



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Hambatan Kapal Pentamaran Dengan Variasi Konfigurasi Side hull Dengan Metode CFD

Niko Andrias Susanto¹⁾, Andi Trimulyono²⁾, Berlian Arswendo Adietya³⁾

¹⁾Laboratorium Kapal Kecil dan Perikanan

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

^{*)}e-mail :nikoandriassusanto@students.undip.ac.id

Abstrak

Kapal multihull merupakan salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi hidrodinamika kapal melalui pengurangan hambatan total akibat interferensi gelombang antar lambung. Salah satu konfigurasi multihull yang masih jarang diteliti adalah kapal pentamaran. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jarak transversal antar lambung (S/L) dan pergeseran longitudinal (R/L) terhadap koefisien hambatan total (C_t) kapal pentamaran menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulasi numerik dilakukan menggunakan ANSYS Fluent berbasis persamaan Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) pada rentang Froude number (Fr) 0,4–0,7. Variasi konfigurasi yang digunakan yaitu S/L 70/200 dan 80/200 dengan R/L 4/20 dan –2/20. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai C_t menurun seiring meningkatnya Fr pada seluruh konfigurasi. Konfigurasi dengan S/L 80/200 dan R/L –2/20 menghasilkan nilai C_t terendah dibandingkan konfigurasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi forward stagger mampu menghasilkan interferensi gelombang dan distribusi aliran yang lebih menguntungkan sehingga hambatan total kapal dapat dikurangi. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa variasi posisi side hull berpengaruh terhadap performa hidrodinamika kapal pentamaran, di mana hasil penelitian menunjukkan bahwa pergeseran longitudinal memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap nilai C_t dibandingkan separasi transversal. Konfigurasi terbaik diperoleh pada S/L = 80/200 dan R/L = –2/20.

Kata Kunci : Hambatan, Pentamaran, Konfigurasi Side hull, CFD

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan zaman maka tuntutan untuk transportasi laut yang semakin cepat dan efisien juga meningkat. Salah satu metode yang telah digunakan untuk mengurangi hambatan kapal adalah menkonstruksi kapal dengan konfigurasi multihull [1]. Produk dari kapal multihull yang umum digunakan adalah catamaran, kapal dengan dua lambung dan trimaran, kapal yang terdiri dari tiga lambung. Pentamaran merupakan konfigurasi kapal yang terdiri dari lima lambung yang umumnya terdiri dari satu lambung utama yang berbentuk ramping untuk memotong ombak dan dipasangkan dengan dua pasang outrigger yang berfungsi untuk memberikan stabilitas yang biasanya dibutuhkan oleh bentuk lambung utama [2].

Kapal multihull mengurangi hambatan dengan memanfaatkan bentuknya yang terdiri dari satu main hull dengan side hull sehingga menghasilkan interferensi gelombang antar lambung. Salah satu faktor yang mempengaruhi hal tersebut adalah penempatan side hull relatif terhadap main hull.

Penggunaan kapal monohull dan multihull untuk mengangkut penumpang akan menghasilkan nilai hambatan yang berbeda. Kapal monohull memiliki nilai hambatan yang lebih besar dibandingkan kapal multihull berdasarkan penelitian Seif *et al* [3]. Menurut Utama *et al* [4]. Interferensi hambatan yang terjadi antar lambung mengakibatkan aliran gelombang di sekitar lambung yang umumnya simetris menjadi asimetris. Penelitian yang dilakukan Yidliz *et al* [5]. yang menguji sembilan konfigurasi side hull trimaran hingga range kecepatan Fr 0.5

menunjukkan interferensi antara *main hull* dengan *side hull* terhadap hambatan melalui profil dan pola gelombang yang dihasilkan lambung Konsep kapal multihull yang diketahui memiliki hambatan rendah di kecepatan tinggi masih menjadi topik penelitian berkelanjutan hingga saat ini. Penelitian yang dilakukan Yuliora *et al* [6]. menguji coba berbagai konfigurasi trimaran dengan lima variasi kecepatan dengan formulasi numerik komputer menemukan bahwa rasio S/L terbaik untuk nilai C_t optimal terutama untuk Fr 0.6 adalah 0.4. Hasil ini sejalan penelitian yang dilakukan Utama *et al* [7]. diama *Interference Factor* (IF) trimaran dengan S/L 0.4 lebih rendah dibanding S/L 0.3

Banyak penelitian telah meneliti mengenai kapal *multihull* seperti yang diteliti Tuck *et al* [8]. yang meneliti hambatan gelombang berbagai konfigurasi model monohull, catamaran, trimaran, dan quadamaran yang dimana disimpulkan bahwa kapal *multihull* memiliki karakteristik hambatan yang lebih baik dibanding kapal monohull, terutama di kecepatan tinggi. Peng *et al* [9] melalui penelitiannya menkonfirmasi bahwa kapal performa kapal trimaran bergantung pada penempatan longitudinal *side hull* namun tidak terlalu responsif terhadap penemparan transversal. Yanuar *et al* [10]. melalui penelitiannya yang dimana meneliti lima konfigurasi simetris dan asimetris menemukan bahwa konfigurasi simetris mengalami gangguan konstruktif dan destruktif di tiga variasi yang berakhir dengan stabilitas yang dimana tren ini sesuai dengan yang dijabarkan penelitian-penelitian sebelumnya. Pada penelitian yang telah dilakukan Yanuar *et al* [1]. yang melakukan uji coba towing tank dengan konfigurasi pentamaran asimetris dengan bentuk lambung wigley ditemukan bahwa kapal pentamaran menunjukkan tendensi hambatan yang lebih rendah dibandingkan dengan kapal *monohull* karena bentuk lambungnya yang ramping namun pada kecepatan rendah kapal *monohull* yang menghasilkan hambatan yang lebih rendah karena dipengaruhi besar oleh hambatan viskositas. Dari penelitian tersebut juga ditemukan bahwa pada Fr 0,55 konfigurasi terbaik adalah konfigurasi dengan nilai S/L 75/200 dan R/L 1/20. Penelitian ini meneliti empat konfigurasi baru yang didapatkan dari modifikasi konfigurasi yang digunakan Yanuar *et al* [1]. sebagai basis modifikasi demi menemukan konfigurasi yang menghasilkan hambatan terendah serta pengaruh dari dari empat konfigurasi baru tersebut.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Objek Penelitian

Kapal yang digunakan merupakan kapal yang digunakan di penelitian Sulistyawati [6] yang

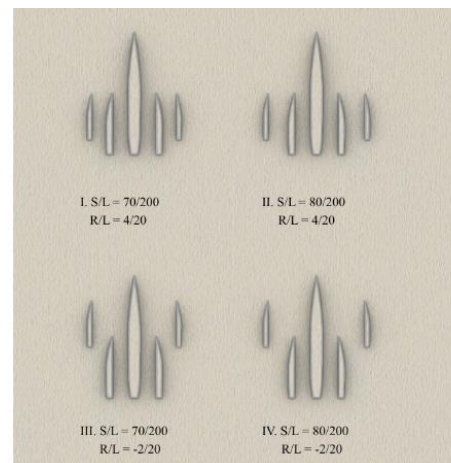
dimana model kapal tersebut juga berdasarkan penelitian Yanuar *et al* [1]. Dengan ukuran utama tertera di tabel 1.

Tabel 1. Ukuran Utama Kapal

No	Parameter	Main Hull	Side Hull I	Side Hull II
1	L	2,00 M	1,00 M	0,75 M
2	B	1,00 M	0,10 M	0,07 M
3	T	0,07 M	0,07 M	0,06 M
4	H	0,15 M	0,15 M	0,14 M

2.2. Parameter Penelitian

Penelitian ini akan menggunakan model kapal pentamaran yang telah didapatkan dari penelitian sebelumnya dan dari konfigurasi penelitian Yanuar *et al* [1]. yang merubah posisi *side hull* luar maka penulis membuat konfigurasi baru dengan S/L dan R/L baru dimana S/L dan R/L yang baru adalah sebagai berikut I. 70/200 dengan 4/20, II. 80/200 dengan 4/20, III. 70/200 dengan -2/20, dan IV. 80/200 dengan -2/20 seperti yang dijelaskan di gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi Penelitian

Untuk rentang uji kecepatan model dipilih dari Fr 0,4 hingga 0,7. Untuk kecepatan aktual dijelaskan di tebal 2.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (m/s) \quad (1)$$

Dimana

v : kecepatan (m/s)

g : gravitasi (m/s^2)

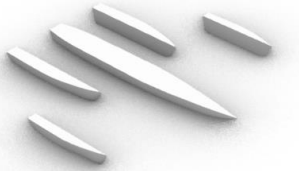
L : panjang kapal (m)

Tabel 2. Kecepatan aktual kapal di rentang Fr

Fr	Kecepatan Aktual (m/s)
0,4	1,77
0,5	2,21
0,6	2,66

2.3. Pemodelan Kapal

Untuk memasukkan kapal ke *software* maka dilakukan pemodelan kapal di *software* 3D modelling Rhinoceros lalu model dapat dimasukkan ke dalam *software* CFD seperti yang ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Model Kapal

2.4. Pengujian Model

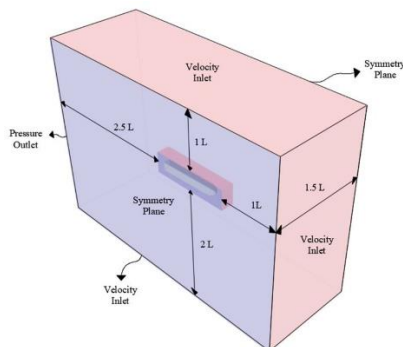
Penelitian ini menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dimana penelitian ini akan mencari hambatan total kapal yang digunakan untuk mengetahui koefisien hambatan total kapal (C_t).

Dimana penelitian ini akan menggunakan metode komputasi numerik dengan menggunakan aplikasi ANSYS Fluent yang dimana aplikasi tersebut menggunakan persamaan RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes).

Domain pengujian dibuat untuk mensimulasikan kapal bergerak di kondisi air tenang. Dimana berdasarkan standar ITTC (*International Towing Tank Commission*) untuk pembuatan domain *virtual towing tank* peneliti memutuskan untuk membuat *virtual towing tank* dengan dimensi yang dijelaskan di tabel 3.

Tabel 3. Dimensi Domain

No	Parameter	Main Hull
1	Length	1L from FP 2,5 from AP
2	Height	1L from deck 2L from deck
3	Breadth	2L from symmetry



Gambar 3. Visualisasi Virtual Towing Tank

2.5. Hambatan

Sesuai dengan peraturan *International Towing Tank Commission* (ITTC) [19], gaya hambat kapal yang bergerak di kondisi air tenang dapat dinyatakan sebagai berikut

$$C_t = C_v + C_w \quad (2)$$

Dimana C_t dapat dinyatakan dengan

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho AV^2} \quad (3)$$

Dengan keterangan sebagai berikut

C_t : Koefisien hambatan total

C_v : Koefisien hambatan viskos

C_w : Koefisien hambatan gelombang

R_t : Hambatan total

V : Kecepatan

2.6. Interference Factor

Interference Factor (IF) digunakan untuk mengevaluasi pengaruh interaksi hidrodinamika antar lambung pada kapal multihull. Nilai IF diperoleh dari perbandingan antara hambatan total konfigurasi multihull terhadap jumlah hambatan masing-masing lambung yang dihitung secara individual pada kondisi operasi yang sama.

Parameter ini memberikan gambaran mengenai tingkat pengaruh interferensi gelombang dan aliran yang terjadi akibat penempatan beberapa lambung dalam satu konfigurasi.

Nilai IF yang lebih kecil dari satu menunjukkan bahwa interferensi yang terjadi bersifat menguntungkan (*favorable interference*), yaitu hambatan total kapal lebih kecil dibandingkan jumlah hambatan masing-masing lambung individual. Sebaliknya, nilai IF yang lebih besar dari satu menunjukkan *unfavorable interference*, yang mengindikasikan bahwa interaksi antar lambung justru meningkatkan hambatan total kapal. Dengan perhitungan sebagai berikut

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan menyajikan hasil simulasi yang telah dilakukan dan membahas mengenai hasil pengaruh konfigurasi *side hull* terhadap hambatan total kapal pentamaran melalui parameter koefisien hambatan total (C_t).

3.1. Verifikasi

Sebelum dilakukan penelitian, simulasi numerik harus melalui verifikasi untuk menjamin akurasi serta keakuratan hasil komputasi dengan

memastikan bahwa hasil jalannya simulasi sudah dalam kondisi *mesh independent*.

Verifikasi dilakukan dengan melakukan *Grid Convergence Index* (GCI), metode pendekatan yang umum digunakan untuk mengetahui pengaruh ukuran mesh terhadap hasil simulasi [7]. Untuk kondisi acuan parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah nilai C_t .

Untuk perhitungan nilai *refinement ratio* didapatkan melalui akar pangkat tiga dari rasio jumlah elemen mesh

$$r_{21} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Approximate relative error didapat berdasarkan selisih hasil antar mesh

$$e_{21} = \left| \frac{\phi_2 - \phi_1}{\phi_1} \right| \quad (5)$$

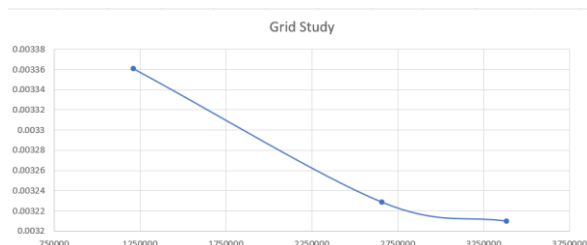
Nilai GCI kemudian didapatkan dengan faktor keamanan 1,25 dan asumsi orde numerik p bernilai 2

$$GCI = \frac{1,25 e_a}{r_p - 1} \times 100 \% \quad (6)$$

Data hasil simulasi pada tingkat mesh *fine*, *medium*, dan *coarse* didapat sebagai berikut

Tabel 4. Hasil simulasi pada berbagai tingkat mesh

Tingkat Mesh	Jumlah Sel	C_t	Diff (%)
Coarse	1.214.945	0,003361	-
Medium	2.659.539	0,003229	4 %
Fine	3.385.572	0,00321	1 %



Gambar 4 . Grafik jumlah cell terhadap C_t

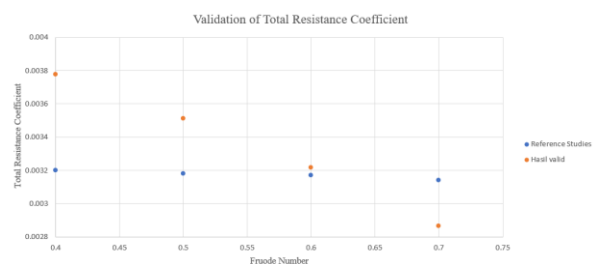
Tabel 5. Hasil perhitungan *Grid Convergence Index* (GCI)

Parameter	Nilai
<i>Fine Configuration</i>	<i>Total Cells</i> = 3.385.572

	$C_t = 0,00321$
<i>Medium Configuration</i>	<i>Total Cells</i> = 2.659.539
	$C_t = 0,003229$
<i>Coarse Configuration</i>	<i>Total Cells</i> = 1.214.495
	$C_t = 0,003361$
<i>Fine Solution, S_1</i>	0,00321
<i>Medium Solution, S_2</i>	0,003229
<i>Coarse Solution, S_3</i>	0,003361
<i>Medium-Fine, ε_{21}</i>	0,000019
<i>Coarse-Medium, ε_{32}</i>	0,000381
e_a^{21}	0,592 %
r_{21}	1,084
<i>Order of Accuracy, p</i>	2,6
<i>GCI Method (%)</i>	3,2 %

3.2. Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil C_t simulasi terhadap hasil penelitian Sulistyawati [6]. Proses ini bertujuan untuk menilai kemampuan model *steady state* RANS dalam merepresentasikan fenomena yang terjadi pada lambung kapal, terutama pada koefisien parameter hambatan total (C_t).



Gambar 4. Perbandingan hasil C_t simulasi dengan referensi penelitian terdahulu

Dimana berdasarkan grafik kurva di gambar 4 menunjukkan kecenderungan penurunan nilai koefisien hambatan total (C_t) seiring dengan peningkatan *Froude number* (Fr). Meskipun terdapat perbedaan nilai secara kuantitatif, kesesuaian tren menunjukkan bahwa model CFD yang digunakan mampu merepresentasikan perilaku hidrodinamika utama kapal pentamaran, sehingga hasil simulasi dapat digunakan untuk analisa perbandingan konfigurasi.

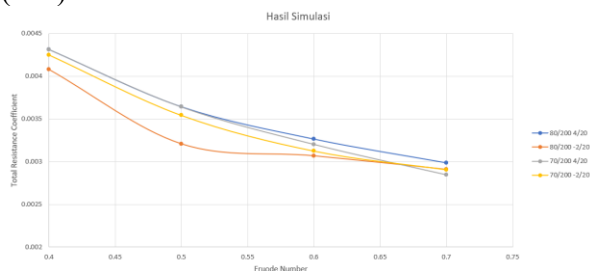
Tabel 6. Persentase Error perbandingan C_t

Fr	Referensi	Simulasi	Error(%)
0,4	0,00321	0,00377	18 %
0,5	0,00318	0,00351	10 %
0,6	0,00317	0,00322	1 %
0,7	0,00314	0,00286	-9 %

3.3. Hasil Penelitian

Gambar memperlihatkan hubungan antara koefisien hambatan total (C_t) terhadap *Froude Number* (Fr) untuk beberapa konfigurasi kapal pentamaran dengan variasi rasio jarak antar

lambung terhadap panjang kapal (S/L) dan rasio pergeseran longitudinal terhadap panjang kapal (R/L).



Gambar 5. Grafik Hasil C_t di setiap Fr

Tabel 7. Hasil C_t yang didapatkan

Fr	80/200 4/20	80/200 -2/20	70/200 4/20	70/200 -2/20
0,4	0,004313	0,004080	0,004314	0,004249
0,5	0,003642	0,003209	0,003641	0,003542
0,6	0,003264	0,003069	0,003204	0,003125
0,7	0,002985	0,002910	0,002848	0,002907

3.4. Analisa Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian dengan variasi konfigurasi jarak transversal (S/L) dan pergeseran longitudinal (R/L) pada beberapa nilai *Froude number* (Fr). Parameter utama yang dianalisis adalah koefisien hambatan total (C_t), karena parameter ini merepresentasikan kontribusi gabungan dari hambatan gesek dan hambatan gelombang serta umum digunakan sebagai indikator performa hidrodinamika kapal *multihull*. Dengan variasi konfigurasi yang diteliti adalah S/L = 70/200 dan 80/200 sebagai jarak transversal antar lambung, R/L = -2/20 dan 4/20 sebagai posisi longitudinal *side hull* terhadap lambung utama, rentang *Froude number* Fr = 0,4–0,7, yang merepresentasikan kecepatan operasi menengah hingga relatif tinggi, di mana pengaruh interferensi gelombang masih signifikan.

Hasil penelitian menunjukkan nilai C_t menurun secara konsisten seiring dengan meningkatnya nilai *Froude Number* yang diuji di seluruh konfigurasi. Pada Fr 0,4 nilai C_t berada di posisi tertinggi dan mengalami penurunan hingga Fr 0,7. Perilaku ini sesuai dengan teori kapal *multihull* dimana pada Fr rendah hambatan gelombang merupakan komponen dominan dan seiring meningkatnya Fr, sistem gelombang yang terbentuk di sekitar kapal mengalami perubahan panjang gelombang dan fase. Interaksi gelombang antar lambung dapat menjadi lebih destruktif sehingga menurunkan amplitudo gelombang dominan dan berpengaruh pada penurunan C_t secara relatif. Tren tersebut juga konsisten dengan hasil penelitian numerik dan eksperimental sebelumnya pada kapal *multihull*, termasuk trimaran dan pentamaran, yang melaporkan bahwa variasi konfigurasi geometrik paling berpengaruh

pada Fr rendah hingga menengah, sementara pada Fr lebih tinggi perbedaan performa antar konfigurasi cenderung mengecil.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaruh separasi transversal (S/L) terhadap C_t tidak menunjukkan tren yang sepenuhnya konsisten dan bergantung pada konfigurasi pergeseran longitudinal (R/L). Pada *forward stagger* (R/L = -2/20), S/L = 80/200 cenderung menghasilkan C_t yang lebih rendah, sedangkan pada *aft stagger* (R/L = 4/20), S/L = 70/200 menunjukkan performa yang relatif lebih baik. Hal ini menunjukkan adanya interaksi antara parameter separasi dan *stagger* dalam menentukan performa hidrodinamika kapal pentamaran.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa performa hidrodinamika kapal pentamaran ditentukan oleh interaksi antara separasi transversal dan pergeseran longitudinal. Pada penelitian ini, kombinasi S/L = 80/200 dan R/L = -2/20 menghasilkan performa terbaik, namun secara umum pengaruh *pergeseran* longitudinal terlihat lebih dominan dibandingkan separasi transversal terhadap nilai C_t . Separasi yang lebih besar menyebabkan interaksi wake antar lambung menjadi lebih kecil sehingga gangguan aliran di antara hull dapat dikurangi. Pada saat yang sama, konfigurasi *forward stagger* membantu mengatur fase interferensi gelombang sehingga interaksi gelombang antar lambung menjadi lebih menguntungkan. Kombinasi kedua parameter tersebut menghasilkan pola aliran yang lebih terkontrol dan berkontribusi terhadap penurunan hambatan total kapal. Dibanding jarak transversal pergeseran longitudinal menunjukkan pengaruh yang lebih signifikan terhadap nilai C_t . Secara umum konfigurasi R/L = -2/20 menghasilkan C_t yang lebih rendah dibandingkan R/L = 4/20 pada sebagian besar kondisi pengujian. Pada konfigurasi dengan R/L -2/20 atau *forward stagger*, *side hull* berada relatif lebih maju dari lambung utama sehingga gelombang dari *side hull* terbentuk lebih dahulu, gelombang tersebut berinteraksi dengan sistem gelombang lambung utama sehingga terjadi pelemahan puncak gelombang di daerah midship dan buritan. Pada konfigurasi R/L 4/20 atau *aft stagger* gelombang dari *side hull* bertemu gelombang utama pada fase yang kurang menguntungkan sehingga sebagian interferensi bersifat konstruktif.

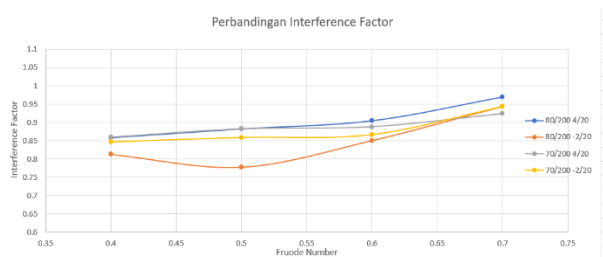
Sebaliknya, konfigurasi dengan *aft stagger* (R/L = 4/20) cenderung menghasilkan nilai C_t yang lebih tinggi. Pada konfigurasi ini, *side hull* yang berada lebih mundur menyebabkan *wake* dari lambung samping berinteraksi lebih langsung dengan *wake* lambung utama di daerah buritan. Interaksi tersebut meningkatkan konsentrasi *wake* dan menyebabkan distribusi aliran menjadi kurang

stabil sehingga kehilangan energi fluida menjadi lebih besar. Kondisi ini terlihat pada konfigurasi $S/L = 80/200$ dan $R/L = 4/20$ cenderung menghasilkan C_t yang lebih tinggi pada sebagian besar kondisi pengujian.

Dari hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pengaruh S/L dan R/L tidak bersifat linier namun saling berinteraksi. Konfigurasi dengan performa terbaik adalah $S/L = 80/200$ dan $R/L = -2/20$, sedangkan konfigurasi dengan C_t tertinggi relatif adalah $S/L = 80/200$ dan $R/L = 4/20$. Hal ini menunjukkan bahwa *stagger* (R/L) menentukan arah dan fase utama interferensi dan separasi (S/L) menentukan kekuatan interaksi tersebut sehingga kombinasi dari kedua hal tersebut yang menentukan performa akhir.

Dilakukan juga perbandingan *interference factor* dengan hasil sebagai berikut berdasarkan merode di persamaan 7

$$IF = \frac{R_t}{R_{MH} + 2R_{SH1} + 2R_{SH2}} \quad (7)$$



Grafik 6. Hasil Perbandingan Interference Factor

Tabel 8. Hasil Perbandingan Interference Factor

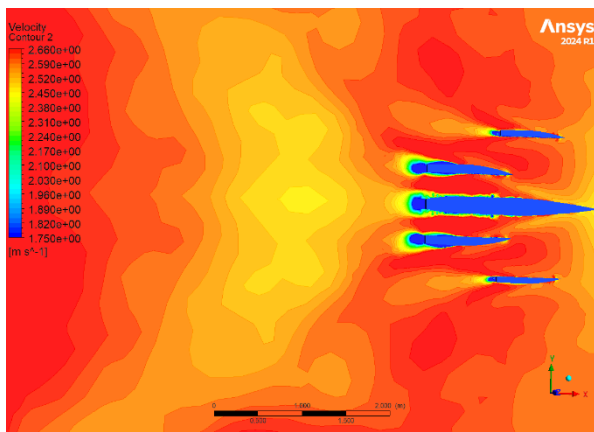
Fr	80/200 4/20	80/200 - 2/20	70/200 4/20	70/200 - 2/20
0,4	0.8588	0.8124	0.8591	0.8461
0,5	0.8825	0.7775	0.8822	0.8583
0,6	0.9046	0.8505	0.8880	0.8661
0,7	0.9686	0.9441	0.9240	0.9430

Gambar 6 menunjukkan perbandingan nilai *Interference Factor* (IF) pada berbagai konfigurasi pentamaran terhadap variasi *Froude Number*. Secara umum, seluruh konfigurasi menghasilkan nilai IF yang berada di bawah satu pada rentang $Fr = 0,4-0,7$, yang mengindikasikan terjadinya *favorable interference* antar lambung. Kondisi ini menunjukkan bahwa hambatan total pentamaran lebih kecil dibandingkan dengan jumlah hambatan masing-masing lambung yang bekerja secara individual. Fenomena tersebut mengindikasikan adanya interaksi sistem gelombang yang menguntungkan sehingga mampu menurunkan hambatan total kapal.

Konfigurasi $S/L = 80/200$ dengan *stagger* = $-2/20$ menghasilkan nilai IF terendah pada $Fr = 0,5$, yaitu sekitar 0,78. Nilai ini menunjukkan tingkat interferensi yang paling menguntungkan dibandingkan konfigurasi lainnya. Penurunan IF pada konfigurasi tersebut mengindikasikan bahwa susunan lambung mampu menghasilkan interaksi gelombang yang lebih efektif dalam mereduksi pembentukan gelombang permukaan, sehingga hambatan total yang dihasilkan menjadi lebih rendah. Hasil ini sejalan dengan grafik koefisien hambatan total (C_t) yang menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut juga memberikan performa hidrodinamik terbaik pada rentang Fr menengah.

Seiring meningkatnya *Froude Number*, nilai IF seluruh konfigurasi cenderung meningkat dan mendekati satu. Peningkatan ini menunjukkan bahwa pengaruh menguntungkan dari interferensi gelombang semakin berkurang pada kecepatan yang lebih tinggi. Pada $Fr = 0,7$, seluruh konfigurasi memiliki nilai IF pada rentang 0,92–0,97, yang mengindikasikan bahwa hambatan total pentamaran mulai mendekati penjumlahan hambatan masing-masing lambung individual. Dengan kata lain, efektivitas mekanisme reduksi hambatan akibat interferensi gelombang menjadi lebih kecil pada kondisi kecepatan tinggi.

Perbandingan antar konfigurasi juga menunjukkan bahwa pengaruh *stagger* lebih dominan dibandingkan perubahan jarak transversal pada *Froude Number* rendah hingga menengah. Hal ini ditunjukkan oleh konfigurasi $S/L = 80/200$ dengan *stagger* = $-2/20$ yang secara konsisten menghasilkan nilai IF lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya pada $Fr = 0,4-0,6$. Namun demikian, perbedaan nilai IF antar konfigurasi semakin mengecil pada $Fr = 0,7$, yang menunjukkan bahwa sensitivitas konfigurasi terhadap efek interferensi berkurang seiring peningkatan kecepatan kapal. Secara keseluruhan, hasil ini membuktikan bahwa pemilihan kombinasi jarak transversal dan *stagger* yang tepat dapat menghasilkan interferensi gelombang yang menguntungkan dan berkontribusi terhadap pengurangan hambatan total pentamaran. Nilai IF yang lebih kecil menunjukkan tingkat interferensi yang semakin menguntungkan, sedangkan nilai IF mendekati satu menunjukkan berkurangnya pengaruh interferensi antar lambung.



Gambar 6. Kontur S/L 80/200 R/L -2/20 di Fr 0,6

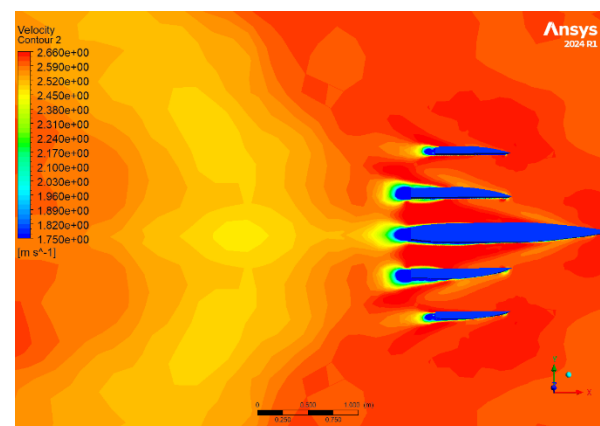
Gambar 6 menunjukkan distribusi kecepatan aliran di sekitar konfigurasi pentamaran dengan jarak transversal S/L 80/200 dan stagger longitudinal R/L -2/20 pada $Fr = 0,6$. Secara umum, distribusi kecepatan di sekitar lambung utama dan side hull tampak relatif merata dengan pola aliran yang berkembang secara simetris terhadap centerline kapal. Daerah yang mengalami percepatan aliran terutama berada di sekitar haluan dan pada celah di antara lambung utama dan *side hull* akibat penyempitan jalur aliran. Setelah melewati daerah tersebut, kecepatan aliran secara bertahap kembali menurun menuju kondisi aliran bebas di belakang kapal.

Pola distribusi kecepatan pada konfigurasi ini menunjukkan bahwa aliran yang melewati setiap lambung dapat berkembang dengan cukup stabil tanpa menghasilkan daerah gangguan yang berlebihan. Interaksi aliran di antara lambung utama dan *side hull* masih terjadi, namun perubahan gradien kecepatan terlihat berlangsung secara bertahap sehingga tidak membentuk daerah dengan fluktuasi kecepatan yang sangat tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa posisi *side hull* yang lebih maju (*forward stagger*) mampu mengurangi intensitas interaksi aliran secara langsung sehingga distribusi kecepatan di sekitar sistem lambung menjadi lebih seragam..

Selain itu, daerah *wake* yang terbentuk di belakang lambung utama maupun *side hull* tampak relatif sempit dan memiliki pola yang lebih teratur dibandingkan konfigurasi lainnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi aliran yang hilang akibat pemisahan aliran relatif lebih kecil sehingga momentum aliran tetap terjaga hingga bagian buritan. Distribusi kecepatan yang lebih seragam tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi ini mampu menghasilkan karakteristik aliran yang lebih efisien dibandingkan konfigurasi lainnya.

Hasil visualisasi *velocity contour* tersebut sejalan dengan hasil analisis kuantitatif yang diperoleh dari nilai koefisien hambatan total (C_t)

dan *Interference Factor* (IF). Pada konfigurasi S/L 80/200 dan R/L -2/20 diperoleh nilai C_t dan IF yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya, sehingga dapat diinterpretasikan bahwa distribusi aliran yang lebih stabil berkontribusi terhadap berkurangnya hambatan akibat interferensi antar lambung. Dengan demikian, konfigurasi *forward stagger* mampu memberikan performa hidrodinamika yang lebih baik pada kondisi operasi $Fr = 0,6$..



Gambar 7. Kontur S/L 80/200 R/L 4/20 di Fr 0,6

Gambar 7 memperlihatkan distribusi kecepatan aliran pada konfigurasi S/L 80/200 dengan stagger longitudinal R/L 4/20 pada $Fr = 0,6$. Dibandingkan konfigurasi sebelumnya, distribusi kecepatan pada konfigurasi ini terlihat lebih kompleks dengan perubahan kecepatan yang lebih signifikan di sekitar lambung utama maupun *side hull*. Daerah percepatan aliran masih muncul di sekitar haluan dan celah antar lambung, namun penyebaran daerah tersebut terlihat lebih luas sehingga menunjukkan interaksi aliran yang lebih kuat..

Pada bagian tengah kapal, distribusi kecepatan di antara lambung utama dan *side hull* menunjukkan perubahan gradien yang lebih tajam dibandingkan konfigurasi R/L -2/20. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan posisi longitudinal *side hull* menyebabkan aliran dari masing-masing lambung saling berinteraksi dengan intensitas yang lebih besar. Akibatnya, terbentuk daerah dengan variasi kecepatan yang lebih tinggi sehingga pola aliran menjadi kurang seragam dibandingkan konfigurasi terbaik.

Fenomena tersebut juga terlihat pada daerah *wake* di belakang sistem lambung. *Wake* yang dihasilkan pada konfigurasi ini tampak lebih lebar dan memanjang hingga ke bagian belakang domain simulasi. Daerah *wake* yang lebih dominan menunjukkan bahwa pemulihan aliran setelah melewati lambung berlangsung lebih lambat, sehingga kehilangan energi akibat interaksi aliran

menjadi lebih besar dibandingkan konfigurasi *forward stagger*.

Hasil *velocity contour* tersebut konsisten dengan hasil analisis koefisien hambatan total (C_t) dan *Interference Factor* (IF) yang menunjukkan bahwa konfigurasi S/L 80/200 dan R/L 4/20 memiliki hambatan total yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi R/L -2/20. Dengan demikian, distribusi kecepatan yang kurang seragam serta *wake* yang lebih dominan mengindikasikan bahwa konfigurasi ini menghasilkan karakteristik aliran yang kurang efisien sehingga meningkatkan efek interferensi antar lambung.

Secara hidrodinamika, posisi *outrigger* yang lebih mundur pada konfigurasi *stagger* 4/20 menyebabkan perubahan fase gelombang yang dibangkitkan oleh masing-masing lambung. Pada $Fr = 0,6$, perubahan posisi longitudinal tersebut menghasilkan pola interferensi yang cenderung konstruktif, sehingga amplitudo gelombang total meningkat. Akibatnya, energi yang dibutuhkan untuk membangkitkan sistem gelombang menjadi lebih besar dan berdampak pada peningkatan nilai koefisien hambatan total (C_t).

Berdasarkan hasil visualisasi *velocity contour* pada kedua konfigurasi, terlihat bahwa variasi *stagger* longitudinal memberikan pengaruh yang cukup nyata terhadap karakteristik distribusi kecepatan aliran di sekitar sistem pentamaran. Meskipun kedua konfigurasi memiliki jarak transversal yang sama (S/L = 80/200), perubahan posisi *longitudinal side hull* menghasilkan pola distribusi kecepatan yang berbeda, terutama pada daerah di antara lambung utama dan *side hull* serta pada daerah *wake* di belakang kapal. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan posisi *side hull* tidak hanya memengaruhi interaksi aliran secara lokal, tetapi juga memengaruhi perkembangan aliran di sepanjang sistem lambung secara keseluruhan.

Pada konfigurasi S/L 80/200 dan R/L -2/20, distribusi kecepatan terlihat lebih merata dengan perubahan gradien kecepatan yang berlangsung secara bertahap. Daerah percepatan aliran di sekitar haluan dan celah antar lambung tidak menunjukkan konsentrasi yang berlebihan, sedangkan *wake* yang terbentuk di belakang kapal relatif lebih sempit dan memiliki pola yang lebih teratur. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa aliran mampu berkembang dengan lebih stabil setelah melewati lambung utama maupun *side hull* sehingga gangguan akibat interaksi antar lambung dapat diminimalkan. Pola distribusi kecepatan seperti ini mengindikasikan bahwa konfigurasi *forward stagger* memberikan karakteristik aliran yang lebih baik dalam mengurangi efek interferensi.

Sebaliknya, konfigurasi S/L 80/200 dan R/L 4/20 memperlihatkan distribusi kecepatan yang lebih tidak seragam dengan daerah perubahan kecepatan yang lebih luas di sekitar sistem lambung. *Wake* yang terbentuk di belakang lambung utama maupun *side hull* tampak lebih dominan dan memanjang dibandingkan konfigurasi R/L -2/20. Pola tersebut menunjukkan bahwa proses pemulihan aliran berlangsung lebih lambat akibat meningkatnya interaksi antar aliran di sekitar lambung. Distribusi kecepatan yang kurang seragam ini mengindikasikan bahwa perubahan posisi *longitudinal side hull* menyebabkan gangguan aliran yang lebih besar sehingga karakteristik hidrodinamika konfigurasi menjadi kurang optimal..

Perbedaan karakteristik distribusi kecepatan pada kedua konfigurasi tersebut menunjukkan bahwa posisi longitudinal *side hull* memiliki peranan penting dalam mengatur pola interaksi aliran di sekitar sistem pentamaran. Pada konfigurasi *forward stagger* (R/L -2/20), posisi *side hull* yang lebih maju memungkinkan aliran berkembang secara lebih bertahap sebelum berinteraksi dengan aliran dari lambung lainnya, sehingga distribusi kecepatan menjadi lebih stabil. Sebaliknya, pada konfigurasi *aft stagger* (R/L 4/20), perubahan posisi *side hull* menyebabkan interaksi antar aliran berlangsung pada lokasi yang berbeda sehingga menghasilkan distribusi kecepatan yang lebih kompleks dan *wake* yang lebih besar

Hasil visualisasi *velocity contour* tersebut menunjukkan kecenderungan yang konsisten dengan hasil analisis kuantitatif. Konfigurasi S/L 80/200 dan R/L -2/20 menghasilkan nilai koefisien hambatan total (C_t) dan *Interference Factor* (IF) yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi S/L 80/200 dan R/L 4/20. Dengan demikian, distribusi kecepatan yang lebih seragam serta *wake* yang lebih kecil pada konfigurasi *forward stagger* mendukung hasil perhitungan bahwa konfigurasi tersebut memiliki performa hidrodinamika yang lebih baik. Sebaliknya, distribusi kecepatan yang lebih tidak merata dan *wake* yang lebih dominan pada konfigurasi *aft stagger* berkorelasi dengan meningkatnya nilai C_t dan IF. Oleh karena itu, hasil visualisasi *velocity contour* berfungsi sebagai pendukung kualitatif yang memperkuat hasil analisis kuantitatif mengenai pengaruh variasi konfigurasi pentamaran terhadap karakteristik hidrodinamika kapal..

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi numerik dan analisis yang telah dilakukan terhadap variasi konfigurasi kapal pentamaran menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), maka

dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi konfigurasi jarak transversal antar lambung (S/L) dan pergeseran longitudinal (R/L) memberikan pengaruh terhadap nilai hambatan total kapal pentamaran. Pengaruh separasi transversal (S/L) terhadap C_t tidak menunjukkan tren yang sepenuhnya konsisten dan bergantung pada konfigurasi *stagger* yang digunakan.
2. Pengaruh pergeseran longitudinal (R/L) terhadap koefisien hambatan total (C_t) pada penelitian ini terlihat lebih dominan dibandingkan separasi transversal (S/L), karena perubahan posisi longitudinal *side hull* secara langsung memengaruhi fase interferensi gelombang dan interaksi *wake* di sekitar kapal. Secara umum konfigurasi *forward stagger* $R/L = -2/20$ menghasilkan distribusi aliran dan pola *wake* yang lebih stabil sehingga mampu menurunkan nilai C_t dibandingkan konfigurasi *aft stagger*. Konfigurasi terbaik yang diperoleh pada penelitian ini adalah $S/L = 80/200$ dengan $R/L = -2/20$, sedangkan konfigurasi dengan hambatan relatif tertinggi adalah $S/L = 80/200$ dengan $R/L = 4/20$. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi jarak transversal dan posisi longitudinal *side hull* memengaruhi pola interferensi aliran dan *wake* di sekitar kapal.
3. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa optimasi konfigurasi *side hull* pada kapal pentamaran berpengaruh terhadap performa hidrodinamika kapal, khususnya dalam mengurangi hambatan total melalui pengaturan interferensi aliran antar lambung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yanuar *et al.* "Experimental Study of Total Hull Resistance of Pentamaran Ship Model with Varying Configuration of Outer Side Hulls." *Procedia Engineering*, vol.194, pp.104-111, 2017.
- [2] "Five Hulls Make Ships Faster". *marinetalk.com*. June 21, 1999. Archived from the original on 2018-12-25. Diambil 15 Desember 2024 pukul 19:58
- [3] Seif, Mohammad Saeed, and E. Amini. "Performance comparison between planing monohull and catamaran at high froude numbers." *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B*, vol. 28, no. B4, pp. 435-44, 2004
- [4] Utama, I. K. A. P., and Ronald Mangasi Hutaeruk. "A Study into the Selection of Mono-and Multi-Hull Vessel for Better Sea Transportation System." In *Proceeding of the 4th International Product Design and Development in conjunction with the 4th AUN/SEED-Net Regional Conference of Manufacture*, 2011
- [5] Yildiz, Burak, Bekir Sener, Suleyman Duman, and Raju Datla. "A numerical and experimental study on the outrigger positioning of a trimaran hull in terms of resistance." *Ocean Engineering* 198, vol. 198, 2020
- [6] Yuliora, E., I. K. A. P. Utama, and I. K. Suastika. "Numerical Study into the Resistance of a Trimaran Hull at Various Longitudinal Spacing." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1081, no. 1, 2022
- [7] Utama, I. K. A. P., and I. K. Suastika. "Experimental and Numerical Investigation into the Effect of the Axe-Bow on the Drag Reduction of a Trimaran Configuration." *International Journal of Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 527-538, 2021
- [8] Tuck, E.O.a.L., L, Optimum spacing of a family of *multihull*. *Ship Technology Research*, 1998. 45: p. 180-195.H. Hashimoto, S. Yoneda, Y. Tahara and E. Kobayashi, "CFD-Based Study on the Prediction of Wave-Induced Surge Force," *Ocean Engineering*, vol. 120, pp. 389-397, 2016.
- [9] Peng, H., Qiu, W., Hsiung, C.C., Measuring Wave Resistance of High-Speed Multi-Hull Ship with a Small Towing Tank., in *27th American Towing Tank Conference 2004*: St. John's, Canada M. Iqbal and I. K. A. P. Utama, "An Investigation into the Effect of Water Depth on the Resistance Components of Trimaran Configuration," in *The 9 th International Conference on Marine Technology*, Surabaya, 2014.
- [10] Yanuar, Ibadurrahman, R. Muhammad Arif, and D. P. Muhamad Ryan. "Resistance Characteristic of High-Speed Unstaggered Pentamaran Model with Variations of Symmetric and Asymmetric Hull Configurations." *Journal of Marine Science and Application*, vol. 18, pp. 472- 481, 2019.
- [11] Sulistyawati, Wiwin."Investigasi Karakteristik Hambatan Pentamaran Bentuk Lambung Wigley dan Chine dengan Menggunakan CFD" *Bina Teknika*, vol.13, no.1, pp. 101-108, 2017

- [12] P. J. Roache, "Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies," *J. Fluids Eng.*, vol. 116, no. 3, pp. 405–413, Sep. 1994, doi: 10.1115/1.2910291.
- [13] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [14] G. Hughes, "Friction and form resistance in turbulent flow, and a proposed formulation for use in model and ship correlation," London, 1954.
- [15] Yanuar, et al., Interference resistance of pentamaran ship model with asymmetric outrigger configurations. *Journal of Marine Science and Application*, 2017. 16(1): p. 42-47.
- [16] Yuliora, E., I. K. A. P. Utama, and I. K. Suastika. "Numerical Study into the Resistance of a Trimaran Hull at Various Longitudinal Spacing." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1081, no. 1, 2022.
- [17] Peng, H., Qiu, W., Hsiung, C.C., Measuring Wave Resistance of High-Speed Multi-Hull Ship with a Small Towing Tank., in 27th American Towing Tank Conference 2004: St. John's, Canada
- [18] Ikeda, Y., Nakabayashi, E. Concept Design of A Pentamaran Type Fast RORO Ship. in *The Fifth International Forum on Aluminium Ships*. 2005. Tokyo, Japan.
- [19] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [20] ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, "Practical Guidelines for Ship CFD Applications," 2011,
- [21] Dudson, Edward. "Optimisation of the seakeeping and performance of a 40-knot pentamaran container vessel." In *Proceedings of the 6th International Conference on Fast Sea Transportation*, pp. 225-233, 2001
- [22] Dubrovsky, Victor A. "Specificity and designing of multi-hull ships and boats." In *Specificity and Designing of Multi-Hull Ships and Boats*, pp. 1-217, 2016.
- [23] Peng, Hongxuan, "Numerical computation of multi-hull ship resistance and motion.", Dalhousie University Halifax, 2001.
- [24] Hafez, Khaled, and Abdel-Rahman El-Kot. "Comparative analysis of the separation variation influence on the hydrodynamic performance of a high speed trimaran." *Journal of Marine Science and Application*, vol.10, pp. 377-393, 2011
- [25] Dubrovsky, V.A., Multi-hulls: new options and scientific developments. *Ships and Offshore Structures*, 2010. 5(1): p. 81-92