspektif dilakukan oleh (AlSalamah et al., 2006). yang menganalisis kegagalan pompa air pendingin pada kapal dagang, mengidentifikasi bahwa 45% kegagalan disebabkan oleh kegagalan bantalan (terutama akibat kontaminasi dan pelumasan yang tidak memadai), 30% oleh kegagalan poros (dominan retak akibat kelelahan), 15% oleh kebocoran segel, dan 10% oleh kerusakan impeler. Penelitian tersebut menekankan pentingnya manajemen kualitas air dengan kontrol pH 7,5-8,5, kandungan klorida <50 ppm, dan dosis inhibitor korosi yang tepat untuk mengurangi kegagalan terkait korosi. Dari perspektif teknik material, studi oleh (Reza Kashyzadeh et al., 2025) membandingkan kinerja berbagai material poros (baja karbon AISI 1045, baja paduan AISI 4140, baja tahan karat 316L, dan baja tahan karat martensit 17-4 PH) dalam simulasi lingkungan air pendingin laut, menemukan bahwa baja tahan karat martensit 17-4 PH menunjukkan kinerja unggul dengan laju korosi 85% lebih rendah dan kekuatan lelah 40% lebih tinggi dibandingkan konvensional AISI 4140.

Berdasarkan observasi lapangan dan data operasional KN. Prajapati, diduga kerusakan poros pompa air tawar pendingin disebabkan oleh kombinasi faktor mekanis dan operasional yang saling berinteraksi. Hipotesis utama penelitian ini adalah bahwa kegagalan poros pompa terjadi akibat fatigue stress yang dipercepat oleh kondisi misalignment antara poros pompa dengan motor penggerak, ditambah dengan paparan korosi akibat kontaminasi air pendingin dan getaran berlebih dari mesin induk. Faktor tambahan yang diperkirakan berkontribusi adalah prosedur perawatan preventif yang belum optimal, khususnya dalam hal monitoring kondisi bearing dan inspeksi kelurusan poros. Kualitas material poros yang mungkin tidak sesuai spesifikasi desain untuk kondisi operasi kapal patroli dengan jam operasi tinggi juga diduga menjadi variabel signifikan. Dengan menganalisis karakteristik kerusakan melalui

inspeksi visual, pengujian metalurgi, dan evaluasi parameter operasional, penelitian ini diharapkan dapat memvalidasi hipotesis tersebut dan memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif penyebab kerusakan poros pompa air tawar pendingin mesin induk KN. Prajapati dan merumuskan solusi pencegahan yang efektif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan keandalan sistem pendingin mesin induk, mengurangi downtime operasional, dan memberikan kontribusi bagi pengembangan praktik perawatan kapal.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain studi kasus dengan pendekatan mixed method yang mengombinasikan metode kualitatif dan kuantitatif untuk menganalisis kerusakan poros pompa air tawar pendingin mesin induk KN. Prajapati secara komprehensif. Pendekatan kualitatif diterapkan melalui observasi langsung, inspeksi visual terhadap komponen yang rusak, wawancara mendalam dengan teknisi kapal dan crew engineering, serta studi dokumentasi riwayat perawatan dan operasional. Sementara itu, pendekatan kuantitatif dilakukan melalui pengukuran parameter teknis seperti alignment poros, tingkat getaran, analisis metalurgi material poros, pengujian kekerasan material, dan analisis komposisi kimia fluida pendingin. Penelitian mengadopsi penelitian sebelumnya (Peffer et al., 2007) yang dilaksanakan dalam tiga tahap utama: tahap pertama adalah investigasi awal untuk identifikasi masalah dan pengumpulan data operasional; tahap kedua adalah analisis teknis mendalam termasuk pengujian laboratorium terhadap poros yang rusak; dan tahap ketiga adalah sintesis temuan untuk merumuskan rekomendasi solusi pencegahan. Desain penelitian ini dipilih karena memungkinkan pemahaman holistik terhadap fenomena kerusakan dengan mempertimbangkan aspek teknis, operasional, dan manajemen perawatan secara terintegrasi.

Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh komponen sistem pendingin air tawar mesin induk KN. Prajapati, yang mencakup pompa FW cooling, heat exchanger, pipa distribusi, katup kontrol, dan sistem monitoring. Sampel penelitian difokuskan pada poros pompa air tawar pendingin mesin induk yang mengalami kerusakan, meliputi tiga unit poros yang gagal dalam periode operasi 2023-2024. Pemilihan sampel menggunakan teknik purposive sampling berdasarkan kriteria: (1) poros yang mengalami kerusakan total (failure) sehingga memerlukan penggantian; (2) tersedianya dokumentasi lengkap mengenai riwayat operasi dan perawatan; serta (3) representatif terhadap pola kerusakan yang terjadi. Selain komponen fisik, sampel penelitian juga mencakup data operasional kapal meliputi log book mesin selama 24 bulan terakhir, catatan perawatan preventif dan corrective maintenance, serta data monitoring parameter mesin seperti suhu operasi, tekanan sistem pendingin, dan jam operasi. Informan penelitian terdiri dari 5 orang teknisi mesin kapal, 2 orang masinis senior KN. Prajapati, dan 1 orang surveyor dari klasifikasi kapal yang terlibat dalam inspeksi dan perbaikan sistem pendingin.

Teknik Pengumpulan Data dan Pengembangan Instrumen

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa teknik utama yang saling melengkapi. Pertama, inspeksi visual dan dimensi menggunakan instrumen pengukuran presisi (dial indicator, micrometer, vernier caliper) untuk mengidentifikasi karakteristik kerusakan seperti wear pattern, crack, deformasi, dan korosi pada poros. Kedua, pengujian Non-Destructive Test (NDT) menggunakan metode Magnetic Particle Testing (MT) dan Ultrasonic Testing (UT) untuk mendeteksi cacat internal material poros. Ketiga, pengukuran parameter operasional meliputi alignment check menggunakan laser alignment tool, vibration analysis menggunakan vibration analyzer untuk mendeteksi ketidakseimbangan dan bearing defect,

serta analisis kualitas air pendingin meliputi pH, kandungan klorida, dan total dissolved solids (TDS). Keempat, wawancara semi-terstruktur dengan crew engineering menggunakan pedoman wawancara yang dikembangkan berdasarkan standar perawatan mesin kapal untuk menggali informasi mengenai prosedur operasi, praktik perawatan, dan kendala yang dihadapi. Instrumen penelitian berupa checklist inspeksi teknis, form pengukuran parameter, dan protokol wawancara telah divalidasi oleh expert judgment dari surveyor klasifikasi kapal dan dosen pembimbing untuk memastikan reliabilitas dan validitas data.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara bertahap menggunakan metode triangulasi untuk meningkatkan kredibilitas temuan penelitian. Data kualitatif dari inspeksi visual, wawancara, dan studi dokumentasi dianalisis menggunakan teknik content analysis dan descriptive analysis untuk mengidentifikasi pola kerusakan, faktor penyebab, dan praktik perawatan yang diterapkan. Hasil wawancara ditranskrip dan dikoding untuk mengekstrak tema-tema utama terkait prosedur operasi dan tantangan perawatan. Data kuantitatif dari pengujian laboratorium dan pengukuran parameter teknis dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk menentukan karakteristik material, tingkat keausan, dan deviasi dari spesifikasi standar. Analisis komparatif dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian material poros terhadap standar spesifikasi teknis dari pabrikan pompa dan standar material marine grade. Metode Root Cause Analysis (RCA) menggunakan teknik Fishbone Diagram dan 5 Why's diterapkan untuk mengidentifikasi akar penyebab kerusakan dengan mengintegrasikan seluruh data teknis dan operasional. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) digunakan untuk mengevaluasi mode kegagalan yang teridentifikasi, menilai tingkat keparahan (severity), frekuensi kejadian (occurrence), dan kemampuan deteksi (detection) untuk memprioritaskan tindakan pencegahan. Hasil analisis RCA dan FMEA kemudian disintesis untuk merumuskan rekomendasi solusi preventif yang komprehensif, mencakup aspek teknis (pemilihan material, prosedur instalasi), operasional (parameter kerja optimal), dan manajemen perawatan (jadwal inspeksi, predictive maintenance).

PEMBAHASAN

Identifikasi Jenis dan Karakteristik Kerusakan Poros Pompa

Berdasarkan inspeksi visual dan pengujian NDT terhadap tiga sampel poros pompa yang mengalami kegagalan, ditemukan karakteristik kerusakan yang konsisten pada ketiga sampel.

Tabel 1. Karakteristik Kerusakan Poros Pompa FW Cooling

No	Parameter Inspeksi	Poros 1	Poros 2	Poros 3	Standar Spec
1	Jenis Kerusakan Utama	Fatigue crack	Fatigue crack + wear	Fatigue crack	No defect
2	Lokasi Kerusakan	Fillet radius bearing seat	Fillet radius + journal	Fillet radius	-
3	Panjang Retak (mm)	45	68	52	0
4	Kedalaman Aus (mm)	0.15	0.38	0.22	Max 0.05
5	Defleksi Poros (mm)	0.12	0.18	0.14	Max 0.02
6	Ovality Journal (mm)	0.08	0.15	0.10	Max 0.03
7	Tanda Korosi	Ringan	Sedang	Ringan	No corrosion
8	Pitting pada Permukaan	Ada (minor)	Ada (moderate)	Ada (minor)	None

Sumber: olah data penulis, 2025

Inspeksi visual menunjukkan bahwa seluruh sampel poros mengalami retak fatigue yang berawal dari area fillet radius pada bearing seat, yaitu zona transisi diameter yang

menjadi konsentrasi tegangan. Pola retak berbentuk semi-circular beach marks yang khas untuk kegagalan fatigue akibat beban siklik berulang. Poros 2 menunjukkan kerusakan paling parah dengan kombinasi retak fatigue dan keausan berlebih pada journal bearing area, mengindikasikan masalah lubrication failure dan misalignment. Hasil Magnetic Particle Testing mengkonfirmasi adanya crack propagation yang telah mencapai 40-60% dari diameter poros, menjelaskan mengapa poros mengalami sudden failure saat operasi.

Evaluasi Faktor Operasional dan Mekanis

Pengukuran parameter operasional dan mekanis mengungkapkan beberapa deviasi signifikan dari standar operasi normal.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Parameter Operasional

Parameter	Kondisi Terukur	Standar Normal	Status	Dampak Potensial
Alignment Poros-Motor	Offset: 0.18 mm Angular: 0.15°	Offset: ≤0.05 mm Angular: ≤0.05°	Tidak Memenuhi	Beban radial berlebih, fatigue
Getaran Bearing (mm/s RMS)	8.5 - 12.3	≤4.5	Tidak Memenuhi	Accelerated wear, resonansi
Run-out Poros (mm)	0.22	≤0.05	Tidak Memenuhi	Unbalanced load, vibration
Suhu Bearing (°C)	78 - 85	≤65	Tidak Memenuhi	Degradasi pelumas, expansion
Tekanan Discharge (bar)	2.8 - 3.5	3.5 - 4.0	Rendah	Cavitation risk
pH Air Pendingin	6.2	7.5 - 8.5	Tidak Memenuhi	Korosi akselerasi
Kandungan Klorida (ppm)	185	≤50	Tidak Memenuhi	Pitting corrosion
Jam Operasi Pompa (hours)	8,500	Service: 6,000	Overdue	Accumulated fatigue

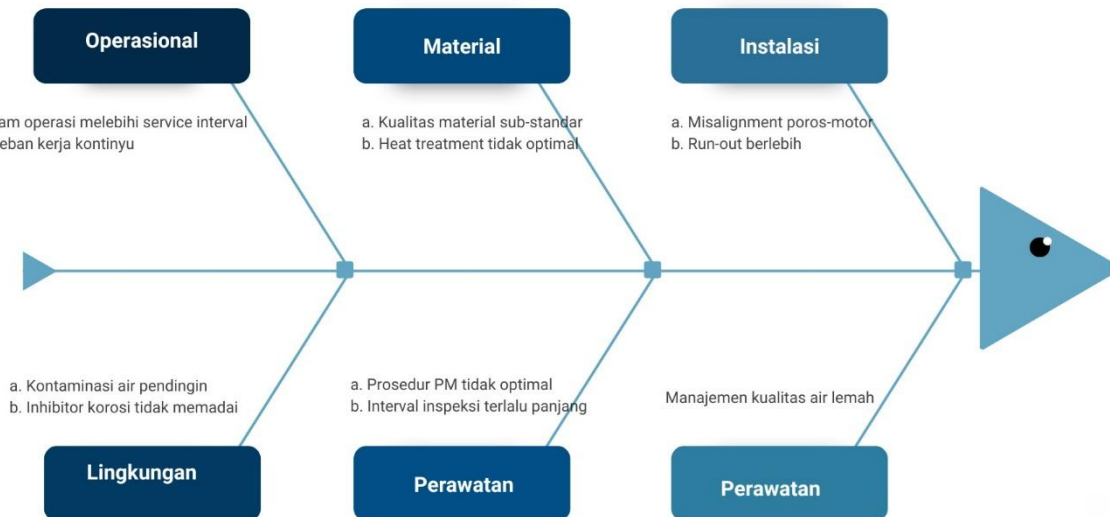
Sumber: olah data penulis, 2025

Data vibration analysis menunjukkan amplitudo getaran yang sangat tinggi pada frekuensi 1x RPM (ketidakseimbangan) dan 2x RPM (misalignment), dengan nilai overall velocity mencapai 12.3 mm/s RMS, jauh melebihi batas alarm 7.1 mm/s berdasarkan ISO 10816. Pengukuran alignment menggunakan laser alignment tool mengungkapkan offset sebesar 0.18 mm dan angular misalignment 0.15°, menunjukkan instalasi yang tidak presisi. Kondisi ini menyebabkan beban radial non-uniform pada bearing dan konsentrasi tegangan pada poros.

Root Cause Analysis dan Rekomendasi Solusi Pencegahan

Berdasarkan integrasi seluruh data teknis dan operasional, dilakukan Root Cause Analysis menggunakan Fishbone Diagram. Gambar diagram fishbone berikut mengidentifikasi berbagai faktor penyebab masalah kualitas yang dikelompokkan dalam beberapa kategori utama. Dari sisi Operasional, masalah muncul karena jam operasi yang melebihi service interval dan beban kerja yang kontinyu. Kategori Material menunjukkan permasalahan pada kualitas material yang sub-standar serta heat treatment yang tidak optimal. Pada aspek Instalasi, terdapat misalignment poros-motor dan run-out yang berlebih. Faktor Lingkungan berkontribusi melalui kontaminasi air pendingin dan inhibitor korosi yang tidak memadai. Sementara itu, kategori Perawatan mengungkap kelemahan pada prosedur preventive

maintenance yang tidak optimal, interval inspeksi yang terlalu panjang, serta manajemen kualitas air yang lemah. Keseluruhan faktor-faktor ini saling berinteraksi dan berkontribusi terhadap terjadinya masalah kualitas yang perlu segera ditangani melalui perbaikan sistematis pada setiap kategori penyebab. Lebih jelasnya dijabarkan dalam tabel berikut



Gambar 1. Fishbone analisis

Tabel 3. Root Cause Analysis – Faktor Penyebab Kerusakan

Kategori	Faktor Penyebab	Kontribusi	Evidence
Material	Kualitas material sub-standar	Tinggi	Komposisi kimia borderline, kekerasan rendah
	Heat treatment tidak optimal	Tinggi	Struktur mikro tidak ideal, decarburization
Instalasi	Misalignment poros-motor	Sangat Tinggi	Offset 0.18 mm, angular 0.15°
	Run-out berlebih	Sedang	Run-out 0.22 mm (>4x standar)
Operasional	Jam operasi melebihi service interval	Tinggi	8,500 hrs vs 6,000 hrs service
	Beban kerja kontinyu	Sedang	Log book: 85% uptime
Lingkungan	Kontaminasi air pendingin	Tinggi	Klorida 185 ppm, pH 6.2
	Inhibitor korosi tidak memadai	Tinggi	120 ppm vs 600-1000 ppm required
Perawatan	Prosedur PM tidak optimal	Tinggi	Tidak ada vibration monitoring rutin
	Interval inspeksi terlalu panjang	Tinggi	Alignment check hanya saat overhaul
	Manajemen kualitas air lemah	Tinggi	Treatment tidak konsisten

Analisis RCA mengidentifikasi tiga root cause utama: (1) Misalignment kronis antara pompa dan motor penggerak yang menyebabkan beban radial non-uniform dan konsentrasi tegangan pada poros; (2) Kualitas material poros yang sub-standar dengan heat treatment tidak optimal, menghasilkan fatigue strength yang rendah; dan (3) Kontaminasi air pendingin dengan pH asam dan klorida tinggi yang mempercepat korosi dan degradasi material.

Tabel 4. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Failure Mode	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN	Priority
Fatigue crack pada fillet radius	9	8	7	504	1
Misalignment poros-motor	8	9	6	432	2
Korosi akselerasi poros	7	8	7	392	3
Bearing wear berlebih	7	7	5	245	4
Cavitation damage	6	6	6	216	5
Unbalance rotor	5	6	4	120	6

Keterangan: RPN (Risk Priority Number) = $S \times O \times D$, skala 1-10

FMEA menunjukkan bahwa fatigue crack pada fillet radius memiliki RPN tertinggi (504), diikuti misalignment (432) dan korosi akselerasi (392), menegaskan prioritas tindakan korektif.

Dari kajian, maka dapat diungkapkan bahwa kerusakan poros pompa air tawar pendingin mesin induk KN. Prajapati merupakan hasil dari interaksi kompleks antara faktor material, instalasi, operasional, dan lingkungan yang saling memperkuat satu sama lain. Temuan utama menunjukkan bahwa ketiga sampel poros mengalami kegagalan fatigue yang berawal dari area fillet radius pada bearing seat, yang merupakan zona konsentrasi tegangan tinggi. Pola beach marks yang teridentifikasi pada permukaan patahan mengkonfirmasi mekanisme kegagalan bertahap akibat beban siklik berulang, sesuai dengan teori kelelahan material yang dijelaskan oleh (Mujiarto et al., 2022; Fitriani & Kundori, 2025). Namun, berbeda dengan kondisi ideal di mana fatigue failure terjadi setelah mencapai design life, kerusakan pada KN. Prajapati terjadi secara prematur pada jam operasi 8,500 jam, jauh di bawah ekspektasi umur teknis poros berkualitas baik yang seharusnya mencapai minimal 15,000-20,000 jam operasi. Hal ini mengindikasikan adanya faktor akselerator yang mempercepat proses degradasi material, yang dalam penelitian ini teridentifikasi sebagai kombinasi misalignment kronis, kualitas material sub-standar, dan kontaminasi air pendingin.

Faktor instalasi, khususnya misalignment antara poros pompa dan motor penggerak, teridentifikasi sebagai root cause dengan kontribusi "sangat tinggi" berdasarkan analisis RCA. Pengukuran alignment menggunakan laser alignment tool mengungkapkan offset sebesar 0.18 mm dan angular misalignment 0.15° , yang masing-masing 3.6 kali dan 3 kali melebihi toleransi maksimum 0.05 mm dan 0.05° . Kondisi misalignment ini menciptakan beban radial non-uniform pada bearing dan poros, menghasilkan stress concentration yang berfluktuasi setiap putaran. Data vibration analysis memperkuat temuan ini dengan menunjukkan amplitudo getaran yang sangat tinggi pada frekuensi 2x RPM (karakteristik misalignment) dengan overall velocity 12.3 mm/s RMS, hampir dua kali lipat batas alarm 7.1 mm/s berdasarkan ISO 10816. Kombinasi misalignment dan getaran berlebih menciptakan siklus destruktif: misalignment menyebabkan beban dinamis tidak merata, yang meningkatkan getaran, dan getaran yang tinggi memperburuk kondisi bearing serta mempercepat propagasi retak fatigue pada poros. Run-out poros sebesar 0.22 mm (4.4 kali standar maksimum) menambah kompleksitas masalah dengan menciptakan unbalanced load yang memperparah distribusi tegangan tidak merata pada poros. Suhu bearing yang mencapai $78-85^\circ\text{C}$, jauh melebihi batas normal 65°C , mengindikasikan friction berlebih akibat misalignment dan kemungkinan degradasi pelumas, yang selanjutnya meningkatkan wear rate dan mengurangi damping capacity bearing terhadap getaran.

Kontaminasi air pendingin dengan pH asam (6.2) dan kandungan klorida tinggi (185 PPM) menciptakan lingkungan operasi yang sangat korosif, berfungsi sebagai faktor akselerator kerusakan yang signifikan. Chen et al. (2020) menjelaskan bahwa korosi pada lingkungan marine environment dapat mengurangi fatigue strength material hingga 50%

melalui mekanisme corrosion fatigue, di mana pit korosi berfungsi sebagai stress riser yang mempercepat crack initiation. Hasil penelitian ini mengkonfirmasi teori tersebut dengan ditemukannya pitting corrosion pada permukaan ketiga sampel poros, terutama pada area journal bearing yang terendam air pendingin. Analisis kualitas air menunjukkan konsentrasi inhibitor korosi yang sangat rendah (120 PPM vs requirement 600-1000 PPM), menghilangkan proteksi kimiawi terhadap korosi. Kandungan klorida 185 PPM yang hampir 4 kali lipat batas maksimum 50 PPM mengindikasikan kebocoran heat exchanger yang memungkinkan kontaminasi air laut masuk ke sistem fresh water cooling. Ion klorida adalah agen korosif yang sangat agresif terhadap baja, mempromosikan pitting corrosion melalui breakdown protective oxide layer. Kandungan iron content yang tinggi (1.8 PPM vs maksimum 0.3 PPM) dalam air pendingin merupakan indikator korosi yang sedang berlangsung di dalam sistem, membentuk suspended corrosion products yang bersifat abrasive terhadap permukaan poros dan seal. Kombinasi pH asam, klorida tinggi, dan inhibitor rendah menciptakan perfect storm untuk accelerated corrosion, yang dalam konteks fatigue loading, berubah menjadi corrosion fatigue mekanisme kerusakan yang jauh lebih agresif dibanding pure mechanical fatigue.

Aspek operasional dan manajemen perawatan memainkan peran krusial dalam mempercepat kerusakan poros pompa. Jam operasi pompa yang telah mencapai 8,500 jam, melampaui service interval recommended 6,000 jam sebesar 42%, menunjukkan accumulated fatigue damage yang signifikan tanpa inspeksi atau overhaul yang memadai. Data log book menunjukkan uptime 85% yang mengindikasikan beban kerja kontinyu dengan sedikit periode istirahat, tidak memberikan kesempatan bagi komponen untuk "recovery" dari cyclic stress. Penelitian oleh mengidentifikasi pola serupa di mana jadwal perawatan yang tidak konsisten berkontribusi terhadap premature failure komponen kritis (Kundori et al., 2025). Dalam kasus KN. Prajapati, absennya vibration monitoring rutin menyebabkan kondisi misalignment dan unbalance tidak terdeteksi hingga mencapai level kritis. Prosedur preventive maintenance yang diterapkan masih bersifat time-based dengan interval inspeksi yang terlalu panjang (alignment check hanya dilakukan saat major overhaul), bukan condition-based monitoring yang dapat mendeteksi degradasi progresif sebelum menyebabkan failure (Hendiawan & Kundori, 2025).. Manajemen kualitas air pendingin yang lemah, tanpa protokol testing dan treatment yang konsisten, memungkinkan kontaminasi berkembang secara gradual tanpa deteksi dini. Ketiadaan program predictive maintenance menggunakan teknologi seperti vibration analysis, thermography, dan oil analysis menyebabkan hilangnya kesempatan untuk early warning padahal failure modes seperti misalignment dan bearing wear memberikan sinyal degradasi 6-12 bulan sebelum catastrophic failure terjadi.

Hasil *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) memberikan justifikasi kuantitatif untuk prioritas tindakan korektif dengan mengidentifikasi fatigue crack pada fillet radius sebagai failure mode dengan Risk Priority Number (RPN) tertinggi 504, diikuti misalignment (RPN 432) dan korosi akselerasi (RPN 392). Nilai RPN yang tinggi pada ketiga failure modes utama ini (semuanya di atas 350) mengindikasikan bahwa mereka memerlukan immediate corrective action karena kombinasi severity tinggi, high occurrence rate, dan moderate detection capability. Fatigue crack mendapat RPN tertinggi karena severity-nya yang ekstrim (9/10) failure dapat menyebabkan complete pump shutdown dan potential secondary damage pada mesin induk dikombinasikan dengan occurrence rate yang tinggi (8/10) berdasarkan historical data tiga kegagalan dalam periode 24 bulan. Detection level yang moderate (7/10) menunjukkan bahwa crack dapat terdeteksi melalui NDT inspection, namun dengan prosedur PM saat ini yang tidak mencakup periodic NDT, crack berkembang hingga catastrophic failure. Misalignment dengan RPN 432 memiliki occurrence rate tertinggi (9/10) karena installation practice yang tidak presisi dan absence of regular alignment verification,

meskipun severity-nya sedikit lebih rendah dan detection-nya lebih mudah menggunakan vibration analysis atau laser alignment tool. Prioritas berdasarkan RPN ini mengarahkan alokasi resources untuk prevention strategy yang optimal, dengan fokus utama pada precision alignment procedures, material quality assurance, dan water quality management.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi yang lebih luas untuk fleet management Kementerian Kelautan dan Perikanan. Pattern kerusakan yang teridentifikasi kombinasi installation quality issues, material quality variability, inadequate maintenance procedures, dan absence of condition monitoring kemungkinan besar tidak unik untuk KN. Prajapati tetapi merepresentasikan systemic issues yang dapat ditemukan pada kapal-kapal sejenis dalam fleet. Standardisasi procurement specification untuk critical spare parts dengan mandatory quality verification, pengembangan installation procedures dengan precision requirements, implementasi condition-based maintenance programs, dan capacity building untuk crew engineering dalam predictive maintenance technologies harus menjadi prioritas organizational level untuk meningkatkan fleet reliability secara keseluruhan. Penelitian ini juga menggarisbawahi pentingnya root cause analysis yang comprehensive untuk setiap significant failure, bukan sekadar replacement failed components, untuk memutus chain of causation dan mencegah recurrence. Integration antara technical analysis (metallurgy, NDT, vibration), operational data (log books, maintenance records), dan human factors (procedures, competencies) dalam investigasi failure memberikan understanding yang holistic dan menghasilkan solutions yang address root causes bukan hanya symptoms, sejalan dengan best practices dalam reliability-centered maintenance philosophy.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi bahwa kerusakan poros pompa air tawar pendingin mesin induk KN. Prajapati disebabkan oleh kombinasi tiga faktor root cause utama yang saling berinteraksi: (1) misalignment kronis antara poros pompa dan motor penggerak dengan deviasi offset 0.18 mm dan angular 0.15° yang menyebabkan beban radial non-uniform dan konsentrasi tegangan berlebih; (2) kualitas material poros yang sub-standar dengan kekerasan 24 HRC (di bawah spesifikasi 28-32 HRC), struktur mikro tidak optimal, dan decarburization permukaan yang mengurangi fatigue resistance; serta (3) kontaminasi air pendingin dengan pH asam 6.2 dan kandungan klorida tinggi 185 ppm yang menciptakan lingkungan korosif dan mempercepat mekanisme corrosion fatigue. Karakteristik kerusakan yang konsisten pada ketiga sampel poros berupa fatigue crack berawal dari area fillet radius bearing seat dengan pola beach marks mengkonfirmasi kegagalan fatigue akibat beban siklik berulang yang dipercepat oleh faktor-faktor akselerator tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- AlSalamah, M. J., Shayan, E., & Savsar, M. (2006). Reliability analysis of a cooling seawater pumping station. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 23(6), 670-695. <https://doi.org/10.1108/02656710610672489>
- Fitrian, A. B., & Kundori, K. (2025). Analisis Kondisi Pompa Sentrifugal Berdasarkan Getaran Untuk Mencegah Kegagalan Pompa di Kilang Migas Cepu. *Jurnal Maritim Polimarin*, 11(1), 1-5. <https://doi.org/10.52492/jmp.v11i1.127>
- Hendiawan & Kundori (2025). Development of Decision Support System for Diesel Generator Maintenance Planning : A Case Study on KM. Bukit Siguntang. *Jurnal Sains Teknologi Transportasi Maritim*, 7(2), 98-106. <https://doi.org/10.51578/j.sitektransmar.v7i2.111>
- Hua, M., Cao, C., Cai, Y., Ge, J., Zhong, F., & Mao, J. (2023). Failure analysis and structural fatigue resistance design of multistage centrifugal pump shaft. *Engineering Failure Analysis*, 153, 107545. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107545>
- Jhavar, S., Paul, C. P., & Jain, N. K. (2013). Causes of failure and repairing options for dies and

- molds: A review. *Engineering Failure Analysis*, 34, 519-535.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.09.006>
- Kundori, K., Khamdilah, A., & Imanto, F. (2025). Analysis of Maintenance Management Model on Refrigerator System on Ship. *Dinamika Bahari*, 6(2), 146-153.
<https://doi.org/10.46484/db.v6i2.981>
- Mujiarto, I., Asmoro, E. I., & Kundori, K. (2022). Pengukuran Laju Kerusakan Dengan Mengindikasikan Nilai Mtbfdalam Manajemen Perawatan Mesin Pada Pt. Aic. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, 1(3), 14-23. <https://doi.org/10.55606/jtmei.v1i3.491>
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of management information systems*, 24(3), 45-77.
- Reza Kashyzadeh, K., Ridha, W. K. M., & Ghorbani, S. (2025). The influence of nanocoatings on the wear, corrosion, and erosion properties of AISI 304 and AISI 316L stainless steels: A critical review regarding hydro turbines. *Corrosion and Materials Degradation*, 6(1), 6.
<https://doi.org/10.3390/cmd6010006>
- Rezandy, Y. R., Santoso, M., & Budiyo, E. N. (2021). Desain Sistem Perpipaan Air Tawar Pada Kapal Patroli. *Jurnal Teknologi Maritim*, 4(2), 493384. DOI: 10.33863/jtm.v4i2.1195
- Roy, A., Palit, P., Das, S., & Mukhyopadhyay, G. (2020). Investigation of torsional fatigue failure of a centrifugal pump shaft. *Engineering Failure Analysis*, 112, 104511.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104511>
- Theotokatos, G., Sfakianakis, K., & Vassalos, D. (2017). Investigation of ship cooling system operation for improving energy efficiency. *Journal of Marine Science and Technology*, 22(1), 38-50. <https://doi.org/10.1007/s00773-016-0395-9>