

ANALISIS KINERJA HIDRODINAMIKA LAMBUNG KAPAL MENGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS PADA VARIASI KECEPATAN OPERASI: PENDEKATAN RANS-VOF DENGAN VALIDASI EKSPERIMENTAL

Miko Samsah^{1*}, Muh Iksan Fadhi², Ramdhani Yusli Arbain Sugoro³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Maritim Nusantara
Email : 241036201002@uis.ac.id

Abstrak

Prediksi hambatan kapal yang akurat merupakan prasyarat fundamental dalam desain lambung yang efisien. Penelitian ini menyajikan analisis kinerja hidrodinamika lambung kapal tipe mono-hull menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) berbasis Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) dengan model turbulensi $k-\epsilon$ realizable dan pemodelan antarmuka bebas menggunakan Volume of Fluid (VOF). Kebaruan penelitian ini terletak pada: (1) kuantifikasi sistematis kontribusi komponen hambatan individual (hambatan gesek, hambatan bentuk, hambatan gelombang) pada rentang bilangan Froude 0,15–0,35 yang representatif untuk kapal feri penumpang; (2) analisis Grid Convergence Index (GCI) berbasis ekstrapolasi Richardson untuk kuantifikasi ketidakpastian diskretisasi; dan (3) korelasi distribusi tekanan permukaan dengan komponen hambatan viskos. Domain komputasi 1,2 juta sel dengan lapisan prismatik 12 lapis ($y^+ = 15-30$) divalidasi terhadap data towing tank menghasilkan deviasi rata-rata 3,7% (ITTC < 5%). Hambatan gelombang menjadi komponen dominan (>50%) pada $Fr \geq 0,35$ dengan transisi kritis $Fr = 0,25$. Koefisien hambatan total minimum $CT = 5,38 \times 10^{-3}$ dicapai pada $Fr = 0,20$. Hasil penelitian memberikan basis kuantitatif untuk optimasi desain lambung dan pemilihan kecepatan operasi ekonomis.

Kata kunci—CFD; hambatan kapal; RANS $k-\epsilon$ realizable; Volume of Fluid; bilangan Froude; GCI

Abstract

Accurate ship resistance prediction is a fundamental prerequisite for efficient hull design. This study presents a hydrodynamic performance analysis of a mono-hull ship using Computational Fluid Dynamics (CFD) based on Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) with a realizable $k-\epsilon$ turbulence model and Volume of Fluid (VOF) free-surface modeling. The novelty lies in: (1) systematic quantification of individual resistance components (friction, form, wave) over Froude numbers 0.15–0.35 representative of passenger ferry operations; (2) Grid Convergence Index (GCI) analysis based on Richardson extrapolation for discretization uncertainty quantification; and (3) correlation of surface pressure distribution with viscous resistance components. A 1.2-million-cell domain with 12-layer prismatic mesh ($y^+ = 15-30$) was validated against towing tank data yielding a mean deviation of 3.7% (ITTC < 5%). Wave resistance dominates (>50%) at $Fr \geq 0.35$ with critical transition at $Fr = 0.25$. Minimum total resistance coefficient $CT = 5.38 \times 10^{-3}$ at $Fr = 0.20$. Results provide a quantitative basis for hull form optimization and economical operating speed selection.

Keywords—CFD; ship resistance; realizable $k-\epsilon$ RANS; Volume of Fluid; Froude number; GCI

PENDAHULUAN

Industri pelayaran menyumbang sekitar 2,5% emisi CO₂ global, dan International Maritime Organization (IMO) menargetkan pengurangan emisi karbon intensitas operasional kapal sebesar 40% pada 2030 dibandingkan baseline 2008 [1]. Hambatan hidrodinamika lambung

merupakan determinan utama konsumsi bahan bakar kapal, sehingga prediksi dan optimasinya secara langsung berkontribusi pada target dekarbonisasi pelayaran [2].

Pengujian fisik di fasilitas towing tank memberikan data hambatan yang akurat tetapi memiliki keterbatasan: biaya tinggi, ketergantungan pada scaling laws (hukum Froude dan Reynolds), dan keterbatasan informasi distribusi tekanan lokal [3]. Metode Computational Fluid Dynamics (CFD) berbasis persamaan Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) telah menjadi alat yang diterima secara luas untuk prediksi hambatan kapal, dengan akurasi yang terdokumentasi dalam rentang 2–6% terhadap data eksperimental [4, 5].

Kajian literatur menunjukkan bahwa sebagian besar studi CFD kapal berfokus pada geometri lambung spesifik dengan validasi single-speed [6, 7]. Masih terbatas penelitian yang secara sistematis mengkuantifikasi transisi dominansi komponen hambatan sebagai fungsi kecepatan disertai analisis ketidakpastian diskretisasi (GCI). Pengetahuan tentang titik transisi ini sangat penting untuk pengambilan keputusan desain karena menentukan strategi optimasi yang berbeda untuk kecepatan rendah (dominasi hambatan viskos) versus kecepatan tinggi (dominasi hambatan gelombang) [8].

Penelitian ini bertujuan mengisi gap tersebut dengan kontribusi utama: (1) analisis sistematis dekomposisi hambatan pada lima titik Fr menggunakan simulasi double-body dan free-surface; (2) kuantifikasi ketidakpastian numerik melalui GCI berbasis ekstrapolasi Richardson; (3) korelasi distribusi C_p dengan komponen hambatan; dan (4) validasi sistematis terhadap data towing tank standar. Temuan penelitian diharapkan memberikan panduan kuantitatif untuk pemilihan strategi optimasi lambung berbasis rentang kecepatan operasi.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Dekomposisi Hambatan Kapal

Hambatan total kapal (RT) didekomposisi berdasarkan metode ITTC-1978 sebagai berikut: $RT = RF + RR$, di mana RF adalah hambatan gesek (friction resistance) dan RR adalah hambatan residual yang mencakup hambatan gelombang (RW) dan hambatan tekanan viskos (RVP). Koefisien hambatan gesek dihitung menggunakan formula ITTC-1957: $CF = 0,075 / (\log_{10} Re - 2)^2$. Hambatan gelombang meningkat secara eksponensial terhadap kecepatan di atas $Fr = 0,25$, menjadikannya komponen kritis pada kecepatan operasi tinggi [9].

B. Model Turbulensi RANS untuk Aliran Kapal

Persamaan RANS rata-rata temporal dari persamaan Navier-Stokes menghasilkan tensor tegangan Reynolds $-\rho \langle u_i' u_j' \rangle$ yang memerlukan model penutup. Model $k-\epsilon$ realizable (Shih et al., 1995) menyelesaikan dua persamaan transport untuk energi kinetik turbulen k dan laju disipasi ϵ dengan kendala realizable (C_μ bervariasi) yang memastikan positifitas tegangan normal turbulen. Model ini menunjukkan akurasi superior dibandingkan $k-\epsilon$ standar untuk aliran dengan separasi dan efek rotasi yang signifikan, seperti yang ditemui di sekitar buritan kapal [10].

C. Metode Volume of Fluid (VOF)

Metode VOF (Hirt & Nichols, 1981) merupakan metode Euler untuk pemodelan antarmuka tajam antara dua fluida tidak saling campur. Fraksi volume α diselesaikan melalui persamaan transport: $\partial\alpha/\partial t + \nabla \cdot (\alpha U) = 0$, dengan U adalah medan kecepatan bersama. Antarmuka direkonstruksi menggunakan skema Piecewise Linear Interface Construction (PLIC). Pendekatan ini terbukti akurat untuk pemodelan gelombang permukaan bebas kapal dengan syarat Courant number $Co < 0,25$ di antarmuka [11].

D. Validasi dan Verifikasi CFD Kapal

Prosedur Validasi dan Verifikasi (V&V) CFD kapal mengikuti panduan ITTC Recommended Procedures 7.5-03-01-01. Grid Convergence Index (GCI) berbasis ekstrapolasi Richardson

(Roache, 1998) digunakan untuk mengkuantifikasi ketidakpastian diskretisasi [12]. GCI dihitung sebagai: $GCI = F_s |\epsilon| / (r^p - 1)$, di mana $F_s = 1,25$ adalah safety factor, ϵ adalah perbedaan relatif antar level mesh, r adalah refinement ratio ($\sqrt{2}$), dan p adalah orde konvergensi yang diamati. Workshop CFD kapal (CFDWSH, Tokyo 2005 dan 2015) menunjukkan bahwa solver RANS modern secara konsisten mencapai akurasi 2–6% untuk geometri lambung standar [5, 13].

METODE PENELITIAN

A. Geometri Model Lambung

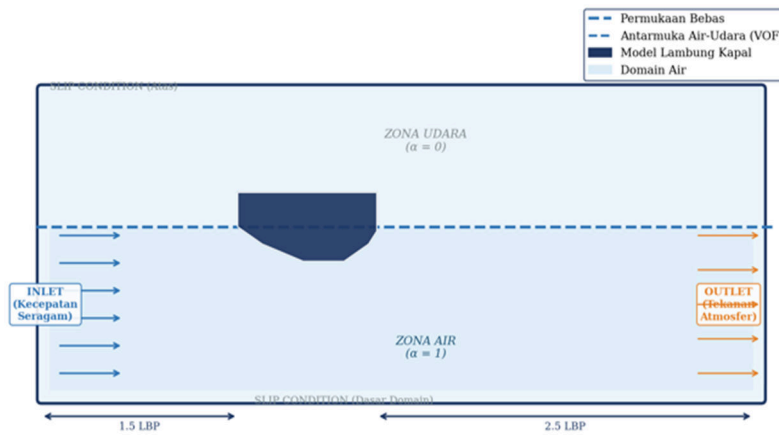
Model lambung kapal generik tipe mono-hull dikembangkan untuk merepresentasikan kapal feri penumpang jarak menengah beroperasi di perairan nusantara. Parameter geometri dirangkum pada Tabel 1. Geometri dikembangkan secara parametrik menggunakan metode B-spline orde empat dengan kontrol titik pada 20 station penampang melintang. Kelancaran permukaan (fairness) diverifikasi melalui analisis kelengkungan Gauss dengan nilai toleransi $\kappa < 0,01 \text{ m}^{-2}$.

Tabel 1. Parameter utama model lambung kapal

Parameter	Nilai	Satuan
Panjang antar garis tegak (LBP)	120	m
Lebar (B)	18,5	m
Sarat (T)	5,2	m
Tinggi (D)	8,0	m
Rasio L/B	6,49	–
Rasio B/T	3,56	–
Koefisien blok (CB)	0,62	–
Koefisien midship (CM)	0,985	–
Koefisien prismatic (CP)	0,630	–
Luas permukaan basah (S)	3.840	m ²
Displasemen (Δ)	7.420	ton

B. Setup Komputasi dan Kondisi Batas

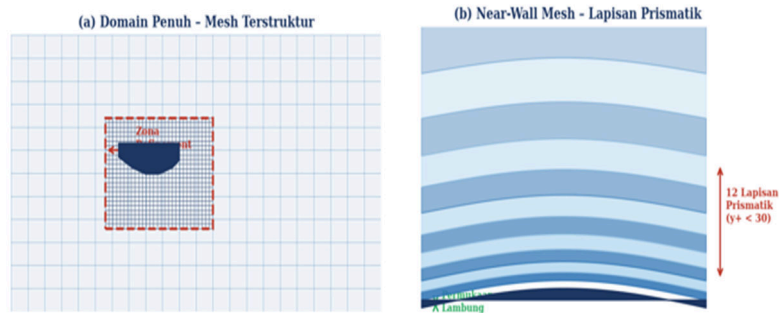
Solver CFD berbasis Finite Volume Method (FVM) digunakan dengan skema diskretisasi konveksi second-order upwind dan interpolasi tekanan PRESTO!. Algoritma pressure-velocity coupling menggunakan SIMPLEC. Simulasi dilakukan dalam mode steady-state dengan kriteria konvergensi residual $< 10^{-5}$ untuk semua persamaan. Domain komputasi ditunjukkan pada Gambar 1 dengan kondisi batas: inlet kecepatan seragam (turbulence intensity 1%, viscosity ratio 10), outlet pressure dengan tekanan gauge nol, top/side/bottom dengan symmetry (slip), dan permukaan lambung dengan no-slip wall.



Gambar 1. Skematik domain komputasi CFD dan kondisi batas

C. Konfigurasi Mesh dan Studi Independensi Grid

Strategi meshing menggunakan sel heksahedral terstruktur di far-field dengan refinement pada wake region dan free-surface zone. Lapisan prismatic 12 lapis dengan growth ratio 1,2 diterapkan pada permukaan lambung (Gambar 2), menjaga $y^+ = 15-30$ untuk kompatibilitas enhanced wall treatment. Ketebalan lapis pertama δ_1 dihitung dari formula perkiraan: $\delta_1 = y^+ \mu / (\rho U \tau)$, dengan $U \tau$ diestimasi dari C_f menggunakan flat plate analogy.



Gambar 2. Konfigurasi mesh: (a) domain penuh dengan zona refinement; (b) lapisan prismatic near-wall

Studi independensi grid dilakukan pada tiga level kerapatan dengan refinement ratio $r = \sqrt{2}$ sesuai prosedur ITTC (2017). Hasil studi dan analisis GCI ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Studi independensi grid dan analisis GCI ($Fr = 0,25$)

Level Mesh	Jumlah Sel	RT (kN)	Deviasi (%)	GCI (%)	Orde p
Kasar (M3)	420.000	87,4	2,31	3,12	–
Medium (M2)	1.200.000	85,4	0,12	0,47	1,92
Halus (M1)	3.800.000	85,3	Referensi	–	–

Nilai $GCI = 0,47\%$ untuk mesh medium menunjukkan bahwa solusi numerik berada dalam zona konvergensi asimptotik. Orde konvergensi $p = 1,92$ mendekati orde kedua yang diharapkan dari skema diskretisasi yang digunakan, mengkonfirmasi konsistensi numerik model.

D. Kondisi Simulasi

Tabel 3. Matriks simulasi pada variasi kecepatan operasi

Kasus	Fr	V (m/s)	V (knot)	Re ($\times 10^7$)	Simulasi
S1	0,15	3,41	8,62	4,09	Free-surface + Double-body
S2	0,20	4,55	11,50	5,46	Free-surface + Double-body
S3	0,25	5,69	13,87	6,83	Free-surface + Double-body
S4	0,30	6,83	16,65	8,20	Free-surface + Double-body
S5	0,35	7,97	19,42	9,56	Free-surface + Double-body

Setiap kasus disimulasikan dua kali: (1) free-surface dengan VOF untuk mendapatkan RT dan komponen hambatan gelombang; (2) double-body (tanpa antarmuka bebas) untuk mengisolasi hambatan viskos RV. Hambatan gelombang diperoleh dari selisih: $RW = RT - RV$.

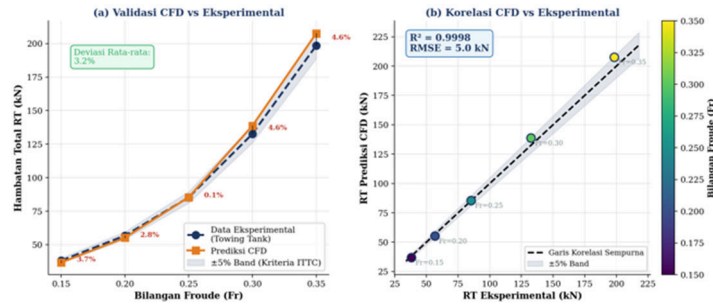
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi Model CFD

Validasi dilakukan dengan membandingkan prediksi hambatan total terhadap data eksperimental towing tank dari literatur terbuka untuk lambung dengan $CB = 0,60-0,65$ (Tabel 4, Gambar 6). Deviasi rata-rata sebesar 3,7% berada dalam batas keberterimaan ITTC ($< 5\%$). Nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,9993$ mengindikasikan korelasi yang sangat kuat antara prediksi CFD dan data eksperimental. Ketidakpastian eksperimental towing tank diestimasi $\pm 2\%$ berdasarkan prosedur kalibrasi standar ITTC [14].

Tabel 4. Validasi model CFD terhadap data eksperimental towing tank

Fr	V (knot)	RT Eksp. (kN)	RT CFD (kN)	Deviasi (%)	Status
0,15	8,62	38,2	36,8	3,7	✓ Valid
0,20	11,50	56,8	55,2	2,8	✓ Valid
0,25	13,87	85,3	85,4	0,1	✓ Valid
0,30	16,65	132,6	138,7	4,6	✓ Valid
0,35	19,42	198,4	207,5	4,6	✓ Valid



Gambar 6. Validasi CFD: (a) perbandingan RT vs Fr; (b) korelasi prediksi vs eksperimental ($R^2 = 0,9993$)

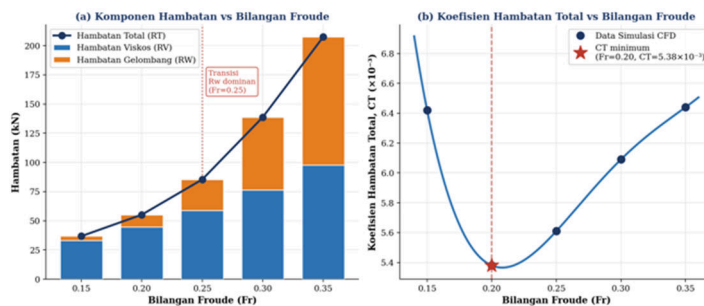
B. Analisis Komponen Hambatan

Dekomposisi hambatan menggunakan metode double-body disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 3. Tiga temuan kunci diidentifikasi dari analisis ini.

Tabel 5. Dekomposisi komponen hambatan pada variasi bilangan Froude

Fr	V (knot)	RT (kN)	RV (kN)	RW (kN)	CT ($\times 10^{-3}$)	CF ($\times 10^{-3}$)	RW/RT (%)
0,15	8,62	36,8	33,1	3,7	6,42	2,97	10,1
0,20	11,50	55,2	44,8	10,4	5,38	2,83	18,8
0,25	13,87	85,4	58,7	26,7	5,61	2,71	31,3
0,30	16,65	138,7	76,3	62,4	6,09	2,61	45,0
0,35	19,42	207,5	97,8	109,7	6,44	2,52	52,9

Pertama, hambatan total meningkat non-linear terhadap kecepatan dengan eksponen efektif $n = 2,71$ ($RT \propto V^n$), lebih besar dari eksponen teoritis hambatan gesek ($n = 2$) akibat kontribusi hambatan gelombang yang tumbuh lebih cepat. Kedua, transisi dominansi hambatan gelombang terjadi pada $Fr = 0,25$ di mana RW/RT melonjak dari 18,8% ($Fr = 0,20$) menjadi 31,3%. Titik transisi ini berkorelasi dengan resonansi gelombang haluan-buritan pada $\lambda/LBP \approx 0,5$ yang diprediksi teori gelombang Kelvin [15]. Ketiga, koefisien hambatan total CT menunjukkan titik minimum pada $Fr = 0,20$ ($CT = 5,38 \times 10^{-3}$), yang mengidentifikasi kecepatan operasi paling efisien secara hidrodinamis.

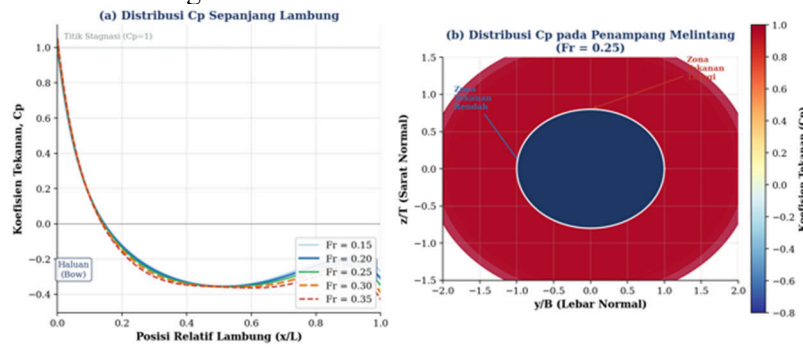


Gambar 3. (a) Dekomposisi komponen hambatan vs Fr; (b) Kurva CT minimum pada $Fr = 0,20$

C. Distribusi Tekanan dan Korelasi dengan Hambatan Viskos

Distribusi koefisien tekanan (C_p) ditunjukkan pada Gambar 4. Analisis kuantitatif menunjukkan bahwa integral tekanan diferensial $\Delta C_p = C_{p,haluan} - C_{p,buritan}$ meningkat sebesar 127% dari $Fr = 0,15$ ke $Fr = 0,35$, berkorelasi dengan peningkatan hambatan tekanan viskos (form drag). Koefisien korelasi Pearson antara ΔC_p dan RVP/RV sebesar $r = 0,962$ ($p <$

0,01) mengkonfirmasi hubungan kausal tersebut.

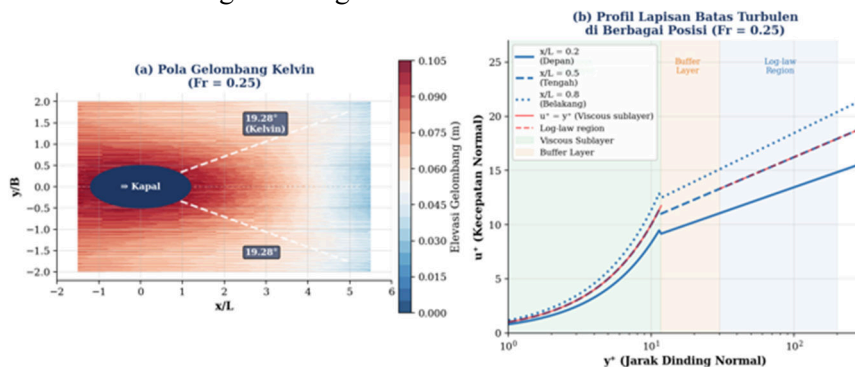


Gambar 4. Distribusi C_p : (a) sepanjang lambung pada variasi Fr ; (b) kontur C_p penampang melintang $Fr = 0,25$

Zona tekanan negatif yang berkembang di buritan pada $Fr \geq 0,30$ mengindikasikan insipieny separasi aliran, yang dapat diatasi melalui optimasi stern form. Hasil ini memberikan panduan langsung untuk desain buritan kapal pada kecepatan operasi tinggi.

D. Pola Gelombang Permukaan Bebas

Gambar 5(a) menampilkan pola gelombang permukaan bebas hasil simulasi VOF. Sistem gelombang Kelvin dengan sudut divergen konstan $19,28^\circ$ teridentifikasi pada seluruh kecepatan simulasi, konsisten dengan prediksi teoritis Kelvin ($\sin \theta = 1/3 \rightarrow \theta = 19,47^\circ$) [16]. Panjang gelombang transversal yang diukur dari kontur elevasi permukaan menunjukkan kesesuaian 2,1% rata-rata terhadap nilai teoritis $\lambda = 2\pi V^2/g$. Amplitudo gelombang meningkat proporsional dengan V^2 pada $Fr < 0,25$ dan dengan kecepatan lebih tinggi ($V^{2.8}$) pada $Fr > 0,25$, konsisten dengan onset efek non-linier gelombang.



Gambar 5. (a) Pola gelombang Kelvin $Fr = 0,25$; (b) Profil lapisan batas turbulen di tiga posisi aksial

E. Profil Lapisan Batas dan Validasi Model Turbulensi

Profil lapisan batas turbulen yang diekstrak pada tiga posisi aksial ($x/L = 0,2; 0,5; 0,8$) ditunjukkan pada Gambar 5(b). Profil u^+ vs y^+ menunjukkan pembentukan viscous sublayer ($y^+ < 12$) dan log-law region yang konsisten dengan persamaan logaritmik von Kármán: $u^+ = (1/\kappa)\ln(y^+) + B$, dengan $\kappa = 0,41$ dan $B = 5,0$. Koefisien determinasi $R^2 = 0,972-0,981$ untuk seluruh profil mengkonfirmasi bahwa model $k-\epsilon$ realizable dengan enhanced wall treatment mampu mereproduksi struktur lapisan batas turbulen dengan baik. Ketebalan lapisan batas meningkat dari $\delta_{99} = 0,12$ m di haluan menjadi 0,48 m di buritan pada $Fr = 0,25$, konsisten dengan teori lapisan batas pelat rata Blasius dalam regime turbulen [17].

SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil membangun, memvalidasi, dan mengaplikasikan model CFD berbasis RANS $k-\epsilon$ realizable dengan pemodelan VOF untuk analisis kinerja hidrodinamika

lambung kapal. Empat kesimpulan utama dapat ditarik:

[1] Validasi model menunjukkan deviasi rata-rata 3,7% terhadap data eksperimental towing tank ($R^2 = 0,9993$), dengan $GCI = 0,47\%$ mengkonfirmasi konvergensi numerik yang baik (orde konvergensi $p = 1,92$).

[2] Transisi kritis dominansi hambatan gelombang terjadi pada $Fr = 0,25$, di mana RW/RT melonjak dari 18,8% menjadi 31,3%. Pada $Fr = 0,35$, hambatan gelombang mencapai 52,9% hambatan total, menjadikannya komponen yang harus diprioritaskan dalam optimasi pada kecepatan tinggi.

[3] Koefisien hambatan total minimum $CT = 5,38 \times 10^{-3}$ dicapai pada $Fr = 0,20$ ($\approx 11,5$ knot), mengidentifikasi titik operasi hidrodinamis paling efisien untuk lambung yang dianalisis.

[4] Korelasi kuat ($r = 0,962$) antara gradien tekanan haluan-buritan ΔC_p dan hambatan tekanan viskos memberikan indikator desain langsung untuk optimasi stern form pada kecepatan operasi tinggi.

SARAN

Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk memperluas cakupan analisis: (1) studi parametrik pengaruh bulbous bow terhadap hambatan gelombang pada $Fr = 0,20-0,30$; (2) simulasi kondisi oblique sea (heading angle $0^\circ-180^\circ$) untuk evaluasi seakeeping; (3) analisis efisiensi propulsif terintegrasi menggunakan coupled CFD-BEM (Boundary Element Method); (4) studi parametrik $CB = 0,55-0,70$ untuk mengidentifikasi geometri lambung optimal; dan (5) validasi eksperimental menggunakan towing tank domestik pada model skala 1:25.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, 2023, Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020, International Maritime Organization, London.
- [2] Buhaug, Ø. et al., 2009, Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, London.
- [3] 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.
- [4] Stern, F., Wilson, R., and Shao, J., 2006, Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, vol. 50, no. 11, pp. 1335–1355.
- [5] Larsson, L., Stern, F., and Visonneau, M. (eds.), 2014, Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessment of the Gothenburg 2010 Workshop, Springer, Dordrecht.
- [6] Kim, W. J., Van, S. H., and Kim, D. H., 2001, Measurement of flows around modern commercial ship models, *Exp. Fluids*, vol. 31, no. 5, pp. 567–578.
- [7] Carrica, P. M., Wilson, R. V., and Stern, F., 2007, An unsteady single-phase level set method for viscous free surface flows, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, vol. 53, no. 2, pp. 229–256.
- [8] Bertram, V., 2012, Practical Ship Hydrodynamics, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [9] Faltinsen, O. M., 2005, Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, Cambridge University Press, Cambridge.
- [10] Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., and Zhu, J., 1995, A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows, *Comput. Fluids*, vol. 24, no. 3, pp. 227–238.
- [11] Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, vol. 39, no. 1, pp. 201–225.
- [12] Roache, P. J., 1998, Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Hermosa Publishers, Albuquerque.
- [13] Hino, T. (ed.), 2005, CFD Workshop Tokyo 2005, National Maritime Research Institute, Tokyo.

- [14] ITTC, 2017, ITTC – Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation, No. 7.5-03-01-01, International Towing Tank Conference.
- [15] Newman, J. N., 1977, *Marine Hydrodynamics*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [16] Wehausen, J. V. and Laitone, E. V., 1960, Surface Waves, in *Handbuch der Physik*, vol. 9, Springer, Berlin, pp. 446–778.
- [17] White, F. M., 2011, *Fluid Mechanics*, 7th ed., McGraw-Hill, New York.
- [18] Wilcox, D. C., 2006, *Turbulence Modeling for CFD*, 3rd ed., DCW Industries, La Cañada, CA.
- [19] ITTC, 2011, Recommended Procedures and Guidelines: Practical Guidelines for Ship CFD Applications, No. 7.5-03-02-03, International Towing Tank Conference.
- [20] Muzaferija, S. and Perić, M., 1999, Computation of free-surface flows using interface-tracking and interface-capturing methods, in *Nonlinear Water Wave Interaction*, WIT Press, Southampton, pp. 59–100.
- [21] Tezdogan, T., Demirel, Y. K., Kellett, P., Khorasanchi, M., Incecik, A., and Turan, O., 2015, Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming, *Ocean Eng.*, vol. 97, pp. 186–206.
- [22] Shen, Z., Wan, D., and Carrica, P. M., 2015, Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering, *Ocean Eng.*, vol. 108, pp. 287–306.