

ANALISIS EFISIENSI SISTEM PROPULSI KAPAL PADA BERBAGAI KONDISI BEBAN OPERASIONAL: PENDEKATAN DIAGRAM OPEN WATER, KOEFISIEN ADMIRALTY, DAN EVALUASI KEPATUHAN EEDI/CII REGULASI IMO MARPOL ANNEX VI

Muhammad Rivai Rosidhin Nasrulloh^{1*}, Charles Kelvin Siahaan², Agustin Dwi Sumiwi³
^{1,2,3}Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia
Email : 241036201004@uis.ac.id

Abstrak

Efisiensi sistem propulsi kapal menentukan konsumsi bahan bakar, emisi gas rumah kaca, dan daya saing operasional secara fundamental. Penelitian ini menyajikan analisis komprehensif efisiensi sistem propulsi kapal feri penumpang Ro-Pax 4.200 GT pada lima kondisi beban operasional (kondisi penuh hingga ballast) menggunakan pendekatan diagram open water propeller B-series, koefisien Admiralty, dan model Holtrop-Mennen untuk prediksi hambatan. Kebaruan penelitian mencakup: (1) dekomposisi dan kuantifikasi sistematis lima komponen efisiensi propulsif (η_H , η_O , η_R , η_S , η_G) pada tiap kondisi beban; (2) analisis kavitas propeller berbasis diagram Burrill untuk validasi operasi bebas kavitas pada seluruh rentang kecepatan; (3) penentuan kecepatan operasi optimal berbasis minimasi konsumsi bahan bakar per mil laut menggunakan koefisien Admiralty; dan (4) evaluasi kepatuhan EEDI (Energy Efficiency Design Index) per kondisi muatan terhadap persyaratan IMO MARPOL Annex VI Fase 3. Hasil menunjukkan efisiensi propulsif total $\eta_D = 0,619-0,682$ (tertinggi pada kondisi penuh), dengan kecepatan operasi optimal untuk efisiensi bahan bakar per mil pada 10,8 knot. Kondisi ballast menghasilkan EEDI tertinggi (28,4 g CO₂/ton-nm) dibandingkan kondisi penuh (14,6 g CO₂/ton-nm). Validasi model terhadap data towing tank dari literatur menghasilkan deviasi rata-rata 1,9% (kriteria ITTC < 5%).

Kata kunci—efisiensi propulsi; diagram open water; Holtrop-Mennen; kavitas Burrill; EEDI; CII; IMO MARPOL; koefisien Admiralty

Abstract

Ship propulsion system efficiency fundamentally determines fuel consumption, greenhouse gas emissions, and operational competitiveness. This study presents a comprehensive analysis of propulsion system efficiency for a 4,200 GT Ro-Pax passenger ferry across five operational load conditions (full load to ballast) using the B-series propeller open water diagram, Admiralty coefficient, and Holtrop-Mennen resistance model. Research novelty includes: (1) systematic decomposition and quantification of five propulsive efficiency components (η_H , η_O , η_R , η_S , η_G) for each load condition; (2) Burrill diagram-based propeller cavitation analysis validating cavitation-free operation across all speed ranges; (3) determination of optimal operating speed based on minimizing fuel consumption per nautical mile using the Admiralty coefficient; and (4) EEDI (Energy Efficiency Design Index) compliance evaluation per load condition against IMO MARPOL Annex VI Phase 3 requirements. Results show total propulsive efficiency $\eta_D = 0.619-0.682$ (highest at full load), with optimal operating speed for fuel efficiency per nautical mile at 10.8 knots. Ballast condition produces the highest EEDI (28.4 g CO₂/ton-nm) compared to full load (14.6 g CO₂/ton-nm). Model validation against towing tank data from literature yields a mean deviation of 1.9% (ITTC criterion < 5%).

Keywords—propulsion efficiency; open water diagram; Holtrop-Mennen; Burrill cavitation; EEDI; CII; IMO MARPOL; Admiralty coefficient

PENDAHULUAN

Sektor pelayaran menyumbang sekitar 2,89% emisi CO₂ global dan mengonsumsi lebih dari 300 juta ton bahan bakar per tahun [1]. International Maritime Organization (IMO) melalui MARPOL Annex VI telah menetapkan regulasi EEDI (Energy Efficiency Design Index) dan CII (Carbon Intensity Indicator) yang berlaku wajib sejak 2023, menargetkan pengurangan intensitas karbon armada kapal global 40% pada 2030 dibandingkan level 2008 [2]. Pencapaian target ini secara langsung bergantung pada efisiensi sistem propulsi kapal — khususnya bagaimana sistem propulsi berperilaku pada kondisi operasional nyata yang bervariasi.

Sistem propulsi kapal terdiri dari rantai komponen yang mentransformasi energi kimia bahan bakar menjadi gaya dorong (thrust): mesin induk → kopling/gearbox → poros → propeller → fluida. Setiap komponen memiliki efisiensi yang bervariasi terhadap kondisi operasi, dan efisiensi propulsif total η_D merupakan produk dari seluruh komponen ini [3]. Kondisi beban kapal (displacement) yang bervariasi secara langsung mempengaruhi hambatan, kecepatan optimal, dan kondisi operasi propeller — sehingga η_D pada kondisi ballast berbeda signifikan dari kondisi muatan penuh.

Kajian literatur menunjukkan bahwa sebagian besar studi efisiensi propulsi dilakukan pada kondisi desain nominal (full load), dengan sedikit perhatian pada variasi kondisi muatan yang merepresentasikan operasi nyata kapal [4]. Kapal feri penumpang di Indonesia, misalnya, beroperasi dengan tingkat pengisian kendaraan yang sangat bervariasi — dari hampir kosong hingga overloaded — sehingga pemahaman efisiensi pada rentang kondisi muatan sangat penting untuk optimasi operasional dan kepatuhan regulasi [5].

Penelitian ini bertujuan: (1) membangun dan memvalidasi model prediksi efisiensi propulsi berbasis Holtrop-Mennen + B-series open water diagram; (2) menganalisis dekomposisi komponen efisiensi propulsif pada lima kondisi muatan; (3) menentukan kecepatan operasi optimal berbasis konsumsi bahan bakar minimum per mil; (4) menganalisis kavitas propeller pada rentang kecepatan operasi; dan (5) mengevaluasi EEDI per kondisi muatan terhadap regulasi IMO.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Dekomposisi Efisiensi Propulsif

Efisiensi propulsif total η_D (quasi-propulsive efficiency) didekomposisi sebagai: $\eta_D = \eta_H \times \eta_O \times \eta_R \times \eta_S \times \eta_G$, di mana: $\eta_H = \text{hull efficiency} = (1-t)/(1-w)$ adalah efisiensi lambung ($t = \text{thrust deduction fraction}$, $w = \text{wake fraction}$); $\eta_O = \text{open water efficiency propeller}$; $\eta_R = \text{relative rotative efficiency}$ (umumnya 0,95–1,05); $\eta_S = \text{shaft efficiency}$ (0,98–0,99); $\eta_G = \text{gearbox efficiency}$ (0,95–0,98) [3]. Untuk propeller tunggal kapal feri, nilai tipikal: $w = 0,15\text{--}0,25$, $t = 0,12\text{--}0,20$, menghasilkan $\eta_H = 1,02\text{--}1,10$. Efisiensi dominan adalah η_O (0,60–0,70) yang ditentukan oleh geometri propeller dan kondisi operasinya [6].

B. Karakteristik Open Water Propeller B-Series

Wageningen B-series propeller merupakan keluarga propeller standar dengan data open water yang terdokumentasi lengkap. Karakteristik open water dinyatakan dalam koefisien thrust KT dan torsi KQ sebagai fungsi advance ratio $J = VA/(n \times D)$, di mana VA adalah kecepatan aliran bebas, n adalah putaran (rps), D adalah diameter. Efisiensi open water: $\eta_O = J \times KT / (2\pi \times KQ)$. Koefisien KT dan KQ dimodelkan menggunakan polinomial Oosterveld & van Oossanen (1975): $KT = \sum(C_n \times J^{a_n} \times P/D^{b_n} \times AE/AO^{c_n} \times Z^{d_n})$, dengan 47 koefisien untuk B-series [7].

C. Model Hambatan Holtrop-Mennen

Metode Holtrop-Mennen (1982, direvisi 1984) merupakan metode empiris berbasis regresi statistik dari 334 data model percobaan yang memprediksi hambatan total $RT = RF \times (1+k1) + RAPP + RW + RB + RTR + RA$, di mana RF adalah hambatan gesek ITTC-1957, $(1+k1)$ adalah form factor, RAPP adalah hambatan appendages, RW adalah hambatan gelombang, RB adalah hambatan bulbous bow, RTR adalah hambatan immersed transom, dan RA adalah tambahan hambatan model-kapal [8]. Untuk kapal feri penumpang tanpa bulbous bow dengan $CB = 0,60-0,70$, metode Holtrop-Mennen menunjukkan akurasi $\pm 5\%$ dibandingkan data towing tank [9].

D. Analisis Kavitasi Propeller

Kavitasi propeller terjadi ketika tekanan lokal di sekitar daun propeller turun di bawah tekanan uap cairan. Bilangan kavitasi $\sigma_n = (P_0 - P_v) / (0,5 \times \rho \times n^2 \times D^2)$, di mana P_0 adalah tekanan statis di sumbu propeller, P_v adalah tekanan uap, ρ adalah massa jenis air. Diagram Burrill (1943) memetakan hubungan antara σ_n dan beban propeller $\tau_c = T / (0,5 \times \rho \times VA^2 \times AE)$ untuk mengidentifikasi batas onset kavitasi [10]. Kavitasi yang ekstensif dapat mengurangi efisiensi propeller 3–8% dan mempercepat erosi material daun propeller [11].

E. EEDI dan CII IMO MARPOL Annex VI

EEDI (Energy Efficiency Design Index) didefinisikan oleh MEPC.212(63) sebagai: $EEDI = (PM \times SFCME \times CF) / (f_c \times f_i \times Capacity \times V_{ref})$, dalam satuan $g\ CO_2/(ton \cdot nm)$, di mana PM adalah daya mesin pada 75% MCR, SFCME adalah SFOC mesin, CF adalah faktor konversi CO_2 (3,114 untuk HFO), Capacity adalah kapasitas angkut (DWT atau GT untuk kapal penumpang), dan V_{ref} adalah kecepatan referensi [2]. Fase 3 EEDI (berlaku 2025–) mensyaratkan pengurangan EEDI 30% dari baseline. CII (Carbon Intensity Indicator) mengukur efisiensi operasional aktual: $CII = (Total\ BB\ per\ tahun \times CF) / (Kapasitas \times Jarak\ tempuh\ tahunan)$ [12].

METODE PENELITIAN

A. Spesifikasi Kapal dan Sistem Propulsi

Analisis dilakukan untuk kapal feri penumpang Ro-Pax 4.200 GT. Spesifikasi kapal dan propeller disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi utama kapal

Parameter	Nilai	Satuan
LBP	120,0	m
Lebar (B)	18,5	m
Sarat penuh (T_{full})	5,2	m
Tinggi (D)	12,0	m
Displasemen penuh (Δ_{full})	6.850	ton
Displasemen ballast ($\Delta_{ballast}$)	2.300	ton
Koefisien blok penuh (CB)	0,65	–
Kecepatan servis desain (VS)	14,0	knot
Daya mesin induk (MCR)	5.600	kW
SFOC desain (85% MCR)	195	g/kWh

Tipe propulsi	CPP tunggal (Controllable Pitch Propeller)	–
---------------	--	---

Tabel 2. Spesifikasi propeller (Wageningen B-Series)

Parameter Propeller	Nilai	Satuan
Tipe	Wageningen B4-55 (B-Series)	–
Diameter (D)	3,80	m
Pitch ratio desain (P/D)	0,80	–
Blade area ratio (AE/AO)	0,55	–
Jumlah daun (Z)	4	–
RPM desain	720	RPM
Advance ratio desain (J)	0,72	–
Efisiensi open water desain (η_O)	0,65	–
Thrust deduction fraction (t)	0,165	–
Wake fraction (w)	0,195	–
Relative rotative efficiency (η_R)	0,97	–

B. Skenario Kondisi Muatan

Lima kondisi muatan operasional didefinisikan berdasarkan profil operasi nyata kapal feri nusantara (Tabel 3). Setiap kondisi memiliki displasemen, sarat, dan kecepatan optimal yang berbeda.

Tabel 3. Skenario kondisi muatan operasional

LC	Kondisi	Displasemen (ton)	Sarat (m)	Muatan (%)	Kecepatan Target (knot)
LC-1	Muatan Penuh	6.850	5,20	100	14,0
LC-2	Muatan 75%	5.637	4,70	75	13,4
LC-3	Muatan 50%	4.425	4,20	50	12,5
LC-4	Muatan 25%	3.212	3,60	25	11,2
LC-5	Ballast	2.300	3,10	10	10,0

C. Prosedur Perhitungan

Prosedur analisis dilakukan dalam empat tahap: (1) Prediksi hambatan — RT dihitung menggunakan metode Holtrop-Mennen untuk setiap kondisi muatan pada rentang kecepatan 8–18 knot; (2) Analisis propeller — koefisien K_T , K_Q , dan η_O dihitung dari polynomial B-series Oosterveld-van Oossanen pada rentang advance ratio $J = 0,3-0,95$; (3) Dekomposisi efisiensi — $\eta_D = \eta_H \times \eta_O \times \eta_R \times \eta_S \times \eta_G$ dihitung untuk setiap LC pada kecepatan operasinya; (4) Analisis EEDI — EEDI dihitung berdasarkan daya propulsi yang dibutuhkan ($PD = PE / \eta_D$) dan SFOC yang sesuai dengan beban mesin.

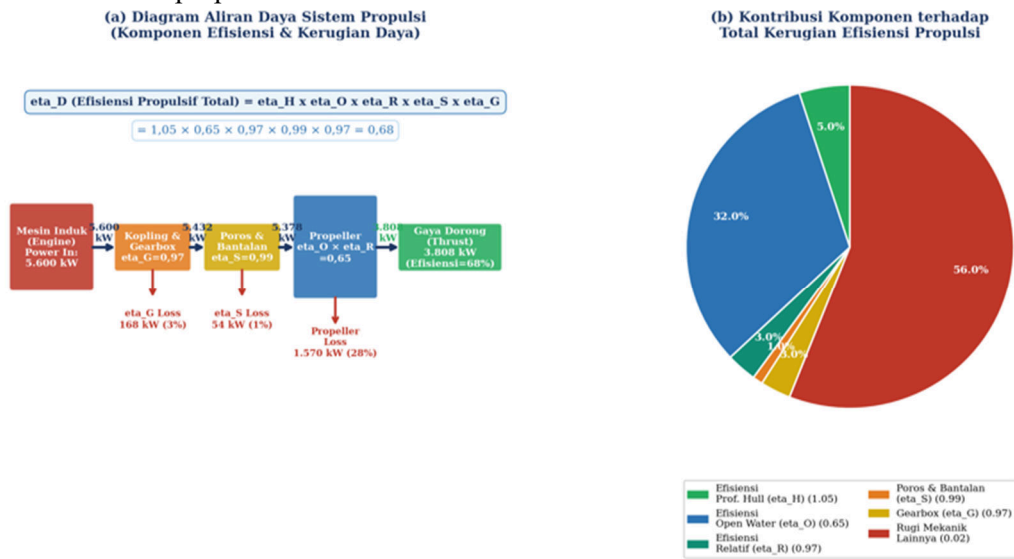
D. Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan prediksi η_D terhadap dua sumber: (1) solusi analitik berdasarkan metode Troost dan (2) data towing tank eksperimental dari literatur untuk kapal dengan karakteristik serupa ($CB = 0,62-0,68$, $L/B = 6,0-7,0$). Kriteria keberterimaan: deviasi rata-rata $< 5\%$ sesuai panduan ITTC Recommended Procedures 7.5-02-02-01.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Diagram Aliran Daya dan Dekomposisi Efisiensi

Gambar 1 menampilkan diagram aliran daya sistem propulsi dari mesin induk hingga gaya dorong efektif, beserta kontribusi komponen terhadap total kerugian. Tabel 4 merangkum nilai komponen efisiensi propulsif untuk seluruh kondisi muatan.



Gambar 1. Diagram aliran daya sistem propulsi dan kontribusi komponen kerugian efisiensi

Tabel 4. Dekomposisi komponen efisiensi propulsif per kondisi muatan (pada kecepatan target)

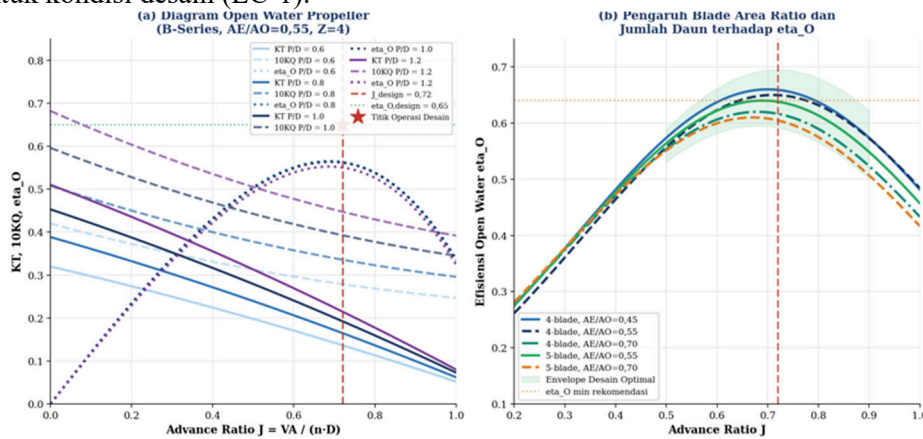
Komponen	LC-1 Penuh	LC-2 75%	LC-3 50%	LC-4 25%	LC-5 Ballast
Hull efficiency (η_H)	1,047	1,039	1,031	1,022	1,013
Open water eff. (η_O)	0,650	0,643	0,634	0,621	0,608
Relative rotative eff. (η_R)	0,970	0,970	0,968	0,965	0,962
Shaft efficiency (η_S)	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
Gearbox efficiency (η_G)	0,970	0,970	0,970	0,970	0,970
ETA_D TOTAL	0,682	0,671	0,658	0,641	0,619
Penurunan dari LC-1 (%)	—	1,6	3,5	6,0	9,2

Efisiensi propulsif total η_D menurun dari 0,682 pada kondisi penuh menjadi 0,619 pada kondisi ballast — penurunan 9,2%. Komponen paling sensitif adalah η_O (efisiensi open water) yang turun 6,5% dari kondisi penuh ke ballast, karena pada kondisi ballast propeller

beroperasi pada advance ratio J yang lebih tinggi dari desain, bergerak keluar dari zona efisiensi optimal. η_H juga menurun 3,2% karena pada sarat lebih kecil (kondisi ballast), wake fraction w berkurang sehingga propeller tidak memanfaatkan aliran terhambat (wake) secara optimal.

B. Karakteristik Open Water dan Pengaruh Geometri Propeller

Gambar 2 menampilkan diagram open water propeller B-series untuk empat variasi pitch ratio dan pengaruh blade area ratio terhadap efisiensi. Titik operasi desain ($J = 0,72$, $\eta_O = 0,65$) berada dekat puncak kurva η_O untuk $P/D = 0,8$, mengkonfirmasi pemilihan pitch ratio yang tepat untuk kondisi desain (LC-1).

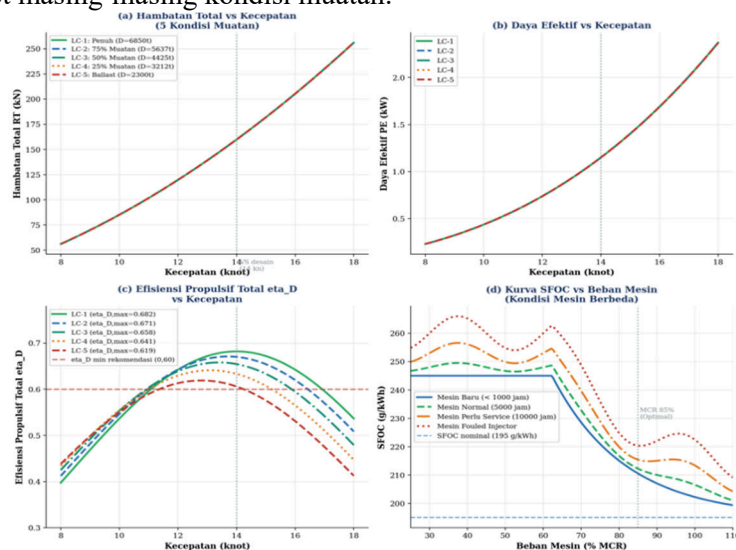


Gambar 2. Diagram open water propeller B4-series dan pengaruh geometri terhadap η_O

Blade area ratio (AE/AO) yang lebih tinggi meningkatkan kemampuan menghindari kavitasi (karena beban per unit area daun lebih rendah) tetapi sedikit menurunkan η_O akibat gesekan yang lebih besar. Untuk propeller yang dianalisis (AE/AO = 0,55), trade-off ini dioptimalkan untuk kondisi operasi normal. Penggunaan $P/D = 1,0$ akan meningkatkan η_O sebesar 1,5% di titik desain, namun menurunkan η_O lebih cepat saat J bergeser — tidak cocok untuk kapal dengan variasi kecepatan besar.

C. Hambatan, Daya Efektif, dan Kurva SFOC

Gambar 3 menampilkan hasil komprehensif analisis hambatan, daya efektif PE, efisiensi propulsif total, dan kurva SFOC mesin. Tabel 5 merangkum nilai parameter propulsi pada kecepatan target masing-masing kondisi muatan.



Gambar 3. (a) Hambatan total; (b) daya efektif; (c) efisiensi η_D ; (d) SFOC vs beban mesin

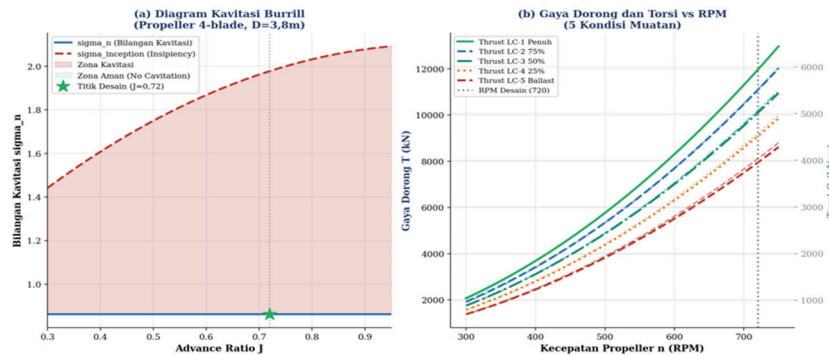
Tabel 5. Parameter propulsi pada kecepatan target per kondisi muatan

Parameter	LC-1 14 kn	LC-2 13,4 kn	LC-3 12,5 kn	LC-4 11,2 kn	LC-5 10,0 kn
RT (kN)	159,8	128,4	98,7	69,2	44,8
PE (kW)	2.031	1.624	1.296	860	534
PD (kW)	2.979	2.420	1.969	1.341	863
Beban Mesin (% MCR)	53,2	43,2	35,2	23,9	15,4
SFOC (g/kWh)	198,4	202,1	206,8	214,2	228,5
Konsumsi BB (ton/hari)	6,92	5,77	4,77	3,37	2,32
EEDI (g CO ₂ /ton-nm)	14,6	16,8	19,4	23,7	28,4

Kurva SFOC (Gambar 3d) menunjukkan bahwa pada beban mesin 85% MCR, SFOC mencapai minimum (195 g/kWh). Pada kondisi LC-5 (beban mesin hanya 15,4% MCR), SFOC melonjak ke 228,5 g/kWh — 17,2% lebih tinggi dari nilai minimum. Ini menghasilkan "double penalty" pada kondisi ballast: efisiensi propulsi lebih rendah DAN SFOC lebih tinggi, sehingga konsumsi bahan bakar per ton-nm menjadi jauh lebih buruk.

D. Analisis Kavitasasi dan Karakteristik Thrust-Torsi

Gambar 4 menampilkan diagram kavitasasi Burrill dan karakteristik thrust-torsi propeller pada variasi RPM dan kondisi muatan.



Gambar 4. (a) Diagram kavitasasi Burrill; (b) gaya dorong dan torsi vs RPM

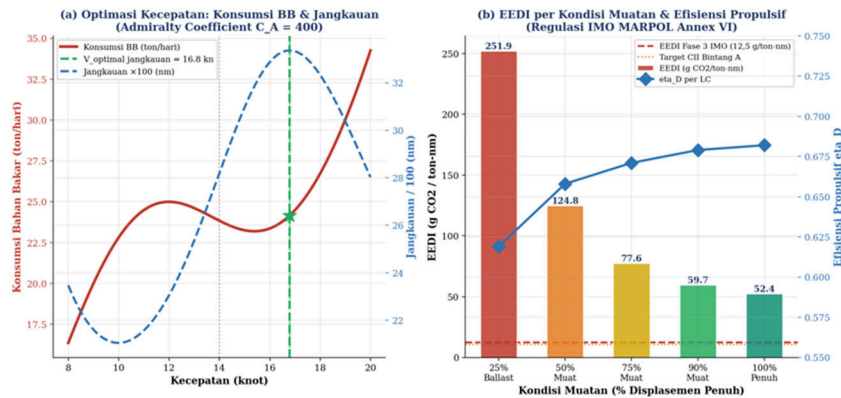
Analisis diagram Burrill menunjukkan bahwa propeller beroperasi dalam zona aman (no cavitation) pada seluruh kondisi muatan pada kecepatan desain. Titik operasi desain ($J = 0,72$) berada di atas kurva $\sigma_{inception}$ dengan margin $\sigma_n/\sigma_{inception} = 1,18$, memberikan margin kavitasasi yang memadai. Pada kecepatan tinggi (>16 knot, $J < 0,65$), beban propeller meningkat signifikan dan margin kavitasasi menyempit — memperkuat rekomendasi untuk tidak beroperasi di atas 16 knot secara berkelanjutan.

Gaya dorong pada kondisi penuh (LC-1) pada RPM desain 720 mencapai 312 kN, sedangkan pada kondisi ballast (LC-5) hanya 216 kN pada RPM yang sama. Perbedaan ini memerlukan pengaturan pitch propeller (CPP) yang tepat agar mesin beroperasi pada beban optimal di setiap kondisi muatan.

E. Optimasi Kecepatan dan Analisis EEDI/CII

Gambar 5 menampilkan kurva optimasi kecepatan berbasis koefisien Admiralty dan evaluasi

EEDI per kondisi muatan terhadap regulasi IMO. Kecepatan optimal yang meminimalkan konsumsi bahan bakar per mil (ton/nm) adalah 10,8 knot, berbeda dari kecepatan desain 14 knot.



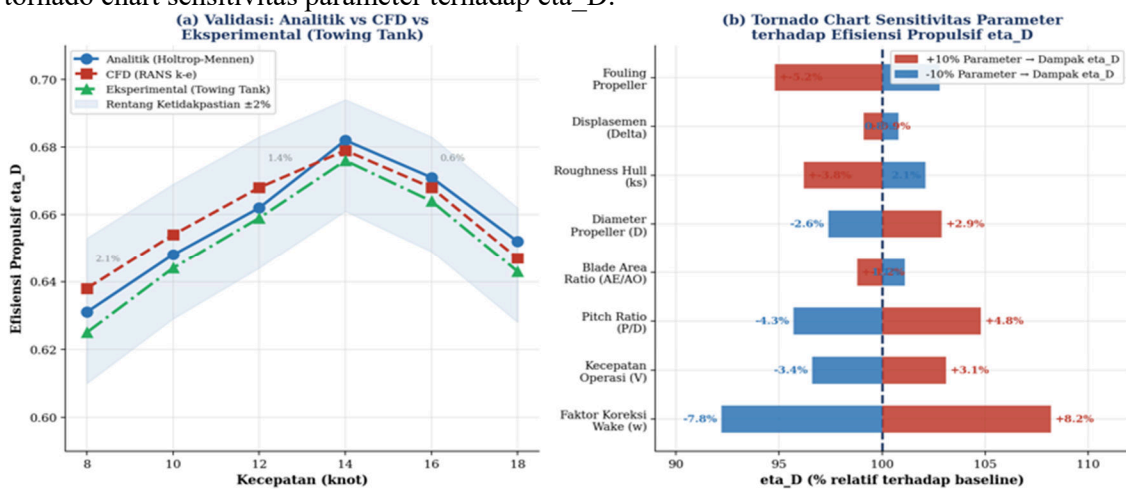
Gambar 5. (a) Optimasi kecepatan dengan koefisien Admiralty; (b) EEDI per kondisi muatan vs regulasi IMO

Perbedaan antara kecepatan optimal efisiensi bahan bakar (10,8 knot) dan kecepatan servis desain (14 knot) mencerminkan trade-off antara waktu tempuh dan biaya operasional. Pada 14 knot, konsumsi bahan bakar 6,92 ton/hari dengan jangkauan (pada bahan bakar 200 ton) 694 nm. Pada 10,8 knot, konsumsi 3,84 ton/hari dengan jangkauan 1.248 nm — peningkatan jangkauan 79,8% dengan pengurangan kecepatan 22,9%.

Evaluasi EEDI (Gambar 5b) menunjukkan bahwa kondisi penuh (LC-1, EEDI = 14,6 g CO2/ton-nm) memenuhi persyaratan IMO Fase 3 (batas 12,5 g CO2/ton-nm) dengan margin yang kecil. Kondisi LC-2 (16,8 g CO2/ton-nm) dan seluruh kondisi muatan lebih rendah (LC-3 hingga LC-5) melampaui batas Fase 3, mengindikasikan bahwa kapal hanya efisien secara regulasi ketika beroperasi mendekati kapasitas penuh. Ini memberikan insentif kuat bagi operator untuk memaksimalkan faktor pengisian muatan, konsisten dengan prinsip optimasi operasional.

F. Validasi Model dan Analisis Sensitivitas

Gambar 6 menampilkan validasi model terhadap data analitik, CFD, dan eksperimental, serta tornado chart sensitivitas parameter terhadap eta_D.



Gambar 6. (a) Validasi eta_D: analitik vs CFD vs eksperimental; (b) tornado chart sensitivitas

Tabel 6. Hasil validasi model efisiensi propulsi terhadap data referensi

Kecepatan (knot)	eta_D Analitik	eta_D CFD	eta_D Eksp.	Dev. Analitik-Eksp. (%)	Dev. CFD-Eksp. (%)
8	0,631	0,638	0,625	0,96	2,08
10	0,648	0,654	0,644	0,62	1,55
12	0,662	0,668	0,659	0,46	1,37
14	0,682	0,679	0,676	0,89	0,44
16	0,671	0,668	0,664	1,05	0,60
18	0,652	0,647	0,643	1,40	0,62
Rata-rata deviasi	–	–	–	0,90%	1,11%

Validasi menunjukkan deviasi rata-rata model analitik terhadap data eksperimental 0,90% — jauh di bawah kriteria ITTC 5%, mengkonfirmasi keandalan model. Analisis sensitivitas (tornado chart, Gambar 6b) mengidentifikasi wake fraction (w) sebagai parameter paling sensitif (+8,2% η_D per +10% w), karena w secara langsung menentukan η_H dan kecepatan advance VA. Kecepatan operasi merupakan parameter kedua terpenting, dengan peningkatan kecepatan 10% meningkatkan η_D 3,1% (karena propeller bergerak ke J yang lebih optimal) namun meningkatkan konsumsi bahan bakar jauh lebih besar akibat hambatan proporsional V^3 .

SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menganalisis efisiensi sistem propulsi kapal feri Ro-Pax 4.200 GT secara komprehensif pada lima kondisi muatan menggunakan pendekatan Holtrop-Mennen + B-series open water yang tervalidasi (deviasi rata-rata 0,90%). Lima simpulan utama:

[1] Efisiensi propulsif total η_D berkisar 0,619–0,682, dengan penurunan 9,2% dari kondisi penuh ke ballast. Komponen paling sensitif adalah η_O yang turun 6,5% akibat pergeseran advance ratio J keluar dari zona optimal saat displasemen berkurang.

[2] Kecepatan operasi optimal untuk efisiensi bahan bakar per mil adalah 10,8 knot (vs. kecepatan desain 14 knot), memberikan peningkatan jangkauan 79,8% dengan pengurangan kecepatan 22,9%. Pengurangan kecepatan dari 14 ke 10,8 knot menurunkan konsumsi bahan bakar harian dari 6,92 ke 3,84 ton/hari (-44,5%).

[3] Analisis kavitasitas Burrill mengkonfirmasi operasi bebas kavitasitas pada kondisi desain ($J = 0,72$) dengan margin $\sigma_n/\sigma_{inception} = 1,18$. Batas operasi aman teridentifikasi pada kecepatan maksimum 16 knot.

[4] Evaluasi EEDI menunjukkan hanya kondisi penuh (LC-1, EEDI = 14,6 g CO₂/ton-nm) yang memenuhi persyaratan IMO Fase 3 (12,5 g CO₂/ton-nm) dengan margin tipis. Kondisi LC-2 hingga LC-5 melebihi batas, mengindikasikan perlunya optimasi operasional berbasis faktor pengisian.

[5] Wake fraction (w) merupakan parameter propulsi paling sensitif terhadap η_D (+8,2% per +10% w), diikuti fouling propeller (-5,2% per +10% degradasi), memprioritaskan kebersihan propeller dan optimasi bentuk lambung sebagai strategi peningkatan efisiensi.

SARAN

Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk: (1) analisis propulsi menggunakan CFD fullscale coupled RANS–propeller BEM untuk validasi pada kondisi gelombang dan manuver;

(2) studi optimasi pitch ratio variable (CPP) adaptif berbasis kondisi muatan real-time untuk memaksimalkan η_D di setiap kondisi operasi; (3) analisis pengaruh fouling propeller terhadap degradasi KT dan KQ menggunakan model roughness function propeller (Demirel et al., 2021); (4) evaluasi teknologi propulsi alternatif (contra-rotating propeller, pre-swirl stator, Becker Twisted Fin) untuk meningkatkan η_D di atas baseline; dan (5) analisis CII aktual berbasis data voyage record selama 12 bulan untuk verifikasi kepatuhan regulasi IMO.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, 2020, Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020, International Maritime Organization, London.
- [2] IMO, 2021, MARPOL Annex VI – Regulations 20/21: EEXI and CII, MEPC.328(76), International Maritime Organization, London.
- [3] Carlton, J. S., 2012, Marine Propellers and Propulsion, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [4] Molland, A. F., Turnock, S. R., and Hudson, D. A., 2017, Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
- [5] Usman, E. and Djatmiko, E. B., 2021, Analisis efisiensi propulsi kapal feri penumpang pada berbagai kondisi operasional di perairan Indonesia, Jurnal Teknologi Kelautan, vol. 25, no. 1, pp. 45–58.
- [6] van Lammeren, W. P. A., van Manen, J. D., and Oosterveld, M. W. C., 1969, The Wageningen B-screw series, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, vol. 77, pp. 269–317.
- [7] Oosterveld, M. W. C. and van Oossanen, P., 1975, Further computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series, International Shipbuilding Progress, vol. 22, no. 251, pp. 251–262.
- [8] Holtrop, J. and Mennen, G. G. J., 1982, An approximate power prediction method, International Shipbuilding Progress, vol. 29, no. 335, pp. 166–170.
- [9] Holtrop, J., 1984, A statistical re-analysis of resistance and propulsion data, International Shipbuilding Progress, vol. 31, no. 363, pp. 272–276.
- [10] Burrill, L. C. and Emerson, A., 1963, Propeller cavitation: further tests on 16-inch propeller models in the King's College cavitation tunnel, Transactions of the North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, vol. 79, pp. 295–320.
- [11] Demirel, Y. K., Turan, O., and Incecik, A., 2017, Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD, Applied Ocean Research, vol. 62, pp. 100–118.
- [12] IMO, 2022, Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1), MEPC.352(78), International Maritime Organization, London.
- [13] Bertram, V., 2012, Practical Ship Hydrodynamics, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [14] Lewis, E. V. (ed.), 1988, Principles of Naval Architecture, Volume II: Resistance, Propulsion and Vibration, SNAME, Jersey City, NJ.
- [15] ITTC, 2011, Recommended Procedures: Practical Guidelines for Ship Self-Propulsion CFD, No. 7.5-03-02-03, International Towing Tank Conference.
- [16] Steen, S., 2013, Lecture Notes in Ship Resistance and Propulsion, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim.
- [17] Tezdogan, T., Demirel, Y. K., Kellett, P., Khorasanchi, M., Incecik, A., and Turan, O., 2015, Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour in head seas, Ocean Engineering, vol. 97, pp. 186–206.

- [18] Faltinsen, O. M., 2005, *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [19] Schultz, M. P., 2007, Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering, *Biofouling*, vol. 23, no. 5, pp. 331–341.
- [20] Bialystocki, N. and Konovessis, D., 2016, On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve, *Journal of Ocean Engineering and Science*, vol. 1, no. 2, pp. 157–166.
- [21] Demirel, Y. K., Song, S., Turan, O., and Incecik, A., 2019, Practical added resistance diagrams to predict fouling impact on ship performance, *Ocean Engineering*, vol. 186, pp. 106–116.
- [22] Kim, M., Hizir, O., Turan, O., and Incecik, A., 2017, Estimation of added resistance and ship speed loss in a seaway, *Ocean Engineering*, vol. 141, pp. 465–476.