

ANALISIS PENGARUH SUDUT MASUK HALUAN TERHADAP HAMBATAN KAPAL MENGGUNAKAN SOFTWARE MAXSURF

Veryawan Nanda Perkasa ¹⁾, Ita Wijayanti ²⁾, Hanifah Widiastuti ³⁾, Meschac Timothee Silalahi ⁴⁾

Politeknik Negeri Batam

Email : veryawan@polibatam.ac.id ¹⁾, ita.wijayanti@polibatam.ac.id ²⁾, hanifah@polibatam.ac.id ³⁾, timothee@polibatam.ac.id ⁴⁾

ABSTRAK

Optimasi sudut masuk haluan merupakan strategi penting untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamis kapal. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi sudut masuk haluan (15°, 20°, 25°, 30°) terhadap hambatan kapal menggunakan simulasi numerik Maxsurf Resistance dengan metode *slenderbody*. Model kapal dengan panjang 30 meter, lebar 8 meter, sarat 2,5 meter, dan koefisien blok 0,52 dianalisis pada kecepatan 15-25 knot. Hasil menunjukkan sudut masuk 15° menghasilkan hambatan terendah secara konsisten. Pada kecepatan 20 knot, model 15° menghasilkan hambatan 193,7 kN dibandingkan 285,0 kN untuk model 30°, menunjukkan perbedaan 47,1%. Sudut masuk yang lebih tajam menghasilkan karakteristik gelombang yang lebih efisien dengan amplitudo *bow wave* lebih rendah. Untuk kapal cepat dengan kecepatan operasional 20-25 knot, sudut masuk 15-20° direkomendasikan untuk minimisasi hambatan dan optimisasi efisiensi bahan bakar.

Kata Kunci : hambatan kapal, sudut masuk haluan, optimasi lambung, hidrodinamika kapal, Maxsurf.

ABSTRACT

Entrance angle optimization is an important strategy for improving ship hydrodynamic efficiency. This study analyzes the effect of entrance angle variations (15°, 20°, 25°, 30°) on ship resistance using Maxsurf Resistance numerical simulation with the slenderbody method. A ship model with length 30 meters, breadth 8 meters, draft 2.5 meters, and block coefficient 0.52 was analyzed at speeds of 15-25 knots. Results show that the 15° entrance angle consistently produces the lowest resistance. At 20 knots, the 15° model generated 193.7 kN resistance compared to 285.0 kN for the 30° model, showing a 47.1% difference. Sharper entrance angles produce more efficient wave characteristics with lower bow wave amplitude. For fast vessels with operational speeds of 20-25 knots, entrance angles of 15-20° are recommended for resistance minimization and fuel efficiency optimization.

Keywords: ship resistance, entrance angle, hull optimization, ship hydrodynamics, Maxsurf

1. PENDAHULUAN

Efisiensi hidrodinamis merupakan faktor krusial dalam desain dan operasi kapal modern, dengan implikasi langsung terhadap konsumsi bahan bakar, emisi gas rumah kaca, dan viabilitas ekonomi dari operasi maritim. Menurut International Maritime Organization (IMO), sektor maritim berkontribusi sekitar 2,89% dari total emisi CO₂ global, dan diprediksi akan meningkat 50-250% pada tahun 2050 jika tidak ada intervensi signifikan (Budiman, 2022). Dalam konteks meningkatnya harga bahan bakar dan regulasi lingkungan yang semakin ketat, optimasi hambatan kapal telah menjadi prioritas utama dalam industri perkapalan global. Hambatan total yang dialami kapal saat bergerak melalui air merupakan resultante dari berbagai komponen yang kompleks (Budiyanto, 2024), termasuk hambatan gesek (*frictional resistance*), hambatan gelombang (*wave-making resistance*), dan hambatan tekanan viskos (*viscous pressure resistance*).

Indonesia, sebagai negara maritim dengan lebih dari 17.000 pulau dan garis pantai terpanjang kedua di dunia, memiliki kebutuhan yang sangat mendesak akan transportasi laut yang efisien (International Maritime Organization, 2023). Urgensi penelitian ini didasarkan pada tiga faktor utama. Pertama, konsumsi bahan bakar kapal patroli dan ferry cepat di Indonesia mencapai ratusan juta liter per tahun dengan biaya operasional yang sangat tinggi. Kedua, regulasi IMO 2030 menargetkan pengurangan intensitas karbon 40% yang memaksa industri maritim nasional untuk segera mengadopsi teknologi efisien. Ketiga, optimasi sudut masuk haluan merupakan strategi yang cost-effective karena dapat diimplementasikan pada tahap desain awal tanpa memerlukan teknologi mahal seperti sistem propulsi hibrida atau bahan bakar alternatif. Penelitian ini memberikan solusi praktis dan aplikatif untuk meningkatkan efisiensi armada nasional melalui optimasi geometri lambung yang dapat menghasilkan penghematan bahan bakar hingga 30-47%.

Penelitian tentang pengaruh bentuk lambung terhadap hambatan kapal memiliki sejarah yang panjang dalam literatur *naval architecture*. Dalam studi monumental Series 60 dari *David Taylor Model Basin* menyatakan bahwa variasi bentuk haluan memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik hambatan kapal pada bilangan Froude tinggi (Patiroi, 2024). Dalam dekade terakhir, penelitian menggunakan CFD modern telah berkembang pesat. Optimasi bentuk haluan menggunakan metode CFD dan menyimpulkan bahwa optimasi geometri haluan dapat menghasilkan pengurangan hambatan hingga 8-12% untuk kapal kontainer pada kecepatan operasional (Ramdhani, 2022). Penelitian menggunakan CFD dengan Volume of Fluid (VOF) method mengidentifikasi bahwa entrance angle 15-20° menghasilkan pola interferensi gelombang yang menguntungkan dengan amplitudo gelombang transversal yang lebih rendah (Akbar, 2024).

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian terdahulu terletak pada beberapa aspek fundamental. Pertama, penelitian ini secara sistematis memvariasikan entrance angle sebagai parameter independen tunggal dengan empat level yang terdefinisi jelas (15°, 20°, 25°, 30°), berbeda dengan penelitian yang mengoptimasi geometri haluan secara keseluruhan tanpa isolasi parameter spesifik. Kedua, penelitian ini menggunakan Maxsurf Resistance dengan metode *slenderbody* yang lebih efisien secara komputasional dibanding high-fidelity CFD yang digunakan Akbar, M (Akbar, 2024), membuatnya lebih aplikatif untuk preliminary design di industri. Ketiga, penelitian ini secara spesifik menargetkan kapal cepat displacement (F_n 0,45-0,75) yang beroperasi di perairan Indonesia, mengisi gap penelitian lokal yang masih sangat terbatas. Keempat, penelitian ini menyediakan data kuantitatif lengkap untuk 44 kondisi simulasi yang dapat langsung digunakan sebagai panduan desain praktis, berbeda dengan studi terdahulu yang lebih berfokus pada aspek teoritis dan mekanisme fisika.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik untuk menganalisis pengaruh variasi sudut masuk haluan (*entrance angle*) terhadap karakteristik hambatan kapal. Metodologi penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan validitas dan reliabilitas hasil, dengan mengintegrasikan teori hidrodinamika kapal, *numerical modeling techniques*, dan *best practices* dalam *naval architecture*. Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikategorikan sebagai penelitian kuantitatif dengan metode simulasi komputasional, dimana parameter geometri kapal divariasikan secara terkontrol untuk mengisolasi pengaruh spesifik dari sudut masuk haluan terhadap hambatan total.

2.1 Parameter Desain Kapal

Seleksi parameter desain kapal merupakan tahap krusial yang menentukan relevansi dan aplikabilitas hasil penelitian. Parameter dipilih berdasarkan karakteristik tipikal dari kapal patroli atau kapal penyeberangan cepat yang beroperasi di perairan Indonesia, dengan mempertimbangkan *trade-off* antara performa hidrodinamis, kapasitas *payload*, dan *requirement* operasional. Panjang keseluruhan kapal (LOA) ditetapkan 30 meter, yang merupakan ukuran yang umum untuk kapal patroli *coast guard* dan kapal penyeberangan antar pulau dengan kapasitas menengah. Ukuran ini juga advantageous dari perspektif konstruksi dan operasional, berada dalam kategori yang dapat dibangun di galangan kapal lokal dengan fasilitas standar dan dapat beroperasi di berbagai kondisi pelabuhan.

Tabel 1. Parameter desain kapal

Parameter	Nilai
Panjang Keseluruhan (LOA)	30 meter
Lebar Kapal (B)	8 meter
Tinggi Kapal (H)	7 meter
Sarat Air (T)	2,5 meter
Displacement (Δ)	319 ton

Parameter	Nilai
Koefisien Blok (C_b)	0,52
Rasio L/B	3,75
Rasio B/T	3,20
Rasio L/T	12,00
Variasi Sudut Masuk	15°, 20°, 25°, 30°
Rentang Kecepatan Simulasi	15 - 25 knot
Interval Kecepatan	1 knot
Rentang Bilangan Froude	0,45 - 0,75
Jumlah Data Point	44 (4 model $\times$ 11 kecepatan)

Lebar kapal (B) ditetapkan 8 meter, menghasilkan rasio panjang terhadap lebar (L/B) sebesar 3,75. Rasio ini berada dalam rentang optimal untuk kapal cepat, memberikan keseimbangan antara stabilitas melintang yang memadai dan hambatan hidrodinamis yang terkontrol. Rasio L/B yang lebih besar (kapal lebih ramping) umumnya menghasilkan hambatan yang lebih rendah tetapi dapat mengorbankan stabilitas dan volume internal. Tinggi kapal (H) 7 meter memberikan *freeboard* yang cukup untuk operasi dalam berbagai kondisi cuaca dan memungkinkan *arrangement* internal yang fleksibel untuk akomodasi mesin, tangki bahan bakar, dan ruang kru. Sarat air (T) ditetapkan 2,5 meter, yang berkorespondensi dengan draft-to-depth ratio (T/H) sekitar 0,36, typical untuk kapal jenis ini dan memberikan clearance yang memadai untuk operasi di perairan dengan kedalaman terbatas.

Displacement kapal ditetapkan 319 ton, yang konsisten dengan dimensi yang telah ditentukan dan koefisien blok (C_b) sebesar 0,52. Koefisien blok didefinisikan sebagai rasio volume displacement aktual terhadap volume balok dengan dimensi $L \times B \times T$, dan nilai 0,52 mengindikasikan bentuk lambung yang relatif ramping (*fine*). Nilai C_b ini typical untuk kapal displacement berkecepatan menengah hingga tinggi, dimana bentuk yang lebih ramping menghasilkan hambatan

gelombang yang lebih rendah pada bilangan Froude tinggi. Untuk validasi, displacement dapat dihitung menggunakan formula:

$$\Delta = \rho \times V = \rho \times (C_b \times L \times B \times T) \quad (1)$$

dimana Δ adalah displacement dalam ton, ρ adalah densitas air laut ($1,025 \text{ ton/m}^3$), V adalah volume displacement, C_b adalah koefisien blok, L adalah panjang kapal, B adalah lebar, dan T adalah sarat. Substitusi nilai-nilai menghasilkan: $\Delta = 1,025 \times (0,52 \times 30 \times 8 \times 2,5) = 319,5 \text{ ton}$, yang memverifikasi konsistensi parameter desain

2.2 Metode Simulasi Slenderbody Method

Maxsurf Resistance menggunakan metode slenderbody untuk prediksi hambatan kapal. Metode ini merupakan pendekatan berbasis teori potensial yang dikembangkan oleh Michell (1898) dan diperluas oleh berbagai peneliti termasuk Guilloton (1964) dan Maruo (1962). Asumsi fundamental dari teori ini adalah bahwa kapal dapat direpresentasikan sebagai distribusi sources dan sinks sepanjang centerline, dengan strength yang bervariasi untuk menghasilkan displacement yang diinginkan. Aliran fluida diasumsikan irrotational dan inviscid, memungkinkan penggunaan teori potensial untuk menghitung hambatan gelombang.

Formula dasar untuk hambatan gelombang menurut teori Michell dapat diekspresikan sebagai:

$$R_W = (4\rho g V^2 / \pi) \times \iint [S'(x)S'(\xi)] \times \cos[K(x-\xi)] d\theta d\xi dx \quad (9)$$

dimana $S'(x)$ adalah gradien longitudinal dari sectional area curve, K adalah wave number yang bergantung pada θ (sudut wave ray), dan integrasi dilakukan over panjang kapal dan spektrum sudut gelombang. Meskipun formula eksak ini kompleks, implementasi modern dalam software seperti Maxsurf menggunakan numerical integration dan fast Fourier transform techniques untuk evaluasi yang efisien.

Metode *slenderbody valid* untuk kapal dengan *slenderness ratio* yang reasonable ($L/B > 3$) dan beroperasi pada bilangan Froude tidak terlalu tinggi ($Fn < 0,8$). Untuk kapal dalam penelitian ini dengan $L/B = 3,75$ dan Fn

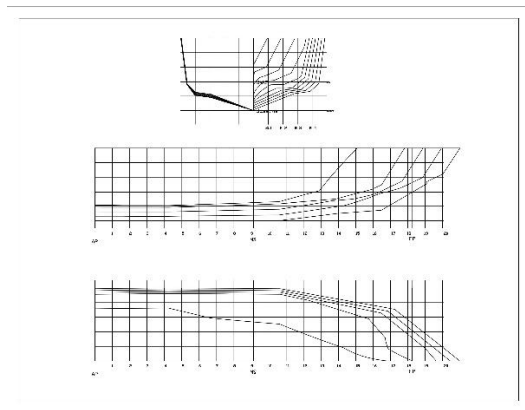
maksimum 0,75, metode ini sangat applicable. Keuntungan utama dari metode ini adalah computational efficiency yang sangat baik dibandingkan dengan *full Navier-Stokes CFD*, memungkinkan *rapid evaluation* dari *multiple design alternatives* dalam tahap preliminary design, sambil tetap memberikan akurasi yang adequate untuk perbandingan relatif dan trend identification.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Geometri Model Kapal dan Parameter Penelitian

Penelitian ini menggunakan model kapal dengan konfigurasi geometri yang dirancang khusus untuk menganalisis pengaruh sudut masuk haluan terhadap karakteristik hambatan. Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak *Maxsurf Resistance* dengan metode *slenderbody* yang merupakan pendekatan berbasis teori potensial yang telah terbukti akurat untuk prediksi hambatan kapal pada tahap desain awal. Metode ini mengasumsikan aliran fluida tidak kental (*inviscid flow*) dengan koreksi empiris untuk memperhitungkan efek viskositas, sehingga dapat memberikan estimasi hambatan yang reliable dengan waktu komputasi yang relatif efisien.

Parameter geometri kapal yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: panjang keseluruhan kapal (*length overall* atau LOA) 30 meter, lebar kapal (*breadth* atau B) 8 meter, tinggi kapal (*depth* atau H) 7 meter, dan sarat air (*draft* atau T) 2,5 meter. Kapal memiliki displacement sebesar 319 ton dengan koefisien blok (C_b) 0,52. Nilai koefisien blok ini mengindikasikan bahwa kapal memiliki bentuk lambung yang relatif ramping (*slender*), yang umumnya cocok untuk aplikasi kapal berkecepatan menengah hingga tinggi seperti kapal patroli, kapal penyeberangan cepat, atau kapal *search and rescue* (SAR). Rasio panjang terhadap lebar (L/B) adalah 3,75, yang berada dalam rentang tipikal untuk kapal jenis ini dan memberikan keseimbangan yang baik antara stabilitas dan resistensi hidrodinamis.



Gambar 1. *Linesplan*

Gambar 1 menunjukkan *Linesplan* atau rencana garis dari model kapal yang digunakan dalam penelitian ini. *Linesplan* merupakan representasi grafis dua dimensi yang menggambarkan bentuk tiga dimensi lambung kapal melalui tiga proyeksi ortogonal: *body plan* (tampak depan), *sheer plan* (tampak samping), dan *half-breadth plan* (tampak atas). Dalam gambar ini, dapat diamati dengan jelas perbedaan sudut masuk haluan pada keempat variasi model yang diuji, yaitu 15°, 20°, 25°, dan 30°. Setiap model mempertahankan parameter geometri yang sama untuk bagian tengah kapal (*midship section*) dan bagian buritan, sehingga perbedaan performa yang diamati dapat secara langsung diatribusikan kepada variasi sudut masuk haluan.

3.2. Hasil Simulasi dan Distribusi Hambatan Total

Simulasi hambatan dilakukan pada rentang kecepatan operasional 15 hingga 25 knot dengan interval 1 knot, menghasilkan total 44 data point untuk keempat variasi sudut masuk. Rentang kecepatan ini dipilih berdasarkan pertimbangan bahwa kapal dengan ukuran dan karakteristik seperti ini umumnya beroperasi pada bilangan *Froude* (F_n) antara 0,35 hingga 0,75, yang merupakan regime kecepatan menengah hingga tinggi dimana hambatan gelombang mulai menjadi signifikan dan mendominasi total hambatan.

Tabel 2. Hasil Simulasi Total Hambatan pada Berbagai Sudut Masuk Haluan

Kecepatan (knot)	Model 15° (kN)	Model 20° (kN)	Model 25° (kN)	Model 30° (kN)
15	99.3	118.3	125.8	171.7
16	101.7	126.6	134.2	183.8
17	107	135.2	142.5	193.7
18	125.8	154.9	161.7	214.1
19	156.7	185.3	191.8	246.1
20	193.7	221.2	227.6	285
21	231.2	257.5	264	325.2
22	266	291.2	297.7	363.4
23	296.9	321.1	327.7	398.1
24	323.5	347	353.8	429
25	346.5	369.3	376.1	456.3

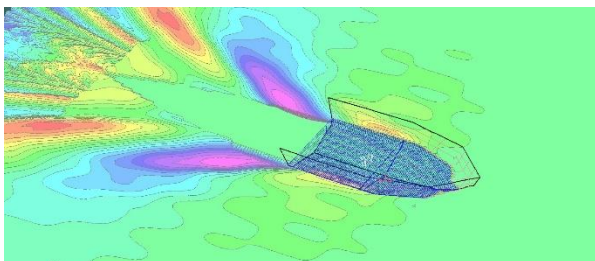
Tabel 2 merupakan kompilasi hasil simulasi numerik yang menampilkan total hambatan (*total resistance*) dalam satuan *kiloNewton* (kN) untuk keempat variasi model pada rentang kecepatan 15 hingga 25 knot. Data dalam tabel ini merepresentasikan hambatan total yang dialami kapal saat bergerak dalam kondisi air tenang (*calm water*), yang mencakup komponen hambatan gesek (*frictional resistance*), hambatan gelombang (*wave-making resistance*), dan hambatan tekanan viskos (*viscous pressure resistance*). Dari tabel ini, dapat diamati beberapa tren yang sangat signifikan dan konsisten di sepanjang rentang kecepatan yang diuji.

Temuan utama yang paling menonjol dari Tabel 2 adalah bahwa model dengan sudut masuk 15° secara konsisten menunjukkan hambatan total terendah pada seluruh rentang kecepatan operasional. Pada kecepatan 15 *knot*, model 15° menghasilkan hambatan sebesar 99,3 kN, sedangkan model 30° menghasilkan hambatan 171,7 kN, menunjukkan perbedaan sebesar 72,9% atau 72,4 kN. Perbedaan *absolut* ini terus meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan. Pada kecepatan 20 knot, hambatan model 15° adalah 193,7 kN sementara model 30° mencapai 285,0 kN, dengan selisih 91,3

kN atau 47,1%. Pada kecepatan maksimum yang diuji yaitu 25 knot, perbedaan ini menjadi 109,8 kN atau 31,7%, dimana model 15° memerlukan 346,5 kN sedangkan model 30° memerlukan 456,3 kN.

Analisis lebih lanjut terhadap data menunjukkan bahwa peningkatan hambatan dengan kecepatan mengikuti pola non-linear yang semakin tajam pada kecepatan tinggi. Untuk model 15°, peningkatan hambatan dari 15 ke 16 knot hanya 2,4 kN (2,4%), namun peningkatan dari 24 ke 25 *knot* adalah 23,0 kN (7,1%). Pola yang sama terlihat pada semua model, dengan akselerasi yang lebih tajam pada model dengan sudut masuk yang lebih besar. Fenomena ini mengindikasikan transisi dari regime yang didominasi hambatan gesek pada kecepatan rendah ke regime yang didominasi hambatan gelombang pada kecepatan tinggi. Titik infleksi yang paling jelas terjadi sekitar 18-19 knot, yang berkorespondensi dengan bilangan Froude sekitar 0,40-0,45 berdasarkan panjang kapal 30 meter.

Model 20° dan 25° menunjukkan nilai hambatan yang relatif serupa, terutama pada kecepatan di bawah 20 knot. Perbedaan antara kedua model ini berkisar 5-10% pada rentang kecepatan rendah, namun meningkat menjadi 10-15% pada kecepatan tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang sudut masuk 20-25°, pengaruh terhadap hambatan tidak selinear seperti pada rentang 15-20° atau 25-30°. Fenomena ini mungkin berkaitan dengan karakteristik pembentukan gelombang dan pola aliran yang kompleks di sekitar haluan kapal pada regime transisi antara bentuk tajam dan tumpul.



Gambar 2. Grafik Hubungan Kecepatan Kapal terhadap Total Hambatan

Gambar 2 menunjukkan representasi *visual* dari data yang disajikan dalam Tabel 1,

dalam bentuk grafik hubungan antara kecepatan kapal (sumbu horizontal, dalam knot) terhadap total hambatan (sumbu vertikal, dalam *kiloNewton*). Grafik ini menggunakan empat kurva berbeda yang masing-masing merepresentasikan model dengan sudut masuk 15°, 20°, 25°, dan 30°. Visualisasi ini sangat efektif dalam mengidentifikasi tren, pola, dan karakteristik perilaku hambatan yang mungkin tidak langsung terlihat dari data tabular.

Dari Gambar 2, dapat diamati dengan jelas bahwa semua kurva menunjukkan tren peningkatan yang non-linear, dengan *curvature* yang semakin tajam pada kecepatan tinggi. Bentuk kurva ini karakteristik untuk hambatan kapal displacement, dimana pada kecepatan rendah, hambatan meningkat secara relatif moderat mengikuti pola kuadratik yang didominasi oleh hambatan gesek, sementara pada kecepatan tinggi, hambatan meningkat secara eksponensial mengikuti pola yang lebih mendekati kubik atau bahkan quartic, yang didominasi oleh hambatan pembentukan gelombang. Transisi antara kedua regime ini terlihat jelas sebagai perubahan *curvature* pada grafik, yang terjadi pada rentang 17-19 knot untuk semua model.

Separasi antara kurva ini mengindikasikan magnitude perbedaan hambatan yang disebabkan oleh variasi sudut masuk. Yang paling menonjol adalah bahwa kurva untuk model 15° konsisten berada di posisi terendah pada grafik, menunjukkan hambatan yang paling kecil di seluruh rentang kecepatan. Sementara itu, kurva untuk model 30° berada di posisi tertinggi, menunjukkan hambatan yang paling besar. Jarak vertikal antara kurva ini, yang merepresentasikan perbedaan hambatan *absolut*, terlihat semakin melebar pada kecepatan tinggi. Hal ini mengkonfirmasi observasi sebelumnya bahwa pengaruh sudut masuk terhadap hambatan menjadi semakin signifikan pada bilangan Froude yang lebih tinggi.

Karakteristik yang menarik dapat diamati pada kurva model 20° dan 25°, dimana keduanya menunjukkan trajektori yang relatif paralel dengan jarak yang hampir konstan pada kecepatan rendah (15-18 knot), namun mulai

diverge pada kecepatan tinggi (21-25 knot). Fenomena ini mengindikasikan bahwa pada kecepatan rendah dimana hambatan gesek dominan, perbedaan sudut masuk antara 20° dan 25° tidak memberikan dampak yang signifikan. Namun pada kecepatan tinggi dimana hambatan gelombang menjadi dominan, perbedaan geometri ini mulai memberikan kontribusi yang substansial terhadap total hambatan.

3.3. Analisis Berbasis Bilangan Froude dan Regime Aliran

Bilangan Froude (F_n) merupakan parameter non-dimensional yang fundamental dalam hidrodinamika kapal, didefinisikan sebagai $F_n = V/(gL)^{0.5}$, dimana V adalah kecepatan kapal dalam m/s, g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$), dan L adalah panjang kapal dalam meter. Untuk kapal dengan panjang 30 meter dalam penelitian ini, kecepatan 15 knot ($7,72 \text{ m/s}$) berkorespondensi dengan $F_n \approx 0,45$, sementara 25 knot ($12,86 \text{ m/s}$) berkorespondensi dengan $F_n \approx 0,75$. Bilangan Froude mengkarakterisasi rasio gaya inersia terhadap gaya gravitasi, dan secara langsung berkaitan dengan karakteristik pembentukan gelombang dan distribusi komponen hambatan.

Analisis data berdasarkan klasifikasi bilangan Froude mengungkapkan beberapa karakteristik yang penting. Pada regime kecepatan rendah dengan $F_n < 0,40$ (kecepatan < 17 knot), perbedaan hambatan antar model berkisar 16-22%. Pada regime ini, hambatan masih didominasi oleh komponen gesek yang relatif tidak sensitif terhadap perubahan geometri haluan. Luas permukaan basah untuk semua model relatif sama karena displacement dan draft yang identik, sehingga hambatan gesek tidak menunjukkan variasi yang dramatis. Perbedaan hambatan yang ada terutama berasal dari perbedaan kecil dalam hambatan tekanan viskos yang terkait dengan karakteristik *boundary layer* dan *wake formation*.

Namun, pada regime kecepatan menengah dengan $0,40 < F_n < 0,60$ (17-21 knot), terjadi transisi yang signifikan dalam karakteristik hambatan. Pada rentang ini, hambatan

gelombang mulai menjadi komponen yang substansial dari total hambatan, dan perbedaan antar model meningkat menjadi 25-35%. Ini adalah regime yang paling kritis untuk desain kapal cepat, karena merepresentasikan kondisi operasional tipikal untuk banyak aplikasi seperti kapal patroli, ferry cepat, dan kapal SAR. Dalam regime ini, optimasi geometri haluan memberikan benefit yang sangat signifikan, dan keputusan desain dapat memiliki dampak yang dramatis terhadap efisiensi operasional.

Pada regime kecepatan tinggi dengan $F_n > 0,60$ (kecepatan > 21 knot), hambatan gelombang menjadi komponen yang sangat dominan, dan perbedaan antar model mencapai 32-40%. Model dengan sudut masuk 30° menunjukkan peningkatan hambatan yang sangat tajam pada regime ini, mengindikasikan bahwa pembentukan gelombang yang tidak efisien menjadi penalty yang sangat besar. Gradien kurva hambatan untuk model ini menjadi sangat curam, menunjukkan bahwa setiap peningkatan kecepatan menghasilkan peningkatan hambatan yang semakin besar. Sebaliknya, model 15° menunjukkan kurva yang relatif lebih moderat, mengindikasikan bahwa geometri yang optimal mampu mengelola pembentukan gelombang dengan lebih baik bahkan pada bilangan Froude tinggi.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil menginvestigasi pengaruh variasi sudut masuk haluan terhadap karakteristik hambatan kapal melalui simulasi numerik yang sistematis menggunakan *Maxsurf Resistance* dengan metode *slenderbody*. Analisis komprehensif terhadap empat variasi model dengan sudut masuk 15° , 20° , 25° , dan 30° pada rentang kecepatan operasional 15-25 knot telah menghasilkan pemahaman yang mendalam tentang mekanisme hidrodinamis yang mendasari fenomena hambatan kapal dan memberikan insights yang sangat valuable untuk optimasi desain lambung kapal, khususnya untuk kapal berkecepatan

menengah hingga tinggi yang beroperasi pada bilangan Froude 0,45-0,75.

Temuan utama penelitian menunjukkan bahwa sudut masuk haluan memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap total hambatan kapal, dengan magnitudo pengaruh yang semakin meningkat pada kecepatan yang lebih tinggi. Model dengan sudut masuk 15° secara konsisten menunjukkan performa superior di seluruh rentang kecepatan yang diuji, menghasilkan hambatan yang lebih rendah antara 31,7% hingga 72,9% dibandingkan dengan model dengan sudut masuk 30°. Pada kecepatan 20 knot yang merepresentasikan kondisi operasional tipikal, perbedaan hambatan mencapai 91,3 kN atau 47,1%, yang merupakan perbedaan yang sangat substansial dengan implikasi signifikan terhadap konsumsi bahan bakar dan efisiensi operasional. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh karakteristik pembentukan gelombang yang lebih efisien pada model dengan sudut masuk yang lebih tajam, dimana geometri haluan yang streamlined menghasilkan *bow wave* dengan amplitudo lebih rendah dan sistem gelombang yang lebih terorganisir dengan interferensi yang menguntungkan. Analisis berdasarkan bilangan Froude mengungkapkan bahwa sensitivitas hambatan terhadap sudut masuk bervariasi dengan regime kecepatan, dengan pengaruh yang lebih moderat pada kecepatan rendah ($F_n < 0,40$) dimana hambatan gesek dominan, dan pengaruh yang sangat signifikan pada kecepatan tinggi ($F_n > 0,60$) dimana hambatan gelombang menjadi komponen yang dominan dan mekanisme pembentukan gelombang menjadi faktor krusial dalam menentukan total hambatan.

4.2. Saran

Validasi eksperimental menggunakan model testing di towing tank untuk memverifikasi hasil simulasi numerik dan mengukur akurasi metode *slenderbody*. Kedua, simulasi high-fidelity CFD dengan RANS atau LES untuk menganalisis detail aliran viskos, fenomena pemisahan aliran, dan struktur turbulent wake di belakang kapal.

Ketiga, analisis *seakeeping* performance untuk mengevaluasi dampak variasi sudut masuk terhadap gerakan kapal di gelombang, khususnya *pitching* dan *heaving* yang dapat mempengaruhi kenyamanan dan keselamatan. Keempat, studi multi-objective optimization yang mengintegrasikan *resistance*, *seakeeping*, stabilitas, dan volume kargo untuk mendapatkan solusi desain optimal yang komprehensif. Kelima, investigasi pengaruh entrance angle pada berbagai *displacement* dan koefisien blok untuk generalisasi temuan penelitian. Keenam, analisis ekonomi yang lebih detail termasuk *lifecycle cost analysis* dan return on investment untuk implementasi desain optimal pada armada kapal Indonesia.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Budiman, Y., Romansyah, F., Rochim, M.N., Akmal, M.S., Solikin, M. and Yudianto, A., 2022, November. Perancangan bodi kapal patroli lepas pantai: analisis numerik hidrodinamika bodi deep v-hull, bulbous hull, dan catamaran melalui simulasi software maxsurf. In *Prosiding Seminar Nasional Ilmu Teknik Dan Aplikasi Industri Fakultas Teknik Universitas Lampung* (Vol. 5, pp. 122-127).
- Budiyanto, M.A. and Nugraha, A.B., Desain dan Analisis Lambung Hard Chine dengan Inverted Bow untuk Kapal Patroli Berkecepatan Tinggi. In *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XXII 2024* (pp. 405-408). Khairun University.
- International Maritime Organization (2023) *Fourth IMO GHG Study 2020/2021*. London: IMO Publishing.
- Kementerian Perhubungan RI (2023) *Statistik Perhubungan Laut 2023*. Jakarta: Kemenhub RI.
- Patiroi, P.D.N., 2024. *STUDI TAHANAN KAPAL BERLAMBUANG PLANNING HULL DEADRISE ANGLE 10 DERAJAT DAN STEPPED HULL 2V MENGGUNAKAN APLIKASI ANSYS FLUENT= Study of Ship Resistance with 10-Degree Planning Hull Deadrise Angle and 2V Stepped Hull Using Ansys fluent*

Application (Doctoral dissertation,
Universitas Hasanuddin).

Ramdhani, Y.I., 2022. *ANALISIS POLA ALIRAN DISEPANJANG LAMBUNG KAPAL CEPAT AKIBAT VARIASI DEADRISE ANGLE, PERUBAHAN TRIM DAN BENTUK LAMBUNG BERTANGGA= THE ANALYSIS OF FLOW PATTERNS AROUND A HIGH-SPEED SHIP HULL DUE TO DEADRISE ANGLE VARIATIONS, CHANGES IN TRIM AND SHAPE OF THE*

BUTTON (Doctoral dissertation,
Universitas Hasanuddin).

Akbar, M., 2024. *Studi Tahanan Kapal Katamaran Dengan Variasi Jarak Lambung Inverted Bow Menggunakan Maxsurf= Study of Catamaran Ship Resistance with Variations in Hull Distance Inverted Bow Using Maxsurf* (Doctoral dissertation,
Universitas Hasanuddin).