https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval

ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh *Stern Flap* terhadap Hambatan Total pada *Double Stepped Planing Hull* Menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamics*

Nathanael Petra Ardhana[1)], Kiryanto[2)], Ari Wibawa Budi Santosa[3)]
[1)]Laboratorium Hidrodinamika
Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
[*)]e-mail :nathanaelpetra@students.undip.ac.id

Abstrak

Kapal cepat menggunakan bentuk planing hull yang dirancang mencapai kecepatan tinggi di atas permukaan air. Saat kondisi planing, tekanan hidrodinamik menopang berat kapal dan menghasilkan gaya angkat yang mengurangi wetted surface area. Untuk memaksimalkan pemanfaatannya, diperlukan usaha peningkatan performa planing hull, salah satunya dengan penambahan appendage seperti stern flap. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh stern flap, dengan variasi panjang chord flap dan sudut flap, terhadap hambatan total, trim, dan sinkage pada model double stepped planing hull menggunakan metode Computational Fluid Dynamics. Finite Volume Method dengan persamaan Reynolds-Averaged Navier-Stokes dan model turbulensi k-ε untuk memprediksi aliran turbulensi di sekitar kapal, serta Volume of Fluid untuk memodelkan free surface. Hasil penelitian menunjukkan, Flap A dengan chord 0.5% Lpp dan sudut 0° mengalami pengurangan hambatan total terbesar, sebesar 8.97% pada Fn 2.07. Sebaliknya, Flap D1 dengan chord 2.0% Lpp dan sudut 1° meningkatkan hambatan total terbesar, sebesar 7.73% di Fn 1.61. Flap C dengan chord flap 1.5% Lpp dan sudut 0° menurunkan sudut trim di semua kecepatan dengan rata-rata penurunan sebesar 3.34% sekaligus mengurangi hambatan total dengan pengurangan rata-rata sebesar 0.91%. Perubahan nilai sinkage menunjukkan pola yang sama dengan perubahan sudut trim.

Kata Kunci : Planing Hull, Stern Flap, Hambatan, CFD

1. PENDAHULAN

Kapal cepat banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor, seperti komersial, pemerintahan, dan militer, karena keunggulannya dalam hal kecepatan. Kapal cepat menggunakan bentuk lambung *planing hull*, yang dirancang untuk mencapai kecepatan tinggi di atas permukaan air. Saat kondisi *planing*, tekanan hidrodinamik menopang berat kapal dan menghasilkan gaya angkat yang mengurangi *wetted surface area*. Seiring bertambahnya kecepatan, tekanan hidrodinamik lebih dominan dibanding tekanan hidrostatiknya, mengangkat lambung ke permukaan air, sehingga kapal bergerak dengan daya lebih rendah karena gesekan berkurang [1].

Untuk memaksimalkan pemanfaatan kapal cepat, perlu dilakukan upaya untuk meningkatkan performanya. Salah satu faktor yang memengaruhi performa kapal adalah hambatan, dengan mengurangi hambatan, performa kapal dapat ditingkatkan. Performa hambatan pada *planing hull* dipengaruhi secara signifikan oleh bentuk lambungnya, seperti sudut *deadrise* dan bentuk atau jumlah *chine*. Selain itu, penggunaan *appendages* juga dapat membantu mengurangi hambatan untuk mengoptimalkan performa *planing hull* [2]

Modifikasi bentuk lambung dengan *step hull* adalah salah satu metode untuk mengurangi hambatan pada *planing hull*. *Step hull* membagi bagian bawah lambung secara melintang, memisahkan *forebody* dan *afterbody*. Sehingga *keel afterbody* lebih tinggi daripada *keel forebody*, membentuk *step* (tingkatan) pada profil lambung. Pada kecepatan tinggi, aliran air di sekitar *step*

terpisah, sehingga mengurangi area basah dan hambatan berkurang [3].

Penelitian sebelumnya melakukan pengujian dengan *towing tank* pada beberapa seri model *hard chine planing hull* untuk mengetahui performanya. Penelitian ini menggunakan model *planing hull* yang sama, dengan penambahan *step hull*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *planing hull* dengan *step* menghasilkan hambatan total yang lebih rendah dibandingkan *planing hull* tanpa *step* pada kecepatan yang sama [4].

Selain modifikasi bentuk lambung *step hull*, penambahan *appendage* seperti *stern flap* juga dapat membantu dalam mengurangi hambatan. *Stern flap* merupakan penambahan berbentuk pelat yang dipasang ke transom, dengan parameter utama panjang *chord*, *span*, dan sudut *flap*. *Stern flap* mengurangi hambatan dengan memperlambat aliran air dan meningkatkan tekanan, serta mengoptimalkan trim melalui pembentukan gaya angkat di area transom [5].

Penelitian sebelumnya mengenai penerapan *stern flap* untuk meningkatkan kinerja hambatan pada *planing hull fridsma*, dengan variasi *span flap* dan sudut *flap*, menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian ini menunjukkan *stern flap* dengan *span flap* 58% dari lebar lambung dan sudut 0° efektif mengurangi total hambatan sebesar 10.2% serta *displacement* sebesar 18% [6].

Penelitian sebelumnya mengenai pengaruh *stern flap* terhadap kinerja hambatan dan propulsi pada *high-speed surface ship*, dengan variasi *chord flap*, *span flap*, dan sudut *flap*, menggunakan metode CFD, menunjukkan penambahan *stern flap* pada kapal cepat mengurangi hambatan total kapal sekitar 8% - 20%, dan juga meningkatkan kinerja propulsi dan menghemat energi 30% - 50%, serta mengurangi hambatan dengan memperbaiki pembentukan gelombang sehingga dapat menghemat energi 50% – 70% [7].

Penelitian sebelumnya mengenai pengaruh penambahan *stern flap* terhadap performa *fast boat* 60 meter, dengan variasi *chord flap* dan sudut *flap*, menggunakan metode CFD, menunjukkan *stern flap* dengan panjang *chord flap* 2% LPP dan sudut *flap* 9° dapat mengurangi hambatan total sebesar 5.53% dan mengurangi sudut trim pada kapal, dan mengurangi sudut trim sebesar 26.38% [8].

Penelitian sebelumnya memasangkan *stern flap* pada *planing hull* dengan modifikasi *step*. Pengujian *towing tank* dan simulasi CFD digunakan untuk mengetahui pengaruh sudut pemasangan *stern flap* pada performa *double stepped planing hull*. Hasil menunjukkan bahwa *step* menyebabkan pemisahan aliran seiring bertambahnya kecepatan, membuat area basah berkurang, sehingga terjadi pengurangan hambatan. Peningkatan sudut *flap* memperbaiki performa hambatan dan membantu menghambat pergerakan *porpoising*, serta mengurangi sudut trim dan mempercepat pemisahan aliran [9]

Berdasarkan uraian di atas, diketahui bahwa parameter geometri *stern flap* berpengaruh dan berperan terhadap peningkatan performa hambatan pada kapal, begitu juga pada *step hull*. Namun, pembahasan mengenai pengaruh variasi parameter geometri *stern flap* pada kapal *planing hull* dengan *step hull* cenderung belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini akan membahas pengaruh *stern flap* dengan variasi panjang *chord flap* dan besar sudut *flap* terhadap hambatan total, trim, dan *sinkage* pada *double stepped planing hull*. Penelitian ini menggunakan metode CFD dengan bantuan *software* Star-CCM+ dan *software* Rhinoceros untuk pemodelannya.

2. METODE

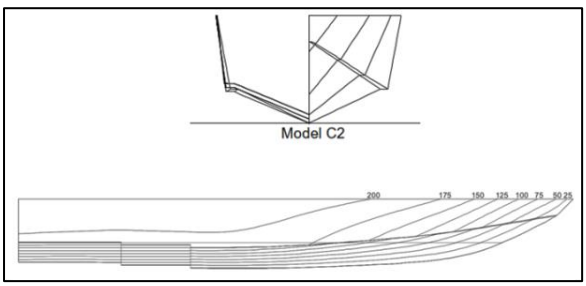
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan *stern flap*, dengan variasi panjang *chord flap dan* sudut pemasangan terhadap hambatan total, trim dan *sinkage* pada *double stepped planing hull* menggunakan simulasi CFD.

2.1. Objek Penelitian

Model *Hard Chine Planing Hull dengan double step hull* pada penelitian ini, diperoleh dari penelitian eksperimental sebelumnya. Skala model 1:7.5 dibanding ukuran kapal asli. Ukuran utama dan *lines plan* model kapal dijelaskan Tabel 1 dan Gambar 1 [10].

Tabel 1. Ukuran Utama *Model Double stepped Planing Hull*

Dimensi	Nilai	Unit
LOA	2.00	m
Breadth (B)	0.399	m
Draft (T)	0.0956	m
Δ	24.82	Kg
β (˚)	22.5	*degree*
LCG (%L)	0.33	%



Gambar 1. *Linesplan Model Double-Stepped Planing Hull*

2.2. Parameter Penelitian

Parameter tetap dan peubah dijelaskan Tabel 2 dan Tabel 3. Variasi panjang *chord* dan sudut *stern flap* berdasarkan rekomendasi rentang ukuran yang diberikan penelitian sebelumnya [11].

Tabel 2. Parameter Tetap

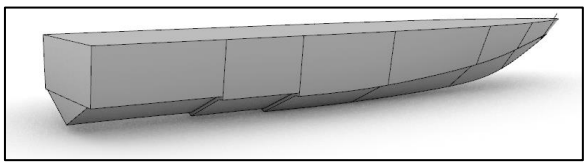
Parameter Tetap	Keterangan
Ukuran utama	Tabel 1
Lebar *Span flap*	100% B_T (Selebar *transom*)
Posisi *Stern Flap*	Mengikuti bentuk *transom*

Tabel 3. Parameter Peubah

Parameter Peubah	Keterangan
Chord flap	0.5%Lpp, 1.0%Lpp, 1.5%Lpp, dan 2.0%Lpp
Sudut *flap*	0° dan 1°
Kecepatan (*Froude number*)	1.41, 1.61, 1.84, 2.07, dan 2.29

2.3. Pemodelan Kapal

Pemodelan kapal berdasarkan ukuran utama dan *lines plan* pada Tabel 1 dan Gambar 1 menggunakan *software* Rhinoceros 6.0. Model dipastikan sudah solid atau tidak berlubang (*closed surface*) supaya dapat di-*import* ke *software* Star-CCM+ untuk selanjutnya dilakukan simulasi.



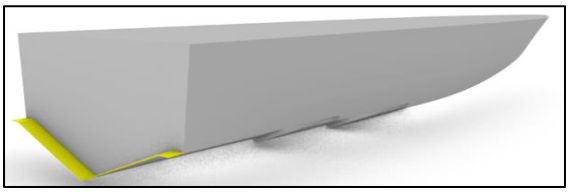
Gambar 2. Model 3D *Double Stepped Planing Hull*

2.4. Variasi Model Kapal

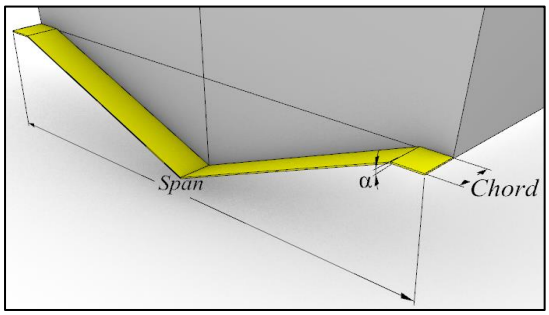
Berdasarkan Tabel 2 dan Tabel 3, diperoleh konfigurasi *stern flap* dengan detail pada Tabel 4. Pemasangan dan detail geometri *stern flap* dijelaskan oleh Gambar 3 dan Gambar 4.

Tabel 4. Variasi Konfigurasi *Stern Flap*

Konfigurasi	Sudut (α)	*Chord* (%Lpp)	Kecepatan (Fn)
Flap A	0°	0.5	1.41, 1.61, 1.84, 2.07, 2.29
Flap B	0°	1	
Flap C	0°	1.5	
Flap D	0°	2	
Flap A1	1°	0.5	
Flap B1	1°	1	
Flap C1	1°	1.5	
Flap D1	1°	2	
Total Variasi			40



Gambar 3. Pemasangan *Stern Flap* pada *Double Stepped Planing Hull*



Gambar 4. Parameter *Stern Flap* pada *Double Stepped Planing Hull*

2.5. Komputasi Numerik

Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik CFD dengan *software* Star-CCM+ untuk menghitung nilai hambatan total, trim dan *sinkage* kapal pada kondisi air tenang. Aliran air diasumsikan sebagai aliran *incompressible* dan turbulen. 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:

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

$$\frac{\partial(\rho\bar{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\bar{U}_i\bar{U}_j + \rho\overline{U_i'U_j'}) = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial\overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} \qquad (2)$$

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

Ui adalah komponen kecepatan rata-rata, $\bar{P}$ adalah tekanan rata-rata, ρ adalah massa jenis fluida, μ adalah viskositas efektif, $u'i$ adalah komponen kecepatan fluktuasi, $\rho\overline{Ui'Uj'}$ adalah *reynolds stress* dan τij adalah komponen tensor dari *viscous stress* (3).

Metode *Volume of Fluid* (VOF) digunakan untuk memodelkan *free surface* yang memisahkan fasa air dan udara disekitar kapal. Dalam VOF, dilakukan perhitungan fraksi volume dalam setiap volume kontrol (*cv*), $c = 1$ pada *cv* yang terisi air, $c = 0$ pada *cv* yang kosong (udara), dan $0 < c < 1$ menunjukkan *cv* berisi campuran air dan udara.

Berdasarkan persamaan kontinuitas, perubahan fraksi c terhadap waktu dinyatakan dengan persamaan (4) berikut:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla . (cv) = 0 \qquad (4)$$

Model *realizable k-ε* (epsilon) digunakan untuk menggambarkan aliran turbulen. Model turbulensi ini terdiri dari dua persamaan, yaitu energi kinetik turbulen (k) dan laju perubahan energi turbulen (ε) [12].

Penelitian ini menggunakan metode *overset mesh*, yang terdiri dari dua bagian, *background* (diam) dan *overset* (rotasi atau translasi seperti trim dan *sinkage*). Gerakan rotasi dan translasi diterapkan pada *overset*, yaitu mesh fluida digantikan *mesh body* kaku. Bentuk sel grid dipertahankan dan gerakan *mesh* dijelaskan melalui vektor *displacement* dan sudut rotasi. *Overset mesh* merupakan metode *donor-acceptor cell*, *background* sebagai *donor* dan *overset* sebagai *acceptor*. Sel-sel ini harus membentuk lapisan sel yang terus-menerus di sekitar *overset mesh*. Setiap sel *acceptor* mempunyai satu atau lebih sel *donor*, banyaknya tergantung opsi interpolasi yang dipilih dan jumlah sel aktif di wilayah *donor* di sekitar pusat sel *acceptor* [13].

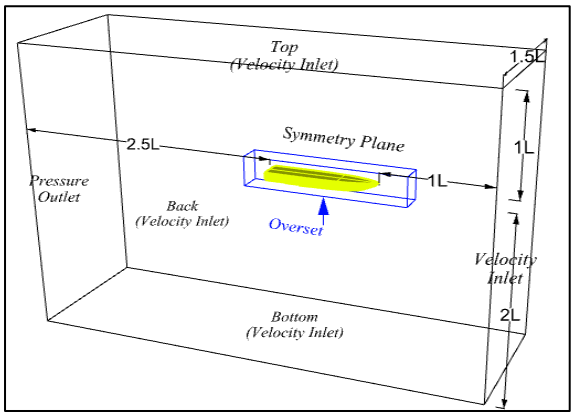
Sesuai standar ITTC (*International Towing Tank Conference*), diperlukan pembuatan *virtual towing tank* sebagai domain komputasi untuk simulasi numerik. Penelitian ini menggunakan dua domain yaitu *background* dan *overset*. Dimensi domain dan kondisi batas komputasi dijelaskan Tabel 5 dan Tabel 6, serta visualiasi ditunjukkan oleh Gambar 5.

Tabel 5. Dimensi Domain Komputasi

Parameter	***Background***	***Overset***
Length (m)	*1L from FP* *2.5L from AP*	*0.25L from FP* *0.25L from AP*
Height (m)	*1 L from deck* *2 L from keel*	*0.75H from Deck* *0.75H from keel*
Breadth (m)	*1.5 L from symmetry*	*1B from symmetry*

Tabel 6. Kondisi Batas Komputasi

Boundary	***Backgorund***	***Overset***
Top	*Velocity Inlet*	*Overset Mesh*
Bottom	*Velocity Inlet*	*Overset Mesh*
Inlet	*Velocity Inlet*	*Overset Mesh*
Outlet	*Pressure Outlet*	*Overset Mesh*
Back	*Velocity Inlet*	*Overset Mesh*
Symmetry	*Symmetry Plane*	*Symmetry Plane*
Half Model	-	*No-Slip Wall*

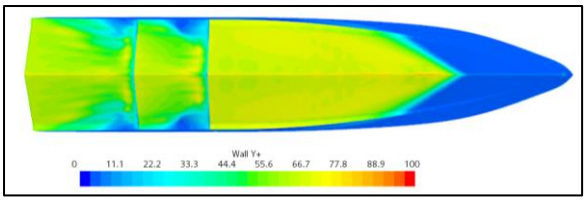


Gambar 5. Domain dan Kondisi Batas Komputasi

Wall function ($y+$) digunakan untuk mengurangi ketidakakuratan dalam perhitungan simulasi CFD. $Y+$ adalah jarak *non-dimensional* dinding (*wall*) dengan aliran fluida. $Y+$ menangkap *boundary layer* (*shear stress*) yang berperan penting dalam perhitungan hambatan. Perhitungan $y+$ berdasarkan ITTC ditunjukkan pada persamaan (5) berikut:

$$\frac{Y}{L} = \frac{y+}{R_e \sqrt{\frac{C_F}{2}}} \qquad (5)$$

Y sebagai tebal layer pertama, L sebagai panjang objek, *Re* sebagai *reynold number* dan *Cf* adalah estimasi dari koefisien gesek permukaan objek. Nilai $y+$ menurut rekomendasi ITTC adalah $30 < y+ < 100$. Penelitian ini menggunakan nilai $y+$ 55 sesuai dengan rekomendasi rentang yang diberikan [14].



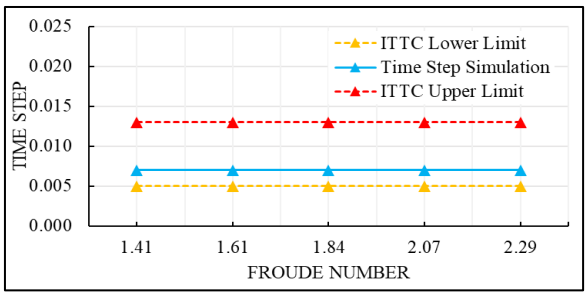
Gambar 7. $Y+$ pada Fn 1.84

Time step digunakan untuk mensimulasikan aliran *unsteady*. *Time step* adalah interval waktu antara setiap iterasi perhitungan. Penentuan *time step*, tergantung kecepatan kapal. Semakin cepat kapal, maka *time step* yang digunakan semakin kecil. Perhitungan *time step* berdasarkan ITTC ditunjukkan pada persamaan (6) berikut:

$$\Delta t = 0.005 \sim 0.01 \frac{L}{U} \qquad (6)$$

L adalah panjang kapal dan U adalah kecepatan kapal. Penelitian ini menggunakan nilai *time step* sesuai rekomendasi dari ITTC, yaitu

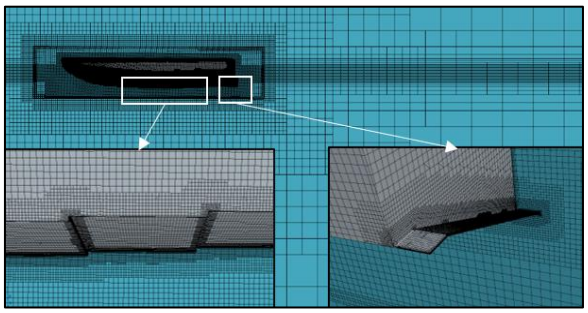
antara 0.005 – 0.013s, dengan nilai yang digunakan adalah 0.007s. Simulasi dijalankan hingga terjadi konvergensi, yaitu tercapainya kesetimbangan dinamis pada posisi vertikal [15].



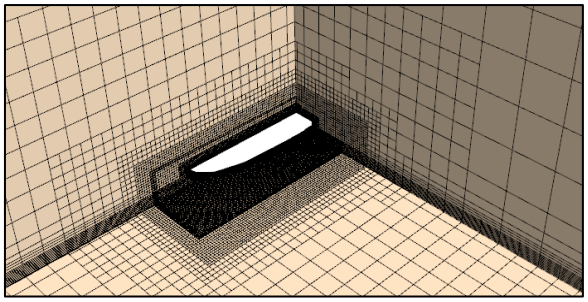
Gambar 6. *Time Step* Simulasi

Metode *mesh refirement* digunakan untuk mengatasi *Numerical Ventilation Problem* (NPV) yang sering terjadi dalam simulasi numerik, terutama *planing hull*. Hal ini terjadi karena pembentukan aliran campuran di bawah lambung, sehingga prediksi hambatan tidak akurat. *Mesh refirement* dapat menyelesaikan masalah ini dengan hasil yang baik [16].

Mesh Refinement dilakukan dengan mengatur konsentrasi *mesh* yang lebih tinggi pada area yang dianggap penting, seperti area haluan, lambung, buritan, area di sekitar lambung, *free surface* dan *wake field*. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi hasil simulasi. Simulasi hanya menggunakan setengah domain komputasi untuk mengurangi beban dan mempersingkat waktu komputasi. *Mesh refirement* penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. *Mesh Refirement Hull*, Area *Step*, dan *Stern flap*



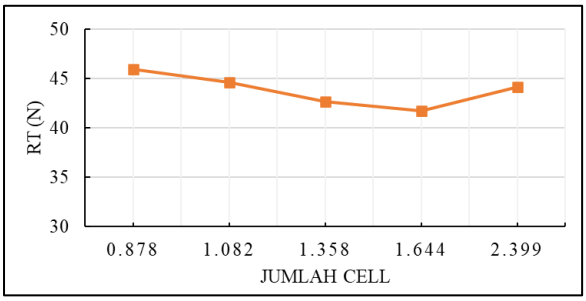
Gambar 9. *Mesh Refirement* Seluruh Area Sekitar *Hull*

2.6. *Grid Study*

Grid study dilakukan untuk menentukan ukuran *grid* atau *mesh* yang sesuai dan memastikan kestabilan (konvergensi) saat analisis. *Grid study* pada penelitian ini dilakukan dengan 5 (lima) kualitas *grid* yang berbeda, dari *very coarse* hingga *very fine*, menggunakan model *barehull* dan disimulasikan pada Fn 1.41.

Tabel 7. Hasil *Grid Study*

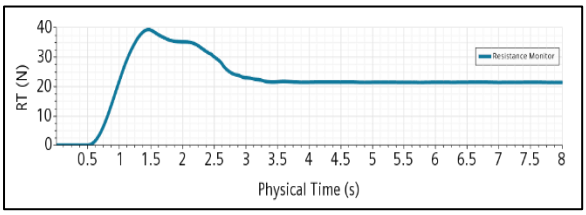
Mesh	***Quality Mesh***	***Base Size***	***Cell (Million)***	**RT (N)**	***Diff* (%)**
1	*Very Coarse*	0.113	0.878	45.93	6.18
2	*Coarse*	0.103	1.082	44.65	3.21
3	*Medium*	0.093	1.358	42.64	-1.44
4	*Fine*	0.083	1.644	41.77	-3.44
5	*Very Fine*	0.073	2.399	44.15	2.06



Gambar 10. *Grid Study* Hambatan Total pada Fn 1.41

Tabel 7 dan Gambar 10 menunjukkan kestabilan nilai seluruh *mesh*, dengan *Mesh 3* (*Medium*) dan *Mesh 5* (*Very Fine*) memberikan akurasi hasil hambatan total yang sama baiknya. Perbedaan hasil hambatan total setiap *mesh* kurang dari 10%, seperti pada penelitian sebelumnya. Penelitian ini menggunakan *Mesh 3* (*Medium*) untuk simulasi karena memberikan akurasi yang baik dengan waktu komputasi yang lebih optimal, dibandingkan dengan *Mesh 5*, yang memiliki jumlah elemen total lebih banyak, sehingga menambah waktu komputasi [17].

Grafik konvergensi *Mesh 3* (*Medium*) ditunjukkan pada Gambar 11. Grafik menunjukkan kestabilan nilai hambatan total setelah *physical time* 4 s dan tidak mengalami perubahan signifikan sampai simulasi berhenti di *physical time* 8 s.



Gambar 11. Konvergensi Hambatan Total *Mesh Medium* pada Fn 1.41

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Validasi Simulasi CFD

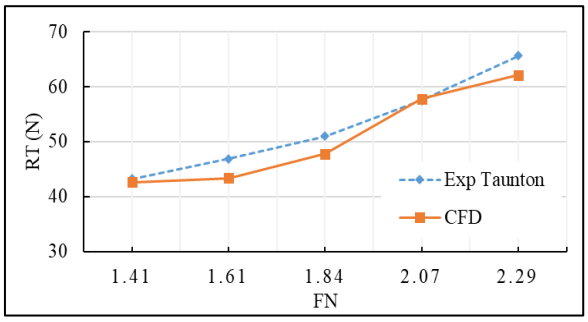
Validasi bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi CFD memiliki tingkat akurasi yang baik terhadap hasil eksperimen sebelumnya. Dalam penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan nilai hambatan total (RT), trim (τ), dan *sinkage* (Z) hasil simulasi CFD dengan hasil eksperimen sebelumnya. Validasi dilakukan pada kondisi air tenang di 5 (lima) kecepatan berbeda, yaitu Fn 1.41, 1.61, 1.84, 2.07, dan 2.29. Tingkat akurasi simulasi dihitung menggunakan persamaan (7) sebagai berikut:

$$Error\ \psi(\%) = \left|\frac{\psi\ CFD - \psi\ EXP}{\psi\ EXP}\right| \times 100 \qquad (7)$$

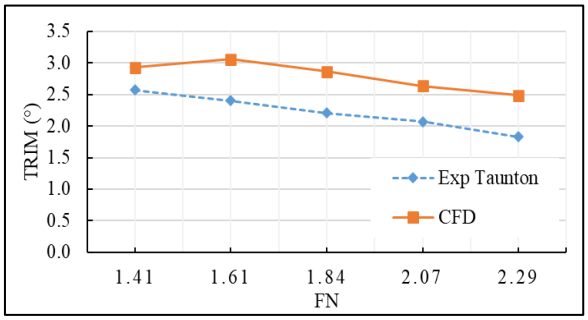
Error adalah perbedaan antara nilai CFD dan eksperimen, *CFD* adalah nilai simulasi, dan *EXP* adalah nilai eksperimen.

Tabel 8. Hasil Validasi Simulasi CFD Terhadap Eksperimen

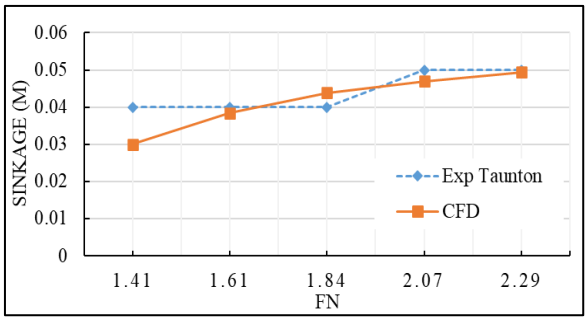
Fn	Eksperimen			Simulasi CFD			*Error* (%)		
	RT (N)	τ (˚)	Z (m)	RT (N)	τ (˚)	Z (m)	RT (N)	τ (˚)	Z (m)
1.41	43.26	2.57	0.04	42.64	2.93	0.03	-1.44	13.97	-25.09
1.61	46.89	2.40	0.04	43.36	3.06	0.04	-7.53	27.46	-3.82
1.84	51.01	2.21	0.04	47.82	2.86	0.04	-6.26	29.57	9.67
2.07	57.52	2.07	0.05	57.81	2.64	0.05	0.51	27.43	-6.02
2.29	65.62	1.83	0.05	62.13	2.49	0.05	-5.32	35.87	-1.17



Gambar 12. Grafik Validasi Hambatan Total Simulasi CFD Terhadap Eksperimen



Gambar 13. Grafik Validasi Trim Simulasi CFD Terhadap Eksperimen



Gambar 14. Grafik Validasi *Sinkage* Simulasi CFD Terhadap Eksperimen

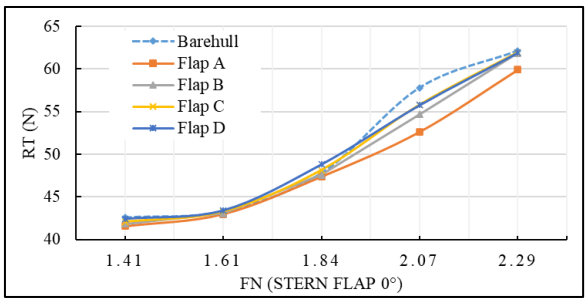
Berdasarkan Tabel 8, diketahui nilai *error* hambatan total di semua kecepatan telah memenuhi kriteria penelitian ini, yaitu tidak lebih dari ± 10%. *Error* terkecil pada hambatan total terjadi di Fn 2.07 sebesar 0.51%, sedangkan *error* terbesar terdapat di Fn 1.61 sebesar -7.53%. Hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan data seri model kapal serupa dengan *satu step hull*, yang mendapatkan rata-rata *error* hambatan total sekitar 10% [18].

Nilai *error* untuk trim dan *sinkage* tidak sebaik nilai *error* hambatan total. *Error* trim terkecil terjadi di Fn 1.41 sebesar 13.97%, sedangkan yang terbesar di Fn 2.29 sebesar 35.87%. Untuk *sinkage*, *error* terkecil terjadi di Fn 2.29 sebesar -1.17%, sedangkan yang terbesar di Fn 1.41 sebesar -25.09%. Namun, Gambar 12 – 14 menunjukkan grafik data hambatan total, trim, dan *sinkage* dari simulasi cenderung memiliki pola yang mirip dengan hasil eksperimen, yaitu hambatan total semakin meningkat dari Fn 1.41 – 2.29, penurunan sudut trim dari Fn 1.61 – 2.29 dan kenaikan nilai *sinkage* dari Fn 1.41 – 2.29. Hasil yang serupa terjadi dalam simulasi CFD pada penelitian sebelumnya yang menggunakan data seri model kapal *double stepped hull* dan kecepatan yang sama. Berdasarkan hal ini, hasil simulasi dapat dianggap valid dan dapat digunakan dalam penelitian ini [19].

3.2. Analisis Hambatan Total

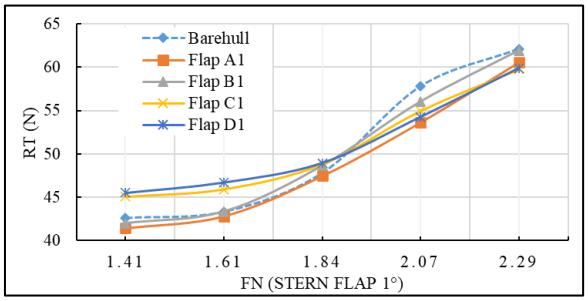
Pembahasan mengenai hambatan total pada *planing hull* dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software* Star-CCM+. Analisis hambatan total termasuk

komponennya, yaitu hambatan gesek (*shear*) dan hambatan tekanan (*pressure*). Perubahan trim dan *sinkage* pada *planing hull* setelah penambahan *stern flap* juga dianalisis.



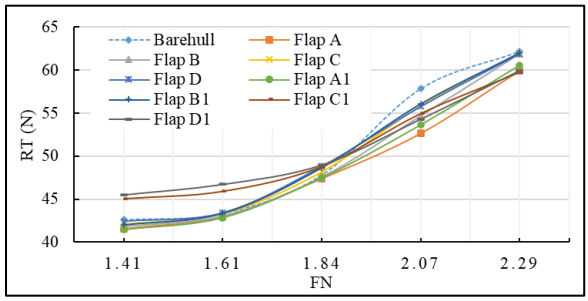
Gambar 15. Grafik Hambatan Total Konfigurasi *Stern Flap* Sudut 0°

Gambar 15 adalah grafik data hasil simulasi CFD hambatan total *stern flap* dengan sudut 0° dan variasi *chord flap* di semua kecepatan. Konfigurasi *stern flap* dengan sudut 0° cenderung menunjukkan pengurangan hambatan total. Hasil nilai hambatan total cenderung meningkat seiring bertambahnya panjang *chord flap*. Konfigurasi *Flap* A dan *Flap* B menunjukkan pengurangan hambatan total di semua kecepatan, dengan pengurangan terbesar terjadi pada *Flap* A di Fn 2.07, sebesar 8.97%. Pada *Flap* C, terdapat sedikit penambahan hambatan total di Fn 1.61, sebesar 0.68%. Sementara itu, pada *Flap* D, penambahan hambatan total terjadi di Fn 1.61 sebesar 0.09%, dan yang terbesar terjadi di Fn 1.84 sebesar 2.04%.



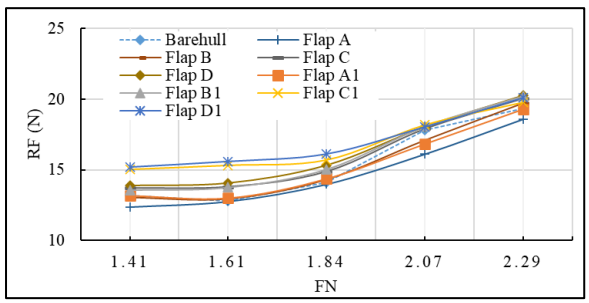
Gambar 16. Grafik Hambatan Total Konfigurasi *Stern Flap* Sudut 1°

Gambar 16 adalah grafik data hasil simulasi CFD hambatan total *stern flap* dengan sudut 1° dan variasi *chord flap* di semua kecepatan. Pola grafik pada sudut 1° mirip dengan sudut 0°, yaitu hambatan total cenderung meningkat seiring bertambahnya panjang *chord flap*, sehingga pada sudut ini terdapat penambahan hambatan total. Konfigurasi *Flap* A1 mengurangi hambatan total di semua kecepatan, dengan pengurangan terbesar terjadi di Fn 2.07, sebesar 7.23%. Pada *Flap* B1, terjadi penambahan hambatan total di Fn 1.84 sebesar 1.72%, namun secara keseluruhan masih mengurangi hambatan total. Sebaliknya, *Flap* C1 dan *Flap* D1 mengalami penambahan hambatan total di Fn 1.41 – 1.84, menunjukkan kedua konfigurasi ini kurang efektif di kecepatan tersebut, dengan penambahan terbesar terjadi pada *Flap* D1 di Fn 1.61 sebesar 7.73%. Meskipun terdapat pengurangan di Fn 2.07 – 2.29, secara keseluruhan kedua konfigurasi ini menambah hambatan total.



Gambar 17. Grafik Hambatan Total Semua Konfigurasi *Stern Flap*

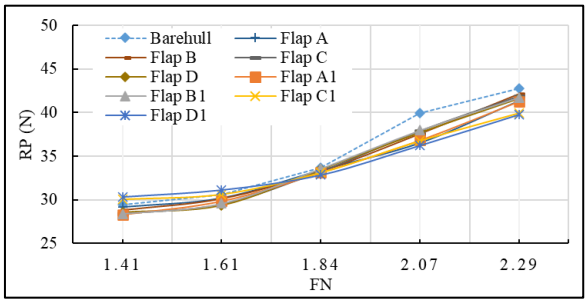
Gambar 17 adalah grafik data hambatan total semua konfigurasi *stern flap*. Hasil simulasi menunjukkan variasi geometri *stern flap* berpengaruh terhadap nilai hambatan total. Pada sudut *flap* yang sama, semakin panjang *chord flap*, hambatan total meningkat. Contohnya, rata-rata pengurangan hambatan total pada *Flap* A di semua kecepatan sebesar 3.37%, sedangkan pada *Flap* D sebesar 0.46%. Selain itu, pada panjang *chord flap* yang sama, semakin besar sudut *flap*, hambatan total meningkat. Contohnya, rata-rata pengurangan hambatan total pada *Flap* A sebesar 3.37%, sedangkan pada *Flap* A1 sebesar 2.90%. Secara keseluruhan pada penelitian ini, semakin panjang *chord flap* dan semakin besar sudut *flap*, nilai hambatan total yang dihasilkan cenderung semakin besar. Hal serupa terjadi pada penelitian sebelumnya [20].



Gambar 18. Grafik Hambatan Gesek Semua Konfigurasi *Stern Flap*

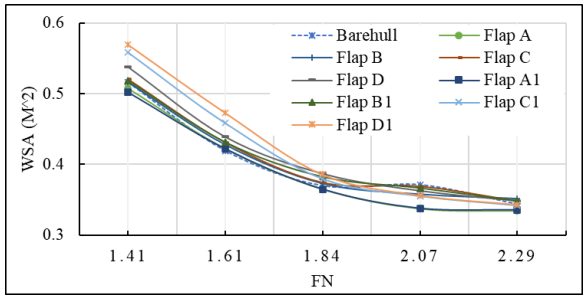
Gambar 18 adalah grafik data hasil simulasi hambatan gesek semua konfigurasi *stern flap*. Hambatan gesek bekerja secara tangensial terhadap lambung. Data menunjukkan sebagian besar konfigurasi *stern flap* mengalami penambahan

hambatan gesek di semua kecepatan. Penambahan hambatan gesek terbesar terjadi pada konfigurasi *Flap* D1 di Fn 1.61, sebesar 21.78%. Selain itu, terdapat juga pengurangan hambatan gesek yang terjadi pada *Flap* A, dengan pengurangan terbesar 9,62% di Fn 2.07. Pola grafik menunjukkan kemiripan dengan hambatan total, yaitu seiring bertambahnya kecepatan, hambatan juga semakin bertambah.



Gambar 19. Grafik Hambatan Tekanan Semua Konfigurasi *Stern Flap*

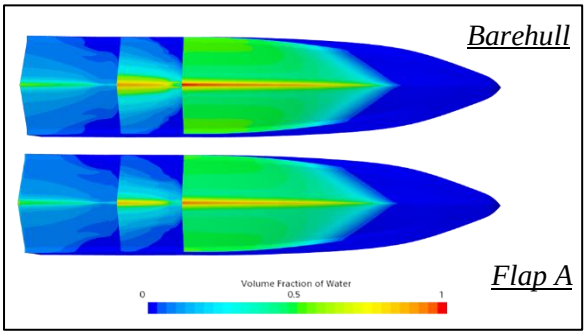
Gambar 19 adalah grafik data hasil simulasi CFD hambatan tekanan semua konfigurasi *stern flap*. Pola grafik menunjukkan kemiripan dengan hambatan total dan hambatan gesek, yaitu seiring bertambahnya kecepatan, hambatan juga ikut meningkat. Hambatan tekanan lebih dominan dibandingkan hambatan gesek. Data menunjukkan sebagian besar konfigurasi *stern flap* cenderung mengurangi hambatan tekanan. Pengurangan hambatan tekanan terbesar terjadi pada konfigurasi *Flap* A di Fn 2.07 sebesar 8.68%. Selain itu, terdapat juga penambahan hambatan tekanan terbesar terjadi pada *Flap* D1 di Fn 1.41 sebesar 2.99%.



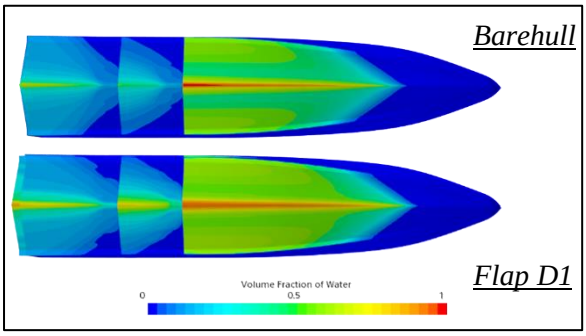
Gambar 20. Grafik WSA Semua Konfigurasi *Stern Flap*

Konfigurasi *stern flap* memengaruhi hambatan total, salah satunya karena perubahan nilai area permukaan basah atau *wetted surface area* (WSA) yang terjadi. Perubahan WSA memengaruhi komponen hambatan total, yaitu pada hambatan gesek. Semakin besar WSA mengakibatkan hambatan gesek yang dihasilkan juga semakin besar. WSA memengaruhi hambatan tekanan dan pembentukan gelombang. Gambar 20 grafik data perubahan WSA semua konfigurasi *stern flap*. Pola grafik menunjukkan semakin bertambahnya kecepatan, WSA yang dihasilkan semakin menurun. Data menunjukkan pengurangan nilai WSA terbesar terjadi pada konfigurasi *Flap* A di Fn 2.07 sebesar 9.11%. Sebaliknya, penambahan nilai WSA terbesar terjadi pada *Flap* D1 di Fn 1.61 sebesar 12.84%.

Gambar 21 dan Gambar 22 menunjukkan contoh perubahan WSA yang dipengaruhi oleh variasi konfigurasi *stern flap*. Pada konfigurasi *Flap* A, terlihat distribusi permukaan basah pada area setelah *transverse step* 1 dan *transverse step* 2 yang sedikit mengalami pengurangan. Sedangkan, pada konfigurasi *Flap* D1 menunjukkan terdapat penambahan distribusi permukaan basah pada area *forebody* dan setelah *transverse step* 1 serta *transverse step* 2.

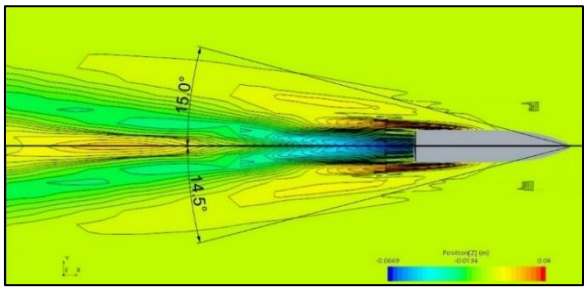


Gambar 21. Perbandingan WSA *Barehull* dan *Flap* A di Fn 2.07



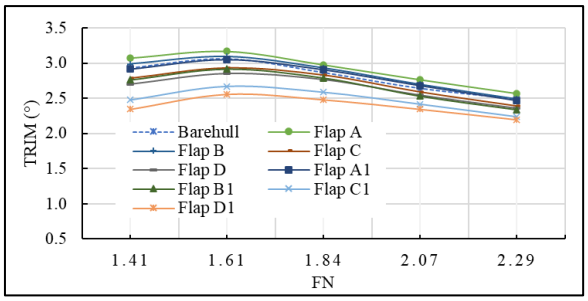
Gambar 22. Perbandingan WSA *Barehull* dan *Flap* D1 di Fn 1.61.

Perbedaan konfigurasi *stern flap* menunjukkan bahwa *chord flap* dan sudut *flap* yang lebih kecil menghasilkan nilai WSA yang lebih kecil, sehingga hambatan gesek yang dihasilkan juga lebih kecil dibandingkan dengan *chord flap* dan sudut *flap* yang lebih besar. Area pembentukkan gelombang sedikit mengalami pengurangan pada konfigurasi dengan *chord flap* dan sudut yang lebih kecil, mengindikasikan hambatan tekanan yang dihasilkan juga cenderung lebih kecil dibandingkan dengan *chord flap* dan sudut *flap* yang lebih besar.



Gambar 23. Perbandingan *Wave Pattern Barehull* dan *Flap* A di Fn 2.07

3.3. Analisis Trim



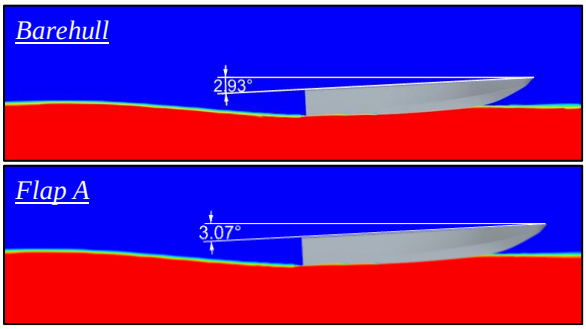
Gambar 24. Grafik Trim Semua Konfigurasi *Stern Flap*

Pemasangan konfigurasi *stern flap* memengaruhi trim dan *sinkage* kapal, yang juga berdampak pada hambatan total. Penurunan sudut trim yang terlalu besar dapat menyebabkan peningkatan *wetted surface area* (WSA), sehingga hambatan total meningkat. Oleh karena itu, *stern flap* yang ideal adalah yang dapat mengurangi sudut trim tanpa meningkatkan hambatan total secara signifikan. Gambar 24 menampilkan grafik data perubahan trim untuk semua konfigurasi *stern flap*. Grafik menunjukkan pola kenaikan sudut trim dari Fn 1.41 – 1.61, kemudian menurun seiring bertambahnya kecepatan hingga Fn 2.29.

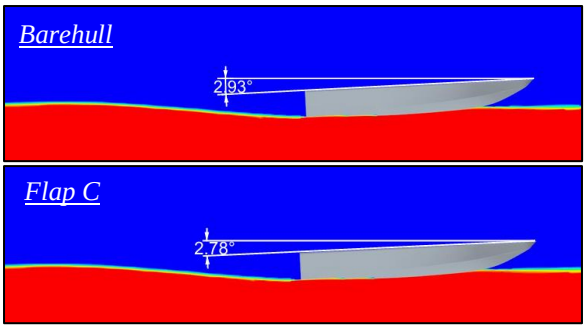
Sebagian besar konfigurasi *stern flap* menurunkan sudut trim kapal. Penurunan sudut trim terbesar terjadi pada *Flap* D1 di Fn 1.41, sebesar 19.88% dari sudut trim *barehull*. Namun, konfigurasi ini tidak ideal karena disertai penambahan hambatan total di Fn 1.41 – 1.84. Sebaliknya, kenaikan sudut trim terbesar terjadi pada *Flap* A di Fn 1.41, sebesar 4.86%, ditunjukkan oleh Gambar 25.

Flap C menunjukkan hasil yang lebih baik dalam penurunan sudut trim, dengan rata-rata penurunan sudut trim di semua kecepatan sebesar 3.27%, sekaligus mengurangi hambatan total dengan rata-rata pengurangan sebesar 0.91%. Penurunan sudut trim terbesar untuk *Flap* C terjadi di Fn 1.41 sebesar 5.02%, ditunjukkan oleh Gambar 26. Secara keseluruhan, semakin panjang *chord flap* dan semakin besar sudut *flap*, penurunan sudut trim yang dihasilkan semakin besar, seperti yang terjadi pada penelitian sebelumnya [7].

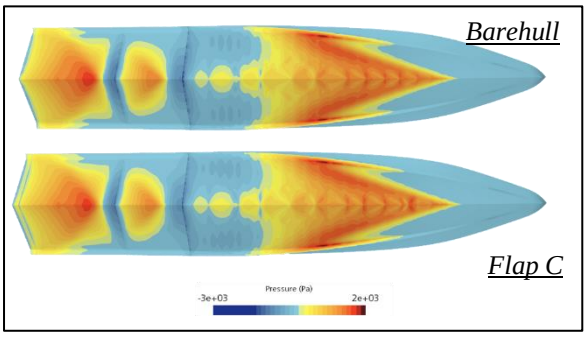
Pemasangan *stern flap* mengubah distribusi tekanan pada lambung kapal. Gambar 27 menunjukkan perbandingan distribusi tekanan antara *barehull* dan *Flap* C di Fn 1.41. *Stern flap* menyebabkan adanya pembentukan tekanan di area *stern flap* yang sebelumnya tidak ada pada *barehull*. Peningkatan tekanan pada area *stern flap* ini menyebabkan buritan kapal terangkat, sehingga menurunkan sudut trim, selain itu juga menyebabkan penurunan nilai *sinkage*, seperti pada penelitian sebelumnya [6].



Gambar 25. Perbandingan Sudut Trim *Barehull* dan Flap A di Fn 1.41



Gambar 26. Perbandingan Sudut Trim *Barehull* dan *Flap* C di Fn 1.41



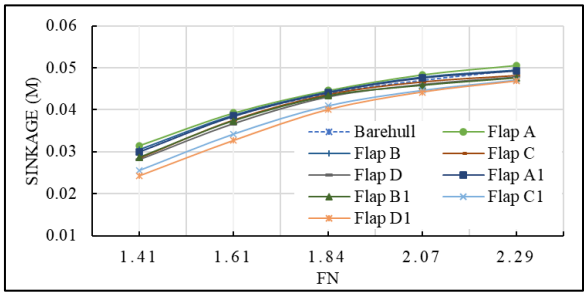
Gambar 27. Perbandingan Distribusi Tekanan *Barehull* dan Flap C di Fn 1.41.

3.4 Analisis *Sinkage*

Pemasangan konfigurasi *stern flap* memengaruhi *sinkage* kapal. Seperti pada perubahan trim, penurunan *sinkage* yang terlalu

besar juga dapat meningkatkan *wetted surface area* (WSA), sehingga menyebabkan hambatan total meningkat. Gambar 28 menampilkan grafik data perubahan *sinkage* untuk semua konfigurasi *stern flap*. Pola grafik menunjukkan bahwa nilai *sinkage* meningkat seiring bertambahnya kecepatan.

Sebagian besar konfigurasi *stern flap* cenderung menghasilkan penurunan nilai *sinkage.* Penurunan terbesar terjadi pada *Flap* D1 di Fn 1.41 sebesar 19.06%. Sebaliknya, kenaikan *sinkage* terbesar terjadi pada *Flap* A di Fn 1.41, sebesar 5.01%. Data menunjukkan bahwa hubungan antara perubahan nilai *sinkage* dengan konfigurasi *stern flap* memiliki pola yang sama dengan perubahan nilai trim. Semakin panjang *chord flap* dan semakin besar *sudut flap,* cenderung menghasilkan penurunan nilai *sinkage* yang semakin besar, seperti pada penelitian sebelumnya [7].



Gambar 28. Grafik *Sinkage* Semua Konfigurasi *Stern Flap*

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu simulasi CFD dapat memprediksi nilai hambatan total berdasarkan validasi dengan nilai *error* dibawah 10% pada model *barehull* (*double stepped planing hull*) di semua kecepatan. *Error* terkecil terjadi di Fn 2.07 sebesar 0.51% dan *error* terbesar di Fn 1.61 sebesar -7.53%.

Variasi *stern flap* pada penelitian ini, yaitu panjang *chord* dan sudut *flap*, memengaruhi perubahan nilai hambatan total. Konfigurasi *Flap* A dengan *chord flap* 0.5% Lpp dan sudut 0°, menghasilkan pengurangan hambatan total terbesar di Fn 2.07 sebesar 8.97%. Sebaliknya, *Flap* D1 dengan *chord flap* 2.0% Lpp dan sudut 1° menambah hambatan total terbesar di Fn 1.61 sebesar 7.73%. Semakin panjang *chord flap* dan semakin besar sudut *flap,* nilai hambatan total yang dihasilkan semakin besar. Pada sudut yang sama, semakin panjang *chord flap,* nilai hambatan total cenderung semakin besar. Begitu juga pada panjang *chord flap* yang sama, semakin besar sudut *flap,* nilai hambatan total semakin besar.

Variasi *stern flap* memengaruhi perubahan nilai trim dan *sinkage*. Pada trim, *Flap* C dengan *chord flap* 1.5% Lpp dan sudut 0° menurunkan sudut trim di semua kecepatan dengan rata-rata penurunan sebesar 3.34% sekaligus mengurangi hambatan total dengan pengurangan rata-rata sebesar 0.91%. Konfigurasi *stern flap* yang optimal adalah yang mengurangi hambatan total, serta menurunkan sudut trim dan *sinkage*. Hubungan antara perubahan nilai *sinkage* dengan konfigurasi *stern flap* memiliki pola yang sama dengan perubahan nilai trim. Semakin panjang *chord flap* dan besar sudut *flap,* semakin besar penurunan nilai trim dan *sinkage* yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Yousefi, R. Shafaghat, and M. Shakeri, “Hydrodynamic Analysis Techniques for High-Speed Planing Hulls,” 2013. doi: 10.1016/j.apor.2013.05.004.

[2] D. J. Kim, S. Y. Kim, Y. J. You, K. P. Rhee, S. H. Kim, and Y. G. Kim, “Design of High-Speed Planing Hulls for the Improvement of Resistance and Seakeeping Performance,” *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 161–177, 2013, doi: 10.2478/ijnaoe-2013-0124.

[3] D. Savitsky and M. Morabito, “Surface Wave Contours Associated with the Forebody Wake of Stepped Planing Hulls,” *Marine Technology and SNAME news*, vol. 47, no. 01, pp. 1-16., 2010.

[4] 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 Calm Water,” *International Journal of Small Craft Technology*, vol. 152, no. 2, 2010, doi: 10.3940/rina.ijsct.2010.b2.96.

[5] C. Dominic S, “Stern Flaps: A Chronicle of Success at Sea (1989-2002),” *SNAME Innovations in Marine Transportation*, 2002.

[6] U. Budiarto, S. Samuel, A. A. Wijaya, S. Yulianti, Kiryanto, and M. Iqbal, “Application of Stern Flaps on Planing Hulls to Improve Resistance,” *International Journal of Engineering Transactions B:*

Applications, vol. 34, no. 5, pp. 2313–2320, 2021, doi: 10.5829/ije.2022.35.12c.06.

[7] K. wei Song, C. yu Guo, C. Wang, C. Sun, P. Li, and W. Wang, "Numerical Analysis of the Effects of Stern Flaps on Ship Resistance and Propulsion Performance," *Ocean Engineering*, vol. 193, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106621.

[8] P. Manik, G. Rindo, H. Yudo, and E. E. Sinaga, "Analysis of the Effect of Addition of Stern Flaps on the Performance of 60 m Fast Boat," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1034, no. 1, pp. 12–32, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1034/1/012032.

[9] J. Zou, S. Lu, Y. Jiang, H. Sun, and Z. Li, "Experimental and Numerical Research on the Influence of Stern Flap Mounting Angle on the Hydrodynamic Performance of Double-Stepped Planing Hulls," *J Mar Sci Eng*, vol. 7, no. 10, 2019, doi: 10.3390/jmse7100346.

[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 calm water," *Int. J. Small Craft Technol*, 2011.

[11] G. Karafiath and D. Cusanelli, "Professional Boatbuilder," *Carl Carmer*, Brooklin, pp. 81–87, 2001. [Online]. Available: www.proboat.com

[12] J. H. Ferziger and M. Peric, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Third Edition. Springer, 2002.

[13] S. Mancini, "The Problem of Verification and Validation Processes of CFD Simulations of Planing Hulls," Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, 2015.

[14] ITTC, "Practical Guidelines for Ship CFD Applications," *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines*, pp. 1–20, 2014.

[15] ITTC, "Practical Guidelines for Ship CFD Applications," *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines*, pp. 1–18, 2011.

[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, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1096/1/012041.

[17] S. T. G. Veysi, M. Bakhtiari, H. Ghassemi, and M. Ghiasi, "Toward Numerical Modeling of Stepped and Non-Stepped Planing Hulls," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 37, no. 6, pp. 1635–1645, 2015, doi: 10.1007/s40430-014-0266-4.

[18] M. Bakhtiari, S. Veysi, and H. Ghassemi, "Numerical Modeling of Stepped Planing Hulls in Calm Water," *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, vol. 29, no. 2, pp. 236–245, 2016, doi: 10.5829/idosi.ije.2016.29.02b.13.

[19] A. Trimulyono, M. L. Hakim, C. Ardhan, S. T. P. Ahmad, T. Tuswan, and A. W. B. Santosa, "Analysis of the Effect of Double Step Position on Planing Hull Performance," *Brodogradnja*, vol. 74, no. 4, pp. 41–72, 2023, doi: 10.21278/brod74403.

[20] O. Yaakob, S. Shamsuddin, and K. Kho King, "Stern Flap for Resistance Reduction of Planing Hull Craft: A Case Study with a Fast Crew Boat Model," *Jurnal Teknologi, Universiti Teknologi Malaysia*, pp. 43–52, 2004.