



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Hambatan Kapal *Planing Hull* pada Kondisi Air Tenang: Perubahan Posisi LCG dan VCG

M. Doni Indra Cahya Kurniawan¹⁾, Samuel²⁾, Andi Trimulyono³⁾

¹⁾Laboratorium Hidrodinamika

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}doniindra@students.undip.ac.id

Abstrak

IMO mengadopsi strategi awal untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dengan memperkenalkan Energy Efficiency Design Index (EEDI). Strategi tersebut menargetkan pengurangan emisi gas rumah kaca sekitar 50% pada tahun 2050 dibandingkan dengan level pada tahun 2008. Permasalahan utama yang dihadapi kapal *planing* adalah keseimbangan antara efisiensi hidrodinamik dan stabilitas operasional. Beberapa perangkat tambahan di buritan, seperti *interceptor* digunakan untuk mengurangi hambatan dan mengontrol sikap kapal melalui pembangkitan gaya angkat hidrodinamik, sehingga sudut trim berkurang dan efisiensi keseluruhan meningkat. Salah satu cara yang untuk mengoptimalkan sudut trim dan efisiensi kapal *planing* tanpa tambahan perangkat di buritan adalah dengan mengoptimalkan distribusi bobot pusat gravitasi longitudinal dan vertical agar hambatan dapat diminimalkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi Longitudinal Center of Gravity dan Vertical Center of Gravity terhadap sudut trim dan hambatan total. Metode yang digunakan adalah simulasi Computational Fluid Dynamic (CFD) berdasarkan Reynold-averaged Navier-Stroke (RANS) yang terverifikasi dan tervalidasi. Hasil penelitian menunjukkan VCG 8% dan LCG +5% menghasilkan penurunan hambatan terbesar sebesar 61,74% pada Fr 0.91. Pada kecepatan lebih tinggi yaitu Fr 1.61, VCG 8% dan LCG -10% memiliki penurunan hambatan terbaik sebesar 41.92%. Seiring bertambahnya kecepatan, posisi VCG 8% secara konsisten memberikan hambatan lebih kecil dibanding VCG 16% dan 24%. Sedangkan pengaruh LCG dan VCG pada sudut trim, di kecepatan rendah Fr 0.91, VCG 8% dan LCG +5% menunjukkan trim paling kecil dan stabil, menandakan keseimbangan gaya angkat dan berat yang baik. Namun, pada kecepatan tinggi Fr 1.41 dan 1.61, LCG -5% dan -10% dengan VCG 8% menghasilkan sudut trim yang optimal dengan nilai 2°-4°, yang merupakan rentang optimum kondisi *planing*.

Kata Kunci : Hambatan, LCG, VCG, *Planing hull*, CFD

1. PENDAHULUAN

Krisis energi global telah menjadi salah satu isu utama dalam pembangunan berkelanjutan. Peningkatan konsumsi energi di seluruh sektor industri, termasuk perkapalan, berdampak langsung terhadap kenaikan emisi gas rumah kaca yang mengancam stabilitas lingkungan global. Menurut laporan International Maritime Organization (IMO) pada tahun 2012, transportasi laut menyumbang sekitar 2,2% dari total emisi CO₂ dunia, dan jika tidak dikendalikan, angka ini diperkirakan akan meningkat 50–250% pada

tahun 2050 [1]. Sebagai respon, IMO menetapkan strategi reduksi emisi melalui Energy Efficiency Design Index (EEDI) dan resolusi MEPC.304 (72) pada tahun 2018, yang menargetkan pengurangan minimal 50% emisi pada tahun 2050 dari tahun 2008 [2]. Kebijakan ini menuntut inovasi teknis dalam desain kapal yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan hemat energi.

Dalam konteks tersebut, peningkatan efisiensi energi pada kapal dapat dicapai melalui berbagai strategi, seperti pengurangan hambatan, optimalisasi desain lambung, pencegahan

biofouling, penggunaan panel surya, optimalisasi baling-baling, dan metode lainnya [3].

Permasalahan utama yang dihadapi kapal *planing* adalah keseimbangan antara efisiensi hidrodinamik dan stabilitas operasional. Beberapa perangkat tambahan di buritan, seperti *interceptor* digunakan untuk mengurangi hambatan dan mengontrol sikap kapal melalui pembangkitan gaya angkat hidrodinamik, sehingga sudut *trim* berkurang dan efisiensi keseluruhan meningkat [4]. Salah satu cara langsung untuk mendukung target dari IMO adalah melalui pengurangan hambatan kapal, karena hambatan berbanding lurus dengan konsumsi energi. Pada kapal *planing*, faktor *Longitudinal Center of Gravity* dan *Vertical Center of Gravity* menjadi penentu sikap hidrodinamik (*trim*, *sinkage*, luas bidang basah) yang pada akhirnya memengaruhi besarnya hambatan. Posisi *Longitudinal Center of Gravity* (LCG) dan *Vertical Center of Gravity* (VCG) memengaruhi *trim*, sikap lambung, serta distribusi gaya hidrodinamis. LCG merupakan titik sepanjang sumbu longitudinal tempat distribusi berat kapal terkonsentrasi, yang menentukan momen *bow up* atau *bow down*. Posisi LCG yang tidak optimal dapat menambah hambatan, *trim*, atau stabilitas. Bila hasil simulasi pada posisi LCG kurang baik dalam mengurangi *trim*, salah satu yang bisa dilakukan dengan menambahkan *interceptor*, karena pengaplikasian *interceptor* pada kapal berlambung *planing* umumnya dapat mengurangi sudut *trim* kapal [5].

VCG, sebagai posisi pusat gravitasi vertikal, memengaruhi kestabilan transversal serta respon kapal terhadap gaya angkat. VCG yang terlalu tinggi membuat kapal lebih rentan terhadap ketidakstabilan, sedangkan VCG rendah meningkatkan kontrol namun dapat memengaruhi kinerja hidrodinamik.

Beberapa penelitian terdahulu telah membuktikan pengaruh posisi LCG dan VCG kapal terhadap hambatan. Michael et al. (2023) menunjukkan bahwa variasi LCG dapat menurunkan hambatan hingga 45,16% melalui optimasi *trim* pada kondisi tertentu, sementara metode empiris Savitsky memberikan prediksi pengurangan resistansi hingga 53,29% [6]. Hajiabadi et al. (2018) memvalidasi hal ini melalui uji eksperimental pada kapal catamaran, yang menunjukkan penurunan hambatan hingga 9,6% pada kondisi beban ringan dengan kecepatan maksimum [7]. Selain itu, dengan menggeser pusat gravitasi ke belakang sebesar sekitar 1%, hambatan kapal berkurang hingga 5%, sementara pergeseran pusat gravitasi ke depan sebesar sekitar 1% menyebabkan peningkatan hambatan hingga 15% [8].

Meskipun demikian, gap penelitian masih terlihat pada analisis komprehensif yang menghubungkan LCG dan VCG secara bersamaan terhadap hambatan kapal *planing*. Sebagian besar studi fokus pada salah satu parameter, baik longitudinal maupun vertikal, tanpa meninjau interaksi keduanya secara simultan. Padahal, kombinasi optimal LCG dan VCG berpotensi memberikan peningkatan signifikan dalam efisiensi energi serta pengendalian sikap kapal. Hal ini menjadi dasar penting untuk mengeksplorasi lebih lanjut peran sinergis LCG dan VCG.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai penurunan hambatan dan nilai sudut *trim* akibat pengaruh variasi LCG dan VCG melalui simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pendekatan *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS) yang mampu menganalisis dan memodelkan gaya hidrodinamik yang kompleks. Pendekatan analisis menggunakan FVM (Finite Volume Method) karena metode ini dominan digunakan dalam memprediksi karakteristik kapal *planing* dengan akurasi yang lebih baik [9]. Objek penelitian adalah kapal *planing* Model C dari studi Taunton, dkk. [10], yang telah diuji melalui eksperimen *towing tank* dan dijadikan referensi validasi. Dengan membandingkan hasil variasi posisi LCG dan VCG pada rentang *froude number*, 0.91-1.61, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi empiris sekaligus praktis dalam desain kapal berkecepatan tinggi yang lebih efisien.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman teoritis tentang hubungan LCG dan VCG terhadap hambatan, tetapi juga menawarkan rekomendasi teknis yang relevan untuk perancangan kapal *planing*. Hasil penelitian diharapkan mendukung tercapainya efisiensi energi dan pengurangan emisi sesuai target IMO, sekaligus memperkaya literatur akademik mengenai hidrodinamika kapal *planing* di kondisi air tenang.

2. METODE

Metodologi penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh variasi posisi *Longitudinal Center of Gravity* (LCG) dan *Vertical Center of Gravity* (VCG) terhadap hambatan kapal *planing*. Pendekatan yang digunakan adalah simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan validasi terhadap data eksperimen *towing tank*. Simulasi dilakukan dalam kondisi air tenang untuk memperoleh pemahaman murni mengenai pengaruh variasi LCG dan VCG tanpa gangguan

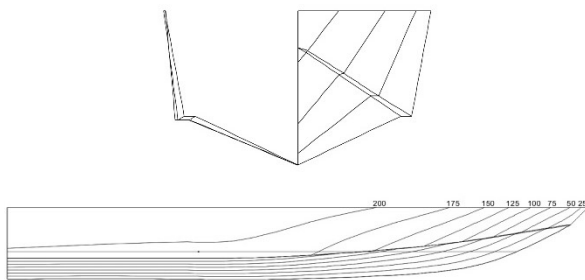
eksternal. Keterbatasan penelitian ini adalah tidak memasukkan kondisi gelombang nyata, efek *cavitation*, *spray*, maupun *dynamic instability* yang sering muncul pada kapal planing berkecepatan tinggi. Metodologi ini dibagi ke dalam beberapa tahap utama sebagaimana dijelaskan di bawah ini.

2.1. Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan kapal berbentuk *Prismatic forms* berdasarkan studi yang dilakukan oleh Taunton, dkk. [10], dengan model C yang memiliki spesifikasi utama seperti tercantum dalam Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Ukuran Utama Model C

No	Parameter	Nilai	Unit
1	L	2	Meter
2	B	0,45	Meter
3	T	0,09	Meter
4	Δ	243,40	Newton
5	$L/\nabla^{1/3}$	6,86	-
6	L/B	4,35	-
7	β	22,5	°
8	LCG	33	%L



Gambar 1. Linesplan Model C

2.2. Parameter Penelitian

Penelitian ini menggunakan parameter dengan menggunakan model kapal C yaitu *planing hull*. Parameter tetap pada penelitian ini mencakup ukuran utama meliputi: panjang kapal, lebar kapal, C_b kapal, L/B kapal. Sedangkan untuk parameter peubah, yaitu posisi LCG dan VCG dan kecepatan kapal.

2.3. Pemodelan Kapal

Pembuatan model 3D *planing hull* yaitu dengan *software* Rhinoceros dan dilakukan pengecekan model 3D bertujuan untuk memastikan model tersebut tidak bocor atau *closed surface*. Kemudian dapat dilakukan simulasi. Pada Gambar 2 merupakan 3D model kapal C.



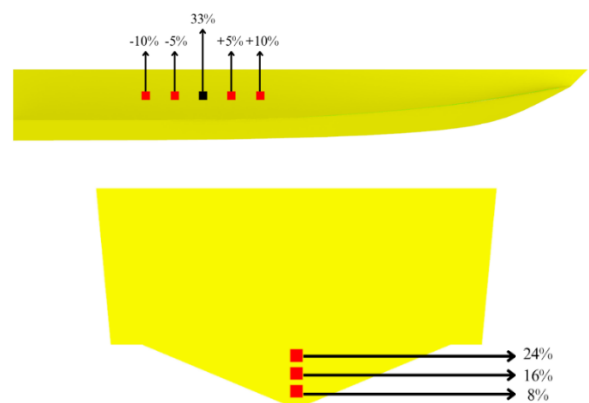
Gambar 2. 3D Kapal Model C

2.4. Variasi Model Kapal

Penelitian ini difokuskan pada pengaruh posisi LCG dan VCG terhadap nilai hambatan pada kapal *planing hull*. Terdapat tiga variasi model VCG dengan masing-masing model memiliki empat parameter peubah. Modifikasi tersebut dirancang untuk mengeksplorasi dampak dari posisi LCG dan VCG terhadap performa kapal *planing hull*. Tabel 2 menunjukkan variasi yang dipakai pada tiap model dan Gambar 3 sketsa posisi LCG pada model kapal.

Tabel 2. Variasi Semua Model

Parameter	Variasi			
Model A	A1	A2	A3	A4
LCG	+5%,	+10%	-5%	-10%
VCG	24%			
Model B	B1	B2	B3	B4
LCG	+5%,	+10%	-5%	-10%
VCG	16%			
Model C	C1	C2	C3	C4
LCG	+5%,	+10%	-5%	-10%
VCG	8%			
Fr	0.91, 1.15, 1.41, 1.61			



Gambar 3. Ilustrasi Variasi Posisi LCG dan VCG

2.5. Komputasi Numerik

Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik CFD untuk menghitung nilai hambatan total, *sinkage*, *trim*, dan WSA. FVM (Finite Volume Method) digunakan untuk memecahkan persamaan RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) pada setiap volume kontrol secara iteratif. Persamaan ini terdiri dari persamaan kontinuitas rata-rata (1) dan momentum (2), dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{U}_i \bar{U}_j + \rho \bar{U}'_i \bar{U}'_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_i}{\partial x} \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

U_i adalah komponen kecepatan rata-rata, \bar{P} adalah tekanan rata-rata, ρ adalah massa jenis fluida, μ adalah viskositas efektif, \bar{U}'_i adalah komponen kecepatan fluktuasi, $\rho \bar{U}'_i \bar{U}'_j$ adalah tegangan Reynolds, dan τ_{ij} adalah komponen tensor dari tegangan viskos rata-rata (3).

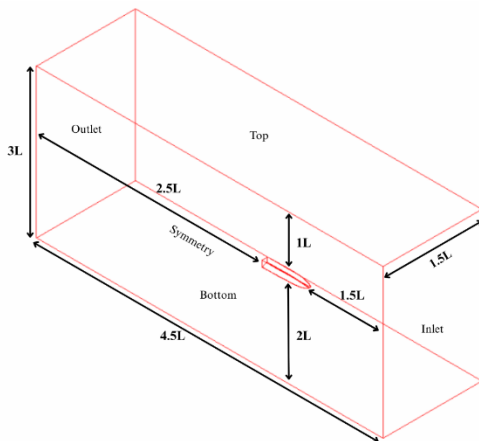
Metode tersebut dapat menggunakan Volume of Fluid (VOF) yang berfungsi melacak lapisan batas interaksi yang melibatkan dua atau lebih fluida yang tidak bersifat tercampur dalam simulasi. Penggambaran interaksi fluida air dengan udara, nilai fraksi bernilai 0.5 digunakan pada isosurface, yang mana air memiliki nilai fraksi 1 dan udara memiliki nilai 0.

Sesuai dengan pedoman ITTC (*International Towing Tank Conference*), penelitian ini menggunakan model $k-\omega$ SST, salah satu model turbulensi RANS [11]. Model turbulensi ini merupakan gabungan dari model $k-\epsilon$ dan model $k-\omega$; model ini menyelesaikan model $k-\epsilon$ pada aliran massal dan juga turbulensi pada dinding berdasarkan model $k-\omega$.

Simulasi numerik yang dilakukan untuk memprediksi hasil hambatan kapal memerlukan pembuatan *computational domain*. Menurut standar ITTC, perhitungan komputasi numerik memerlukan *virtual towing tank* yang digunakan sebagai *background domain*. Pada Tabel 3 merupakan ukuran domain komputasi yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3. Dimensi Towing Tank

No	Parameter	Background
1	Length (m)	1L from FP 2.5L from AP
2	Height (m)	1L from deck 2L from deck
3	Breadth (m)	1.5L from symmetry

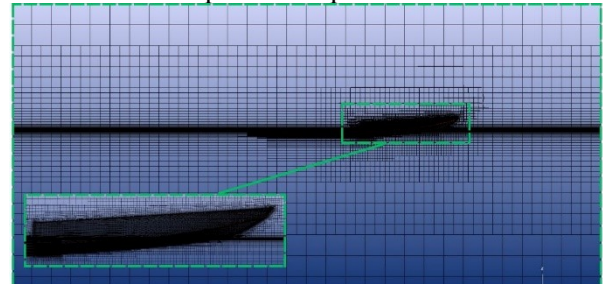


Gambar 4. Visualisasi Towing Tank

Tabel 4. Domain Virtual Towing Tank

No	Part Surface	Background
1	Top	Velocity Inlet
2	Bottom	Velocity Inlet
3	Inlet	Velocity Inlet
4	Outlet	Pressure Outlet
5	Symmetry	Symmetry Plane

Kepadatan mesh di fokuskan pada objek dan permukaan air untuk mendapatkan hasil yang akurat. Penelitian ini menerapkan metode *mesh refinement* untuk meningkatkan konsentrasi mesh pada bagian hull dengan menyesuaikan mesh yang lebih rapat di sepanjang *surface* dan *curve* kapal [12]. Visualisasi tingkat kerapatan mesh dan kualitas mesh dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 5. Visualisasi Mesh

Message

MESH QUALITY CHECK REPORT

>>> Domain: HULL

> 1533509 cells

> Number of negative cells = 0

> Number of concave cells = 0

> Number of twisted cells = 0

--- ORTHOGONALITY ---

Min	Max	Average	Standard deviation
13.52	90.00	78.15	10.88

--- NON-ORTHOGONALITY (FINE/Marine) ---

Min	Max	Average	Standard deviation
0.00	34.28	0.33	0.44

--- EXPANSION RATIO ---

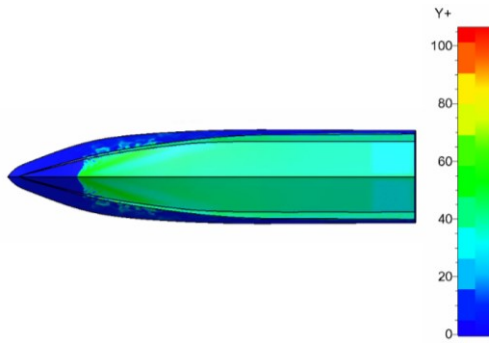
Min	Max	Average	Standard deviation
1.00	6.48	1.47	0.42

The mesh quality respects the recommended NUMECA criteria.

Gambar 6. Mesh Quality Check Report

Parameter yang digunakan dalam validasi hasil analisis numerik menggunakan nilai *wall function* (y^+). *Wall function* (y^+) dinyatakan pada satuan non-dimensional dalam menangkap fenomena *boundary layer* dan memastikan permodelan aliran turbulen yang akurat. *Wall function* (y^+) ini perlu untuk diperhatikan dalam simulasi aliran viskos karena dapat mempengaruhi hasil *drag* dari suatu simulasi. Gambar 7 mendeskripsikan Y^+ yang mempengaruhi prediksi gesekan dengan rekomendasi berdasarkan ITTC dengan nilai $30 < Y^+ < 100$ Y^+ [11] dapat didefinisikan, seperti pada Persamaan 4.

$$Y^+ = \frac{\rho \cdot U \cdot y}{\mu} \quad (4)$$



Gambar 7. Distribusi Y^+ Barehull pada Fr 0.91

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk menilai ketidakpastian simulasi akibat kesalahan diskretisasi, khususnya terkait jumlah sel mesh menggunakan metode *Grid Convergence Index* (GCI) untuk mengevaluasi konvergensi numerik secara sistematis seiring dengan penyempurnaan mesh. Pendekatan GCI digunakan untuk mengevaluasi ketidakpastian numerik. Dalam hal menghitung rasio galat antara dua tingkat resolusi grid yang berbeda, metode GCI memberikan informasi penting mengenai seberapa cepat galat menurun seiring peningkatan resolusi grid. Persamaan 5 sampai 8 digunakan untuk memperoleh nilai GCI sebagaimana dijelaskan oleh Celik dkk [13] dan mempertimbangkan *time step* seperti yang dilakukan Iqbal dkk [14].

$$R = \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \quad (5)$$

$$p = \left(\frac{1}{\ln(r)} \right) \left| \ln \left(\frac{s^3 - s^2}{s^2 - s^1} \right) \right| \quad (6)$$

$$e_a^{21} = \left| \frac{s^1 - s^2}{s^1} \right| \quad (7)$$

$$GCI = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (8)$$

Tabel 5. *Grid Convergence Index* (GCI)

Parameter	Nilai
<i>Fine Configuration</i>	<i>Total Cells</i> = 2.406.459 <i>Time Step</i> = 0.00214 s
<i>Medium Configuration</i>	<i>Total Cells</i> = 1.533.509 <i>Time Step</i> = 0.00309 s
<i>Coarse Configuration</i>	<i>Total Cells</i> = 858.591 <i>Time Step</i> = 0.00429 s
<i>Fine solution, S₁</i>	34.70
<i>Medium solution, S₂</i>	34.93
<i>Coarse solution, S₃</i>	35.23
<i>Medium-Fine, ε₂₁</i>	0.22686
<i>Coarse-Medium, ε₃₂</i>	0.30274
<i>e_a²¹</i>	0.00654
<i>Convergence ratio, R</i>	0.74935
<i>Order of accuracy, p</i>	0.83257
<i>GCI Method (%)</i>	2.443

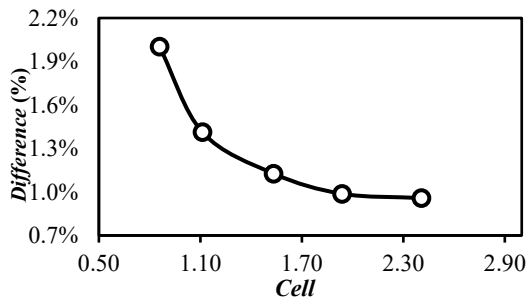
Berdasarkan hasil perhitungan GCI, ketiga nilai yang diperoleh berada di bawah 5% dan nilai *convergence ratio* menunjukkan nilai di bawah 1 yang menunjukkan solusi sudah dalam kriteria konvergen. Hal ini menunjukkan bahwa solusi numerik telah mencapai konvergensi grid yang baik. Dengan demikian, tingkat ketelitian hasil simulasi dapat dianggap memadai dan pengaruh ketidakpastian akibat ukuran grid berada pada tingkat yang dapat diterima.

Selain itu dilakukan verifikasi menggunakan *Grid independence study* dengan lima variasi kerapatan *mesh* yang dilakukan untuk ketelitian atau kehalusan grid dalam menentukan efektivitas dan akurasi hasil simulasi. Hal ini memastikan bahwa hasil analisis tetap konsisten seiring dengan meningkatnya kerapatan *mesh* [15].

$$\varepsilon = \frac{|R_{T(n+1)} - R_{T(n)}|}{R_{T(n)}} \times 100\% \quad (9)$$

Tabel 6. *Grid Independence Study*

Type	Cell (million)	Rt (N)	Diff (%)	ε (%)
Coarse	0.85	35.23	2.00%	-
Coarse-Medium	1.11	35.03	1.41%	0.58%
Medium	1.53	34.93	1.13%	0.28%
Medium-Fine	1.93	34.88	0.99%	0.14%
Fine	2.40	34.87	0.96%	0.03%



Gambar 8. Grafik *Grid Independence Study*

3.2. Validasi

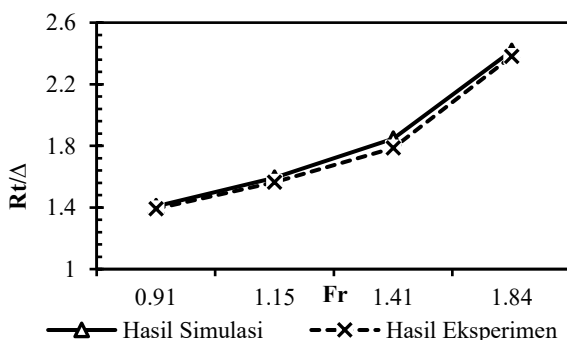
Tahap validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Taunton, dkk.[10]. Validasi data hasil diperoleh berdasarkan pendekatan rumus pada Persamaan 10 dan Persamaan 11 menghitung RMSE (*Root Mean Square Error*), yang mengukur kesalahan dari sampel berdasarkan variasi kecepatan.

$$E_{\psi}\% = \left| \frac{\psi_{numeric} - \psi_{experiment}}{\psi_{experiment}} \right| \times 100 \quad (10)$$

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E_i^2}{N}} \quad (11)$$

Tabel 7. Hasil Validasi Nilai Hambatan

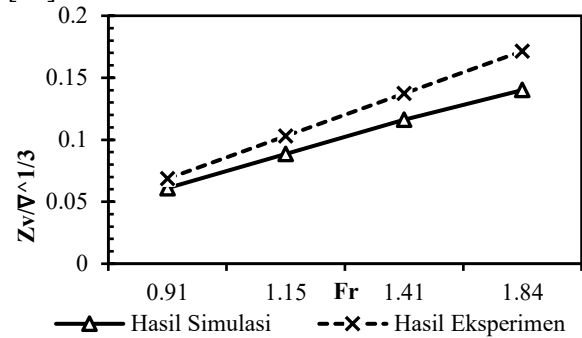
Fr	Vs (m)	Hasil Simulasi (N)	Hasil Eksperimen (N)	Koreksi
0.91	4.05	34.93	34.54	1.13%
1.15	5.09	39.53	38.80	1.87%
1.41	6.23	45.84	44.32	3.32%
1.84	8.13	59.96	59.07	1.49%
RSME				2.12%



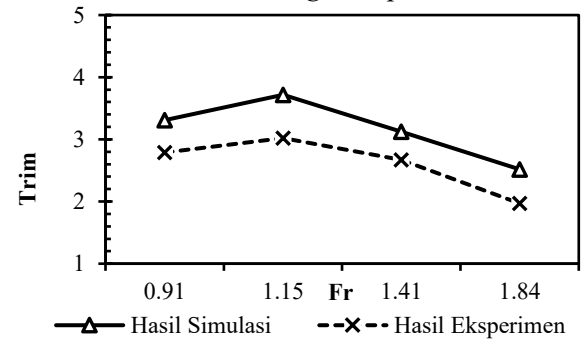
Gambar 9. Grafik Hambatan Eksperimen dan CFD

Hasil dari simulasi pada Gambar 9 menunjukkan, bahwa karakteristik hasil simulasi yang sama, seperti hasil penelitian oleh Taunton, dkk.[10], yang mana koreksi nilai *error*-nya di bawah 5% di setiap simulasi. Nilai *error* paling tinggi pada proses validasi ini, yakni sebesar 3.32% pada kecepatan 6.23 m/s (Fr 1.41). Sebagian besar hasil simulasi menghasilkan aliran

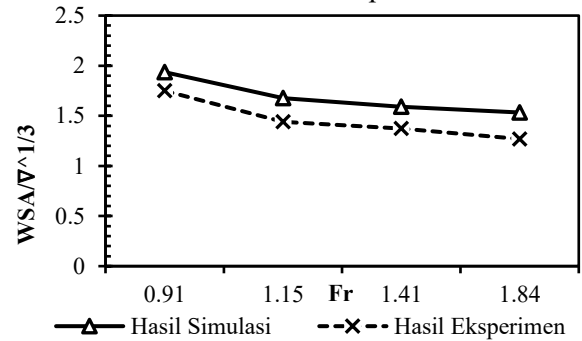
campuran di bawah lambung kapal yang menyebabkan prediksi hambatan tidak akurat [16].



Gambar 10. Grafik *Sinkage* Eksperimen dan CFD



Gambar 11. Grafik *Trim* Eksperimen dan CFD



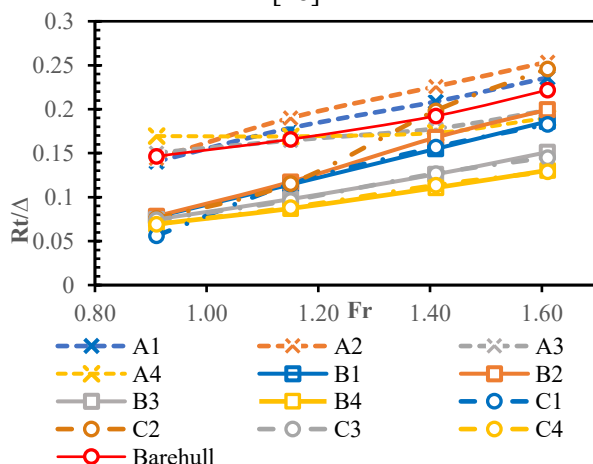
Gambar 12. Grafik *WSA* Eksperimen dan CFD

Berdasarkan validasi yang dilakukan menunjukkan, bahwa meskipun hasilnya tidak sempurna, tetapi masih dapat diterima. Perbandingan pola grafik dan visualisasi aliran berdasarkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4. 7, **Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., dan Error! Reference source not found.** dengan hasil pola simulasi yang sama. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Samuel, et.al hasil simulasi *trim* dan *heave* memiliki *error* yang cukup besar dibanding hasil eksperimen, tetapi memiliki pola tren grafik yang sama [16]. Validasi hasil *trim* dan *sinkage* di namis merupakan hal yang cukup menantang, seperti penelitian yang sudah pernah dilakukan oleh Dashtimanesh, et.al yang menunjukkan hasil simulasi dan eksperimen pada *trim* dan *sinkage* memiliki koreksi yang cukup tinggi, namun memiliki pola yang sama [17].

Hasil validasi menunjukkan terdapat kesalahan yang cukup besar yang disebabkan oleh proses input nilai momen inersia secara otomatis. Berdasarkan validasi yang sudah dilakukan, terlihat nilai *sinkage* pada simulasi yang lebih rendah dan nilai *trim* lebih tinggi dibandingkan dengan hasil eksperimen, maka didapatkan nilai WSA yang diperoleh dari simulasi menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan hasil eksperimen. Akan tetapi, penulis tetap melanjutkan penelitian dan fokus terhadap pengaruh posisi LCG dan VCG pada kapal *Planing Hull* pada hasil penelitian.

3.3. Hambatan Total Kapal

Hasil simulasi hambatan total pada kapal planing yang ada di Gambar 13 dengan variasi posisi LCG dan VCG menunjukkan bahwa nilai hambatan cenderung meningkat seiring bertambahnya kecepatan, yang mirip dengan karakteristik pada *barehull*. Hambatan total pada penelitian ini, meliputi hambatan gesek dan hambatan residual, yang mana pada hambatan residual terdiri dari *pressure* dan hambatan gelombang. Pengaruh posisi LCG terlihat cukup signifikan, perpindahan LCG +5% dan +10% menyebabkan kenaikan hambatan pada hampir semua kecepatan, pada keseluruhan variasi VCG. Sebaliknya, perpindahan LCG -5% dan -10% cenderung memberikan hambatan yang lebih rendah, khususnya pada kecepatan tinggi. Analisis hasil menunjukkan bahwa pergeseran LCG ke buritan menghasilkan penurunan hambatan karena trim *bow-up* berkurang, posisi VCG rendah membuat WSA lebih kecil. Hal ini konsisten dengan teori *planing hull* yang menyatakan bahwa sudut *trim* optimal berkorelasi langsung dengan efisiensi hidrodinamik [18].

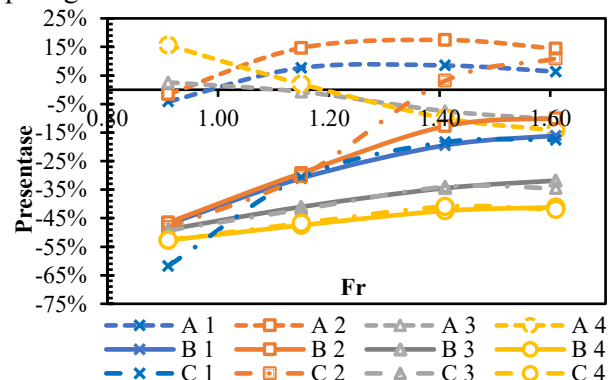


Gambar 13. Grafik Hambatan pada Semua Variasi

Pada grafik persentase perubahan hambatan total di Gambar 14, terlihat bahwa Model A4

mampu menurunkan hambatan hingga sekitar 20% pada *froude number* 1.41 dan 1.61. Posisi LCG -5% memberikan pengurangan sekitar 10-15% pada kecepatan yang sama, namun pada *froude number* 0.91 dan 1.15 pengaruhnya tidak terlalu signifikan. Sebaliknya, Model A1 dan A2 justru meningkatkan hambatan masing-masing sekitar 10% dan 20%. Sedangkan, untuk Model B3 dan B4, memberikan efek pengurangan hambatan yang jauh lebih besar dibandingkan Model A. Model B4 mampu mengurangi hambatan hingga sekitar 55-60% pada *froude number* 1.41 dan 1.61, sedangkan Model B3 memberikan pengurangan sekitar 30-40%. Sementara itu, Model B1 dan B2 tetap menambah hambatan, namun besarnya relatif kecil, yaitu sekitar 5-15%, jauh lebih rendah dibandingkan pada Model A.

Model C dengan VCG 8% menunjukkan bahwa konfigurasi LCG ke buritan paling stabil dalam menurunkan hambatan. Model C4 konsisten memberikan reduksi sekitar 52% pada *froude number* 0.91, menurun menjadi 40% pada *froude number* 1.15, dan tetap berada di kisaran 30-32% pada *froude number* 1.41-1.61. Pada *froude number* 0.91 penurunan maksimum justru dicapai oleh Model C1 sebesar 60%, namun manfaatnya berangsur menyusut hingga sekitar 20% di *froude number* 1.61. Kondisi paling tidak menguntungkan terjadi pada Model C2 semula masih memberikan reduksi 45% di *froude number* 0.91, lalu melemah mendekati 0% di *froude number* 1.41 dan berbalik positif pada *froude number* 1.61. Temuan ini menegaskan bahwa pada VCG rendah, penempatan LCG ke buritan -5% dan -10% menghasilkan nilai hambatan yang paling efisien.



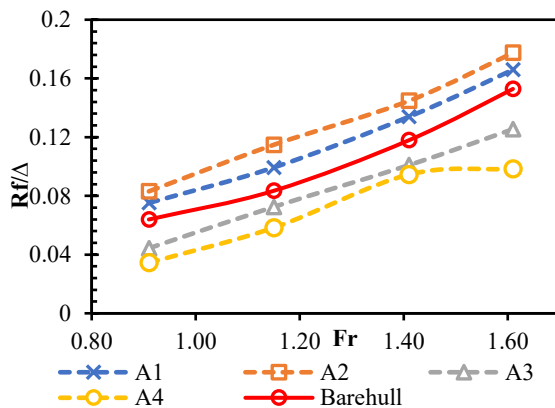
Gambar 14. Presentase Hambatan pada Semua Variasi

3.4. Hambatan Gesek dan Hambatan Residual

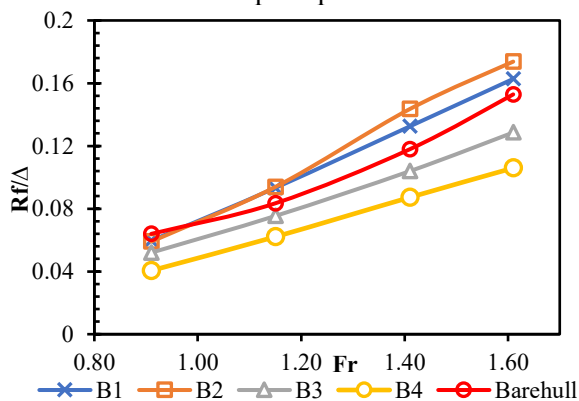
Hasil analisis pada Gambar 15 grafik menunjukkan, Model A1 memiliki hambatan gesek yang lebih tinggi dari *barehull* sedangkan Model A2 nilai hambatan gesek paling besar di

semua kecepatan. Gambar 16 Model B1 dan terutama B2, nilai hambatan gesek menjadi yang paling besar di semua *froude number*. Sebaliknya, pada model B3 dan B4, hambatan gesek turun dan menjadi yang paling kecil. Gambar 17 Model C pada *froude number* 0.91 seluruh variasi LCG masih berada di bawah *barehull*, sedangkan pada *froude number* 1.15, 1.41, dan 1.61 variasi LCG +5% dan +10% hambatan gesek meningkat, variasi LCG -5% dan -10% menurunkan hambatan gesek. Gambar 4.21 menampilkan kontur *Wall Shear X*, yang menunjukkan LCG -5% dan -10% memiliki hambatan gesek yang kecil dibanding LCG +5% dan +10%.

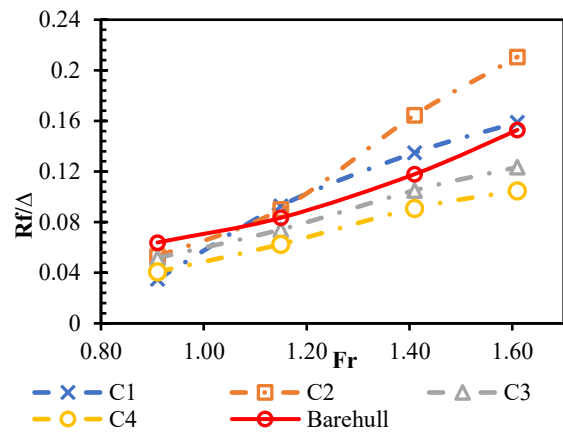
Gambar 18 menampilkan kontur *Wall Shear X*, yang menunjukkan LCG -5% dan -10% memiliki hambatan gesek yang kecil dibanding LCG +5% dan +10%.



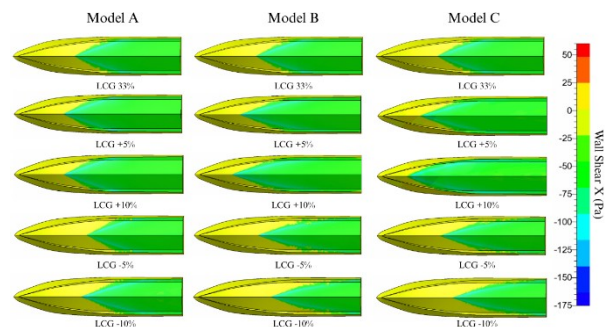
Gambar 15. Hasil Hambatan Gesek pada Model A Terhadap Displacement



Gambar 16. Hasil Hambatan Gesek pada Model B Terhadap Displacement

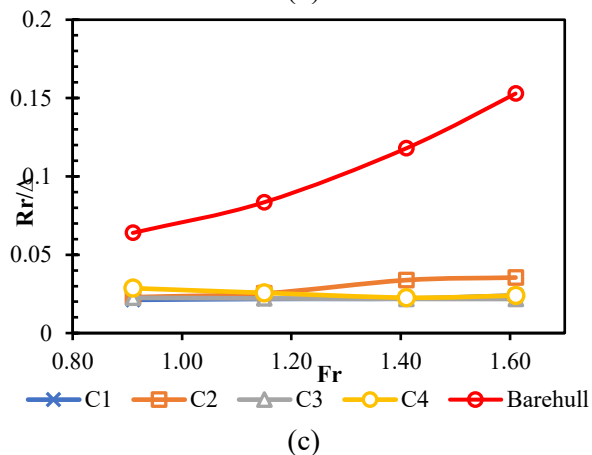
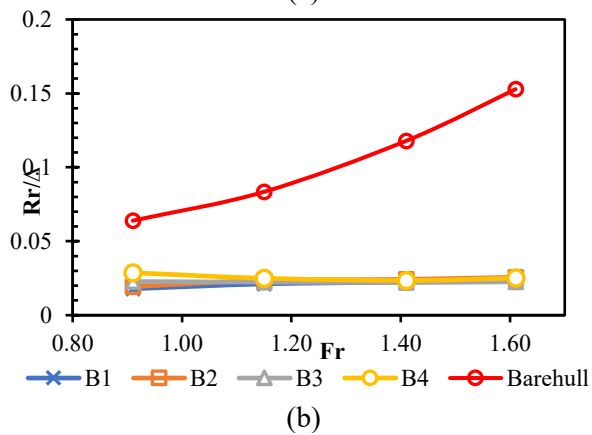
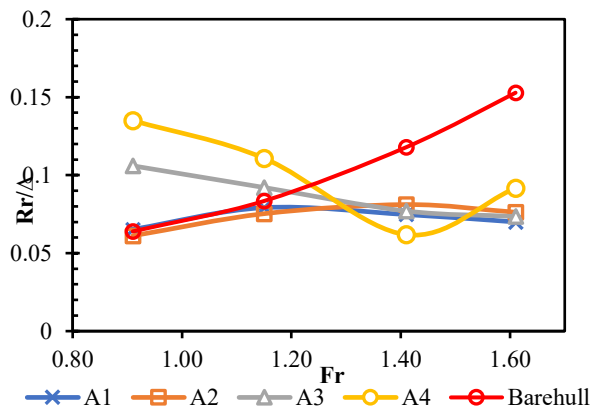


Gambar 17. Hasil Hambatan Gesek pada Model C Terhadap Displacement



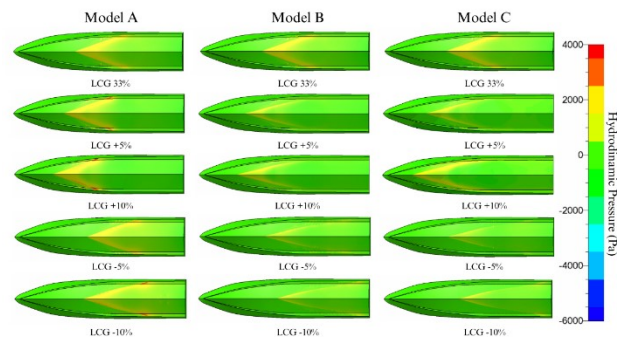
Gambar 18. *Wall Shear X* pada Fr 1.41

Di sisi lain, analisis dari Gambar 19 mengenai hasil hambatan residual. Posisi VCG sangat mempengaruhi hambatan residual, pada Model A di *froude number* 0.91 dan 1.15 pergeseran LCG ke -5% dan -10% cenderung menaikkan hambatan residual, tapi di *froude number* 1.41 menurun. Hal ini terjadi karena pada kecepatan rendah kapal terlalu *trim* kebelakang dengan LCG -10% dan VCG 24% yang menaikkan hambatan residual, sedangkan ketika kapal sudah pada kecepatan tinggi hambatan residual menurun karena *trim* pada posisi yang baik. Pada Model B dan VCG 8% memiliki nilai hambatan residual yang lebih rendah daripada *barehull* ini terjadi karena pada posisi VCG yang rendah membuat *trim* stabil. Hambatan residual dipengaruhi oleh distribusi tekanan sepanjang dasar kapal. Pada Model C, tekanan maksimum di buritan menurun dibanding VCG tinggi 24%, sehingga *pressure drag* berkurang signifikan.



Gambar 19. Hasil Hambatan Residual (a) Model A (b) Model B (c) Model C

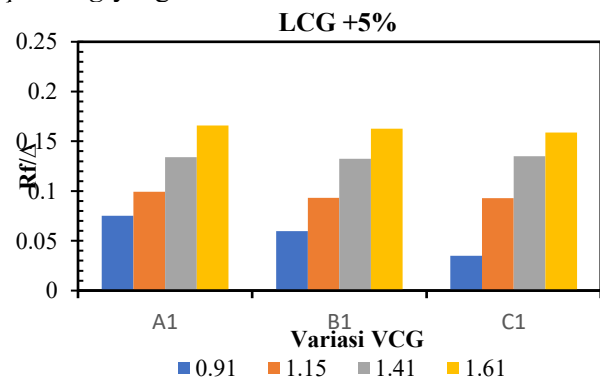
Visualisasi *pressure* pada Gambar 20 menunjukkan bahwa VCG 24% memiliki tekanan yang lebih tinggi daripada VCG 16% dan VCG 8%. Posisi LCG -5% dan -10% memiliki tekanan yang lebih rendah dibanding LCG +5% dan +10% bisa dilihat dari warna yang lebih merah di tengah lambung kapal.

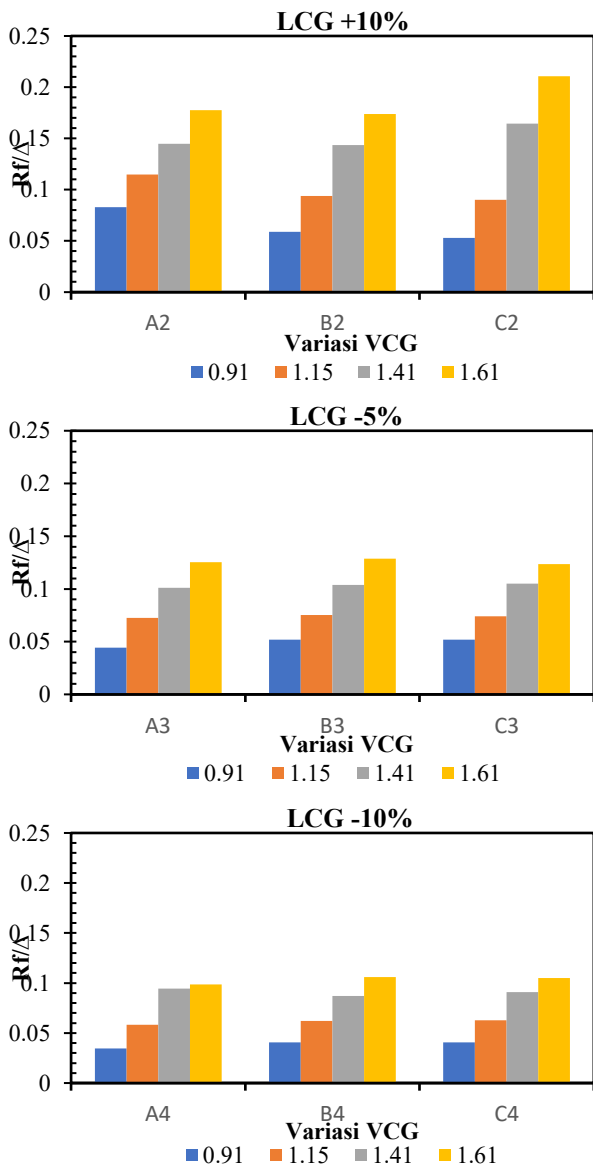


Gambar 20. *Hydrodynamic Pressure* di Fr 1.41

3.5. Pengaruh LCG dan VCG Terhadap Hambatan Gesek dan Residual

Gambar 21 menunjukkan pengaruh LCG dan VCG terhadap hambatan gesek. Posisi LCG -5% dan -10% memberikan nilai hambatan gesek yang lebih rendah daripada *barehull* karena pada saat posisi LCG tersebut haluan lebih terangkat dan mengurangi WSA. Posisi LCG +5% dan +10% membuat kapal mengalami *trim bow down* memperbesar WSA karena bagian haluan lebih dalam masuk ke air. Kondisi ini meningkatkan hambatan gesek. VCG 24% menghasilkan momen *pitching* besar sehingga *trim bow up* berlebih dan WSA meningkat, sedangkan penurunan VCG ke 16% dan terutama 8% mengurangi momen *pitching* sehingga sudut *trim* mendekati optimum, WSA mengecil, dan hambatan gesek menjadi yang terendah. Dengan demikian, LCG memengaruhi hambatan gesek melalui kecenderungan arah *trim*, sedangkan VCG mengatur besar kecilnya *trim* melalui momen *pitching* yang dihasilkan.



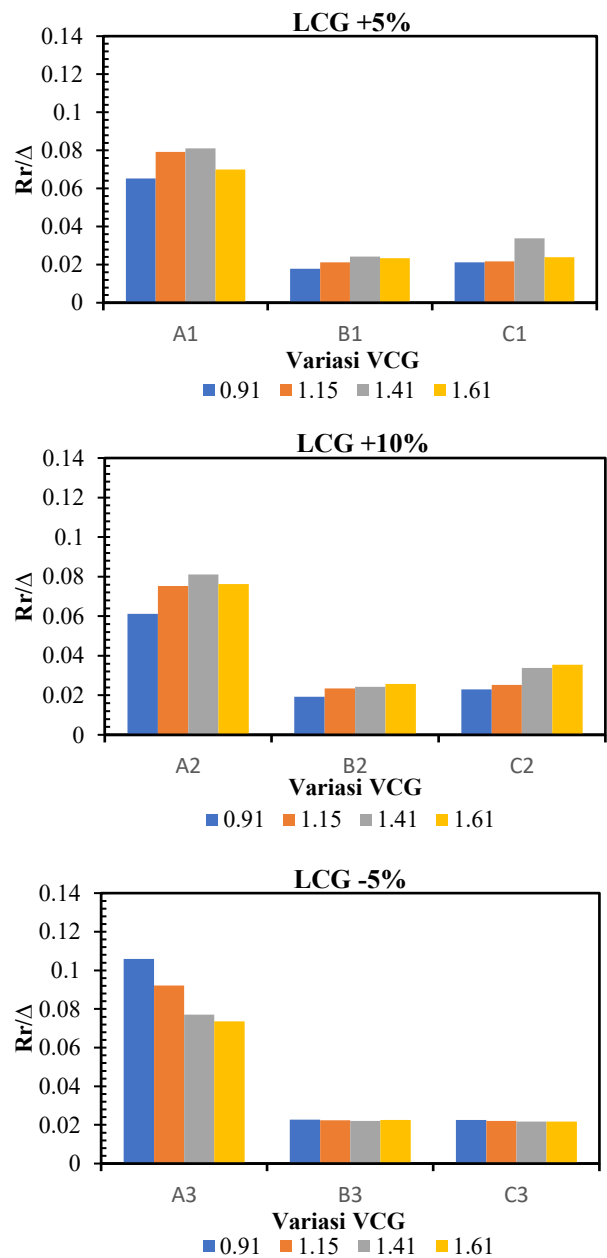


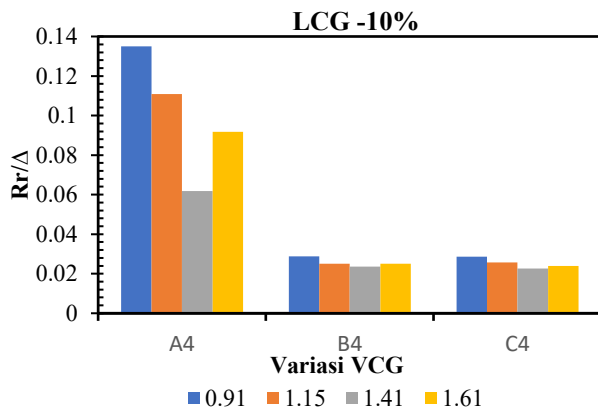
Gambar 21. Pengaruh LCG dan VCG Terhadap Hambatan Gesek

Hasil analisis pada Gambar 22 menunjukkan posisi LCG sangat mempengaruhi hambatan residual. Posisi LCG +5% dan +10% menghasilkan hambatan residual yang lebih rendah daripada *barehull* pada *froude number* 0.91 dan 1.15 namun menghasilkan nilai yang lebih tinggi daripada variasi posisi LCG -5% dan -10% ketika kecepatan bertambah di *froude number* 1.41 dan 1.61. Hal ini terjadi karena pada posisi LCG tersebut, kecepatan yang tinggi membuat haluan lebih tercelup air dan menghasilkan gelombang haluan besar.

Sebaliknya, posisi LCG -5% dan -10% menghasilkan hambatan residual yang tinggi di *froude number* 0.91 dan 1.15 dan menurun seiring bertambah kecepatan di *froude number* 1.41 dan 1.61. Karena pada *froude number* 1.41 dan 1.61 *trim* sudah pada kondisi yang baik. Pada VCG 24%, momen *pitching* besar sehingga kapal mengalami *trim bow up* yang berlebihan. Hal ini

memindahkan tekanan ke bagian belakang dan memperbesar gelombang serta pusaran di buritan, sehingga hambatan residual menjadi terbesar. Ketika VCG diturunkan menjadi 16%, *trim* menjadi lebih stabil dan gelombang tidak terlalu besar. VCG 8% memberikan kondisi terbaik karena tekanan air menyebar lebih merata, gelombang haluan kecil, dan aliran di belakang lebih bersih, sehingga hambatan residual menjadi paling rendah. Dengan kata lain, hambatan residual sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya *trim* dan seberapa stabil tekanan di sekitar lambung, yang dikendalikan oleh kombinasi LCG dan VCG.



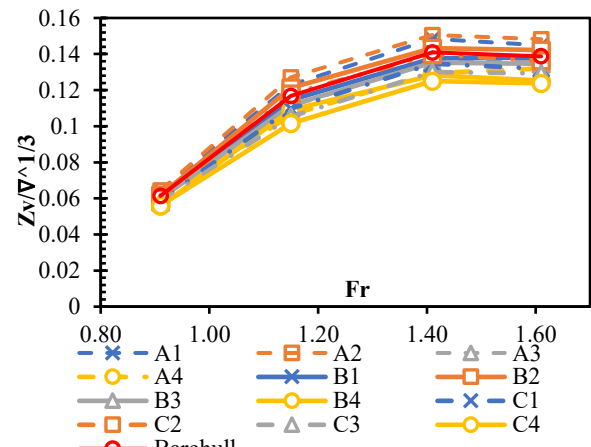


Gambar 22 Pengaruh LCG dan VCG Terhadap Hambatan Residual

3.6. Hasil Analisis *Sinkage*

Gambar 23 menunjukkan hasil *sinkage* pada seluruh konfigurasi meningkat dari *froude number* 0,91 hingga 1,41, kemudian cenderung stagnan atau sedikit menurun pada *Fr* 1,61. Pola ini mencerminkan transisi menuju kondisi planing, di mana pada fase praplaning peningkatan tekanan dinamis masih memperbesar *squat*, sedangkan pada fase transisi *planing* gaya angkat hidrodinamik mulai menyeimbangkan berat kapal sehingga *sinkage* tidak lagi bertambah signifikan. Sensitivitas terhadap LCG paling dominan pada VCG tinggi. LCG yang digeser ke haluan (+5% dan +10%) menghasilkan *sinkage* terbesar akibat kecenderungan bow down, sementara pergeseran LCG ke buritan (-5% dan -10%) secara konsisten menurunkan *sinkage*. Penurunan VCG menyebabkan tingkat *sinkage* absolut menurun dan memperkecil pengaruh variasi LCG, sehingga respons trim menjadi lebih stabil. Pada VCG terendah, perbedaan *sinkage* antar variasi LCG semakin moderat, meskipun konfigurasi LCG ke buritan tetap memberikan nilai *sinkage* terendah.

Secara keseluruhan, pengendalian *sinkage* paling efektif dicapai pada VCG 8% dan 16% dengan LCG -5% dan -10%, sedangkan LCG +10%, khususnya pada VCG 24%, secara konsisten meningkatkan *sinkage* pada seluruh rentang kecepatan yang dianalisis.



Gambar 23. Grafik *Sinkage* pada Semua Variasi

3.7. Hasil Analisis *Trim*

Hasil analisis *trim* dinamis pada Gambar 24 menunjukkan bahwa variasi LCG dan VCG berpengaruh langsung terhadap besarnya *trim* pada *planing hull*, di mana *trim* positif merepresentasikan kondisi bow up dan *trim* negatif menunjukkan bow down. Pada Model A, VCG 24% seluruh konfigurasi menghasilkan nilai *trim* relatif tinggi, menandakan sensitivitas momen longitudinal yang besar; LCG -10% memicu *bow up* berlebihan, sedangkan LCG +10% cenderung *bow down*. Seiring peningkatan kecepatan, nilai *trim* menurun akibat bertambahnya gaya angkat hidrodinamik.

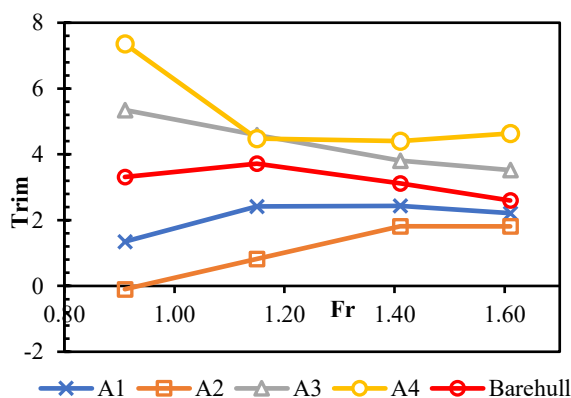
Pada Model B, VCG 16%, nilai *trim* menurun secara signifikan dan respons longitudinal menjadi lebih seimbang. LCG -10% masih menghasilkan *bow up* namun stabil, sementara LCG +10% mendekati kondisi *trim nol* yang mencerminkan keseimbangan optimal antara gaya angkat dan berat kapal. Pada Model C, konfigurasi VCG 8% menunjukkan kondisi paling stabil, dengan nilai *trim* kecil dan hampir konstan untuk seluruh variasi LCG; LCG -5% hingga -10% memberikan *bow up* ringan yang optimal, sedangkan LCG +10% hanya menimbulkan *bow down* ringan dalam batas aman.

3.8. Wetted Surface Area Kapal

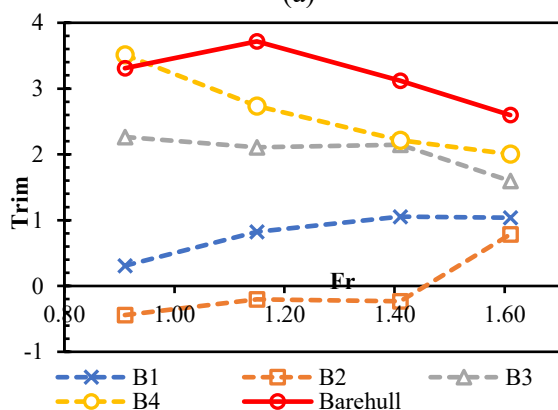
Berdasarkan Gambar 26 pada Model A WSA cenderung lebih besar dan sangat dipengaruhi oleh posisi LCG. LCG +10% mempertahankan WSA tertinggi pada seluruh *froude number*, LCG +5% sedikit lebih rendah tetapi masih di atas *barehull*. Sebaliknya, LCG yang dimundurkan -5% dan terutama -10% menurunkan WSA secara nyata. Pola ini konsisten dengan perubahan trim, LCG maju mendorong *bow down* dan memperpanjang bidang kontak di haluan, sedangkan LCG mundur sedikit mengangkat haluan sehingga bidang basah menyusut. Terdapat kenaikan lokal di sekitar *froude number* 1.41 pada LCG -10%, yang merefleksikan fase transisi *planing* ketika *patch spray* bergeser.

Sedangkan, Model B seluruh kurva WSA berada pada tingkat yang lebih rendah dibanding model VCG 24% untuk setiap *froude number*, nilai WSA antar variasi LCG terkonsentrasi dalam rentang yang sempit, perbedaan relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa pada VCG 16% perubahan posisi LCG hanya sedikit memengaruhi WSA dibandingkan pada VCG 24%. Pada Model C, seluruh kurva variasi LCG berada jauh di bawah *barehull* dan relatif datar terhadap *froude number*. LCG -10% konsisten menjadi yang terendah, diikuti LCG -5%, +5% dan +10% sedikit lebih tinggi namun tetap jauh lebih kecil daripada *barehull*. Hal ini menunjukkan bahwa pusat berat yang semakin rendah menahan perubahan *trim* dan meminimalkan bidang basah di semua kecepatan.

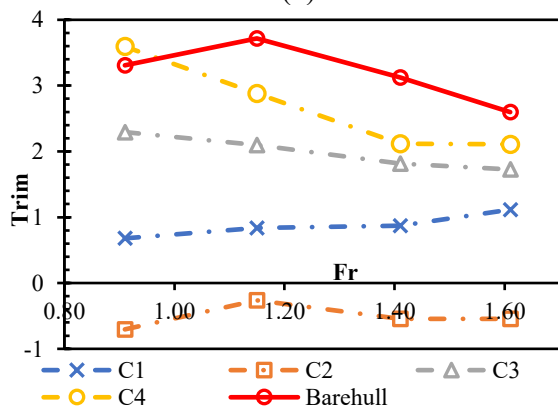
Karena hambatan gesek berbanding lurus dengan luas bidang basah, konfigurasi yang meminimalkan WSA juga cenderung menghasilkan hambatan total yang lebih kecil. Dari ketiga model, kombinasi VCG 8% dan 16% dengan LCG -5% dan -10% memberikan WSA paling rendah dan paling stabil pada semua kecepatan, sedangkan LCG +10% terutama pada VCG 24% mempertahankan WSA tertinggi dan berpotensi meningkatkan hambatan.



(a)

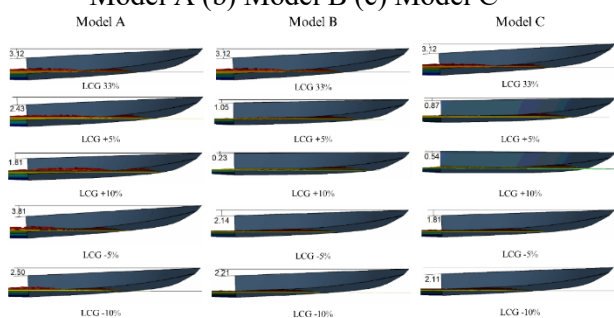


(b)

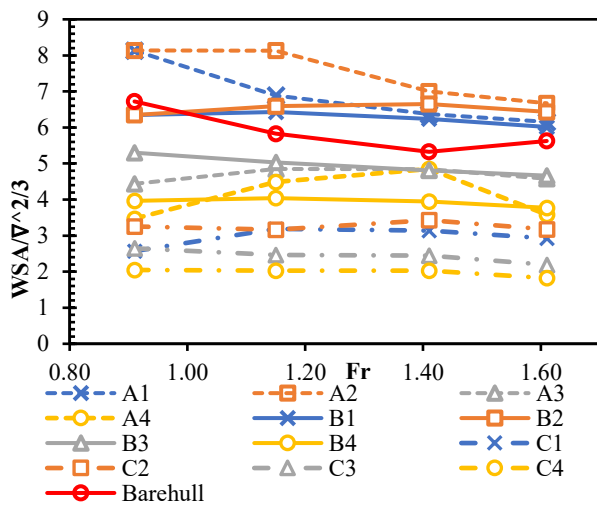


(c)

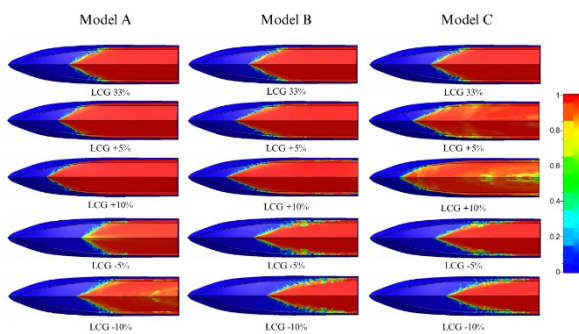
Gambar 24. Grafik Trim pada Semua Variasi (a) Model A (b) Model B (c) Model C



Gambar 25. Trim pada *Froude Number* 1.61 untuk Semua Variasi



Gambar 26. Grafik WSA pada Semua Variasi



Gambar 27. Mass Fraction pada Froude Number 1.61

4. KESIMPULAN

Telah dilakukan simulasi untuk menganalisis pengaruh posisi LCG dan VCG. Hasil yang dianalisis adalah hambatan, *trim*, *sinkage*, dan WSA. Kemudian untuk pengaturan CFD menggunakan metode *multi-fluid*, persamaan unsteady RANS.

Hasil utama penelitian memperlihatkan bahwa Perubahan posisi LCG dan VCG berpengaruh signifikan terhadap hambatan total kapal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa LCG +5% dan VCG 8% menghasilkan penurunan hambatan terbesar sebesar 61,74% pada Fr 0.91 dibandingkan *barehull*. Pada kecepatan lebih tinggi yaitu Fr 1.61, LCG -10% dan VCG 8% dan memiliki penurunan hambatan terbaik sebesar 41.92%. Seiring bertambahnya kecepatan, posisi VCG 8% secara konsisten memberikan hambatan lebih kecil dibanding VCG 16% dan 24%, karena tekanan dinamis dan WSA berkurang. Variasi LCG dan VCG juga memengaruhi sudut *trim* kapal. Pada kecepatan rendah Fr 0.91, LCG +5% dan VCG 8% menunjukkan *trim* paling kecil dan stabil, menandakan keseimbangan gaya angkat dan berat yang baik. Namun, pada kecepatan tinggi Fr 1.41 dan 1.61, LCG -5% dan -10% pada VCG 8% menghasilkan sudut *trim* yang optimal

dengan nilai 2° - 4° , yang merupakan rentang optimum kondisi *planing*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, "Safe, secure and efficient shipping on clean oceans," vol. 32, no. 2, pp. 207–221, 2014, doi: 10.5586/aa.1979.019.
- [2] IMO MEPC, "Initial IMO Strategy on reduction of GHG emission from ships. Resolution MEPC.304(72) (adopted on 13 April 2018)," *Mepc.304(72)*, vol. 304, no. April, pp. 1–12, 2018, [Online]. Available: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf).
- [3] L. N. Wang H, "Long-term potential for increased shipping efficiency through the adoption of industry-leading practices," no. July, p. 32, 2013.
- [4] W. Seok, S. Y. Park, and S. H. Rhee, "An experimental study on the stern bottom pressure distribution of a high-speed planing vessel with and without interceptors," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 12, pp. 691–698, 2020, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.08.003.
- [5] S. Samuel, O. Mursid, S. Yulianti, Kiryanto, and M. Iqbal, "Evaluation of Interceptor Design To Reduce Drag on Planing Hull," *Brodogradnja*, vol. 73, no. 3, pp. 93–110, 2022, doi: 10.21278/brod73306.
- [6] M. Michael, J.-T. Lim, N.-K. Im, and K.-C. Seo, "Empirical and Numerical Analyses of a Small Planing Ship Resistance using Longitudinal Center of Gravity Variations," *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, vol. 29, no. 7, pp. 971–979, 2023, doi: 10.7837/kosomes.2023.29.7.971.
- [7] A. Hajiabadi, R. Shafaghat, and H. Kazemi Moghadam, "A study into the effect of loading conditions on the resistance of asymmetric high-speed catamaran based on experimental tests," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 3, pp. 1713–1720, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.03.045.
- [8] M. L. Hakim *et al.*, "Optimizing Sensitive Weight Configurations on a Fast-Planing Vessel to Reduce Drag," *Evergreen*, vol. 11, no. 3, pp. 1919–1939, 2024, doi: 10.5109/7236842.
- [9] O. F. Sukas, O. K. Kinaci, F. Cakici, and M. K. Gokce, "Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids," *Appl.*

- Ocean Res.*, vol. 65, pp. 35–46, 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.03.015.
- [10] D. J. Taunton, D. A. Hudson, and R. A. Shenoi, “Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls – Part 1 Performance in,” *Int. J. Small Cr. Technol.*, vol. 152, pp. 55–57, 2010, doi: 10.3940/rina.ijst.2010.b2.96.
 - [11] ITTC, “Practical Guidelines for Ship CFD Applications,” *ITTC – Recomm. Proced. Guidel. ITTC*, pp. 1–8, 2011.
 - [12] R. N. Bilandi, A. Dashtimanesh, and S. Tavakoli, “Hydrodynamic study of heeled double-stepped planing hulls using CFD and 2D+T method,” *Ocean Eng.*, vol. 196, no. December 2019, p. 106813, 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106813.
 - [13] I. B. Celik, U. Ghia, P. J. Roache, C. J. Freitas, H. Coleman, and P. E. Raad, “Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications,” *J. Fluids Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 7, pp. 0780011–0780014, 2008, doi: 10.1115/1.2960953.
 - [14] M. Iqbal, M. Terziev, T. Tezdogan, and A. Incecik, “Hull form optimisation to minimise the total resistance and dynamic responses of small fishing vessels,” *Ocean Eng.*, vol. 321, no. December 2024, p. 120357, 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.120357.
 - [15] A. Fathuddiin and S. Samuel, “Meshing Strategi untuk Memprediksi Hambatan Total pada Kapal Planing Hull,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. September, 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.012.02.15.
 - [16] Samuel, D. J. Kim, A. Fathuddiin, and A. F. Zakki, “A Numerical Ventilation Problem on Fridsma Hull Form Using an Overset Grid System,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1096, no. 1, p. 012041, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1096/1/012041.
 - [17] A. Dashtimanesh, A. Esfandiari, and S. Mancini, “Performance prediction of two-stepped planing hulls using morphing mesh approach,” *J. Sh. Prod. Des.*, vol. 34, no. 3, pp. 236–248, 2018, doi: 10.5957/JSPD.160046.
 - [18] D. Savitsky, “Hydrodynamic Design of Planing Hulls.” Marine Technology, 1964.
 - [19] D. A. Molland, Anthony F., Turnock, Stephen R., Hudson, *SHIP RESISTANCE AND PROPULSION Second Edition*. 2017.