

Analisis hambatan kapal *Bulk Carrier* skala model dan skala penuh menggunakan simulasi CFD dan formula empiris

Kurniawan T. Waskito^{a,1}, Achmad Hammam Gopar^a, Yanuar^a, Gunawan^a

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

¹Email korespondensi: waskito@eng.ui.ac.id

Abstrak. Penelitian ini mengkaji analisis hambatan kapal bulk carrier pada skala model dan skala penuh menggunakan simulasi CFD NUMECA Fine/Marine dan formula empiris metode Holtrop-Mennen. Penelitian bertujuan untuk membandingkan perbedaan hambatan antara hasil simulasi CFD dan perhitungan metode Holtrop-Mennen sebagai validasi, serta menganalisis nilai koreksi (ΔCF) untuk skala model dan skala penuh guna mendukung ekstrapolasi nilai hambatan pada ukuran kapal tertentu. Hasil dari kedua metode menunjukkan peningkatan gaya yang signifikan seiring bertambahnya skala kapal, dengan tingkat kesalahan antara 1,72% dan 13,30%, menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan antara kedua metode. Nilai koreksi (ΔCF) yang lebih besar pada kapal berukuran kecil mengindikasikan bahwa simulasi skala model memerlukan penyesuaian lebih besar untuk akurasi pada skala penuh dibandingkan dengan kapal berukuran besar. Penelitian ini menghasilkan persamaan ekstrapolasi untuk prediksi hambatan yang meningkatkan efisiensi operasional dan estimasi konsumsi bahan bakar dalam desain kapal. Namun, keterbatasan meliputi kebutuhan akan validasi lebih lanjut dengan uji towing dan peningkatan jumlah meshing untuk kapal skala besar. Penelitian ini berkontribusi pada peningkatan akurasi prediksi hambatan kapal, mendukung desain kapal yang optimal dan efisiensi biaya operasional, khususnya untuk kapal bulk carrier.

Keywords: hambatan, bulk carrier, CFD, Holtrop-Mennen, simulasi numerik

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

DOI: <https://doi.org/10.71452/Sfkat551>

PENDAHULUAN

Prediksi hambatan kapal merupakan aspek krusial dalam desain kapal karena memengaruhi efisiensi bahan bakar, kinerja operasional, dan biaya pembangunan. Hambatan kapal dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk viskositas fluida, efek skala, dan karakteristik lambung, yang menyebabkan perbedaan signifikan antara skala model dan skala penuh. Penelitian terdahulu, seperti Holtrop dan Mennen (1982) [1], telah mengembangkan metode empiris untuk memperkirakan hambatan kapal berdasarkan analisis regresi data uji model dan skala penuh, sementara metode numerik seperti Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan software seperti NUMECA Fine/Marine menawarkan pendekatan yang lebih rinci, namun membutuhkan sumber daya komputasi yang besar [2], [3]. Namun, terdapat kesenjangan dalam memahami hubungan antara hasil simulasi CFD dan metode empiris, terutama dalam hal nilai koreksi (ΔCF) untuk menyesuaikan prediksi hambatan dari skala model ke skala penuh. Penelitian ini memperkenalkan kebaruan dengan menganalisis ΔCF menggunakan simulasi CFD dan metode Holtrop-Mennen untuk kapal bulk carrier, yang belum banyak dibahas secara spesifik dalam literatur terbaru. Permasalahan utama yang ditangani adalah ketidaksesuaian prediksi hambatan antarskala, dengan hipotesis bahwa ΔCF dapat digunakan untuk ekstrapolasi hambatan yang akurat.

Pendekatan penelitian ini mengintegrasikan simulasi CFD dengan validasi empiris untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat. Tujuan penelitian adalah membandingkan hambatan kapal pada skala model dan skala penuh, menganalisis ΔCF , dan menyusun persamaan ekstrapolasi untuk desain kapal yang optimal. Kontribusi penelitian ini adalah meningkatkan akurasi prediksi hambatan, mendukung efisiensi operasional dan desain kapal bulk carrier, meskipun terbatas pada asumsi simetri bilateral dan kebutuhan validasi uji towing.

Hambatan Kapal

Hambatan kapal pada kecepatan tertentu adalah gaya yang diperlukan untuk menarik kapal pada kecepatan tersebut di air yang tenang. Hambatan kapal tersebut sama dengan komponen gaya fluida yang bekerja sejajar dengan sumbu gerak kapal.

Hambatan total kapal terdiri dari berbagai komponen hambatan yang saling berinteraksi secara kompleks. Untuk analisis, cukup gunakan dua komponen hambatan dengan metode Froude (Gunawan, 2012). Pada tahap desain awal, uji model tidak dapat dilakukan, sehingga metode statistik digunakan untuk menentukan daya dorong. Metode ini diperkenalkan oleh Holtrop dan Mennen, yang dikembangkan melalui analisis regresi dari percobaan model acak dan data skala penuh yang tersedia di Netherlands Ship Model Basin (Holtrop & Mennen, 1982). Berikut adalah persamaannya:

$$R_T = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (2.1)$$

R_T : Hambatan total, R_F : Hambatan gesek, $(1 + k_1)$: Faktor bentuk dari lambung, R_{APP} : Hambatan tambahan, R_W : Hambatan gelombang, R_B : Hambatan tekanan tambahan dari *bulbous bow* di dekat permukaan air, R_{TR} : Hambatan tekanan tambahan dari perendaman transom yang terendam. R_A : Hambatan korelasi model-kapal.

Setelah mencari hambatan total pada air tenang, nilai daya utama kapal dapat ditentukan dengan menggunakan efisiensi propulsif, poros, dan *sea margin*. Berikut adalah langkah-langkah dalam mencari daya mesin untuk kapal:

1. *Effective Horsepower*

$$EHP = R_T(v) \cdot V_S \quad (2.2)$$

2. *Delivered Horsepower*

$$DHP = \frac{EHP}{\eta_D} \quad (2.3)$$

3. *Brake Horsepower*

$$BHP = \frac{DHP}{\eta_T} \quad (2.4)$$

4. *Normal Continuous Rating*

$$NCR = BHP \left(1 + \frac{\text{Sea Margin}}{100}\right) \quad (2.5)$$

5. *Derated Maximum Continuous Rating*

$$DMCR = \frac{NCR}{\text{Engine Margin}} \quad (2.6)$$

6. *Nominal Maximum Continuous Rating*

$$NMCR = \frac{DMCR}{\text{Derating Rate}} \quad (2.7)$$

Tujuan utama dalam memprediksi hambatan untuk kapal adalah mengestimasi nilai NMCR. Dari nilai NMCR, pemilihan mesin dan daya mesin dapat ditentukan untuk kapal berdasarkan mesin yang tersedia di *market*.

Wave Making Resistance

Wave Making Resistance adalah hambatan yang dialami kapal akibat energi yang dibutuhkan untuk menyingkirkan air di depan lambung dan membentuk gelombang di belakang kapal. Hambatan ini diukur dan diperkirakan menggunakan model skala di tangki uji coba, yang mewakili desain kapal sebenarnya dalam ukuran lebih kecil.

Model Points dan Ship Points

Skala model (Model Points) merujuk pada kapal kecil untuk uji tarik di laboratorium, sedangkan skala penuh

(Ship Points) merujuk pada kapal yang beroperasi di lautan. Metode towing test digunakan untuk mengevaluasi hambatan pada skala model dengan mengukur gaya tarikan, kecepatan, dan distribusi tekanan. Koreksi prediksi hambatan diperlukan untuk memastikan kinerja kapal yang optimal, dilakukan dengan menyesuaikan prediksi berdasarkan pengukuran skala penuh. Metode ITTC yang diperkenalkan pada 1970-an memisahkan dan memperbaiki elemen-elemen dalam proses prediksi daya kapal, diterima secara luas sejak 1978 sebagai 'The 1978 ITTC Performance Prediction Method for Single Screw Ships' (ITTC, 2002).

Proses ini terdiri dari tiga langkah dasar:

1. Koefisien hambatan total untuk kapal, CTS

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_R + \Delta C_F + C_{AA}, \quad (2.9)$$

(Catatan, ITTC memilih untuk menggunakan C_R daripada C_W)
dimana faktor bentuk $(1 + k)$ didasarkan pada garis ITTC,

$$C_F = \frac{0.075}{[\log_{10} Re - 2]^2}. \quad (2.10)$$

Koefisien residual C_R sama untuk model dan kapal, dan diperoleh sebagai:

$$C_R = C_{TM} - (1 + k)C_{FM} \quad (2.11)$$

Kekasaran ΔC_F yang diizinkan adalah:

$$\Delta C_F = \left[105 \left(\frac{k_S}{L} \right)^{1/3} - 0.64 \right] \times 10^{-3} \quad (2.12)$$

Jika pengukuran kekasaran kurang, $k_S = 150 \times 10^{-6}$ m direkomendasikan.

Persamaan berikut, menggabungkan efek Re , telah diusulkan oleh Townsin (Townsin, 1985):

$$\Delta C_F = \left\{ 44 \left[\left(\frac{k_S}{L} \right)^{1/3} - 10Re^{-1/3} \right] + 0.125 \right\} \times 10^{-3} \quad (2.1)$$

ITTC ke-19 (1990) merekomendasikan menggunakan rumus Townsin persamaan (2.13) jika pengukuran kekasaran tersedia, menggantikan rumus Bowden – Davison persamaan (2.12). Persamaan (2.12) direkomendasikan sebagai tunjangan korelasi, termasuk efek kekasaran. Perbedaan antara persamaan (2.12) dan (2.13) mencerminkan komponen yang tidak diperhitungkan di tempat lain.

$$[\Delta C_F]_{\text{Bowden}} - [\Delta C_F]_{\text{Townsin}} = [5.68 - 0.6 \log_{10} Re] \times 10^{-3}. \quad (2.14)$$

Hambatan udara C_{AA} diperkirakan dari persamaan (2.15), ketika informasi yang lebih baik tidak tersedia, sebagai berikut.

$$C_{AA} = 0.001 \frac{A_T}{S}, \quad (2.15)$$

di mana A_T adalah area proyeksi melintang di atas garis air dan S adalah area kapal yang dibasahi.

Jika kapal dilengkapi dengan lunas lambung kapal, resistansi total meningkat dengan rasio:

$$\frac{S + S_{BK}}{S} \quad (2.16)$$

di mana S adalah area yang dibasahi dari lambung kapal telanjang dan S_{BK} adalah area yang dibasahi dari lunas lambung kapal.

2. Karakteristik Propeller

Nilai K_T , K_Q dan η_0 yang ditentukan dalam uji perairan terbuka dikoreksi untuk perbedaan C_D koefisien drag antara model dan kapal skala penuh.

$C_{DS} > C_{DM}$; oleh karena itu, untuk J tertentu, skala penuh K_Q lebih rendah dan K_T lebih tinggi daripada dalam kasus model dan η_0 adalah skala penuh yang lebih besar.

Karakteristik skala penuh dihitung dari karakteristik model sebagai berikut:

$$K_{TS} = K_{TM} + \Delta K_T, \quad (2.17)$$

dan

$$K_{QS} = K_{QM} - \Delta K_Q, \quad (2.18)$$

dimana

$$\Delta K_T = \Delta C_D \cdot 0.3 \frac{P}{D} \frac{c \cdot Z}{D}, \quad (2.19)$$

$$\Delta K_Q = \Delta C_D \cdot 0.25 \frac{c \cdot Z}{D}, \quad (2.20)$$

Perbedaan dalam koefisien drag adalah:

$$\Delta C_D = C_{DM} - C_{DS}, \quad (2.21)$$

dimana

$$C_{DM} = 2 \left(1 + 2 \frac{t}{c} \right) \left[\frac{0.04}{(Re_{co})^{1/6}} - \frac{5}{(Re_{co})^{2/3}} \right], \quad (2.22)$$

dan

$$C_{DS} = 2 \left(1 + 2 \frac{t}{c} \right) \left[1.89 + 1.62 \log_{10} \frac{c}{k_p} \right]^{-2.5}. \quad (2.23)$$

Dalam persamaan di atas, Z adalah jumlah bilah, P/D adalah rasio *pitch*, c adalah panjang akord, t adalah ketebalan maksimum dan Re_{co} adalah nomor Reynolds lokal pada jari-jari non-dimensi $x = 0,75$. Kekasaran bilah diatur pada $k_p = 30 \times 10^{-6}m$.

Re_{co} tidak boleh lebih rendah dari 2×10^5 pada tes perairan terbuka.

Ketika memperkirakan $Re_{co}(=V_R \cdot c/v)$, perkiraan rasio akord pada $x = 0,75 (= 0,75R)$ adalah:

$$\left(\frac{c}{D} \right)_{0.75R} = X_1 \times BAR, \quad (2.24)$$

dimana $X_1 = 0,732$ untuk tiga bilah, $0,510$ untuk empat bilah dan $0,413$ untuk lima bilah.

Perkiraan perkiraan ketebalan t dapat diperoleh, dan VR diperkirakan sebagai:

$$V_R = \sqrt{Va^2 + (0.75\pi nD)^2}. \quad (2.25)$$

3. Koefisien propulsif $\eta_H = (1 - t)/(1 - w_T)$ dan η_R

Koefisien propulsif η_H dan η_R yang ditentukan dari uji propulsi diri, dikoreksi sebagai berikut. t dan η_R harus diasumsikan sama untuk kapal dan model. Fraksi bangun skala penuh w_T dihitung dari fraksi bangun model dan faktor deduksi dorong sebagai berikut:

$$w_{TS} = (t + 0.04) + (w_{TM} - t - 0.04) \frac{(1 + k)C_{FS} + \Delta C_F}{(1 + k)C_{FM}}, \quad (2.26)$$

di mana 0,04 memperhitungkan efek kemudi dan ΔC_F adalah tunjangan kekasaran seperti yang diberikan oleh persamaan (2.12).

Hal tersebut di atas memberikan garis besar 'Metode Prediksi Kinerja ITTC' untuk P_D dan N . Prediksi percobaan akhir diperoleh dengan mengalikan P_D dan N dengan koefisien prediksi percobaan C_P dan C_N (atau dengan memperkenalkan koreksi individual C_F dan w_T). C_P dan C_N diperkenalkan untuk memperhitungkan perbedaan yang tersisa antara prediksi dan percobaan (pada dasarnya, C_P menggantikan $(1 + x)$ dan C_N menggantikan $(1 + k_2)$).

Besarnya koreksi ini tergantung pada model dan prosedur uji coba yang digunakan serta pilihan margin prediksi.

Penggunaan metode ITTC1978 lebih disukai karena mencoba untuk skala individu komponen perkiraan daya. Ini juga memungkinkan pembaruan dilakukan pada masing-masing komponen saat data baru tersedia. Metode asli, menggunakan faktor korelasi keseluruhan seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2.3 1 Nilai tipikal untuk faktor korelasi kapal SCF $(1 + x)$ (Sumber: F. Molland, 2011)

LBP (m)	122	150	180	240	300
Froude friction line	0.97	0.93	0.90	0.86	0.85
ITTC friction line	1.17	1.12	1.08	1.04	1.02

Tabel ini masih sesuai untuk digunakan dengan hasil yang diskalakan menggunakan garis gesekan Froude, seperti seri BSRA dan data lain pada era itu.

Berikut ini merupakan nilai kunci untuk evaluasi kinerja propulsi kapal:

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} \rightarrow P_D = \frac{P_E}{\eta_D} \quad (2.27)$$

$$P_D = \frac{P_E}{\eta_D} = \frac{U_S \cdot \frac{1}{2} \rho U_S^2 S_S \cdot \{C_W + (1 + k)C_{f0s} + \Delta CF\}}{\frac{1 - t}{1 - w_t} \eta_o \eta_R} \quad (2.28)$$

- C_W : Di antara hambatan yang diterima lambung kapal dari air, komponen pembuat gelombang.
- $(1 + k)C_{f0s}$: Komponen viskositas dan tekanan dari hambatan yang diterima lambung kapal dari air.
- ΔCF : Koreksi dengan korelasi kapal aktual.
- $1 - t$: (Thrust Reduction Factor) Faktor yang mempertimbangkan efek menarik lambung kapal saat *propeller* menyedot air.
- $1 - w_t$: (Effective Wake Coefficient) Karena baling-baling beroperasi di belakang kapal, koefisien yang mempertimbangkan efek beroperasi di aliran yang lebih lambat daripada saat beroperasi di aliran yang seragam.

- η_o : Efisiensi *propeller* tunggal.
- η_R : Rasio efisiensi *propeller*.

Berdasarkan persamaan (2.28) untuk mencari nilai koreksi (ΔCF), kita dapat menjabarkan persamaan tersebut sebagai berikut:

$$\underbrace{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot C_W}_{R_W} + \underbrace{\left[\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot S \cdot (1+k) C_f + \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot \Delta CF \right]}_{x} \quad (2.29)$$

dimana R_W : (Wave Resistance), R_V : (Viscous Resistance)

Dari persamaan (2.29) maka kita dapat mencari nilai koreksi (ΔCF), sebagai berikut:

$$\Delta CF = \frac{x - R_W}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot S} \quad (2.30)$$

Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah metode numerik untuk memecahkan persamaan matematika yang menggambarkan aliran fluida. Dalam penelitian ini, analisis hambatan kapal menggunakan software NUMECA Fine/Marine dan pemecah aliran ISIS-CFD yang dikembangkan di Ecole Centrale de Nantes (ECN). Metode Volume-of-Fluid (VOF) digunakan

untuk mendeteksi permukaan bebas antara udara dan air (Queutey & Visonneau, 2007). Penelitian mengulas perkembangan teknik penangkapan antarmuka dan validasi solver aliran ISIS-CFD (Wackers et al., 2011; Guo et al., 2012; Hänninen et al., 2014). Kode CFD ini memecahkan persamaan RANS tak terkompresibel menggunakan metode volume terbatas untuk diskritisasi spasial.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.31)$$

Di mana garis atas menunjukkan nilai rata-rata dan x adalah komponen fluktuasi. Kemudian persamaan Navier-Stokes dan kontinuitas yang dirata-ratakan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 \bar{u}_i + g \delta_{i3} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j} \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.33)$$

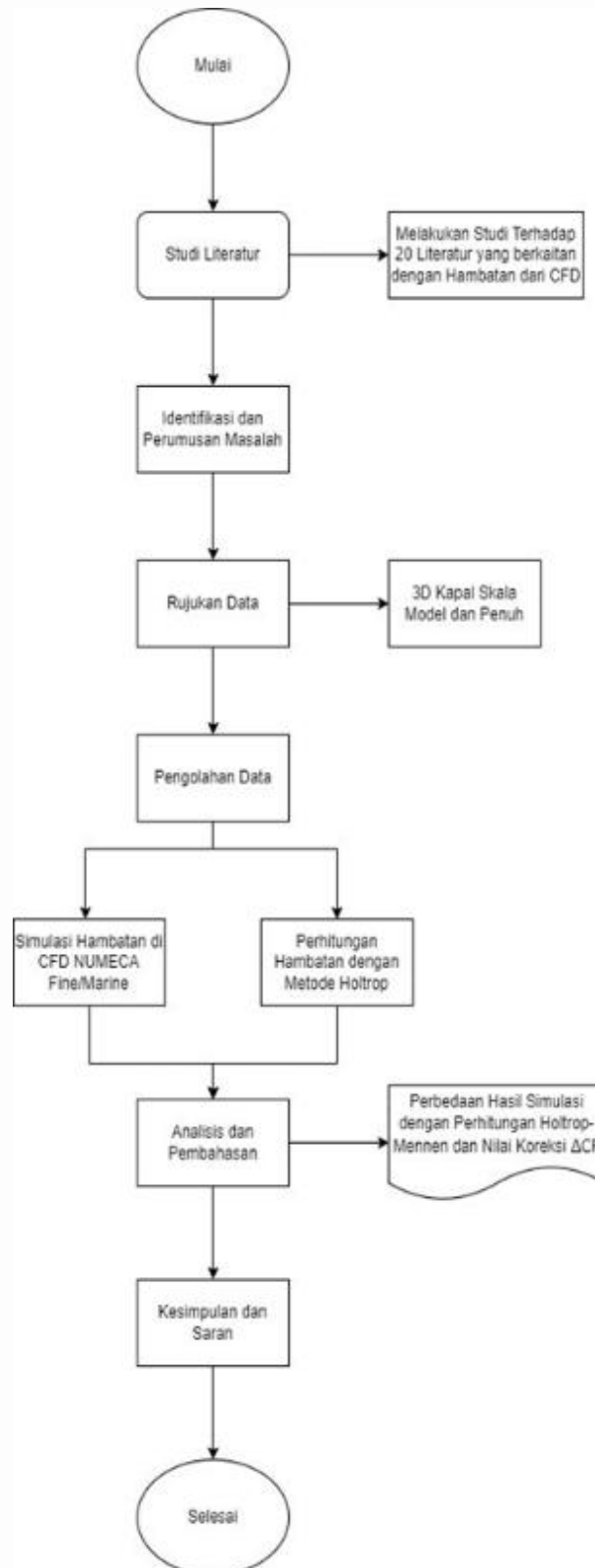
Di mana ρ dan ν mewakili koefisien densitas dan viskositas kinematik dari fluida, dan δ_{i3} adalah delta Kronecker, hanya sama dengan 1 untuk $i = 3$.

Karena istilah terakhir dalam persamaan tersebut disebabkan oleh tegangan Reynolds x , beberapa jenis pemodelan turbulensi perlu diperkenalkan. Model $k-\omega$ SST (F.R. Menter, 1994) diadopsi untuk simulasi dengan NUMECA FINE/Marine. Waktu simulasi dalam CFD dibagi menjadi langkah-langkah waktu diskrit, minimal 100 langkah per periode gelombang. Akselerasi sub-cycling membagi langkah waktu global

ΔT menjadi langkah lebih kecil dt , mengurangi waktu komputasi. Dalam solver implisit seperti ISIS-CFD, kondisi angka Courant tidak berlaku dan skema BRICS diterapkan. Setiap langkah waktu melibatkan beberapa iterasi non-linear untuk solusi akurat, dengan rekomendasi 12 hingga 22 iterasi dan konvergensi 4 orde magnitudo, meski ITTC merekomendasikan 3 orde. Nilai rekomendasi NUMECA FINE/Marine untuk jumlah mesh dan time step digunakan dalam studi ini.

METODOLOGI

Berikut adalah bagan alir (flow chart) pada studi ini yang bertujuan untuk memberikan informasi tentang bagaimana alur penelitian ini dilakukan.



Gambar 3.1 1 Diagram Alur Penelitian

Rujukan Data

Tabel 3.1.1 berikut adalah data dan gambar yang digunakan untuk penelitian ini, yaitu data model kapal *bulk carrier* yang digunakan dalam percobaan kali ini yang memiliki dimensi utama.

Pengolahan Data

Persiapan simulasi menggunakan perangkat lunak NUMECA Fine/Marine

Pada penelitian ini, simulasi menggunakan software NUMECA Fine/Marine dengan dasar-dasar yang

tercantum pada landasan teori. Berikut adalah skema yang akan digunakan pada NUMECA Fine/Marine

Simulasi yang diujikan pada kapal ini menggunakan asumsi setengah badan (*half body*). Hal ini cocok untuk simulasi awal untuk memperkirakan hambatan kapal, Asumsi tersebut dapat mengurangi waktu komputasi dan meningkatkan akurasi untuk kapal dengan simetri bilateral yang tinggi.

Setelah file Rhinoceros 3D, file akan diekspor dalam format Parasolid dan akan melanjutkan proses pembentukan *domain* pada NUMECA HEXPRESS. Berikut adalah dimensi yang digunakan dalam membentuk *box* yang akan menjadi *domain*:

Tabel 3.1 1 Principal Dimension

Principal Dimension					
Measurement	Model Points	Ship Points 1	Ship Points 2	Ship Points 3	Unit
Length Water Line: LWL	2.000	50.000	100.000	200.000	m
Length Overall: LOA	2.133	53.333	106.666	213.321	m
Breadth: B	0.333	8.338	16.676	33.352	m
Draft	0.107	2.675	5.350	10.7	m
Depth	0.200	5.000	10.000	20.000	m
Displacement: ∇	0.058	904.5	7236	57886	m ³
Block coefficient (C_b)	0.794	0.795	0.795	0.795	
Midship coefficient (C_m)	0.992	0.994	0.994	0.994	
Surface Wetted Area	0.931	580.911	2323.644	9294.576	m ²

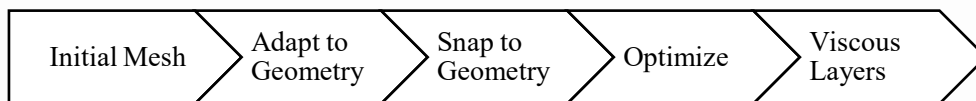
Tabel 3.2.1 1 Skema NUMECA Fine/Marine

Item	Scheme used
<i>Grid system</i>	<i>Unstructured, non-conformal, fully hexahedral grid</i>
<i>Spatial Distribution</i>	<i>Finite volume method</i>
<i>Advection term</i>	<i>QUICK 3rd order upwind difference</i>
<i>Viscous diffusion term</i>	<i>2nd order central difference</i>
<i>Time marching</i>	<i>Backward difference, sub-iteration with virtual time</i>
<i>Coupling between pressure and velocity</i>	<i>Projection method solving Poisson's equation</i>
<i>Free-surface capturing</i>	<i>VOF Method (BRICS scheme)</i>
<i>Turbulence model</i>	<i>k - ω SST</i>
<i>Body-surface boundary condition</i>	<i>Logarithmic function as a wall function</i>

Tabel 3.2.1 2 Box Dimension

	First Corner	Opposite Corner
X	2 X LWL	-(2 X LWL)
Y	1 X LWL	0 X LWL
Z	½ X LWL	-(1 X LWL)

Selanjutnya adalah proses meshing, proses ini akan menjalani beberapa tahap sebagai berikut:



Gambar 3.2.1 1 Alur *Meshing* NUMECA HEXPRESS

Pada tahap selain *Viscous Layers*, tidak diperlukan banyak input. Namun, pada tahap *Adapt to Geometry*, diperlukan penyesuaian data input, terutama total number of cells yang akan dihasilkan dalam proses

meshing. Sementara itu, pada tahap *Viscous Layers*, diperlukan input data yang sesuai dengan data kapal, seperti *Reference length* dengan nominal LWL dan *Reference velocity* sebagai berikut:

Tabel 3.2.1 1 Nilai Kecepatan dan *Froude Number*

LWL	Fn	V (m/s)
2	0.16	0.71
2	0.18	0.80
2	0.20	0.89
50	0.16	3.55
50	0.18	4.00
50	0.20	4.43
100	0.16	5.00
100	0.18	5.65
100	0.20	6.25
200	0.16	7.10
200	0.18	8.00
200	0.20	8.90

Setelah proses *meshing* dalam pembuatan domain selesai, maka bisa dilanjutkan dengan penggunaan aplikasi *Fine/Marine* untuk mengubah parameter yang sesuai dengan simulasi yang akan dijalankan.

Berikut adalah setting parameter yang akan digunakan:

- o General Parameters

Pada parameter ini, simulasi akan digunakan dalam kondisi *Steady* pada *Time configuration*.

- o Fluid Model

Pada parameter ini, simulasi dijalankan pada *multifluid*, yaitu fluida air laut dan udara. Fluida air laut diuji pada 30°C yang memiliki densitas 1021.769 kg/m³ dan udara dengan densitas 1.2 kg/m³.

- o Flow Model

Pada parameter ini simulasi dijalankan dengan *Mathematical model* yaitu *k-omega (SST-menter)*, *Gravity Intensity* dengan nominal -9.81 m/s², *Reference length* dengan nominal LWL, dan *Reference velocity* (kecepatan kapal) yang akan disesuaikan dengan data kapal sebagai berikut:

Tabel 3.2.1 4 Nilai Kecepatan dan *Froude Number*

LWL	Fn	V (m/s)
2	0.16	0.71
2	0.18	0.80
2	0.20	0.89

LWL	Fn	V (m/s)
50	0.16	3.55
50	0.18	4.00
50	0.20	4.43
100	0.16	5.00
100	0.18	5.65

LWL	F_n	V (m/s)
100	0.20	6.25
200	0.16	7.10
200	0.18	8.00
200	0.20	8.90

Z_{max}	EXT	Prescribed Pressure
-----------	-----	---------------------

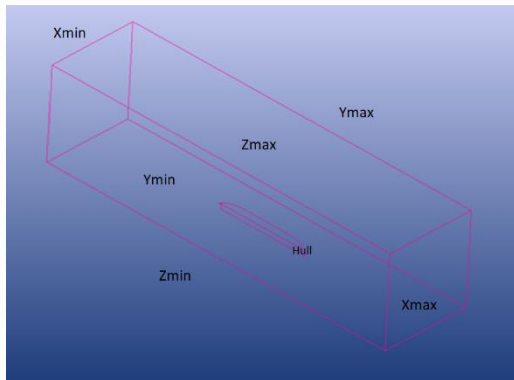
o Body Motion

Pada parameter ini simulasi akan digunakan pendekatan Quasi-Static (QS) dengan *Geometry* yaitu *Half body* dan motion definition sebagai berikut:

Tabel 3.2.1 6 *Motion* Beserta Tipenya

D.o.fs	Motion Type	Motion law
Tx0 (Surge)	Imposed	½ sinusoidal ramp
Ty0 (Fixed)	Fixed	-
Tz0 (Heave)	Solved	-
Rx2 (Roll)	Fixed	-
Ry1 (Pitch)	Solved	-
Rz0 (Yaw)	Fixed	-

o Boundary Condition



Gambar 3.2.1 2 *Boundary Condition* yang Digunakan

Tabel 3.2.1 2 *Boundary Condition Description*

Description	Type	Boundary Condition
Hull	SOL	No Slip
Xmin	EXT	Far Field
Xmax	EXT	Far Field
Ymin	MIR	-
Ymax	EXT	Far Field
Zmin	EXT	Prescribed Pressure

Simulasi NUMECA Fine/Marine

Simulasi dilakukan kepada skala penuh (Ship Points) dan skala model (Model Points). Setelah simulasi telah selesai, akan didapatkan berbagai data baik *residual*, *force*, *motion* dan *moment*. Akan tetapi, hasil yang diperlukan pada penelitian ini hanya *force* dari kapal. Hasil dari *force* adalah nilai hambatan pada sumbu x. Hasil yang didapatkan maka perhitungan untuk mendapatkan nilai koreksi (ΔCF) dari skala penuh (Ship Points) dan skala model (Model Points).

Perhitungan Hambatan dengan Metode Holtrop-Mennen

Perhitungan akan dilakukan berdasarkan teori dan rumus yang telah dijabarkan dari sub-bab 2.2 dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel karena dapat membantu dalam perhitungan karena memiliki sejumlah fitur yang memudahkan berbagai macam

o Control Variables

Pada parameter ini dapat ditentukan *number of time step* atau iterasi yang dapat disesuaikan besarnya sebagai berikut:

- Number cell yang digunakan dalam studi ini adalah 502,379 hingga 3,848,134.
- Time steps yang digunakan adalah 1500.
- Non-Linear Iteration yang digunakan adalah 5.
- Convergence criteria yang digunakan adalah 2 orde.

Setelah parameter telah diatur sesuai yang telah dipaparkan diatas maka simulasi dimulai dengan *start solver* yang kali ini menggunakan solusi parallel untuk *launching mode*-nya.

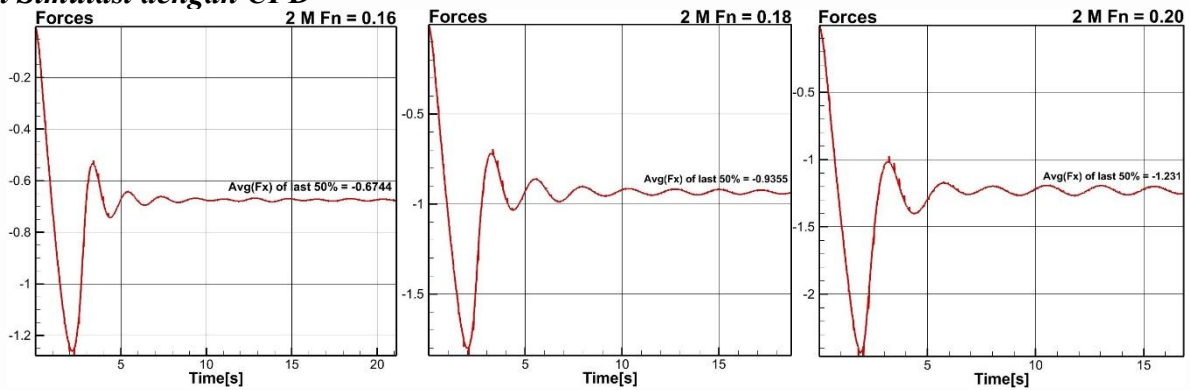
perhitungan dengan cepat dan akurat. Hasil dari perhitungan akan digunakan sebagai komparasi dari metode CFD yang nantinya juga akan membantu dalam mencari tujuan dari studi ini yaitu mendapatkan nilai koreksi (ΔCF) dari skala penuh (Ship Points) dan skala model (Model Points).

HASIL DAN ANALISIS

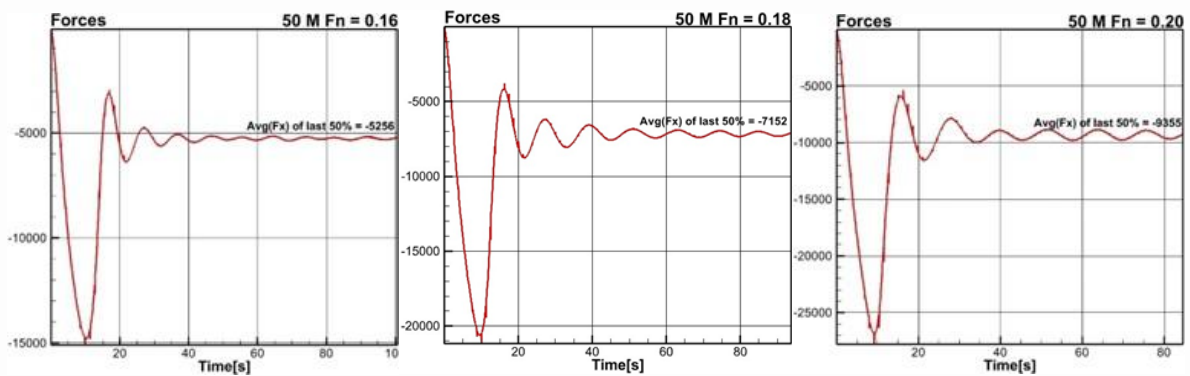
Simulasi dan Perhitungan Hambatan

Berikut hasil simulasi yang dilakukan menggunakan CFD NUMECA Fine/Marine serta membandingkan hasil grafik dari perhitungan Holtrop-Mennen dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel. Pertama kali yang dilakukan adalah menganalisis grafik F_x atau *Forces* oleh lambung kapal dengan setengah badan (*half body*) yang dilakukan dengan CFD. Selanjutnya, menganalisis tabel R_T atau hambatan total dengan perhitungan Holtrop-Mennen.

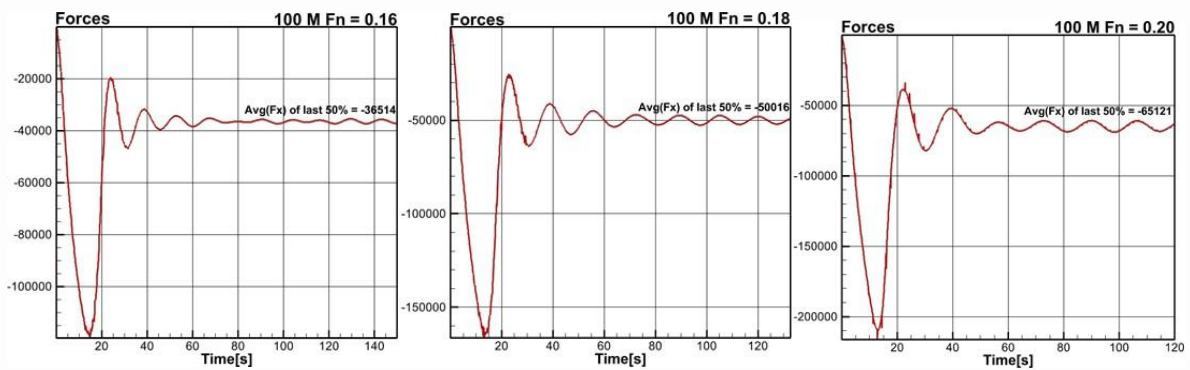
Hasil Simulasi dengan CFD



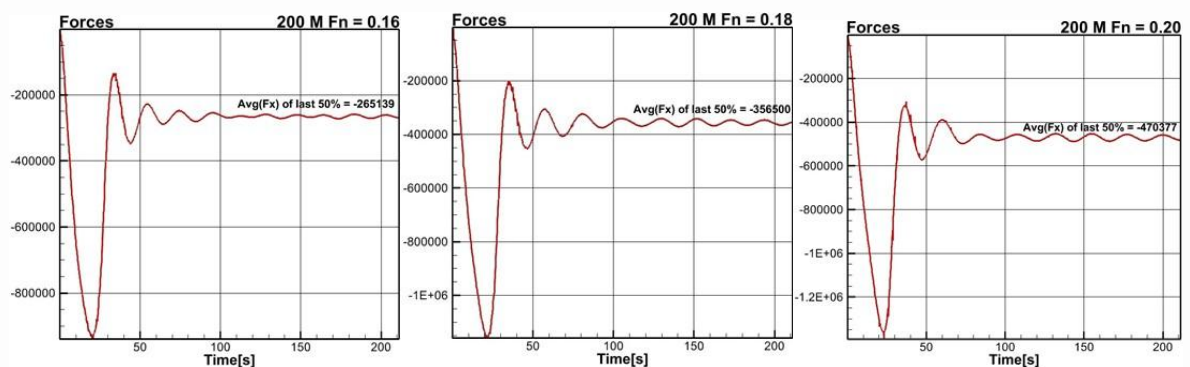
Gambar 4.1.1 1 Hasil simulasi CFD untuk skala 2 meter pada Froude Number 0.16, 0.18, dan 0.20.



Gambar 4.1.1 2 Hasil simulasi CFD untuk skala 50 meter pada Froude Number 0.16, 0.18, dan 0.20.



Gambar 4.1.1 3 Hasil simulasi CFD untuk skala 100 Meter pada Froude Number 0.16, 0.18, dan 0.20.



Gambar 4.1.1.4 Hasil simulasi CFD untuk skala 200 Meter pada Froude Number 0.16, 0.18, dan 0.20.

Gambar 4.1.1 menunjukkan nilai gaya F_x terhadap waktu dengan 1500 langkah waktu, bervariasi berdasarkan Froude Number dan skala kapal. Pada skala 2 meter, gaya berosilasi dan cepat stabil. Pada skala 50, 100, dan 200 meter, amplitudo osilasi meningkat sebelum stabil. Semua grafik menunjukkan fluktuasi awal sebelum stabil. Rata-rata gaya diambil

dari 50% terakhir waktu karena stabil. Nilai rata-rata dan gaya akhir meningkat seiring peningkatan skala. Simulasi menggunakan asumsi setengah badan, jadi hasil perlu dilipatgandakan dua kali. Grafik menunjukkan nilai F_x negatif karena dorongan buatan pada lambung kapal. Berikut tabel hasil simulasi CFD yang telah dikoreksi.

Tabel 4.1.1 1 Hasil Simulasi CFD

Fn/LWL	2m	50m	100m	200m
0.16	1.348 N	10512 N	73028 N	530278 N
0.18	1.871 N	14184 N	100032 N	713000 N
0.20	2.462 N	18710 N	130242 N	940754 N

Hasil Perhitungan dengan Metode Holtrop-Mennen

Perhitungan ini berdasarkan cara mencari nilai hambatan yang diperkenalkan oleh Holtrop dan Mennen pada tahun 1982. Teori dan rumus perhitungan ini telah dijabarkan pada sub-bab 2.2. Berikut adalah tabel R_T atau hambatan total dengan perhitungan Holtrop-Mennen:

Perbandingan Hasil dari CFD dengan Holtrop-Mennen

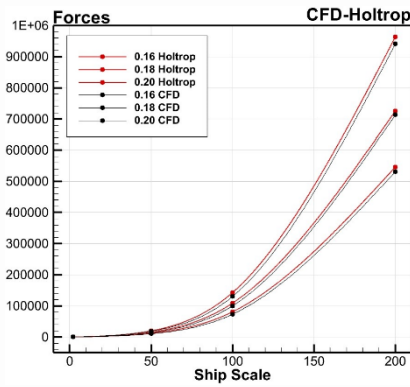
Bagian ini bertujuan untuk membandingkan hasil simulasi CFD dengan metode Holtrop-Mennen, tetapi juga untuk mengeksplorasi aspek-aspek tertentu dari kinerja kedua pendekatan tersebut. Setelah didapatkan hasil simulasi CFD, diperlukan komparasi hasil tersebut dengan metode Holtrop-Mennen sebagai komparasi dan validasi dari metode CFD dalam mencari tujuan dari studi ini.

Tabel 4.1.2 1 Hasil Perhitungan Holtrop-Mennen

Holtrop				
Fn/LWL	2m	50m	100m	200m
0.16	1.555 N	11713 N	80853 N	545536 N
0.18	2.000 N	15339 N	108744 N	725481 N
0.20	2.600 N	19701 N	142586 N	963118 N

Tabel 4.1.3 1 Hasil Simulasi CFD dan Perhitungan Holtrop-Mennen

CFD				
Fn/LWL	2m	50m	100m	200
0.16	1.348 N	10512 N	73028 N	530278 N
0.18	1.871 N	14184 N	100032 N	713000 N
0.20	2.462 N	18710 N	130242 N	940754 N
Holtrop				
0.16	1.555 N	11713 N	80853 N	545536 N
0.18	2.000 N	15339 N	108744 N	725481 N
0.20	2.600 N	19701 N	142586 N	963118 N

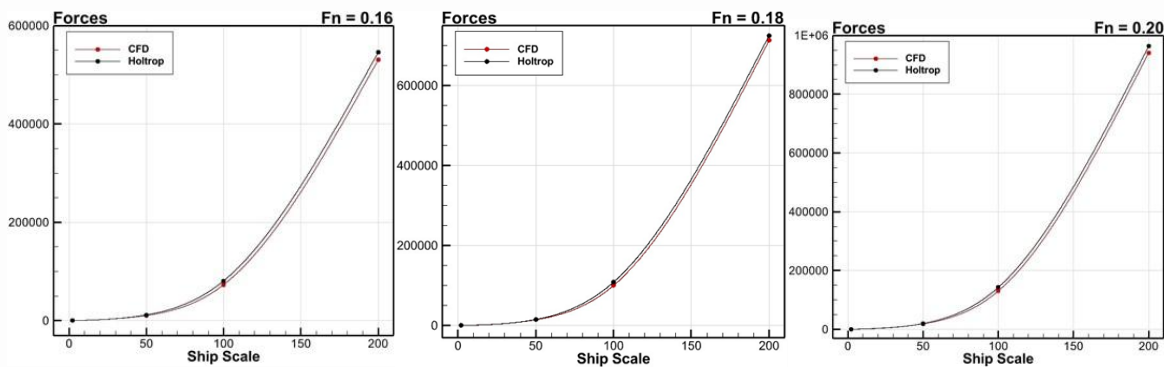


Gambar 4.1.3 1 Grafik Forces CFD dan Holtrop-Mennen

Gambar 4.1.3.1 menunjukkan perbandingan Forces pada berbagai skala kapal untuk Froude Number (Fn) 0.16, 0.18, dan 0.20, dengan masing-masing ditandai dengan garis merah, hitam, dan biru. Pada kedua grafik, sumbu x mewakili skala kapal dan sumbu y menunjukkan forces dari 0 hingga 1.000.000. Fn = 0.16 dimulai dari nilai kecil dan meningkat hingga mendekati 500.000 pada skala 200, Fn = 0.18 mencapai hampir 700.000, dan Fn = 0.20 mendekati 1.000.000. Hasil simulasi CFD menunjukkan hambatan meningkat dengan skala kapal, dengan nilai hambatan lebih rendah pada skala model dibandingkan dengan skala penuh karena efek viskositas. Metode Holtrop-Mennen memberikan perkiraan awal yang kuat meski kurang detail dalam efek skala, dan

hasilnya tidak menunjukkan perbedaan signifikan dengan simulasi CFD.

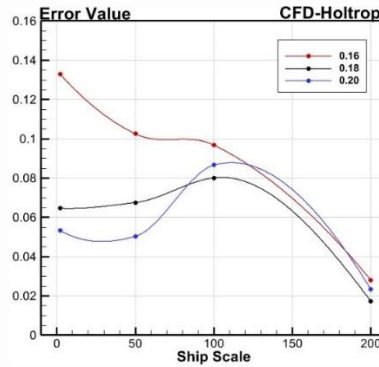
Gambar 4.1.3 3 menunjukkan hubungan antara nilai error dan skala kapal untuk tiga Froude Number (Fn) berbeda: 0.16, 0.18, dan 0.20. Fn = 0.16 menunjukkan penurunan signifikan dalam nilai kesalahan dari sekitar 14% pada skala kapal 2 hingga sekitar 3% pada skala kapal 200. Fn = 0.18 dan Fn = 0.20 menunjukkan peningkatan nilai kesalahan hingga skala kapal 100, kemudian menurun, dengan Fn = 0.18 mencapai sekitar 2% dan Fn = 0.20 sekitar 3% pada skala kapal 200. Secara keseluruhan, semua variabel Fn menunjukkan tren penurunan nilai kesalahan pada skala kapal yang lebih besar, dengan beberapa variasi pada titik tengah skala kapal.



Gambar 4.1.3 2 Perbandingan Forces CFD dengan Holtrop-Mennen pada Froude Number 0.16,0.18, dan 0.20

Tabel 4.1.3 2 Nilai Error Simulasi CFD Terhadap Perhitungan Holtrop-Mennen

Fn/LWL	2 Meter	50 Meter	100 Meter	200 Meter
0.16	13,30%	10,25%	9,68%	2,80%
0.18	6,46%	6,75%	8,01%	1,72%
0.20	5,33%	5,03%	8,66%	2,32%



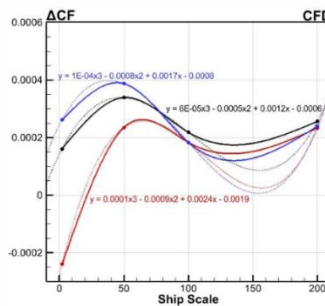
Gambar 4.1.3 3 Grafik Nilai *Error* Simulasi CFD Terhadap Perhitungan Holtrop-Mennen

Perhitungan Nilai Koreksi ΔCF

Gambar 4.2.1 menunjukkan perubahan koefisien gesekan (ΔCF) pada berbagai skala kapal. $F_n = 0.16$ menunjukkan peningkatan ΔCF dari negatif pada skala 2 hingga sekitar 0.0002 pada skala 50, kemudian menurun dan stabil mendekati 0 pada skala 200. $F_n = 0.18$ dan 0.20 menunjukkan peningkatan ΔCF hingga sekitar 0.0004 pada skala 100 dan 50, kemudian menurun mendekati 0.0002 pada skala 200. Grafik ini menunjukkan hubungan nonlinier antara ΔCF dan skala kapal, dengan perubahan signifikan pada skala 50 dan 100, dan stabilitas lebih baik pada $F_n = 0.16$.

Dari grafik ini juga didapatkan gambaran terkait ekstrapolasi dalam mencari nilai hambatan dengan ukuran kapal tertentu.

Tabel 4.2 2 berisi persamaan ekstrapolasi dari trendline Gambar 4.2 1, digunakan untuk mencari ΔCF pada kapal berukuran 2 hingga 200 meter dengan Froude Number (F_n) 0.16, 0.18, dan 0.20. Nilai ΔCF yang diperoleh membantu meningkatkan akurasi prediksi hambatan kapal, yang berdampak langsung pada efisiensi operasional, konsumsi bahan bakar, dan desain kapal yang optimal, sehingga penting untuk kinerja dan biaya operasional kapal.



Gambar 4.2 1 Grafik Nilai ΔCF

Tabel 4.2 1 Nilai Ekstapolasi ΔCF

F_n	Equation
0.16	$y = 0,0001x^3 - 0,0009x^2 + 0,0024x - 0,0019$
0.18	$y = 6E-05x^3 - 0,0005x^2 + 0,0012x - 0,0006$
0.20	$y = 1E-04x^3 - 0,0008x^2 + 0,0017x - 0,0008$

KESIMPULAN

Simulasi menunjukkan variasi gaya hambatan (F_x) dari 1,348 hingga 940,754 newton, dihitung dari rata-rata 50% data terakhir dan dikalikan dua karena asumsi setengah badan kapal. Hambatan pada skala penuh jauh lebih besar dibandingkan dengan skala model akibat interaksi aliran yang lebih kompleks. Kedua metode, CFD dan Holtrop-Mennen, mencatat

peningkatan gaya signifikan seiring bertambahnya skala kapal, dengan kesalahan relatif antara 1,72% dan 13,30%, menegaskan relevansi metode Holtrop-Mennen karena kecepatan dan kemudahan penerapannya dibandingkan dengan CFD. Nilai koreksi (ΔCF) bervariasi dari -0,00024 hingga 0,000387, dengan Froude Number (F_n) 0,16 yang menunjukkan stabilitas terbaik. Kapal berukuran kecil memerlukan penyesuaian ΔCF lebih besar untuk akurasi pada skala penuh dibandingkan dengan kapal

besar. Ekstrapolasi hambatan untuk ukuran kapal tertentu diperoleh dengan persamaan: untuk $F_n = 0,16$, $y = 0,0001x^3 - 0,0009x^2 + 0,0024x - 0,0019$; untuk $F_n = 0,18$, $y = 6E-05x^3 - 0,0005x^2 + 0,0012x - 0,0006$; dan untuk $F_n = 0,20$, $y = 1E-04x^3 - 0,0008x^2 + 0,0017x - 0,0008$. Penelitian ini mendukung prediksi hambatan kapal yang lebih akurat, berkontribusi pada desain kapal yang efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Feng, A., You, Y., & Cai, H. (2019). An improved Rankine source panel method for three dimensional water wave problems. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.02.001>
- [2] Gunawan. (2012). *Efek Injeksi Gelembung Udara Terhadap Hambatan Total Kapal Model*.
- [3] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [4] ITTC - Recommended Procedures and Guidelines-, “Testing and Extrapolation Methods for Performance Prediction of Propellers and Propulsion Systems”, 2007
- [5] Lee et al, “Comparison of Resistance Prediction between Model Scale and Full Scale for Naval Ships”, 2020
- [6] F. Molland, “Ship resistance and propulsion”, 2011
- [7] William Froude, "On the Effect of Surface Friction on Waves of Translation", 1884
- [8] T.H. Havelock, "The Effect of Viscosity on the Motion of Long Waves under Gravity", 1925
- [9] J.H. Michell, "The Theory of Waves in an Infinite Fluid", 1898
- [10] H. Maruo, "On the Calculation of Wave Resistance of a Ship", 1959
- [11] John Doe and Jane Smith, "Experimental Study of Towing Tank Testing for Ship Hydrodynamics Evaluation", 2020
- [12] L. Larsson, "Extrapolation Methods for Predicting Wave Resistance of Ships", 2020