

Analisis pengaruh penggunaan genset tambahan terhadap konsumsi bahan bakar pada kapal Ro-Ro 3500 DWT

Dimas Angga Fakhri Muzhoffar^{a,1}, Muhammad Agung Santoso^a, Achmad Riadi^a,
Raffa Bainan Nunni^a, Arindra Nur Rakhman Wiambodo^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424

¹Email korespondensi: dimas.anggafm@ui.ac.id

Abstract. In the Indonesian shipping industry, second-hand vessels are often the preferred choice for specific routes. These ships are frequently operated beyond their economic life. This condition leads to operational patterns that no longer match the auxiliary engine (AE) specifications, particularly during idle mode while waiting to dock, where the electrical load falls far below the AE's optimal range. As a solution, a retrofit was performed by installing a smaller-capacity additional generator set (GT). This study analyzes historical fuel consumption data before and after the retrofit to evaluate the effectiveness of this measure. The results show significant fuel savings. A theoretical analysis based on the engine's technical specifications revealed that, before the retrofit, the AE operated outside its optimal efficiency range due to its advanced age. In contrast, the newer GT operates within a load range that matches its specifications, resulting in more efficient fuel consumption. The findings of this study provide a practical framework for identifying operational inefficiencies in ship machinery. The presented results and discussion are expected to serve as a reference for mapping operational parameters, optimizing engine performance, and planning retrofits. Ultimately, this research is hoped to serve as a guide for ship operators in formulating sustainable operational strategies, including fuel consumption management and setting emission-reduction targets.

Keywords: energy optimization, fuel consumption, maritime industry, retrofit, ship operation, sustainability.

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/w96h4a73>

PENDAHULUAN

Industri maritim global tengah menghadapi dua tekanan berat yang mendorong percepatan optimasi efisiensi energi, yaitu melonjaknya biaya operasional dan semakin ketatnya regulasi lingkungan internasional [1]. Kontributor biaya operasional terbesar, yang dapat mencapai 40–60%, berasal dari konsumsi Marine Diesel Oil (MDO) untuk sistem propulsi dan pembangkit daya mesin bantu (*Auxiliary Engine/AE*) [2]. Di sisi regulasi, International Maritime Organization (IMO) melalui Konvensi MARPOL Annex VI secara agresif mempersempit batasan emisi gas rumah kaca (GRK), menjadikan pengurangan konsumsi bahan bakar bukan hanya sebuah strategi penghematan, melainkan sebuah kewajiban [3]. Konvergensi antara tekanan ekonomi dan regulasi ini menciptakan kebutuhan mendesak akan solusi teknis yang inovatif, praktis, dan efektif untuk memitigasi kedua tantangan tersebut secara simultan.

Kapal Ro-Ro (*Roll-on/Roll-off*) memainkan peran krusial dalam rantai logistik global, khususnya untuk transportasi kendaraan dan barang antarpulau yang mengandalkan kecepatan dan fleksibilitas bongkar muat. Namun, dalam praktiknya, banyak kapal jenis ini terus dioperasikan jauh melampaui umur ekonomisnya, sering kali melebihi 30 tahun [4]. Realitas operasional ini semakin kompleks dengan maraknya penggunaan kapal bekas dioperasikan pada

rute dan dengan profil beban yang telah menyimpang dari desain awalnya.

Akibat dari kondisi ini, efisiensi sistem pembangkit daya menjadi korban utama. Mesin bantu pada kapal Ro-Ro dirancang untuk menangani beban puncak selama operasi bongkar muat. Ironisnya, dalam proporsi waktu operasional yang sangat besar, seperti saat berlabuh atau menunggu, kebutuhan daya aktual justru jauh lebih rendah. Ketidakesesuaian yang signifikan antara kapasitas terpasang dan kebutuhan aktual ini memaksa AE beroperasi pada *load factor* yang rendah [5].

Permasalahan ini bersumber pada karakteristik fundamental mesin diesel, yang mencapai efisiensi termal optimal pada rentang 75–85% dari *Maximum Continuous Rating* (MCR). Operasi di bawah 50% MCR menyebabkan *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) melonjak 15–30% [6]. Kondisi ini semakin diperburuk oleh degradasi kinerja mesin seiring dengan penuaan usia kapal. Meskipun sebagian degradasi kinerja mesin dapat diatasi melalui manajemen pemeliharaan rutin, terdapat beberapa yang tidak dapat dipulihkan sepenuhnya pada komponen mesin tertentu yang mengalami penuaan sehingga pada satu studi kasus daya mesin diesel *two-stroke* mengalami degradasi sebesar 620 kW dan SFOC sebesar 26.74 g/kWh [7].

Untuk mengatasi inefisiensi sistemik ini, penelitian ini mengusulkan sebuah solusi strategis: instalasi sebuah genset tambahan (*Generator Set/GT*)

berkapasitas lebih kecil yang dirancang khusus untuk secara efisien memenuhi kebutuhan beban dasar (*base load*) yang rendah. Sebuah konsep operasi *hybrid* kemudian diterapkan, yang mengombinasikan penggunaan AE untuk kondisi beban tinggi dan GT untuk kondisi beban rendah. Skema ini diharapkan dapat mengoptimalkan titik kerja setiap mesin, sehingga secara keseluruhan konsumsi bahan bakar dapat dioptimalkan.

Metodologi penelitian mencakup analisis komparatif terhadap data operasional sebelum dan setelah instalasi GT, dan pemodelan teoritis konsumsi bahan bakar berdasarkan spesifikasi SFOC. Luaran dari penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan solusi praktis dan terukur bagi operator kapal dalam membuat keputusan retrofit armada tua, tetapi juga berkontribusi pada upaya global dekarbonisasi industri maritim. Dengan pendekatan berbasis data dan analisis finansial, penelitian ini menawarkan sebuah kerangka kerja yang dapat dijadikan acuan dalam pengambilan keputusan investasi teknologi efisiensi energi di sektor maritim.

METODOLOGI

Pengumpulan Data

Analisis dalam penelitian ini berfokus pada kapal Ro-Ro pengangkut mobil **KM. V5**, dengan spesifikasi

teknis utama meliputi: tonase 3500 DWT, panjang 128 m, dan tahun pembuatan 1991 (telah beroperasi selama 34 tahun pada tahun 2025). Pengumpulan data operasional (primer dan sekunder) dilakukan selama dua periode komparatif (April–Oktober) pada tahun 2023 dan 2024. Periode pertama (2023) merepresentasikan kondisi operasi acuan konvensional dengan konfigurasi AE tunggal. Sementara itu, periode kedua (2024) mencatat performa sistem setelah implementasi sistem *hybrid* melalui pemasangan GT. Pemilihan rentang waktu yang identik pada kedua tahun ini dilakukan untuk memastikan validitas komparasi dengan meminimalkan variabel pengganggu eksternal, seperti perbedaan kondisi musiman dan pola pelayaran.

Data primer diperoleh melalui metode observasi langsung dan wawancara mendalam dengan Kepala Kamar Mesin kapal. Data ini mencakup penentuan kisaran beban listrik aktual selama kondisi berlabuh (*idle*) yaitu 170–200 kW, serta pengumpulan spesifikasi teknis lengkap dari unit AE dan GT yang terpasang (lihat **Tabel 1**). Data sekunder meliputi catatan *sounding* konsumsi bahan bakar harian, *logbook* operasional mesin, dan satuan konversi bahan bakar (0.85 t/kl [8]). Pendekatan multi-sumber ini memungkinkan rekonstruksi yang akurat dari profil operasional dan kinerja kapal, sebelum dan setelah implementasi sistem *hybrid* [9].

Tabel 1. Spesifikasi mesin bantu (*Auxiliary Engine/AE*) dan genset tambahan (GT)

Parameter	AE	GT
Jumlah Silinder	6	6
<i>Bore</i>	220 mm	105 mm
<i>Stroke</i>	300 mm	135 mm
Kecepatan	720 rpm	1500 rpm
MCR	736 kW	176 kW
SFOC	220–280 g/kWh	209–235 g/kWh (pada 25–110% MCR)

Pemrosesan Data

Penelitian ini berfokus pada pemetaan kinerja aktual mesin melalui perbandingan komprehensif antara data historis konsumsi bahan bakar dengan perhitungan teoritis. Tahap awal melibatkan kompilasi data operasional kapal selama periode 2023 (operasi AE

tunggal) dan 2024 (operasi *hybrid* AE dan GT), yang mencakup total jam operasional dalam mode operasional *idle*, dan historis konsumsi bahan bakar. Pendekatan teoritis kemudian dikembangkan menggunakan persamaan konsumsi bahan bakar (*FC*, t) di bawah [7]:

$$FC = SFOC \times P \times t \times 10^{-6} \quad (1)$$

dimana *SFOC* adalah SFOC dalam g/kWh, *P* adalah daya aktual dalam kW, dan *t* adalah jam operasi dalam jam (h). Dengan memvariasikan parameter *SFOC* dan *P* untuk membangun model kinerja mesin yang komprehensif. Selanjutnya, identifikasi perbedaan antara konsumsi bahan bakar aktual dan teoritis pada AE memunculkan tiga hipotesis: (1) degradasi SFOC

AE melampaui SFOC spesifikasi teknis setelah 30 tahun operasi, (2) pembebanan listrik aktual selama mode operasional *idle* melebihi estimasi awal 170–200 kW, atau (3) kombinasi dari kedua hipotesis tersebut. Berangkat dari sini, analisis akan dibatasi oleh asumsi bahwa kecepatan AE dan GT terjaga konstan dan jam

operasional AE dan GT sepenuhnya sama dengan jam operasional yang tercatat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan Konsumsi Bahan Bakar Tahun 2023 dan 2024

Penelitian ini melakukan analisis komparatif terhadap data konsumsi bahan bakar aktual kapal Ro-Ro 3500 DWT selama periode tujuh bulan (April–Oktober) pada tahun 2023 (sebelum *hybrid*) dan 2024 (setelah *hybrid*). Pada tahun 2023, saat kapal beroperasi (mode *idle*) dengan sistem konvensional menggunakan satu AE, seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**.

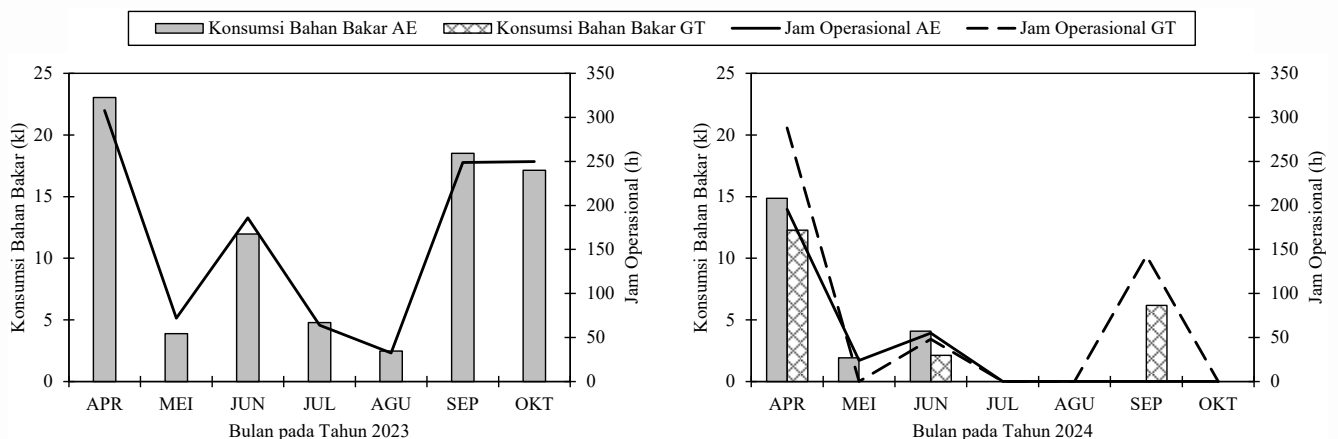
Setelah implementasi sistem *hybrid* pada tahun 2024 yang mengombinasikan AE dengan GT, terjadi penurunan konsumsi yang signifikan. Hasil ini secara umum menunjukkan efektivitas implementasi sistem *hybrid* dalam mengurangi konsumsi energi. Lebih luas, total konsumsi bahan bakar dan jam operasional dapat digambarkan pada **Gambar 2**.

Pada tahun 2023, kapal hanya mengoperasikan AE pada mode operasional *idle*. Dengan total konsumsi bahan bakar 81,78 kl, dihasilkan laju konsumsi rata

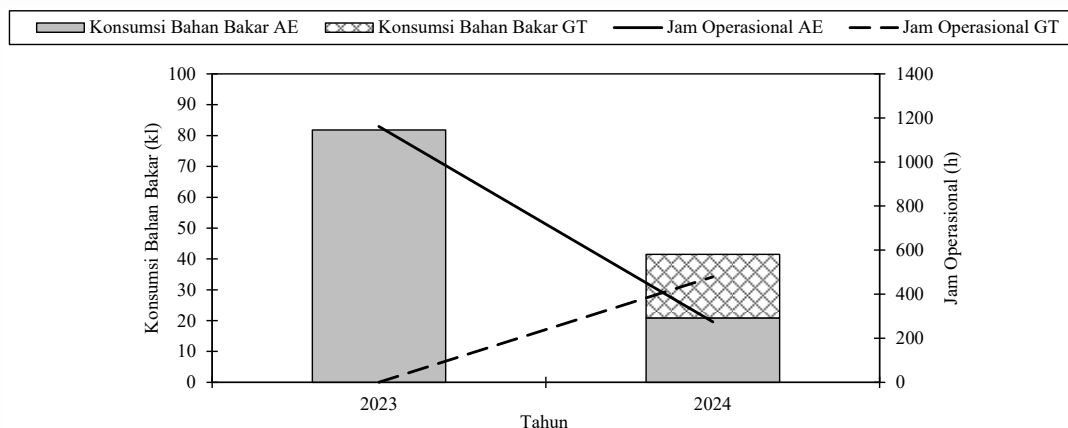
sebesar 0,071 kl/jam. Kemudian, pada tahun 2024, kapal menerapkan operasi *hybrid* AE dan GT dengan total konsumsi bahan bakar 40,46 kl, masing-masing sebesar 20,88 dan 20,58 kl untuk AE dan GT. Lalu, dapat dipahami bahwa laju konsumsi untuk AE dan GT berturut-turut sebesar 0,076 dan 0.043 kl/jam. Selanjutnya, untuk menjelaskan penghematan konsumsi bahan bakar, pendekatan teoritis diterapkan dengan memetakan parameter operasi mesin bantu dan genset tambahan, yang merujuk pada hipotesis yang telah dipaparkan dalam **Bagian Metodologi**.

Pemetaan Parameter Operasi Mesin Bantu dan Genset Tambahan

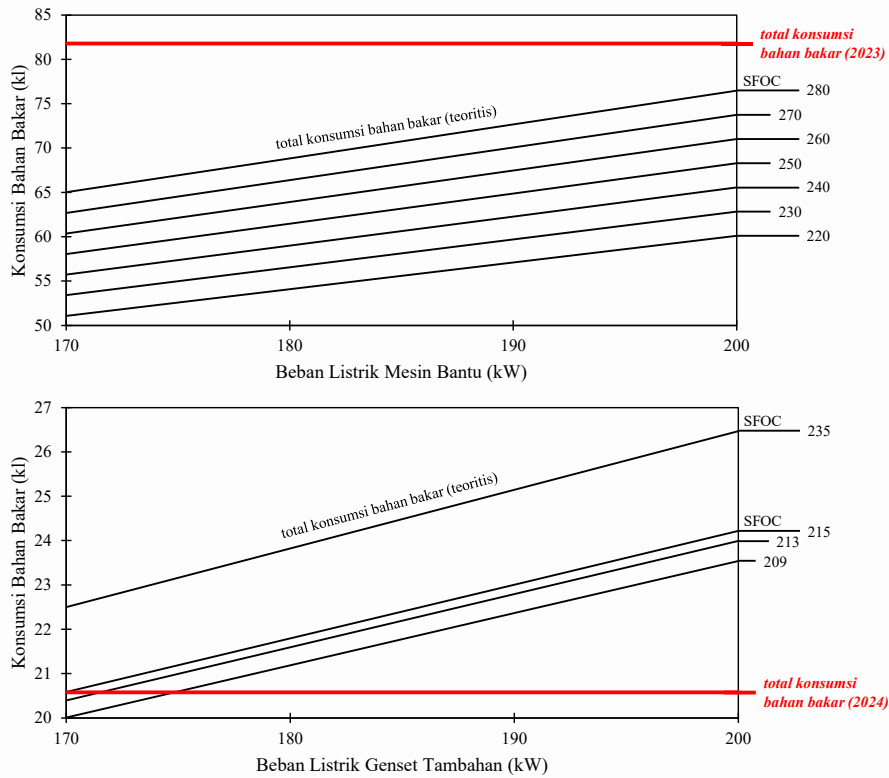
Sebagaimana telah diidentifikasi sebelumnya, perhitungan menggunakan kisaran SFOC AE pada spesifikasi (220–280 g/kWh) dan rentang beban listrik yang tercatat (170–200 kW), tidak mampu menjelaskan total konsumsi bahan bakar AE pada tahun 2023, yaitu 81.779 kl. Perbedaan yang signifikan ini mengonfirmasi adanya degradasi kinerja AE yang ditandai dengan kemungkinan membengkaknya SFOC, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3** di bawah.



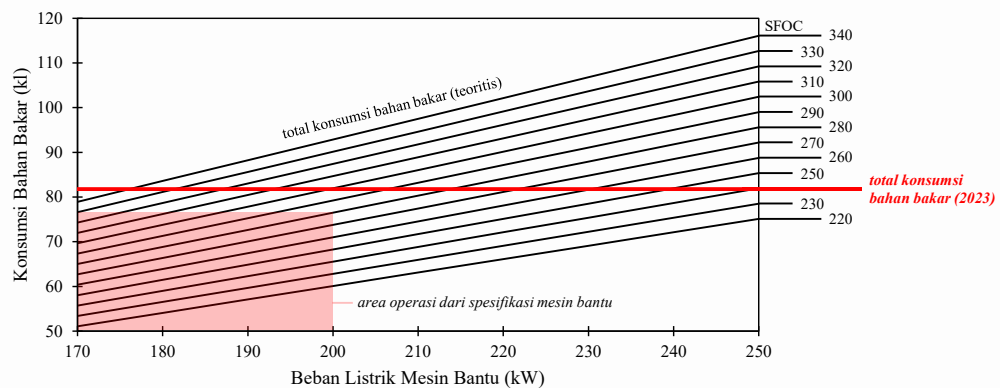
Gambar 1. Data historis konsumsi bahan bakar pada tahun 2023 dan 2024



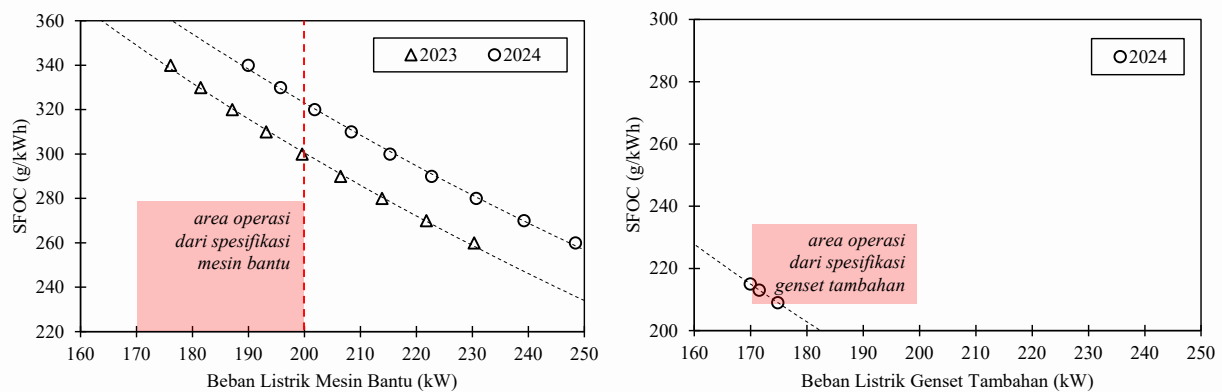
Gambar 2. Total konsumsi bahan bakar pada tahun 2023 dan 2024



Gambar 3. Pemetaan parameter operasi mesin bantu dan genset tambahan



Gambar 4. Perluasan parameter operasi mesin bantu



Gambar 5. Identifikasi parameter operasi aktual mesin bantu dan genset tambahan

Sementara itu, hasil perhitungan untuk GT yang menggunakan kisaran SFOC berdasarkan spesifikasi pabrik (209–235 g/kWh) berhasil menjelaskan total konsumsi bahan bakar GT pada tahun 2024, yaitu 20.578 kl. Pada Gambar 3, garis konsumsi bahan bakar teoritis pada SFOC 209, 213, dan 215 g/kWh berpotongan dengan garis konsumsi bahan bakar aktual, masing-masing pada beban listrik 174.83, 171.55, dan 169.95 kW. Hasil ini menunjukkan bahwa GT beroperasi dalam rentang spesifikasinya, pada rentang beban yang sesuai dengan data yang tercatat. Hal ini dimungkinkan karena GT dianggap masih dalam umur operasinya, yang baru dioperasikan kurang dari satu tahun.

Untuk menentukan parameter operasi AE yang mendekati konsumsi bahan bakar aktual, rentang parameter operasi diperluas berdasarkan hipotesis yang telah dirumuskan pada **Bagian Metodologi**, seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**.

Titik-titik perpotongan antara garis konsumsi teoritis dengan garis konsumsi aktual merepresentasikan estimasi parameter operasi aktual. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi yang lebih komprehensif terhadap kombinasi parameter SFOC dan beban listrik yang sebenarnya, mengungkap tingkat degradasi kinerja mesin bantu yang selama ini tidak terdeteksi dalam operasi rutin. Melalui interpolasi terhadap seluruh titik potong, serangkaian parameter operasi AE dapat ditentukan, seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**.

Berdasarkan analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa AE pada tahun 2023 beroperasi pada SFOC rerata 290 g/kWh dengan beban rerata mendekati 210 kW. Pola operasi yang serupa juga muncul pada tahun 2024. Pemetaan kinerja aktual ini membangun area operasi realistis berbasis data untuk kondisi degradasi AE. Jika mempertimbangkan rentang beban listrik pada mode *idle* (170–200 kW), perpanjangan batas beban maksimal direpresentasikan dengan garis merah vertikal putus-putus, sehingga jika diasumsikan kapal dalam kondisi *idle* pada beban listrik maksimal secara kontinu, dapat dipahami bahwa AE beroperasi pada rentang SFOC 320–330 g/kWh. Nilai tersebut 14–45%

lebih besar dibandingkan dengan rentang spesifikasi SFOC (220–280 g/kWh). Kondisi ini dihasilkan dari AE yang dioperasikan melebihi umur ekonomisnya, yang telah dioperasikan sejak kapal dibangun. Di samping itu, AE tidak dioperasikan pada faktor beban optimal dengan SFOC terendah, di mana beban listrik pada mode operasional *idle* hanya 27% dari total daya AE (200/736 kW).

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan keunggulan ekonomis dari pemasangan GT pada **KM. V5** untuk memenuhi kebutuhan daya listrik beban rendah pada mode operasi *idle*. Melalui pendekatan teoritis untuk mengatasi keterbatasan alat ukur langsung di kapal, penelitian ini telah memetakan parameter operasi aktual (SFOC dan beban listrik) pada AE dan GT dengan memanfaatkan data historis konsumsi bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi GT untuk kondisi *idle* (kapal menunggu untuk berlabuh) merupakan langkah strategis untuk mengatasi ketidakefisienan operasional AE yang berkapasitas terlalu besar dan telah melewati umur ekonomisnya. Analisis komparatif secara konsisten menunjukkan bahwa sistem *hybrid*, yaitu kombinasi penggunaan AE dan GT, mampu mengurangi konsumsi bahan bakar secara signifikan. Penghematan ini selanjutnya berkontribusi pada penurunan biaya operasional dan emisi gas rumah kaca secara proporsional. Berdasarkan pembahasan yang telah dipaparkan, direkomendasikan agar operator dan manajemen kapal mengadopsi pendekatan teoritis ini sebagai alat bantu pengambilan keputusan untuk pemetaan parameter operasi, optimasi performa mesin, dan perencanaan retrofit. Metodologi yang disajikan memberikan kerangka kerja praktis untuk mengidentifikasi sumber ketidakefisienan dalam pengoperasian mesin bantu. Lebih lanjut, temuan penelitian ini dapat menjadi acuan penting bagi operator kapal dalam menyusun strategi operasi berkelanjutan, termasuk pengendalian konsumsi bahan bakar dan penetapan target reduksi emisi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Czernański, Ernest, Barbara Pawłowska, Aneta Oniszczyk-Jastrzębek, and Giuseppe T. Cirella. "Decarbonization of maritime transport: analysis of external costs." *Frontiers in Energy Research* 8 (2020): 28. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00028>.
- [2] Bouman, Evert A., Elizabeth Lindstad, Agathe I. Riialand, and Anders H. Strømman. "State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—A review." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 52 (2017): 408–421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>.
- [3] IMO. "Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted." (2023). Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted.aspx> (17 Agustus 2025).
- [4] Jugović, Alen. "The Economic Impact of Container-loading Problem." *Transactions on maritime science* 9, no. 02 (2020): 271–278. DOI: <https://doi.org/10.7225/toms.v09.n02.010>.
- [5] Babaei, Maziar, Jian Shi, Nasibeh Zohrabi, and Sherif Abdelwahed. "Development of a hybrid model for shipboard

- power systems." In *2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, pp. 145-149. IEEE, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESTS.2015.7157877>.
- [6] Ghaemi, Mohammad Hossein. "Performance and emission modelling and simulation of marine diesel engines using publicly available engine data." *Polish Maritime Research* 4 (2021): 63-87. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2021-0050>.
- [7] G. Kökkülünk, A. Parlak, and H. H. Erdem, "Determination of performance degradation of a marine diesel engine by using curve based approach," *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 1136-1146, 2016/09/05/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.019>.
- [8] Faber, J., Hanayama, S., Zhang, S., Pereda, P., Comer, B., Hauerhof, E., and Yuan, H. Fourth IMO Greenhouse Gas Study. Tersedia: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/imo-ghg-studies.aspx> (17 Agustus 2025).
- [9] Robert, K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* Sixth Edition. Sage publications.