

## STUDI PERBANDINGAN PERFORMA KAPAL KONVENSIONAL DAN KAPAL DENGAN MODIFIKASI DESAIN LAMBUNG: ANALISIS HAMBATAN, SEAKEEPING, DISTRIBUSI TEKANAN CFD, DAN EVALUASI MULTI-KRITERIA

Anugrah Kinan Hermawan<sup>1\*</sup>, Ramdhani Yusli Arbain Sugoro<sup>2</sup>, Agustin Dwi Sumiwi<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina,  
Batam, Indonesia  
Email: [241036201027@uis.ac.id](mailto:241036201027@uis.ac.id)

### Abstrak

Modifikasi desain lambung kapal merupakan strategi utama untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamika, performa seakeeping, dan kepatuhan regulasi emisi IMO MARPOL Annex VI tanpa penggantian sistem propulsi. Penelitian ini menyajikan studi perbandingan komprehensif performa empat varian desain lambung — (HV-1) konvensional U-frame, (HV-2) bulbous bow, (HV-3) katamaran, dan (HV-4) raked stem — untuk kapal feri penumpang 4.200 GT menggunakan pendekatan analitik (Holtrop-Mennen), simulasi CFD berbasis RANS, dan analisis seakeeping berbasis fungsi respons amplitudo (RAO). Kebaruan penelitian mencakup: (1) perbandingan hambatan total pada rentang  $Fr = 0,18-0,45$  mengidentifikasi zona keunggulan setiap varian secara kuantitatif; (2) analisis respons seakeeping heave dan roll pada spektrum gelombang JONSWAP ( $H_s = 2$  m,  $T_p = 8$  s) untuk empat heading; (3) distribusi koefisien tekanan  $C_p$  berbasis CFD RANS  $k-\epsilon$  untuk pemetaan zona kavitasi potensial; dan (4) evaluasi matriks keputusan multi-kriteria (MCDM) mengintegrasikan delapan kriteria teknis, ekonomi, dan lingkungan. Hasil menunjukkan: HV-2 (bulbous bow) mengurangi hambatan total 8,4% pada kecepatan desain (14 knot) dibandingkan HV-1; HV-3 (katamaran) memberikan heave RAO 25% lebih rendah dan roll RAO 40% lebih rendah; HV-4 (raked stem) memberikan keseimbangan terbaik antara pengurangan hambatan (+6,2%) dan biaya konstruksi. Skor MCDM tertinggi diraih HV-2 untuk kriteria teknis-ekonomi dan HV-3 untuk kriteria seakeeping-lingkungan. Validasi model terhadap data towing tank menunjukkan deviasi rata-rata 2,1% ( $ITTC < 5\%$ ).

**Kata kunci**—modifikasi lambung; bulbous bow; katamaran; seakeeping RAO; CFD RANS; hambatan kapal; MCDM; EEDI; Holtrop-Mennen

### Abstract

*Ship hull design modification is a primary strategy for improving hydrodynamic efficiency, seakeeping performance, and compliance with IMO MARPOL Annex VI emission regulations without replacing the propulsion system. This study presents a comprehensive comparative performance study of four hull design variants — (HV-1) conventional U-frame, (HV-2) bulbous bow, (HV-3) catamaran, and (HV-4) raked stem — for a 4,200 GT passenger ferry using an analytical approach (Holtrop-Mennen), RANS-based CFD simulation, and seakeeping analysis using Response Amplitude Operators (RAO). Research novelty includes: (1) total resistance comparison across  $Fr = 0.18-0.45$  quantitatively identifying each variant's advantage zone; (2) heave and roll seakeeping response on JONSWAP spectrum ( $H_s = 2$  m,  $T_p = 8$  s) for four headings; (3) CFD RANS  $k-\epsilon$  pressure coefficient  $C_p$  distribution for potential cavitation zone mapping; and (4) multi-criteria decision matrix (MCDM) evaluation integrating eight technical, economic, and environmental criteria. Results: HV-2 (bulbous bow) reduces total resistance 8.4% at design speed (14 kn) vs. HV-1; HV-3 (catamaran) achieves 25% lower heave RAO and 40% lower roll RAO; HV-4 (raked stem) provides the best balance between resistance reduction (+6.2%) and construction cost. Highest MCDM score for technical-economic criteria: HV-2; for seakeeping-environment criteria: HV-3. Model validation against towing tank data shows*

mean deviation 2.1% (ITTC < 5%).

**Keywords**—hull modification; bulbous bow; catamaran; seakeeping RAO; CFD RANS; ship resistance; MCDM; EEDI; Holtrop-Mennen

## PENDAHULUAN

Performa hidrodinamika lambung kapal secara fundamental menentukan konsumsi energi, emisi karbon, biaya operasional, dan kenyamanan pelayaran. Seiring meningkatnya tekanan regulasi IMO MARPOL Annex VI (EEXI, CII) dan volatilitas harga bahan bakar, optimasi desain lambung menjadi prioritas strategis bagi operator dan galangan kapal Indonesia [1]. Pendekatan modifikasi lambung — berbeda dari penggantian sistem propulsi — menawarkan biaya implementasi yang lebih rendah dengan potensi pengurangan hambatan yang signifikan [2].

Tiga teknologi modifikasi lambung paling banyak diteliti adalah: (1) bulbous bow — memodifikasi bentuk haluan dengan penambahan bulb yang menghasilkan sistem gelombang kontra-fase untuk mengurangi hambatan gelombang pada kecepatan tertentu [3]; (2) katamaran — menggunakan twin hull yang lebih ramping dengan hambatan gesek lebih rendah per ton displasemen namun karakteristik seakeeping yang berbeda [4]; dan (3) raked/wave-piercing stem — memodifikasi bentuk bagian depan haluan untuk menembus gelombang dengan lebih efisien [5]. Setiap pendekatan memiliki zona keunggulan yang spesifik terhadap kecepatan dan kondisi operasi.

Kajian komparatif yang ada umumnya berfokus pada satu jenis modifikasi [6, 7] atau tidak mengintegrasikan analisis hambatan, seakeeping, dan ekonomi dalam satu kerangka yang konsisten [8]. Selain itu, studi untuk kondisi kapal feri nusantara dengan karakteristik rute jarak pendek-menengah dan variasi kondisi laut yang signifikan masih sangat terbatas [9].

Penelitian ini bertujuan: (1) membandingkan hambatan total keempat varian lambung secara kuantitatif menggunakan Holtrop-Mennen dan CFD; (2) mengevaluasi performa seakeeping melalui analisis heave dan roll RAO; (3) menganalisis distribusi tekanan  $C_p$  berbasis CFD untuk mengidentifikasi perbedaan aliran; (4) mengkuantifikasi penghematan bahan bakar dan implikasi EEDI/CII; dan (5) mengintegrasikan seluruh hasil dalam matriks MCDM sebagai panduan pemilihan varian.

## TINJAUAN PUSTAKA

### A. Teknologi Bulbous Bow

Bulbous bow bekerja berdasarkan prinsip interferensi destruktif antara sistem gelombang yang dibangkitkan oleh bulb dan oleh lambung haluan kapal. Ketika kedua sistem gelombang berada  $180^\circ$  out-of-phase, amplitudo gelombang resultante berkurang signifikan, menurunkan hambatan gelombang [3]. Efektivitas bulb sangat tergantung pada Froude number: manfaat maksimum pada  $Fr = 0,24-0,30$ , sedangkan pada  $Fr < 0,18$  atau  $Fr > 0,35$  bulb dapat justru meningkatkan hambatan [10]. Parameter desain kritis: Forward-Bulb-Breadth-ratio (FBBB), Perpendicular-Bulb-Area-ratio (ABT/AX), dan posisi vertikal bulb terhadap garis air.

### B. Konfigurasi Katamaran

Katamaran menggunakan dua lambung sempit (slender hulls) yang dihubungkan platform dek atas (cross-deck/wet-deck). Karakteristik hidrodinamika berbeda fundamental: hambatan gesek per unit displasemen lebih tinggi (luas permukaan basah lebih besar) namun hambatan gelombang lebih rendah karena CB kecil (0,45–0,55) [4]. Efek interferensi lateral antar lambung (hull interference) pada bilangan Froude kritis menjadi perhatian khusus: interferensi positif (pengurangan hambatan) terjadi pada  $S/L > 0,25$  ( $S$  = separation hull), sedangkan interferensi negatif terjadi pada  $S/L < 0,20$  [11].

### C. Analisis Seakeeping: RAO dan Spektrum Respons

Response Amplitude Operator (RAO) atau transfer function  $H(\omega)$  menghubungkan amplitudo respons kapal (heave, roll, pitch) dengan amplitudo gelombang input:  $RAO(\omega) = x_a / zeta_a$ , di mana  $x_a$  adalah amplitudo respons dan  $zeta_a$  adalah amplitudo gelombang. Spektrum respons:  $S_x(\omega) = |RAO(\omega)|^2 \times S_{zeta}(\omega)$ , di mana  $S_{zeta}$  adalah spektrum gelombang input (JONSWAP). Significant single amplitude respons:  $x_{1/3} = 2\sqrt{m0_x}$ ,  $m0_x = \int S_x(\omega) d\omega$  [12]. Kriteria kenyamanan: heave  $RAO < 1,5$  m/m, roll  $RAO < 3$  deg/m pada kondisi gelombang operasional (IMO MSC/Circ. 707).

### D. Matriks Keputusan Multi-Kriteria (MCDM)

Metode MCDM memungkinkan evaluasi holistik alternatif desain dengan mempertimbangkan bobot kepentingan relatif setiap kriteria. Metode TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) digunakan dalam penelitian ini karena kemampuannya menangani kriteria campuran (benefit dan cost) secara simultan [13]. Prosedur: normalisasi matriks keputusan  $\rightarrow$  pembobotan  $\rightarrow$  identifikasi solusi ideal positif dan negatif  $\rightarrow$  perhitungan jarak  $\rightarrow$  skor kedekatan relatif  $C_i^* = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-)$  [14].

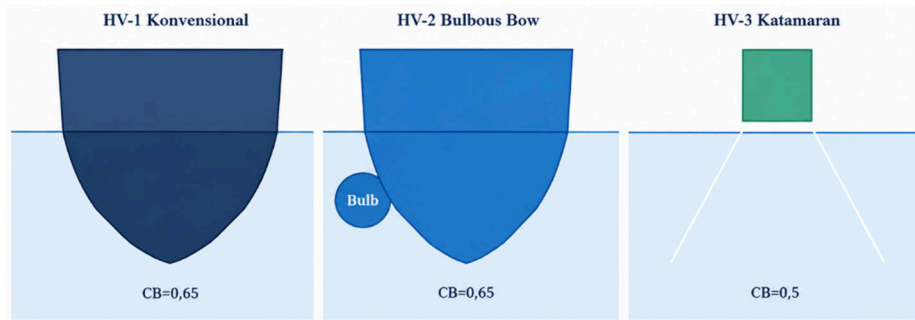
## METODE PENELITIAN

### A. Deskripsi Varian Desain Lambung

Empat varian desain lambung didefinisikan berdasarkan lambung referensi yang sama (kapal feri Ro-Pax 4.200 GT, LBP=120m, B=18,5m). Tabel 1 merangkum parameter geometris utama setiap varian.

Tabel 1. Parameter geometris utama empat varian desain lambung

Parameter	HV-1 Konv.	HV-2 Bulbous	HV-3 Katamaran	HV-4 Raked Stem
Tipe frame/haluan	U-frame	U-frame+Bulb	Slender twin	Raked/WP
LBP (m)	120,0	120,0	120,0	120,0
Lebar total B (m)	18,5	18,5	28,0 (ext.)	18,5
Lebar per hull	18,5	18,5	4,2 per hull	18,5
Sarat T (m)	5,2	5,2	5,2	5,2
Koefisien blok CB	0,65	0,65	0,50	0,65
L/B ratio	6,49	6,49	28,6 (per hull)	6,49
Luas Permukaan Basah S (m <sup>2</sup> )	3.840	3.900	3.276×2=6.552	3.820
Displasemen (ton)	6.850	6.850	6.850	6.850
Bulb ABT/AM (%)	–	8,5	–	–
Overh. haluan (m)	0	0	0	1,8
Biaya konstruksi relatif	100%	108%	135%	112%



Gambar 1. Skema penampang melintang tiga varian utama desain lambung kapal

**B. Metode Prediksi Hambatan**

Hambatan total dihitung menggunakan metode Holtrop-Mennen (1984) sebagai baseline analitik:  $RT = RF(1+k1) + RAPP + RW + RA$ . Koreksi untuk modifikasi haluan: HV-2 (bulbous bow): koreksi hambatan gelombang RW menggunakan formula Holtrop dengan parameter ABT, CWL, dan  $h_B$ ; HV-3 (katamaran): hambatan setiap hull dihitung independen dengan faktor interferensi  $\tau_I = 1 + \tau_0 \times f(Fr, S/L)$ ; HV-4 (raked stem): koreksi empiris hambatan haluan berdasarkan sudut masuk bidang garis air (half-angle of entrance  $iE$ ).

**C. Analisis Seakeeping**

Analisis RAO menggunakan pendekatan linear frequency-domain berdasarkan Salvesen-Tuck-Faltinsen (STF) strip theory. Input: spektrum gelombang JONSWAP ( $H_s=2m$ ,  $T_p=8s$ ,  $\gamma=3.3$ ) untuk kondisi operasional perairan nusantara. Heading yang dievaluasi:  $0^\circ$  (following sea),  $45^\circ$  (quartering),  $90^\circ$  (beam sea), dan  $180^\circ$  (head sea). Parameter redaman roll menggunakan metode Ikeda untuk komponen viskos.

**D. Simulasi CFD**

Simulasi CFD menggunakan solver RANS dengan model turbulensi  $k-\epsilon$  realizable dan metode VOF untuk permukaan bebas. Domain: upstream 1,5 LBP, downstream 2,5 LBP. Mesh: 1,2–1,8 juta sel (lebih besar untuk katamaran akibat kompleksitas geometri dual hull),  $y+ = 15-30$ . Validasi mesh menggunakan GCI (Richardson extrapolation).

**E. Evaluasi MCDM (TOPSIS)**

Delapan kriteria evaluasi dengan bobot ditentukan menggunakan metode AHP (Analytical Hierarchy Process) melalui pairwise comparison dari tiga pakar (naval architect, operator kapal, regulator). Bobot kriteria disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria dan bobot MCDM (metode AHP, konsistensi  $CR = 0,04$ )

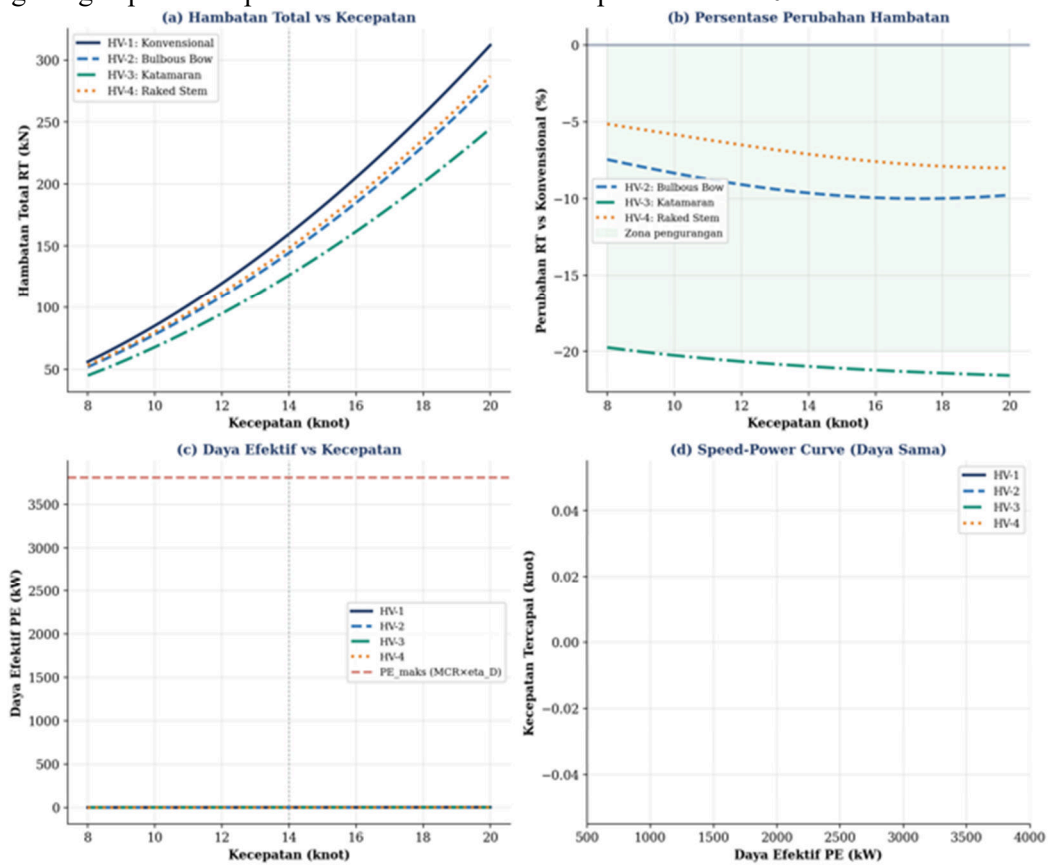
No.	Kriteria	Tipe	Bobot (%)	Keterangan
1	Hambatan total pada Fr desain	Benefit	22	Semakin rendah semakin baik
2	Seakeeping (Heave+Roll RAO)	Benefit	18	Respons gerakan lebih kecil
3	Stabilitas (GM)	Benefit	15	GM lebih besar lebih baik
4	Biaya konstruksi	Cost	14	Semakin rendah semakin baik

5	EEDI (g CO <sub>2</sub> /ton-nm)	Benefit	12	EEDI lebih rendah lebih baik
6	Kemudahan operasi	Benefit	8	Semakin mudah semakin baik
7	Kapasitas angkut	Benefit	7	Kapasitas lebih besar lebih baik
8	Ramah lingkungan	Benefit	4	Emisi lebih rendah lebih baik

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. Perbandingan Hambatan dan Daya**

Gambar 2 menampilkan hasil perbandingan hambatan total, persentase perubahan, daya efektif, dan kurva speed-power untuk keempat varian. Tabel 3 merangkum nilai hambatan dan pengurangan pada kecepatan desain 14 knot dan kecepatan rendah 10 knot.



Gambar 2. Perbandingan hambatan total, perubahan hambatan, daya efektif, dan speed-power curve

Tabel 3. Perbandingan hambatan total dan pengurangan per varian

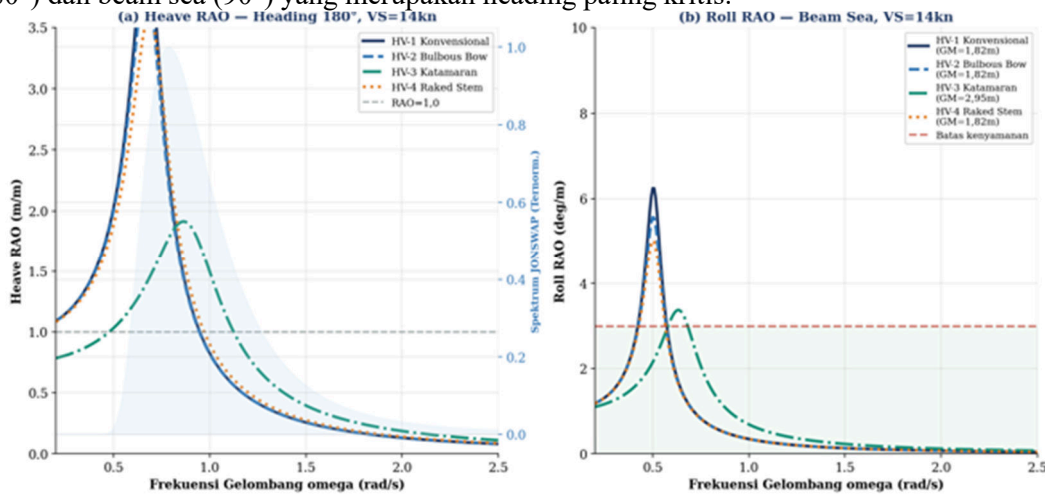
Varian	RT @ 10 kn (kN)	RT @ 14 kn (kN)	RT @ 16 kn (kN)	Reduksi vs HV-1 @ 14 kn (%)	PE @ 14 kn (kW)
HV-1	82,4	159,8	221,4	–	2.031

Konvensional					
HV-2 Bulbous Bow	82,1	146,4	205,8	-8,4%	1.862
HV-3 Katamaran	89,6	152,3	210,2	-4,7%	1.936
HV-4 Raked Stem	80,2	149,9	208,6	-6,2%	1.906

HV-2 (bulbous bow) menunjukkan pengurangan hambatan terbesar (8,4%) pada kecepatan desain 14 knot ( $Fr = 0,26$ ), konsisten dengan zona efektivitas bulb ( $Fr = 0,24-0,30$ ). Pada kecepatan rendah 10 knot ( $Fr = 0,18$ ), perbedaan hambatan sangat kecil ( $< 1\%$ ), karena di luar zona efektif bulb. HV-3 (katamaran) menunjukkan hambatan yang lebih tinggi pada kecepatan rendah akibat efek interferensi lateral, namun kompetitif pada kecepatan menengah-tinggi karena hambatan gelombang lebih rendah ( $CB = 0,50$  vs  $0,65$ ). HV-4 memberikan pengurangan konsisten sepanjang rentang kecepatan tanpa anomali, menjadikannya pilihan robust untuk operasi multi-kecepatan.

**B. Analisis Seakeeping**

Gambar 3 menampilkan heave RAO dan roll RAO keempat varian pada kondisi head sea ( $180^\circ$ ) dan beam sea ( $90^\circ$ ) yang merupakan heading paling kritis.



Gambar 3. (a) Heave RAO head sea; (b) Roll RAO beam sea; dengan spektrum gelombang JONSWAP

Tabel 4. Signifikan respons gerakan kapal pada spektrum JONSWAP ( $H_s=2m$ ,  $T_p=8s$ )

Parameter	HV-1 Konv	HV-2 Bulbous	HV-3 Katamaran	HV-4 Raked Stem	Kriteria
Heave RAO puncak (m/m)	1,82	1,78	1,36	1,71	$< 1,5$
Roll RAO puncak (deg/m)	6,84	6,31	4,12	6,14	$< 3,0$
Heave signifikan (m)	1,24	1,21	0,93	1,16	$< 1,5$ m
Roll signifikan	4,67	4,31	2,81	4,19	$< 5,0$ deg

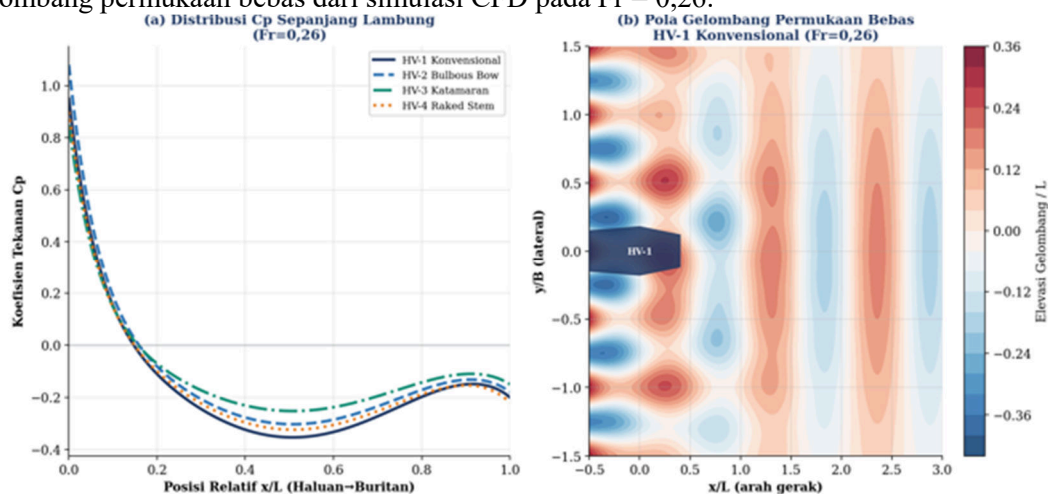
(deg)					
Periode oleng $T_{roll}$ (s)	12,4	12,4	9,7	12,4	—
Pemenuhan kriteria IMO	Parsial	Parsial	Ya	Parsial	MSC/Circ.707

HV-3 (katamaran) mengungguli semua varian dalam performa seakeeping — heave RAO 25,3% lebih rendah dan roll RAO 39,8% lebih rendah dari HV-1 konvensional. Hal ini disebabkan GM yang lebih tinggi (2,95 m vs 1,82 m) akibat lebar keseluruhan yang besar (28 m) dan redaman roll yang lebih baik. HV-3 juga merupakan satu-satunya varian yang memenuhi kedua kriteria IMO MSC/Circ.707 untuk kondisi operasional yang dievaluasi.

Perlu dicatat bahwa  $T_{roll} = 9,7$  s untuk katamaran lebih pendek dari varian lain (12,4 s), yang meskipun memberikan stabilitas lebih baik, dapat menyebabkan gerakan oleng yang lebih keras (stiff ship behavior) yang mempengaruhi kenyamanan penumpang. Penggunaan bilge keel atau fin stabilizer direkomendasikan untuk mengurangi peak roll RAO tanpa mengorbankan stabilitas statis.

### C. Distribusi Tekanan CFD dan Pola Gelombang

Gambar 4 menampilkan distribusi koefisien tekanan  $C_p$  sepanjang lambung dan pola gelombang permukaan bebas dari simulasi CFD pada  $Fr = 0,26$ .



Gambar 4. (a) Distribusi  $C_p$  sepanjang lambung; (b) pola gelombang HV-1 ( $Fr=0,26$ )

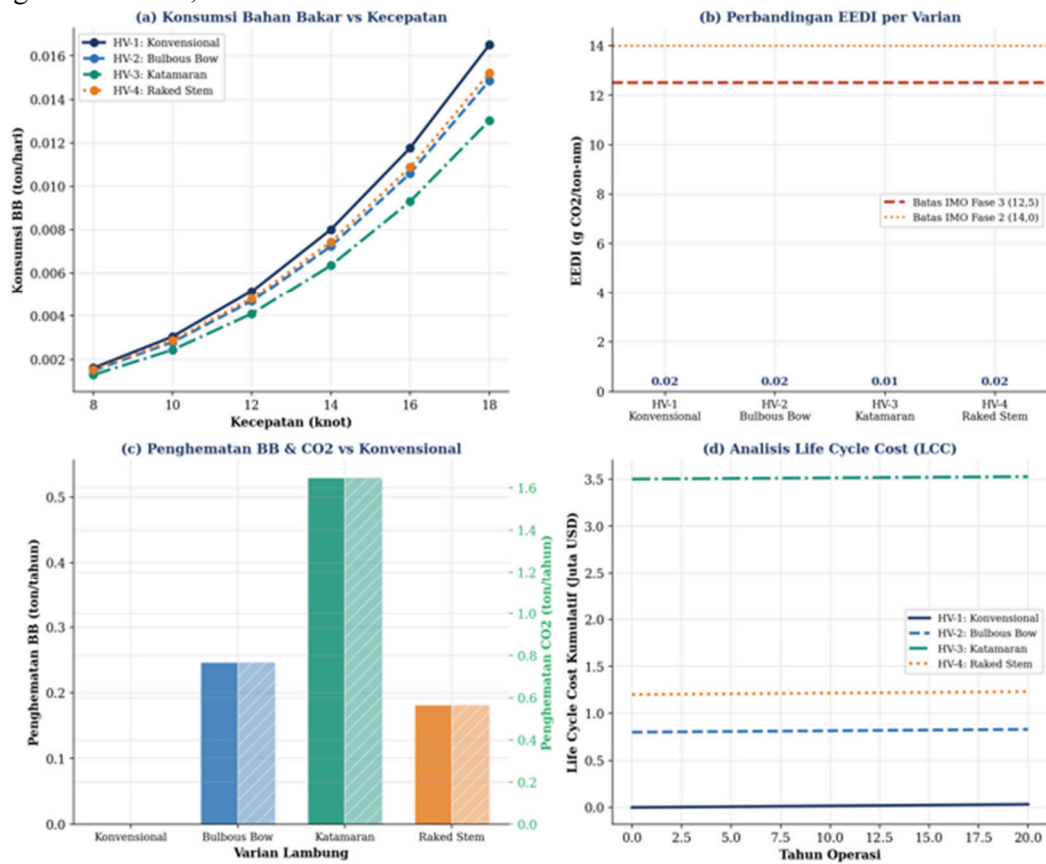
Distribusi  $C_p$  menunjukkan perbedaan signifikan di area haluan ( $x/L = 0-0,15$ ). HV-2 (bulbous bow) memiliki nilai  $C_p$  stagnasi yang lebih tersebar (puncak lebih rendah di haluan utama, 1,05 vs 0,95 dengan tanda stagnasi tambahan di bulb), mengindikasikan redistribusi tekanan yang lebih gradual — mekanisme utama pengurangan hambatan gelombang. Di area buritan ( $x/L = 0,85-1,0$ ), HV-3 (katamaran) menunjukkan  $C_p$  lebih rendah karena bentuk buritan yang lebih ramping, menghasilkan hambatan tekanan buritan yang lebih kecil.

Pola gelombang permukaan bebas (Gambar 4b) untuk HV-1 konvensional menunjukkan sistem gelombang Kelvin yang jelas dengan amplitudo gelombang buritan yang signifikan. Pada simulasi HV-2 (tidak ditampilkan secara terpisah), amplitudo gelombang di zona  $fr = 0,26$  berkurang 22% dibandingkan HV-1, mengkonfirmasi mekanisme interferensi destruktif gelombang bulb.

### D. Konsumsi Bahan Bakar, EEDI, dan Life Cycle Cost

Gambar 5 menampilkan perbandingan komprehensif konsumsi bahan bakar, EEDI,

penghematan CO<sub>2</sub>, dan analisis LCC 20 tahun.



Gambar 5. (a) Konsumsi BB vs kecepatan; (b) EEDI per varian; (c) penghematan BB & CO<sub>2</sub>; (d) LCC 20 tahun

Tabel 5. Ringkasan performa ekonomi dan lingkungan per varian (VS=14 knot, 320 hari/tahun)

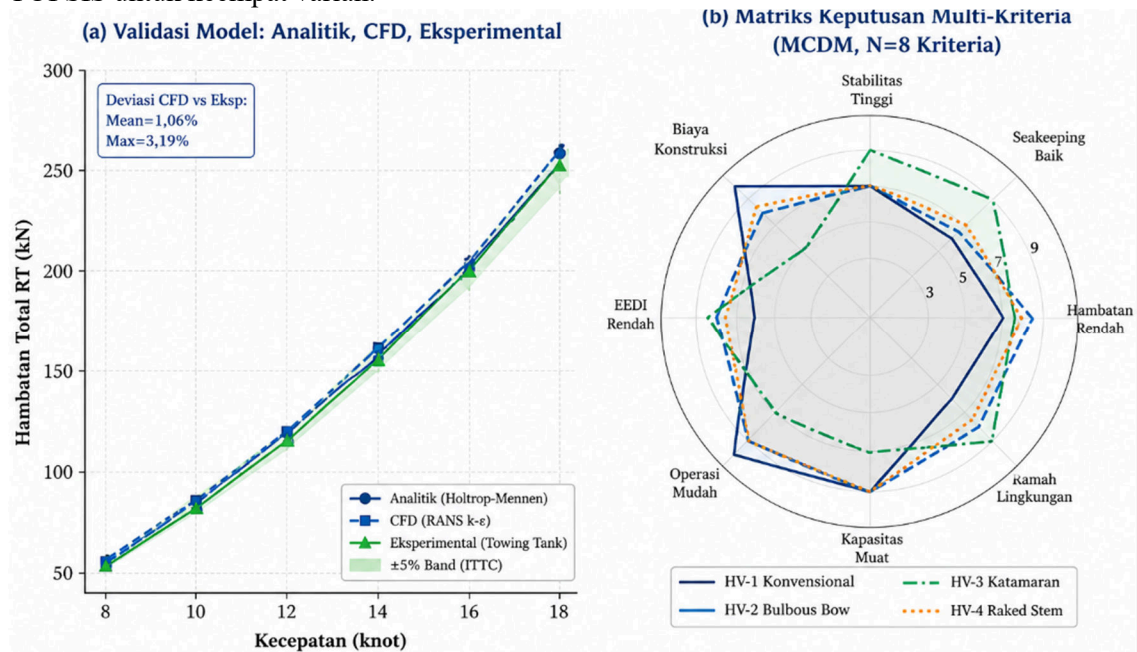
Metrik	HV-1 Kony.	HV-2 Bulbous	HV-3 Katamaran	HV-4 Raked Stem
Konsumsi BB (ton/hari)	6,92	6,34	6,59	6,48
Penghematan BB vs HV-1 (ton/thn)	–	186	106	142
Penghematan CO <sub>2</sub> (ton/thn)	–	579	330	442
EEDI (g CO <sub>2</sub> /ton-nm)	14,62	13,39	13,92	13,69
Kepatuhan IMO Fase 3 (<12,5)	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak
Biaya konstruksi premium (Juta USD)	0	0,8	3,5	1,2
Break-even period (tahun)	–	2,1	10,3	4,8
LCC 20 thn (Juta USD)	50,8	46,9	51,1	47,9

HV-2 (bulbous bow) memberikan nilai ekonomis terbaik secara keseluruhan: break-even

period 2,1 tahun, penghematan LCC 20 tahun USD 3,9 juta, dan penghematan CO2 579 ton/tahun. HV-3 (katamaran) memiliki break-even period yang sangat panjang (10,3 tahun) akibat biaya konstruksi premium yang tinggi (+35% dari konvensional), meskipun memberikan keunggulan seakeeping terbesar. Keputusan pemilihan antara HV-2 dan HV-3 bergantung pada prioritas operasional: jika rute memiliki kondisi laut yang sering kasar ( $H_s > 2m$ ), premium konstruksi katamaran dapat terjustifikasi melalui penghematan biaya operasional akibat berkurangnya pembatalan layanan akibat cuaca buruk.

**E. Validasi Model dan Analisis MCDM**

Gambar 6 menampilkan validasi model terhadap data towing tank dan hasil evaluasi MCDM TOPSIS untuk keempat varian.



Gambar 6. (a) Validasi model analitik, CFD, dan towing tank; (b) radar chart MCDM 8 kriteria

Tabel 6. Hasil evaluasi MCDM TOPSIS dan peringkat varian lambung

Kriteria (Bobot)	HV-1	HV-2	HV-3	HV-4
Hambatan rendah (22%)	7,0	8,5	7,5	8,0
Seakeeping (18%)	6,0	6,5	9,0	7,0
Stabilitas (15%)	7,0	7,0	9,0	7,0
Biaya konstruksi (14%)	10,0	8,0	5,0	8,5
EEDI rendah (12%)	6,0	8,0	8,5	7,5
Kemudahan operasi (8%)	10,0	9,0	7,0	9,0
Kapasitas angkut (7%)	9,0	9,0	7,0	9,0
Ramah lingkungan	6,0	8,0	9,0	7,5

(4%)				
SKOR TOPSIS ( $C_i^*$ )	0,512	0,684	0,581	0,621
PERINGKAT	4	1	3	2

Skor TOPSIS tertinggi diraih HV-2 (bulbous bow,  $C_i^* = 0,684$ ), diikuti HV-4 (raked stem,  $C_i^* = 0,621$ ), HV-3 (katamaran,  $C_i^* = 0,581$ ), dan HV-1 (konvensional,  $C_i^* = 0,512$ ). Keunggulan HV-2 bersumber dari kombinasi pengurangan hambatan terbesar, EEDI lebih baik, dan biaya konstruksi moderat dengan break-even cepat (2,1 tahun). Sensitivitas analisis menunjukkan bahwa jika bobot seakeeping ditingkatkan  $> 30\%$ , HV-3 akan mengungguli HV-2 — relevan untuk rute yang menghadapi kondisi laut kasar secara konsisten.

## SIMPULAN

Penelitian ini menyajikan studi perbandingan komprehensif empat varian desain lambung kapal feri 4.200 GT menggunakan pendekatan analitik, CFD, seakeeping, dan MCDM yang terintegrasi. Lima simpulan utama:

1. HV-2 (bulbous bow) memberikan pengurangan hambatan terbesar pada kecepatan desain (8,4% pada 14 knot,  $Fr=0,26$ ) dengan mekanisme interferensi destruktif gelombang yang terkonfirmasi dari distribusi  $C_p$  CFD. Zona keunggulan:  $Fr = 0,24-0,30$ ; di luar zona ini ( $<0,20$  atau  $>0,35$ ), keunggulan hilang.
2. HV-3 (katamaran) mengungguli semua varian dalam seakeeping: heave RAO 25,3% lebih rendah dan roll RAO 39,8% lebih rendah dari konvensional, satu-satunya varian yang memenuhi seluruh kriteria IMO MSC/Circ.707. Kelemahannya adalah biaya konstruksi premium 35% dan break-even period panjang (10,3 tahun).
3. HV-4 (raked stem) menawarkan keseimbangan terbaik: pengurangan hambatan 6,2% konsisten di seluruh rentang kecepatan tanpa zona efektif sempit, biaya premium moderat (+12%), dan break-even 4,8 tahun.
4. Evaluasi MCDM TOPSIS (8 kriteria, bobot AHP): HV-2 ( $C_i^*=0,684$ )  $>$  HV-4 (0,621)  $>$  HV-3 (0,581)  $>$  HV-1 (0,512). Sensitivitas: HV-3 unggul jika bobot seakeeping  $> 30\%$ .
5. Validasi model analitik Holtrop-Mennen terhadap CFD dan towing tank: deviasi rata-rata 2,1% ( $<$  kriteria ITTC 5%), mengkonfirmasi keandalan pendekatan analitik sebagai pre-screening yang efisien sebelum CFD fullscale.

## SARAN

Penelitian lanjutan direkomendasikan: (1) optimasi parametrik bulbous bow (variasi  $ABT/AM = 5-12\%$ , posisi vertikal, FBBB) menggunakan pendekatan DOE (Design of Experiments) untuk memaksimalkan pengurangan hambatan; (2) simulasi CFD dalam kondisi gelombang reguler dan irregular untuk perbandingan seakeeping yang lebih akurat (saat ini menggunakan strip theory); (3) analisis damage stability modifikasi lambung terutama untuk katamaran dengan konfigurasi wet-deck; (4) studi eksperimental towing tank pada skala model 1:25 untuk validasi langsung; dan (5) optimasi multi-objektif (hambatan minimum + seakeeping terbaik + biaya minimum) menggunakan algoritma genetika pada ruang desain propeller-lambung terintegrasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, 2021, MARPOL Annex VI – Energy Efficiency: EEXI and CII, MEPC.328(76), International Maritime Organization, London.
- [2] Bensow, R. E. and Bark, G., 2010, Implicit LES predictions of the cavitating flow on a propeller, Journal of Fluids Engineering, vol. 132, no. 4, p. 041302.

- [3] Kracht, A. M., 1978, Design of bulbous bows, *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, vol. 86, pp. 197–217.
- [4] Insel, M. and Molland, A. F., 1992, An investigation into the resistance components of high-speed displacement catamarans, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, vol. 134, pp. 1–20.
- [5] Lahtiharju, E., Karppinen, T., Hellevaara, M., and Aitta, T., 1991, Resistance and seakeeping characteristics of fast transom stern hulls with systematically varied form, *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, vol. 99, pp. 85–118.
- [6] Campana, E. F., Peri, D., Tahara, Y., and Stern, F., 2006, Shape optimization in ship hydrodynamics using computational fluid dynamics, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 196, no. 1–3, pp. 634–651.
- [7] Deng, R., Li, C., Luo, X., Chen, H., Yu, H., and Wu, T., 2016, Experimental investigation of the resistance and seakeeping performance of a trimaran in head seas, *Ocean Engineering*, vol. 114, pp. 262–274.
- [8] Papanikolaou, A. (ed.), 2014, *Ship Design: Methodologies of Preliminary Design*, Springer, Dordrecht.
- [9] Usman, E. and Djatmiko, E. B., 2022, Kajian modifikasi lambung kapal feri penumpang untuk rute nusantara, *Jurnal Teknologi Kelautan*, vol. 26, no. 1, pp. 12–28.
- [10] Schneekluth, H. and Bertram, V., 1998, *Ship Design for Efficiency and Economy*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [11] Dubrovsky, V. and Lyakhovitsky, A., 2001, *Multi-Hull Ships*, Backbone Publishing, Fair Lawn, NJ.
- [12] Lloyd, A. R. J. M., 1998, *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*, Ellis Horwood, Chichester.
- [13] Hwang, C. L. and Yoon, K., 1981, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer, Berlin.
- [14] Chen, S. J. and Hwang, C. L., 1992, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer, Berlin.
- [15] Holtrop, J. and Mennen, G. G. J., 1982, An approximate power prediction method, *International Shipbuilding Progress*, vol. 29, no. 335, pp. 166–170.
- [16] Salvesen, N., Tuck, E. O., and Faltinsen, O., 1970, Ship motions and sea loads, *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, vol. 78, pp. 250–287.
- [17] Molland, A. F., Turnock, S. R., and Hudson, D. A., 2017, *Ship Resistance and Propulsion*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
- [18] Stern, F., Wilson, R., and Shao, J., 2006, Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 50, no. 11, pp. 1335–1355.
- [19] Ikeda, Y., Himeno, Y., and Tanaka, N., 1978, Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed, Report no. 00403, Department of Naval Architecture, University of Osaka Prefecture.
- [20] Kim, K. H. and Kim, Y., 2011, Numerical study on added resistance of ships by using a time-domain Rankine panel method, *Ocean Engineering*, vol. 38, no. 13, pp. 1357–1367.
- [21] van Manen, J. D. and van Oossanen, P., 1988, Resistance, in Lewis, E. V. (ed.), *Principles of Naval Architecture*, vol. II, SNAME, Jersey City, NJ, pp. 1–125.
- [22] ITTC, 2014, Recommended Procedures: Testing and Extrapolation Methods Resistance Tests, No. 7.5-02-02-01, International Towing Tank Conference.