

Analisis Kegagalan Sistem Kontrol Pitch Propeller pada Kapal MT. Transko Aquila Menggunakan Metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Anton Hidayatullah*, Bagiyo Suwasono, Rodlitul Awwalin Universitas Hangtuah, Indonesia

Email: anton_jokam@yahoo.com*

Abstrak

Sistem Controllable Pitch Propeller (CPP) merupakan teknologi propulsi kapal yang krusial dalam mendukung manuver presisi, terutama di pelabuhan sempit tanpa bantuan kapal tunda. Penelitian ini mengkaji kegagalan sistem CPP pada kapal MT. Transko Aquila selama olah gerak di pelabuhan TBBM Pertamina Reo, NTT, dengan fokus pada identifikasi faktor teknis, operasional, dan manajerial yang memengaruhi keandalan sistem. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi dampak kegagalan terhadap efisiensi operasional dan keselamatan pelayaran, serta merumuskan rekomendasi berbasis data untuk peningkatan sistem. Metode yang digunakan adalah pendekatan deskriptif kualitatif dengan teknik observasi langsung, wawancara kru kapal, studi dokumentasi, dan analisis Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Analisis dilakukan terhadap sepuluh komponen kritis sistem CPP, dengan penilaian berdasarkan tingkat keparahan (Severity), frekuensi kejadian (Occurrence), dan kemampuan deteksi (Detection). Hasil penelitian menunjukkan bahwa mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi terjadi pada mekanisme kontrol pitch (RPN = 216), pompa hidrolik (RPN = 200), dan sistem pendingin oli (RPN = 128). Gangguan yang teridentifikasi meliputi pitch reversal tak diinginkan, penurunan tekanan hidrolik, keterlambatan respons sistem kontrol, dan penurunan RPM mesin utama. Dampaknya mencakup penundaan sandar ± 3 jam, peningkatan risiko tabrakan, dan aktivasi protokol keselamatan darurat. Pendekatan FMEA terbukti efektif dalam memberikan peta risiko yang komprehensif, mendukung pengambilan keputusan teknis, dan meningkatkan keandalan sistem propulsi kapal secara menyeluruh.

Kata Kunci: Controllable Pitch Propeller, FMEA, Risk Priority Number, Sistem Propulsi, Keselamatan Maritim

Abstract

The Controllable Pitch Propeller (CPP) system is a crucial ship propulsion technology in supporting precision maneuvers, especially in narrow harbors without the assistance of tugboats. This study examines the failure of the CPP system on MT ships. Transko Aquila during the movement at Pertamina Reo's TBBM port, NTT, focusing on identifying technical, operational, and managerial factors that affect system reliability. The purpose of the study was to evaluate the impact of failures on operational efficiency and shipping safety, as well as to formulate data-driven recommendations for system improvement. The methods used are a qualitative descriptive approach with direct observation techniques, crew interviews, documentation studies, and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) analysis. Analysis was carried out on ten critical components of the CPP system, with assessments based on severity, frequency of occurrence, and detection ability. The results showed that the failure mode with the highest RPN value occurred in the pitch control mechanism (RPN = 216), hydraulic pump (RPN = 200), and oil cooling system (RPN = 128). Faults identified include undesirable pitch reversal, decreased hydraulic pressure, delayed control system response, and decreased

Analisis Kegagalan Sistem Kontrol Pitch Propeller pada Kapal MT. Transko Aquila Menggunakan Metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

RPM of the main engine. The impact includes a ± 3 -hour delay in docking, increased risk of collisions, and activation of emergency safety protocols. The FMEA approach has proven effective in providing comprehensive risk maps, supporting technical decision-making, and improving the reliability of the ship's propulsion system overall.

Kata Kunci: Controllable Pitch Propeller, FMEA, Risk Priority Number, Sistem Propulsi, Keselamatan Maritim

PENDAHULUAN

Industri maritim saat ini mengalami perkembangan pesat untuk memenuhi tuntutan transportasi dan perdagangan global. Berdasarkan laporan International Chamber of Shipping (ICS), sekitar 90% perdagangan dunia dilakukan melalui jalur laut, yang menekankan pentingnya efisiensi sistem propulsi seperti Controllable Pitch Propeller (CPP) (Geertsma, Negenborn, Visser, & Hopman, 2020). Penggunaan CPP dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi bahan bakar kapal hingga 15% dibandingkan baling-baling tetap dalam kondisi tertentu (Yang, Chen, Wang, Liu, & Li, 2023).

Sistem Controllable Pitch Propeller (CPP) merupakan salah satu inovasi penting dalam teknologi propulsi kapal yang memungkinkan pengaturan sudut bilah baling-baling secara fleksibel, bahkan saat baling-baling berputar (Na'maikalatif, 2022). Teknologi ini sangat berperan dalam meningkatkan efisiensi energi dan memberikan fleksibilitas tinggi, terutama dalam manuver kapal di pelabuhan yang memerlukan kecepatan respons dan akurasi tinggi (PT. PTK, 2020).

Namun, meskipun sistem CPP menawarkan keunggulan dalam efisiensi bahan bakar dan kemampuan manuver, sistem ini tidak terlepas dari potensi kegagalan (Murawski & Ostachowicz, 2020). Berdasarkan penelitian terbaru, kegagalan pada sistem CPP sering kali terjadi karena gangguan hidrolis (30%), kesalahan kontrol perangkat lunak (25%), dan malfungsi mekanis (20%). Kegagalan sistem propulsi pada kapal dapat berdampak pada kerugian ekonomi yang signifikan, dengan potensi kerugian biaya hingga ribuan dolar per hari akibat penundaan operasional (ICS, 2020; IMO, 2020).

Pelabuhan TBBM Pertamina REO merupakan salah satu lokasi penting dalam distribusi bahan bakar minyak di Indonesia (Chariri, 2021; Fadli, 2021; Garbatov dan Guedes Soares, 2019). Kapal-kapal yang beroperasi di pelabuhan ini sering kali menghadapi tantangan dalam manuver tanpa bantuan kapal tunda, sehingga keandalan sistem CPP menjadi faktor kritis dalam memastikan kelancaran operasional (Martins dan Maturana, 2013). Kapal MT. Transko Aquila, sebagai kapal tanker yang mengangkut BBM untuk distribusi regional, pernah mengalami kegagalan sistem CPP yang menyebabkan gangguan operasional signifikan, termasuk penundaan bongkar muat dan peningkatan risiko keselamatan (Kumar & Singh, 2018).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menyoroti pentingnya keandalan sistem propulsi kapal dalam meningkatkan efisiensi operasional. Misalnya, Lee et al. (2018) meneliti kegagalan sistem CPP pada kapal komersial dan menemukan bahwa gangguan hidrolis dan malfungsi mekanis menjadi

penyebab utama kerusakan, namun penelitian ini terbatas pada data kapal berbendera internasional dan tidak mempertimbangkan kondisi spesifik pelabuhan lokal di Indonesia, di mana manuver kapal sering dilakukan tanpa bantuan kapal tunda. Sementara itu, Zhang & Wang (2020) menekankan penggunaan FMEA dalam mengidentifikasi potensi kegagalan sistem propulsi, tetapi studi tersebut lebih bersifat teoretis dan kurang memberikan rekomendasi aplikatif terkait mitigasi risiko operasional di kapal tanker pengangkut BBM yang beroperasi di lingkungan pelabuhan yang padat dan kompleks.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab kegagalan sistem CPP menggunakan metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), yang memungkinkan pemetaan potensi kegagalan berdasarkan tingkat keparahan, frekuensi kejadian, dan kemampuan deteksi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi aplikatif untuk meningkatkan keandalan sistem CPP dan mendukung peningkatan efisiensi serta keselamatan operasional kapal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan metode studi kasus pada kapal MT. Transko Aquila selama periode Desember 2020 hingga Juli 2021. Lokasi penelitian dilaksanakan di atas kapal MT. Transko Aquila dan pelabuhan TBBM Pertamina REO, NTT (Sugiyono, 2017).

Pengumpulan Data

Data primer diperoleh melalui:

1. Observasi langsung terhadap sistem CPP dan komponen-komponennya.
2. Wawancara mendalam dengan Chief Engineer, Third Engineer, Fourth Engineer, dan Oiler kapal MT. Transko Aquila
3. Dokumentasi operasional dan log kegagalan sistem

Data sekunder diperoleh dari manual book sistem CPP, dokumentasi teknis kapal, dan literatur terkait reliability engineering dan sistem propulsi kapal.

Analisis FMEA

Analisis dilakukan menggunakan metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) dengan tahapan:

1. Identifikasi Komponen Kritis: Mengidentifikasi sepuluh komponen utama sistem CPP yang memiliki peran vital dalam operasi sistem
2. Identifikasi Mode Kegagalan: Menentukan berbagai kemungkinan kegagalan untuk setiap komponen
3. Penilaian Risiko: Memberikan skor untuk setiap mode kegagalan berdasarkan tiga parameter:
 - a) Severity (S): Tingkat keparahan dampak kegagalan (skala 1-10)

- b) Occurrence (O): Frekuensi kemungkinan terjadinya kegagalan (skala 1-10)
- c) Detection (D): Kemampuan mendeteksi kegagalan sebelum terjadi (skala 1-10)
- 4. Perhitungan RPN: Risk Priority Number = $S \times O \times D$
- 5. Prioritasi Risiko: Mengurutkan komponen berdasarkan nilai RPN untuk menentukan prioritas tindakan perbaikan

Analisis Data

Data yang terkumpul dianalisis secara deskriptif kualitatif dengan fokus pada identifikasi pola kegagalan, evaluasi dampak operasional, dan formulasi rekomendasi perbaikan sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum Sistem CPP Kapal MT. Transko Aquila

Kapal MT. Transko Aquila merupakan kapal tanker berukuran kecil yang mengangkut BBM untuk distribusi regional di wilayah Indonesia Timur. Sistem Controllable Pitch Propeller (CPP) pada kapal ini terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi: panel kontrol di bridge, unit kontrol elektronik, aktuator hidrolik, sistem sensor dan monitoring, serta propeller dan hub mekanis. Sistem ini memungkinkan kapal untuk bergerak maju atau mundur tanpa mengubah arah putaran mesin, melakukan manuver presisi saat sandar, menghemat bahan bakar dengan pengaturan pitch optimal, dan sandar tanpa bantuan kapal tunda.

Identifikasi Komponen Kritis Sistem CPP

Berdasarkan analisis struktural dan fungsional, sepuluh komponen utama sistem CPP telah diidentifikasi sebagai elemen kritis yang memerlukan evaluasi mendalam. Komponen-komponen ini dipilih berdasarkan peran vital dalam operasi sistem dan potensi dampak kegagalannya terhadap performa kapal secara keseluruhan.

Tabel 1. Komponen Kritis Sistem CPP dan Fungsi Utamanya

No	Komponen Utama CPP	Sub-Komponen / Fungsi Kritis
1	Pitch Control Mechanism	Servo valve, actuator, pitch feedback sensor
2	Hydraulic Power Unit	Pompa hidrolik, reservoir, filter, pressure relief valve
3	PLC Control System	Programmable logic controller, interface panel
4	Oil Cooling System	Heat exchanger, temperature sensor
5	Shaft & Propeller Assembly	Shaft bearing, blade pitch linkage
6	Monitoring & Alarm System	Sensor array, alarm logic, display unit
7	Control Valve	Flow control, pressure regulation
8	Feedback Sensor	Position feedback, signal transmission
9	Propeller Hub	Blade mounting, pitch mechanism housing
10	Pressure Relief Valve	Overpressure protection, system safety

Deskripsi Kasus Kegagalan dan Indikator Kritis

Pada periode penelitian, kapal MT. Transko Aquila mengalami kegagalan sistem CPP saat melakukan manuver sandar di Terminal Bahan Bakar Minyak (TBBM) Reo, NTT. Kegagalan sistem ini terjadi ketika kapal hendak melakukan penyesuaian sudut pitch baling-baling untuk mengatur kecepatan dan arah gerak, namun sistem tidak merespon perintah yang diberikan oleh operator secara semestinya (American Bureau of Shipping [ABS], 2021).

Tabel 2. Indikator Kegagalan Sistem CPP dan Data Pendukung

No	Indikator Kegagalan	Data Pendukung	Dampak Operasional
1	Ketidaksesuaian rasio sudut pitch terhadap olah gerak kapal	Sudut pitch ditetapkan pada $+15^\circ$, namun kecepatan kapal tetap tinggi (2.5 knot), padahal seharusnya turun ke <1 knot	Kesulitan kontrol kecepatan
2	Pitch reversal tidak diinginkan	Sudut pitch berubah dari $+10^\circ$ ke -5° dalam 3 detik tanpa perintah operator	Kehilangan kendali arah
3	Penurunan tekanan hidrolik	Tekanan turun dari 180 bar ke 90 bar saat manuver, menyebabkan aktuatur tidak responsif	Gangguan respons sistem
4	Delay respons sistem kontrol	Waktu respons sistem terhadap input operator >5 detik, normalnya <1 detik	Manuver tidak presisi
5	Penurunan RPM mesin utama	RPM turun dari 800 ke 500 tanpa perubahan throttle, menunjukkan beban abnormal	Penurunan performa propulsi

Kronologi dan Dampak Kegagalan

Kegagalan sistem CPP terdeteksi saat kapal sedang melakukan manuver pengurangan kecepatan menjelang proses sandar di dermaga. Operator mencoba mengubah sudut pitch ke posisi netral untuk mengurangi gaya dorong, namun sistem menunjukkan respons yang lambat dan bahkan sempat mengalami pitch reversal yang tidak diinginkan. Akibatnya, posisi kapal menjadi tidak stabil dan berisiko menabrak struktur dermaga.

Investigasi awal menunjukkan bahwa sinyal dari sistem kontrol tidak diteruskan secara efektif ke aktuatur, sehingga sudut pitch tidak berubah sesuai perintah. Hal ini mengindikasikan adanya gangguan pada jalur komunikasi antara kontrol elektronik dan sistem hidrolik. Dampak yang timbul meliputi penundaan proses sandar selama ± 3 jam, risiko kerusakan lambung kapal akibat kedekatan dengan struktur dermaga, dan aktivasi protokol keselamatan oleh kru kapal dan pelabuhan.

Hasil Analisis FMEA

Analisis Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) dilakukan menggunakan pendekatan sistematis dengan mengevaluasi setiap komponen berdasarkan tiga parameter kritis: Severity (S) yang menunjukkan tingkat

Analisis Kegagalan Sistem Kontrol Pitch Propeller pada Kapal MT. Transko Aquila Menggunakan Metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

keparahan dampak kegagalan, Occurrence (O) yang menggambarkan frekuensi kemungkinan terjadinya kegagalan, dan Detection (D) yang mengukur kemampuan mendeteksi kegagalan sebelum terjadi. Risk Priority Number (RPN) dihitung menggunakan rumus:

$$\text{RPN} = \text{Severity (S)} \times \text{Occurrence (O)} \times \text{Detection (D)}$$

Tabel 3. Hasil Analisis FMEA Komponen Sistem CPP

No	Komponen	Mode Kegagalan	Penyebab Potensial	Efek Kegagalan	S	O	D	RPN
1	Pitch Control Mechanism	Aktuator macet, servo valve rusak	Kontaminasi oli, keausan komponen, overload	Pitch tidak responsif, thrust menurun	9	6	4	216
2	Hydraulic Pump	Penurunan tekanan, kebocoran oli	Seal rusak, cavitasi, keausan impeller	Tekanan hidrolik tidak stabil	8	5	5	200
3	Oil Cooling System	Kontaminasi oli, overheating	Filter tersumbat, heat exchanger kotor	Kualitas oli menurun, sistem overheat	8	4	4	128
4	Control Valve	Katup macet, respons lambat	Kotoran, keausan seat valve	Flow tidak terkontrol	6	4	4	96
5	PLC Controller	Error logika kontrol, sensor rusak	Gangguan software, kerusakan hardware	Sinyal kontrol tidak akurat	5	4	4	80
6	Feedback Sensor	Data tidak akurat, delay sinyal	Kalibrasi rusak, interferensi listrik	Informasi posisi pitch salah	4	4	4	64
7	Propeller Hub	Keausan bearing, misalignment	Fatigue material, beban berlebih	Vibrasi, noise, efisiensi menurun	7	3	3	63
8	Shaft Seal	Kebocoran, kontaminasi sistem	Keausan seal, tekanan berlebih	Air masuk sistem, oli terkontaminasi	6	3	3	54
9	Pressure Relief Valve	Kalibrasi tidak tepat, macet	Setting pressure salah, kotoran	Tekanan sistem tidak terkontrol	5	3	3	45
10	Alarm System	False alarm, delay notifikasi	Sensor rusak, software error	Operator tidak mendapat peringatan dini	3	3	3	27

Analisis Distribusi Risiko berdasarkan Nilai RPN

Berdasarkan perhitungan RPN, distribusi risiko komponen sistem CPP dapat dikategorikan menjadi tiga level:

1. Risiko Tinggi (RPN > 150):

Pitch Control Mechanism (RPN = 216)

Hydraulic Pump (RPN = 200)

2. Risiko Sedang (RPN 100-150):

Oil Cooling System (RPN = 128)

3. Risiko Rendah hingga Sedang (RPN < 100):

Control Valve (96), PLC Controller (80), Feedback Sensor (64), Propeller Hub (63), Shaft Seal (54), Pressure Relief Valve (45), Alarm System (27)

Evaluasi Faktor Teknis, Operasional, dan Manajerial

Faktor Teknis

Analisis menunjukkan bahwa faktor teknis dominan meliputi kontaminasi oli pada sistem hidrolis, keausan komponen akibat operasi kontinyu, dan gangguan pada jalur sinyal kontrol elektronik. Pitch Control Mechanism sebagai komponen dengan RPN tertinggi mengalami kegagalan akibat kombinasi kontaminasi oli dan keausan servo valve yang menyebabkan respons aktuator menjadi lambat atau tidak responsif sama sekali.

Faktor Operasional

Faktor operasional yang berpengaruh meliputi intensitas operasi kapal yang tinggi, kondisi lingkungan laut yang korosif, dan variabilitas beban operasional selama manuver. Sistem CPP pada MT. Transko Aquila mengalami stress operasional yang tinggi karena seringnya melakukan manuver tanpa bantuan kapal tunda di pelabuhan TBBM Reo.

Faktor Manajerial

Faktor manajerial mencakup keterbatasan program pemeliharaan preventif, kurangnya monitoring berbasis kondisi, dan minimnya pelatihan teknis crew terhadap penanganan kegagalan sistem CPP. Tidak adanya sistem monitoring real-time menyebabkan degradasi komponen tidak terdeteksi secara dini.

Dampak Kegagalan terhadap Efisiensi Operasional dan Keselamatan

Dampak terhadap Efisiensi Operasional

Kegagalan sistem CPP berdampak signifikan terhadap efisiensi operasional kapal, meliputi:

1. Penundaan jadwal sandar rata-rata 3 jam per kejadian
2. Peningkatan konsumsi bahan bakar hingga 20% akibat ketidakoptimalan pitch
3. Gangguan rantai distribusi BBM regional
4. Biaya operasional tambahan untuk perbaikan darurat

Dampak terhadap Keselamatan Pelayaran

Aspek keselamatan yang terpengaruh mencakup:

1. Peningkatan risiko tabrakan dengan dermaga atau kapal lain
2. Kesulitan manuver dalam ruang pelabuhan yang terbatas
3. Aktivasi protokol keselamatan darurat
4. Potensi kerusakan infrastruktur pelabuhan

Validasi Hasil dengan Kajian Teoritis

Hasil penelitian ini konsisten dengan teori reliability engineering yang menyatakan bahwa sistem kompleks seperti CPP memiliki interdependensi tinggi antar komponen. Menurut Stopford (2018), sistem propulsi yang kehilangan respons optimal dapat berdampak pada efisiensi bahan bakar hingga 10%, yang sejalan dengan temuan penelitian ini yang menunjukkan peningkatan konsumsi bahan bakar hingga 20% saat terjadi kegagalan sistem.

Efisiensi sistem CPP sangat bergantung pada integrasi fungsional antara sistem kontrol elektronik, mekanisme penggerak hidrolik, dan komponen mekanis. Ketidakseimbangan atau kegagalan pada satu subsistem dapat menyebabkan penurunan performa propulsi kapal secara keseluruhan, sebagaimana dikonfirmasi oleh data operasional yang menunjukkan penurunan RPM mesin utama dari 800 ke 500 tanpa perubahan throttle.

Perbandingan dengan Studi Sebelumnya

Penelitian oleh Yamamoto et al. (2020) menunjukkan bahwa sistem CPP yang dilengkapi dengan sensor prediktif dan modul pemrosesan data real-time berhasil menurunkan potensi kegagalan hingga 40%. Studi tersebut sejalan dengan temuan penelitian ini bahwa pendekatan berbasis FMEA sangat efektif dalam mengenali dan mengurangi risiko pada sistem propulsi.

Kumar dan Singh (2018) dalam penelitiannya terhadap marine propulsion systems menggunakan pendekatan FMEA juga menemukan bahwa komponen hidrolik dan kontrol pitch merupakan area dengan risiko tertinggi, yang konsisten dengan hasil penelitian ini dimana Pitch Control Mechanism dan Hydraulic Pump memiliki nilai RPN tertinggi (Dokumentasi Operasional CPP, 2020–2021).

Dibandingkan dengan sistem CPP konvensional yang bergantung pada inspeksi manual, sistem berbasis sensor prediktif menawarkan akurasi lebih tinggi serta meningkatkan keandalan operasional kapal. Perbandingan ini mendukung arah rekomendasi implementasi teknologi monitoring lanjutan pada armada kapal niaga di masa depan.

Formulasi Rekomendasi Berbasis Data FMEA

Berdasarkan hasil analisis FMEA dan evaluasi dampak operasional, strategi perbaikan sistem disusun dengan prioritas berdasarkan nilai RPN:

1. Prioritas Tinggi (RPN > 150)

Pitch Control Mechanism: Implementasi condition-based monitoring dengan sensor posisi dan tekanan, upgrade material servo valve tahan korosi, instalasi sistem bypass manual

Hydraulic Pump: Penerapan sistem monitoring tekanan real-time, peningkatan frekuensi penggantian seal, instalasi pompa backup

2. Prioritas Sedang (RPN 100-150)

Oil Cooling System: Upgrade heat exchanger dengan material tahan fouling, instalasi sistem filtrasi berlapis, implementasi monitoring kualitas oli otomatis

3. Prioritas Rendah hingga Sedang (RPN < 100)

Kalibrasi berkala sistem kontrol dan sensor

Perawatan preventif terjadwal sesuai jam operasi

Pelatihan crew untuk response kegagalan sistem

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi faktor-faktor kritis yang berkontribusi terhadap kegagalan sistem Controllable Pitch Propeller (CPP) pada kapal MT. Transko Aquila menggunakan metode FMEA. Hasil analisis menunjukkan bahwa Pitch Control Mechanism (RPN = 216), Hydraulic Pump (RPN = 200), dan Oil Cooling System (RPN = 128) merupakan komponen dengan prioritas risiko tertinggi yang memerlukan perhatian khusus dalam program pemeliharaan. Kegagalan sistem CPP berdampak signifikan terhadap keselamatan operasional, efisiensi pelayaran, dan aspek ekonomi, dengan penundaan operasional hingga 3 jam dan peningkatan risiko tabrakan. Pendekatan FMEA terbukti efektif dalam memberikan peta risiko komprehensif dan mendukung formulasi strategi pemeliharaan berbasis data. Rekomendasi perbaikan mencakup implementasi condition-based monitoring, perawatan preventif terjadwal, kalibrasi sistem kontrol, peningkatan kualitas oli, upgrade material komponen kritis, dan digitalisasi dokumentasi pemeliharaan. Implementasi rekomendasi ini diharapkan dapat meningkatkan keandalan sistem CPP, mengurangi risiko kegagalan operasional, dan mendukung efisiensi serta keselamatan pelayaran kapal tanker di pelabuhan dengan kondisi manuver yang menantang seperti TBBM Pertamina REO.

REFERENSI

- American Bureau of Shipping (ABS). (2021). Technical Guidelines on Propulsion Systems. Houston: ABS Publications.
- Chariri, A. (2021). Penelitian Kualitatif dalam Praktik Manajemen. Dalam Fadli, M. (2021).
- Dokumentasi Operasional CPP Kapal MT. Transko Aquila. (2020-2021).
- Fadli, M. (2021). Konsep Penelitian Kualitatif dalam Studi Pendidikan. Jakarta: Pustaka Ilmu.

- Garbatov, Y., & Guedes Soares, C. (2019). Failure analysis in marine systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3), 65-78.
- Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K., & Hopman, J. J. (2020). Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110366. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110366>
- International Chamber of Shipping (ICS). (2020). Maritime Trade Statistics. London: ICS Publications.
- International Maritime Organization (IMO). (2020). Guidelines for Maritime Safety. London: IMO Publications.
- Islam, R., & Martin, S. (2025). A reliability assessment of a vessel's main propulsion engine. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1278. <https://doi.org/10.3390/jmse13071278>
- Kristensen, H.O., & Lützen, M. (2019). Prediction of resistance and propulsion power of ships. Project report, Technical University of Denmark.
- Kudryavtsev, A., Saed, A., & Johnsen, S. O. (2024). Systems reliability and data driven analysis for marine machinery maintenance planning and decision making. *Machines*, 12(5), 294. <https://doi.org/10.3390/machines12050294>
- Kumar, S., & Singh, R. (2018). Reliability analysis of marine propulsion systems using FMEA approach. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 9(2), 340-352.
- Li, S., Liu, J., Zhao, Y., Wang, X., & Zhang, H. (2023). Ship voyage optimization based on fuel consumption under various operational conditions. *Fuel*, 342, 127798. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127798>
- Martins, M. R., & Maturana, M. C. (2013). Application of Bayesian belief networks to the human reliability analysis of an oil tanker operation focusing on collision accidents. *Reliability Engineering & System Safety*, 110, 89-109. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.09.008>
- Murawski, L., & Ostachowicz, W. (2020). Marine propulsion system failures—A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), 662. <https://doi.org/10.3390/jmse8090662>
- Na'maikalatif. (2022). Identifikasi kegagalan monitoring dan pengontrolan controllable pitch propeller pada saat manuver di kapal MT.Transko Aquila. Semarang: Teknika.
- PT. PTK. (2020). Manual Book Sistem Controllable Pitch Propeller (CPP) di Kapal MT. Transko Aquila.
- Stopford, M. (2018). Maritime Economics 3rd Edition. London: Routledge.
- Sugiyono. (2017). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta.
- Yamamoto, K., Tanaka, H., & Suzuki, M. (2020). Predictive maintenance system for controllable pitch propellers using IoT sensors. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(4), 201-215.

Yang, X., Chen, G., Wang, H., Liu, Y., & Li, Z. (2023). Reliability and availability evaluation on hydraulic system of ship controllable pitch propeller based on evidence theory and dynamic Bayesian network. *Ocean Engineering*, 275, 114153. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114153>