



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh Variasi Teknik Mesh Dan Model Turbulensi Pada Simulasi Openfoam Terhadap Perhitungan Hambatan *Planing Warped Hull*

M. Agus Sri Hartono¹⁾, Andi Trimulyono²⁾, M. Luqman Hakim³⁾

¹⁾Laboratorium Hidrodinamika

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

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

Abstrak

Pemanfaatan perangkat lunak open-source OpenFOAM untuk simulasi hambatan kapal planing hull bertipe warped masih relatif terbatas jika dibandingkan dengan pengaplikasiannya pada lambung displacement. Mengingat hasil komputasi dari metode ini memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap pengaturan parameter numerik, evaluasi komprehensif sangat diperlukan guna memastikan tingkat akurasi prediksi hidrodinamika. Dalam penelitian ini difokuskan pada evaluasi pengaruh variasi parameter setup OpenFOAM—yang mencakup ukuran mesh (coarse, medium, fine), model turbulensi ($k-\epsilon$ dan $k-\omega$ SST), serta teknik mesh (Static Grid, Moving Grid, dan Overset Grid)—terhadap nilai komponen hambatan kapal planing hull pada rentang Fr 1,5 – 2,6. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji tingkat keandalan hasil simulasi komputasi OpenFOAM melalui verifikasi dan validasi secara empiris menggunakan data towing tank dalam memprediksi hambatan total kapal. Objek kajian pada penelitian ini adalah model kapal cepat bertipe warped planing hull (Model Warp-3) yang disimulasikan pada rentang kecepatan dengan bilangan Froude (Fr) 0,65 hingga 1,0. Penelitian ini mengaplikasikan metode simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan penyelesaian persamaan Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Pendekatan analitik dilakukan melalui pengujian sensitivitas parameter yang mengkombinasikan tiga teknik diskretisasi mesh (Static Grid, Moving Grid, dan Overset Grid) serta dua pemodelan turbulensi ($k-\epsilon$ dan $k-\omega$ SST) di bawah kondisi dinamis dua derajat kebebasan (heave dan pitch). Pendekatan Grid Convergence Index (GCI) diterapkan untuk studi konvergensi mesh, yang dilanjutkan dengan validasi Root Mean Square Error (RMSE) terhadap data eksperimen towing tank. Hasil analisis mengindikasikan bahwa adanya faktor penentu dalam pemilihan model turbulensi dan disesuaikan dengan kondisi pada nilai Fr atau nilai karena hambatan selinear dengan kecepatan. Selain itu, terdapat adanya hubungan berbanding terbalik antara hambatan tekanan atau hambatan sisa dan hambatan kekentalan atau hambatan gesek.

Kata Kunci : Hambatan, Numerical Setup, Planing hull, OpenFoam

1. PENDAHULUAN

Peningkatan efisiensi energi pada kapal menjadi salah satu fokus utama dalam pengembangan teknologi transportasi laut modern. Hambatan kapal merupakan salah satu parameter hidrodinamika yang paling berpengaruh terhadap kebutuhan daya propulsi, konsumsi bahan bakar, serta emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, prediksi hambatan kapal yang akurat menjadi tahapan penting dalam proses desain maupun optimasi performa kapal. Dalam mengetahui performa kapal juga dibutuhkan sebuah pengujian

atau eksperimen dan simulasi dengan metode numerik (Computational Fluid Dynamics) yang mencakup aspek-aspek penting seperti hambatan, stabilitas, dan olah gerak kapal [1]. CFD atau disebut sebagai Computational Fluid Dynamics adalah cabang dari ilmu dinamika fluida yang menerapkan metode numerik dalam mempelajari dan menganalisis aliran fluida, termasuk di dalamnya perpindahan panas. Aliran fluida dapat bersifat mampat atau tak-mampat, laminar, atau turbulence, dalam keadaan tunak atau tak-tunak.

Alasan utama digunakannya komputasi OpenFOAM ialah karena dapat meminimalkan biaya untuk pengoperasian komputasi tanpa adanya biaya lisensi dibandingkan dilakukan pengujian eksperimental dan mensimulasikan CFD komersial package. Selain bebas lisensi, OpenFOAM menyediakan akses penuh terhadap source code sehingga pengguna dapat memodifikasi solver, skema numerik, model turbulensi, maupun algoritma penyelesaian sesuai kebutuhan penelitian. Fleksibilitas tersebut menjadikan OpenFOAM banyak digunakan dalam pengembangan metode CFD dibandingkan perangkat lunak komersial yang bersifat closed-source. [2]. Namun, sebagian besar telah digunakan untuk meneliti hambatan lambung kapal displacement dan semi-planing.

Di sisi lain, komputasi numerik masih menimbulkan gap atau celah yang panjang antara presisi dalam melakukan eksperimen towing tank dengan simplicity persamaan matematika. Kelebihan dalam CFD dapat mendetailkan jangkauan yang tidak dapat dicapai oleh towing tank seperti halnya: distribusi tekanan, tegangan-geser, dan area permukaan basah [6], yang masih menjadi tantangan. Namun, masih terdapat kekurangan pada akurasi simulasi aliran eksternal planing hull karena dalam hasil yang didapatkan bervariasi [7].

Kapal tipe tersebut merupakan jenis kapal cepat yang menghasilkan gaya angkat hidrodinamika sehingga sebagian besar berat kapal ditopang oleh tekanan dinamis air ketika beroperasi pada kecepatan tinggi. Karakteristik tersebut menyebabkan fenomena aliran di sekitar lambung menjadi jauh lebih kompleks dibandingkan displacement hull karena melibatkan interaksi permukaan bebas, spray formation, trim, sinkage, serta perubahan wetted surface area secara dinamis.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa akurasi simulasi OpenFOAM sangat dipengaruhi oleh pemilihan numerical setup. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Islam dan Guedes Soares (2019), OpenFOAM digunakan untuk mengevaluasi tingkat ketidakpastian (uncertainty) pada prediksi hambatan kapal cepat melalui pendekatan Verification and Validation (V&V). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi hambatan, trim, dan sinkage tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik geometri kapal, tetapi juga sangat sensitif terhadap parameter numerik seperti ukuran mesh, time step, model turbulensi, dan proses konvergensi. Melalui studi pada beberapa kapal benchmark, penulis menemukan bahwa perbedaan pengaturan numerik dapat menghasilkan variasi hasil yang cukup

signifikan meskipun menggunakan model fisik yang sama. Penggunaan OpenFOAM dalam penelitian ini menjadi menarik karena berbeda dengan perangkat lunak CFD komersial yang umumnya memiliki keterbatasan akses terhadap kode sumber, OpenFOAM menyediakan akses penuh terhadap algoritma numerik, model turbulensi, serta prosedur perhitungan yang digunakan. Karakteristik open-source tersebut memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi bagi peneliti untuk melakukan modifikasi solver, pengembangan model fisik, serta evaluasi mendalam terhadap pengaruh parameter numerik yang digunakan. Selain itu, OpenFOAM tidak memerlukan biaya lisensi sehingga lebih ekonomis untuk penelitian akademik maupun pengembangan metode numerik dalam skala besar. Temuan Islam dan Guedes Soares menunjukkan bahwa keandalan hasil simulasi OpenFOAM sangat bergantung pada pemilihan numerical setup yang tepat, sehingga analisis sensitivitas parameter menjadi tahapan penting sebelum hasil simulasi digunakan untuk tujuan desain maupun optimasi performa kapal. Penelitian tersebut juga menegaskan bahwa validasi yang dilakukan pada suatu jenis lambung tidak dapat secara langsung diterapkan pada jenis lambung lainnya karena karakteristik aliran yang berbeda dapat menghasilkan tingkat ketidakpastian yang berbeda pula.

Li (2019) melakukan studi verifikasi dan validasi OpenFOAM pada lambung planing hull prismatic generik dan menunjukkan bahwa pemilihan ukuran mesh serta kondisi batas berpengaruh signifikan terhadap akurasi prediksi hambatan dan trim kapal [2]. Mancini juga mengidentifikasi bahwa proses V&V simulasi CFD pada planing hull memiliki kompleksitas tersendiri akibat fenomena permukaan bebas yang sangat dinamis [3]. Pemilihan parameter setup yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakakuratan hasil yang signifikan, terutama pada simulasi aliran kompleks di sekitar lambung planing hull yang melibatkan interaksi gelombang, efek permukaan bebas, dan aliran turbulen tinggi.

Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya masih menggunakan software CFD komersial, sedangkan penelitian yang mengevaluasi sensitivitas numerical setup pada OpenFOAM khususnya untuk planing hull berbentuk warped dengan mempertimbangkan kombinasi teknik mesh, turbulence model, serta gerakan heave dan pitch secara bersamaan masih sangat terbatas. Untuk itu, penelitian ini menganalisis pengaruh numerical setup yang dilakukan perlakuan teknik mesh dan turbulence berbeda dalam menganalisis hambatan total pada kapal Planing Hull dengan menggunakan open-

source (OpenFOAM). Metode yang digunakan adalah simulasi Computational Fluid Dynamic (CFD) berdasarkan Reynold-averaged Navier-Stroke (RANS). Pendekatan analisis menggunakan FVM (Finite Volume Method) karena metode ini dominan digunakan dalam memprediksi karakteristik kapal planing dengan akurasi yang lebih baik.

Objek penelitian adalah kapal warped planing NSS Series dalam studi E. Begovic, dkk. yang telah diuji melalui eksperimen towing tank dan dijadikan referensi validasi. Dengan membandingkan hasil pada perlakuan teknik mesh berbeda dan pemilihan turbulen model berbeda dan diuji dengan Fr dalam rentang 0.65 – 1.0.

Di antara berbagai model turbulensi yang tersedia pada OpenFOAM, model $k-\varepsilon$ dan $k-\omega$ SST merupakan dua model yang paling banyak digunakan untuk simulasi hidrodinamika kapal karena memiliki karakteristik prediksi yang berbeda terhadap boundary layer, separasi aliran, serta fenomena free surface. Namun demikian, performa kedua model tersebut pada simulasi planning hull masih menunjukkan hasil yang bervariasi sehingga memerlukan evaluasi lebih lanjut.

Penelitian ini memiliki kebaruan berupa evaluasi sensitivitas numerical setup OpenFOAM melalui kombinasi tiga teknik mesh (Static Grid, Moving Grid, Overset Grid), dua turbulen model ($k-\varepsilon$ dan $k-\omega$ SST), serta analisis dua derajat kebebasan (heave dan pitch) pada lambung planing hull tipe warped yang telah divalidasi menggunakan data eksperimen towing tank.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman teoritis tentang hubungan numerical setup terhadap hambatan, tetapi juga memberikan rekomendasi teknis yang relevan untuk: pemilihan setup pada OpenFoam atau CFD komersial, perancangan dan performa kapal planning, dan fenomena kapal planing. Penelitian ini diharapkan menghasilkan rekomendasi numerical setup OpenFOAM yang paling akurat untuk simulasi planing hull sehingga dapat dijadikan acuan dalam penelitian hidrodinamika kapal cepat, proses desain awal, maupun optimasi performa kapal tanpa ketergantungan pada perangkat lunak CFD komersial.

2. METODE

2.1. Geometri

Penelitian ini menggunakan geometri kapal berbentuk *Warped forms* yang terdapat studi yang dilakukan oleh E.Begovic, dkk. [7], dan dilakukan simulasi menggunakan *opensource* (OpenFOAM). Untuk memprediksi nilai hambatan total, yang terdiri dari dua komponen hambatan: hambatan

tekanan dan hambatan gesek atau viskositas, dan koefisien *drag* (C_t). Material fluida yang dipakai pada penelitian ini adalah air tawar dengan densitas 1000 kg/m^3 . Simulasi akan dilakukan pada sudut trim 3.934° , 3.848° , 3.77° , dan 3.485° . Kecepatan aliran yang digunakan pada penelitian ini dengan nilai Fr 1,582, 1,922, 2,261, 2,600. Dengan model Warp-3 yang memiliki ukuran utama seperti tercantum dalam Tabel 1 di bawah ini.

Model W3 ini dipilih untuk mengetahui seberapa besar hambatan total pada model yang spesifik terkait pengaruhnya sudut *deadrise* (9.09° - 35.75°).

Tabel 1. Ukuran Utama Model W3

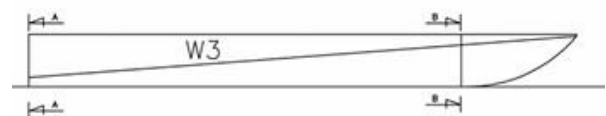
No	Parameter	Nilai	Unit
1	L	1,9	Meter
2	B	0,424	Meter
3	T_{Ap}	0,115	Meter
4	Δ	318,520	Newton
5	$L/\nabla^{1/3}$	6,86	-
6	L/B	4,48	-
7	VCG	0,586	-
8	Trim	1,666	°
9	β	9,09-35,75	°
10	LCG	0,156	-

2.2. Pemodelan Kapal

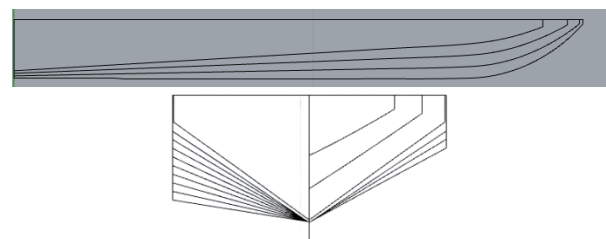
Model 3D stl (*mesh*) *planing hull*, yaitu dengan *software* Rhinoceros dan dilakukan pengecekan model 3D bertujuan untuk memastikan model tersebut *closed mesh*. Kemudian dapat dilakukan simulasi di OpenFOAM. Pada Gambar 1 merupakan 3D model kapal W3.



Gambar 1. 3D Kapal Model Warp-3



Gambar 2. Sketsa kapal Model Warp-3



Gambar 3. Half Body Plan dan BodyPlan W3

2.3. Parameter Setup Planning Hull

Penelitian ini difokuskan pada pengaruh teknik mesh berbeda dan terhadap nilai hambatan pada kapal planing hull. Terdapat tiga variasi teknik *mesh*, dua variasi model turbulen, dan dua derajat kebebasan. Setup tersebut dirancang untuk mengeksplorasi dampak dari terhadap performa kapal *planing hull*. Tabel 2 menunjukkan *setup* yang dipakai pada model Warp-3.

Tabel 2. *Parameter Setup OpenFoam*

Teknik Mesh	Variasi Turbulence Modelling	DOF
Static Grid	kOmega k-Epsilon SST	-
Moving Grid	kOmega k-Epsilon SST	2
Overset Grid	kOmega k-Epsilon SST	2
Fr	0.65 , 0.79 , 0.93, 1.0	

Simulasi *Unsteady (transient)* dan persamaan *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* dengan model turbulen *k – ω Shear Stress Transport (SST)* dan *k-epsilon* akan digunakan pada seluruh kecepatan kapal di penelitian ini.

2.4. Setup Simulasi OpenFoam

Tabel 3 menunjukkan *setup* simulasi OpenFOAM yang akan digunakan dalam penelitian ini, yang dipilih berdasarkan proses validasi.

Tabel 3. *Setup simulasi CFD*

Item	Setting
Solver	Transient to SteadyState
Turbulence Model	kOmegaSST , k-Epsilon
Scheme	PIMPLE
Velocity	Blended
Turbulence (Omega)	Second Order linearUpwind
Turbulence (k)	Second Order linearUpwind
Time Step	1000 s

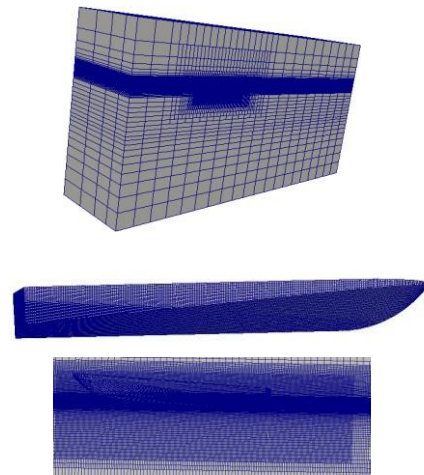
2.5. Boundary Condition

Boundary condition masing-masing akan didefinisikan sebagai berikut. *Inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet*, *outlet* didefinisikan sebagai *pressure outlet*, dan bagian samping pada domain didefinisikan sebagai *symmetry* karena model yang disimulasikan hanya setengah bagian saja supaya menghemat waktu komputasi. Model kapal didefinisikan sebagai *movingWallVelocity*. Tabel 4 menunjukkan setup pada *boundary condition* yang digunakan.

Tabel 4. *Boundary Condition*

Boundary	Velocity	Pressure
Inlet	fixedValue	fixedFlux
Outlet	outletPhaseMeanVelocity	zGradient
Hull	movingWallVelocity	fixedFlux
Sides	symmetryPlane	symmetryP
Bottom	symmetryPlane	symmetryP
Top	pressureInletOutletVelocity	prghTotal Pressure

2.6. Visualisasi Mesh

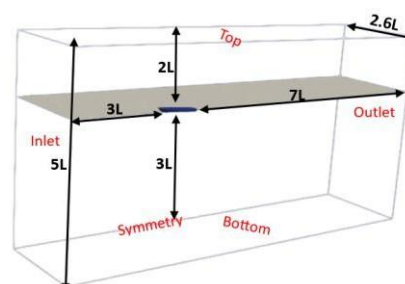


Gambar 4. Visual Mesh pada domain dan Wall

Mesh yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tipe *hex-dominant unstructured mesh* melalui dua tahap meshing, yakni : *blockMesh* (pada domain) dan *snappyHexMesh* (pada domain dan hull). Pada simulasi digunakan layer yang diaplikasikan di sekitar *wall hull* dengan nilai *first layer thickness*, yakni $Y^+ = 30$.

2.7. Dimensi Domain

Sesuai dengan pedoman ITTC (*International Towing Tank Conference*), Simulasi numerik yang dilakukan untuk memprediksi hasil hambatan kapal memerlukan pembuatan *computational domain*. Menurut standar ITTC [17], perhitungan komputasi numerik memerlukan *virtual towing tank* yang digunakan sebagai *background domain*. Pada tabel 3 menunjukkan ukuran domain yang digunakan selama simulasi.



Gambar 5. Domain virtual Towing Tank

Tabel 5. Dimensi Towing Tank

No	Parameter	Background
1	Length (m)	3L from FP 7L from AP
2	Height (m)	2L from deck 3L from deck
3	Breadth (m)	2.6L from symmetry

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Verifikasi

Adapun pada penelitian ini, dilakukan verifikasi dilakukan untuk menilai ketidakpastian simulasi akibat kesalahan diskretisasi, khususnya terkait jumlah sel mesh menggunakan metode *Grid Convergence Index* (GCI) untuk mengevaluasi konvergensi numerik secara sistematis seiring dengan penyempurnaan *mesh*. Pendekatan GCI digunakan untuk mengevaluasi ketidakpastian numerik. Dalam hal menghitung rasio galat antara dua tingkat resolusi *grid* yang berbeda, metode GCI memberikan informasi penting mengenai seberapa cepat galat menurun seiring peningkatan resolusi *grid*.

Analisis ketidakpastian numerik (*numerical uncertainty analysis*) menggunakan faktor *refinement* (penghalusan) seragam sebesar $\sqrt{2}$ untuk diskretisasi spasial dan temporal guna membuat tiga konfigurasi mesh, yaitu *fine* (halus), *medium* (sedang), dan *coarse* (kasar). Strategi ini bertujuan untuk menjaga konsistensi nilai bilangan *Courant* pada setiap konfigurasi, mengikuti rekomendasi dari Terziev dkk. [11]. Studi ini menghitung *Grid Convergence Index* (GCI) menggunakan metode *generalized Richardson extrapolation* (Persamaan 9) [12]

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

Tabel 6. Calculation GCI

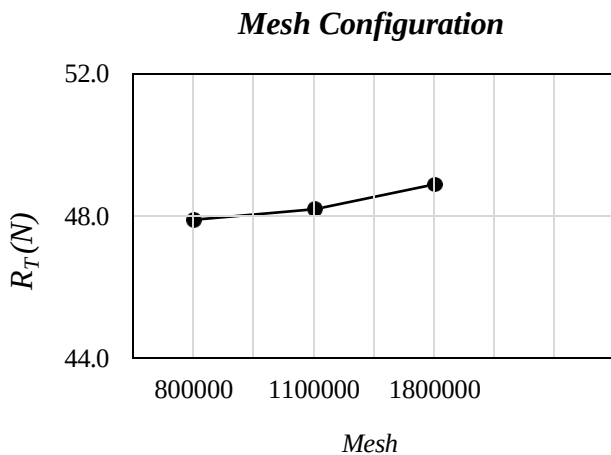
Parameter	Symbol	Nilai
<i>Fine Setting</i> (<i>Mesh; Time step</i>)	N ₁	1.800.000 [cells]; 0.002[s]
<i>Medium Setting</i> (<i>Mesh; Time step</i>)	N ₂	1.100.000 [cells]; 0.002 [s]
<i>Coarse Setting</i> (<i>Mesh; Time step</i>)	N ₃	800.000 [cells]; 0.002 [s]
<i>Refinement factor</i>	r ₂₁	$\sqrt{2}$
<i>Refinement factor</i>	r ₃₂	$\sqrt{2}$
<i>Fine solution</i>	Φ ₁	4,89E+01 N
<i>Medium solution</i>	Φ ₂	4,82E+01 N
<i>Coarse solution</i>	φ ₃	4,79E+01 N
φ ₂ -φ ₁	ε ₂₁	0,7
φ ₃ -φ ₂	ε ₃₂	0,3
<i>Convergence ratio</i>	R	2,33
<i>Type of convergence</i>	(-)	Monotonic
<i>Order of accuracy</i>	pa	-2,57
<i>Uncertainty</i>	[(GCI _{fine21})] [%]	3,13

Tabel 6 merangkum sampel hasil *uncertainty* (ketidakpastian) yang dilakukan pada model turbulensi k-OmegaSST dengan teknik *moving Mesh* pada Fr = 2.6 . *Grid Convergence Index* sebesar 3,13% menunjukkan konvergensi monotonik, dan rasio konvergensi berada di antara 0 dan 1. Selain itu, *order accuracy* menunjukkan nilai yang wajar, yaitu 2,57. Studi ini menggunakan tiga konfigurasi mesh mulai dari 800.000 sel (*coarse*/kasar) hingga 1.800.000 sel (*fine*/halus), dengan solusi *resistance* (hambatan) menunjukkan *error* sebesar 0,3 dan 0,7 masing-masing untuk perbandingan *fine-medium* dan *medium-coarse*.

Selain itu, dilakukan verifikasi menggunakan *Grid independence study* dengan tiga variasi kerapatan *mesh* yang dilakukan untuk ketelitian atau kehalusan *grid* dalam menentukan efektivitas dan akurasi hasil simulasi.

Tabel 7. Konfigurasi Mesh dengan Hambatan

Cell	Configuration	Rt (N)	Error(%)
800000	Coarse	47.90	
1100000	Medium	48.20	0.6
1800000	Fine	48.90	1.5



Gambar 5. Grafik Konfigurasi Mesh

3.2. Validasi

Tahap validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh E.Begovic, dkk.[10]. Validasi data hasil diperoleh berdasarkan pendekatan rumus pada Persamaan 2 dan Persamaan 3 menghitung RMSE (*Root Mean Square Error*), yang mengukur kesalahan dari sampel berdasarkan variasi kecepatan.

$$E_{\psi} \% = \left| \frac{\psi_{numeric} - \psi_{experiment}}{\psi_{experiment}} \right| \times 100 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N F_i^2}{N}} \quad (3)$$

Tabel 8. Hasil Validasi Nilai Hambatan

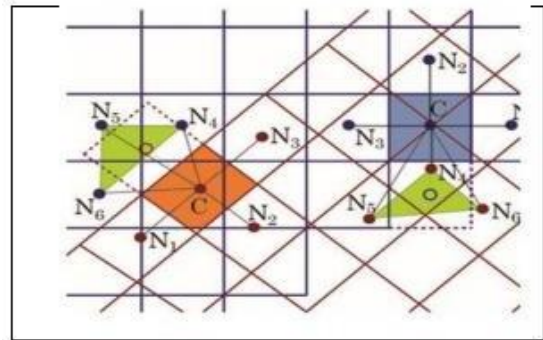
Hasil	Fr	Rt	RMSE
Eksperimen	0.65	42.33 N	
CFD		41.9 N	
Error (%)		0.42	
Hasil	Fr	Rt	
Eksperimen	0.79	45.66 N	
CFD		45.2	
Error (%)		0.4	2.32%
Hasil	Fr	Rt	
Eksperimen	0.93	48.95 N	
CFD		46.5 N	
Error (%)		4.9	
Hasil	Fr	Rt	
Eksperimen	1.0	50.69 N	
CFD		48.9 N	
Error (%)		3.55	

3.3. Mesh Technique

Overset Mesh

Overset mesh digunakan untuk menyelesaikan persamaan gerak dan rotasi objek, yang terjadi pada objek padat yang berinteraksi dengan fluida [13]. Metode *overset mesh* umum

digunakan untuk simulasi numerik uji manuver, uji *roll decay*, dan estimasi respons kapal terhadap gelombang. Pada Gambar 6, dapat dilihat bagaimana transfer data bekerja pada metode *overset mesh*. Visualisasi *meshing* dapat dilihat pada gambar 6, yaitu kondisi *overset mesh* sebelum *running*. Terdapat posisi yang berbeda pada bagian *overset* untuk menerjemahkan sifat-sifat fisik yang bekerja, termasuk gerak 2DOF (dua derajat kebebasan) kapal. Pada gambar 6, terdapat sel aktif pada setiap ujung geometri *overset* sebagai penerima donor (*donor recipient*) dan sel pasif pada latar belakang (*background*), yang digantikan oleh sel *overset*.



Gambar 6. Metode Overset Mesh [14]

Moving Mesh

Pada metode ini, seluruh grid dipindahkan sesuai dengan gerakan kapal. Pendekatan ini memiliki beberapa keunggulan karena hanya variabel aliran yang perlu dikoreksi sesuai dengan gerakan kapal. Metode ini sangat baik, dan galat (*error*) komputasinya kecil. Di sisi lain, metode ini hanya berlaku untuk gerakan satu benda kaku (*rigid body*). Teknik *moving mesh* memiliki dua kelemahan utama dan signifikan dalam pengujian ketahanan lambung kapal, yaitu perlunya membuat *set-up free surface* yang mana latar belakang (*background*) bergerak bebas, sementara objek yang diteliti tidak bergerak. Penelitian lain mengenai *moving mesh* juga telah dilakukan untuk aplikasi pada CFD [15].

Kelemahan kedua adalah dapat menimbulkan osilasi tambahan atau gelombang semu (*spurious waves*) yang memengaruhi *trim* dan *sinkage*, sehingga dapat menyebabkan kesalahan dalam analisis. Gambar 11a merupakan visualisasi *moving mesh* sebelum analisis. Gambar 11b memiliki kotak merah, di mana kotak merah tersebut menunjukkan terjadinya osilasi atau gelombang semu.

Static Mesh

Static mesh (mesh statis) adalah salah satu metode *meshing* dalam simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) di mana *grid* atau *mesh* komputasi tetap diam (tidak berubah posisi

maupun bentuknya) selama proses simulasi berlangsung, berbeda dengan *overset mesh* atau *moving mesh* yang *mesh*-nya ikut bergerak atau berubah mengikuti gerakan objek.

Pada metode *static mesh*, kapal (*hull*) di posisikan tetap pada domain komputasi, sementara aliran fluida (air dan udara) yang bergerak melewati lambung kapal. Artinya, bukan kapal yang "bergerak" melalui air secara fisik dalam simulasi, melainkan air yang dialirkan (*inlet velocity*) melewati kapal yang diam, mirip prinsip pengujian di *towing tank*.

3.4. Turbulence Modelling

k-Epsilon

k-epsilon menyelesaikan dua persamaan transport tambahan, yaitu untuk energi kinetik turbulensi (k) dan laju disipasi turbulensi (ϵ). Model ini menggunakan pendekatan *wall function* pada y^+ lebih dari 30, di mana *mesh* dekat dinding sengaja dibuat kasar dan sel pertama berada pada daerah *log-law region*, sehingga model menggunakan rumus semi-empiris (*wall function*) untuk menjembatani ke dinding. Pendekatan ini murah secara komputasi tetapi dapat menjadi tidak akurat jika asumsi *wall function* dilanggar, misalnya oleh gradien tekanan yang kuat.

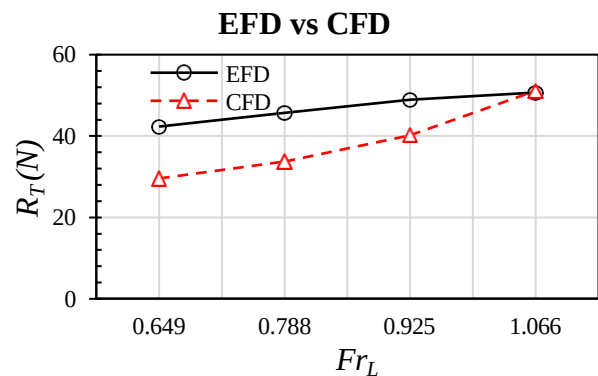
Kekurangan utama model ini adalah akurasi menurun pada aliran dengan separasi kuat dan gradien tekanan adversal (*adverse pressure gradient*), sehingga kurang cocok untuk kasus yang melibatkan lapisan batas (*boundary layer*) yang kompleks.[16]

k-OmegaSST

Model SST k-omega menjadi strategi pemodelan turbulensi RANS yang tangguh untuk kapal karena kemampuannya memodelkan gradien tekanan adversal dan separasi aliran. Gradien tekanan adversal terjadi ketika tekanan meningkat searah aliran, yang dapat terjadi saat aliran air mengenai lambung kapal, terutama di sekitar daerah buritan (*stern*).

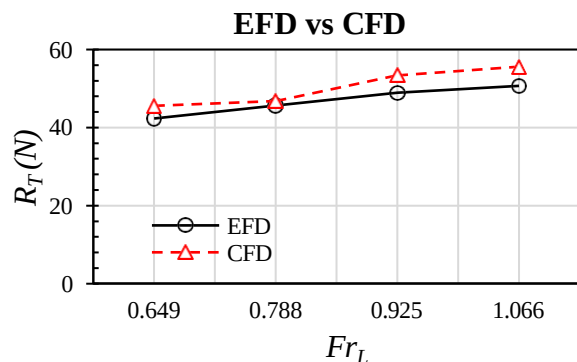
Berbeda dengan model k-epsilon, model k-omegaSST dapat diintegrasikan langsung melalui *viscous sublayer* tanpa memerlukan *wall function*, sehingga jauh lebih akurat untuk aplikasi *aerospace* (perhitungan gaya angkat dan hambatan pada *airfoil*), aliran dengan efek lapisan batas yang kuat, serta kasus dengan gradien tekanan adversal dan separasi ringan. Namun, hal ini membutuhkan *mesh* yang jauh lebih halus di daerah dekat dinding ($y^+ \approx 1$). [18,19,20]

3.5. Hasil Simulasi dengan Static Mesh



Gambar 7. Grafik Hasil Hambatan dengan kOmegaSST

Karakteristik hasil simulasi yang sama, seperti hasil penelitian oleh E.Begovic, dkk.[7], yang mana koreksi nilai *error*-nya di bawah 5% di setiap simulasi. Nilai *error* paling tinggi pada proses validasi ini, yakni sebesar 30% pada kecepatan (Fr 0.65).



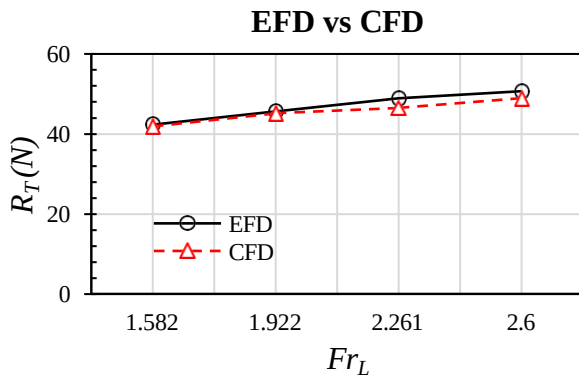
Gambar 8. Grafik Hasil Hambatan dengan kEpsilon

Pada Gambar 7 menyajikan perbandingan nilai hambatan total (R_t) terhadap bilangan Froude (Fr) menggunakan dua pendekatan berbeda, yaitu melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (R_t CFD) yang digambarkan dengan garis biru dan pengujian fisik (R_t Eks) yang diilustrasikan dengan garis oranye. Jika ditinjau dari tingkat kesesuaian data, hasil simulasi CFD dengan *turbulence* SST menunjukkan akurasi yang lebih baik pada rentang bilangan Froude antara 0,65 hingga 1,0 dengan nilai *error* tidak melebihi 3% apabila dibandingkan dengan k-epsilon menunjukkan nilai *error* melebihi dari 2% dan dibawah dari 10%.

3.6. Hasil Simulasi dengan Dynamic Mesh

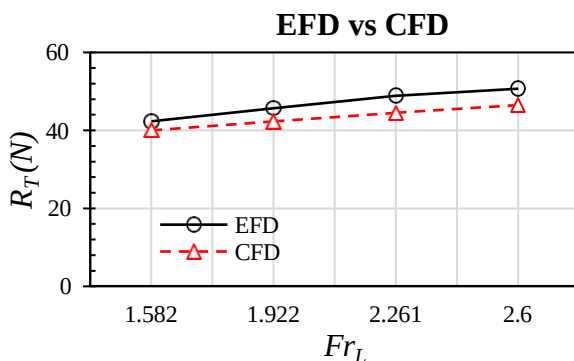
Hasil dari simulasi pada tabel 7. menunjukkan, bahwa karakteristik hasil simulasi yang sama, seperti hasil penelitian oleh E.Begovic, dkk.[7], yang mana koreksi nilai *error*-nya di

bawah 5% di setiap simulasi. Nilai *error* paling tinggi pada proses validasi ini, yakni sebesar 4.9% pada kecepatan (Fr 0.93).



Gambar 9. Grafik Hasil Hambatan dengan kOmegaSST

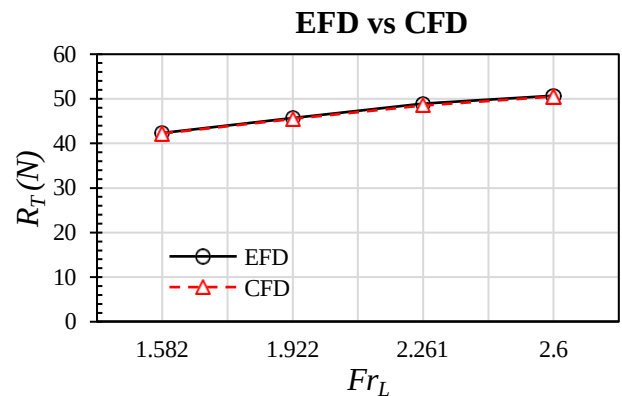
Pada Gambar 8 menyajikan perbandingan nilai hambatan total (R_t) terhadap bilangan Froude (Fr) menggunakan dua pendekatan berbeda, yaitu melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (R_t CFD) yang digambarkan dengan garis biru dan pengujian fisik (R_t Eks) yang diilustrasikan dengan garis oranye. Jika ditinjau dari tingkat kesesuaian data, hasil simulasi CFD dengan *turbulence* SST menunjukkan akurasi yang lebih baik pada rentang bilangan Froude antara 0.65 hingga 1.0 karena kedua garis terlihat saling berhimpitan



Gambar 10. Grafik Hasil Hambatan dengan kEpsilon

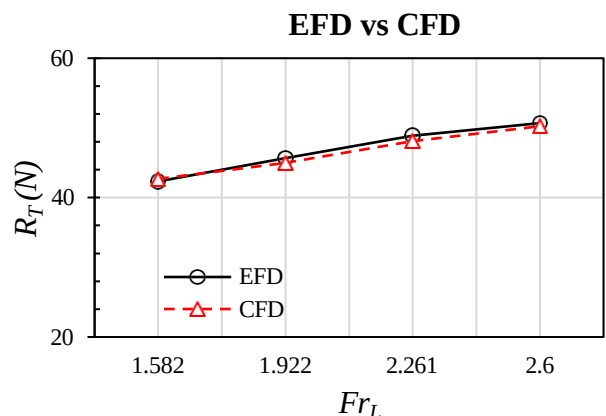
Jika dibandingkan untuk hasil *turbulence modelling* dengan k-Epsilon, terdapat perbedaan *error* yang masih relative besar daripada hasil kOmegaSST tetapi *error* dibawah 7%. Hal ini tetap mengindikasikan bahwa model simulasi CFD tersebut sangat valid dan mampu mendekati karakteristik kondisi pengujian riil dengan sangat baik.

3.7. Hasil Simulasi dengan Overset Mesh



Gambar 11. Grafik Hasil Hambatan dengan kOmegaSST

Pada Gambar 10 menunjukkan bahwa hasil hambatan total dengan menggunakan *turbulence modelling*, kOmegaSST, didapatkan hasil *error* mendekati 0,5% hingga 2 %. Dalam gambar 11 menunjukkan hasil grafik dengan menggunakan kEpsilon. Sedangkan dengan Teknik *mesh* yang sama tetapi menggunakan *turbulence modelling* berbeda, kEpsilon hasil *error* masih menunjukkan kurang dari 8,5%.



Gambar 12. Grafik Hasil Hambatan dengan kEpsilon

3.8. Visualisasi Bidang Aliran

Lambung kapal tipe *planing* (*planing hull*) umumnya beroperasi di tiga *region* kecepatan:

(i) *region displacement* atau perpindahan air ($Fr < 0.50$), (ii) *region transisi* ($0.50 < Fr < 0.85$), dan (iii) *region planing* ($Fr > 0.85$).

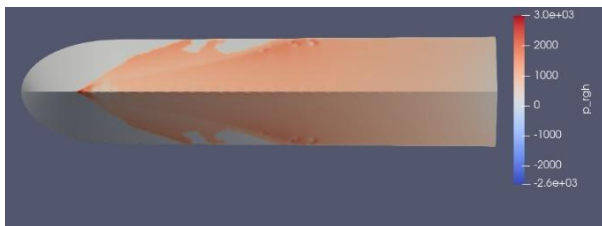
Dalam penelitian ini, hanya *region planing* saja yang dipelajari. Pola gelombang yang dihasilkan oleh kapal dan distribusi tekanan hidrodinamika pada lambung kapal pada empat bilangan Froude yang berbeda masing-masing ditunjukkan pada gambar 14 dan gambar 13 dengan metode *Moving Mesh* dan *turbulence* k-Epsilon.

Ukuran dan sudut dari *wake* (gelombang buritan/jejak air) sangat didominasi oleh jenis lambung dan kecepatan kapal. Lambung tipe *planing* berselancar di atas permukaan air. Seiring meningkatnya kecepatan, area kontak dengan air menjadi lebih sedikit karena adanya gaya angkat

hidrodinamika (*hydrodynamic lift*) yang kuat serta hambatan pembentukan gelombang (*wave-making resistance*) yang lebih kecil. Oleh karena itu, ukuran dan sudut gelombang buritan mengecil pada kecepatan tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.

Dengan meningkatnya bilangan Froude, lambung kapal akan berselancar di atas permukaan air. Seiring meningkatnya gaya angkat, area kontak dengan air akan berkurang pada bagian haluan kapal. Pada wilayah kecepatan yang lebih tinggi, hambatan kapal utamanya didominasi oleh hambatan viskos (*viscous drag*) dan hambatan cipratan air (*spray drag*), bukan oleh hambatan pembentukan gelombang. Distribusi hidrodinamika dari tekanan yang mengenai lambung kapal ditunjukkan pada Gambar 13.

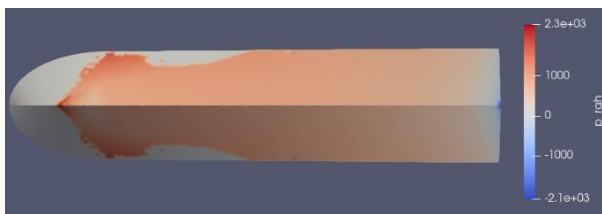
Fr 1.0



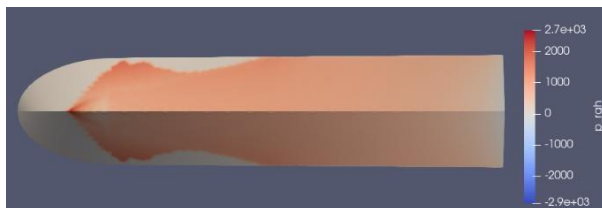
Fr 0.93



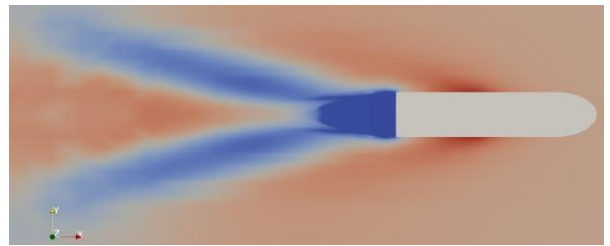
Fr 0.78



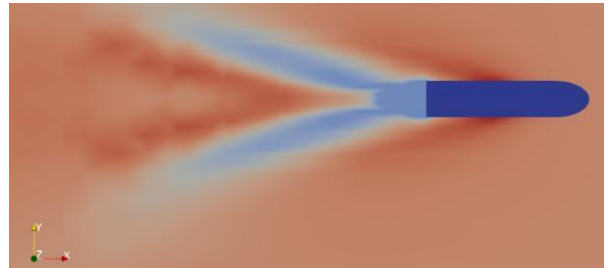
Fr 0.65



Gambar 13. *Pressure condition* pada perbedaan Fr



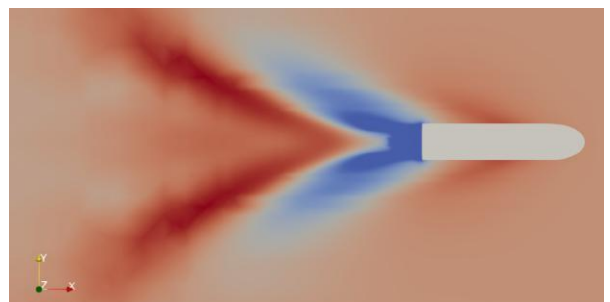
Fr 1.0



Fr 0.93



Fr 0.788



Fr 0.65

Gambar 14. Gelombang elevasi pada Fr berbeda-beda

Pada kecepatan tinggi menghasilkan cipratan air (*spray*) di bagian *stagnation* yang mempengaruhi distribusi tekanan, hal ini dapat dilihat sebagai sudut cipratan yang tajam di dekat haluan. Seiring meningkatnya gaya angkat (*lift force*) pada kecepatan tinggi, volume lambung kapal yang tenggelam secara dinamis (*dynamic immersed volume*) akan berkurang. Oleh karena itu, pada kecepatan tinggi, tekanan hidrodinamika didistribusikan ke area yang lebih kecil di bagian bawah lambung kapal.

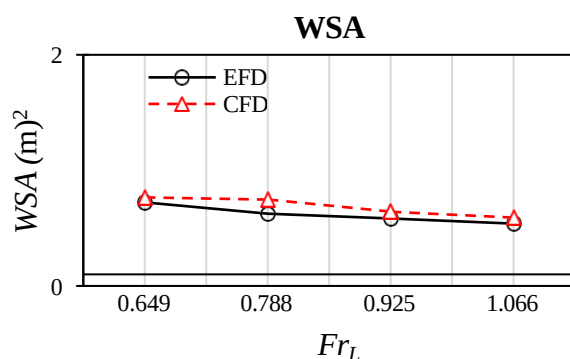
3.9. Wetted Surface Area

Nilai WSA ditunjukkan pada gambar 14, terjadi perbedaan yang tidak signifikan pada Fr 2.6 dengan 1.92 yang mengindikasikan hambatan yang dicapai pada nilai galatnya $< 3\%$ atau dapat disebut hambatan terkecil dibandingkan pada Fr 2.26 yang menunjukkan hambatan masih dalam *range* 2% sampai 5% dikarenakan perubahan WSA juga ada kaitannya pada komponen nilai hambatan R_p dan R_v .

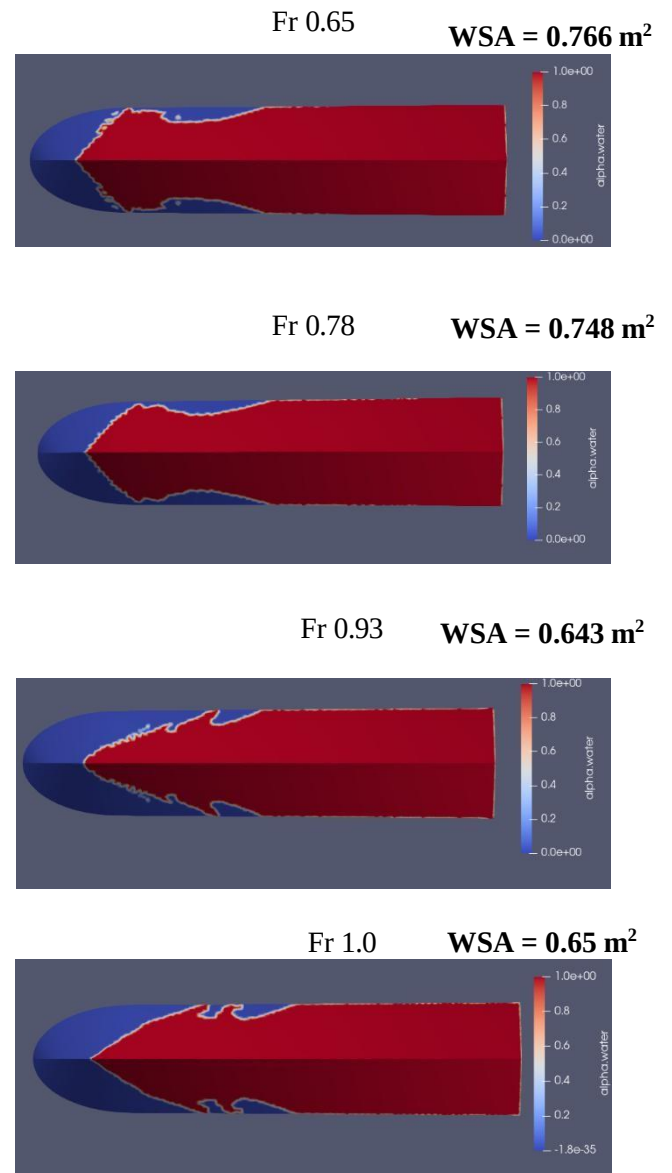
Selain itu, sesuai dengan karakteristik fisis lambung planing, di mana pada Fr yang semakin tinggi, gaya angkat dinamis (*dynamic lift*) yang bekerja pada lambung menyebabkan proporsi hambatan bergeser dari dominasi hambatan tekanan/gelombang menuju dominasi hambatan gesek.

Mengindikasikan bahwa kenaikan nilai WSA CFD yang diperoleh melalui metode integrasi fraksi volume air (*alpha.water*) pada rentang Fr menengah-tinggi kemungkinan besar tidak sepenuhnya merepresentasikan luas area yang secara fisis berkontribusi terhadap gaya gesek, melainkan turut mencakup lapisan tipis semburan air (*spray*) atau *thin film* pada zona chine dan haluan yang tertangkap sebagai wilayah "basah" secara numerik, tetapi kontribusinya terhadap tegangan geser dinding relatif kecil dibandingkan area basah utama pada permukaan lambung.

Pada Gambar 16 menunjukkan visualisasi fraksi volume (*alpha.water*) merepresentasikan keberhasilan pembentukan lapisan antarmuka cair-gas pada permukaan benda padat. Penurunan *Wetted Surface Area* (WSA) secara fundamental adalah proses manipulasi lapisan batas (*boundary layer*). Untuk beberapa Fr terdapat pengurangan WSA mengindikasikan bahwa penurunan nilai hambatan gesek (*frictional drag* karena tegangan geser yang terjadi pada area berlapis gas menjadi sangat kecil hingga mendekati nol).



Gambar 15. Grafik WSA pada Dynamic Mesh dengan kOmegaSST



Gambar 16. Mass Fraction Hull pada Fr berbeda-beda

Pada beberapa gambar 16 yang ditampilkan Luasan area basah yang berbanding lurus dengan hambatan gesek (R_f), telah disebutkan sebelumnya bahwa semakin cepat suatu kapal *planing* berlayar maka luasan WSA semakin berkurang dan maka semakin kecil hambatan yang dihasilkan. Untuk itu, nilai WSA yang didapat dari simulasi pada Fr 1.0 didapat hambatan terkecil sedangkan hambatan terbesar terjadi pada Fr 0.65.

3.10. Trim dan Komponen Hambatan Total

Tabel 9. Nilai Komponen Hambatan

Fr	Cp (10 ³)	Cv (10 ³)	Ct (10 ³)
1.0	3.9	3.376	7.27
0.93	5.568	3.478	9.05
0.788	7.170	3.284	10.4
0.65	5.33	1.701	14.09

Pada studi validasi *resistance planing hull* dengan model turbulensi berbasis SST k- ω , hasil CFD menunjukkan error sekitar 0,4 – 1,5% terhadap data eksperimen model W3, jauh lebih akurat dibanding metode k-epsilon yang selisih *error*-nya sekitar 1-3%, karena pendekatan CFD menangkap perilaku dinamis lambung *planing* secara lebih efektif. Akan tetapi, hal ini juga tak terlepas dari adanya peran teknik *meshing* yang dipakai maka dari sini dapat ditarik garis besar bahwa *turbulence modelling* hanya menunjukkan efek sedikit dalam akurasi hasil hambatan total.

Pada komponen hambatan Total terdiri dari dua bagian, yaitu Hambatan Tekanan (*Rpressure*) dan Hambatan *viscouse* (*Rv*). Dengan tabel 8 yang dipaparkan nilai koefisien tekanan terlihat dominan dan mempengaruhi komponen gelombang dan komponen tekanan viskos karena dari nilai Cp berfluktuatif dan lebih besar nilai ketimbang nilai Cv yang makin berkurang dari kecepatan tinggi kapal ke kecepatan rendah kapal. Selain itu dilakukan pengecekan nilai trim yang telah disimulasikan.

Tabel 9. Nilai Trim

Fr	Rt	Trim (°)
1.0	48.8937	3.485
0.93	46.33893	3.77
0.788	45.20825	3.792
0.65	41.85837	3.848

Pada hasil simulasi dengan Fr 1.582 nilai didapat trim 3.848° nilai masih dibawah pada kecepatan tinggi dan tertinggi pada nilai Fr 2.6 yang secara eksplisit menunjukkan bahwa nilai Trim memiliki pengaruh sedikit dalam hal perhitungan hambatan menunjukkan sensitivitas mesh terdapat hal utama dalam akurasi hambatan

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi pada penelitian ini, dapat disimpulkan menjadi beberapa poin berikut ini.

1. Berdasarkan uji sensitivitas pengaturan numerik (numerical setup), konfigurasi yang paling optimal dan menghasilkan akurasi tertinggi adalah

kombinasi penggunaan teknik Overset Mesh dengan model turbulensi k- ω SST. Pemodelan turbulensi k- ω SST terbukti memiliki akurasi superior dengan rentang galat (error) hanya sebesar 0,4% hingga 1,5% terhadap data eksperimental towing tank.

2. Selain itu, Setiap model Turbulen memiliki keunggulan masing masing tergantung dari teknik mesh yang digunakan dan juga memiliki kekurangan dalam menentukan akurasi ditentukan oleh setup yang dilakukan. Selain itu, komponen hambatan yang dominan dipengaruhi oleh komponen hambatan tekanan atau hambatan sisa tetapi juga hambatan viscous atau hambatan gesek memiliki pengaruh dalam nilai hambatan total. Juga, nilai WSA berbanding lurus terhadap nilai gaya viscous (friction), semakin nilai WSA kecil semakin kecil hambatan yang dihasilkan serta nilai trim tidak terlalu berpengaruh signifikan dalam nilai hambatan pada kasus kapal ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Demirel *et al.*, “Uncertainty Analysis in Ship Resistance Prediction using OpenFOAM,” *Ocean Engineering*, vol. 191, 2019.
- [2] J. Park *et al.*, “Development of a Numerical Simulation Tool for Efficient and Robust Prediction of Ship Resistance,” *Int. J. Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 9, no. 5, 2017.
- [3] D. Hurtado and R. Paredes, “Numerical Hull Resistance Calculation of a Catamaran using OpenFOAM,” *Ship Science and Technology*, 2017.
- [4] “CFD Analysis of the Influence of Biofouling Growth on Ship Resistance under Variable Trim and Draft Conditions,” *Ocean Engineering*, 2026.
- [5] A. Del Buono *et al.*, “Full-Scale RANS Validation of Multi-Fidelity Bow Optimization for a RoRo Cargo Ship,” 2025.
- [6] M. G. Kibria and M. Rahaman, “Verification and Validation of the Added Resistance of a Container Ship in Head Waves using CFD Technique,” 2025.
- [7] E. Begovic and C. Bertorello, “Resistance assessment of warped hullform,” *Ocean Engineering*, vol. 56, pp. 28–42, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.08.004.

- [8] Li, J. (2019). *Verification and Validation Study of OpenFOAM on the Generic Prismatic Planing Hull Form*. Tesis Master, Virginia Tech.
- [9] De Luca, F., Mancini, S., Miranda, S., Pensa, C. (2016). *An Extended Verification and Validation Study of CFD Simulations for Planing Hulls*. Journal of Ship Research, 60(2), 101–118.
- [10] Brizzolara, A., Serra, F. *Accuracy of CFD Codes in the Prediction of Planing Surfaces Hydrodynamic Characteristics*.
- [11] Terziev, M., Tezdogan, T., Incecik, A. (2020). *A posteriori error and uncertainty estimation in computational ship hydrodynamics*. Ocean Engineering, 208, 107434.
- [12] Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J. (2008). *Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications*. Journal of Fluids Engineering, 130(7).
- [13] S. Mancini, "The Problem of Verification and Validation Processes of CFD Simulations of Planing Hulls," Ph.D. dissertation, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italy, 2015.
- [14] Shi, X., Zhang, Y., Yum, D.J. (2019). *Prediction of Resistance and Planing Attitude for Prismatic Planing Hull using OpenFOAM*. Journal of Ocean Engineering and Technology.
- [15] Zhang, Z.R., Hui, L., Zhu, S.P., Feng, Z. (2006). *Application of CFD in ship engineering design practice and ship hydrodynamics*. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 18(3), 315–322.
- [16] W. Rodi and G. Scheuerer, "Scrutinizing the k - ϵ turbulence model under adverse pressure gradient conditions," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 108, no. 2, pp. 174–179, 1986.
- [17] ITTC (2014a) — "*Practical Guidelines for Ship CFD Application*", ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-02-03.
- [18] S. Sun *et al.*, "Towards a full-scale CFD guideline for simulating a ship advancing in open water," *Ship Technology Research*, 2023, doi: 10.1080/09377255.2023.2167537.
- [19] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [20] E. G. Paterson, R. V. Wilson, and F. Stern, "General-purpose parallel unsteady RANS ship hydrodynamics code: CFDSHIP-IOWA," IIHR Technical Report No. 431, Univ. of Iowa, Iowa City, IA, USA, 2003.