

# Analisis CFD Hambatan Kapal Katamaran dengan *Stepped Hull* Melintang

Zhafir Tri Setiabudi Putra dan I Ketut Aria Pria Utama  
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: kutama@na.its.ac.id

**Abstrak**—Perkembangan dalam ilmu dan teknologi telah memajukan metode dan pengetahuan dari desain lambung kapal. Kapal cepat memerlukan bentuk lambung yang baik untuk beroperasi secara efisien dan salah satu cara untuk mencapai efisiensi yang baik adalah dengan menggunakan step pada lambung kapal. Step pada lambung adalah diskontinuitas tajam yang berlokasi pada permukaan alas dari lambung. Pada kondisi sekarang, desain dari kapal dengan stepped hull hanya dilakukan pada kapal planing monohull, namun pengembangan desain untuk kapal katamaran dengan stepped hull sudah mulai dilakukan oleh para desainer kapal. Diketahui bahwa analisa hambatan pada lambung katamaran dengan transverse stepped hull masih sangat terbatas di dalam literatur. Penelitian ini bertujuan untuk memahami efek penggunaan step pada lambung katamaran terhadap hambatan kapal. Analisis hambatan pada penelitian ini menggunakan simulasi dengan Computational Fluid Dynamics (CFD). Dalam simulasi tersebut, dianalisa pengaruh step pada hambatan kapal pada konfigurasi monohull dan katamaran menggunakan lambung tipe round bilge. Model katamaran diuji dengan separation ratio (S/L) 0,3. Variasi kecepatan pada setiap model dilakukan pada Froude Number 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, dan 0,7. Validasi dilakukan dengan menggunakan hasil uji tarik yang telah dilakukan untuk model tanpa stepped hull. Dari hasil simulasi diperoleh nilai hambatan, permukaan basah, tekanan pada model, dan wave pattern yang dihasilkan. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa hasil simulasi CFD mendapatkan hasil dengan keselarasan yang baik dengan hasil eksperimen dengan margin perbedaan sesuai dengan kriteria yaitu di bawah 5%. Hasil perbandingan antara model dengan dan tanpa stepped hull mendapatkan hasil pada model monohull dengan stepped hull terjadi pengurangan nilai CT dan  $RT/\Delta$  pada Fr 0,2 – 0,3 dan penambahan nilai tersebut pada Fr 0,4 – 0,7. Pada model katamaran dengan stepped hull terjadi pengurangan nilai CT pada Fr 0,2, dan penambahan nilai CT pada Fr 0,3 – 0,7 dan  $RT/\Delta$  pada Fr 0,2 – 0,7.

**Kata Kunci**—Computational Fluid Dynamics, Katamaran, Hambatan Kapal, Transverse Stepped Hull.

## I. PENDAHULUAN

DESAIN lambung kapal telah menjadi dasar dari ilmu teknik perkapalan sejak dahulu. Efisiensi dalam desain kapal bervariasi secara signifikan. Analisis studi melihat adanya peningkatan tinggi efisiensi kapal baru pada tahun 1980an, penurunan perlahan pada 1990an dan 2000an, dan peningkatan pada beberapa waktu terakhir. Perubahan efisiensi desain merupakan hasil dari perubahan dalam desain lambung dan propeller. Hal ini diakibatkan oleh pengurangan penggunaan bahan bakar karena peningkatan harga minyak dunia [1]. Pada sekarang ini, fokus utama dari desain lambung kapal adalah untuk memenuhi kontrak persyaratan kecepatan dengan konsumsi bahan bakar yang rendah [2].

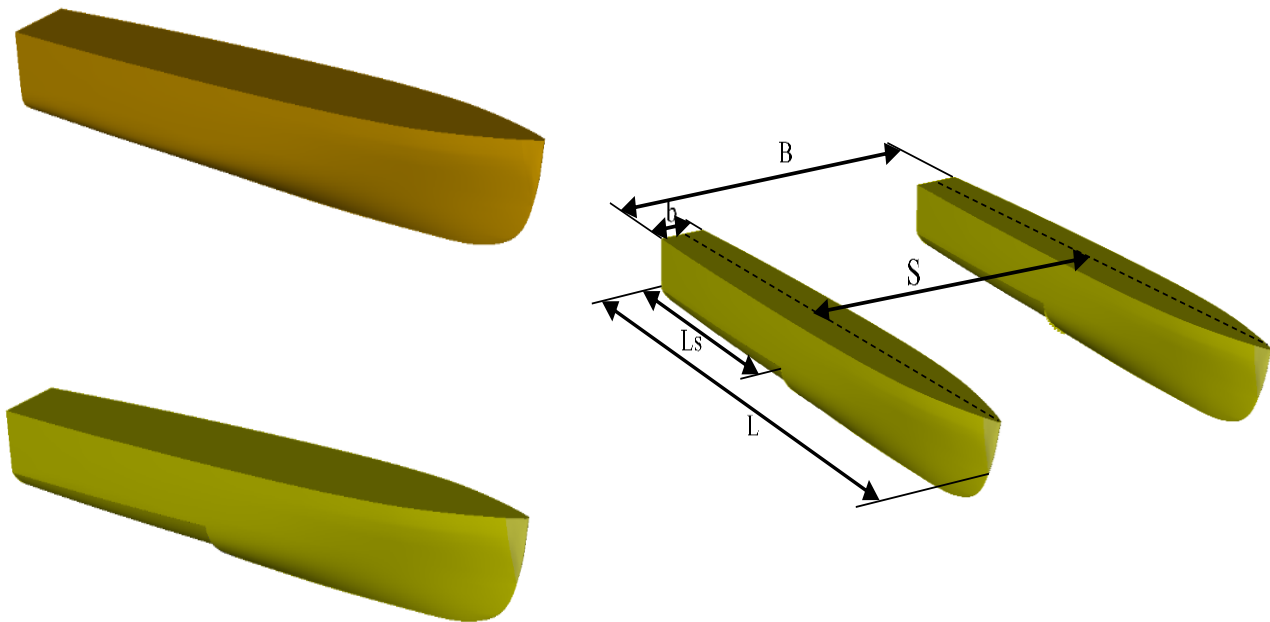
Salah satu cara untuk mencapai efisiensi pada kapal cepat adalah dengan menggunakan step pada lambung kapal.

Peningkatan ketersediaan mesin yang ringan dengan daya kuda yang tinggi membuat desainer lambung untuk meningkatkan kecepatan dari kapal. Penggunaan step pada kapal mampu mengurangi secara signifikan hambatan hidrodinamis pada kecepatan tinggi sehingga mampu menggunakan daya dari mesin secara lebih efisien [3]. Dengan penambahan efisiensi, mampu mengurangi jumlah bahan bakar yang digunakan untuk mencapai kecepatan tersebut. Step pada lambung adalah diskontinuitas tajam yang berlokasi pada permukaan alas dari lambung. Penggunaan step pada kapal mampu memberikan sudut trim yang konstan pada kecepatan tinggi sehingga mampu memberikan stabilitas, karakteristik stabilitas yang baik, dan efek porpoising yang lebih kecil [4].

Kapal katamaran merupakan kapal dengan dua lambung atau demihull. Kapal katamaran sering digunakan untuk kapal penumpang dikarenakan tersedianya area geladak yang lebih luas [5] dan mempunyai derajat stabilitas melintang (transverse stability) terbesar dibandingkan jenis kapal lainnya sehingga memiliki karakteristik stabilitas dan seakeeping yang nyaman untuk penumpang [6]. Kapal katamaran memiliki kebutuhan daya yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan kapal displacement monohull dengan panjang yang sama untuk mencapai kecepatan yang sama, namun katamaran mempunyai kapasitas payload yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan monohull [7]. Kapal katamaran menunjukkan fenomena hidrodinamika yang menarik akibat terdapat dua lambung pada katamaran; hambatan kapal katamaran lebih besar bila dibandingkan dengan penjumlahan hambatan demihull penyusunnya dimana hal tersebut disebabkan oleh fenomena interferensi antar lambung kapal [5].

Penelitian tentang stepped hull pada kapal planing monohull telah dilakukan dengan uji eksperimen [3]-[8]-[9] dan simulasi CFD [4] -[10]. Namun demikian, penelitian pada kapal katamaran dengan stepped hull masih sangat terbatas walau penggunaan stepped hull pada kapal katamaran mulai diminati oleh desainer. Terdapat potensi penggunaan stepped hull pada katamaran sangat tinggi oleh karena itu penelitian ini mencoba mencari tahu efek dari penggunaan stepped hull dengan konfigurasi katamaran terutama pada hambatan dan efek interferensi yang dihasilkan oleh demihull katamaran.

Secara tradisional, analisis hidrodinamika pada kapal ditentukan menggunakan metode eksperimen dengan uji tarik menggunakan model kapal yang diskala lebih kecil di fasilitas towing tank. Hal ini dikarenakan metode ini sudah lama digunakan dan mempunyai hasil yang mampu memprediksi karakteristik kapal pada ukuran sebenarnya [11]. Keterbatasan penggunaan metode eksperimen dengan uji tarik adalah memerlukan fasilitas towing tank yang jarang



Gambar 1. Ilustrasi Model Pengujian (a) S0, (b) S1, dan (c) Konfigurasi Katamaran.

ditemukan, memerlukan waktu yang cukup lama, harga yang mahal, dan hanya dapat diaplikasi pada model yang diuji [12].

Sesuai dengan perkembangan teknologi dalam bidang komputasi, terdapat metode prediksi performa kapal yang lebih universal yaitu menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD). CFD menggunakan simulasi komputer untuk memprediksi tingkah laku kapal pada saat berlayar yang dianalisis menggunakan metode numerik. CFD mampu memprediksi hambatan sebuah model kapal dengan tingkat keakuratan yang tinggi, dan melakukan studi dan analisis pada sistem yang sulit untuk dilakukan dengan metode eksperimen [12]. Keterbatasan dalam CFD adalah metode ini memerlukan performa komputer seperti daya pemrosesan dan memori yang tinggi untuk menjamin kelancaran proses penelitian.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Hambatan Kapal

Hambatan kapal merupakan suatu gaya fluida yang bekerja pada kapal akibat interaksi antara kapal dan fluida dengan sedemikian rupa melawan gerakan kapal tersebut [13]. Bila suatu kapal bergerak diobservasi maka akan terlihat gelombang dan *wake* yang ditimbulkan. Gaya dari gelombang dan *wake* tersebut terdiri dari berbagai komponen yang mencakup *drag* dan hambatan gelombang (*wave-making resistance*). *Drag* adalah selisih antara hambatan total dan hambatan gelombang, dimana hambatan gelombang diasumsikan tidak terpengaruh secara signifikan oleh kekasaran permukaan. Hambatan yang menyusun *drag* terbagi menjadi hambatan gesek (*frictional resistance*) dan hambatan tekanan viskos (*viscous pressure drag*) [11]. Dalam menghitung hambatan kapal, *Froude Number* (*Fr*) yang dikembangkan oleh William Froude (1868) digunakan sebagai acuan kecepatan. Persamaan untuk *Froude Number* adalah:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \tag{1}$$

Dimana *V* sebagai kecepatan kapal, *g* sebagai percepatan gravitasi, dan *L* sebagai panjang kapal [13]. Pada kapal yang memiliki kecepatan yang lebih, *Froude Number Volume Displacement* (*Fr<sub>v</sub>*) seringkali digunakan. Persamaan untuk *Fr<sub>v</sub>* adalah:

$$Fr_v = \frac{V}{\sqrt{g\nabla^{1/3}}} \tag{2}$$

Dimana  $\nabla$  adalah volume *displacement* kapal. Dalam mengukur hambatan dari model kapal, metode Hughes menjadi dasar untuk penghitungan penskalaan dari model – kapal. Dalam mengukur hambatan kapal, digunakan koefisien hambatan total kapal (*C<sub>T</sub>*) sebagai penilaian dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho SV^2} \tag{3}$$

Dimana *R<sub>T</sub>* sebagai hambatan total kapal,  $\rho$  sebagai massa jenis air, *S* sebagai luas permukaan basah kapal.

Metode Hughes memperkenalkan korelasi model-kapal dimana koefisien hambatan total kapal (*C<sub>T</sub>*) adalah penjumlahan dari koefisien hambatan gesek (*C<sub>F</sub>*), hambatan bentuk dari model (*C<sub>F0</sub>*) dan hambatan gelombang (*C<sub>w</sub>*) [14]. Dikarenakan nilai *C<sub>F0</sub>* merupakan hasil perkalian *form factor* (*k*) dengan *C<sub>F</sub>*, persamaan komponen koefisien hambatan total menurut Hughes adalah sebagai berikut:

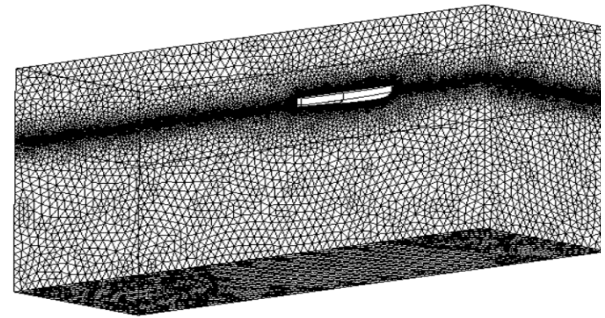
$$C_T = (1 + k)C_F + C_w \tag{4}$$

Perkalian antara (1+k) dengan *C<sub>F</sub>* didefinisikan sebagai koefisien hambatan viskos kapal (*C<sub>V</sub>*) [14]. Dalam menghitung nilai *C<sub>F</sub>*, metode yang paling umum digunakan

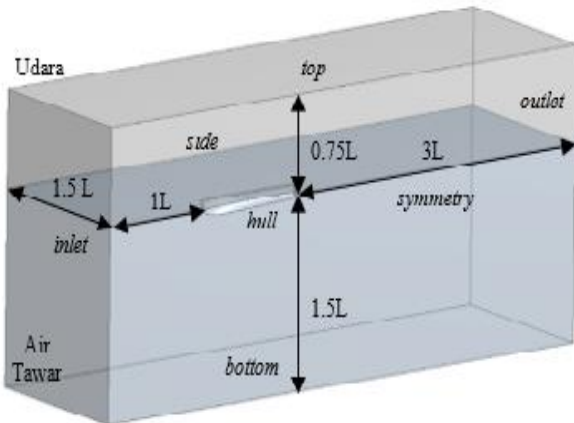
Tabel 1.

Ukuran Utama dan Hidrostatik Model Penguji

Model	S0	S1
L (m)	1,600	1,600
L/B	9,005	9,097
B/T	2,001	1,981
$L/\nabla^{1/3}$	7,417	7,693
$C_B$	0,397	0,360
$C_P$	0,693	0,621
$C_M$	0,573	0,662
A (m <sup>2</sup> )	0,342	0,330
LCB (%L MS)	-6,40	-4,27
$L_S$ (m)	-	0,700
$H_S$ (m)	-	0,013



Gambar 3. Gambaran Umum dari Meshing yang digunakan pada Simulasi CFD.



Gambar 2. Ukuran Domain Komputasi dan Penamaan Kondisi Batas yang digunakan pada Simulasi CFD.

adalah dengan menggunakan persamaan ITTC 1957 *Model-Ship Correlation Line* dengan persamaan sebagai berikut [15]:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (5)$$

Dimana  $Re$  adalah *Reynolds Number* yang dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [15].

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (6)$$

Dimana  $\mu$  adalah viskositas dinamis fluida.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Insel dan Molland (1992), hambatan kapal katamaran mempunyai tambahan hambatan dari hambatan kedua *demihull* dikarenakan terdapat interferensi gelombang yang terjadi di antara dua *demihull* [16]. Oleh karena itu, untuk kapal katamaran dibutuhkan metode khusus untuk menghitung komponen hambatan kapal katamaran. Metode yang dikembangkan Insel dan Molland (1992) memasukkan nilai efek dari interferensi yang diakibatkan oleh *demihull*. Metode ini secara persamaan matematis adalah sebagai berikut:

$$C_T = (1 + \beta k) C_F + \tau C_W \quad (7)$$

Dimana  $\beta$  adalah faktor interferensi viskos dan  $\tau$  adalah faktor interferensi hambatan gelombang. Dalam menghitung nilai *form factor* atau  $(1+k)$ , dapat digunakan persamaan empiris yang dikembangkan menggunakan hasil eksperimen. Penggunaan metode empiris merupakan estimasi praktis dari *form factor* [11]. Untuk model lambung dengan *round bilge*, dapat digunakan metode yang dikembangkan oleh Couser

Tabel 3. Spesifikasi Komputer yang digunakan

Sistem Operasi	Windows 10 – Home 64 bit
Prosesor	Intel® Core™ i7-6700HQ 2.6 GHz
Jumlah core	4 (Quad-Core)
RAM	32 GB

Tabel 4.

Variasi Kasus yang digunakan dalam Simulasi CFD

Fr	Fr <sub>v</sub>	V (m/s)
0,2	0,545	0,793
0,3	0,817	1,189
0,4	1,089	1,585
0,5	1,362	1,981
0,6	1,634	2,377
0,7	1,906	2,773

dkk. [16]. Persamaan Couser dkk. dapat digunakan pada model *monohull* dan katamaran. Persamaan untuk *monohull* adalah sebagai berikut:

$$(1 + k) = 2.76(L/\nabla^{1/3})^{-0.4} \quad (8)$$

Dimana  $\nabla$  adalah volume *displacement* kapal. Persamaan untuk katamaran adalah sebagai berikut:

$$(1 + \beta k) = 3.03(L/\nabla^{1/3})^{-0.4} \quad (9)$$

### B. Model Matematis

Dalam menghitung hambatan kapal menggunakan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD), digunakan persamaan Navier-Stokes. Persamaan Navier-Stokes merupakan persamaan fundamental dalam hukum fisika pada fluida. Persamaan ini merupakan penurunan dari prinsip dasar fisika yaitu hukum konservasi massa, konservasi momentum dari Hukum Kedua Newton, dan konservasi energi dari Hukum Pertama Termodinamika [17]. Hukum konservasi massa menyatakan bahwa sebuah sistem yang tertutup dari perpindahan zat dan energi, massa dari sistem tersebut harus konstan. Dalam suatu fluida dapat diartikan bahwa tingkat penambahan massa dalam elemen fluida sama dengan tingkat laju massa yang keluar dari elemen fluida [12]. Dalam persamaan Navier-Stokes didefinisikan sebagai persamaan kontinuitas yang dapat didefinisikan secara matematis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (10)$$

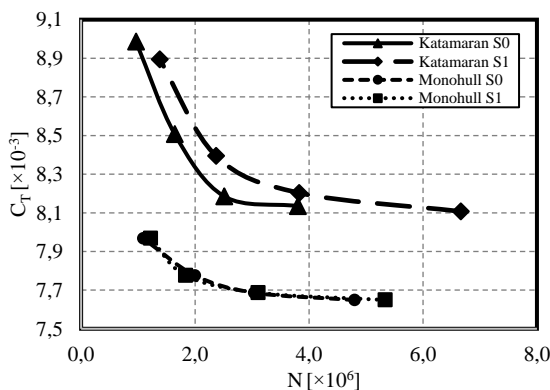
Tabel 2. Pengaturan pada Solver pada Simulasi CFD

Kondisi Batas	
Inlet	Velocity Inlet dengan kecepatan aliran sesuai variasi kecepatan, turbulence intensity 2-3% dan turbulent viscosity ratio 1-10%
Outlet	Pressure-Outlet dengan nilai turbulence intensity dan turbulent viscosity ratio mengikuti nilai pada inlet
Top, Bottom, Side, Symmetry	Symmetry
Hull	Wall dengan kondisi no slip
Pengaturan Solver	
Waktu	Steady
Kriteria Konvergensi	RMS dengan kriteria absolut 0,001
Multiphase	Volume of Fluid, open channel flow
Model Turbulen	k- $\omega$ Shear Stress Transport
Metode Numerik	
Scheme	SIMPLE
Gradient	Green-Gauss Node Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	2nd Order Upwind
Volume Fraction	Compressive
Turbulent Kinetic Energy	2nd Order Upwind
Specific Dissipation Rate	2nd Order Upwind

Tabel 5. Grid Independence Study

Model Monohull S0				
Mesh	Elemen	R <sub>T</sub> [N]	C <sub>T</sub> [ $\times 10^{-3}$ ]	Perbedaan
Sangat Halus	4.797.116	1,850	7,649	-0,49%
Halus*	3.035.248	1,859	7,686	-1,17%
Menengah	1.993.887	1,881	7,776	-2,47%
Kasar	1.089.781	1,927	7,968	-
Model Monohull S1				
Mesh	Elemen	R <sub>T</sub> [N]	C <sub>T</sub> [ $\times 10^{-3}$ ]	Perbedaan
Sangat Halus	5.337.528	1,799	7,726	-0,75%
Halus*	3.106.603	1,813	7,784	-0,93%
Menengah	1.833.452	1,829	7,856	-1,06%
Kasar	1.219.499	1,849	7,939	-
Model Katamaran S0 S/L 0.3				
Mesh	Elemen	R <sub>T</sub> [N]	C <sub>T</sub> [ $\times 10^{-3}$ ]	Perbedaan
Halus*	3.803.770	3,935	8,135	-0,62%
Menengah	2.511.320	3,959	8,186	-3,93%
Kasar	1.644.123	4,115	8,507	-5,63%
Sangat Kasar	962.200	4,347	8,986	-
Model Katamaran S1 S/L 0.3				
Mesh	Elemen	R <sub>T</sub> [N]	C <sub>T</sub> [ $\times 10^{-3}$ ]	Perbedaan
Sangat Halus	6.664.100	3,776	8,107	-1,17%
Halus*	3.826.917	3,821	8,203	-2,28%
Menengah	2.369.085	3,910	8,395	-5,62%
Kasar	1.378.124	4,143	8,895	-

\* Mesh dengan kualitas halus digunakan untuk simulasi dengan variasi kasus nilai Fr



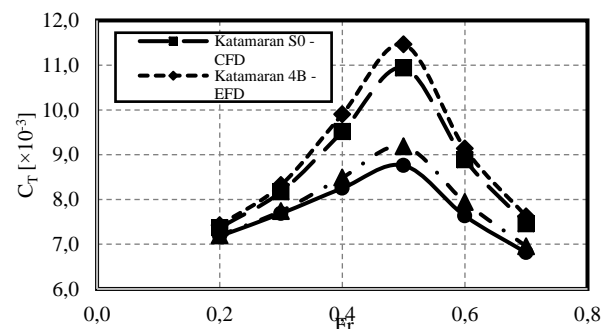
Gambar 4. Grafik Hasil Grid Independence Study.

Dimana  $t$  adalah waktu dan  $U$  sebagai kecepatan fluida. Hukum Newton Kedua menyatakan bahwa tingkat perubahan momentum dari partikel fluida sama dengan jumlah dari gaya pada partikel fluida. Gaya pada fluida dapat dikategorikan menjadi dua yaitu gaya internal yang terdiri dari gaya akibat tekanan dan viskositas fluida, dan gaya eksternal [12]. Persamaan ini dalam Navier Stokes didefinisikan sebagai persamaan momentum yang dapat didefinisikan secara matematis sebagai berikut:

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + \rho F \quad (11)$$

Dimana  $p$  adalah tekanan fluida dan  $F$  adalah gaya eksternal yang bekerja pada fluida. Pada perhitungan hambatan kapal, tidak terjadi perubahan energi pada partikel fluida, sehingga persamaan konservasi energi yang didasarkan dari Hukum Pertama Termodinamika tidak digunakan [12].

Aliran pada kapal pada umumnya berada pada nilai  $Re$  yang tinggi sehingga aliran tersebut dapat dikategorikan sebagai aliran yang turbulen dengan hanya sebagian aliran dekat dengan dinding sebagai laminar. Aliran laminar adalah aliran reguler yang konstan terhadap waktu, dan aliran turbulen adalah tidak reguler, tiga dimensi, dan tidak konstan



Gambar 5. Grafik Perbandingan Hasil Simulasi CFD dengan Hasil Eksperimen.

terhadap waktu atau *unsteady* [18]. Oleh karena hal tersebut, dibutuhkan model numerik untuk menghitung aliran turbulen. Terdapat beberapa metode yang umum digunakan, namun metode *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations* (RANS) merupakan metode dengan kebutuhan komputasi yang relatif tidak tinggi dan aplikasi yang universal, sehingga metode RANS merupakan metode yang paling umum digunakan [12].

Terdapat beberapa model turbulen RANS yang umum digunakan, model ini adalah model  $k-\epsilon$  standar, model  $k-\omega$ , dan model *Shear Stress Transport* (SST). Model SST merupakan penggabungan model  $k-\epsilon$  standar dan model  $k-\omega$  dengan fungsi pencampuran [19]. Model ini diakui mempunyai performa yang baik secara umum dan sangat umum digunakan untuk model turbulensi untuk simulasi analisis hidrodinamika kapal [20].

### III. METODOLOGI

#### A. Model Lambung Pengujian

Model lambung tanpa *stepped hull* diberikan notasi S0 dengan didasarkan dari lambung *Southampton NPL Series* model 4B [5]. Model lambung dimodelkan menggunakan *software* Maxsurf Modeler. Model lambung S0 divalidasi dengan dilakukan perbandingan nilai hidrostatik dan dimensi

Tabel 6.  
Data Perbandingan Hasil CFD pada Model S0 dengan Hasil Eksperimen

Monohull S0						
Fr	V [m/s]	R <sub>T</sub> [N]	C <sub>T</sub> [×10 <sup>-3</sup> ]	C <sub>T</sub> [×10 <sup>-3</sup> ]	Perbedaan	
0,2	0,793	0,772	7,181	7,196	-0,21%	
0,3	1,189	1,859	7,686	7,740	-0,69%	
0,4	1,585	3,546	8,251	8,489	-2,80%	
0,5	1,981	5,881	8,760	9,187	-4,65%	
0,6	2,377	7,378	7,633	7,942	-3,89%	
0,7	2,773	8,961	6,812	6,954	-2,04%	
Katamaran S0						
Fr	V [m/s]	R <sub>T</sub> [N]	C <sub>T</sub> [×10 <sup>-3</sup> ]	C <sub>T</sub> [×10 <sup>-3</sup> ]	Perbedaan	
0,2	0,793	1,585	7,368	7,426	-0,78%	
0,3	1,189	3,953	8,172	8,321	-1,79%	
0,4	1,585	8,179	9,516	9,904	-3,92%	
0,5	1,981	14,691	10,941	11,467	-4,58%	
0,6	2,377	17,181	8,888	9,137	-2,73%	
0,7	2,773	19,614	7,455	7,621	-2,17%	

Tabel 7.  
Data Hasil Simulasi CFD pada Model S1 & Perbandingan Hasil Model S0

Monohull S1							
V [m/s]	Fr <sub>L</sub>	R <sub>T</sub> [N]	C <sub>T</sub> [×10 <sup>-3</sup> ]	Perbedaan C <sub>T</sub>	R <sub>T</sub> /Δ	Perbedaan R <sub>T</sub> /Δ	
0,793	0,2	1,458	7,037	-2,65%	0,008	-6,26%	
1,189	0,3	3,808	8,177	-1,56%	0,022	-5,21%	
1,585	0,4	8,186	9,891	3,66%	0,046	-0,19%	
1,981	0,5	14,338	11,090	4,77%	0,081	0,88%	
2,377	0,6	17,195	9,238	10,42%	0,097	6,32%	
2,773	0,7	19,769	7,804	7,25%	0,112	3,27%	
Katamaran S1							
V [m/s]	Fr <sub>L</sub>	R <sub>T</sub> [N]	C <sub>T</sub> [×10 <sup>-3</sup> ]	Perbedaan C <sub>T</sub>	R <sub>T</sub> /Δ	Perbedaan R <sub>T</sub> /Δ	
0,793	0,2	1,458	7,037	-4,50%	0,008	2,61%	
1,189	0,3	3,808	8,177	0,05%	0,022	7,50%	
1,585	0,4	8,186	9,891	3,95%	0,046	11,69%	
1,981	0,5	14,338	11,090	1,36%	0,081	8,90%	
2,377	0,6	17,195	9,238	3,94%	0,097	11,67%	
2,773	0,7	19,769	7,804	4,67%	0,112	12,46%	

utama dengan model 4B. Didapatkan bahwa model lambung S0 mempunyai perbedaan di bawah 2% sehingga dinilai valid. Ilustrasi dari model tiga dimensi model S0 dapat dilihat pada Gambar 1a. Ukuran utama dan hidrostatik dari model lambung S0 dapat dilihat pada Tabel 1.

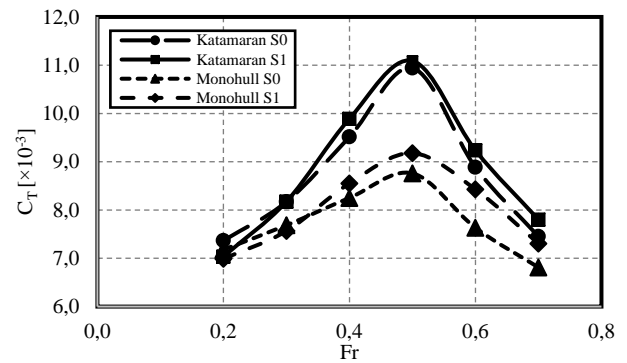
Model lambung dengan *stepped hull* diberikan notasi S1. Tinggi dan posisi dari *step* didasarkan dari hasil penelitian pada kapal *planing monohull* dengan *chine* dan *step* [8]. Dikarenakan model S1 merupakan tipe lambung *round bilge*, bentuk dari *step* dimodelkan sedemikian rupa agar dapat menyatu dengan bagian lambung pada akhir *step*. Ilustrasi dari model tiga dimensi model S1 dapat dilihat pada Gambar 1b. Ukuran utama dan hidrostatik dari model lambung S1 dapat dilihat pada Tabel 1.

**B. Konfigurasi Katamaran**

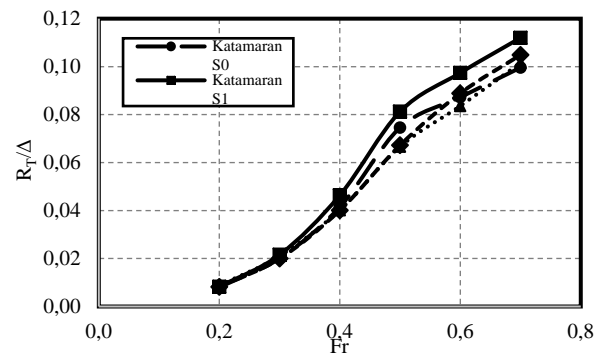
Konfigurasi katamaran dibuat dengan menggunakan model S0 dan S1 dan diberi jarak antar *demihull* dengan nilai rasio jarak antar *demihull* dengan panjang atau *separation ratio* (S/L) sebesar 0,3. Nilai S/L 0,3 dipilih dikarenakan nilai paling optimal untuk hambatan pada katamaran [5]. Ilustrasi dari konfigurasi katamaran yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1c.

**C. Pengaturan Simulasi CFD**

Domain komputasi yang digunakan mempunyai ukuran yang mencukupi sesuai rekomendasi dari ITTC. Domain ini dibuat dengan tujuan menghindari batas dari domain yang



Gambar 6. Grafik Perbandingan Nilai C<sub>T</sub> antara Model S0 dan S1.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Nilai R<sub>T</sub>/Δ antara Model S0 dan S1.

dapat mempengaruhi aliran di sekitar lambung [15]. Simulasi yang digunakan adalah dengan model permukaan bebas. Panjang dari gelombang *wave pattern* juga menjadi pertimbangan dalam menentukan ukuran domain komputasi. Ilustrasi dari domain komputasi yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.

Simulasi CFD dilakukan dengan *software* Ansys Fluent. *Software* ini melakukan simulasi CFD dengan metode *Finite Volume*. Pengaturan yang digunakan pada simulasi CFD pada *solver* dapat dilihat pada Tabel 2. *Meshing* dihasilkan dengan menggunakan *software* Ansys Meshing. *Mesh* yang digunakan adalah tipe *unstructured tetrahedral* dengan lapisan inflasi prisma pada permukaan lambung dan permukaan bebas air. Gambaran umum dari hasil *meshing* dapat dilihat pada Gambar 3. Spesifikasi dari komputer yang digunakan berpengaruh terhadap lamanya proses simulasi. Spesifikasi komputer yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3. Proses simulasi hingga mencapai kriteria konvergensi memakan waktu 9 – 20 jam.

Untuk stabilitas dari proses simulasi CFD, nilai *under relaxation factor* direndahkan. Pada awal mula simulasi, digunakan skema *first order upwind* pada *momentum*, *turbulent kinetic energy*, dan *specific dissipation rate* untuk menghindari terjadinya divergensi pada awal simulasi dikarenakan belum mencapai titik simulasi yang stabil

*Grid independence study* dilakukan pada setiap model menggunakan empat kualitas *mesh* yang berbeda. Perbedaan antara kualitas *mesh* yang digunakan pada simulasi CFD berada pada kriteria di bawah 2% untuk memastikan bahwa penambahan jumlah elemen pada *mesh* sudah tidak akan mempengaruhi hasil dari simulasi [17]. Pada setiap model, kualitas *mesh* halus dipilih sebagai *mesh* yang akan digunakan untuk variasi kasus. Meskipun kualitas *mesh* yang

Tabel 8.  
Data Permukaan Basah Lambung pada Variasi Fr

Fr	Permukaan Basah Lambung [m <sup>2</sup> ]			
	Monohull S0	Monohull S1	Katamaran S0	Katamaran S1
0,2	0,341	0,334	0,681	0,666
0,3	0,340	0,331	0,675	0,659
0,4	0,336	0,331	0,667	0,655
0,5	0,337	0,325	0,659	0,634
0,6	0,336	0,337	0,685	0,666
0,7	0,357	0,351	0,745	0,725

Tabel 9.  
Interferensi Hambatan pada Hasil C<sub>T</sub> Model S0 dan S1

Fr	Faktor Interferensi (FI)		Perbedaan FI S0-S1
	S0	S1	
0.2	2.61%	3.52%	0.90%
0.3	6.32%	8.06%	1.74%
0.4	15.32%	15.64%	0.32%
0.5	24.90%	20.83%	-4.07%
0.6	16.43%	9.60%	-6.83%
0.7	9.44%	6.81%	-2.63%

Tabel 10.  
Faktor Interferensi Hambatan Viskos & Gelombang pada Model S0 dan S1

Fr	Katamaran Model S0		Katamaran Model S1	
	$\beta$	$\tau$	$\beta$	$\tau$
0.2	1.093	1.044	1.089	1.108
0.3	1.090	1.162	1.090	1.235
0.4	1.087	1.374	1.088	1.369
0.5	1.089	1.548	1.078	1.441
0.6	1.094	1.409	1.078	1.202
0.7	1.088	1.259	1.081	1.158

lebih rendah sudah memenuhi kriteria 2%, *mesh* halus dipilih dikarenakan keakuratan dalam memberikan hasil seperti *wave pattern* yang lebih baik dengan waktu simulasi CFD yang relatif tidak tinggi. Hasil dari *grid independence study* pada setiap model dapat dilihat pada Tabel 5 dan grafik hasil dapat dilihat pada Gambar 4.

Variasi kasus digunakan berdasarkan nilai *Froude Number* dari model. Nilai kecepatan yang didapatkan dari *Froude Number* pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 4. Penghitungan nilai Fr dilakukan menggunakan persamaan 1 dan Fr<sub>v</sub> menggunakan persamaan 2.

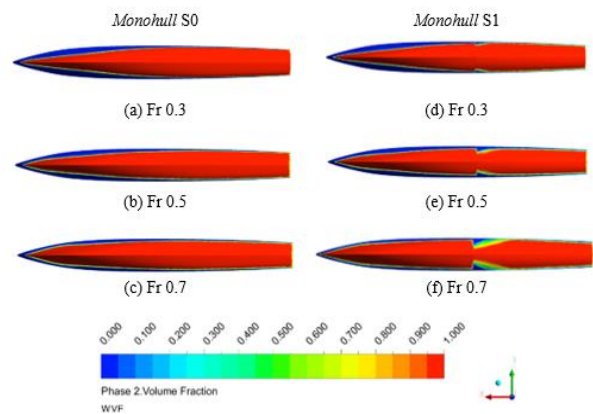
IV. ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Validasi Hasil Simulasi CFD dengan Eksperimen

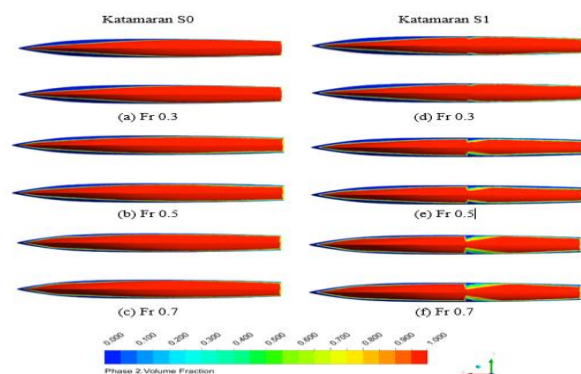
Hasil dari simulasi CFD pada model *monohull* dan katamaran S0 dilakukan validasi dengan hasil eksperimen oleh [5]. Data hasil validasi dapat dilihat pada Tabel 6. dan grafik perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen dapat dilihat pada Gambar 5. Dari Tabel 6., dapat dilihat bahwa hasil simulasi CFD mempunyai keselarasan yang baik dengan hasil eksperimen dengan perbedaan terbesar bernilai -4,65% pada *monohull* dan -4,58% pada model katamaran. Perbedaan ini memasuki kriteria validasi dengan kriteria perbedaan perbedaan maksimal 5%. Oleh karena itu, hasil simulasi CFD dapat dinyatakan valid dan pengaturan yang digunakan pada model S0 dapat digunakan pada model S1.

B. Perbandingan Hasil Simulasi CFD pada Model S0 – S1

Dari hasil simulasi CFD pada model *monohull* dan katamaran S1, dilakukan analisa dan perbandingan dengan model *monohull* dan katamaran S0. Data hasil simulasi CFD pada model S1 dan perbandingan dengan model S0 dapat



Gambar 8. Visualisasi Permukaan Basah pada Model Monohull.



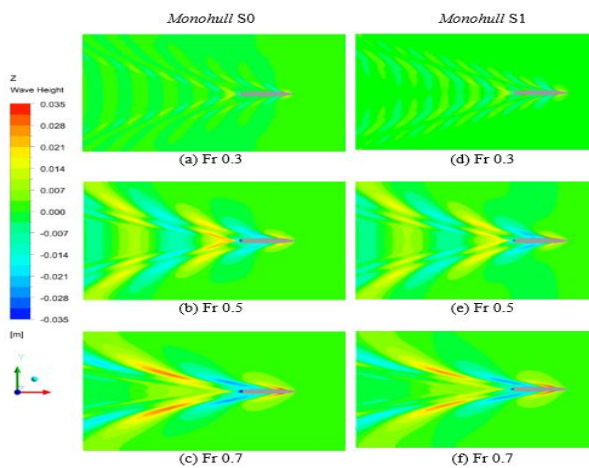
Gambar 9. Visualisasi Permukaan Basah pada Model Katamaran.

dilihat pada Tabel 7. Dari hasil perbandingan pada C<sub>T</sub> dapat dilihat bahwa pada model *monohull* S1 mengalami pengurangan nilai C<sub>T</sub> pada Fr 0,2 – 0,3, dan penambahan pada Fr 0,4 – 0,7. Pada model katamaran S1 mengalami pengurangan C<sub>T</sub> pada Fr 0,2 dan penambahan C<sub>T</sub> pada Fr 0,3 – 0,7. Hasil ini membuktikan bahwa pada nilai Fr yang rendah, *stepped hull* mampu mengurangi hambatan pada kapal apabila dibandingkan dengan model tanpa *stepped hull*. Grafik perbandingan ini dapat dilihat pada Gambar 6. Dari hasil ini dapat dilihat bahwa terjadi interferensi yang dihasilkan *demihull* dengan adanya penambahan nilai C<sub>T</sub> pada model katamaran.

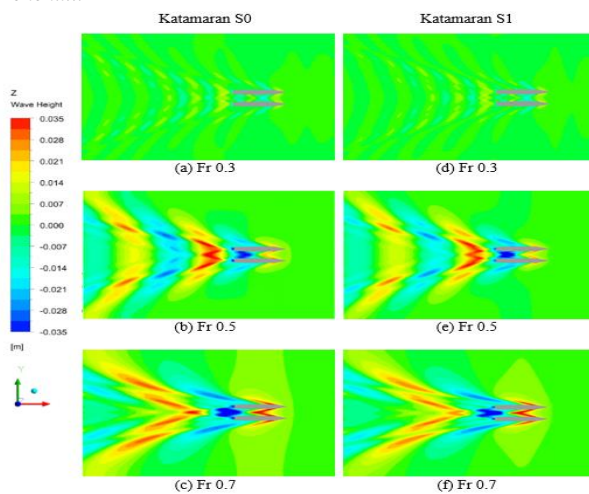
Hasil pada model S1 juga dibandingkan dengan nilai rasio hambatan total dengan *displacement* kapal (R<sub>T</sub>/Δ). Hasil perbandingan R<sub>T</sub>/Δ dapat dilihat pada Tabel 7. dan grafik perbandingan hasil dapat dilihat pada Gambar 7. Dari hasil perbandingan dapat dilihat bahwa pada model *monohull* S1 terjadi pengurangan nilai R<sub>T</sub>/Δ pada Fr 0,2 – 0,4, dan penambahan nilai R<sub>T</sub>/Δ pada Fr 0,5 – 0,7, dan pada model katamaran S1 terjadi penambahan R<sub>T</sub>/Δ pada Fr 0,2 – 0,7.

Hasil ini membuktikan meskipun nilai C<sub>T</sub> pada model katamaran S1 berkurang pada Fr 0,2, namun nilai R<sub>T</sub>/Δ selalu lebih besar apabila dibandingkan dengan model S0. Hasil yang didapatkan, mempunyai keselarasan yang baik dengan hasil eksperimen yang pernah dilakukan [8].

Hasil simulasi CFD mampu mendapatkan hasil yang sulit didapatkan apabila menggunakan uji eksperimen. Beberapa hasil ini adalah permukaan basah pada lambung pada kecepatan tertentu dan bentuk dari *wave pattern* yang dihasilkan oleh model. Hasil dari permukaan basah model pada kecepatan variasi kasus, dapat dilihat pada Tabel 8.



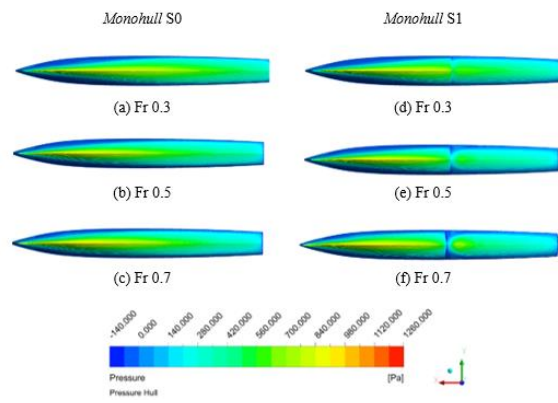
Gambar 10. Visualisasi Wave Pattern yang dihasilkan oleh Model Monohull.



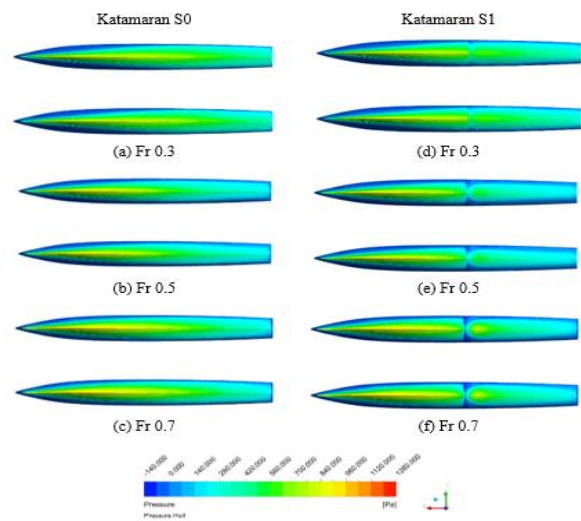
Gambar 11. Visualisasi Wave Pattern yang dihasilkan oleh Model Katamaran

Dari Tabel 8., dapat dilihat bahwa terjadi pengurangan pada nilai  $Fr$  0,4 – 0,6, namun terjadi penambahan pada  $Fr$  0,7. Hal ini bisa terjadi dikarenakan simulasi CFD dilakukan dengan *fixed body* sehingga permukaan basah akibat gelombang *spray* pada haluan model bertambah lebih banyak pada kecepatan tinggi. Visualisasi dari permukaan basah model dengan variabel *water volume fraction* dari simulasi CFD pada model *monohull* dapat dilihat pada Gambar 8. dan pada model katamaran dapat dilihat pada Gambar 9.

*Wave pattern* yang dihasilkan oleh model dibandingkan dari segi bentuk yang dihasilkan dan tinggi gelombang yang dihasilkan. Visualisasi *wave pattern* dari hasil simulasi CFD pada model *monohull* dapat dilihat pada Gambar 10., dan pada model katamaran dapat dilihat pada Gambar 11. Dapat dilihat pada Gambar 10. bahwa tidak ada perbedaan secara signifikan dari bentuk *wave pattern* yang dihasilkan oleh model *monohull* S0 dan S1. Perbedaan yang ada pada model *monohull* adalah tinggi gelombang yang dihasilkan oleh model S1 lebih rendah dibandingkan model S0. Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa terdapat suatu perbedaan pada segi bentuk *wave pattern* yang dihasilkan oleh model katamaran S0 dan S1. Perbedaan dapat dilihat pada hasil persilangan gelombang yang dihasilkan oleh *demihull* terutama pada  $Fr$  0,5 dan 0,7. Dapat dilihat pada Gambar 10. dan 11. bahwa penambahan kecepatan pada kapal membuat *wave pattern* yang dihasilkan mempunyai *kelvin wave angle* yang lebih kecil dan panjang gelombang yang dihasilkan menjadi lebih



Gambar 12. Visualisasi Kontur Tekanan pada Model Monohull S0 dan S1.



Gambar 13. Visualisasi Kontur Tekanan pada Model Katamaran S0 dan S1.

panjang. Perbandingan tekanan didapatkan untuk melihat bagaimana distribusi tekanan pada lambung pada saat dilakukan simulasi CFD. Visualisasi perbandingan tekanan pada model lambung S0 dan S1 monohull dapat dilihat pada Gambar 12 dan katamaran pada Gambar 13. Pada Gambar 12 dan 13 dapat dilihat bahwa kontur tekanan yang dihasilkan pada model monohull dan katamaran S0-S1 tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Pada Gambar 12 a-b-c dan 13 a-b-c dapat dilihat bahwa pada model S0 mempunyai persebaran tekanan yang uniform dengan tekanan terbesar berada pada bagian keel model dan tekanan bertambah seiring bertambahnya kecepatan. Pada Gambar 12 d-e-f dan 13 d-e-f dapat dilihat pula pada model S1 bahwa terdapat diskontinuitas dari persebaran tekanan pada bagian step dari model dengan tekanan mempunyai nilai yang kecil pada area sekitar step dengan seiring bertambah kecepatan, wilayah pada bagian step mengalami penurunan tekanan. Hal ini dapat diduga akibat terjadinya diskontinuitas dari aliran air pada bagian step model dan pengurangan bagian permukaan model yang basah akibat air. Dikarenakan bentuk haluan dari model S0 dan S1 identik, maka persebaran tekanan pada haluan tidak mengalami perbedaan.

### C. Interferensi Hambatan Model S0 dan S1

Pengaruh interferensi dari *demihull* pada katamaran dianalisis untuk mengetahui pengaruh *step* terhadap interferensi hambatan lambung katamaran. Interferensi

hambatan secara total didapatkan dengan menghitung Faktor Interferensi (FI) dengan persamaan sebagai berikut:

$$FI = \frac{C_{TKat} - C_{TMono}}{C_{TMono}} \quad (12)$$

Nilai FI pada model S0 dan S1 dapat dilihat pada Tabel 9. Dari Tabel 9, model S1 memiliki nilai FI yang lebih besar dibandingkan model S0 pada  $Fr$  0.2 – 0.4, sedangkan pada  $Fr$  0.5 – 0.7 model S1 memiliki nilai FI lebih kecil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan *step* mampu mengurangi interferensi hambatan dengan bertambahnya kecepatan.

Penurunan faktor interferensi hambatan viskos ( $\beta$ ) dan interferensi hambatan gelombang ( $\tau$ ) juga dilakukan dengan melakukan simulasi *full-viscous* untuk mendapatkan nilai koefisien hambatan viskos ( $C_v$ ) yang kemudian menggunakan persamaan (7) dapat didapatkan nilai  $\beta$  dan  $\tau$ . Hasil ini dapat dilihat pada Tabel 10. Dari Tabel 10 dapat dilihat bahwa nilai  $\beta$  model S0 dan S1 tidak memiliki perbedaan yang signifikan, sedangkan nilai  $\tau$  model S1 memiliki nilai yang lebih besar pada  $Fr$  0.2 – 0.3 dan lebih kecil pada  $Fr$  0.4 – 0.7.

## V. KESIMPULAN

Dari hasil analisa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa simulasi CFD dengan menggunakan *software* Ansys Fluent mendapatkan hasil dengan keselarasan yang baik dengan hasil eksperimen dengan perbedaan di bawah 5%, pengaruh *stepped hull* pada kapal katamaran adalah mampu mengurangi dan menambahkan hambatan kapal yang bergantung pada kecepatan kapal tersebut. Pada kecepatan rendah ( $< Fr$  0,3), hambatan kapal lebih rendah, dan pada kecepatan yang lebih tinggi ( $Fr$  0.3 – 0.7) terjadi penambahan hambatan, apabila dibandingkan dengan kapal tanpa *stepped hull*. Ditemukan pada  $Fr$  0,2 – 0,7, belum terjadi pengurangan yang signifikan terhadap permukaan basah lambung akibat adanya *step* pada lambung. Ditemukan bahwa penggunaan *step* pada lambung katamaran mampu mengurangi interferensi hambatan pada  $Fr > 0.4$ .

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Departemen Teknik Perkapalan ITS dan Kepala Laboratorium Hidrodinamika DTP-ITS atas fasilitas yang diberikan untuk dilakukan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan dukungan finansial melalui Beasiswa Unggulan tahun 2017 -

2020 melalui SK. 29799/A1.4/LL/2017.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Faber, M. 't Hoen, R. V. (CE, and J. C. (UCL), *Historical Trends in Ship Design Efficiency: The Impact of Hull Form on Efficiency*, no. March. Delft: CE Delft Committed to the Environment Through, 2016.
- [2] D. Frisk and L. Tegehall, "Prediction of High-Speed Planing Hull Resistance and Running Attitude. A Numerical Study Using Computational Fluid Dynamics," University of Technology Gothenburg, 2015.
- [3] D. Savitsky and M. Morabito, "Surface wave contours associated with the Forebody wake of stepped planing hulls," *Meet. New York Metrop. Sect. Soc. Nav. Archit. Mar.*, 2009, [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/read/51195906/surface-wave-contours-associated-with-the-forebody-wake-of-stepped->
- [4] A. De Marco, S. Mancini, S. Miranda, R. Scognamiglio, and L. Vitiello, "Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull," *Appl. Ocean Res.*, vol. 64, pp. 135–154, 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.02.004.
- [5] A. F. Insel, M. & Molland, *An Investigation Into The Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans*. London: RINA, 1992.
- [6] V. A. Dubrovsky, "Multi-hulls: some new options as the result of science development," *Brodogradnja*, vol. 61, no. 2, pp. 142–152, 2010.
- [7] R. Garrett and D. Wilkie, *The Symmetry of Sailing: The Physics of Sailing for Yachtsmen*. Dobbs Ferry, New York: Sheridan House, 1996.
- [8] 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 Cr. Technol.*, vol. 52, pp. 55–75, 2010, [Online]. Available: <https://eprints.soton.ac.uk/172717/>.
- [9] V. L., M. S., B. F. B. A., and C. S., "Stepped hulls: model experimental tests and sea trial data," 2012.
- [10] D. Yang, Z. Sun, Y. Jiang, and Z. Gao, "A study on the air cavity under a stepped planing hull," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 12, 2019, doi: 10.3390/JMSE7120468.
- [11] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [12] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method*, 2nd ed. Harlow, Essex : Pearson Education Ltd, 2007.
- [13] S. A. Harvald, *Resistance and Propulsion of Ships*. New York: Wiley & Sons, 1983.
- [14] G. Hughes, "Friction and form resistance in turbulent flow, and a proposed formulation for use in model and ship correlation." London, 1954. [Online]. Available: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9a642c53-27f0-45fe-a5e4-5e1296b62af1>.
- [15] ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, "Practical Guidelines for Ship CFD Applications," 2011, [Online]. Available: <https://ittc.info/media/1357/75-03-02-03.pdf>.
- [16] P. R. Couser, A. F. Molland, N. A. Armstrong, and I. K. A. P. Utama, "Calm water powering predictions for high-speed catamarans," in *Proceedings of 4th International Conference on Fast Sea Transportation*, 1997, vol. 31, pp. 765–774.
- [17] J. D. Anderson, *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. New York: Mc Graw Hill Inc, 1995.
- [18] J. Mathieu, *Turbulent flows*. Cambridge, 2000.
- [19] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994, doi: 10.2514/3.12149.
- [20] F. Stern *et al.*, "Computational ship hydrodynamics: nowadays and way forward," in *International Shipbuilding Progress*, 2013, vol. 60, no. 1–4, pp. 3–105, doi: 10.3233/ISP-130090