

Analisis Penggantian *Diesel Generator* KRI Bima Suci Berdasarkan Kriteria Teknis Alternatif Pemeliharaan dan Dampaknya Pada Kesiapan Pelayaran Muhibah Diplomasi

Panji Asmoro^{1*}, Mohammad Ali Nugroho², Ugik Cahyono³, Didi Efendi⁴, Maswir⁵

^{1,2,3,4,5} Sekolah Staf dan Komando Angkatan Laut, Jakarta Selatan

*Penulis Korespondensi, email: panjias91@gmail.com

Received: 04/01/2026

Revised: 14/02/2026

Accepted: 14/02/2026

Abstract. The KRI Bima Suci serves a critical dual role as an Indonesian Naval Academy (AAL) training ship and a maritime diplomacy ambassador. Its technical readiness, particularly the Diesel Generator (DG) system, is paramount for successful strategic missions. This study analyzed the partial modernization decision to replace the old DG (425 kW), which operated at an inefficient load factor (92%), with a new DG (565 kW) operating optimally (69%). The research aimed to compare the technical performance (efficiency, reliability, and availability) and assess its impact on operational readiness for diplomatic missions. This quantitative comparative-associative study utilized operational logbook data and statistical tests (Paired Sample t-test and Weibull Distribution) involving KRI Bima Suci personnel. Statistical testing confirmed a statistically significant performance difference ($p < 0.001$), validating the new DG's improved performance. Technically, operational reliability (Mean Time Between Failure / MTBF) increased by 51.6% (from 310 hours to 470 hours), system availability reached 96%, and Specific Fuel Oil Consumption (SFOC) decreased by 9.2%. Weibull analysis ($\beta = 1.35$) confirmed the new DG system operates within the wear-out phase, emphasizing the need for a Predictive Maintenance (PdM) policy. This enhanced reliability directly strengthens the KRI Bima Suci's readiness, ensuring smooth diplomatic missions without downtime incidents, thereby elevating the TNI AL's soft power image. The implementation of integrated Policy, Strategy, and Effort (KSU) incorporating Reliability-Centered Maintenance (RCM) and Total Productive Maintenance (TPM) is recommended to sustain the new DG system's technical and operational efficiency.

Keywords: Diesel generator; KRI Bima Suci; Reliability; Maritime diplomacy; RCM

Abstrak. KRI Bima Suci memiliki peran vital ganda sebagai kapal latih Taruna AAL dan duta diplomasi maritim Indonesia. Kesiapan teknisnya, terutama sistem *Diesel Generator* (DG), adalah prasyarat keberhasilan misi strategis. Penelitian ini menganalisis keputusan modernisasi parsial dengan mengganti DG lama (425 kW) yang beroperasi pada *load factor* tidak efisien (92%) menjadi DG baru (565 kW) yang beroperasi lebih optimal (69%). Tujuannya adalah membandingkan performa teknis (efisiensi, keandalan, dan ketersediaan) dan menilai dampaknya terhadap kesiapan operasional misi diplomasi. Penelitian komparatif-asosiatif kuantitatif ini menggunakan data *logbook* operasional dan hasil uji statistik (*Paired Sample t-test* dan Distribusi *Weibull*) dari personel KRI Bima Suci. Hasil pengujian statistik menunjukkan perbedaan kinerja yang signifikan secara statistik ($p < 0.001$), memvalidasi peningkatan performa DG baru. Secara teknis, keandalan operasional (*Mean Time Between Failure* / MTBF) meningkat sebesar 51.6% (dari 310 jam menjadi 470 jam), *availability* sistem mencapai 96%, dan *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) berkurang sebesar 9.2%. Analisis *Weibull* ($\beta = 1.35$) mengonfirmasi bahwa sistem DG baru berada dalam fase *wear-out*, menegaskan perlunya kebijakan *Predictive Maintenance* (PdM). Peningkatan keandalan ini secara langsung memperkuat kesiapan KRI Bima Suci, menjamin kelancaran misi diplomasi tanpa *insiden downtime*, dan meningkatkan citra *soft power* TNI AL. Implementasi Kebijakan, Strategi, dan Upaya (KSU) yang mengintegrasikan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) dan *Total Productive Maintenance* (TPM) direkomendasikan untuk mempertahankan keunggulan teknis dan efisiensi operasional sistem DG baru di masa depan.

Kata Kunci: Diesel generator, KRI bima suci, Keandalan, Diplomasi maritim, RCM

I. PENDAHULUAN

KRI Bima Suci merupakan kapal latih layar terbesar milik TNI Angkatan Laut (TNI AL) yang dibangun di galangan kapal *Freire Shipyard, Vigo, Spanyol*, dan resmi masuk jajaran armada TNI AL pada tahun 2017. Kapal ini memiliki peran strategis tidak hanya sebagai sarana pendidikan dan latihan bagi Taruna Akademi Angkatan Laut (AAL), tetapi juga sebagai duta bangsa dalam misi diplomasi maritim di berbagai belahan dunia. Keberadaan KRI Bima Suci senantiasa menarik perhatian publik internasional setiap kali melaksanakan pelayaran muhibah diplomasi, baik dalam bentuk kunjungan pelabuhan, kegiatan budaya, maupun latihan bersama dengan angkatan laut negara sahabat.

Guna mendukung peran strategis tersebut, KRI Bima Suci dilengkapi dengan sistem pendukung utama berupa *Diesel Generator (DG)* yang berfungsi sebagai sumber tenaga listrik kapal [1]. Tenaga listrik yang dihasilkan DG menopang sistem navigasi, komunikasi, penerangan, pendingin, akomodasi, hingga fasilitas penunjang kegiatan diplomasi [2]. Dengan demikian, kinerja DG memiliki pengaruh langsung terhadap *performance* kapal secara keseluruhan, baik dari aspek keselamatan pelayaran maupun kelancaran misi diplomasi [3].

Namun, seiring berjalannya waktu, unit DG lama dengan kapasitas terpasang 425 kW mengalami penurunan performa signifikan. Data *logbook* menunjukkan beban rata-rata saat pelayaran mencapai 390 kW, atau sekitar 92% dari kapasitas nominal. Kondisi ini menyebabkan DG bekerja mendekati batas kapasitas maksimum sehingga membutuhkan operasi paralel tanpa adanya jeda istirahat yang memadai. Secara teknis, kondisi ini menyimpang dari standar operasional pabrikan yang menganjurkan *margin* beban aman di bawah 85% dari kapasitas terpasang untuk menjaga umur pakai komponen. Akibatnya, terjadi peningkatan frekuensi kerusakan, konsumsi bahan bakar yang tidak efisien, serta *downtime* perawatan yang tinggi.

Situasi tersebut menimbulkan risiko strategis bagi kesiapan operasional kapal. *Downtime* sistem

non-militer kelistrikan tidak hanya berdampak pada aspek teknis, tetapi juga berpotensi mengganggu keberlangsungan agenda diplomasi maritim. Jika terjadi kegagalan daya listrik pada saat kegiatan diplomatik atau latihan bersama, hal tersebut dapat menurunkan kredibilitas TNI AL di mata mitra internasional [4]. Dengan kata lain, penurunan performa DG tidak hanya menjadi masalah teknis, melainkan juga dapat berimplikasi pada dimensi strategis pertahanan non

Sebagai bentuk respons, TNI AL melaksanakan program pergantian DG dengan kapasitas lebih besar, yakni 565 kW. Pergantian ini secara konseptual dirancang untuk meningkatkan keandalan sistem listrik, mengurangi kebutuhan operasi paralel, dan memperpanjang interval perawatan. Namun, masih terdapat research gap mengenai sejauh mana pergantian DG benar-benar memberikan keuntungan dibandingkan alternatif lain, seperti pemeliharaan preventif, *overhaul*, atau *upgrade* teknologi pada DG lama [5] [6].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji aspek keandalan dan efisiensi sistem pembangkit pada kapal. Bui menggunakan *Life-Cycle Cost Analysis (LCCA)* untuk mengevaluasi keuntungan ekonomis mesin *dual-fuel* dengan simulasi sensitivitas [5]. Sedangkan Daya & Lazakis mengembangkan *framework* reliabilitas untuk sistem pembangkit kapal patroli menggunakan pendekatan probabilistic [6]. Uyanik menerapkan metode data-driven untuk prediksi beban generator pada kapal tanker kimia [7]-[9]. Kiriolivos & Jeong membandingkan reliabilitas berbagai konfigurasi mesin *dual-fuel versus diesel* konvensional [10]. Barone dkk., menggunakan simulasi dinamis untuk menganalisis efisiensi bahan bakar dan strategi manajemen beban [11].

Namun, kajian-kajian tersebut umumnya terfokus pada salah satu dimensi teknis atau ekonomis secara terpisah. Penelitian ini menempati posisi unik dengan mengintegrasikan dimensi teknis (SFOC, MTBF, *availability*, MTTR), ekonomis (LCCA), dan strategis (dampak pada misi diplomasi) secara simultan pada konteks kapal latih/duta bangsa. Berdasarkan uraian tersebut,

penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis dan membandingkan performa teknis antara DG lama (425 kW) dan DG baru (565 kW); (2) menilai pengaruh perubahan performa teknis DG terhadap kesiapan operasional dalam pelaksanaan misi diplomasi maritim; dan (3) merumuskan kebijakan, strategi, dan upaya (KSU) yang relevan bagi TNI AL dalam mengoptimalkan pemanfaatan DG baru.

II. METODOLOGI

Penelitian ini bersifat kuantitatif dengan pendekatan komparatif-asosiatif. Data primer dikumpulkan melalui kuesioner berskala *Likert* (35 butir) kepada 30 personel teknis KRI Bima Suci (komandan, perwira, bintang, tamtama, dan Taruna AAL bagian mesin), serta wawancara semi-terstruktur. Data sekunder mencakup logbook operasional, laporan pemeliharaan, catatan konsumsi bahan bakar, dan dokumentasi teknis (misalnya manual *Caterpillar C-18*). Lokasi penelitian adalah KRI Bima Suci dengan dukungan data dari Koarmada II dan Dismatal. Periode pengumpulan data 3 bulan pada 2024 (data DG lama dari 2021–2023 dan DG baru selama 2024).

Populasi penelitian meliputi seluruh data teknis DG dan seluruh personel teknis terkait; sampel diambil *purposive sampling*: 30 responden personel teknis serta sampel data DG lama (12 bulan sebelum) dan DG baru (3 bulan sesudah) pergantian. Data dianalisis melalui beberapa langkah: validitas instrumen (*corrected item-total correlation*), reliabilitas (*Cronbach's Alpha*), analisis deskriptif (efisiensi bahan bakar, keandalan, *availability*, *downtime*), serta uji beda (*paired t-test* atau *Wilcoxon*). Parameter teknis utama meliputi: *Specific Fuel Oil Consumption (SFOC)*, *Mean Time Between Failure (MTBF)*, *Availability*, dan *Mean Time To Repair (MTTR)*. Analisis statistik menggunakan SPSS 26.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Uji validitas dan reliabilitas instrumen

Proses penelitian diawali dengan uji validitas instrumen. Berdasarkan Tabel 1, seluruh 35 butir pernyataan memiliki r-hitung lebih besar dari r-tabel (0,361), sehingga dinyatakan valid secara empiris.

Sebagai contoh, item Q5 memiliki r-hitung = 0,695 > 0,361 (Tabel 1). Hasil ini memperkuat keabsahan data penelitian. Selanjutnya, uji reliabilitas (*Cronbach's Alpha*) pada Tabel 2 menunjukkan nilai 0,871, jauh melampaui ambang $\geq 0,70$. Artinya, instrumen memiliki reliabilitas tinggi dan konsistensi internal yang kuat. Dengan validitas dan reliabilitas instrumen terjamin, analisis selanjutnya dapat difokuskan pada perbandingan kinerja teknis *Diesel Generator* (DG).

Tabel 1. Hasil Uji Validitas Instrumen (*Corrected Item-total Correlation*)

No	Item Pernyataan	r hitung	r tabel	Keterangan
1	Q1	0.542	0.361	Valid
2	Q2	0.486	0.361	Valid
3	Q3	0.613	0.361	Valid
4	Q4	0.425	0.361	Valid
5	Q5	0.695	0.361	Valid
6	Q6	0.372	0.361	Valid (marginal)
7	Q7	0.517	0.361	Valid
8	Q8	0.589	0.361	Valid
9	Q9	0.455	0.361	Valid
10	Q10	0.478	0.361	Valid
11	Q11	0.524	0.361	Valid
12	Q12	0.601	0.361	Valid
13	Q13	0.576	0.361	Valid
14	Q14	0.632	0.361	Valid
15	Q15	0.547	0.361	Valid
16	Q16	0.469	0.361	Valid
17	Q17	0.511	0.361	Valid
18	Q18	0.584	0.361	Valid
19	Q19	0.428	0.361	Valid
20	Q20	0.394	0.361	Valid
21	Q21	0.612	0.361	Valid
22	Q22	0.655	0.361	Valid
23	Q23	0.492	0.361	Valid
24	Q24	0.583	0.361	Valid
25	Q25	0.679	0.361	Valid
26	Q26	0.476	0.361	Valid
27	Q27	0.562	0.361	Valid
28	Q28	0.534	0.361	Valid
29	Q29	0.428	0.361	Valid
30	Q30	0.391	0.361	Valid
31	Q31	0.437	0.361	Valid
32	Q32	0.478	0.361	Valid
33	Q33	0.563	0.361	Valid
34	Q34	0.605	0.361	Valid
35	Q35	0.624	0.361	Valid

Tabel 2. Hasil Uji Reliabilitas Instrumen (*Cronbach's Alpha*)

Jenis Uji	Nilai <i>Cronbach's Alpha</i>	Kriteria	Keterangan
Reliabilitas keseluruhan instrumen	0.871	≥ 0.70	Reliabel (konsistensi internal tinggi)

B. Perbandingan performa teknis DG lama dan DG baru

Analisis komparatif performa teknis DG lama (425 kW) versus DG baru (565 kW) menunjukkan peningkatan signifikan pada semua parameter kunci. Uji statistik *paired t-test* menghasilkan nilai $t(29)=6,700$ dengan $p<0,001$ (Tabel 6), mengindikasikan perbedaan signifikan antara kedua kondisi. Rata-rata skor kinerja DG baru (125,43) lebih tinggi dibanding DG lama (115,40) dengan selisih rata-rata 10,03. Uji non-parametrik *Wilcoxon* juga mendukung temuan ini, dengan $Z=-4,859$, $p<0,001$ (Tabel 7) dan semua 30 pasang data menunjukkan preferensi kinerja pada DG baru. Dengan demikian, penggantian DG lama oleh unit baru secara statistik terbukti meningkatkan performa teknis.

Selain itu, analisis distribusi kegagalan (*Weibull*) pada DG baru (Tabel 3) memberikan *insight reliability* yang mendalam. Parameter bentuk $\beta=1,35$ (>1) menandakan sistem DG baru telah memasuki *fase wear-out*, yaitu peningkatan tingkat kegagalan seiring waktu operasi. Dalam konteks ini, waktu skala (η) sebesar 1.250 jam menunjukkan bahwa pada durasi tersebut sekitar 63,2% unit sudah mengalami kegagalan. Fungsi reliabilitas $R(1000)$ sebesar 0,89 mengindikasikan probabilitas 89% unit DG baru berfungsi tanpa gagal selama 1.000 jam operasi. Temuan ini menegaskan bahwa meskipun DG baru lebih andal, fase pemakaian memerlukan kebijakan *Predictive Maintenance*. Tabel 3 merangkum parameter *Weibull* tersebut.

Tabel 3. Parameter Distribusi *Weibull* Unit DG Baru (Setelah Pergantian)

Parameter	Simbol	Nilai	Interpretasi
<i>Shape Parameter</i>	β	1,35	$\beta > 1$ menunjukkan tingkat keausan meningkat (<i>wear-out period</i>)
<i>Scale Parameter</i>	η	1.250 jam	Waktu rata-rata sebelum 63,2% kegagalan terjadi
<i>Mean Time Between Failure</i>	<i>MTBF</i>	1.180 jam	Rata-rata waktu antar kerusakan DG baru
<i>Reliability Function</i>	$R(t)$	0,89	Probabilitas DG baru berfungsi tanpa gagal selama 1.000 jam

Dari aspek operasional, indikator reliabilitas dan maintainability DG baru juga unggul. Tabel 4 memperlihatkan *Mean Time To Repair (MTTR)* rata-rata hanya 2,3 jam, sehingga ketersediaan (*Availability*) sistem teoritis mencapai 98%. Indeks *maintainability* sebesar 0,94 menunjukkan efisiensi proses perbaikan. Angka-angka ini mengonfirmasi bahwa DG baru memperpendek *downtime* perbaikan dan menjaga kapal lebih sering dalam kondisi siap pakai.

Tabel 4. Indikator Reliabilitas dan *Maintability* Sistem DG Baru

Parameter	Nilai	Interpretasi
<i>Mean Time To Repair (MTTR)</i>	2,3 jam	Rata-rata waktu perbaikan tiap gangguan
$Availability = MTBF / (MTBF + MTTR)$	0,98	Tingkat ketersediaan sistem tinggi
<i>Maintainability Index</i>	0,94	Perbaikan dapat dilakukan cepat dan efisien

Lebih lanjut, Tabel 5 membandingkan metrik performa keseluruhan sebelum dan sesudah penggantian. Keandalan DG baru meningkat signifikan: MTBF naik dari 310 jam menjadi 470 jam (+51,6%), sementara MTTR berkurang dari 6,8 jam menjadi 3,5 jam. Ini berarti frekuensi gangguan berkurang drastis (dari 3–4 kali/misi menjadi hanya 1 minor per misi), dan tidak ada peristiwa blackout total selama misi. Ketersediaan sistem naik dari 85% menjadi 96%. Dari sisi efisiensi bahan bakar, SFOC turun dari 238 g/kWh menjadi 216 g/kWh (meningkat ~9,2%), sesuai temuan Barone et al. (2023) bahwa *upgrade* teknis dan optimasi beban dapat menurunkan konsumsi BBM.

Tabel 5. Perbandingan Metrik Kinerja Teknis DG Sebelum dan Sesudah Penggantian

Aspek Kinerja	Sebelum Penggantian DG	Sesudah Penggantian DG	Keterangan
<i>Availability</i>	85%	96%	Kesiapan operasi meningkat signifikan
<i>MTBF (Mean Time Between Failure)</i>	310 jam	470 jam	Peningkatan keandalan unit
<i>MTTR (Mean Time To Repair)</i>	6,8 jam	3,5 jam	Perbaikan lebih cepat
<i>Konsumsi BBM (SFOC)</i>	238 g/kWh	216 g/kWh	Lebih efisien ±9%
<i>Frekuensi Gangguan</i>	3–4 kali/misi	1 kali/misi (minor)	Stabilitas operasi meningkat
<i>Blackout Event</i>	2 kali/misi	0 kali/misi	Tidak ada kehilangan daya total
<i>Tingkat Kebisingan</i>	87 dB	79 dB	Lebih nyaman di ruang mesin

Hasil uji statistik (Tabel 6 dan 7) menguatkan interpretasi di atas. Tabel 6 menunjukkan detail uji *paired t-test*: dengan $p < 0,001$, kita menolak hipotesis nol dan menyimpulkan peningkatan kinerja DG baru signifikan secara statistik.

Demikian pula, hasil *Wilcoxon* pada Tabel 7 (nilai $Z = -4,859$, $p < 0,001$) menegaskan DG baru memiliki kinerja lebih tinggi secara konsisten. Keputusan uji untuk kedua metode yakni signifikan, artinya perbedaan performa tidak terjadi secara kebetulan.

Tabel 6. Hasil Uji Beda *Paired T-Test* Antara DG Lama dan DG Baru

Statistik	Nilai
Jumlah Sampel (N)	30
Rata-rata Kinerja DG Baru (Sesudah)	125,43
Rata-rata Kinerja DG Lama (Sebelum)	115,40
Selisih Rata-rata	10,03
Standar Deviasi Selisih	8,202
Nilai <i>t</i>	6,700
Derajat Kebebasan (df)	29
<i>p-value</i> (2-tailed)	< 0,001
Keputusan Uji	Signifikan
Interpretasi	Terdapat perbedaan yang signifikan antara kinerja DG lama dan DG baru

Tabel 7. Hasil Uji *Wilcoxon Signed-Rank* Antara DG Lama dan DG Baru

Statistik	Nilai
N (Pasangan Data)	30
Jumlah Ranks Negatif	30
Mean Rank	15,50
Jumlah Ranks Positif	0
Nilai Z	-4,859
<i>p-value</i> (2-tailed)	< 0,001
Keputusan Uji	Signifikan
Interpretasi	DG baru memiliki kinerja lebih tinggi dibanding DG lama

Hasil analisis ini menunjukkan secara meyakinkan bahwa DG baru unggul dalam efisiensi bahan bakar, keandalan, dan ketersediaan sistem. Perbaikan signifikan pada MTBF dan *availability*, ditunjang oleh penurunan MTTR, berarti KRI Bima

Suci dapat beroperasi lebih lama dengan gangguan yang minim. Perbedaan performa yang nyata juga mengurangi kebutuhan akan operasi darurat saat pelayaran, memperpanjang waktu normal *sailing*, dan meminimalkan risiko teknis pada misi diplomasi.

C. Dampak bagan terhadap kesiapan misi diplomasi

Hasil wawancara dengan perwira operasi dan taruna peserta pelayaran menunjukkan bahwa setelah penggantian DG, seluruh agenda diplomasi dan pertunjukan budaya di negara tujuan berjalan tanpa gangguan listrik. Waktu istirahat awak kapal meningkat karena berkurangnya *emergency maintenance*. Persepsi mitra asing terhadap profesionalitas kru kapal meningkat, karena seluruh kegiatan berlangsung tepat waktu dan terorganisasi. Pelayaran tahun 2024 mencatat *zero-delay departure* di seluruh rute pelabuhan.

Temuan ini sejalan dengan konsep *soft power* yang dikemukakan oleh Nye [12] di mana diplomasi maritim merupakan instrumen untuk memengaruhi pihak lain melalui daya tarik budaya dan profesionalitas, bukan dengan paksaan. Kesiapan teknis kapal merupakan syarat mutlak keberhasilan diplomasi maritim, karena gangguan teknis dapat mengurangi kredibilitas negara di mata mitra internasional [13].

D. Tantangan implementasi

Meskipun DG baru menunjukkan peningkatan performa signifikan, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa tantangan dalam implementasinya. Dari hasil kuesioner, terungkap bahwa 40% responden menyatakan bahwa jadwal perawatan DG baru sulit dipatuhi karena keterbatasan waktu di antara jadwal operasional yang padat. Selain itu, 30% responden menilai bahwa manual teknis DG baru kurang mudah dipahami, mengindikasikan perlunya peningkatan kapasitas personel melalui pelatihan intensif.

Kendala logistik juga muncul dalam hal ketersediaan suku cadang. Meskipun DG baru menggunakan teknologi yang lebih modern, ketersediaan suku cadang spesifik masih tergantung

pada lead time pengadaan internasional yang rata-rata 2-3 bulan. Hal ini menekankan pentingnya perencanaan logistik yang matang dan pembentukan *stock buffer* untuk komponen kritis [14].

E. Analisis ekonomis (*life cycle cost*)

Meskipun data biaya lengkap tidak sepenuhnya tersedia dalam penelitian ini, analisis awal menunjukkan bahwa penghematan bahan bakar sebesar 9,2% dan pengurangan *downtime* sebesar 48,5% berpotensi memberikan kontribusi positif terhadap *Net Present Value (NPV)* dalam jangka panjang. Analisis LCCA menekankan pada pertimbangan *trade-off* antara *capital expenditure (capex)* dan *operational expenditure (opex)* dalam perspektif *life-cycle* [15]. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk menghitung *payback period* dan sensitivitas investasi terhadap perubahan harga bahan bakar dan frekuensi kegagalan.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa penggantian *Diesel Generator* dari 425 kW menjadi 565 kW pada KRI Bima Suci memberikan peningkatan signifikan pada seluruh parameter teknis yang diukur. MTBF meningkat 51,6% (dari 310 jam menjadi 470 jam), *availability* meningkat 11% (dari 85% menjadi 96%), SFOC turun 9,2% (dari 238 g/kWh menjadi 216 g/kWh), dan MTTR berkurang 48,5% (dari 6,8 jam menjadi 3,5 jam). Secara statistik, perbedaan performa antara DG lama dan DG baru sangat signifikan ($p < 0,001$).

Berdasarkan temuan penelitian, dapat direkomendasikan beberapa kebijakan, strategi, dan upaya (KSU) bagi TNI AL: (1) implementasi *predictive maintenance* berbasis digital *monitoring* untuk mengoptimalkan *interval* perawatan; (2) peningkatan kompetensi personel melalui pelatihan intensif terkait pengoperasian dan pemeliharaan DG baru; (3) standarisasi protokol operasional DG untuk memastikan konsistensi pelaksanaan di seluruh kapal sejenis; (4) perencanaan logistik yang matang dengan pembentukan stok *buffer* suku cadang kritis; dan (5) kajian lanjutan mengenai analisis *Life Cycle Cost (LCCA)* untuk mengevaluasi kelayakan ekonomis jangka panjang. Penelitian ini

memiliki keterbatasan pada periode pengamatan yang relatif singkat (3 bulan) untuk data DG baru. Penelitian lanjutan dengan periode observasi lebih panjang direkomendasikan untuk memvalidasi konsistensi performa DG baru dalam berbagai kondisi operasional, termasuk pelayaran lintas samudra jangka panjang. Selain itu, analisis LCCA yang lebih komprehensif dengan data biaya lengkap perlu dilakukan untuk memberikan rekomendasi kebijakan yang lebih holistik.

REFERENSI

- [1] D. Tarnapowicz, S. German-Galkin, A. Nerc, dan M. Jaskiewicz, "Improving the Energy Efficiency of a Ship's Power Plant by Using an Autonomous Hybrid System with a PMSG," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 7, Apr 2023, doi: 10.3390/en16073158.
- [2] T. M. Dibiagio, "Law, Force & Diplomacy at Sea, by Ken Booth, 12 Md," 1987. [Daring]. Tersedia pada: <http://digitalcommons.law.umaryland.edu/mjil/vol12/iss1/9>
- [3] K. Kemaritiman, "KEPMENKO KEMARITIMAN NO 128 TAHUN 2019 tentang BUKU PUTIH DIPLOMASI MARITIM," Jakarta, Agu 2019.
- [4] G. Till, *Seapower: A Guide for the Twenty-first Century*. London: Psychology Press, 2004.
- [5] K. Q. Bui, L. P. Perera, dan J. Emblemavåg, "Life-cycle cost analysis of an innovative marine dual-fuel engine under uncertainties," *J. Clean. Prod.*, vol. 380, hlm. 134847, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134847>.
- [6] A. A. Daya dan I. Lazakis, "Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance," *Ocean Engineering*, vol. 272, hlm. 113766, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113766>.
- [7] T. Uyanık, N. N. A. Bakar, Ö. Kalenderli, Y. Arslanoğlu, J. M. Guerrero, dan A. Lashab, "A Data-Driven Approach for Generator Load Prediction in Shipboard Microgrid: The Chemical Tanker Case Study," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 13, Jul 2023, doi: 10.3390/en16135092.
- [8] A. Villemeur, *Reliability, availability, maintainability and safety assessment*, vol. 2. Chichester: Chichester, 1991.
- [9] W. G. Ireson, C. F. J. Coombs, dan R. Y. Moss, *Handbook of Reliability Engineering and Management*, 2 ed., no. 2. Michigan: McGraw-Hill Education, 2007.
- [10] G. L. Kirolianos dan B. Jeong, "Comparative reliability analysis and enhancement of marine dual-fuel engines," *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, vol. 6, no. 1, hlm. 1–23, Jan 2022, doi: 10.1080/25725084.2021.1968663.
- [11] G. Barone, A. Buonomano, G. Del Papa, R. Maka, dan A. Palombo, "How to achieve energy efficiency and sustainability of large ships: a new tool to optimize the operation of on-board diesel generators," *Energy*, vol. 282, hlm. 128288, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128288>.
- [12] J. S. Nye, *Bound To Lead: The Changing Nature of American Power*, 1 ed., vol. 1. United States: Basic Books, 1990.
- [13] Md Syful Islam, "Maritime Diplomacy and Regional Cooperation Mechanisms: Insights from the Black Sea and Bay of Bengal," *Millennial Asia*, hlm. 09763996241256162, Jun 2024, doi: 10.1177/09763996241256162.
- [14] Larsen Barasa, Marihot Simanjuntak, Brenhard Mangatur Tampubolon, Nurul Wahyuni, dan Siska Yoniessa, "Ship Maintenance and Spare-Parts Availability for Operational Continuity of AHTS Vessels," *ePaper Bisnis: International Journal of Entrepreneurship and Management*, vol. 2, no. 3, hlm. 144–149, Sep 2025, doi: 10.61132/epaperbisnis.v2i3.533.
- [15] H. Lee, J. Lee, G. Roh, S. Lee, C. Choung, dan H. Kang, "Comparative Life Cycle Assessments and Economic Analyses of Alternative Marine Fuels: Insights for Practical Strategies," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, Mar 2024, doi: 10.3390/su16052114.