

STUDI PENGARUH VARIABEL-VARIABEL  
DALAM CFD UNTUK MENGHITUNG KOEFISIEN TAHANAN KAPAL

Deddy Chrismianto, Parlindungan Manik \*)

*Abstract*

*Commonly, the Computational Fluid Dynamic (CFD) analysis using the finite volume method, solid modeling is usually used in the early stage in order to prepare a mesh process before the computational process is executed. In this paper the CFD analysis must be executed to obtain a resistance coefficient value, and the verification should be done to ensure a result is close to experimental data.*

*In the CFD analysis, some parameters have been taken into account, including the variation of domain dimensions, variation of mesh sizes, and variation of boundary conditions, in which the comparison between the numerical analysis and experimental data showed good agreement in general.*

*The result of the case no.1 has a smaller difference of the resistance coefficients to the experimental data than other cases, in which the total resistance coefficient (Ct) has a difference about 1.95% of experimental data, the friction resistance (Cf) has a difference about 0.83% of experimental data, and there is a difference about 6.30% of experimental data for the residual resistance (Cr).*

*Key words: Solid modeling, Mesh, Resistance coefficient, Computational Fluid Dynamic (CFD).*

**Pendahuluan**

Dalam paper ini sebuah studi tentang analisis CFD yang seharusnya diterapkan untuk mendapatkan koefisien tahanan total kapal yang mendekati dengan hasil eksperimen. Dimana analisis ini dilakukan dengan menggunakan software CFX. Beberapa parameter, seperti ukuran domain, jumlah elemen *mesh*, dan jenis kondisi batas juga diselidiki untuk mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap hasil koefisien tahanan kapal total yang diperoleh dibandingkan dengan hasil eksperimen.

**Model Kapal**

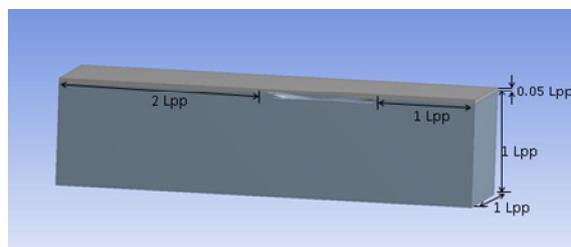
Model kapal yang digunakan untuk penelitian ini adalah KRISO *Container Ship* (KCS) dengan informasi dari dimensi model KCS tersebut tersedia dalam Tabel 1. Sedangkan percobaan dilakukan di KRISO *towing tank* (200m x 16m x 7m) pada model dengan menggunakan skala 1/31.6 dari KCS asli (dengan dimensi L = 230m , B = 22.2m , D = 19m , dengan T = 10.8m), dimana mempunyai *froude number* (Fn) = 0,26 dan *reynolds number* (Re) sebesar 1.4x10<sup>7</sup> . Model ini mempunyai kondisi *heave* dan *pitch* pada skala rancangan statis penuh dengan tanpa trim. Sedangkan untuk memvalidasi hasil simulasi CFD, digunakan tahanan total dan data gelombang untuk KRISO *Container Ship* ( KCS ) yang diperoleh melalui tes tangki penarik ( Kim et al , 2001 ).

Selanjutnya, model kapal KCS disiapkan dengan membuat domain permukaan bebas (*free surface*) untuk analisis CFD menggunakan software CFX. Model ini dibuat sebagai pemodelan solid yang ada di kotak domain dengan dimensi kotak telah ditetapkan. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 , ada beberapa jenis dimensi yang mencakup jarak dari haluan kapal ke batas depan kotak sebesar 1 kali panjang kapal (1 Lpp), dari buritan kapal ke batas belakang kotak sebesar 2 kali panjang kapal (2 Lpp), dari permukaan bebas

ke batas atas kotak sebesar 0,05 kali panjang kapal (0,05 Lpp), dari permukaan bebas ke batas bawah kotak sebesar 1 kali panjang kapal (1 Lpp), dan jarak badan kapal ke batas samping kotak sebesar 1 kali panjang kapal (1 Lpp).

Tabel 1. Dimensi KCS model

	Prototype	Model
Scale ratio	1.0	1/31.6
Speed (m/s)	12.3467	2.1962
Fn	0.26	0.26
Re	2.4E+09	1.4E+07
Length	230.0	7.2786
Breadth	32.2	1.019
Height	19.0	0.6013
Draught	10.8	0.3418
W S A ( m 2 )	9498	9.4379
Displ. ( m 3 )	52030	1.649
C b	0.6505	0.6505



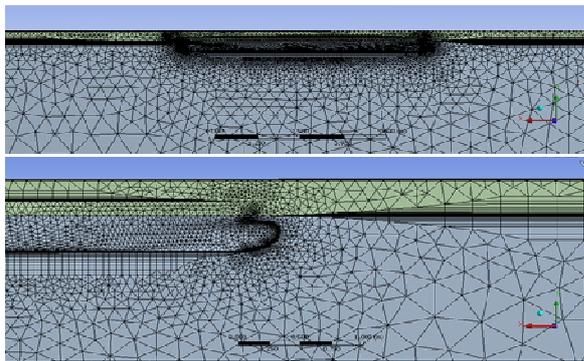
Gambar 1. Dimensi kotak domain

**Strategi Meshing**

Dalam analisis CFD domain aliran dibagi menjadi sejumlah besar sel komputasi. Jumlah sel dalam *mesh* seharusnya cukup besar untuk merepresentasikan geometri dan fenomena dalam domain aliran. Kualitas mesh sangat penting untuk melakukan analisis CFD yang dapat diandalkan [1, 2, 3]. Di studi ini, metode

\*) Staf Pengajar Jurusan Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

CFX *mesh* dipilih untuk menghasilkan *mesh* secara otomatis. *Mesh* yang dihasilkan dalam metode CFX *mesh* menggunakan pilihan transisi rendah untuk memperbaiki *mesh* secara bertahap melalui zona-zona yang ada di dalam domain. Elemen tetrahedral tak terstruktur dipilih dalam domain dan *wall*, sedangkan untuk permukaan bebas dan batas badan kapal, lapisan *mesh* prismatic (*inflation mesh*) diaplikasikan dengan kenaikan eksponensial antara lapisan satu dengan lainnya. Di permukaan bebas, jumlah lapisan didefinisikan sebanyak 40 lapisan dan sekitar batas badan kapal, total lapisan adalah sekitar 20 lapisan. Selain ukuran *mesh* pada kotak domain, ukuran *mesh* pada badan kapal dibagi lagi menjadi empat jenis *mesh* yang berbeda, yaitu, ceruk belakang, badan kapal bagian tengah, ceruk depan, dan geladak.



Gambar 2. Hasil mesh untuk analisa CFD

Gambar 2 menunjukkan hasil *meshing* menggunakan metode CFX *mesh*, di mana jumlah elemen yang telah dihasilkan adalah sekitar 2,5 juta yang mencakup unsur-unsur baik tetrahedral dan prisma .

### Pengaturan CFD

Empat jenis kondisi batas yang digunakan dalam bidang batas yang berbeda meliputi: *Inlet*, *Outlet*, *Opening*, *Wall*, dan *Symmetry*. Sebuah kondisi batas *Inlet* digunakan untuk merepresentasikan bahwa aliran diarahkan masuk ke domain. Kondisi batas dapat diatur dalam beberapa cara tergantung pada model fisik tertentu yang digunakan untuk simulasi [4, 5]. Kondisi batas *Outlet* dapat digunakan untuk merepresentasikan bahwa aliran diarahkan keluar dari domain. Spesifikasi kondisi batas hidrodinamik (yaitu, massa dan momentum) untuk *Outlet* melibatkan beberapa batasan seperti tekanan statis, kecepatan atau aliran massa. Sementara *Wall* yang merupakan permukaan kedap air adalah kondisi batas standar untuk CFX. Dimana bisa menjadi dinding eksterior atau permukaan tipis. Pengaruh *Wall* pada aliran dapat menjadi kondisi *no slip* atau kondisi *free slip*. Dalam kasus *no slip*, cairan harus memiliki kecepatan yang sama dengan *Wall* terdekat, dimana kekasaran juga dapat dipertimbangkan. Di sisi lain, dalam kasus *free slip*, hanya tegangan geser yang bernilai nol, bukan kecepatan. Kondisi batas *Symmetry* memberlakukan kondisi 'mirror' untuk aliran di sisi lain badan kapal. Misalnya, komponen kecepatan normal bekerja pada

batas *Symmetry* sedangkan variabel skalar normal gradient ke batas kotak diatur ke nol.

$$U_n = 0 \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Model turbulensi yang digunakan dalam perhitungan adalah model SST berbasis  $k-\omega$  yang dipertimbangkan untuk perpindahan tegangan geser turbulen dan memberikan prediksi yang sangat akurat untuk jumlah pemisahan aliran melalui gradien tekanan. Secara rinci, fisik domain pada model permukaan bebas untuk batas-batas domainnya dapat dilihat pada Tabel 2.

Untuk pertimbangan komputasi, konvergensi berulang diasumsikan dengan cara residual normal. Residual RMS atas domain disyaratkan sebesar  $1E - 04$ . ANSYS CFX *Solver* menghitung solusi untuk berbagai persamaan. Namun, beberapa kasus menghasilkan nilai residual. Hal ini disebabkan persamaan tidak memenuhi sepenuhnya. Tentu saja, jika solusinya adalah eksak, maka residualnya adalah nol. Namun, karena persamaan hanya menghasilkan perkiraan fisik, hasil dalam sebuah solusi tidak selalu sesuai dengan kenyataan. Sementara, *raw residual*,  $[r]$ , dihitung sebagai ketidakseimbangan dalam sistem linierisasi pada persamaan diskrit. *Raw residual* tersebut kemudian dinormalisasi untuk tujuan monitoring penyelesaian dan untuk mendapatkan kriteria konvergensi. Sebuah prosedur normalisasi diberikan di bawah ini. Untuk setiap variabel solusi,  $\phi$ , residual normalisasi diberikan sebagai berikut [6]:

$$\left[ \frac{r_\phi}{a_p \Delta_\phi} \right] \dots\dots\dots (2)$$

Dimana  $r_\phi$  adalah *raw residual* ketidakseimbangan kontrol volume,  $a_p$  menyatakan koefisien kontrol volume dan  $\Delta_\phi$  menyatakan kisaran dari variabel dalam domain. Perhitungan eksak dari  $a_p$  dan  $\Delta_\phi$  tidak sederhana dan tidak disajikan di sini. Namun, ada dua catatan penting: pertama, residual yang dinormalisasi adalah independen dalam pilihan *time step* dan dugaan awal. Untuk aliran multifase, fraksi volume ikut dipertimbangkan. Hal ini untuk mencegah residual yang besar di lokasi dimana fraksi volume yang memiliki pengaruh besar diabaikan.

Kontrol *time step* untuk masalah *steady state*, software CFX menggunakan sebuah robust untuk formulasi implisit sehingga besar *time step* bisa ditentukan, dan mempercepat konvergensi untuk kondisi *steady state* secepat mungkin. Sebuah perhitungan *steady state* bi-

Tabel 2. Batas-batas domain menggunakan software CFX

Boundaries		Boundaries	
Boundary - Inlet		Boundary - Outlet	
Type	INLET	Type	OUTLET
Location	Inlet	Location	Outlet
<i>Settings</i>		<i>Settings</i>	
Flow Regime	Subsonic	Flow Regime	Subsonic
Mass And Momentum	Cartesian Velocity Components	Mass And Momentum	Static Pressure
U	2.1962e+00 [m s <sup>-1</sup> ]	Relative Pressure	P = Hydrostatic pressure
V	0.0000e+00 [m s <sup>-1</sup> ]	<b>Boundary - Sym</b>	
W	0.0000e+00 [m s <sup>-1</sup> ]	Type	SYMMETRY
Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio	Location	Sym
<b>Boundary - Top</b>		<i>Settings</i>	
Type	OPENING	<b>Boundary - Bottom</b>	
Location	Top	Type	WALL
<i>Settings</i>		Location	Bottom
Flow Regime	Subsonic	<i>Settings</i>	
Mass And Momentum	Entrainment	Mass And Momentum	Free Slip Wall
Relative Pressure	0.0000e+00 [Pa]	Fluid Pair	air   water
Turbulence	Zero Gradient	<b>Boundary - Hull</b>	
<b>Boundary - Side</b>		Type	WALL
Type	WALL	Location	Hull
Location	Side	<i>Settings</i>	
<i>Settings</i>		Mass And Momentum	No Slip Wall
Mass And Momentum	Free Slip Wall	Wall Roughness	Smooth Wall
Fluid Pair	air   water	Fluid Pair	air   water

asanya akan membutuhkan antara lima puluh sampai seratus *time step* untuk mencapai konvergensi. Dalam kasus ini biasanya dapat mengurangi jumlah *time step* yang diperlukan dengan menetapkan kondisi awal yang lebih mendekati aliran steady state. Meskipun secara keseluruhan *time step* yang besar bisa digunakan, namun jika *time step* terlalu besar akan menghasilkan perilaku konvergensi yang akan "goyah". Jika hal ini diamati, maka ukuran *time step* nya seharusnya dikurangi. Namun, jika *time step* yang terlalu kecil, maka konvergensi akan sangat lambat.

*Time step* mengijinkan ukuran *time step* tetap yang akan digunakan untuk persamaan yang dipilih di seluruh domain aliran. Untuk aliran yang didominasi oleh adveksi, ukuran *time step* seharusnya adalah skala panjang dibagi dengan skala kecepatan [7]. Sebuah pendekatan yang baik adalah waktu yang dinamis untuk aliran. Ini merupakan waktu yang dibutuhkan sebuah poin dalam aliran untuk membuat jalan melalui domain fluida. Bagi banyak simulasi perkiraan yang wajar adalah mudah untuk membuat berdasarkan panjang dari domain cairan dan kecepatan rata-rata, misalnya:

$$\Delta t = \frac{L}{2U} \dots\dots\dots (3)$$

Dalam perhitungan ini, *time step* diterapkan dalam rangka untuk mendapatkan stabilitas yang lebih baik dengan menggunakan dua jenis *time step*, yaitu : 0.01 detik dalam 20 langkah pertama dan 0,08 detik untuk setelah langkah 20 dengan persamaan di bawah ini.

$$0.01 [s] + 0.08 \{s\} * step (atstep - 20) \dots\dots\dots (4)$$

### Metodologi Penelitian

Framework untuk prosedur analisis CFD dalam rangka memperoleh koefisien tahanan total kapal yang mendekati data hasil eksperimen dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Menggunakan Desain Modeler ANSYS untuk membuat sebuah model kapal 3D, biasanya masih dalam model *surface* yang diimpor dari software CAD lain (IGES atau file STEP).
2. Dalam Desain Modeler ANSYS, model ini harus diubah menjadi model *solid* dan ditambahkan batas kotak domain untuk menggambarkan kondisi permukaan bebas (*free surface*).

3. Proses *meshing* diterapkan dengan menggunakan *mesh* tak terstruktur (gabungan antara *mesh* tetrahedral dan prisma) dengan mengaplikasikan metode CFX *mesh*. Disini, jumlah total elemen dan ukuran *mesh* serta nilai  $Y^+$  dipertimbangkan selama membuat beberapa variasi *mesh* tersebut.
4. Sedangkan analisis CFD dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa sifat kondisi batas termasuk *inlet*, *outlet*, *opening*, *wall*, dan *symmetry*.
5. Hasil analisis CFD dibandingkan dengan data eksperimen. Dimana hasil CFD sedekat mungkin dengan data hasil eksperimen.

### Hasil Analisis CFD

Maksud sub bab ini adalah untuk menghitung tahanan total kapal di mana hasil komputasi diharapkan mendekati dengan hasil eksperimen. Untuk tujuan ini, beberapa parameter telah diselidiki dan mendapatkan hasil sebagai berikut:

Variasi ukuran domain.

Ada enam jenis ukuran domain yang telah dihitung dengan menggunakan software CFX. Dimana hanya ukuran domain belakang kotak dan depan kotak yang dipertimbangkan untuk diubah. Selain ukuran domain bagian belakang dan depan, ukuran domain lainnya serta semua *mesh* dan *setup* CFD dibuat sama mengikuti pengaturan yang telah dijelaskan sebelumnya, seperti: ukuran *mesh*, kondisi batas, *time step*, dan kontrol konvergensi.

Hasilnya ditampilkan dalam Tabel 3. Umumnya, koefisien tahanan total ( $C_t$ ) diperoleh menunjukkan perbedaan yang kecil untuk setiap ukuran domain. Ukuran domain bagian belakang 2 Lpp dan bagian depan 1 Lpp memberikan perbedaan terkecil terhadap hasil eksperimen yaitu sekitar 2,76%. Sementara, pola gelombang masih menunjukkan refleksi gelombang pada arah *inlet* (Gambar 3). Cara sederhana untuk meredam refleksi gelombang adalah menggunakan ruang grid yang lebih besar di dekat batasan.

Tabel 3. Hasil perhitungan koefisien total tahanan ( $C_t$ ) untuk variasi ukuran domain

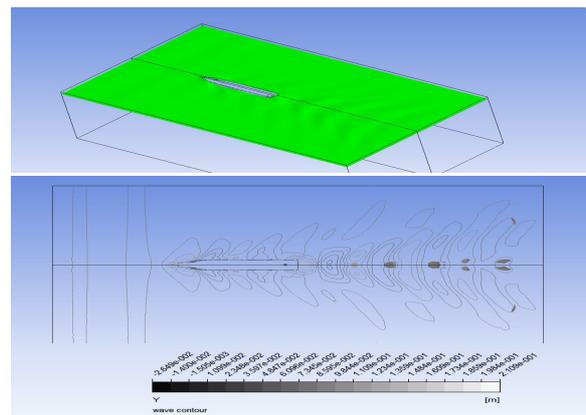
No.	After (Stern to boundary)	Forward (Bow to boundary)	$C_t$	Different %
			1.E-03	
1	2.5 Lpp	1 Lpp	3.699	3.98
2	2.25 Lpp	1 Lpp	3.686	3.63
3	2 Lpp	1 Lpp	3.655	2.76
4	2 Lpp	1.5 Lpp	3.917	10.12
5	2 Lpp	1.4 Lpp	3.736	5.04
6	2 Lpp	1.1 Lpp	3.709	4.28
	Experiment		3.557	

Strategi *meshing*.

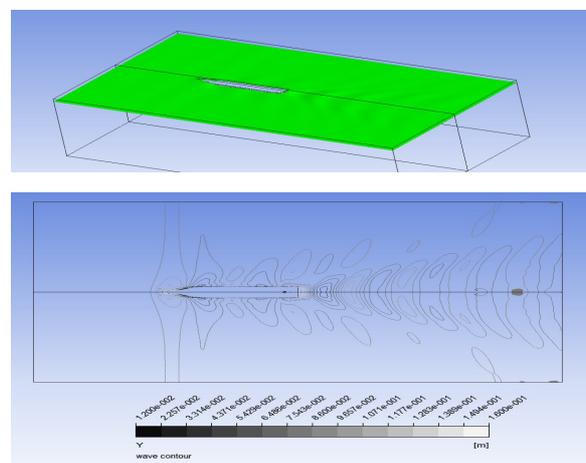
Dalam analisis sebelumnya, gelombang refleksi muncul di pola gelombang. Jadi, strategi *meshing* perlu dipertimbangkan untuk mencegah refleksi gelombang pada batas tersebut. Di sini, penggunaan ruang grid

yang lebih besar di dekat batasan diimplementasikan. Ukuran kotak domain ditetapkan lebih besar dengan ukuran elemen maksimum sebesar 0,8 m (jumlah elemen sekitar 2.537.256) diubah menjadi 1 m (jumlah elemen sekitar 2.071.355). Sedangkan kondisi fisik lainnya tetap seperti kondisi awal.

Hasil koefisien tahanan total ( $C_t$ ) tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, dimana untuk kotak domain dengan ukuran elemen maksimum sebesar 0,8 m,  $C_t = 3,655 \cdot 10^{-3}$ , dan untuk kotak domain dengan ukuran elemen maksimum sebesar 1m,  $C_t = 3.670 \cdot 10^{-3}$ . Sedangkan, gelombang refleksi berkurang setelah menggunakan strategi *meshing* yang baru (Gambar. 3 dan 4).



Gambar 3. Pola gelombang untuk ukuran elemen maksimum = 0,8 m



Gambar 4. Pola gelombang untuk ukuran elemen maksimum = 1 m

Variasi tipe kondisi batas.

Ada empat macam jenis kondisi batas dihitung, terutama pada perbedaan batas *outlet*, *side* dan *top* (Tabel 4). Tekanan hidrostatis diperhitungkan dan memasukkannya ke dalam kondisi awal dengan tujuan untuk mengurangi refleksi gelombang di daerah *inlet*. Selain itu, ketinggian ukuran domain dari permukaan bebas ke *top* ditambahkan sampai 0.1Lpp untuk mendapatkan koefisien tahanan yang mendekati dengan data

eksperimen. Hasil pada Tabel 5 menunjukkan bahwa semua kasus memiliki koefisien tahanan total (Ct) dekat dengan hasil eksperimen. Namun, kasus no.1 memiliki perbedaan paling kecil (1,95 %) dibanding yang lainnya, dan untuk pola gelombang juga menunjukkan kesamaan pola dengan data gelombang percobaan, terutama pada haluan kapal.

Tabel 4. Tipe kondisi-kondisi batas untuk variasi kasus

Boundary	Case	Case	Case	Case
Inle	Constant speed	Constant speed	Constant speed	Constant speed
Outlet	Outlet	Opening	Outlet	Outlet
Top	Opening	Opening	Wall	Opening
Sid	Free	Free	Free	Opening
Botto	Free	Free	Free	Free
Hul	No	No	No	No

Tabel 5. Hasil untuk koefisien tahanan pada masing-masing kondisi batas tiap *case*

Cases	Coefficient of Resistance (1.E-					
	Ct	Diff (%)	Cf	Diff (%)	Cr	Diff (%)
Case 1	3.626	1.95	2.856	0.83	0.771	6.30
Case 2	3.627	1.98	2.856	0.84	0.772	6.43
Case 3	3.708	4.26	2.861	1.01	0.848	16.94
Case 4	3.489	-1.90	2.862	1.05	0.628	-13.43
Experiment	3.557		2.832		0.725	

### Kesimpulan

Analisis CFD telah diselesaikan dengan menggunakan software CFX, di mana *mesh* tetrahedral tak terstruktur dan *mesh* prisma juga diimplementasikan menggunakan metode CFX *mesh*. Beberapa parameter seperti ukuran domain, ukuran *mesh*, dan jenis kondisi batas dipertimbangkan untuk mendapatkan hasil yang diharapkan mendekati dengan hasil eksperimen.

Hasil yang terbaik untuk perhitungan CFD diperoleh oleh kasus no.1 yang memiliki domain dengan ukuran domain 1 Lpp di depan, 2 Lpp di belakang, dan 0,1 Lpp dari permukaan bebas ke *top*. Sedangkan kondisi batas yang digunakan adalah kecepatan konstan dan tekanan hidrostatis untuk batas *inlet*, tekanan hidrostatis untuk batas *outlet*, *opening* untuk batas *top*, dan *wall* dengan *free slip* diterapkan dalam batas *side* dan batas *bottom*, sedangkan badan kapal dianggap sebagai *wall* tanpa *slip*. Kasus no.1 memiliki perbedaan terkecil dari koefisien tahanan total terhadap data eksperimen dibandingkan kasus lain, di mana koefisien tahanan total (Ct) memiliki selisih sekitar 1,95 % dari data eksperimen, tahanan gesek (Cf) memiliki selisih sekitar 0.83 % dari data eksperimen, dan ada perbedaan sekitar 6,30 % dari data eksperimen untuk tahanan residual (Cr). Demikian juga pola gelombang kasus no.1 juga menunjukkan kemiripan dengan percobaan.

Dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan CFD dipengaruhi oleh beberapa factor, seperti: ukuran domain, jumlah *mesh* dan tipe *mesh*, dan kondisi batas. Menentukan nilai yang sesuai untuk setiap parameter sehingga dapat menghasilkan koefisien tahanan total yang sangat mendekati dengan data eksperimen. Sementara *mesh* memiliki peran yang sangat penting untuk memproduksi pola gelombang, dimana *mesh* yang sangat halus di sekitar permukaan bebas dapat menghasilkan pola gelombang yang baik dan mengurangi difusi gelombang. Namun, *mesh* tersebut biasanya membutuhkan waktu yang lebih lama untuk satu perhitungan.

### Daftar Pustaka

1. Anderson JD. 1995. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications, McGraw Hill, pp. 81–83.
2. Blazek J. 2001. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier Science Ltd, Oxford England.
3. Ferziger JH, and Peric M. 2002. Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd ed., Springer-Verlag, pp. 157–206.
4. Liaw K. 2005. Simulation of Flow around Bluff Bodies and Bridge Deck Sections using CFD. Phd Thesis, School of Civil Engineering, University of Nottingham.

5. Menter FR, Kuntz M, and Bender RA. 2003. Scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions. AIAA 2003, paper No. 767.
6. Rhie CM, Chow WL., 1983. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. Vol. 21, pp. 1525–1532.
7. Seo, J.W, Seol, D.M, Lee, J.H, and Rhee, S.H, 2010. Flexible CFD meshing strategy for prediction of ship resistance and propulsion performance. Inter J Nav Archit Oc Engng, 2, pp.139-145.