



TUGAS AKHIR - MN 141581

**ANALISIS HAMBATAN PENAMBAHAN *WAVE PIERCING*
PADA KAPAL KATAMARAN MENGGUNAKAN CFD**

**Abdul Hakim Lillah
NRP 0411144000043**

**Dosen Pembimbing
Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



TUGAS AKHIR - MN 141581

**ANALISIS HAMBATAN PENAMBAHAN *WAVE PIERCING*
PADA KAPAL KATAMARAN MENGGUNAKAN CFD**

**Abdul Hakim Lillah
NRP 0411144000043**

**Dosen Pembimbing
Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



FINAL PROJECT - MN 141581

**ANALYSIS OF THE RESISTANCE ADDING WAVE
PIERCING TO CATAMARAN VESSEL USING CFD**

**Abdul Hakim Lillah
NRP 0411144000043**

**Supervisor
Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE & SHIPBUILDING ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS HAMBATAN PENAMBAHAN *WAVE PIERCING*
PADA KAPAL KATAMARAN MENGGUNAKAN CFD**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ABDUL HAKIM LILLAH
NRP 0411144000043

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing


Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D
NIP 19670406 199203 1 001

Mengetahui,
Kepala Departemen Teknik Perkapalan


Ir. Wasis Dwi Aryan, M.Sc., Ph.D.
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 12 JULI 2018

LEMBAR REVISI

ANALISIS HAMBATAN PENAMBAHAN *WAVE PIERCING* PADA KAPAL KATAMARAN MENGGUNAKAN CFD

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 4 Juli 2018

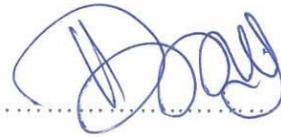
Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

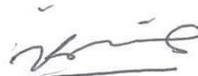
ABDUL HAKIM LILLAH
NRP 0411144000043

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

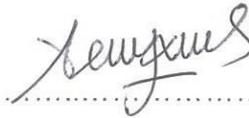
1. Dony Setyawan, S.T., M.Eng.



2. Dr. Ir. I Ketut Suastika



3. Teguh Putranto, S.T., M.T.



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D



SURABAYA, 12 JULI 2018

Dipersembahkan kepada kedua orang tua atas segala dukungan dan doanya

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas karunia, rahmat dan hidayah-Nya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bantuan baik moril ataupun materil. Sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa yang dengan segala bantuan-Nya telah memberi kita Rahmat, Karunia dan Kesehatan sehingga kita dapat menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Orang tua dan keluarga yang selalu memberi dukungan dan doa sekaligus sumber semangat dalam mengerjakan Tugas Akhir.
3. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Dr. Ir. I Ketut Suastika, Dony Setyawan, S.T., M.Eng. dan Teguh Putranto, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan sarannya untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc, Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
6. Serta semua pihak terkait yang telah membantu baik secara langsung ataupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 4 Juli 2018

Abdul Hakim Lillah

ANALISIS HAMBATAN PENAMBAHAN *WAVE PIERCING* PADA KAPAL KATAMARAN MENGGUNAKAN CFD

Nama Mahasiswa : Abdul Hakim Lillah
NRP : 0411144000043
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Kapal adalah salah satu moda transportasi yang digunakan untuk penyeberangan antar pulau bahkan antar negara untuk mendukung kegiatan ekonomi. Kapal memiliki peranan penting terutama di negara Indonesia dalam pendistribusian barang dari satu daerah ke daerah lain. Penggunaan kapal dalam bidang kemaritiman terdapat berbagai jenis model kapal. Saat ini banyak model kapal menggunakan jenis multihull, salah satunya kapal katamaran. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hambatan yang terjadi pada kapal katamaran dengan pengaplikasian modifikasi bentuk haluan yaitu tanpa *wave piercing* dan dengan *wave piercing*. Desain lambung katamaran menggunakan katamaran simetris, desain yang sama dengan model kapal milik Jamaluddin dkk (2012) pada pengujian *towing tank*. Perbandingan jarak pisah demihull secara melintang $S/L = 0.3$. Tipe bow pada penelitian yang dilakukan yaitu “*wave piercing*” dengan 4 model yaitu katamaran. Model pertama tanpa *wave piercing* (NWV), sedangkan model lainnya modifikasi dari model pertama dengan penambahan *wave piercing* memiliki panjang 2% Lwl (NWV2), 4% Lwl (NWV4) dan 6% Lwl (NWV6). Analisa hambatan dan interferensi antar kedua lambung secara numerik menggunakan *software* CFD pada 6 variasi kecepatan yang disimulasikan disetiap model dengan Fr (Froude Number) = 0.19-0.65. Hasil analisa menggunakan CFD kemudian divalidasi dan dilakukan perbandingan dengan model katamaran simetris yang sama (model NWV) menggunakan data hasil pengujian pada *Towing Tank-LHI* (Laboratorium Hidrodinamika Indonesia). *Wave piercing* memiliki kemampuan dalam pengurangan nilai hambatan kapal katamaran simetris hingga 16.19%.

Kata kunci : hambatan, bow, *wave piercing*, CFD.

ANALYSIS OF THE RESISTANCE ADDING WAVE PIERCING TO CATAMARAN VESSEL USING CFD

Author : Abdul Hakim Lillah
Student Number : 0411144000043
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisor : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

Vessel is one of transportation modes that is used for crossing between islands or countries to support activity of economy. Vessel has place significantly in Indonesia, for example in shipping of products between one place to other. Nowadays, some vessels use multihull (one kind of vessel), for example is catamaran vessel. This study aims to analyse resistance that are in catamaran by applying bow modification such as without wave piercing and with wave piercing. The design of catamaran hull uses symmetrical of catamaran that is used in Jamaluddin's et al vessel (2012) in *towing tank* trial. The ratio separation of demihull transversal is $S/L = 0.3$. Bow type of this study is conducted by applying "wave piercing" with 4 models of catamaran. The first model does not use wave piercing (NWV), meanwhile the others model apply the first model by adding wave piercing which has 2% Lwl (NWV2), 4% Lwl (NWV4) and 6% Lwl (NWV6). The analysis of resistance and interference between 2 hulls numerically use CFD software in 6 variation of quickness that apply for each models with Fr (Froude Number) = 0.19-0.65 . The result of this study that uses CFD which have been validated and compared with the same symmetrical of catamaran (NWV model) by using the data from the result of *Towing Tank-LHI* (Laboratorium Hidrodinamika Indonesia) trial. Wave piercing has capability in decreasing resistance symmetrical of catamaran until 16.19%.

Keyword : resistance, bow, wave piercing, CFD.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR REVISI.....	iv
HALAMAN PERUNTUKAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
Bab I PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Perumusan Masalah.....	2
I.3. Tujuan.....	2
I.4. Batasan Masalah.....	3
I.5. Manfaat.....	3
I.6. Hipotesis.....	3
Bab II STUDI LITERATUR	5
II.1. Dasar Teori.....	5
II.2. Tinjauan Pustaka	5
II.2.1. Kapal Katamaran	5
II.2.2. Tipe Kapal Katamaran.....	6
II.2.3. Hambatan.....	8
II.2.4. Hambatan Katamaran	14
II.2.5. <i>Wave Piercing</i>	17
II.2.6. Simulasi CFD	18
Bab III METODOLOGI	21
III.1. Studi Literatur	21
III.2. Pengumpulan Data	21
III.3. Pemodelan Katamaran.....	22
III.3.1. Desain WV2.....	23
III.3.2. Desain WV4.....	25
III.3.3. Desain WV6.....	26
III.4. Penentuan Jumlah Grid	28
III.5. Metode Simulasi CFD.....	29
III.6. Distribusi Kecepatan Fluida.....	31
III.7. Validasi Data	32
III.8. <i>Flowchart</i> Metodologi Penelitian.....	34
Bab IV SIMULASI CFD.....	35
IV.1. Tahapan Simulasi CFD	35
IV.1.1. Simulasi CFD 1 Fluida	35
IV.1.2. Simulasi CFD 2 Fluida	41
IV.2. Proses Validasi	48

Bab V ANALISA DAN PEMBAHASAN	51
V.1. Data Hasil Eksperimen.....	51
V.2. Data Hasil CFD	53
V.3. Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Model Numerik	56
V.4. Analisa Hambatan Total Hasil Simulasi CFD	59
V.5. Analisa Hambatan Viskos Hasil Simulasi CFD	60
V.6. Analisa Hambatan Gelombang Hasil Simulasi CFD	63
V.7. Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner dan Outer Hull Katamaran.....	67
Bab VI KESIMPULAN DAN SARAN	73
VI.1. Kesimpulan.....	73
VI.2. Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN	
LAMPIRAN A HASIL SIMULASI <i>FREE SURFACE</i> PADA CFD	
LAPMIRAN B HASIL SIMULASI KEKENTALAN MURNI PADA CFD	
LAMPIRAN C DISTRIBUSI KECEPATAN PADA <i>INNER HULL</i> DAN <i>OUTER HULL</i>	
LAPMIRAN D VISUALISASI DISTRIBUSI KECEPATAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Bentuk Lambung Katamaran Simetris.....	6
Gambar II. 2 Bentuk Lambung Katamaran Asimetris.....	7
Gambar II. 3 Bentuk Lambung Katamaran Asimetris Penuh.....	7
Gambar II. 4 Diagram Komponen Koefisien Hambatan Total Kapal.....	8
Gambar II. 5 Diagram Komponen Hambatan Kapal.....	9
Gambar II. 6 Sistem Gelombang Divergen dan Transversal.....	12
Gambar II. 7 Katamaran dengan <i>Wave Piercing</i>	18
Gambar III. 1 Demihull Katamaran Simetris S/L 0.3.....	22
Gambar III. 2 Model Katamaran Simetris S/L 0.3.....	23
Gambar III. 3 Demihull Katamaran WV2.....	24
Gambar III. 4 Model Katamaran WV2.....	24
Gambar III. 5 Demihull Katamaran WV4.....	25
Gambar III. 6 Model Katamaran WV4.....	26
Gambar III. 7 Demihull Katamaran WV6.....	27
Gambar III. 8 Model Katamaran WV6.....	27
Gambar III. 9 Modifikasi Haluan Kapal Katamaran Simetris.....	28
Gambar III. 10 Distribusi Zona Pada CFD.....	29
Gambar III. 11 Posisi node pada x/Lwl model.....	32
Gambar IV. 1 Pemodelan 1 Fluida.....	36
Gambar IV. 2 Bentuk Model dan Ukuran Domain.....	37
Gambar IV. 3 Pengaturan <i>Meshing</i> WV4 Simulasi 1 Fluida.....	38
Gambar IV. 4 Proses <i>Meshing</i> 1 Fluida pada ICEM-Ansys.....	38
Gambar IV. 5 Tahap <i>CFX Pre-Processor</i> pada Simulasi 1 Fluida.....	41
Gambar IV. 6 Pemodelan Model dan Ukuran Domain 2 Fluida.....	42
Gambar IV. 7 Pengaturan <i>Meshing</i> WV4 Simulasi 2 Fluida.....	43
Gambar IV. 8 <i>Meshing</i> Domain (a) dan Model (b).....	44
Gambar IV. 9 Tahap <i>CFX Pre-Processor</i> pada Simulasi 2 Fluida.....	47
Gambar IV. 10 Grafik Konvergensi.....	48
Gambar IV. 11 <i>Grid Independence Full Viscous</i>	49
Gambar IV. 12 <i>Grid Independence Free Surface</i>	50
Gambar V. 1 Grafik Koefisien Hambatan NWV.....	54
Gambar V. 2 Grafik Koefisien Hambatan WV2.....	55
Gambar V. 3 Grafik Koefisien Hambatan WV4.....	55
Gambar V. 4 Grafik Koefisien Hambatan WV6.....	56
Gambar V. 5 Koefisien Hambatan Total CFD dan Eksperimen.....	57
Gambar V. 6 Koefisien Hambatan Viskos CFD dan Eksperimen.....	57
Gambar V. 7 Koefisien Hambatan Gelombang CFD dan Eksperimen.....	58
Gambar V. 8 Koefisien Hambatan Total Hasil Simulasi CFD.....	59
Gambar V. 9 Koefisien Hambatan Viskos Hasil Simulasi CFD.....	60
Gambar V. 10 Distribusi Tekanan Keempat Model pada Fr 0.65.....	62
Gambar V. 11 Koefisien Hambatan Gelombang Hasil Simulasi CFD.....	63
Gambar V. 12 Vektor Keempat Model pada Fr 0.19.....	64
Gambar V. 13 Vektor Keempat Model pada Fr 0.65.....	65

- Gambar V. 14 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.19...67
Gambar V. 15 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.28...68
Gambar V. 16 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.37...69
Gambar V. 17 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.46...70
Gambar V. 18 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.56..71
Gambar V. 19 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer Hull pada Fr 0.65..71

DAFTAR TABEL

Tabel III. 1 Data Hidrostatik Demihull Kapal Katamaran Simetris	21
Tabel III. 2 Data Hidrostatik Kapal Katamaran Simetris	23
Tabel III. 3 Data Hidrostatik Kapal Katamaran WV2.....	25
Tabel III. 4 Data Hidrostatik Kapal Katamaran WV4.....	26
Tabel III. 5 Data Hidrostatik Kapal Katamaran WV6.....	28
Tabel IV. 1 Pendefinisian CEL (<i>CFX Expression Language</i>).....	45
Tabel IV. 2 <i>Grid Independence</i> untuk Simulasi 1 Fluida.....	49
Tabel IV. 3 <i>Grid Independence</i> untuk Simulasi 2 Fluida.....	50
Tabel V. 1 Nilai Hambatan Kapal Hasil Uji Tarik	51
Tabel V. 2 Data Koefisien Hambatan Hasil Uji Tarik	53
Tabel V. 3 Data Koefisien Hambatan Model NWV Simulasi CFD.....	53
Tabel V. 3 Data Koefisien Hambatan Model NWV Simulasi CFD.....	54
Tabel V. 4 Data Koefisien Hambatan Model WV2 Simulasi CFD.....	54
Tabel V. 5 Data Koefisien Hambatan Model WV4 Simulasi CFD.....	55
Tabel V. 6 Data Koefisien Hambatan Model WV6 Simulasi CFD.....	56
Tabel V. 7 Presentase <i>Error</i> CFD dengan Eksperimen model NWV	58

DAFTAR SIMBOL

R_{TM}	= Hambatan model dari percobaan.
R_{FM}	= Hambatan gesek dari permukaan datar yang memiliki permukaan basah
f, n	= Konstanta, fungsi dari panjang dan sifat permukaan
R_{RM}	= Hambatan sisa dari model
L	= Panjang kapal (m)
B	= Lebar kapal (m)
T	= Sarat kapal (m)
H	= Tinggi kapal (m)
C_{wp}	= Koefisien garis air
R_f	= Hambatan gesek
R_R	= Hambatan sisa
R_T	= Hambatan total
R_V	= Hambatan viskos atau kekentalan
R_W	= Hambatan gelombang
C_F	= Koefisien hambatan gesek
C_T	= Koefisien hambatan total
C_V	= Koefisien viskos atau kekentalan
C_W	= Koefisien hambatan gelombang
V	= Kecepatan kapal (m/s)
Re	= <i>Reynolds number</i>
ν	= Viskositas Kinematik (m^2/s)
$(1+k)$	= <i>Form factor</i>
$\blacktriangle C_F$	= <i>Roughness allowance</i>
C_{AA}	= <i>Air resistance</i>
σ	= Faktor interferensi hambatan gesek (<i>friction</i>)
Φ	= Faktor interferensi hambatan sisa (<i>residual</i>)
Fr	= <i>Froude number</i>
Φ	= Faktor interferensi hambatan bentuk (<i>form</i>)
τ	= Faktor interferensi hambatan gelombang (<i>wave</i>)
ρ	= densitas fluida (kg/m^3)
WSA	= luas bidang basah lambung (m^2)
g	= Gravitasi bumi (m^2/s)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah

Kapal merupakan salah satu moda transportasi yang digunakan untuk kegiatan ekonomi, penyeberangan antar pulau bahkan antar negara. Dalam pendistribusian barang dari satu daerah ke daerah lain, kapal memiliki peranan penting termasuk di negara Indonesia, karena sebagian besar wilayahnya merupakan kepulauan yang sangat bergantung pada moda transportasi laut. Untuk memenuhi tujuan dasar tersebut maka kapal harus memenuhi beberapa karakteristik seperti mengapung di posisi tegak lurus, bergerak dengan kecepatan sesuai dengan rencana awal, kuat dalam menahan beban yang dialami akibat gelombang air, dan mampu *manouver* di laut lepas seperti halnya dalam perairan terbatas (Rawson & Tupper, 2001).

Berbagai riset dan penelitian telah dilakukan dalam dunia perkapalan untuk mendapatkan desain lambung yang efisien dan bermanfaat bagi manusia di masa depan. Desain lambung yang baik akan mendapatkan keunggulan dari berbagai segi, salah satunya adalah unggul dalam segi hidrodinamika (Rawson & Tupper, 2001). Desain lambung kapal harus meminimalisir nilai hambatan yang terjadi pada saat kapal beroperasi. Meminimalisir hambatan pada kapal dapat mengurangi kebutuhan daya mesin kapal yang digunakan sebagai pendorong pada kapal sehingga kecepatan kapal tercapai sesuai target yang diinginkan. Pemilihan motor dengan daya mesin yang kecil akan menekan penggunaan bahan bakar, operasional, dan biaya produksi kapal.

Penggunaan kapal dalam dunia maritim terdapat berbagai jenis model kapal. Saat ini banyak model kapal menggunakan jenis multihull, salah satunya kapal katamaran. Kapal katamaran merupakan salah satu alternatif dalam mendesain kapal untuk mendapatkan kelebihan daripada kapal monohull. Aplikasi kapal katamaran sebagai moda transportasi sungai maupun laut terus mengalami perkembangan. Salah satu alasan kapal katamaran banyak digunakan adalah kapal katamaran memiliki deck yang dapat didesain relatif lebih luas dibandingkan kapal single hull, selain itu katamaran juga mempunyai stabilitas yang cukup baik (Utama & Molland, 2001). Keuntungan lain dari kapal jenis katamaran ini mampu beroperasi pada kedalaman laut atau sungai yang dangkal khususnya untuk daerah – daerah terpencil yang banyak terdapat di Indonesia.

Hambatan kapal baik *monohull* maupun katamaran (*multihull*) terjadi karena adanya interaksi antara lambung kapal dengan fluida (media air). Apabila pada *monohull*, hambatan yang terjadi hanya diakibatkan oleh satu lambung saja. Hambatan total pada *multihull* adalah total penjumlahan hambatan setiap lambung kapal ditambahkan dengan adanya efek interferensi. Analisis hambatan katamaran lebih kompleks dibandingkan dengan kapal *monohull*.

Salah satu cara dalam mengurangi hambatan yang terjadi pada kapal katamaran adalah dengan pengaplikasian *wave piercing* pada katamaran. Pengaplikasian bow konvensional pada kapal monohull diketahui cukup efisien dalam mengurangi hambatan. Bow konvensional ini berfungsi mengurangi *wave making resistance* akibat gerakan kapal. Salah satu tipe bow pada perkembangan desain saat ini yaitu “*wave piercing*”. *Wave piercing* ini memiliki ujung yang ramping dengan mengurangi gaya angkat di bagian ujungnya. Penelitian mengenai hambatan katamaran dengan *wave piercing*, pola aliran (kecepatan fluida) dan pengaruh interferensi antar *demihull* dilakukan analisa numerik dengan bantuan *software* CFD-Ansys.

I.2. Perumusan Masalah

1. Bagaimana perbandingan nilai hambatan antara hasil numerik dan eksperimen untuk model kapal katamaran tanpa *wave piercing* ?
2. Bagaimana perbandingan hambatan secara numerik pada model kapal tanpa Wave Piercing (NWV) , Wave Piercing 2% lwl (WV2), Wave Piercing 4% lwl (WV4) dan Wave Piercing 6% lwl (WV6) ?
3. Bagaimana perbedaan aliran fluida (distribusi kecepatan) yang dihasilkan oleh model kapal NWV, WV2, WV4 dan WV6 ?

I.3. Tujuan

Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Untuk mendapatkan perbandingan hambatan model katamaran tanpa *wave piercing* dengan hasil eksperimen.
2. Untuk mengetahui pengaruh *wave piercing* pada kapal katamaran.
3. Untuk mengetahui aliran distribusi kecepatan yang dihasilkan oleh setiap model katamaran.

I.4. Batasan Masalah

Untuk membatasi ruang lingkup dari penelitian tugas akhir ini dan memfokuskan untuk permasalahan yang akan dianalisa agar hasil yang akan dicapai sesuai tujuan, maka diberikan batasan sebagai berikut :

1. Model kapal yang digunakan adalah kapal katamaran simetris yang telah dilakukan pengujian eksperimen Jamaluddin dkk (2012).
2. Model numerik yang dilakukan terdapat 6 variasi kecepatan $Fr = 0.19-0.65$ sesuai dengan kecepatan uji coba *towing tank* yang telah dilakukan oleh Jamaluddin dkk (2012) sebagai data validasi dalam penelitian tugas akhir ini.
3. Terdapat variasi *wave-piercing* dengan ukuran sebagai berikut:
 - Tanpa *wave-piercing* (sebagai perbandingan data uji numerik dengan hasil eksperimen) dengan nama NWV
 - *Wave-piercing* dengan variasi panjang 2% L_{wl} dengan nama WV2
 - *Wave-piercing* dengan variasi panjang 4% L_{wl} dengan nama WV4
 - *Wave-piercing* dengan variasi panjang 6% L_{wl} dengan nama WV6
4. Hambatan yang dianalisis menggunakan *software* CFD-Ansys
5. Tidak dilakukan perhitungan konstruksi dan kekuatan kapal

I.5. Manfaat

Dari penulisan tugas akhir, ini diharapkan dapat diambil manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan ilmu pengetahuan di dunia pendidikan khususnya bidang perkapalan.
2. Memberikan hasil mengenai perbandingan hambatan *wave piercing* sesuai ukuran masing-masing.
3. Sebagai referensi untuk penelitian kapal katamaran selanjutnya.

I.6. Hipotesis

Penambahan *wave piercing* dengan variasi ukuran yang berbeda akan mempengaruhi nilai hambatan dan salah satu dari variasi ukuran *wave piercing* memiliki tingkat efisiensi tertinggi pada model lambung katamaran yang ada.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

STUDI LITERATUR

II.1. Dasar Teori

Kapal katamaran adalah salah satu jenis kapal *multihull* yang memiliki dua lambung kapal (*demihull*). Berbagai keuntungan lebih diberikan oleh kapal katamaran dibandingkan dengan kapal *monohull*. Kapal katamaran memiliki luasan geladak yang lebih luas dan tingkat stabilitas transversal yang lebih baik dibandingkan dengan kapal *monohull* (Insel & Molland, 1990).

Terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan saat merancang desain kapal katamaran yaitu permasalahan hambatan dari adanya interferensi gelombang dan luasan bidang basah (WSA) lambung kapal katamaran yang lebih besar daripada kapal monohull dengan displasemen yang sama. Dalam memperoleh desain kapal yang efisien untuk mengurangi hambatan yang timbul saat kapal beroperasi dilakukan penambahan pada bagian haluan berupa suatu tojolan yang disebut dengan *bulbous bow* (bow konvensional) (Kracht, 1978).

Bulbous bow merupakan struktur pada haluan kapal yang berfungsi menghasilkan gelombang. Gelombang yang dihasilkan *bulbous bow* akan berlawanan arah dengan gelombang yang dihasilkan oleh lambung kapal, sehingga kedua gelombang akan saling menghilangkan dan membuat gelombang yang dihasilkan menjadi lebih kecil (Kracht, 1978). Desain katamaran dengan *wave piercing* merupakan inovasi dalam mengurangi hambatan kapal. *Wave piercing* sebuah bentuk bow yang ramping, yang dapat mengurangi gaya angkat pada ujungnya.

II.2. Tinjauan Pustaka

II.2.1. Kapal Katamaran

Katamaran adalah tipe kapal laut multi lambung, biasanya terdiri dari dua lambung. Desain kapal katamaran disebut sebagai desain terbaik untuk kapal laut karena dapat mengakomodasi kebutuhan akan kecepatan, stabilitas dan kapasitas yang besar dalam sebuah kapal. Beberapa hal penting yang diperhatikan pada saat merancang kapal katamaran yaitu permasalahan yang ditimbulkan oleh dua badan kapal sehingga menghasilkan interferensi viskos yang disebabkan oleh aliran asimetris disekitar kedua badan kapal serta interferensi gelombang yang disebabkan oleh sistem gelombang antar

kedua badan kapal (Jamaluddin dkk, 2012). Keuntungan dari bentuk kapal katamaran yang berbeda dengan kapal *monohull* adalah memiliki deck yang dapat didesain relatif lebih luas dibandingkan kapal *monohull*, selain itu katamaran juga mempunyai stabilitas yang cukup baik.

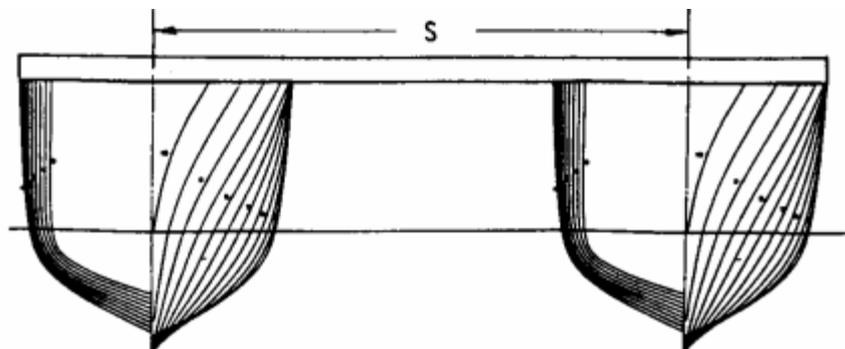
Karakteristik hambatan di air tenang kapal katamaran lebih besar dibandingkan dengan *monohull*, dimana dominasi hambatan gesek mencapai 40% dari hambatan total pada kecepatan rendah. Penurunan kecepatan kapal katamaran akibat kondisi gelombang yang tinggi tidak jarang ditemui pada kapal katamaran sehingga kapal katamaran pada umumnya digunakan pada kecepatan tinggi dengan tingkat bahan bakar yang relatif ekonomis.

II.2.2. Tipe Kapal Katamaran

Kapal katamaran memberikan kebebasan pada aspek desain bentuk lambung kapal dan dimensi dari demihull untuk meningkatkan stabilitas transversal (Insel & Molland 1990). Hal ini membuat volume dari *demihull* dapat didistribusikan secara bebas baik secara transversal maupun longitudinal dibandingkan dengan *monohull*. Aspek desain yang fleksibel ini membuat katamaran dapat didesain relatif asimetris terhadap *centerplane*. Secara umum terdapat tiga macam bentuk dasar dari lambung katamaran yang dapat diadopsi yaitu :

a. Katamaran Simetris

Merupakan desain bentuk lambung yang diadaptasi langsung dari variasi bentuk lambung konvensional. Tidak adanya batasan dari stabilitas membuat *demihull* katamaran dapat didesain dengan range yang lebih besar dari L/B , B/T , C_{wp} dari *monohull* seperti lambung revolusioner yaitu SWATH.

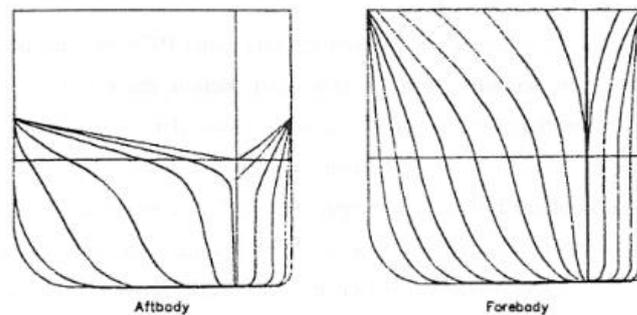


Gambar II. 1 Bentuk Lambung Katamaran Simetris

b. Katamaran Asimetris

Merupakan bentuk katamaran yang dikembangkan dengan menggeser volume displasemen centerline demihull untuk mengurangi efek interferensi yang merugikan antara *demihull*.

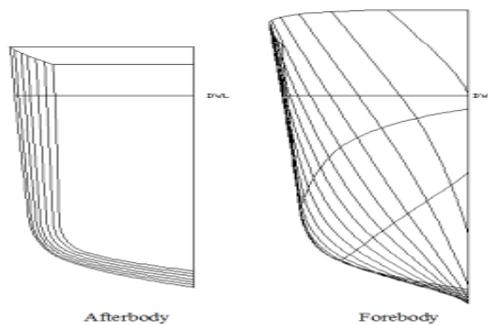
Pada tipe ini, bentuk lambung kapal disisi dalam yaitu diantara lambung – lambungnya, tidaklah sepenuhnya asimetris karena tidak sepenuhnya datar. Secara umum, bentuk lambung bagian dalam dilakukan optimasi untuk mendapatkan interferensi yang menguntungkan.



Gambar II. 2 Bentuk Lambung Katamaran Asimetris

c. Katamaran Asimetris Penuh

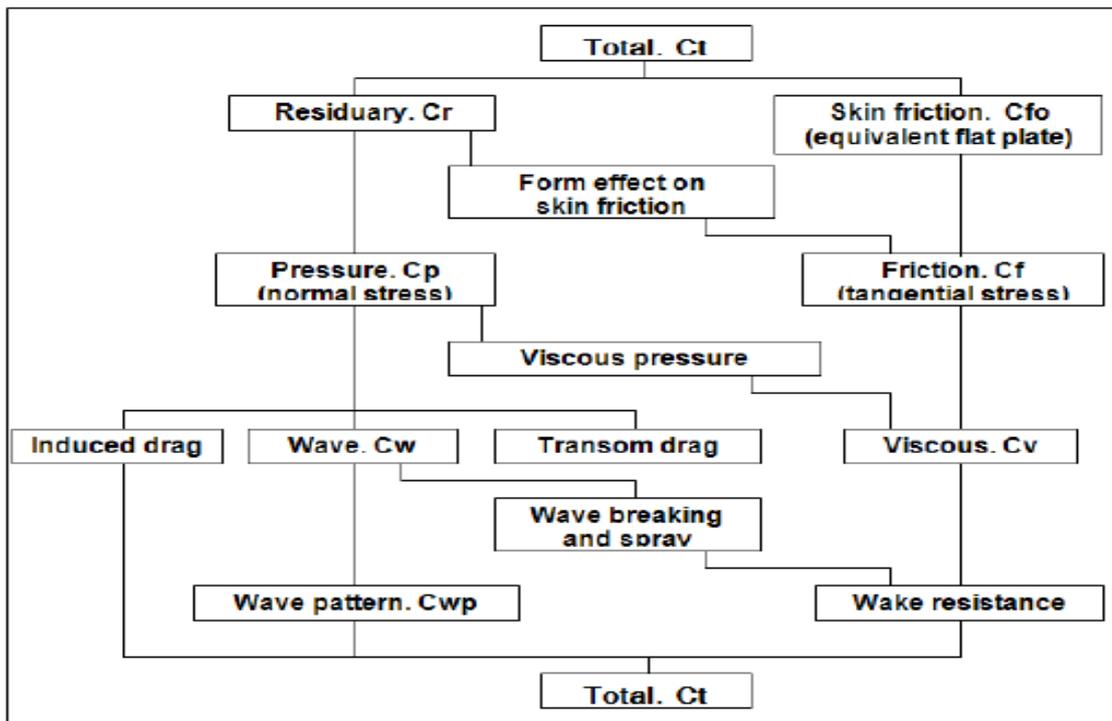
Merupakan bentuk lambung yang diperoleh dengan menggeser semua volume displasemen dari simetris demihull ke salah satu sisi dari centerline seperti membagi monohull menjadi dua bagian dari centerline. Bentuk ini juga disebut dengan separuh *monohull* atau lambung sobek.



Gambar II. 3 Bentuk Lambung Katamaran Asimetris Penuh

II.2.3. Hambatan

Sebuah model kapal yang bergerak pada permukaan fluida tak terganggu dengan kecepatan konstan mengalami gaya yang berlawanan dengan arah gerak kapal yang disebut dengan hambatan total. Hambatan total pada kapal yang bergerak di permukaan air pada proses fisiknya terdiri dari dua komponen utama yaitu tegangan normal (*normal stress*) dan tegangan geser (*tangential stress*) fluida yang bekerja pada lambung kapal dibawah permukaan Gambar II.4



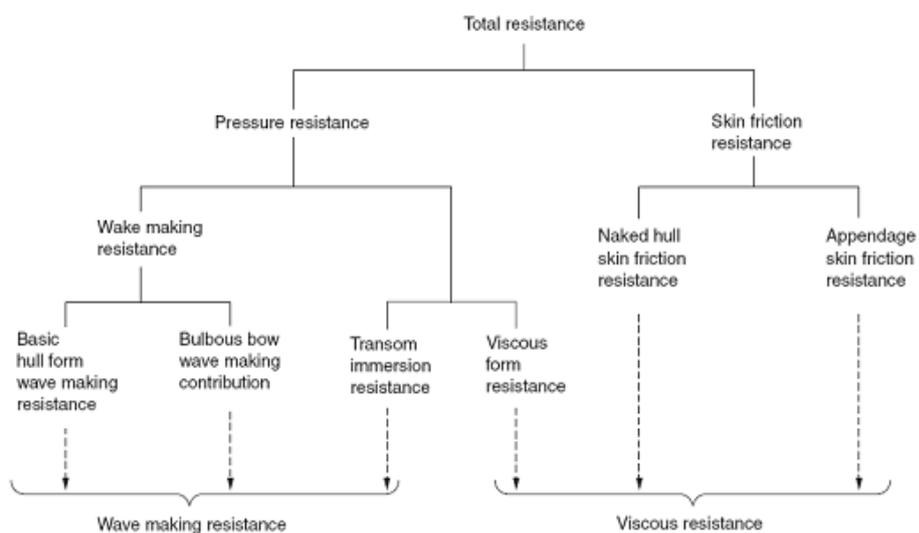
Gambar II. 4 Diagram Komponen Koefisien Hambatan Total Kapal (Couser dkk, 1997)

Komponen tegangan normal terdiri dari hambatan gelombang (*wave making*) dan tegangan viskos/kekentalan (*viscous pressure*) sedangkan komponen tegangan geser disebabkan oleh adanya viskositas fluida.

Hambatan gelombang disebabkan oleh adanya gravitasi permukaan bebas dan tegangan viskos ditimbulkan oleh pengurangan tekanan di lambung bagian belakang (*stern*) kapal akibat adanya lapisan batas (*boundary layer*). Bentuk bagian belakang yang berbentuk kotak (*transom*) menimbulkan komponen hambatan tersendiri termasuk komponen hambatan tekanan (*pressure drag*) dan sebagai hambatan induksi (*induced*

drag) pada lambung katamaran. Sedangkan *wave breaking* dan *spray* dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap total hambatan pada kecepatan tinggi.

Untuk kapal pada kondisi tenang dengan kecepatan lambat, pada saat itu berat kapal tidak mengalami perubahan signifikan akibat gaya angkat hidrodinamik. Penyederhanaan (Molland, 2008) terhadap komponen hambatan kapal dibagi ke dalam dua kelompok utama yaitu hambatan viskos (*viscous resistance*) dan hambatan gelombang (*wave resistance*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.5



Gambar II. 5 Diagram Komponen Hambatan Kapal (Molland, 2008)

Standar internasional dari *ITTC* mengklasifikasikan hambatan kapal pada air tenang (*calm water*), secara praktis dibagi ke dalam dua komponen hambatan utama yaitu hambatan viskos (*viscous resistance*) yang berkaitan dengan bilangan *Reynolds* dan hambatan gelombang (*wave making resistance*) yang bergantung pada bilangan *froude*. Kedua komponen tersebut dapat diperlihatkan pada persamaan

$$R_{T(Re, Fr)} = R_{V(Re)} + R_{W(Fr)} = (1+k)_{(Fr)} R_{F(Re)} + R_{W(Fr)} \quad (2.1)$$

Hambatan gelombang (R_w) memiliki komponen fluida ideal (*inviscid*) dan hambatan viskos atau kekentalan (R_v) meliputi hambatan akibat tegangan geser (*friction drag*) dan komponen tekanan kekentalan (*viscous pressure*)

Total hambatan kapal dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$R_T = \frac{1}{2} \rho C_T (WSA) V^2 \quad (2.2)$$

Estimasi dari komponen hambatan dilakukan dengan menggunakan metode berdasarkan pengukuran hambatan total dari *towing tank* dan estimasi hambatan gesek dengan pendekatan empiris dengan memperhitungkan kemungkinan hasil model untuk kapal dengan skala tertentu.

Komponen hambatan total pertama kali diperkenalkan oleh W.froude. dimana hambatan total merupakan penjumlahan hambatan gesek (R_f) dengan hambatan sisa (R_R) sehingga didapatkan persamaan :

$$R_{TM} = R_{FM} + R_{RM} \quad (2.3)$$

Dimana :

R_{TM} : Hambatan model dari percobaan.

R_{FM} : Hambatan gesek dari permukaan datar yang memiliki permukaan basah sama dengan model, yang mana dapat ditentukan dari :

$$R_{FM} = f S V^n \quad (2.4)$$

f, n : Konstanta, fungsi dari panjang dan sifat permukaan

R_{RM} : Hambatan sisa dari model

Dengan menggunakan metode *froude*, dapat diperhitungkan untuk koefisien hambatan kapal full side scale dari hasil percobaan model kapal, dengan persamaan koefisien hambatan :

$$C_{TS} = C_{FS} + (C_{TM} - C_{FM}) \quad (2.5)$$

Dengan metode baru, pada tahun 1954, Hughes mengusulkan metode perhitungan hambatan total dari model kapal. Dimana hambatan total terdiri dari tiga komponen (Hughes, 1954), yaitu :

1. Hambatan Gesek (*Friction Resistance*)
2. Hambatan Bentuk (*Form Resistance*)
3. Hambatan Permukaan Bebas (*Free Surface Resistance*)

Komponen hambatan total dapat dijelaskan sebagai berikut :

II.2.3.1. Hambatan Gesek (*Friction Resistance*) (C_F)

Merupakan komponen hambatan akibat tegangan tangensial stress antara molekul air dan kulit badan kapal yang berkerja pada permukaan bidang basah

dengan luas dan panjang yang sama dengan model kapal, hambatan gesek terjadi karena adanya suatu volume air yang melekat pada badan kapal yang terbentuk pada permukaan bagian yang terendam dari badan kapal yang sedang bergerak. Penting tidaknya gesekan dalam situasi fisik ini tergantung pada jenis fluida dan konfigurasi fisik atau pola alirannya. Daerah fluida yang dekat dengan benda padat didefinisikan sebagai lapisan batas (*boundary layer*). Di dalam daerah lapisan batas tersebut, kecepatan gerak dari partikel – partikel zat cair bervariasi dari nol pada permukaan kulit kapal menjadi maksimum yaitu sama dengan besarnya kecepatan aliran zat cair pada tepi dari lapisan tersebut. Perubahan atau variasi kecepatan partikel – partikel zat cair inilah yang mencerminkan adanya pengaruh intensif gaya – gaya viskositas pada lapisan batas yang menimbulkan tahanan gesek pada lambung kapal tersebut. Semakin kasar bentuk badan kapal maka nilai dari hambatan gesek akan semakin meningkat. Koefisien hambatan gesek C_F biasanya didapatkan melalui percobaan uji tarik pada *towing tank*, sehingga diperlukan cara untuk menghitung gesekan permukaan dan untuk mengembangkan data yang diperoleh dari model ke ukuran kapal yang sebenarnya.

Besar hambatan gesek pada dasarnya tergantung pada luas permukaan basah lambung kapal, tingkat kekasaran permukaan dan bilangan *Reynolds*, besar koefisien hambatan gesek C_F dinyatakan dengan persamaan :

$$C_F = \frac{0.075}{(\log (Re)-2)^2} \quad (2.6)$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2.7)$$

Dimana:

Re = *Reynolds* number

L = Lpp kapal

V = Kecepatan kapal (m/s)

ν = Viskositas Kinematik

= 1.18831×10^{-6} (m²/s) untuk pada suhu 15°C

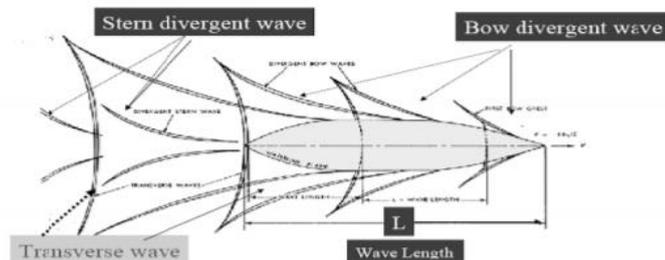
II.2.3.2. Hambatan Bentuk (*Form Resistance*) (C_{FO})

Merupakan hambatan diluar batas hambatan gesek dan terjadi pada saat badan kapal tercelup dengan cukup dalam. Hughes mengasumsikan bahwa untuk lambung yang *streamline* pada aliran turbulen dapat diekspresikan sebanding dengan hambatan gesek.

Hambatan ini terjadi karena bentuknya partikel – partikel air yang bergerak dalam satu pusaran (*eddy*). Pusaran – pusaran ini terjadi antara lain karena bentuk – bentuk yang tidak *streamline*, bentuk yang demikian ini terdapat dibagian belakang kapal. Akibat terjadinya arus *eddy* ini, tekanan pada bagian buritan yang terjadi dapat mengimbangi tekanan pada bagian depan sehingga timbullah suatu gaya yang melawan gerak maju dari kapal.

II.2.3.3. Hambatan Permukaan Bebas (*Free Surface Resistance*)

Hambatan permukaan bebas sebagai hambatan gelombang (C_w) merupakan pengurangan hambatan total (C_T) dari penjumlahan hambatan gesek (C_F) dan hambatan bentuk (C_{FO}) dari model.



Gambar II. 6 Sistem Gelombang Divergen dan Transversal (Carlton, 2007)

Secara matematis, dari koefisien – koefisien hambatan dapat ditulis dengan persamaan :

$$C_T = C_F + C_{FO} + C_w \quad (2.8)$$

Dimana, $C_{FO} = k C_F \quad (2.9)$

Substitusi Pers. (1) ke pers. (2)

$$\begin{aligned} C_T &= C_F + C_{FO} + C_w \\ &= C_F + k C_F + C_w \\ C_T &= (1+k)C_F + C_w \end{aligned} \quad (2.10)$$

(1+k) disebut dengan form factor dan dapat ditemukan pada percobaan dengan kecepatan sangat rendah dimana C_w dapat diabaikan. Secara matematis didapatkan persamaan *form factor* :

Dengan $C_w \approx 0$ maka

$$C_T = (1+k) C_F + C_w$$

$$C_T = (1+k) C_F + 0$$

$$C_T = (1+k) C_F$$

Sehingga, $(1+k) = C_T/C_F$ (2.11)

Pada tahun 1978, Metode baru dalam perhitungan hambatan kapal diperkenalkan oleh ITTC berjudul “ 1978 *ITTC Performance Prediction Method for Simple Single Screw Ships*”. Dalam metode ini, hambatan total kapal dibagi dalam 4 (empat) komponen :

$$C_T = (1+k) C_F + C_R + \blacktriangle C_F + C_{AA} \quad (2.12)$$

Dimana,

(1+k) : merupakan form Factor

C_F : Hambatan gesek dengan menggunakan ITTC ‘57

C_R : Hambatan dari sisa percobaan model

$\blacktriangle C_F$: *Roughness Allowance (0 for smooth model)*

C_{AA} : *Air resistance (assume 0 for model without superstructure).*

Metode yang disarankan untuk mendapatkan nilai k dengan pengukuran pada kecepatan dimana C_R diasumsikan mendekati 0 dan $(1+k) = C_T/C_F$. Dengan uraian sebagai berikut :

$$C_R \approx 0$$

$$\blacktriangle C_F \approx 0$$

$$C_{AA} \approx 0$$

Sehingga,

$$C_T = (1+k) C_F + C_R + \blacktriangle C_F + C_{AA}$$

$$C_T = (1+k) C_F + 0 + 0 + 0$$

$$C_T = (1+k) C_F$$

$$(1+k) = C_T/C_F$$

Percobaan pada kecepatan rendah memiliki kelemahan dalam menjamin keakuratan hasil yang didapat sehingga terdapat metode lain dalam memperhitungkan hambatan, yaitu metode yang diusulkan oleh Prohaska (1966).

Diasumsikan $C_{RM} = (1+k) C_F + a F_{rn}$ pada kecepatan rendah (pada umumnya $Fr < 0,2$) sehingga persamaan hambatan totalnya menjadi sebagai berikut :

$$C_T = (1+k) C_F + a Fr \quad (2.13)$$

Dimana $(1+k)$, a dan n dapat diselesaikan melalui *least square analysis* dari pengukuran kecepatan rendah.

II.2.4. Hambatan Katamaran

Hambatan kapal katamaran diasumsikan sebagai penjumlahan dari beberapa komponen yang saling tidak bergantung (*independent*) supaya mudah memecahkan masalah hambatan lambung kapal dan pengaruh jarak antara lambung (*hull clearance*).

Hambatan kapal katamaran memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi dibandingkan kapal monohull. Hal ini terjadi karena adanya faktor interferensi yang dihasilkan oleh kedua lambung kapal. Menurut Insel dan Molland (1990), efek interaksi dalam lambung kapal katamaran dibagi menjadi dua yaitu :

a. Interferensi Badan Kapal

Aliran sekitar badan demihull simetris dan asimetris atau tidak simetris karena adanya pengaruh satu sama lain dari demuhull misalnya tekanan bidang relatif tidak simetris terhadap centerline demihull. Hal ini berkaitan dengan :

1. Kecepatan pesturbasi atau usikan kecepatan disekitar demuhull semakin meningkat, khususnya pada sisi dalam, sisi terowongan dari lambung karena venture effect. Kecepatan ini semakin bertambah disebabkan oleh hambatan gesek kulit dan modifikasi *form factor*.
2. Persilangan Aliran (*Cross Flow*) yang dapat terjadi dibawah lunas (*keel*) yang mana dapat memicu kedalam komponen tarikan induksi (*induced drag*) yang pada normalnya diabaikan pada monohull. Meskipun dianggap penting, tetapi pengaruhnya relatif kecil jika dibandingkan dengan pengaruh kecepatan persturbasi atau usikan kecepatan.

3. Adanya perbedaan tinggi gelombang antara stern bagian dalam dan luar dari demihull, dapat menunjukkan arah aliran air menuju ke dalam atau keluar. Hal ini mengakibatkan terjadinya *vortice* dan *spray* yang kemudian menghasilkan komponen tarikan induksi (*induced drag*).
4. Semakin meningkatnya kecepatan didalam sisi terowongan disebabkan oleh perubahan struktur lapisan batas (*boundary layer*).
5. Akibat gelombang dari suatu demihull mencapai badan (*hull*) lainnya membuat luas bidang basah menjadi berubah sehingga memberikan nilai perubahan hambatan gesek (*skin friction*).

b. Interferensi Gelombang (*Wave Interference*)

Interferensi akibat sisi – sisi dari dua lambung yang berjalan bersamaan. Interferensi gelombang dapat dianalisa melalui hambatan gelombang. Adanya perubahan tekanan bidang mengakibatkan berubah gelombang dari demihull. Gelombang melintang dari demihull selalu diperkuat oleh lambung lain saat gelombang divergen haluan dari satu lambung dapat dihilangkan oleh gelombang *divergen* buritan dari lambung lain.

Pemantulan dari gelombang *divergen* dari *demihull* yang sama menyulitkan fenomena interferensi. Gelombang haluan dari satu lambung yang bertemu diterowongan (bagian lambung antara) dan gelombang haluan dari lambung yang lain tepat di *centerline* dan superposisi antara keduanya menjadi sangat tinggi menghasilkan gelombang yang tidak stabil, bahkan menimbulkan gelombang pecah dan percikan atau semburan pada kecepatan tinggi. Aliran Air kearah dalam dan kearah luar pada bagian belakang (*stern*) merubah formasi gelombang dibelakang badan kapal.

Dengan memasukkan efek interferensi yang dihasilkan maka metode untuk perhitungan hambatan total kapal katamaran dapat memodifikasi dari perhitungan hambatan total monohull. Modifikasi dapat pada metode ITTC '57, ITTC '78 dan pengukuran secara langsung untuk mengetahui factor interferensi. Berikut merupakan modifikasi yang dilakukan pada metode ITTC'57 :

Hambatan total monohull

$$C_T = C_{F(\text{mono})} + C_{R(\text{mono})} \quad (2.14)$$

Hambatan total katamaran

$$\begin{aligned} C_{T(\text{cat})} &= C_{F(\text{cat})} + C_{R(\text{cat})} \\ &= \sigma C_F + \Phi C_R \end{aligned} \quad (2.15)$$

Dimana :

σ : merupakan faktor interferensi hambatan gesek (*friction*)

Φ : merupakan faktor interferensi hambatan sisa (*residual*)

Faktor interferensi hambatan gesek dapat menginterpretasikan adanya pertambahan kecepatan pada daerah antar lambung katamaran yang mana faktor ini dapat diperhitungkan dari integrasi hambatan gesek lokal atas permukaan bidang basah dan dipengaruhi oleh jarak pisah lambung (S/L). Variasi besarnya jarak pisah lambung dan *froude number* yang mengakibatkan perubahan kecepatan dinamika kapal berpengaruh terhadap besarnya faktor interferensi hambatan sisa, dimana faktor ini dapat diintegrasikan dengan hasil percobaan.

Metode lain dalam perhitungan hambatan total katamaran dilakukan dengan memodifikasi metode perhitungan hambatan total katamaran oleh ITTC '78 :

$$\begin{aligned} C_{T(\text{cat})} &= C_{F(\text{cat})} + C_{w(\text{cat})} \\ C_{T(\text{cat})} &= (1 + \Phi k) \sigma C_F + \tau C_w \end{aligned}$$

Sehingga hambatan total katamaran

$$C_{T(\text{cat})} = (1 + \Phi k) \sigma C_F + \tau C_w \quad (2.15)$$

Dimana :

σ : merupakan faktor interferensi hambatan gesek (*friction*) sesuai dengan metode ITTC '57

Φ : merupakan faktor interferensi hambatan bentuk (*form*)

τ : merupakan faktor interferensi hambatan gelombang (*wave*)

Φ digunakan dalam perhitungan dalam perhitungan tekanan disekitar kapal. Untuk tujuan praktis, Φ dan σ dapat dikombinasikan dalam faktor interferensi hambatan viskos (β) sehingga :

$$(1 + \Phi k) \sigma = (1 + \beta k) \quad (2.16)$$

Sedangkan faktor interferensi hambatan gelombang dapat diperoleh dari hasil percobaan sehingga diperoleh hambatan total kapal katamaran :

$$C_{T(\text{cat})} = (1 + \beta k) C_F + \tau C_w \quad (2.17)$$

Penjabaran untuk rumus interferensi dapat diturunkan sebagai berikut :

Untuk hambatan total *monohull* :

$$\begin{aligned}
 C_{T(\text{mono})} &= (1+k) C_F + \tau C_w \\
 \tau C_{w(\text{mono})} &= [C_T - (1+k) C_F]_{(\text{mono})} \\
 \tau &= \frac{[C_T - (1+\beta k) C_F]_{(\text{mono})}}{C_w(\text{mono})} \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

Dengan catatan bahwa untuk demihull *in isolation* maka $\beta = 1$ dan $\tau = 1$

Untuk hambatan total katamaran :

$$\begin{aligned}
 C_{T(\text{cat})} &= (1+\beta k) C_F + \tau C_w \\
 \tau C_{w(\text{cat})} &= [C_T - (1+\beta k) C_F]_{(\text{cat})} \\
 \tau &= \frac{[C_T - (1+\beta k) C_F]_{(\text{cat})}}{C_w(\text{cat})} \quad (2.19)
 \end{aligned}$$

Maka dengan substitusi dari pers (18) dan pers (19) didapat

$$\begin{aligned}
 \tau_{(\text{mono})} &= \tau_{(\text{cat})} \\
 \frac{[C_T - (1+\beta k) C_F]_{(\text{mono})}}{C_w(\text{mono})} &= \frac{[C_T - (1+\beta k) C_F]_{(\text{cat})}}{C_w(\text{cat})} \\
 \tau &= C_w(\text{cat}) / C_w(\text{mono}) \\
 &= [C_T - (1+\beta k) C_F]_{(\text{cat})} / [C_T - (1+k) C_F]_{(\text{mono})}
 \end{aligned}$$

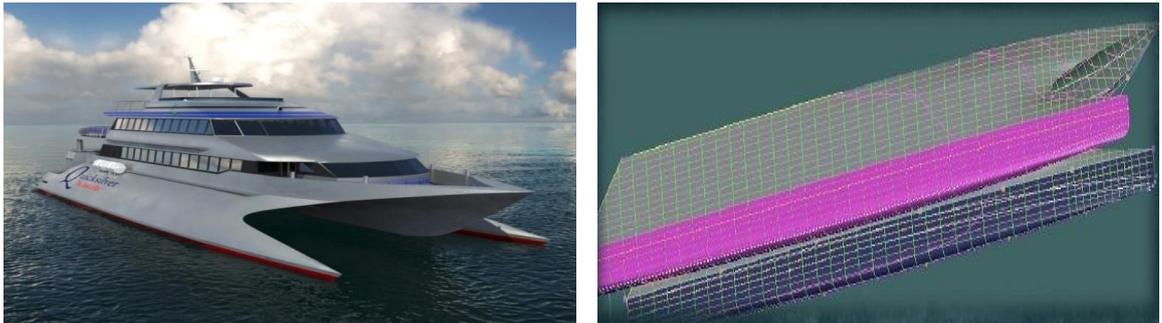
Dapat disimpulkan rumus interferensi hambatan gelombang pada kapal katamaran adalah sebagai berikut :

$$\tau = [C_T - (1+\beta k) C_F]_{(\text{cat})} / [C_T - (1+k) C_F]_{(\text{mono})} \quad (2.19)$$

II.2.5. Wave Piercing

Wave piercing merupakan bagian kapal yang terletak dibagian haluan. Bagian ini merupakan bagian yang terintegrasi dengan lambung kapal. Sebagian besar hambatan mengalami kontak langsung dengan fluida. Fluida yang dilalui kapal membentuk pola gelombang akibat gerakan badan kapal yang pada akhirnya menimbulkan gesekan dengan lambung kapal. Prinsip kerja bow adalah menginterferensi gelombang kapal yang datang dari haluan, sehingga gelombang yang datang akan kehilangan tenaga karena interferensi gelombang dari bow dan pada akhirnya energi gelombang di sekitar lambung kapal akan berkurang, dengan demikian hambatan kapal dapat meminimalisir (Kracht, 1978).

Lambung kapal dengan *wave piercing* merupakan sebuah bentuk bow yang ramping, yang dapat mengurangi gaya angkat pada ujungnya. Ketika kapal sedang terhadang oleh gelombang air laut, berkurangnya gaya angkat memberikan pengertian bahwa pada saat tersebut lambung menembus (*pierces*) gelombang, sehingga kapal tidak mengapung di atas gelombang air laut. Selain itu, desain dari wave piercing dapat mengurangi tahanan gelombang (*wave making resistance*).



Gambar II. 7 Katamaran dengan *Wave Piercing*

II.2.6. Simulasi CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah salah satu cabang dari meknika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisa masalah yang terjadi pada aliran fluida. Ketika menggunakan CFD dengan perangkat keras yang canggih sekalipun maka yang didapatkan hanya berupa pendekatan. Inilah salah satu aspek yang terus dibenahi dalam pengembangan metode CFD.

Secara ringkas CFD adalah memprediksi secara kuantitatif apa yang akan terjadi ketika aliran fluida dan seringkali kombinasi dengan hal – hal berikut :

- a. Aliran perpindahan kalor
- b. *Mass transfer*
- c. Perubahan fase benda, seperti : peleburn, pembekuan, dan pendidihan
- d. Reaksi kimia, seperti : pembakaran
- e. Pergerakan komponen mekanik, seperti pergerakan piston, kipas dll
- f. Tegangan dan perpindahan yang terjadi di dalam struktur benda *solid* atau yang terjadi di sekitarnya.

Kegunaan CFD untuk mengetahui bagaimana fluida mengalir dan memperkirakan apa yang terjadi pada benda mengalami kontak dengan aliran fluida. CFD bisa diterapkan dalam membantu berbagai aspek *engineer* seperti di bawah ini :

- a. CFD membantu insinyur sipil dan arsitek untuk menyediakan lingkungan yang nyaman dan aman bagi manusia.
- b. Membantu desainer *power plants* untuk mendapatkan efisiensi maksimum, dan mengurangi polusi.
- c. Insinyur kimia untuk memaksimalkan hasil dari reactor dan peralatan produksi.
- d. Perancang kendaraan darat, laut dan udara untuk mendapatkan performa yang maksimal dan minim biaya produksi.
- e. Analisis resiko dan bahaya, serta *safety engineer*, untuk memperkirakan kerusakan yang terjadi pada bangunan, peralatan manusia, flora dan fauna yang diakibatkan kebakaran, ledakan dan gelombang ledakan.

Konsep dasar penggunaan *software* CFD ini adalah penyelesaian metode numerik dengan sebuah persamaan fluida yaitu Persamaan Navier-Stokes, dengan prinsip :

- a. Kekekalan massa
- b. Kekekalan momentum
- c. Kekekalan energi

Pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan ketika melakukan simulasi CFD, yaitu : *Preprocessor*, *Processor* dan *Postprocessor*.

- a. *Preprocessor* adalah tahap dimana data dimasukkan dimulai dari pendefinisian domain serta pendefinisian kondisi batas atau *boundary condition*. Ditahap itu juga sebuah benda atau ruangan yang akan dianalisa terbagi dengan jumlah grid tertentu atau sering disebut dengan *meshing*.
- b. *Processor*, pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data – data yang telah dimasukkan dengan persamaan yang terlibat secara literatif. Artinya penghitungan dilakukan hingga menuju *error* terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen. Penghitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap volume control dengan proses integrasi persamaan diskrit.
- c. *Postprocessor* dimana hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola – pola warna tertentu.

Hal yang paling mendasar mengapa konsep CFD (*software* CFD) banyak sekali digunakan dalam dunia industry yaitu dengan CFD dapat dilakukan analisis terhadap suatu sistem dengan mengurangi biaya eksperimen dan tentunya waktu yang panjang dalam melakukan eksperimen tersebut. Dalam proses *design engineering* tahap yang harus dilakukan menjadi lebih singkat. Hal lain yang mendasari pemakaian konsep CFD adalah

pemahaman lebih dalam akan suatu masalah yang akan diselesaikan atau dalam hal ini pemahaman lebih dalam mengenai karakteristik aliran fluida dengan melihat hasil berupa grafik, vector, kontur dan bahkan animasi. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) bisa berarti suatu teknologi komputasi yang memungkinkan kita mempelajari dinamika dari benda – benda atau zat – zat yang mengalir

Adapun dalam penggunaan CFD memiliki kelebihan dan kekurangan dalam analisa dibidang *engineering*. Misalnya kelebihan – kelebihan pada CFD diantaranya :

- a. Disaat produk yang diinginkan sulit dibuat prototype ataupun diadakan riset yang mendalam, misalnya karena mahalnya biaya membuat prototipr ataupun riset, maka menggunakan analisa CFD merupakan hal yang tepat.
- b. Analisa CFD merupakan alat untuk memprediksi parameter – parameter yang ada dengan kondisi tertentu, maka analisa CFD dapat menyelesaikan dengan singkat. Dengan simulasi CFD dapat mengubah parameter – parameter yang ada dengan melihat hasilnya, mengubah lagi hingga didapatkan kondisi yang diinginkan sebelum dibuat prototipe fisik.

BAB III METODOLOGI

III.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk lebih memahami permasalahan yang ada, sehingga memunculkan dugaan – dugaan awal yang selanjutnya bisa disusun menjadi sebuah hipotesa awal. Studi literatur yang dilakukan adalah berkaitan dengan pemahaman teori dan konsep dari katamaran, *wave piercing* dan hambatan kapal. Selain itu dilakukan studi literatur tentang Maxsurf dan CFD yang menyangkut teori, cara kerja, dan *software* yang digunakan. Studi literatur yang dilakukan dengan menggunakan buku literatur, tugas akhir, dan *browsing* internet.

III.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang menyangkut objek dari tugas akhir ini dilakukan dengan cara mencari referensi kapal katamaran dari buku dan *browsing* internet yang diperlukan dalam pemodelan proses tugas akhir.

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, data kapal yang digunakan adalah sebuah kapal katamaran simetris yang telah di uji sebelumnya di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI) oleh Jamaluddin dkk (2012) dengan rasio S/L adalah 0.3. Kapal katamaran yang di uji memiliki demihull yang simetris dengan 6 variasi kecepatan $Fr = 0.19-0.65$. Tabel III.1 merupakan data ukuran utama dari data demihull model kapal katamaran tersebut.

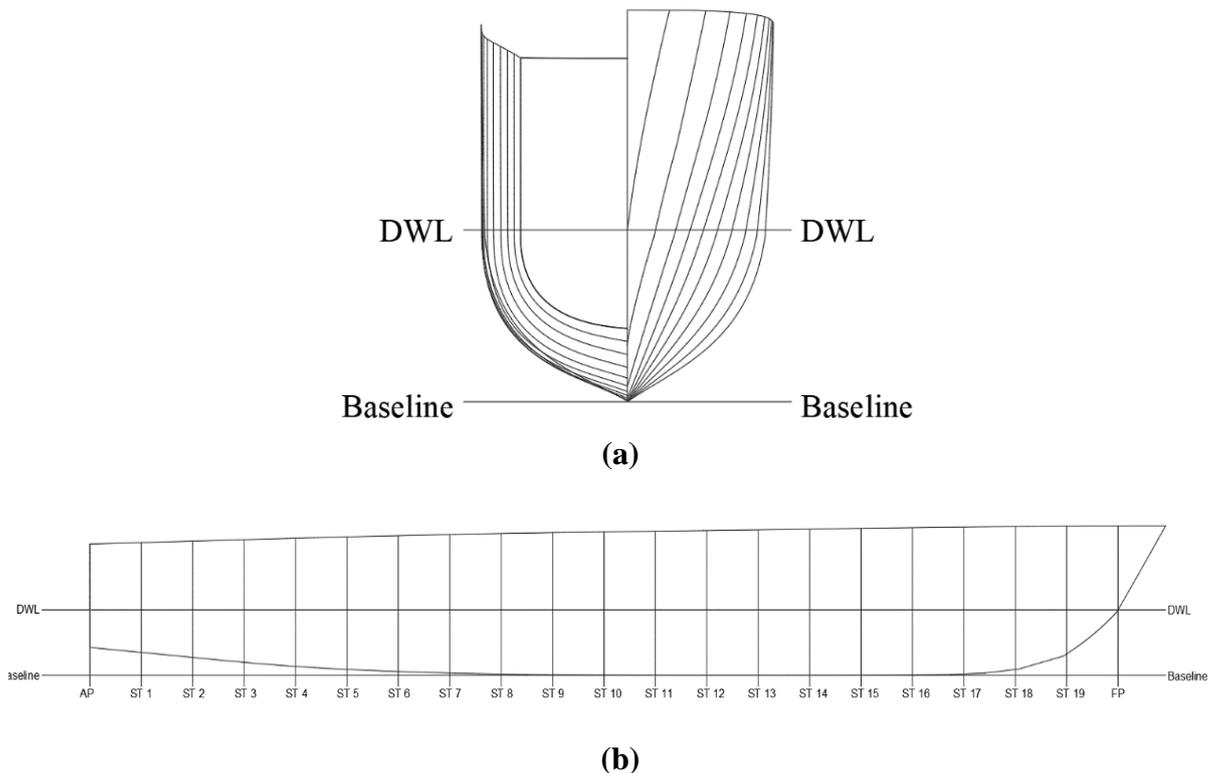
Tabel III. 1 Data Hidrostatik Demihull Kapal Katamaran Simetris

No.	Dimensi	Nilai	Satuan
1.	Lwl	1.372	m
2.	Lebar	0.132	m
3.	Tinggi	0.178	m
4.	Sarat	0.078	m
5.	WSA	0.256	m ²
6.	Volume	0.007	m ³
7.	Displasemen	7.023	kg

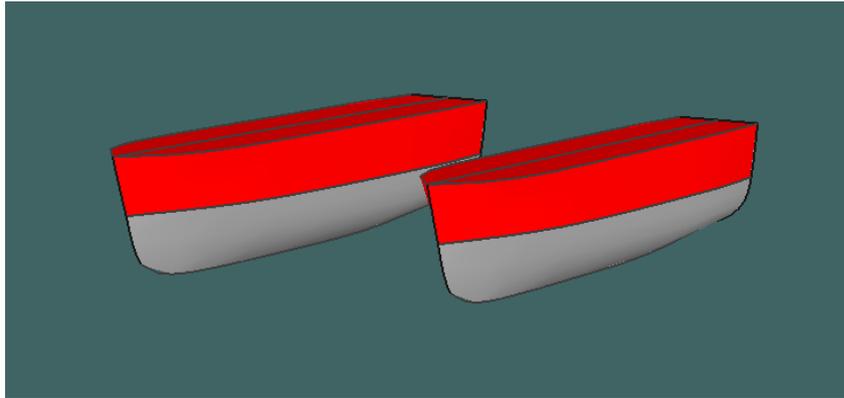
III.3. Pemodelan Katamaran

Pembuatan geometri kapal pada tugas akhir ini terdapat 4 model yang terdiri dari 1 model utama dan 3 model hasil modifikasi dengan penambahan *wave piercing* dengan variasi panjangnya 2%, 4% dan 6% L_{wl} . Untuk mempermudah penyebutan akan dibuat penamaan untuk keempat model yaitu NWV untuk model tanpa *wave piercing*, WV2 untuk model dengan penambahan *wave piercing* dengan panjang 2% L_{wl} , WV4 untuk model dengan penambahan *wave piercing* dengan panjang 4% L_{wl} , dan WV6 untuk model dengan penambahan *wave piercing* dengan panjang 6% L_{wl} .

Model lambung katamaran NWV yang telah dilakukan simulasi pada *software* CFD untuk tugas akhir ini adalah desain yang diadopsi dari penelitian sebelumnya Jamaluddin dkk (2012) sesuai data kapal pada pengumpulan data. Rasio S/L yang digunakan adalah 0.3, S merupakan jarak demihull 0.4116 mm dan L adalah panjang kapal. Model ditunjukkan pada Gambar III.2



Gambar III. 1 Demihull Katamaran Simetris S/L 0.3 Body Plan (a) dan Sheer Plan (b)



Gambar III. 2 Model Katamaran Simetris S/L 0.3

Model kapal katamaran menggunakan *software* Maxsurf dengan pemilihan NURB *Surface* hal ini bertujuan agar bentuk lambung kapal mendekati bentuk model kapal. Setiap bagian dari model harus dibuat dengan semirip mungkin dengan model kapal yang telah dilakukan pengujian sebelumnya sehingga mampu mempresentasikan kondisi model yang sebenarnya. Model untuk fluida dalam simulasi tugas akhir ini melalui Ansys ICEM CFD. Ansys ICEM digunakan untuk menerjemahkan model, kondisi batas, serta kondisi fluida. Penerjemahkan ini perlu dilakukan agar model di Maxsurf dapat disimulasikan pada Ansys CFD serta dapat menyesuaikan kondisi fluida dengan pengujian sebelumnya.

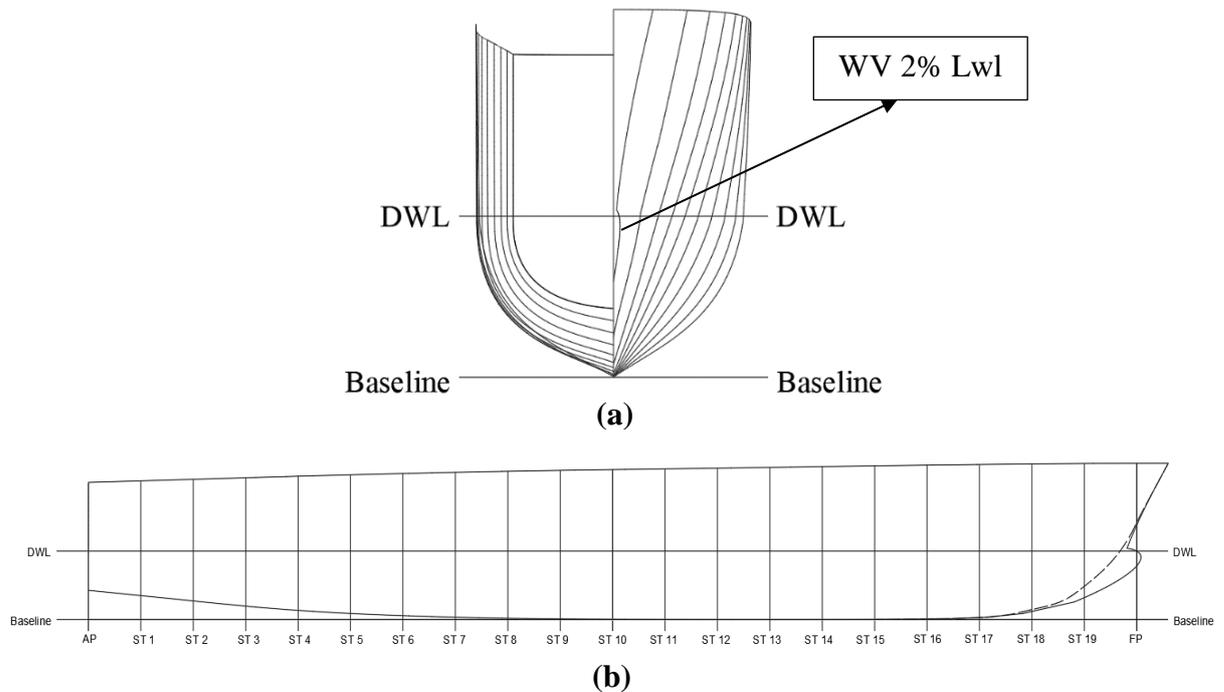
Tabel III. 2 Data Hidrostatik Kapal Katamaran Simetris

No.	Dimensi	Nilai	Satuan
1.	Lwl	1.372	m
2.	Lebar	0.543	m
3.	Tinggi	0.178	m
4.	Sarat	0.078	m
5.	WSA	0.512	m ²
6.	Volume	0.014	m ³
7.	Displasemen	14.05	kg

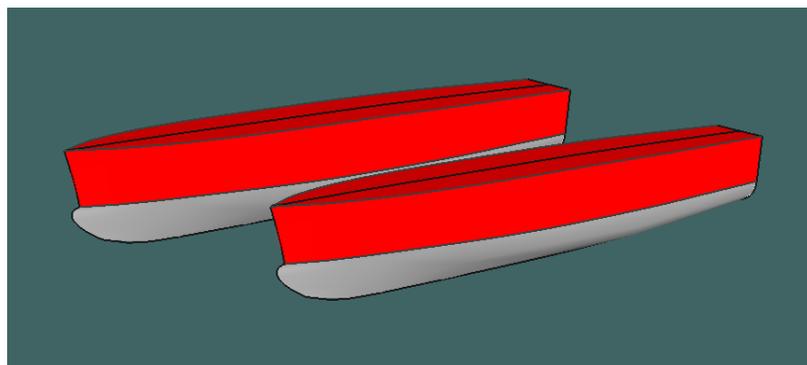
III.3.1. Desain WV2

Wave Piercing yang akan didesain merupakan modifikasi dari kapal katamaran simetris. Panjang *wave piercing* yang akan dimodelkan adalah 2% Lwl dari kapal katamaran simetris sehingga didapat panjang *wave piercing* pada model WV2 adalah 27.44 mm. Titik awal modifikasi lambung atau permodelan *wave piercing* dari titik FP (*Forward*

Perpendicular) pada kapal katamaran simetris. Bagian *wave piercing* yang muncul di atas permukaan air diposisikan pada titik 0.8 panjang *wave piercing* dari garis FP. Panjang bagian *wave piercing* yang muncul di atas permukaan adalah 21.952 mm sehingga Lwl pada model WV2 menjadi 1.394 m. Model kapal katamaran dengan desain *wave piercing* dapat dilihat pada Gambar III.4



Gambar III. 3 Demihull Katamaran WV2 Body Plan (a) dan Sheer Plan (b)



Gambar III. 4 Model Katamaran WV2

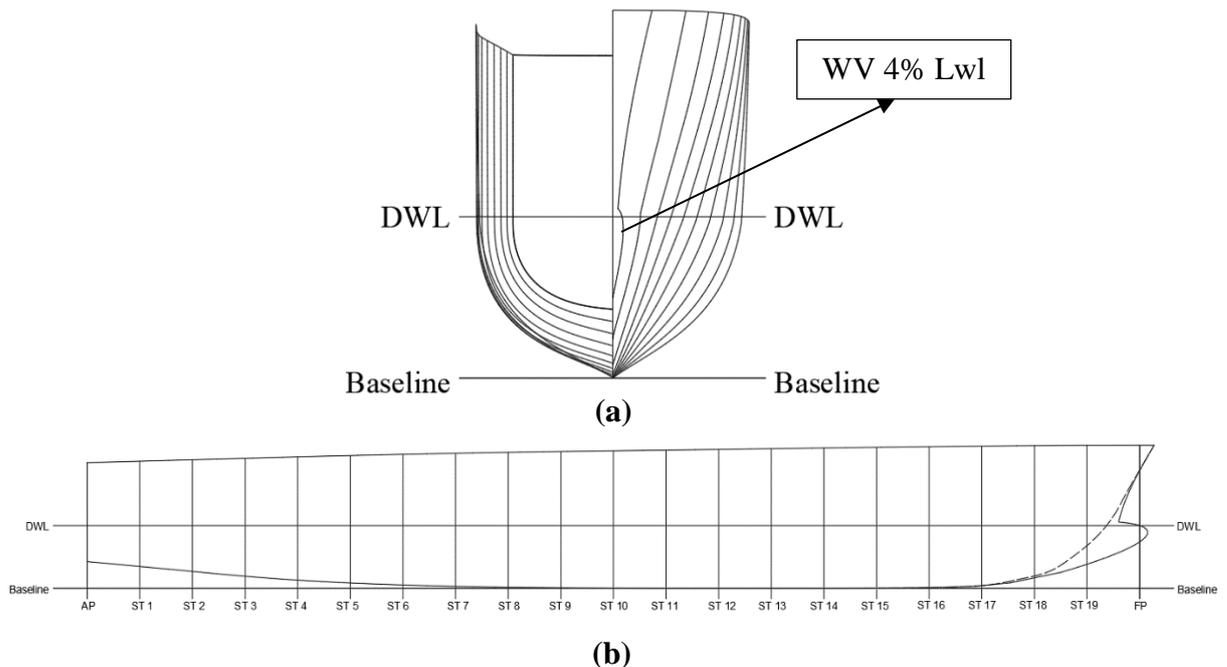
Hambatan kapal sangat bergantung pada luasan dari permukaan lambung yang menyentuh air, semakin besar WSA (*Wetted Surface Area*) maka besarnya hambatan kapal dengan bentuk dan kecepatan yang sama akan semakin besar. Akibat adanya modifikasi pada di bagian haluan kapal katamaran simetris, model kapal WV2 luasan permukaan lambung yang menyentuh air semakin besar. Pada tugas akhir ini displasemen yang dipertahankan sama antara kapal simetris tanpa *wave piercing* dan dengan *wave piercing*.

Tabel III. 4 Data Hidrostatik Kapal Katamaran WV2

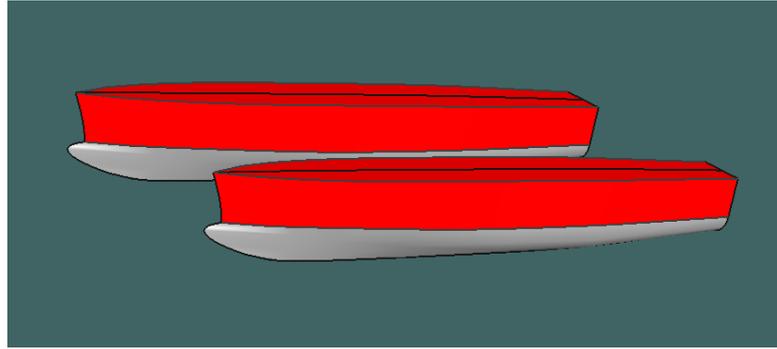
No.	Dimensi	Demihull	Katamaran	Satuan
1.	Lwl	1.394	1.394	m
2.	Lebar	0.132	0.550	m
3.	Tinggi	0.178	0.178	m
4.	Sarat	0.078	0.078	m
5.	WSA	0.260	0.520	m ²
6.	Volume	0.007	0.014	m ³
7.	Displasemen	7.023	14.05	kg

III.3.2. Desain WV4

Model untuk WV4 sama halnya seperti pada model WV2. Yang membedakan pada model ini hanya panjang *wave piercing*. Panjang *wave piercing* yang akan dimodelkan adalah 4% Lwl dari kapal katamaran simetris. Panjang *wave piercing* pada model WV4 adalah 54.88 mm. Panjang *wave piercing* ini modifikasi haluan dari katamaran simetris dengan titik nol atau titik acuan dari FP (*Forward Perpendicular*). *Wave Piercing* pada posisi 0.8 panjang *wave piercing* desain WV4 muncul di atas permukaan air dari FP. Panjang bagian *wave piercing* yang muncul di atas permukaan air adalah 43.904 mm sehingga Lwl pada model WV4 menjadi 1.416 m. Model kapal katamaran dengan desain *wave piercing* dapat dilihat pada Gambar III.6



Gambar III. 5 Demihull Katamaran WV4 Body Plan (a) dan Sheer Plan (b)



Gambar III. 6 Model Katamaran WV4

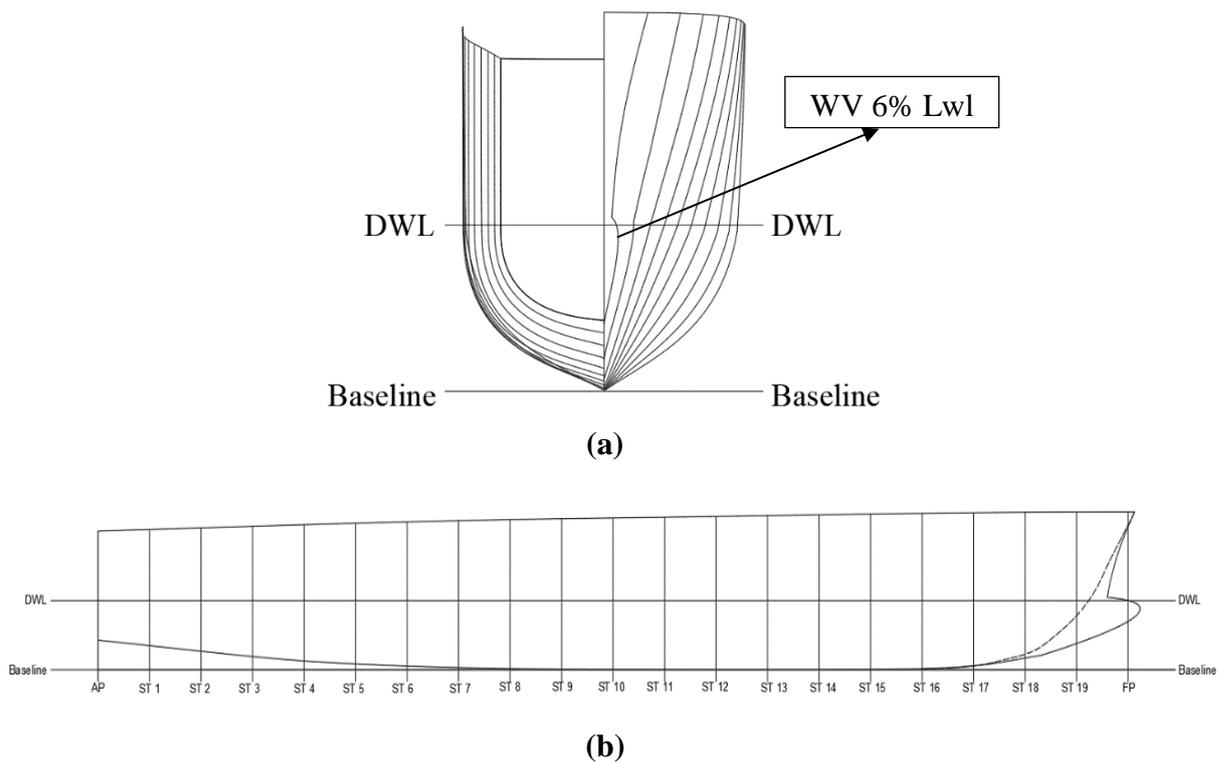
Seperti permodelan sebelumnya. Model WV4 akibat adanya modifikasi bagian haluan maka luasan permukaan lambung yang menyentuh air semakin besar. Secara otomatis karena panjang *wave piercing* pada WV4 lebih panjang daripada WV2 maka WSA WV4 juga mengalami kenaikan yang lebih besar daripada model WV2. Pada model WV4 tetap mempertahankan displasemen.

Tabel III. 5 Data Hidrostatik Kapal Katamaran WV4

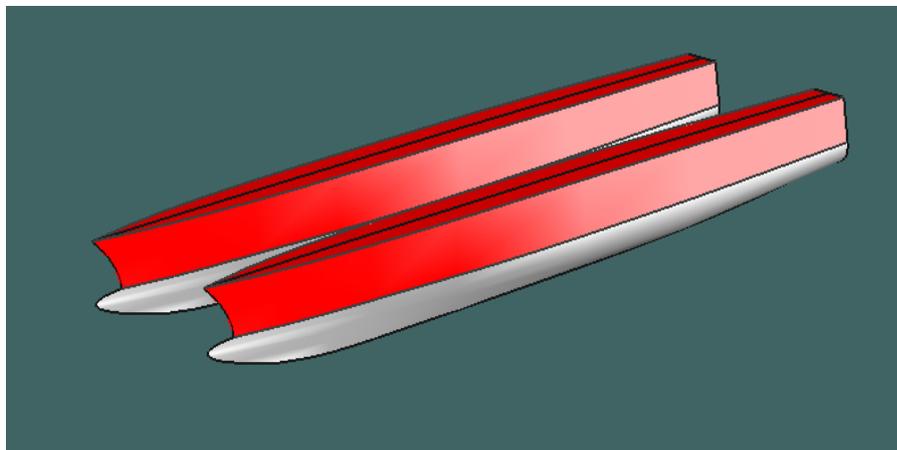
No.	Dimensi	Demihull	Katamaran	Satuan
1.	Lwl	1.416	1.416	m
2.	Lebar	0.132	0.556	m
3.	Tinggi	0.178	0.178	m
4.	Sarat	0.078	0.078	m
5.	WSA	0.262	0.524	m ²
6.	Volume	0.007	0.014	m ³
7.	Displasemen	7.023	14.05	kg

III.3.3. Desain WV6

Variasi model yang terakhir adalah modifikasi *wave piercing* dengan panjang 6% Lwl dari kapal katamaran simetris yang selanjutnya sebagai model WV6. *Wave piercing* ini didapat dengan menarik model WV4 yang telah didesain sebelumnya dengan panjang 6% Lwl. Panjang *wave piercing* pada model WV6 adalah 82.32 mm. Panjang *wave piercing* ini modifikasi haluan dari katamaran simetris dengan titik nol atau titik acuan dari FP (*Forward Perpendicular*). *Wave Piercing* pada posisi 0.8 panjang *wave piercing* desain WV6 muncul di atas permukaan air dari FP. Panjang bagian *wave piercing* yang muncul di atas permukaan air adalah 65.856 mm sehingga Lwl pada model WV6 menjadi 1.438 m. Model kapal katamaran dengan desain *wave piercing* dapat dilihat pada Gambar III.8

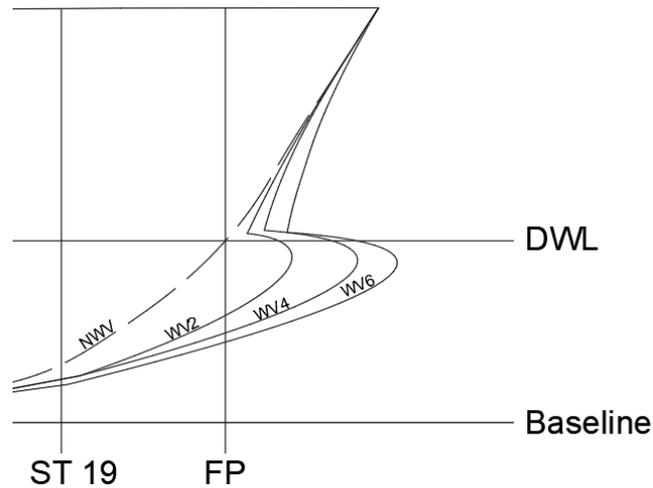


Gambar III. 7 Demihull Katamaran WV6 Body Plan (a) dan Sheer Plan (b)



Gambar III. 8 Model Katamaran WV6

Seperti permodelan sebelumnya. Model WV6 akibat adanya modifikasi bagian haluan maka luasan permukaan lambung yang menyentuh air semakin besar. Secara otomatis karena panjang *wave piercing* pada WV6 paling panjang daripada model sebelum – sebelumnya maka WSA WV6 memiliki nilai yang yang terbesar daripada model sebelumnya. Walaupun terdapat modifikasi bagian haluan, pada model WV6 tetap mempertahankan displasemen.



Gambar III. 9 Modifikasi Haluan Kapal Katamaran Simetris

Modifikasi haluan yang dilakukan pada kapal katamaran simetris memiliki panjang yang berbeda untuk setiap model. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Gambar III.10, terlihat setiap model memiliki panjang *wave piercing* yang berbeda sesuai dengan variasi WV2 yaitu panjang *wave piercing* 2% Lwl, WV4 dengan panjang *wave piercing* 4% Lwl dan WV6 memiliki panjang *wave piercing* 6% Lwl. Data hidrostatik untuk kapal katamaran WV6 dapat dilihat pada Tabel III.5

Tabel III. 6 Data Hidrostatik Kapal Katamaran WV6

No.	Dimensi	Demihull	Katamaran	Satuan
1.	Lwl	1.438	1.438	m
2.	Lebar	0.132	0.563	m
3.	Tinggi	0.178	0.178	m
4.	Sarat	0.078	0.078	m
5.	WSA	0.265	0.530	m ²
6.	Volume	0.007	0.014	m ³
7.	Displasemen	7.023	14.05	kg

III.4. Penentuan Jumlah Grid

Grid adalah suatu kumpulan elemen yang bergabung dan transformasi ke dalam suatu bentuk tertentu. Banyaknya jumlah elemen atau grid yang digunakan dalam perhitungan numerik akan menentukan keakurasian hasil yang didapatkan saat dilakukan simulasi pada CFD karena jumlah elemen mempengaruhi bentuk geometri model. Semakin kecil ukuran grid

yang digunakan maka jumlah elemen akan semakin banyak dan memerlukan waktu yang lama untuk melakukan simulasi. Ukuran grid yang kecil akan berpengaruh terhadap tingkat kerapatan geometri, sehingga nantinya akan nampak pada setiap bagian kapal yang dihasilkan akan lebih halus. Proses simulasi akan semakin singkat apabila jumlah elemen sangat sedikit sekali.

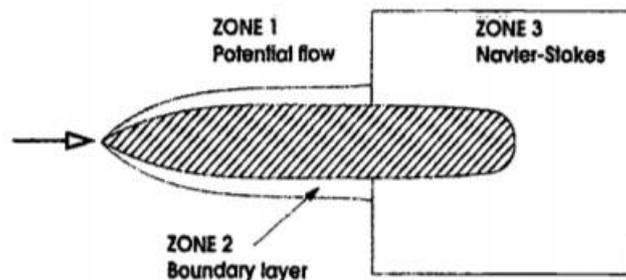
Jumlah elemen yang besar akan memberikan hasil yang lebih mendekati nilai sebenarnya. Namun tidak selamanya jumlah elemen yang banyak menjamin optimalisasi. Proses simulasi dapat dinilai optimal tidak bisa dilakukan hanya dengan percobaan pemodelan dengan berbagai variasi jumlah grid saja, namun harus dilakukan simulasi berulang – ulang hingga mendapatkan hasil yang mendekati kondisi sebenarnya. Proses mendapatkan jumlah grid optimum disebut dengan *Grid Independence Study*.

III.5. Metode Simulasi CFD

Tahap proses simulasi CFD dimulai dengan pembuatan model kapal yang memvariasikan panjang *wave piercing* dengan bentuk lambung utama yang sama, seperti yang dibahas sebelumnya ada 4 model katamaran yaitu katamaran simetris tanpa *wave piercing*, WV2, WV4 dan WV6. Proses pembuatan model 3D dilakukan dengan bantuan *software* Maxsurf. Pemodelan yang sudah dilakukan sebelumnya akan dilakukan *remodelling* pada Ansys ICEM CFD. Model ulang ini diperlukan untuk menekan tingkat kecacatan pada model akibat seluruhnya tingkat *compatible* tersedia antara kedua perangkat lunak. Setelah itu proses simulasi CFD dapat dimulai.

Secara garis besar ada 3 zona yang terjadi pada kapal dalam pembagian menggunakan CFD (Sahoo dkk, 2006)

1. Zona 1 metode *potential flow*.
2. Zona 2 metode *boundary layer*.
3. Zona 3 metode *Navier-Stokes*.



Gambar III. 10 Distribusi Zona Pada CFD
(Sahoo dkk, 2006)

Aliran laminar berawal dari titik stagnasi yang selanjutnya secara bertahap mengalami perubahan seiring mengalirnya fluida mengikuti bentuk *streamline* lambung kapal, dan ketika mencapai titik transisi dimana viskositas fluida tidak cukup kuat untuk mempertahankan aliran fluida agar tetap pada posisi *streamline* kapal, aliran akan berubah menjadi turbulen.

Metode *potential flow* digunakan untuk menganalisis aliran fluida di area terluar dari zona, ditetapkan sebagai zona 1 pada Gambar III.10. Di zona ini, aliran fluida bersifat kontinu dan *streamline*. Berawal dari ujung depan kapal, dan memanjang kembali ke ujung belakang. Zona yang mencakup lapisan batas tipis di sepanjang lambung kapal disebut sebagai Zona 2. Sifat aliran fluida berubah ketika cairan bergerak di sepanjang lambung di zona 2. Metode *boundary layer* digunakan untuk menghitung karakteristik fluida di zona 2. Zona terakhir adalah sepenuhnya bersifat turbulen dan terdapat *wake*. Daerah ini dimulai memanjang jauh dari titik transisi, yang biasanya berada pada wilayah *midship*. Metode *Navier-Stokes* diterapkan dalam zona 3.

Asumsi pada analisa CFD bahwa fluida bersifat *incompressible* dan *Newtonian* memungkinkan penyederhanaan dari persamaan mendasar untuk aplikasi hidrodinamik. Persamaan kontinuitas dan persamaan konservasi-momentum selanjutnya yang diperlukan untuk menyelesaikan nilai kecepatan dan tekanan dari aliran *incompressible*. Analisis pada dasarnya dapat dengan mudah dimodifikasi kira-kira untuk semua efek viskositas, tegangan permukaan, dan elastisitas permukaan. Berikut uraian singkat langkah – langkah yang perlu dilakukan pada tahap simulasi CFD secara umum. Untuk detail teknisnya dapat dilihat pada bab simulasi CFD.

1. Pemodelan bentuk lambung dimulai dari katamaran simetris tanpa *wave piercing* dan 3 model katamaran modifikasi menggunakan *wave piercing* dilakukan di Maxsurf. Pemodelan dilakukan secara 3D, setelah model selesai kemudian diekspor ke dalam bentuk file *.iges*, yang sebelumnya format file Maxsurf adalah *.msd*. Ekspor file *.msd* menjadi *.iges* ini diperlukan agar file dapat diterjemahkan oleh Ansys ICEM.
2. *Pre processing* adalah tahap untuk memulai simulasi CFD-Ansys. Pada tahap ini dilakukan penyempurnaan model, seperti pembuatan domain dan surface. Selanjutnya, dilakukan penentuan kondisi batas pada inlet, outlet, bottom, opening, wall, domain fluida dan model kapal. Proses *meshing* juga dilakukan pada tahap ini.

3. *Solver Manager* dilakukan pada model kapal yang telah ditentukan kondisi batasnya. Tahap ini merupakan tahap *running* atau perhitungan secara numerik dan kumpetasi yang sebenarnya menyerupai prinsip pengujian tarik pada *towing tank*.
4. *Post processing* analisis dan penggambaran hasil dilakukan pada tahap ini. Hasil yang didapat pada tahap ini setelah tahap sebelumnya selesai. Hasil yang didapatkan dibaca dan divisualisasikan seperti tekanan, kecepatan, aliran fluida *streamline* dan distribusi temperatur.

Untuk mendapatkan komponen hambatan C_V dan C_T , simulasi yang dilakukan harus 2 kali dengan kondisi batas yang berbeda. Untuk mendapatkan komponen C_V simulasi dilakukan model kapal berada pada kondisi satu fluida yaitu air, bagian lambung kapal yang mengalami perhitungan hanya lambung kapal di bawah sarat. Simulasi ini dilakukan karena luas bagian lambung kapal yang tercelup air berhubungan langsung dengan hambatan viskos. Sedangkan untuk mendapatkan komponen C_T simulasi dilakukan dimana model berada pada 2 fluida yaitu air dan udara. Simulasi ini sering disebut dengan *free surface condition*.

Proses simulasi dilakukan sebanyak 48 kali meliputi 24 kali simulasi untuk mendapatkan komponen R_V (hambatan viskos) dan 24 kali untuk mendapatkan R_T (hambatan total). Sedangkan, untuk mendapatkan R_W (*wave making resistance*) maka digunakan rumusan $R_T = R_W + R_V$. adapun spesifikasi computer yang digunakan dalam simulasi sebagai berikut :

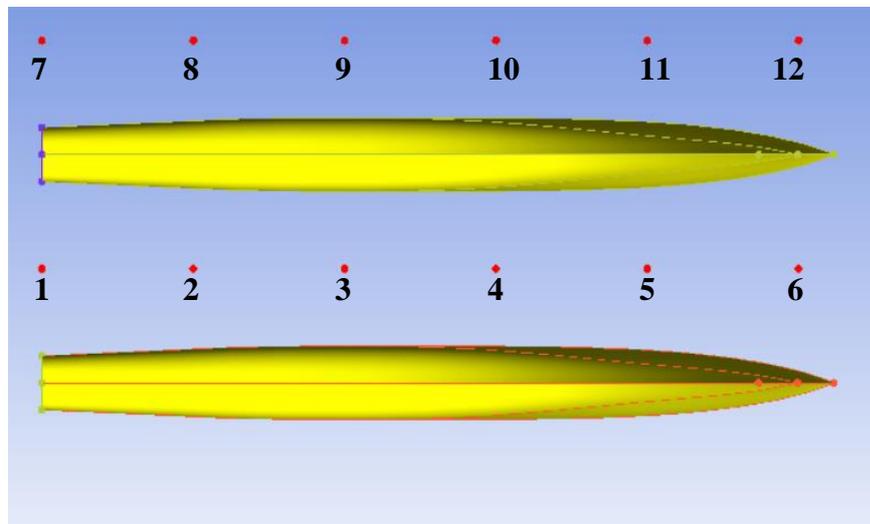
1. Processor : Intel ® Core™ i7-7700HQ CPU @2.80 Ghz
2. Installed memory (RAM) : 8.00 GB (7.89 GB usable)
3. System type : 64-bit Operating System
4. Operating System : Windows 10 Home

III.6. Distribusi Kecepatan Fluida

Pada bagian ini, penulis akan menampilkan data distribusi kecepatan fluida disekitar lambung katamaran. Hal ini dimaksudkan untuk merepresentasikan adanya pengaruh nyata yang ditimbulkan oleh *wave piercing*. Pengaruh tersebut akan diperlihatkan dengan berubahnya nilai distribusi kecepatan fluida di daerah sepanjang model kapal.

Untuk mengetahui besarnya nilai distribusi kecepatan telah dibuat 6 node (titik) di *centerline* di antar kedua demihull (*inner hull*). Titik pertama terletak di AP dengan posisi ditunjukkan dengan $x/Lwl = 0$, x merupakan x meter dari AP. Titik selanjutnya berada pada $x/Lwl = 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 ; 1$ dari titik awal. $x/Lwl = 1$ dimaksudkan berada pada posisi FP.

Untuk bagian luar atau *outer hull* akan dibuat 6 titik dengan jarak yang sama sepanjang model dengan jarak melintang sama seperti jarak demihull ke *centerline* diantara kedua demihull (*inner hull*). Titik pertama terletak di AP selanjutnya berurutan ke depan menuju FP dengan penomoran 7 -12.



Gambar III. 11 Posisi node pada x/Lwl model

III.7. Validasi Data

Setiap data yang telah didapatkan dari hasil simulasi numerik dengan menggunakan Ansys CFD harus dilakukan validasi data. Terdapat tiga parameter utama pada tahap validasi data yaitu :

1. Konvergensi adalah analisis kebenaran internal dimana tingkat kesalahan yang dirancang dipenuhi oleh model dan juga untuk meminimalisir error pada hasil simulasi.

Proses perhitungan atau disebut proses iterasi pada tahap *flow solver* dilakukan jika semua data kondisi batas telah ditentukan. Jumlah iterasi yang digunakan berpengaruh terhadap jumlah waktu yang dibutuhkan juga akan semakin banyak untuk proses simulasi. Penentuan banyak jumlah grid yang dipakai dalam pemodelan maka semakin banyak pula iterasi yang perlu dilakukan untuk perhitungan model tersebut.

2. *Grid Independence* merupakan proses pemilihan jumlah yang optimum dalam simulasi CFD.

Hasil yang ditampilkan dalam CFD sangat bergantung pada ukuran mesh dari model tetapi jumlah mesh yang digunakan juga harus dipertimbangkan. Penggunaan jumlah grid yang terlalu sedikit atau ukuran mesh terlalu besar berpengaruh terhadap

tingkat akurasi data yang didapatkan setelah simulasi. Semakin kecil ukuran mesh maka jumlah elemen pada model akan semakin banyak. Jumlah elemen yang banyak akan memberikan hasil yang lebih mendekati nilai sebenarnya. Namun tidak selamanya pada model dengan jumlah elemen yang banyak menjamin optimalisasi simulasi. Simulasi dapat dinilai optimal tidak hanya disebabkan hasil yang akurat, namun waktu juga yang digunakan dapat dibatasi. Penggunaan waktu yang minimum dapat diatur melalui pemilihan jumlah elemen dan juga pembatasan dari iterasi pada *solver manager*. Namun perlu diingat bahwa jumlah elemen juga mempengaruhi hasil. Titik optimum secara deskripsi dijelaskan apabila CFD telah menjangkau nilai dari hasil yang akurat pada jumlah elemen tertentu, dan apabila jumlah elemen diperbanyak maka hasil yang didapatkan tidak akan jauh berbeda dari simulasi sebelumnya.

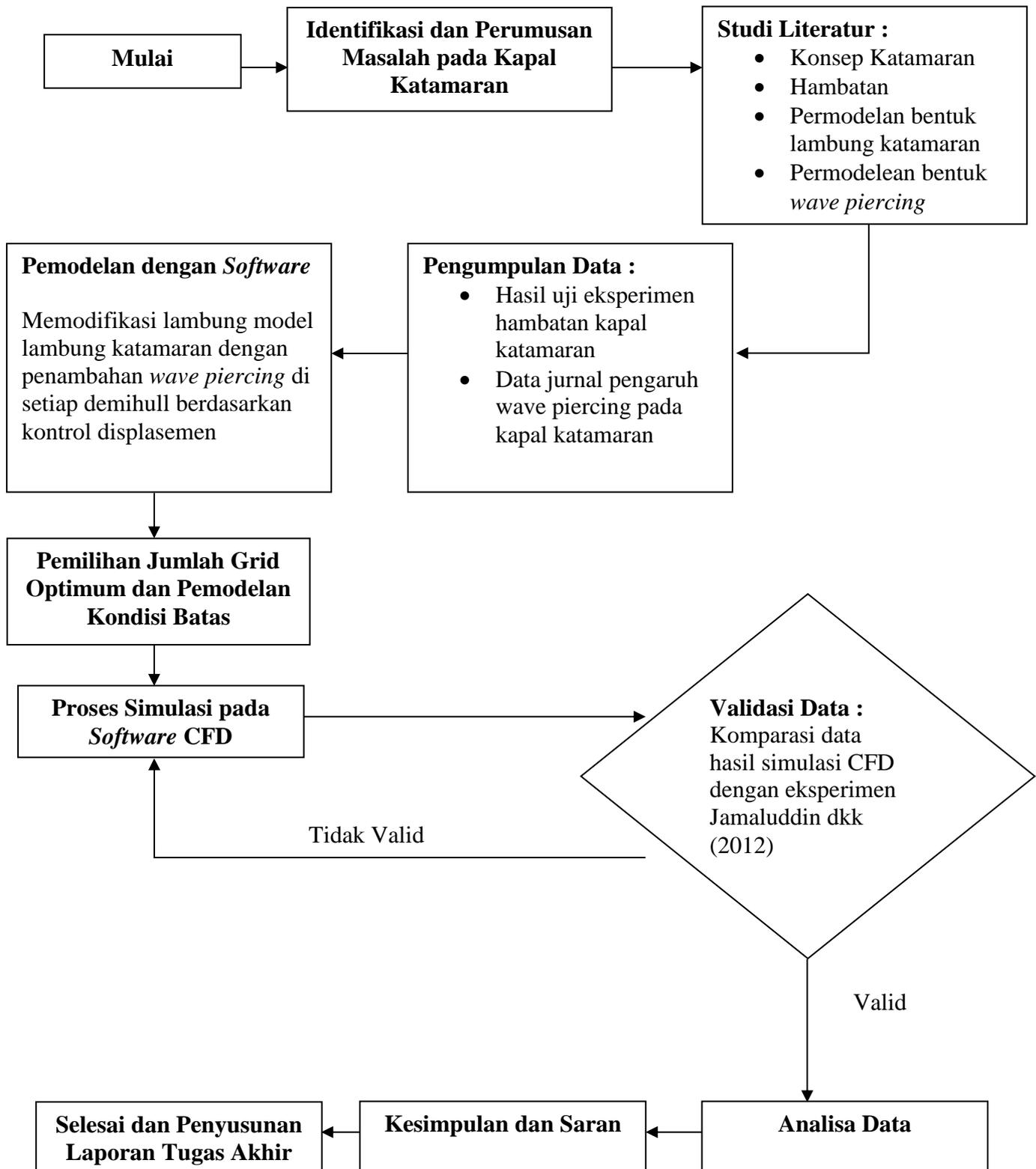
3. Verifikasi Hasil dengan Data Eksperimen

Verifikasi dilakukan bertujuan untuk memastikan bahwa data yang didapatkan dari hasil simulasi CFD adalah benar atau valid. Proses yang dilakukan pada tahap ini adalah membandingkan data yang didapatkan dari simulasi CFD dengan hasil eksperimen yaitu uji tarik. Hasil simulasi yang benar akan menunjukkan margin atau perbedaan nilai yang relatif kecil dalam *range* tertentu antara kedua hasil.

Koefisien hambatan yang akan menjadi perbandingan karena koefisien tersebut bersifat non dimensional yang berarti tidak berpengaruh pada kondisi pengujian. Berbeda dengan nilai hambatan, nilai hambatan akan berbeda jika menggunakan kondisi yang berbeda antara CFD dengan eksperimen sehingga lazim digunakan koefisien hambatan untuk proses perbandingan dalam proses verifikasi seperti yang telah diterapkan oleh (Salas dkk, 2015)

Kontrol batasan masalah meliputi model, kecepatan serta kondisi pengujian yang perlu diperhatikan. Ketiganya dibuat sama antara mode eksperimen dari uji tarik dengan simulasi CFD. Model yang dilakukan verifikasi adalah model NWV dengan dimensi dan bentuk yang sama dengan model Jamaluddin dkk (2012). Pemakaian model ini dilakukan untuk menjembatani verifikasi data pengujian katamaran dengan modifikasi *wave piercing*. Ukuran model NWV telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Variasi kecepatan pada proses simulasi dijalankan pada variasi yang sama dengan pengujian di *towing tank* yaitu 6 variasi kecepatan $Fr = 0.19-0.65$. Kondisi percobaan yang meliputi jenis fluida.

III.8. Flowchart Metodologi Penelitian



BAB IV SIMULASI CFD

IV.1. Tahapan Simulasi CFD

Computational Fluid Dynamics adalah proses analisa yang melibatkan sistem tertentu yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena terkait seperti reaksi kimia dimana dalam proses penyelesaiannya dan analisa perhitungan dilakukan simulasi berbasis komputer. Tekniknya sangat berguna dan mencakup berbagai bidang aplikasi industri dan non-industri (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Nilai hambatan yang dapat diperoleh dari simulasi CFD adalah hambatan total dan hambatan viskos. Perhitungan hambatan kapal dilakukan dengan menggunakan *software* CFD-Ansys CFX terdapat 2 metode yang berbeda pada tahap *modeling* yaitu *free surface* dan tanpa *free surface* (kekentalan murni) . Proses simulasi kapal dengan *free surface* atau disebut simulasi 2 fluida untuk memperoleh nilai hambatan total dari kapal. Simulasi 2 fluida terdapat batas permukaan kedua fluida yang terjadi fluktuasi dari masing – masing fluida yang akan membentuk suatu pola gelombang. Gelombang ini dapat didefinisikan sebagai sistem gelombang yang dihasilkan akibat laju kapal. Proses simulasi tanpa *free surface* (kekentalan murni) menggunakan 1 fluida untuk mendapatkan hambatan viskos kapal dengan kondisi batas yang telah ditetapkan.

Pemodelan kapal menggunakan grid tetrahedral untuk bentuk – bentuk *unstructural* yang digunakan dengan *the viscous flow code* untuk komputasi domain dan menggunakan grid quadrilateral dengan *the potential flow code* untuk 29 pemodelan kapal dan permukaan air disekitar badan kapal (Jamaluddin dkk, 2012). Hal ini berhubungan dengan kualitas grid yang digunakan untuk konvergensi dan keakuratan perhitungan CFD dimana kualitas grid dibahas secara lebih terperinci oleh Thompson dkk. (1999) dan Deng dkk. (2010).

IV.1.1. Simulasi CFD 1 Fluida

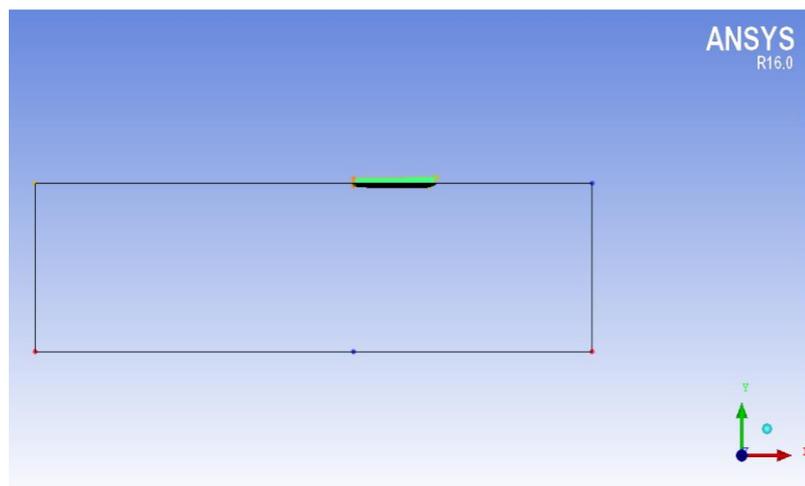
Kekentalan murni atau simulasi 1 fluida ini menggunakan domain hanya fluida air saja. Tujuan utama dari simulasi ini adalah untuk mendapatkan hambatan viskos dengan kondisi batas yang ditentukan.

1. Tahap *Pre-Processor*

Langkah ini dilakukan sebelum dilakukan perhitungan. Proses *preprocessor* merupakan tahap untuk menentukan karakteristik kondisi – kondisi batas pada objek uji berupa model kapal dan dinding uji. Tahap ini dilakukan untuk membuat objek serta deskripsi karakteristiknya agar dapat diterjemahkan oleh *software*. Setiap batasan yang diberikan akan berpengaruh pada hasil simulasi. Berikut adalah tahapan yang perlu dilakukan.

a. Pemodelan

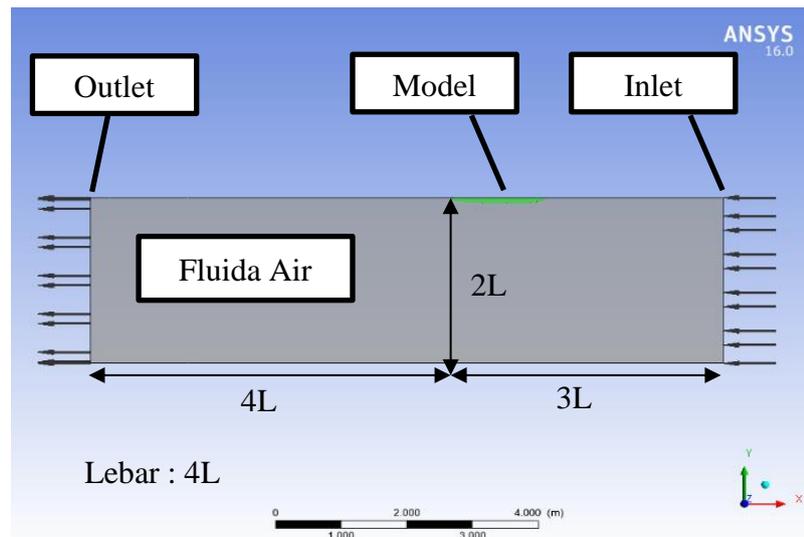
Pemodelan merupakan proses membuat bentuk kapal yang akan diteliti, selanjutnya diikuti dengan membuat bentuk kondisi batasnya dalam hal ini berbentuk *box* fluida. Sebelum dilakukan pemodelan di *software* CFD, terlebih dahulu diperlukan pemodelan kapal katamaran simetris tanpa *wave piercing* dan 3 model katamaran modifikasi menggunakan *wave piercing* dilakukan di Maxsurf. Pemodelan dilakukan secara 3D, setelah model selesai kemudian diekspor ke dalam bentuk file *.iges*, yang sebelumnya format file Maxsurf adalah *.msd*. Ekspor file *.msd* menjadi *.iges* ini diperlukan agar file dapat diterjemahkan oleh Ansys ICEM. Posisi kapal berada di *top wall* sehingga yang terkena fluida hanya lambung di bawah sarat. Pemodelan kapal katamaran dapat dilihat pada Gambar IV.1



Gambar IV. 1 Pemodelan 1 Fluida

Ukuran skala model yang digunakan pada pemodelan adalah satuan meter. Menurut Utama (1999) kondisi ukuran domain optimum yang bekerja pada model dengan keadaan aliran fluida eksternal adalah :

1. Jarak sisi depan (*inlet*) terhadap model berkisar $2L - 3L$
2. Jarak dinding samping ke model $\geq 2L$
3. Jarak sisi belakang (*outlet*) terhadap model berkisar $3L - 5L$



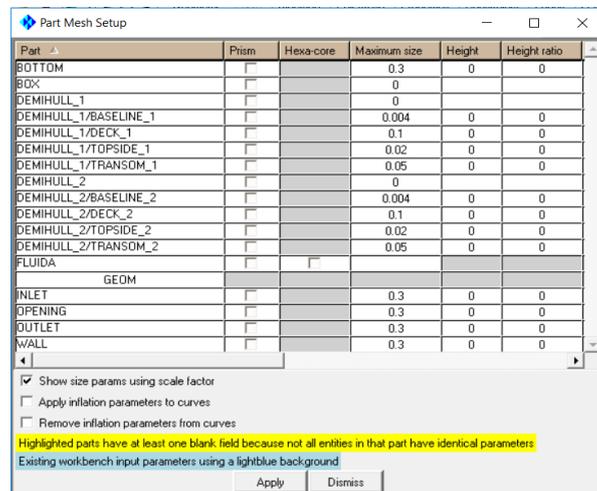
Gambar IV. 2 Bentuk Model dan Ukuran Domain

Setiap sisi dari *box* dibuat *surface* yang selanjutnya didefinisikan sebagai *part* dan dapat diartikan sebagai bagian dari *boundary condition*. Perintah yang digunakan adalah *create/modify surface* – beri nama *boundary condition – simple surface*. Berikut *boundary condition* yang telah dimodelkan sebagai berikut :

1. *Inlet* sebagai sisi masuknya fluida (air) yang terletak di bagian depan kapal.
2. *Outlet* sebagai sisi keluarnya fluida yang terletak dibagian belakang kapal.
3. *Wall* sisi bagian bawah, kanan, kiri dan atas sebagai batasan fluida.
4. Fluida yang didefinisikan oleh Ansys sebagai *body* yang pada proses *meshing* tidak perlu diatur sebagai grid karena bagian fluida (*body*) sudah terbaca sebagai kumpulan elemen.

b. *Meshing*

Meshing berfungsi untuk mendeskripsikan model yang telah dibuat sebagai elemen, selanjutnya dapat dihitung gaya – gaya yang bekerja pada setiap elemen tersebut. Langkah *meshing* dimulai dengan menentukan ukuran elemen yang digunakan pada setiap bagian. Perlu diingat semakin kecil ukuran *meshing* maka jumlah elemen akan semakin banyak sehingga waktu untuk menyelesaikan satu simulasi akan semakin lama dan menghasilkan file yang lebih besar. Jumlah elemen pada kapal katamaran WV4 dengan simulasi 1 fluida berjumlah 1121806 elemen. Komposisi grid yang digunakan dapat dilihat pada Gambar IV.3



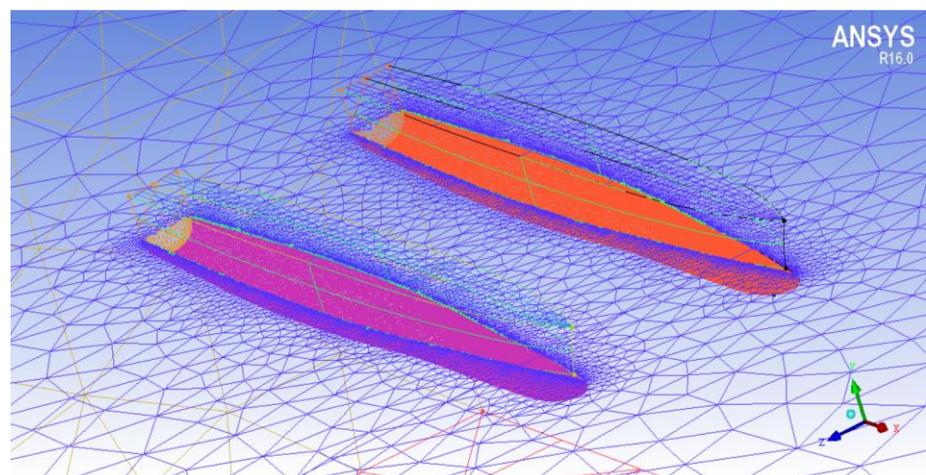
Part	Prism	Hexa-core	Maximum size	Height	Height ratio
BOTTOM	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.3	0	0
BOX	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0		
DEMIHULL_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0		
DEMIHULL_1/BASELINE_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.004	0	0
DEMIHULL_1/DECK_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.1	0	0
DEMIHULL_1/TOPSIDE_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.02	0	0
DEMIHULL_1/TRANSOM_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.05	0	0
DEMIHULL_2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0		
DEMIHULL_2/BASELINE_2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.004	0	0
DEMIHULL_2/DECK_2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.1	0	0
DEMIHULL_2/TOPSIDE_2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.02	0	0
DEMIHULL_2/TRANSOM_2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.05	0	0
FLUIDA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
GEOM	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
INLET	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.3	0	0
OPENING	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.3	0	0
OUTLET	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.3	0	0
WALL	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.3	0	0

Show size params using scale factor
 Apply inflation parameters to curves
 Remove inflation parameters from curves
Highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters.
Existing workbench input parameters using a lightblue background

Apply Dismiss

Gambar IV. 3 Pengaturan *Meshing* WV4 Simulasi 1 Fluida

Adapun perintah tahap pemilihan metode *meshing* yang digunakan adalah *compute mesh – mesh type (tetra/mixed) – mesh method (robust octree) – apply*. Selanjutnya klik *compute* untuk mendapatkan hasilnya.



Gambar IV. 4 Proses *Meshing* 1 Fluida pada ICEM-Ansys

2. Tahap pada Proses *Flow Solver*

Tahap sebelum dilakukan proses *running* adalah penentuan kondisi batas dari model. Kondisi batas dapat didefinisikan sebagai keadaan atau karakteristik dari bagian objek uji model kapal dan dinding uji. Seperti penentuan jenis fluida yang digunakan, temperatur, metode perhitungan yang digunakan penentuan tekanan pada dinding uji dan lain – lain. Berikut adalah kondisi batas yang digunakan pada tugas akhir ini.

a. Kondisi Batas *Inlet*

Inlet merupakan bagian sisi dimana tempat aliran fluida masuk. Pada sisi ini dilakukan pengisian data kecepatan dari aliran fluida yang disamakan dengan kecepatan gerak kapal. Pada simulasi ini diasumsikan sebagai elemen yang bergerak sedangkan kapal dalam kondisi seolah – olah diam.

b. Kondisi Batas *Outlet*

Outlet merupakan sisi untuk keluarnya aliran fluida. Kondisi untuk *outlet* dianggap dalam kondisi tidak bertekanan sehingga disimulasikan bahwa *outlet* berada pada kondisi *static pressure* dan nilainya 0 Pa

c. Kondisi Batas *Wall (Top, Side dan Bottom)*

Dinding-dinding fluida dianggap berada pada kondisi tanpa gesekan sehingga boundary detail disetting *free slip wall*.

d. Kondisi Batas Objek Kapal

Berbeda dengan keadaan yang diterapkan pada area dinding-dinding fluida. Permukaan model kapal uji akan mengalami gesekan dengan fluida akibat terjadinya kontak langsung dari keduanya. Sehingga pada simulasi ini model uji dikondisikan sebagai *no slip wall* (tidak terjadi selip).

e. Kondisi Domain

Domain merupakan sebagai media atau tempat dimana model uji yang akan disimulasikan dapat bergerak. Pada simulasi *full viscous*, domain hanya memiliki satu fluida yaitu air tawar dengan massa jenis 1000 kg/m^3 disesuaikan dengan kondisi tempat uji tarik. Sifat fluida yang digunakan

yakni *continous fluid* pada umumnya memiliki tekanan sebesar 1 atm karena kapal berada di atas permukaan air.

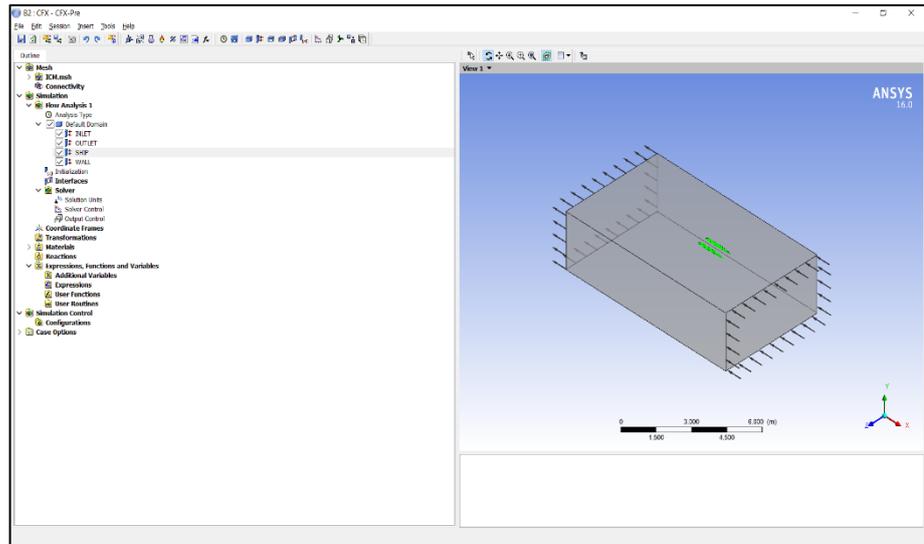
Pemilihan model turbulen didasarkan pemecahan persamaan yang mengatur fluida, domain fluida dibagi ke dalam jumlah sel yang terbatas dan persamaannya dirubah ke dalam bentuk aljabar. Pada simulasi ini, model turbulen yang digunakan *Shear Stress Transport (SST)*. Penggunaan turbulensi fluida SST pada kondisi *isothermal* lebih memberikan akurasi yang lebih baik. Metode turbulen ini telah digunakan oleh Menter (1993a, 1994b) dan dinyatakan sebagai metode paling akurat untuk pemodelan berbagai aliran yang termasuk dalam diskusi NASA Technical Memorandum (Bardina dkk, 1997; Swennberg, 2000). Model turbulen ini memecahkan turbulensi berbasis (k- ω) pada dinding – dinding dan turbulensi berbasis (k- ϵ) pada aliran.

f. *Initialization*

Pada simualsi ini fluida dianggap bergerak hanya pada satu arah yaitu pada sumbu x atau sumbu u, pada sumbu u diisikan nilai kecepatan kapal sedangkan pada sumbu lain dianggap nol.

g. *Solver Control*

Pada tahap solver control dikenal istilah RMS (Root Mean Square) yang merupakan salah satu komponen dari proses konvergensi pada tahap validasi. RMS menggambarkan jumlah iterasi yang diinginkan. Jumlah iterasi tersebut dapat diungkapkan pada jumlah residual target yang ingin dicapai, yaitu tingkat kesalahan yang mungkin terjadi selama iterasi. Apabila nilainya diperkecil akan berakibat pada semakin akurat dari hasil yang akan dikeluarkan. Pada simulasi full viscous, residual target untuk tahap konvergensi yaitu sampai 10^{-5} .



Gambar IV. 5 Tahap CFX Pre-Processor pada Simulasi 1 Fluida

IV.1.2. Simulasi CFD 2 Fluida

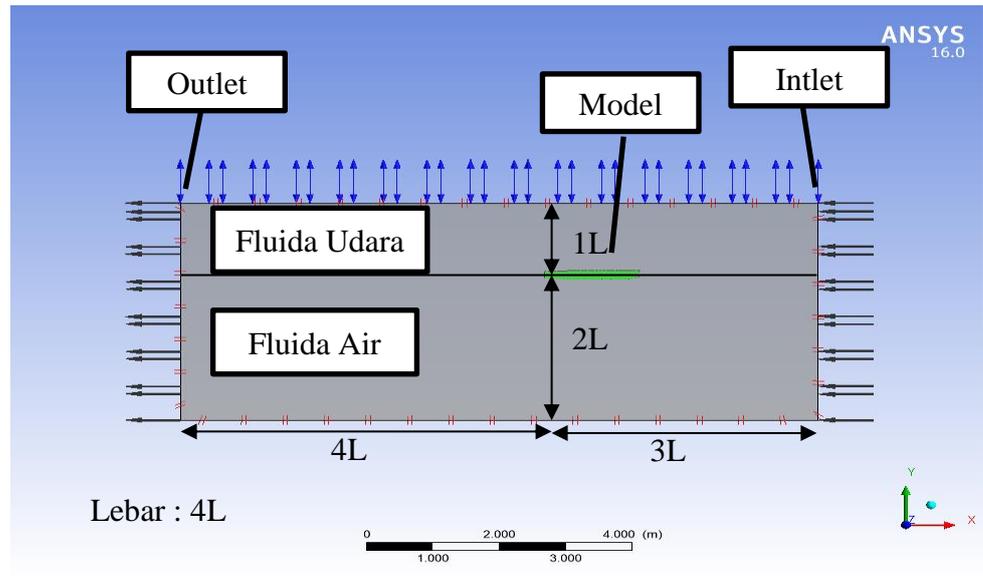
2 fluida didefinisikan mengacu pada 2 material atau bahan yang digunakan sebagai domain pada simulasi ini yaitu air dan udara sebagai fluida tempat model uji bergerak. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk memperoleh hambatan total, hambatan tidak hanya dihasilkan oleh kerja fluida air melainkan juga oleh udara. *Output* lainnya adalah visualisasi pola gelombang yang terbentuk akibat gerakan model uji.

1. Tahap *Pre-Processor*

Tahap ini dilakukan untuk membuat objek serta deskripsi karakteristiknya agar dapat diterjemahkan oleh *software*. Setiap batasan yang diberikan akan berpengaruh pada hasil simulasi. Berikut adalah tahapan yang perlu dilakukan.

a. Pemodelan

Sama seperti simulasi 1 fluida, di dalam simulasi 2 fluida tahap *preprocessor* diawali dengan pemodelan kapal di dalam domain, selanjutnya membuat bentuk kondisi batasnya dalam hal ini berbentuk *box* fluida yang terdiri dari udara untuk domain bagian atas sarat kapal dan fluida air untuk dibawah sarat. Pemodelan *free surface* dapat dilihat pada Gambar IV.6



Gambar IV. 6 Pemodelan Model dan Ukuran Domain 2 Fluida

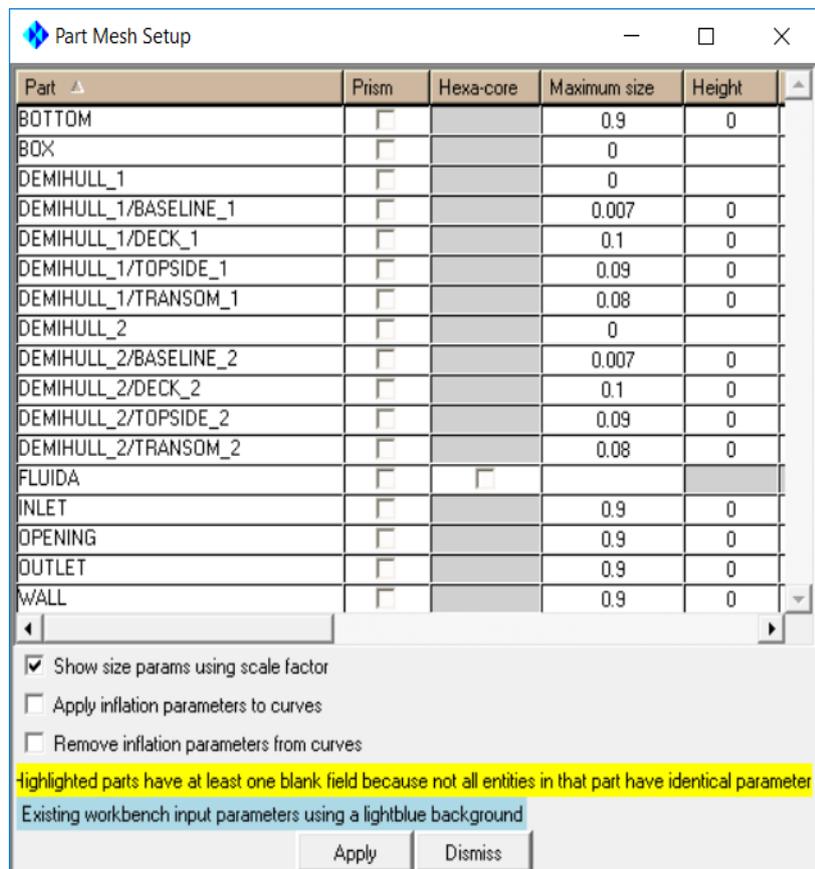
Setiap sisi selanjutnya diberi nama sehingga dapat diartikan dan mempermudah pembuatan *boundary condition*. Perintahnya adalah *create/modify surface* – beri nama *boundary condition* – *simple surface*. Berikut *boundary condition* yang telah dimodelkan sebagai berikut :

1. *Inlet* sebagai sisi masuknya fluida (air) yang terletak di bagian depan kapal.
2. *Outlet* sebagai sisi keluarnya fluida yang terletak di bagian belakang kapal.
3. *Wall* sisi bagian bawah, kanan, kiri dan atas sebagai batasan fluida.
4. Fluida yang didefinisikan oleh Ansys sebagai *body* yang pada proses *meshing* tidak perlu diatur sebagai grid karena bagian fluida (*body*) sudah terbaca sebagai kumpulan elemen. Berbeda dengan simulasi sebelumnya, domain fluida akan dibagi menjadi 2 pada pembuatan kondisi batas yaitu air dan udara.

b. *Meshing*

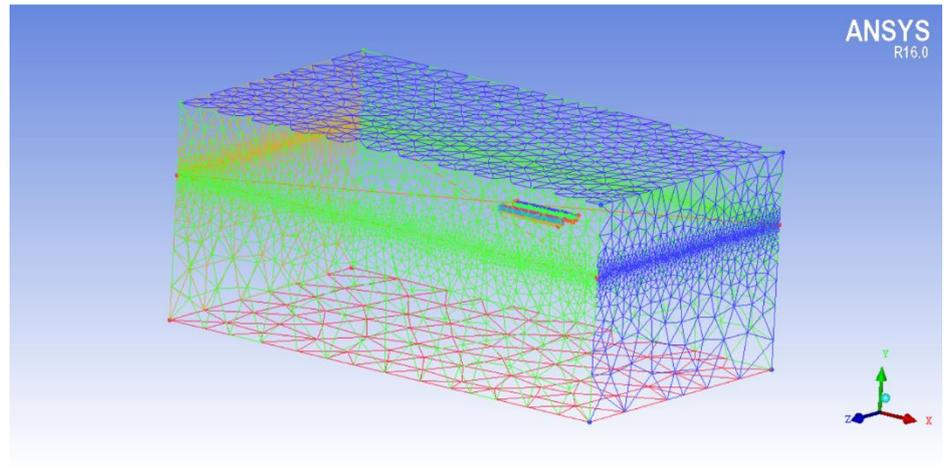
Proses *meshing* yang dilakukan sama seperti simulasi 1 fluida. Penambahan *meshing* dilakukan dengan hanya menambah *mesh* di atas domain air yang sebelumnya telah dibuat. Hal ini untuk mempertahankan

kondisi domain fluida air sebelumnya agar tidak mengalami perubahan. Karena adanya penambahan domain fluida udara maka jumlah elemen akan menjadi lebih besar. Untuk mendapatkan hasil yang optimum maka diperlukan *meshing* dengan lebih rapat di bagian batas fluida antar air dengan udara. Perintah yang digunakan yaitu *create mesh density* – tentukan letak *density* pada batas air dan udara. Jumlah elemen optimum pada kapal katamaran WV4 dengan simulasi 2 fluida berjumlah 1351929 elemen. Komposisi grid yang digunakan dapat dilihat pada Gambar IV.7

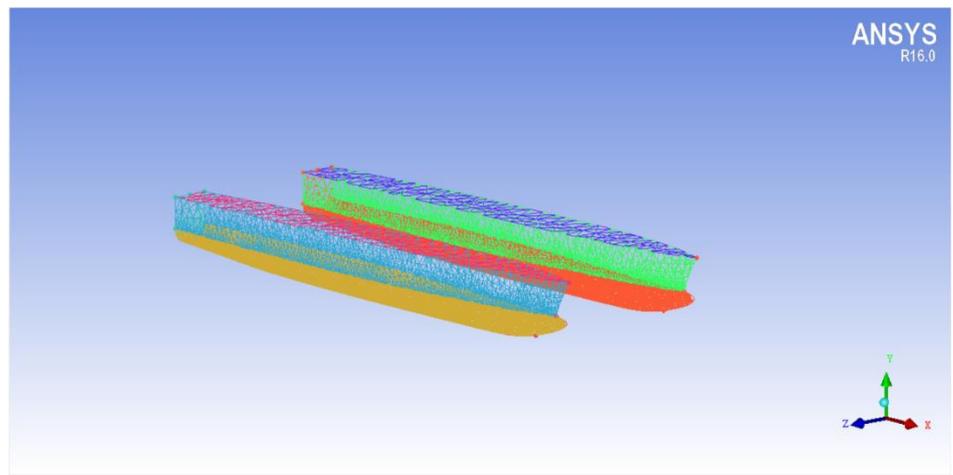


Gambar IV. 7 Pengaturan *Meshing* WV4 Simulasi 2 Fluida

Adapun perintah tahap pemilihan metode *meshing* yang digunakan adalah *compute mesh* – *mesh type (tetra/mixed)* – *mesh method (robust octree)* – *apply*. Selanjutnya klik *compute* untuk mendapatkan hasilnya.



(a)



(b)

Gambar IV. 8 Meshing Domain (a) dan Model (b)

2. Tahap pada Proses *Flow Solver*

Seperti simulasi full viscous, pada tahap pre-processor perlu melakukan mendefinisikan domain dan boundary dari part-part yang telah dibuat di ICEM-Ansys. Simulasi *free surface* menggunakan 2 fluida maka kondisi domain lebih kompleks daripada simulasi 1 fluida maka diperlukan pengaturan ekspresi – ekspresi agar dapat membagi domain menjadi 2 fluida.

a. Pendefinisian CEL (CFX Expression Language)

CEL merupakan ekspresi – ekspresi bahasa pemrograman terhadap *boundary condition* (CFX, 2007). Pada simulasi *free surface* membutuhkan penentuan *boundary* dan *initial condition*, sehingga diperlukan ekspresi CEL untuk menentukan domain menjadi 2 fluida.

Ekspresi CEL yang digunakan pada simulasi *free surface* dapat dilihat pada Tabel IV.1 berikut ini :

Tabel IV. 1 Pendefinisian CEL (*CFX Expression Language*)

Nama Bagian	CEL	Definisi
Tinggi hulu <i>free surface</i>	UpH	2.744 [m]
Tinggi hilir <i>free surface</i>	DownH	2.744 [m]
Densitas air	DenWater	1000 [kg m ⁻³]
Desnsitas udara	DenRef	1.185 [kg m ⁻³]
Densitas air - desnsitas udara	DenH	(DenWater-DenRef)
Fraksi volume udara (hulu)	UpVFAir	step((y-UpH)/1[m])
Fraksi volume air (hulu)	UpVFWater	1-UpVFAir
Distribusi tekanan hulu	UpPres	DenH*g*UpVFWater*(UpH-y)
Fraksi volume udara (hilir)	DownVFAir	step((y-DownH)/1[m])
Fraksi volume air (hilir)	DownVFWater	1-DownVFAir
Distribusi tekanan hilir	DownPres	DenH*g*DownVFWater*(DownH-y)

b. Kondisi Batas Domain

Pada langkah ini jenis fluida dibagi dalam dua jenis yaitu air dan udara. Pada tab Basic Setting terdapat opsi Gravity X Dim, Gravity Y Dim, dan Gravity Z Dim yang diisi dengan angka 0 m/s; -g (Gravitasi = 9.81 m/s²); dan 0 m/s secara berturut-turut. Untuk Buoy. Ref. Density diisi dengan “DenRef“ sesuai dengan ekspresi-ekspresi CEL yang telah dijelaskan (CFX, 2007). Untuk opsi-opsi lainnya dibiarkan dengan setting default. Pada tab Fluid Model, kotak di sebelah pilihan “Homogeneous Model” dicentang dan pada opsi Free Surface Model di-setting mode “Standard”, sedangkan untuk model turbulensi di-setting “Shear Stress Transport”. Untuk opsi-opsi lainnya dibiarkan dengan setting default. Pada tab Fluid Specific Model, harus dipastikan bahwa fluida yang telah di-setting pada proses ini ada dua yaitu air dan udara.

Seperti pada simulasi 47 sebelumnya, model turbulensi fluida menggunakan shear stress transport pada kondisi isothermal lebih memberikan akurasi yang lebih baik. Metode turbulen ini telah digunakan oleh Menter (1993a, 1994b) dan dinyatakan sebagai metode paling akurat untuk pemodelan berbagai aliran yang termasuk dalam diskusi NASA Technical Memorandum (Bardina dkk, 1997; Swennberg, 2000).

c. Kondisi Batas *Inlet*

Inlet merupakan bagian sisi dimana tempat aliran fluida masuk. Pada sisi ini dilakukan pengisian data kecepatan dari aliran fluida yang disamakan dengan kecepatan gerak kapal. Pada simulasi ini diasumsikan sebagai elemen yang bergerak sedangkan kapal dalam kondisi seolah – olah diam.

d. Kondisi Batas *Outlet*

Outlet merupakan sisi untuk keluarnya aliran fluida atau disebut juga bagian hulu. Kondisi tekanan untuk *outlet* dianggap dalam kondisi statis dan merupakan fungsi ekspresi ‘DownPres’ (CFX, 2007).

e. Kondisi Batas *Wall (Side)*

Dinding sisi fluida diasumsikan sebagai *free slip*, yaitu kondisi tanpa gesekan (bebas slip). Kondisi lain yang dapat digunakan adalah *symmetry*, yaitu kondisi tekanan dalam dan luar lingkungan pengujian sama, gelombang tidak dipantulkan terhadap dinding.

f. Kondisi Batas *Bottom*

Bottom didefinisikan sebagai *wall* dengan setting *free slip* yang artinya bebas slip, bagian ini tidak mengalami gesekan.

g. Kondisi Batas *Opening*

Top didefinisikan sebagai *opening* yang berarti volume udara di bagian atas terbuka, tidak mengalami gaya dan tekanan. Turbulensi pada sisi *opening* adalah nol (CFX, 2007)

h. Kondisi Batas Objek Kapal

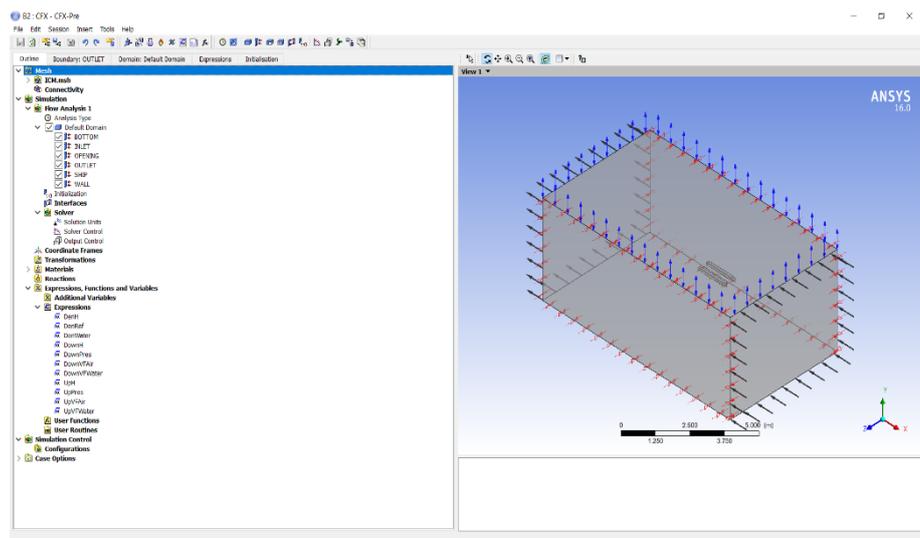
Permukaan model kapal uji akan mengalami gesekan dengan air dan udara akibat terjadinya interaksi. Sehingga pada simulasi ini model uji dikondisikan sebagai *no slip wall* (tidak terjadi selip) (CFX, 2007).

i. Global Initialization

Pada simulasi ini fluida dianggap bergerak hanya pada satu arah yaitu pada sumbu x atau sumbu u, pada sumbu u diisikan nilai kecepatan kapal sesuai dengan batas inlet sedangkan pada sumbu lain dianggap nol. Initialization merupakan tahap pengaturan dimana kecepatan aliran fluida diatur, fraksi udara diatur dengan mengisi “UpVFAir” dan fraksi air diisi dengan “UpVFWater”

j. Solver Control

Pada tahap ini melakukan setting residual target untuk tahap konvergensi dimana pada simulasi *free surface* diatur 10^{-5} . Selain mengatur jumlah iterasi pada tahap ini agar domain pada simulasi ini dapat terbagi menjadi 2 fluida yaitu air dan udara, maka perlu melakukan setting pada tab Advanced Options, dan mencentang multiphase control dan volume fraction coupling. Kemudian pilih option “coupled”.



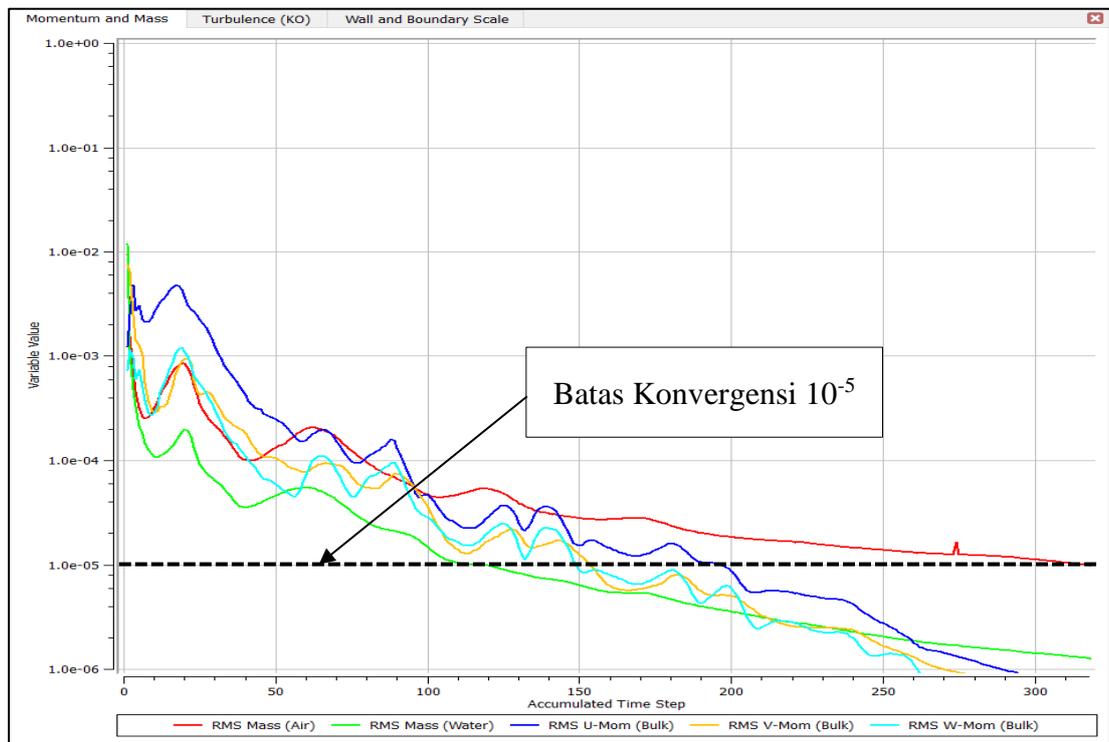
Gambar IV. 9 Tahap CFX Pre-Processor pada Simulasi 2 Fluida

IV.2. Proses Validasi

Diperlukan tahap validasi hasil untuk memastikan bahwa metode yang diterapkan pada model uji dengan semua kondisi batasnya yang digunakan adalah benar. Hal ini berfungsi untuk menghindari kesalahan hasil pada saat simulasi model penelitian yang sebenarnya. Ada 2 proses validasi dalam simulasi CFD (AIAA, 1998). Proses validasi yang digunakan dari hasil Ansys CFD sebagai berikut :

1. Konvergensi

Berhentinya proses iterasi dapat disebabkan oleh beberapa hal yaitu karena proses iterasi telah mencapai batas maksimum dari jumlah iterasi yang ditentukan dan proses iterasi telah batas konvergensi yang telah ditentukan. Pada proses ini perhitungan dilakukan hingga menuju nilai error terkecil atau didapatkan nilai yang konvergen. Besarnya nilai *convergence criteria* yang digunakan sebagai batas konvergensi atau batas *Root Mean Square* (RMS) pada Ansys CFX adalah 10^{-5} . Nilai konvergensi ini telah banyak digunakan pada berbagai perhitungan aplikasi teknik. Berikut merupakan grafik konvergensi pada Gambar IV.10



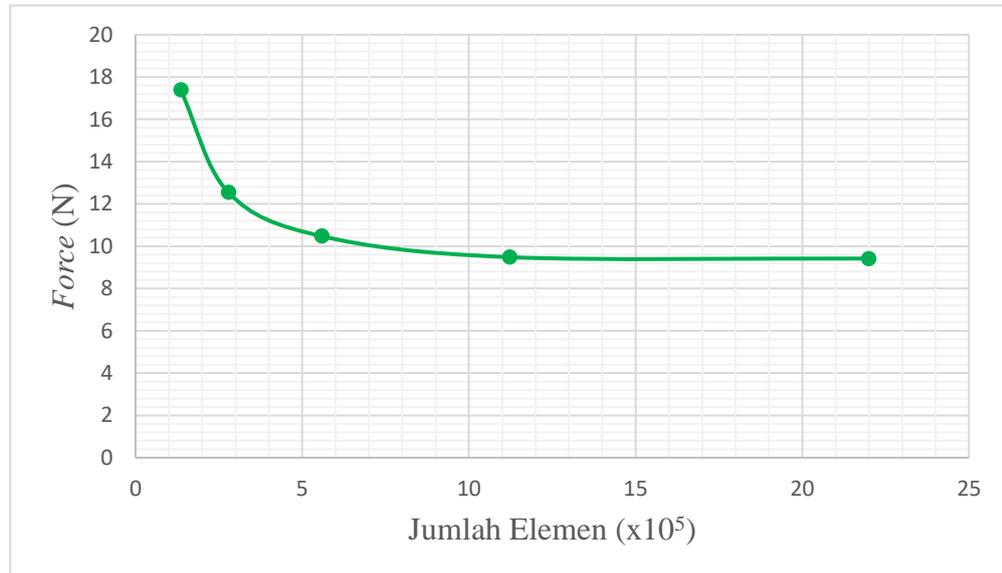
Gambar IV. 10 Grafik Konvergensi

2. Grid Independence

Setelah dilakukan simulasi pada CFD, berikut ini adalah hasil *Grid Independence* yang telah dilakukan pada model katamaran WV4 dengan kecepatan 2.4 m/s. Karena pada simulasi terdapat 2 kondisi batas yang berbeda maka terdapat 2 *Grid Independence* yaitu untuk R_V pada 1 fluida dan R_T untuk 2 fluida. Nilai hambatan antara suatu jumlah elemen dengan elemen sebelumnya kurang dari 2% maka *Grid Independence* mencapai posisi optimum. (Utama & Molland, 2001). *Grid Independence* untuk 1 fluida yang telah dilakukan simulasi di CFD dapat dilihat pada Tabel IV.2

Tabel IV. 2 *Grid Independence* untuk Simulasi 1 Fluida

No	Jumlah Elemen	Force (N)	Margin
1	135465	17.3936	
2	278465	12.5475	27.86%
3	558398	10.4756	16.51%
4	1121806	9.48216	9.48%
5	2199277	9.41564	0.70%

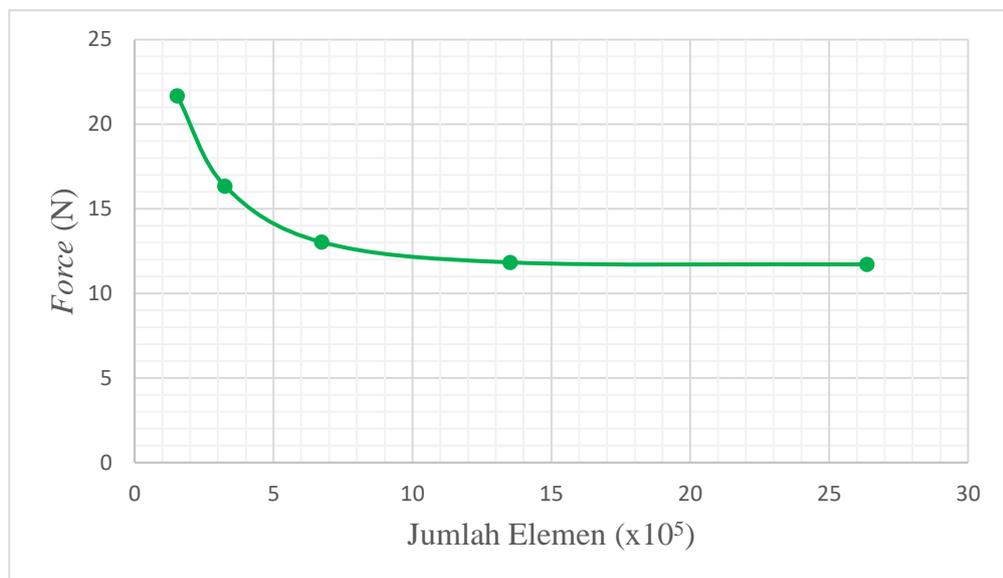


Gambar IV. 11 *Grid Independence Full Viscous*

Grid Independence pada simulasi 1 fluida mencapai posisi optimum pada percobaan ke-4 dengan jumlah elemen yaitu 1.121.806. Hal ini dapat dilihat, pada percobaan ke-4 margin yang didapatkan tidak sampai 2% yaitu hanya 0.7%. Untuk *Grid Independence* pada simulasi 2 fluida dapat dilihat pada Tabel IV.3

Tabel IV. 3 Grid Independence untuk Simulasi 2 Fluida

No	Jumlah Elemen	Force (N)	Margin
1	153268	21.6755	
2	325259	16.3456	24.59%
3	673436	13.0326	20.27%
4	1351929	11.8307	9.22%
5	2636697	11.7138	0.99%



Gambar IV. 12 Grid Independence Free Surface

Dari tabel dan grafik di atas dapat dilihat bahwa nilai optimum pada simulasi 2 fluida penggunaan elemen berada pada percobaan ke-4. Jumlah elemen yang digunakan sebanyak 1.351.929 elemen. Pemilihan nilai optimum karena posisi tersebut margin yang didapatkan kurang dari 2% yaitu 0.99% seperti yang diterangkan oleh Utama dan Molland (2001).

BAB V ANALISA DAN PEMBAHASAN

V.1. Data Hasil Eksperimen

Data dari hasil *towing test* yang diambil dari pengujian eksperimental yang telah dilakukan Jamaluddin dkk (2012). Model NWV yang disimulasi pada CFD merupakan adopsi dari model milik Jamaluddin. Berikut ini merupakan data hasil pengujian *towing tank* model NWV :

Tabel V. 1 Nilai Hambatan Kapal Hasil Uji Tarik

Froude Number	R_T (N)	R_v (N)
0.19	0.841	0.789
0.28	2.273	1.626
0.37	4.210	2.724
0.46	9.118	4.074
0.56	10.982	5.645
0.65	12.308	7.455

Berdasarkan prosedur pengujian *towing tank*, output data yang akan didapatkan dari proses eksperimen adalah hambatan total, sedangkan untuk hambatan viskos dengan dilakukannya eksperimen dengan menggunakan *wind tunnel* pada kecepatan rendah atau menggunakan metode numerik menggunakan CFD (Utama & Molland, 2001). Tahapan awal yang dilakukan adalah pengujian model kapal dengan kecepatan rendah. Dengan asumsi bahwa pada kondisi seperti ini hambatan gelombang bernilai sangat kecil dan hambatan viskos tersebut mendominasi gaya yang bekerja pada model. Pengujian model kapal dengan kecepatan yang lebih tinggi dapat diperoleh nilai hambatan gelombang melalui penggunaan tren.

Dari setiap data di atas terdapat kolom yang menunjukkan bahwa variasi *froude number* sebagai acuan dalam menentukan kecepatan pengujian model. Nilai kecepatan model uji dapat

dihitung dengan menggunakan rumus umum hubungan antara *froude number* dengan kecepatan, panjang kapal dan gaya gravitasi.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (5.1)$$

Untuk nilai hambatan dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus umum hambatan seperti dibawah ini :

$$R = \frac{1}{2} \rho C WSA V^2 \quad (5.2)$$

Dimana :

R = hambatan kapal (N)

ρ = densitas fluida (kg/m³)

C = koefisien hambatan

WSA = luas bidang basah lambung (m²)

V = kecepatan kapal (m/s)

Pada kondisi eksperimen model, hasil uji Tarik pada *towing tank* yang terdiri dari hambatan total, hambatan viskos dan hambatan gelombang dilakukan pada kondisi air tenang (*Calm Water*). Tujuan dengan kondisi tersebut agar mempermudah proses pengujian atau simulasi. Nilai hambatan gelombang dapat ditentukan dari hasil selisih antara hambatan total dengan hambatan viskos. Rumus umum seperti ini :

$$R_T = R_V + R_W \quad (5.3)$$

Sehingga untuk koefisien hambatan total didefinisikan sebagai berikut :

$$C_T = C_V + C_W \quad (5.4)$$

Untuk mendapatkan nilai komponen hambatan yang lainnya dapat menggunakan rumus empiris yang telah banyak digunakan pada penelitian – penelitian sebelumnya.

Dari hasil eksperimen yang didapatkan sebelumnya yaitu hambatan total dan hambatan viskos kapal maka dapat diperoleh nilai – nilai koefisien hambatan. Berikut nilai koefisien dari komponen – komponen hambatan disajikan pada Tabel V.2

Tabel V. 2 Data Koefisien Hambatan Hasil Uji Tarik

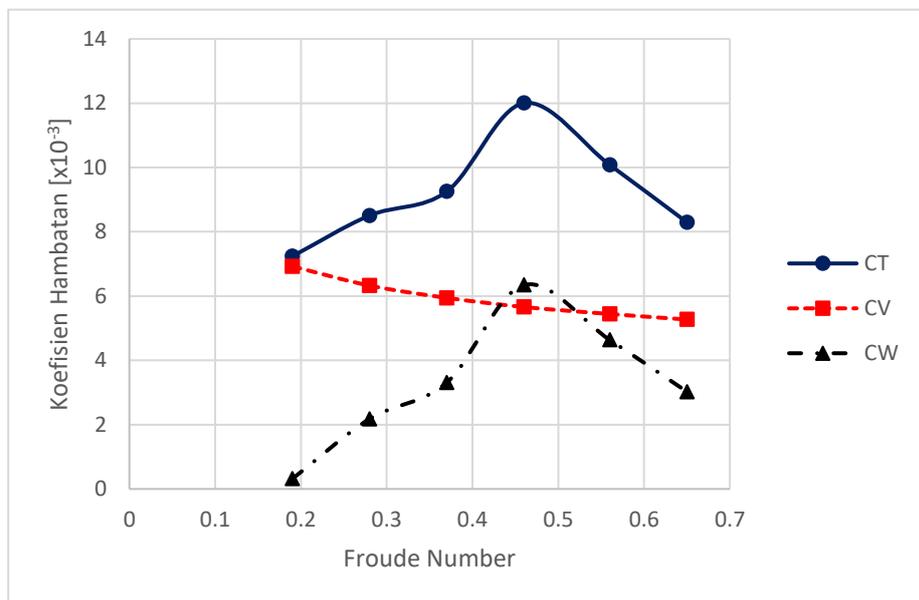
F_n	R_T (N)	R_v (N)	C_T ($\times 10^{-3}$)	C_v ($\times 10^{-3}$)	C_w ($\times 10^{-3}$)
0.19	0.841	0.789	6.819	6.506	0.313
0.28	2.273	1.626	8.203	5.975	2.228
0.37	4.210	2.724	8.552	5.636	2.916
0.46	9.118	4.074	11.854	5.392	6.462
0.56	10.982	5.645	9.942	5.206	4.736
0.65	12.308	7.455	8.197	5.056	3.141

V.2. Data Hasil CFD

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, perhitungan hambatan total kapal terbagi menjadi 2 komponen yaitu hambatan viskos dan hambatan gelombang, seperti yang dijelaskan oleh (Sahoo dkk, 2003). Perhitungan hambatan kapal dilakukakan dengan menggunakan *software* CFD-Ansys CFX dimana telah dijelaskan pada bab simulasi CFD, terdapat 2 proses simulasi berbeda yaitu tanpa *free surface* (kekentalan murni) dan menggunakan *free surface*. Tanpa *free surface* dengan 1 fluida memiliki keterbatasan dalam perhitungan yang digunakan untuk menentukan hambatan total sehingga hanya didapatkan hambatan viskos kapal dengan kondisi batas yang telah ditetapkan. Proses simulasi kapal dengan *free surface* atau disebut simulasi 2 fluida untuk memperoleh nilai hambatan total dari kapal, sedangkan untuk hambatan gelombang merupakan selisih antara hambatan gelombang dengan hambatan viskos. Penerapan kondisi *free surface* direkomendasikan dalam perhitungan hambatan kapal melalui analisa numerik yaitu CFD sesuai dengan pengujian yang telah dilakukan oleh Jamaluddin dkk (2012). Penetapan kondisi batas dilakukan pada tahap CFX-pre meliputi geometri model, densitas fluida, temperatur dan turbulensi, selanjutnya dilakukakn pendefinisian sebagai input data pada tahap *solver*. Setelah tahap *solver*, representasi hasil pada tahap *post-processor*. Hasil berupa nilai hambatan model yang disajikan pada tabel berikut :

Tabel V. 4 Data Koefisien Hambatan Model NWW Simulasi CFD

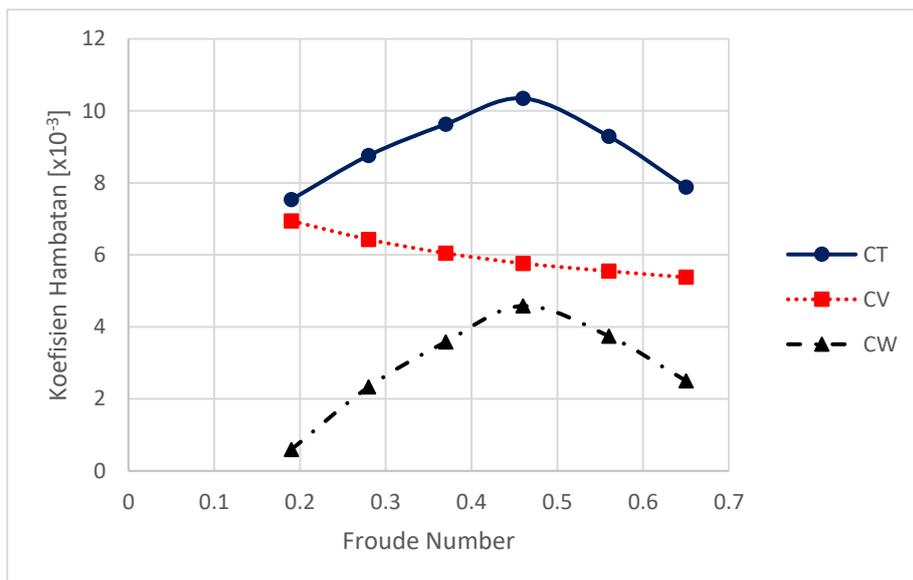
Fn	R _T (N)	R _V (N)	C _T (x 10 ⁻³)	C _V (x 10 ⁻³)	C _w (x 10 ⁻³)
0.19	0.877	0.839	7.239	6.922	0.317
0.28	2.315	1.722	8.506	6.326	2.179
0.37	4.471	2.873	9.252	5.944	3.308
0.46	9.070	4.277	12.004	5.660	6.344
0.56	10.929	5.901	10.080	5.442	4.638
0.65	12.232	7.772	8.295	5.271	3.024



Gambar V. 1 Grafik Koefisien Hambatan NWW

Tabel V. 5 Data Koefisien Hambatan Model WV2 Simulasi CFD

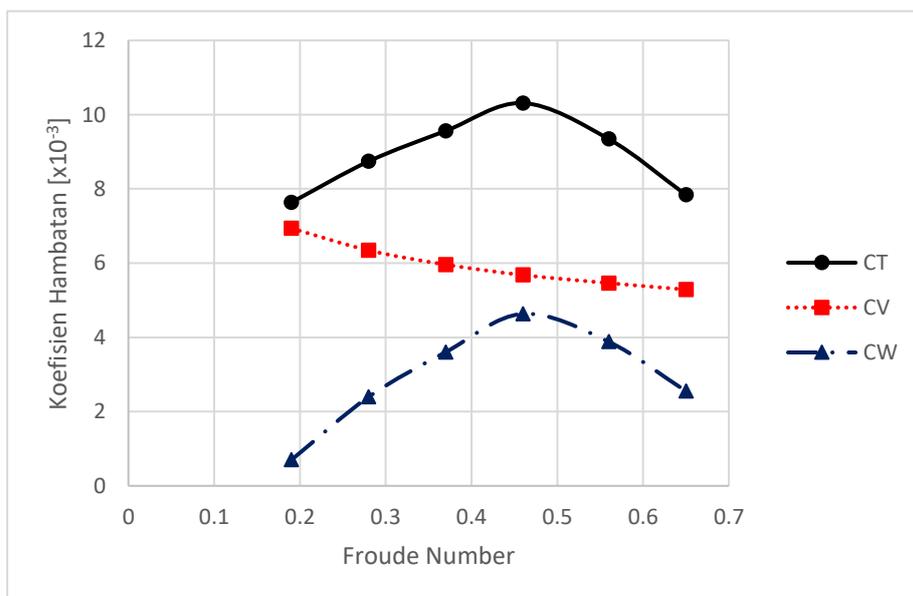
Fn	R _T (N)	R _V (N)	C _T (x 10 ⁻³)	C _V (x 10 ⁻³)	C _w (x 10 ⁻³)
0.19	0.928	0.855	7.539	6.943	0.595
0.28	2.421	1.777	8.760	6.430	2.330
0.37	4.727	2.968	9.631	6.047	3.584
0.46	7.941	4.424	10.348	5.765	4.583
0.56	10.234	6.111	9.294	5.549	3.744
0.65	11.804	8.056	7.882	5.379	2.503



Gambar V. 2 Grafik Koefisien Hambatan WV2

Tabel V. 6 Data Koefisien Hambatan Model WV4 Simulasi CFD

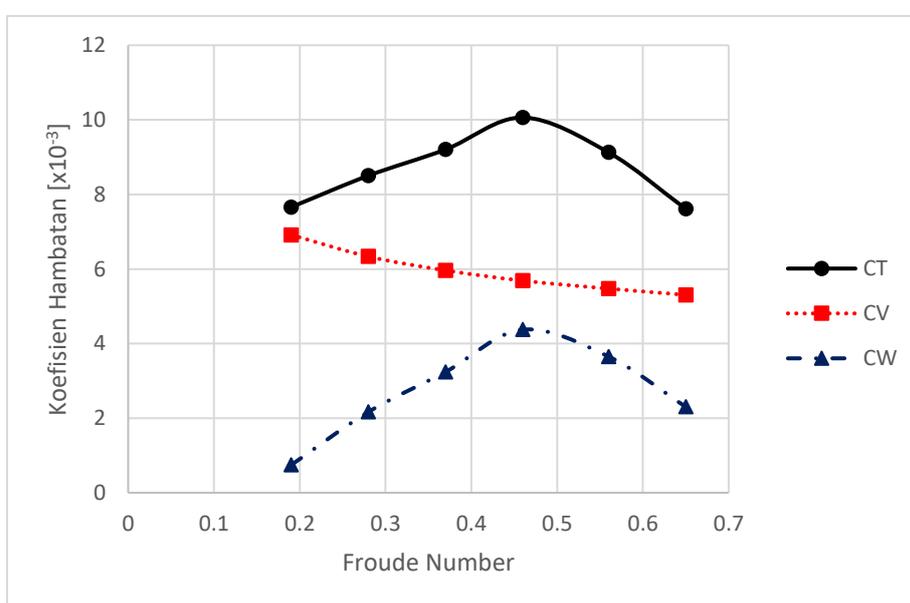
Fn	R _T (N)	R _V (N)	C _T (x 10 ⁻³)	C _V (x 10 ⁻³)	C _W (x 10 ⁻³)
0.19	0.947	0.860	7.636	6.937	0.699
0.28	2.434	1.767	8.741	6.345	2.395
0.37	4.730	2.948	9.563	5.960	3.603
0.46	7.974	4.392	10.312	5.679	4.633
0.56	10.367	6.061	9.343	5.462	3.881
0.65	11.831	7.982	7.839	5.289	2.550



Gambar V. 3 Grafik Koefisien Hambatan WV4

Tabel V. 7 Data Koefisien Hambatan Model WV6 Simulasi CFD

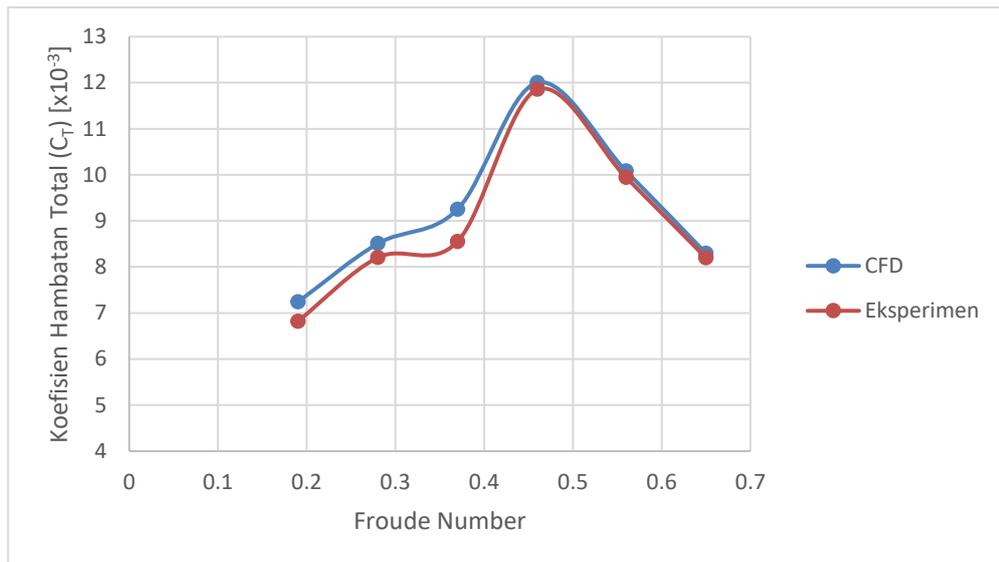
Fn	R_T (N)	R_V (N)	C_T ($\times 10^{-3}$)	C_V ($\times 10^{-3}$)	C_W ($\times 10^{-3}$)
0.19	0.961	0.867	7.660	6.914	0.746
0.28	2.395	1.784	8.503	6.335	2.168
0.37	4.605	2.983	9.204	5.963	3.241
0.46	7.869	4.448	10.061	5.686	4.375
0.56	10.243	6.144	9.126	5.474	3.653
0.65	11.618	8.099	7.611	5.306	2.305



Gambar V. 4 Grafik Koefisien Hambatan WV6

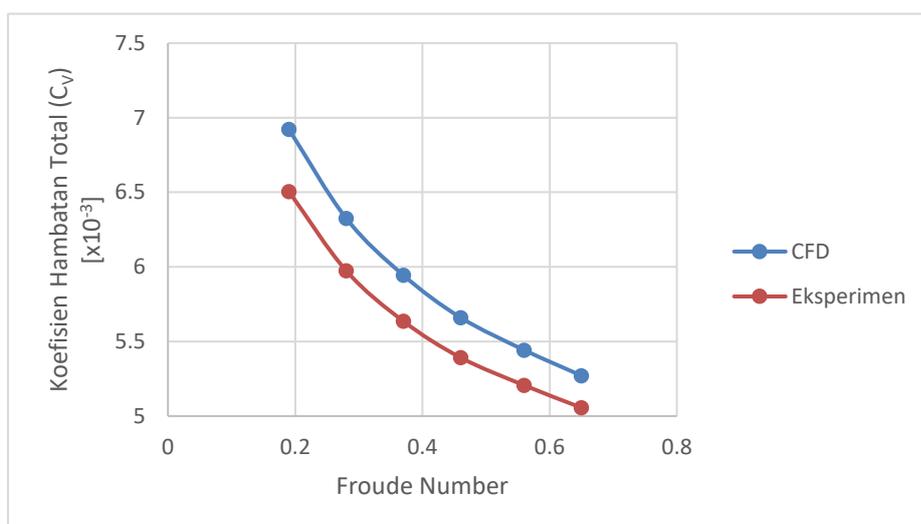
V.3. Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Model Numerik

Penulis akan menyajikan hubungan kedekatan antara hasil eksperimen dengan hasil CFD. Perbandingan hasil kedua metode tersebut bertujuan untuk meyakinkan bahwa hasil dari simulasi CFD atau numerik memiliki tingkat kebenaran yang memenuhi kriteria. Hasil dari simulasi CFD dikatakan benar jika output model numerik menunjukkan nilai dan *trendline* yang hampir sama dalam skala tertentu.



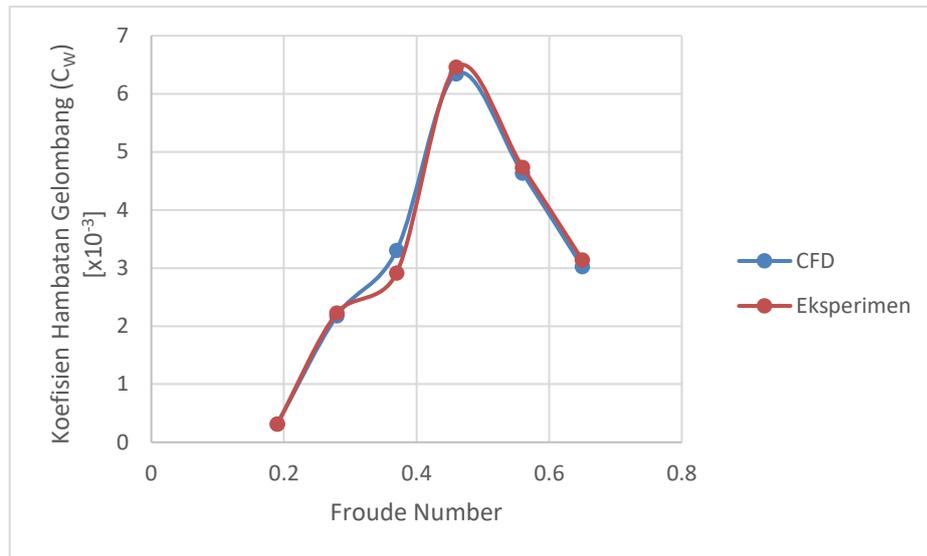
Gambar V. 5 Koefisien Hambatan Total CFD dan Eksperimen

Gambar V.5 memperlihatkan perbandingan hasil perhitungan antara CFD dengan eksperimen yang dilakukan Jamaluddin dkk (2012). Dari hasil analisa dan evaluasi menunjukkan bahwa antara hasil metode numerik dengan eksperimen memperlihatkan *trend* kurva yang hampir sama dengan perbedaan hasil yang sangat kecil. Presentase selisih nilai tertinggi dari kedua metode adalah 7.56% pada $Fr = 0.37$. Pada hasil eksperimen di $Fr = 0.37$ nilai koefisien hambatan memiliki trend yang berbeda dari *froude number* sebelumnya atau pun setelahnya, hal ini bisa dikarenakan pada saat dilakukan uji tarik kondisi air belum sepenuhnya dalam kondisi tenang, perlunya dilakukan kalibrasi pada alat pengujian *towing tank* atau disebabkan faktor lain yang dapat mempengaruhi hasil dari pengujian uji tarik.



Gambar V. 6 Koefisien Hambatan Viskos CFD dan Eksperimen

Melihat Gambar V.6 dapat diperoleh informasi bahwa perbedaan koefisien viskos dari metode model numerik dan eksperimen semakin mengecil seiring meningkatnya kecepatan. Hal ini selaras dengan pola dari nilai hambatannya. Hasil dari eksperimen memiliki nilai yang lebih kecil dari metode numerik, perbedaan terbesar terjadi pada *froude number* = 0.19 hingga 6.01%. Namun hasil simulasi CFD memiliki *trend* yang sama dengan hasil eksperimen.



Gambar V. 7 Koefisien Hambatan Gelombang CFD dan Eksperimen

Hasil koefisien hambatan gelombang seperti yang diperlihatkan pada Gambar V.7 merupakan selisih antara koefisien hambatan total dengan hambatan viskos. Diantara hasil dari simulasi CFD maupun eksperimen memiliki *trend* yang sama dan tidak memperlihatkan perbedaan yang signifikan. Hal ini dapat dilihat dari $Fr = 0.19 - 0.65$, pada $Fr 0.37$ yang hanya mengalami perbedaan. Hal ini sesuai dengan hasil koefisien hambatan total pada $Fr 0.37$ yang memiliki nilai yang tidak konstan.

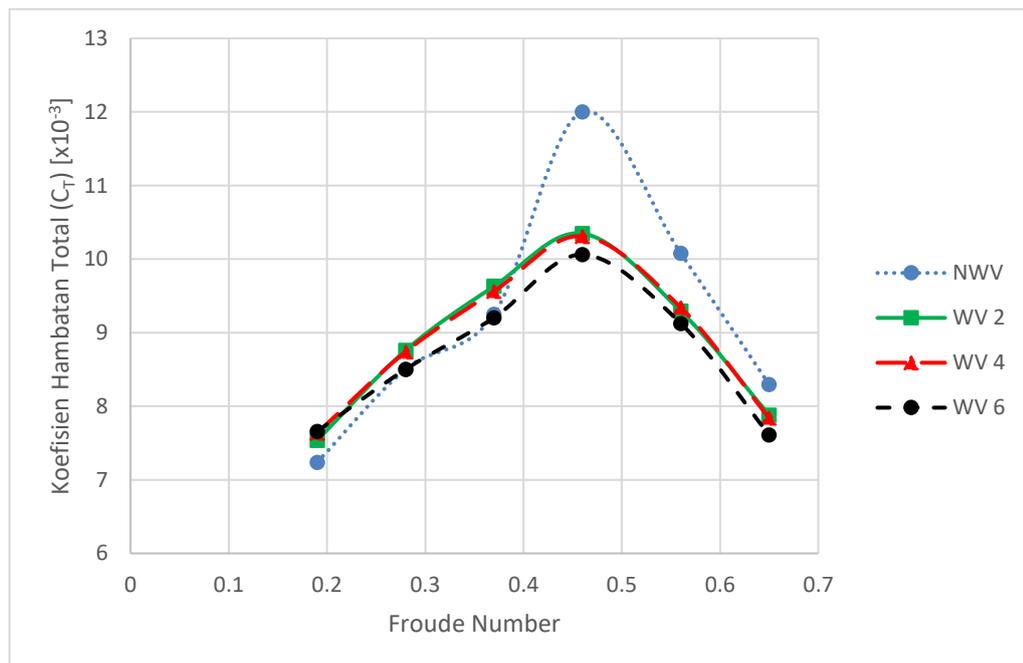
Tabel V. 8 Presentase Error CFD dengan Eksperimen model NWV

Fr	% Error C_T	% Error C_v	% Error C_w
0.19	5.80%	6.01%	1.15%
0.28	3.56%	5.55%	2.23%
0.37	7.56%	5.19%	11.84%
0.46	1.25%	4.74%	1.86%
0.56	1.37%	4.34%	2.11%
0.65	1.18%	4.08%	3.86%

Dapat dilihat dari Tabel V.7 nilai *error* terbesar dari simulasi CFD hanya berkisar 6.01% untuk C_V , sedangkan untuk koefisien C_T berkisar 7.56%. Hal ini dapat mendukung hasil simulasi CFD. Akibat *error* pada $Fr = 0.37$ untuk koefisien C_T dan C_V cukup besar maka hal ini berdampak pada koefisien C_W dengan presentase *error* 11.84% karena nilai koefisien C_W merupakan selisih antara C_T dengan C_V .

V.4. Analisa Hambatan Total Hasil Simulasi CFD

Hambatan total dari hasil simulasi CFD didapatkan dengan menggunakan simulasi 2 fluida atau bisa disebut dengan *free surface* seperti yang telah dijelaskan pada subab sebelumnya. Pada proses simulasi CFD dengan *free surface* pada kondisi batas yang telah diterapkan seperti geometri model, densitas fluida, turbulensi dan temperatur peran hambatan gelombang akan tampak sehingga bersama dengan diketahuinya nilai hambatan viskos. Hasil koefisien hambatan total dari perhitungan rumus empiris hambatan yang didapatkan dari simulasi CFD dapat dilihat pada Gambar V.8



Gambar V. 8 Koefisien Hambatan Total Hasil Simulasi CFD

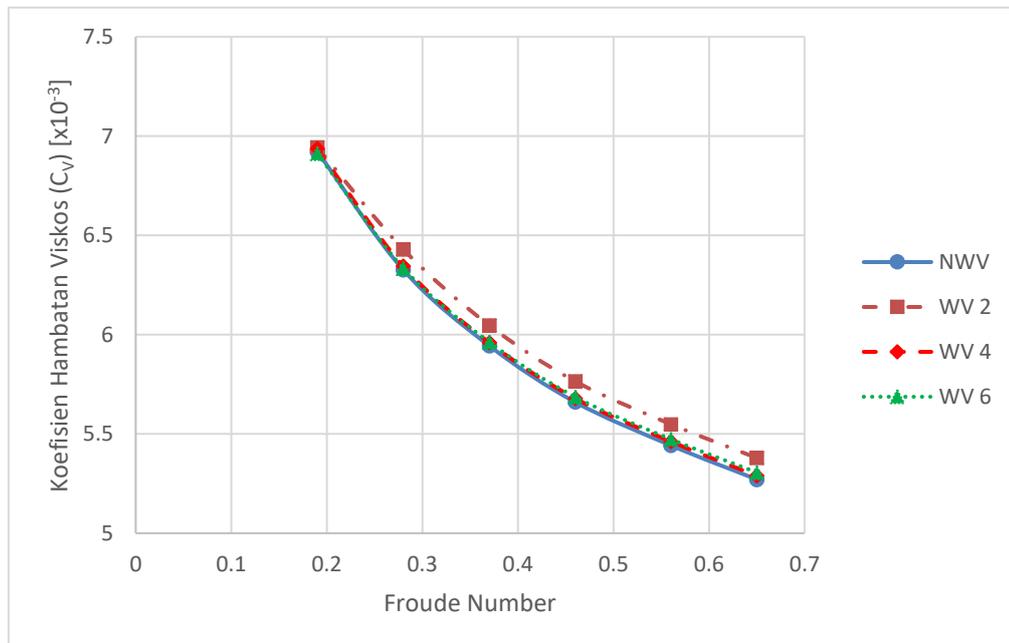
Nilai hambatan total dari keempat model NWV, WV2, WV4 dan WV6 setelah dilakukan simulasi CFD menurut grafik diatas mengalami kenaikan seiring meningkatnya variasi *froude number*. Grafik diatas sesuai dengan model grafik pada sebuah penelitian yang telah dilakukan oleh (Li & Lin, 2008). Pada *froude number* 0.19-0.37 semua model dengan menggunakan *wave piercing* nilai hambatan total lebih besar dari model tanpa *wave piercing*.

Perbedaan terbesar untuk semua model terletak pada $Fr = 0.19$. Model WV2 memiliki koefisien hambatan total lebih besar 4.14% dari model NWV. Model WV4 memiliki koefisien hambatan total lebih besar 5.48% dari model NWV sedangkan untuk model WV6 memiliki koefisien yang lebih besar 5.81% dari model NWV. Pemakaian *wave piercing* tidak memberikan keuntungan sama sekali justru memperbesar hambatan. Hal ini disebabkan karena *wave piercing* menghasilkan hambatan bentuk model kC_F yang dominan pada kecepatan rendah.

Pada $Fr > 0.37$ hambatan model WV2, WV4 dan WV6 berada di bawah NWV. Hal ini menunjukkan bahwa *wave piericng* sudah mulai berperan pada daerah ini. *Wave piercing* memberikan pengaruh maksimum dalam meminimalisir hambatan total pada Fr 0.4-0.65. Nilai penurunan hambatan tertinggi berada pada posisi ketika $Fr = 0.46$. Model WV2 mengalami penurunan sebesar 13.79%, WV4 penurunan sebesar 14.10% dan untuk WV6 mengalami penurunan terbesar yaitu 16.19%

V.5. Analisa Hambatan Viskos Hasil Simulasi CFD

Salah satu komponen hambatan yaitu hambatan viskos. Besarnya hambatan viskos dipengaruhi beberapa faktor yaitu kecepatan kapal, jenis fluida dan luasan permukaan basah kapal. Untuk menjelaskan perbedaan nilai dari setiap model mulai dari NWV, WV2, WV4 dan WV6 disajikan pada Gambar V.9



Gambar V. 9 Koefisien Hambatan Viskos Hasil Simulasi CFD

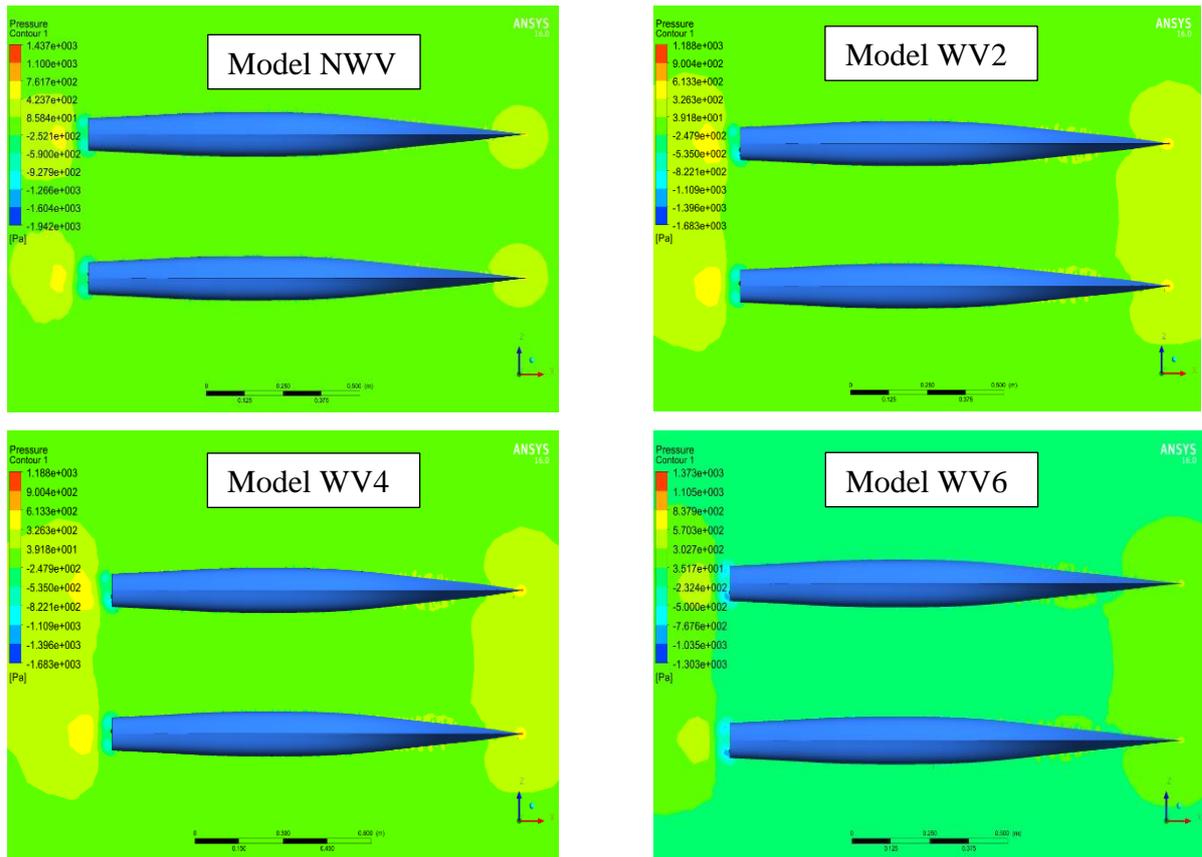
Berdasarkan grafik di atas, maka dapat diperoleh koefisien hambatan viskos akan mengalami penurunan seiring dengan kenaikan variasi *froude number*. Nilai dari koefisien viskos didapatkan dari penurunan rumus empiris hambatan viskos dan sifatnya relatif konstan terhadap perubahan *froude number*. Keempat model ini didesain agar memiliki volume displasemen yang sama. Akibat adanya modifikasi dibagian haluan maka setiap model modifikasai mengalami penambahan nilai WSA, namun perubahan nilai WSA dari hasil modifikasi tidak mengalami perubahan yang besar. Hal ini dapat dilihat dari grafik adanya perubahan WSA yang relatif kecil maka nilai hambatan viskos (R_v) mengalami perbedaan yang relatif kecil juga, begitupun untuk koefisien hambatan viskos perbedaan yang relatif kecil untuk setiap model akibat dari modifikasi bagian haluan.

Seiring bertambahnya kecepatan kapal, nilai hambatan viskos terus bertambah. Pertambahan nilai hambatan viskos ini, ditandai dengan penurunan koefisien C_v , penurunan C_v diakibatkan nilai kuadrat kecepatan sebagai pembagi nilai hambatan viskos yang semakin besar seiring dengan pertambahan nilai hambatan, $R_v = \frac{1}{2} \rho C_v WSA V^2$. Hal ini sesuai dengan percobaan yang telah dilakukan oleh Insel dan Molland (1990). Besarnya perbedaan nilai koefisien C_v antara model NWV dengan WV2 adalah 2.05%, NWV dengan WV4 adalah 0.35% sedangkan untuk model NWV dengan WV6 sebesar 0.67% pada Fr 0.65. Perbedaan yang relatif kecil ini terjadi akibat perubahan nilai WSA untuk masing – masing model memiliki nilai yang tidak terlalu jauh berbeda. Tidak hanya karena perbedaan WSA, perbedaan nilai koefisien untuk masing – masing model diakibatkan adanya modifikasi dibagian haluan sehingga adanya bentuk model yang berbeda. Di mana bentuk model lambung akan berpengaruh pada nilai hambatan bentuk (kC_F). K merupakan *form factor*, perbedaan nilai K didapatkan dari hasil perhitungan ketika model dilakukan simulasi dengan kecepatan rendah $Fr < 0.2$.

Saat model dilakukan simulasi dengan kecepatan rendah, pada kondisi ini hambatan gelombang dapat diabaikan karena pada kecepatan rendah sistem gelombang pada model memang belum terbentuk, sehingga sesuai dengan penyederhanaan rumus empiris dengan mengasumsikan bahwa hambatan total hanya disusun oleh hambatan viskos, $C_T = (1+\beta k)C_F$. Rumus empiris *form factor* $(1+\beta k)$ dapat ditulis menjadi formulasi C_T/C_F berdasarkan hasil dari simulasi yang dilakukan dengan metode CFD maka didapatkan nilai *form factor* berturut – turut dari model NWV, WV2, WV4 dan WV6 adalah 1.4573 ; 1.4838 ; 1.4703 ; 1.4704. Sedangkan nilai untuk variasi kecepatan lainnya tidak jauh berbeda dan telah ditunjukkan pada subbab sebelumnya. Dengan melihat kembali rumus $C_v = C_F + kC_F$, hal ini menunjukkan bahwa C_F konstan dengan WSA tetap dan nilai K memberikan peran paling besar. Hambatan bentuk yang

direpresentasikan dengan adanya modifikasi bagian haluan menjadi dominan dalam kasus tersebut.

Hambatan bentuk merupakan hambatan yang bekerja searah bidang normal dari model lambung kapal. Hal ini berkaitan erat dengan *viscous pressure resistance* (C_{VP}). Nilai dari C_{VP} bergantung pada tekanan fluida yang dialami sekitar lambung kapal. Distribusi tekanan yang terjadi pada setiap model kapal katamaran dapat ditunjukkan oleh Gambar V.10



Gambar V. 10 Distribusi Tekanan Keempat Model pada Fr 0.65

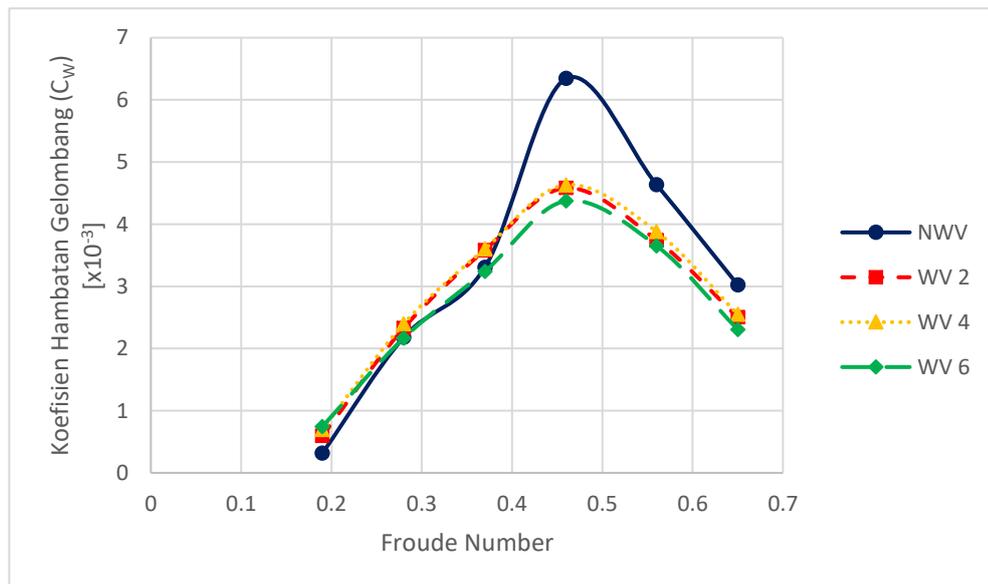
Pada Gambar V.10 menunjukkan bahwa adanya pengaruh dari keberadaan *wave piercing* mampu merubah bentuk distribusi tekanan di bagian haluan. Perbedaan distribusi tekanan terjadi karena adanya efek interferensi dari masing – masing demihull, seperti ditunjukkan rumus $C_v = (1 + \Phi k) \sigma C_F$, dimana Φ adalah nilai perubahan daerah bertekanan (*pressure field*). Hasil dari modifikasi bagian haluan mampu mengubah tahanan C_{VP} semakin besar. Kenaikan C_{VP} ditandai dengan nilai *form factor*. Hambatan viskos akan terus menanjak dengan bertambahnya kecepatan.

Semakin bertambahnya kecepatan untuk model NWV, WV2, WV4 dan WV6 sistem gelombang yang terbentuk akan semakin dominan dibandingkan pada kecepatan rendah. Peran *wave piercing* dalam merubah sistem gelombang akan semakin terlihat. Berdasarkan hasil

simulasi CFD, *wave piercing* berperan lebih efektif pada daerah dengan kecepatan tinggi. Kecepatan sebanding dengan gaya gesek pada lambung. Hal ini sesuai dengan hukum Newton II yang diturunkan lebih lanjut menjadi persamaan energi kinetik $E = \frac{1}{2} m V^2$. Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa semakin tinggi kecepatan fluida dengan massa yang tetap maka energi akan bertambah. Energi merupakan penurunan dari gaya dikalikan jarak $E = F.S$ dengan istilah "usaha" dengan satuan joule.

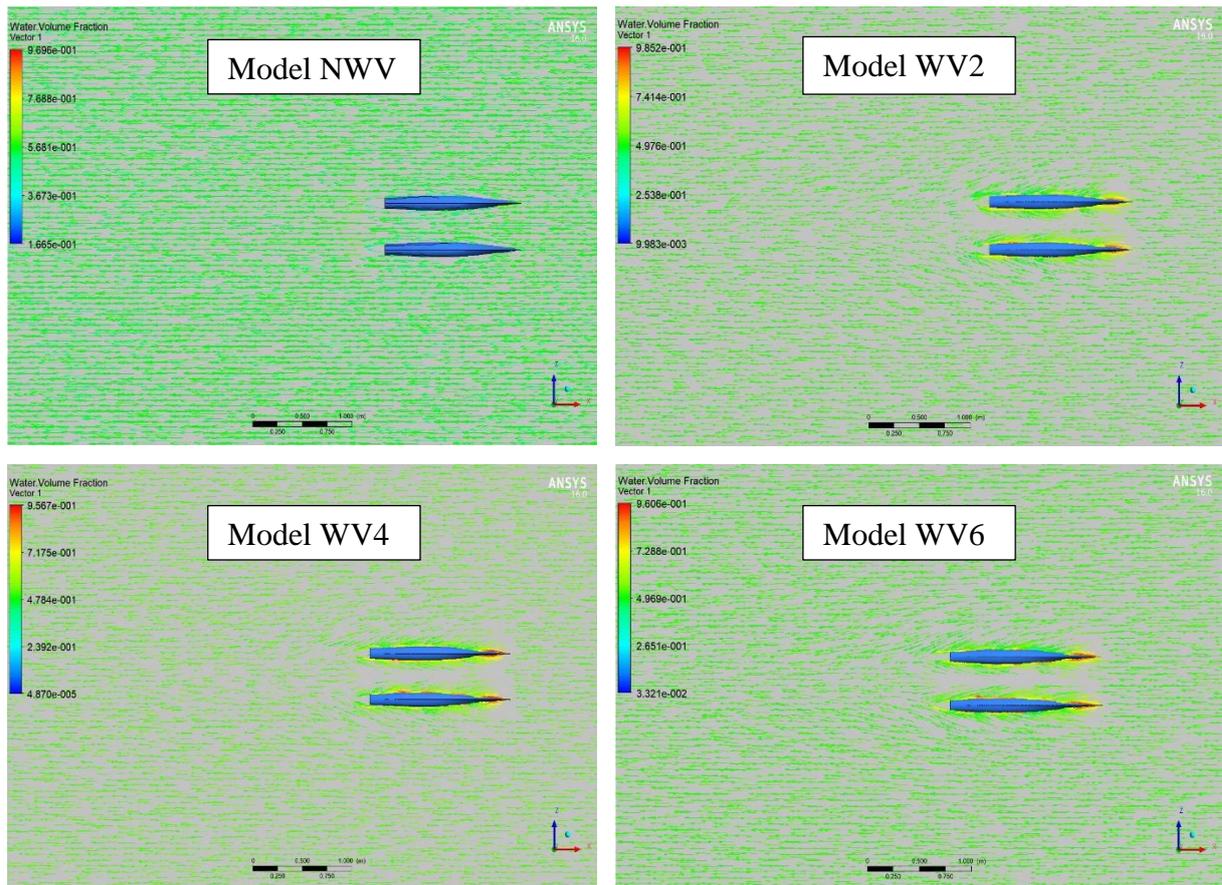
V.6. Analisa Hambatan Gelombang Hasil Simulasi CFD

Komponen hambatan total salah satunya adalah hambatan gelombang. Hambatan gelombang merupakan selisih antara hambatan total dengan hambatan viskos, maka dari itu hambatan gelombang saling mempengaruhi satu sama lain. Setelah dilakukannya simulasi dengan *free surface* untuk mendapatkan hambatan total dan tanpa *free surface* (kekentalan murni) untuk mendapatkan hasil hambatan viskos, barulah hambatan gelombang dapat ditemukan nilainya. Untuk menunjukkan nilai koefisien dari hambatan gelombang dari keempat model dapat dilihat pada Gambar V.11



Gambar V. 11 Koefisien Hambatan Gelombang Hasil Simulasi CFD

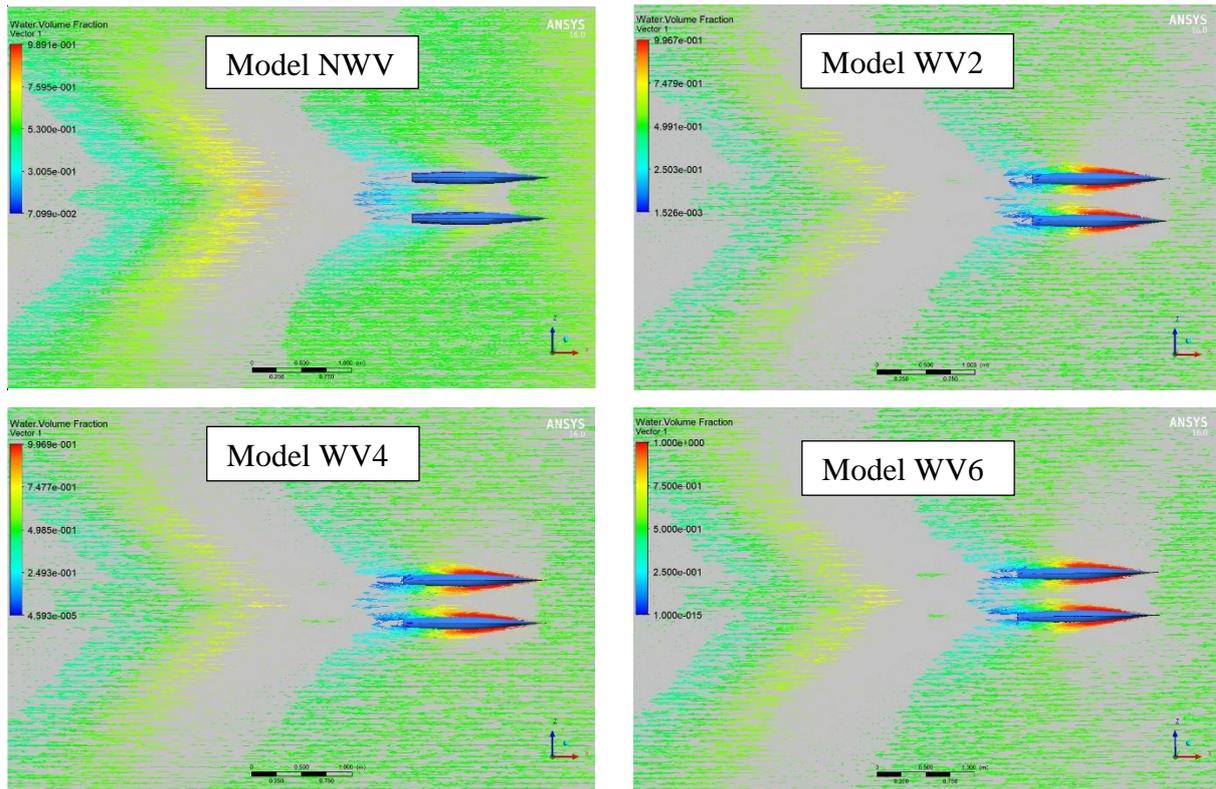
Grafik hambatan gelombang terlihat ada yang naik dan ada yang turun bergantung pada fungsi kecepatan. Pada saat kecepatan rendah, sistem gelombang masih belum terbentuk untuk menghasilkan hambatan gelombang (R_w), selanjutnya dengan meningkatnya kecepatan hambatan gelombang terus naik hingga mencapai puncaknya (Xiaoping, Yan, & Kun, 2000). Kenaikan hambatan gelombang yang signifikan diakibatkan adanya interferensi gelombang antar demihull.



Gambar V. 12 Vektor Keempat Model pada Fr 0.19

Dapat dilihat pada Gambar V.12 menunjukkan belum adanya gelombang yang terjadi. Hal ini karena pada gambar tersebut keempat model disimulasikan pada kecepatan rendah yaitu Fr 0.19. Hambatan gelombang dapat diasumsikan tidak ada dan yang berperan paling besar pada kecepatan rendah yaitu hambatan viskos. Namun, hasil dari modifikasi bagian haluan mengalami tekanan ditandai dengan warna merah yang terjadi pada haluan. Pola vektor dari hasil ketiga modifikasi haluan dengan *wave piercing* cenderung sama hal ini karena modifikasi yang dilakukan tidak terlalu jauh berbeda. Warna merah menunjukkan nilai yang tinggi, sedangkan untuk warna biru menunjukkan nilai yang rendah.

Pada Fr yang lebih tinggi nilai C_w cenderung menurun akibat gelombang yang dihasilkan oleh masing – masing demihull yang menyentuh demihull lainnya berkurang. Sistem gelombang akan ditinggalkan oleh kapal lebih cepat pada Fr yang tinggi, sehingga menyebabkan gelombang berada dibagian buritan dan efeknya menjadi lebih kecil dibandingkan Fr sebelumnya. Gelombang tinggi terjadi dibagian buritan, karena kapal melaju dengan kecepatan tinggi maka gelombang tersebut segera ditinggalkan oleh kapal.



Gambar V. 13 Vektor Keempat Model pada Fr 0.65

Gambar V.13 menunjukkan bahwa keberadaan *wave piercing* mampu merubah bentuk vektor hambatan gelombang. Pada kecepatan tinggi Fr 0.65 sistem gelombang terjadi namun sistem gelombang yang terjadi berada di belakang kapal, kapal segera meninggalkan sistem gelombang tersebut karena laju kapal cukup tinggi. Hasil sistem gelombang dari ketiga model dengan modifikasi haluan menggunakan *wave piercing* cenderung sama. Pada ketiga model di sekitar demihull, vektor berwarna merah hal ini menunjukkan adanya tekanan yang tinggi pada bagian haluan kapal, sehingga dengan adanya *wave piercing* mampu merubah efek interferensi dari masing – masing demihull. Di bagian buritan ditandai dengan warna biru pada vektor, hal ini menunjukkan tekanan yang rendah.

Fenomena lain yang perlu diperhatikan pada grafik koefisien hambatan gelombang untuk dibahas adalah terjadinya lonjakan nilai koefisien hambatan gelombang pada Fr 0.46. Kondisi dimana ketika hambatan gelombang membentuk puncaknya yang disebut dengan *Hump* (Tuck dkk, 2002) yang dalam bahasa indonesia berarti bukit. *Hump* terjadi akibat pengaruh panjang dan kecepatan kapal., dimana keberadaannya ditimbulkan oleh sistem gelombang yang konvergen. Sistem gelombang kapal dibagi menjadi 2 macam yaitu konvergen dan transversal. Gelombang transversal pada kapal merupakan gelombang yang cenderung tegak lurus dengan gerakan kapal. Ketika kecepatan rendah beberapa puncak gelombang dari

sistem gelombang ini berada di daerah sepanjang kapal. Ketika kapal melaju dengan kecepatan tinggi, panjang gelombang yang konvergen akan mengalami kenaikan. Selanjutnya, ketika panjang gelombang mendekati panjang kapal, maka besarnya hambatan akan naik dengan sangat cepat ($Fr = 0.46-0.65$). Ketika panjang gelombang dengan panjang kapal sama dengan kecepatan tertentu maka disebut dengan *hull speed*. Pada hasil simulasi ini kecepatan tersebut terjadi pada kisaran $1.3 - 2$ m/s. *Hull speed* dapat dihindari dengan memperpanjang kapal. Hal ini akan mencegah terjadinya *hull speed* yang terjadi terlalu cepat pada kapal. *Hump* dapat terjadi apabila gelombang transversal hasil dari bentukan bagian haluan maupun buritan berada satu fase yang sama yang berarti puncak kedua gelombang bertemu pada satu titik yang sama sehingga energi gelombang yang dihasilkan terbesar yang mengakibatkan *hump* terjadi. Dapat dilihat pada Gambar V.13 dengan adanya modifikasi haluan dengan *wave piercing* dapat memperpendek gelombang di sepanjang *demihull* kapal.

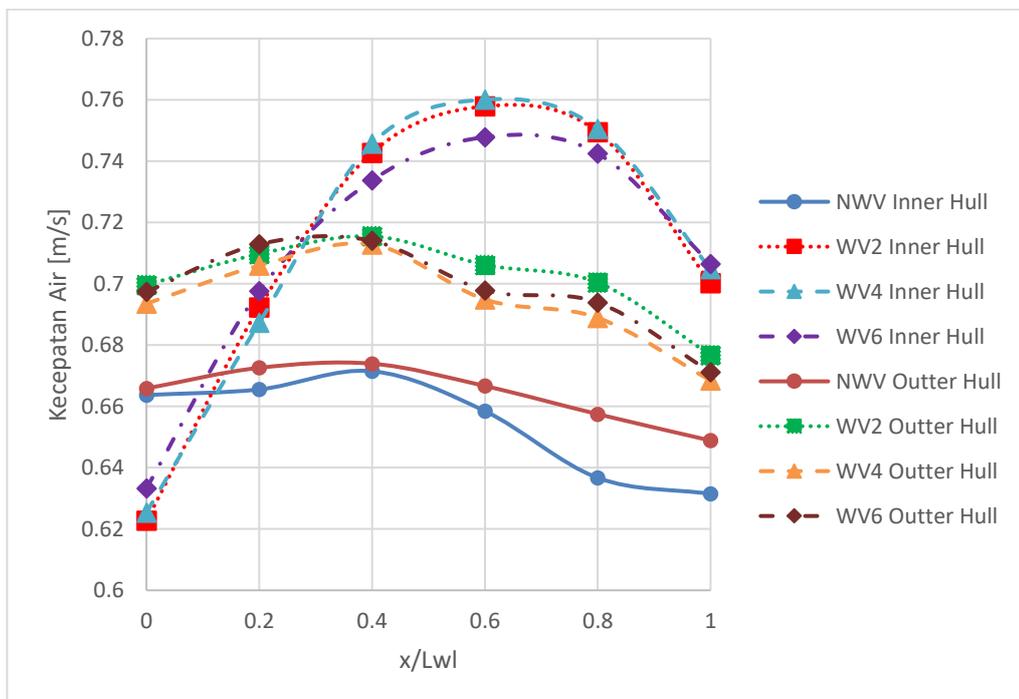
Perbedaan nilai hambatan anatar WV2, WV4 dan WV6 memang tidak terlalu besar karena secara dimensi keduanya memiliki *wave piercing* yang hampir sama, hanya berbeda pada variasi panjangnya. Perbedaan dimensi panjang dari *wave piercing* inilah yang mengakibatkan selisih nilai R_w dari model WV2, WV4 dan WV6 terjadi. Tentunya perbedaan ini yang akan menimbulkan perbedaan fase dari gelombang yang dihasilkan *wave piercing* masing – masing. Berdasarkan grafik koefisien hambatan gelombang pada Gambar V.11, besarnya pengurangan nilai koefisien hambatan gelombang terjadi pada Fr 0.46, pengurangan antara model NWV dengan WV2 adalah 27.76%, NWV dengan WV4 adalah 26.97% dan NWV dengan WV6 adalah 31.04%.

Peran interferensi antar demihull juga sangat berpengaruh terhadap terjadinya sistem gelombang di bagian *inner* model katamaran. Akibat dari adanya *wave piercing* telah merubah sistem gelombang menjadi lebih kecil. Sistem gelombang yang lebih kecil khususnya terjadi pada kecepatan tinggi peran dari *wave piercing* terjadi, sehingga sistem gelombang dari salah satu *demihull* yang mampu menjangkau *demihull* satunya (seberangnya) menjadi lebih kecil.

V.7. Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner dan Outer Hull Katamaran

Tahap selanjutnya mengidentifikasi hasil interferensi aliran fluida akibat gerakan kedua demihullnya. Hasil interferensi dapat dilihat dengan mengetahui besarnya nilai kecepatan ataupun tekanan diantara kedua *demihull*. Nilai kecepatan akan bervariasi di setiap titik bergantung pada bentuk dari model kapal. Untuk mengetahui nilai besarnya kecepatan aliran fluida tersebut telah dibuat 6 titik (*node*) di *centerline* di antara kedua demihull. Titik pertama terletak di AP dengan posisi ditunjukkan dengan $x/Lwl = 0$, x merupakan x meter dari AP. Untuk titik kedua dan selanjutnya berada pada $x/Lwl = 0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1$. $x/Lwl = 1$ berada pada posisi FP. Demikian juga untuk *node* pada outer hull, pada bagian ini akan dibuat 6 titik dengan jarak yang sama sepanjang model kapal. Titik pertama terletak sepanjang AP dengan penomoran berurutan ke depan menuju FP 6-12.

Distribusi kecepatan fluida sepanjang model kapal tentunya sangat bergantung pada bentuk lambungnya. Posisi di mana fluida mengalir mempengaruhi besarnya kecepatan. Seperti misalnya distribusi kecepatan pada bagian *inner hull* dan *outer hull* pada katamab akan mengalami perbedaan kecepatan fluida. Hal tersebut terjadi diakibatkan adanya perbedaan pola aliran fluida. Adanya fenomena turbulensi juga mempengaruhi besarnya aliran kecepatan fluida. Berikut ini akan dibahas mengenai distribusi kecepatan fluida di bagian *inner hull* dan *outer hull* dari semua model katamaran.

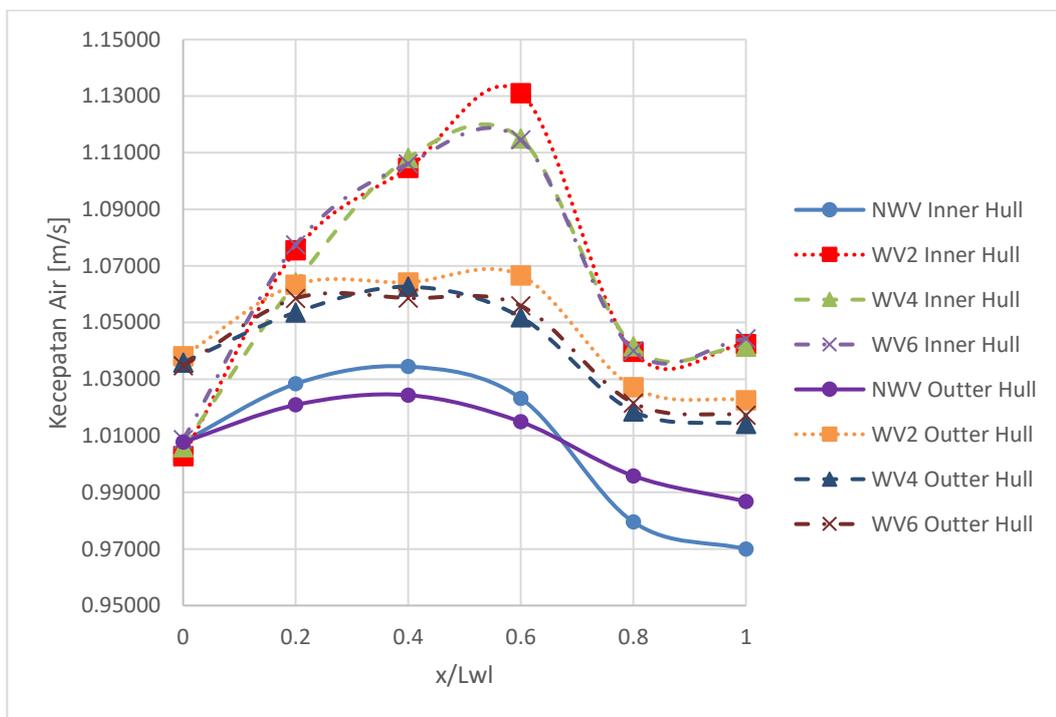


Gambar V. 14 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.19

Hasil simulasi menunjukkan terjadi kecepatan terbesar pada bagian tengah lambung kapal di sekitar $x/Lwl = 0.6$ untuk bagian di *inner hull*. Hal ini menunjukkan perbedaan antara kecepatan fluida dan kecepatan gerakan kapal hingga 10.48%. Pada kecepatan rendah, distribusi kecepatan fluida telah menunjukkan perbedaan antara model NWV dengan model hasil modifikasi bagian haluan dengan *wave piercing* yaitu model WV2, WV4 dan WV6. Pada model WV2, WV4 dan WV6 untuk bagian belakang kapal memiliki nilai kecepatan aliran fluida yang lebih besar daripada di bagian haluan. Terjadinya perbedaan kecepatan ini sesuai hukum Bernoulli, apabila fluida memiliki kecepatan lebih tinggi hal ini diakibatkan tekanan yang rendah atau sebaliknya diungkapkan melalui persamaan :

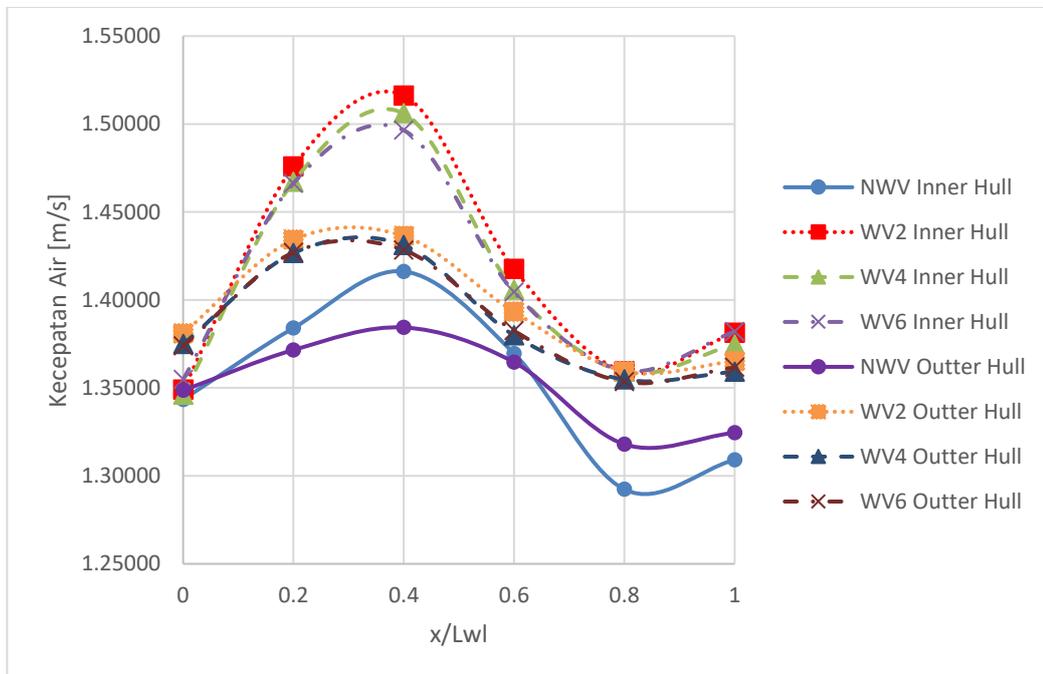
$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (5.5)$$

Kecepatan fluida $x/Lwl \geq 0.2$ di bagian *inner hull* melebihi kecepatan fluida di *outer hull*. Hal ini terjadi akibat adanya efek interferensi lambung terhadap gelombang. Interferensi saling meniadakan terjadi dibagian *inner hull*, sehingga system gelombang yang terbentuk di bagian ini lebih kecil dibandingkan dengan di bagian *outer hull*, karena di bagian *outer hull* tidak memiliki kemampuan menginterferensi gelombang seperti di bagian *inner hull*. Akibatnya pada bagian *inner hull* tekanan yang terjadi lebih rendah dibandingkan bagian *outer hull* yang berarti kecepatan *inner hull* akan lebih tinggi.



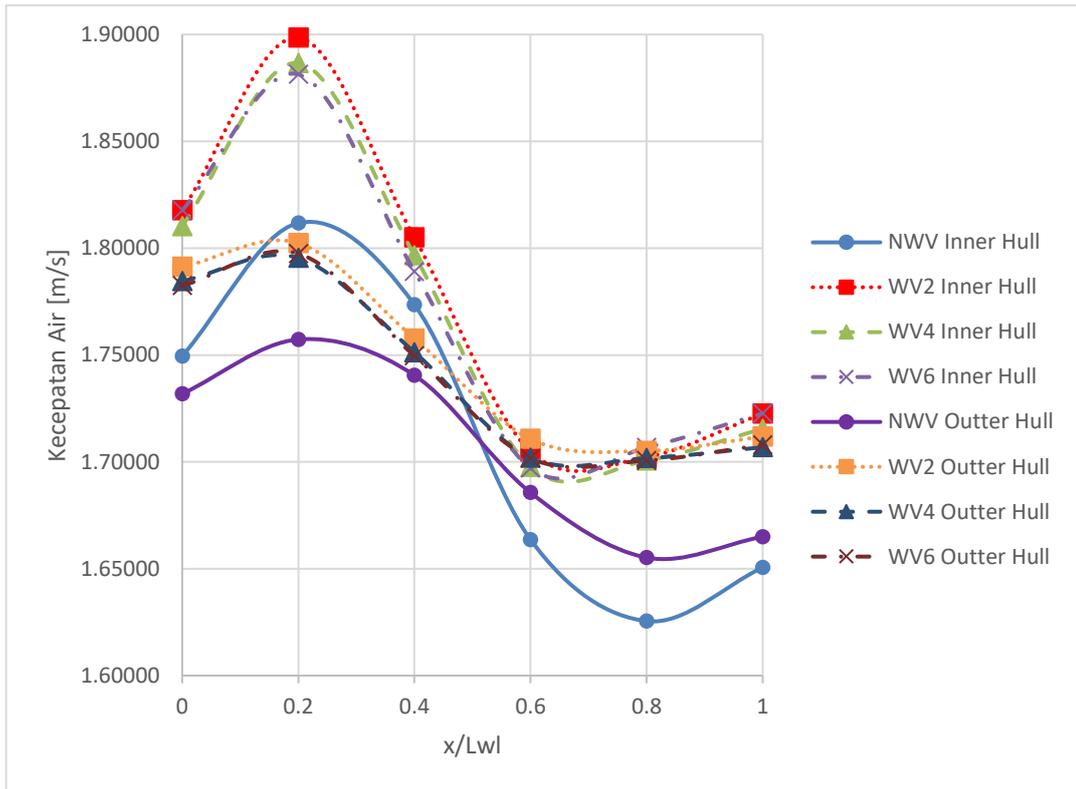
Gambar V. 15 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.28

Distribusi kecepatan model katamaran dari modifikasi haluan dengan *wave piercing* menunjukkan pola distribusi yang sama terlihat pada Gambar V.15. Berdasarkan hasil simulasi puncak kecepatan terjadi di sekitar tengah kapal. Aliran fluida semakin naik dimulai pada posisi $x/Lwl = 0.8$ ke arah belakang hingga akhirnya mulai turun pada posisi $x/Lwl = 0.6$. Fenomena yang unik muncul di bagian haluan kecepatan fluida memiliki nilai yang lebih besar daripada di belakangnya. Hal ini terjadi adanya penurunan tekanan di bagian *centerline (inner hull)* haluan yaitu di bagian kapal katamaran. Perbedaan kecepatan fluida bagian haluan dengan $x/Lwl = 0.8$ hingga 0.41%. Untuk model NWV kecepatan aliran fluida dari ujung haluan mengalami kenaikan hingga kebelakang dan mulai mengalami penurunan pada $x/Lwl = 0.4$. Hal ini terjadi baik untuk bagian *inner hull* maupun *outer hull* pada model NWV.



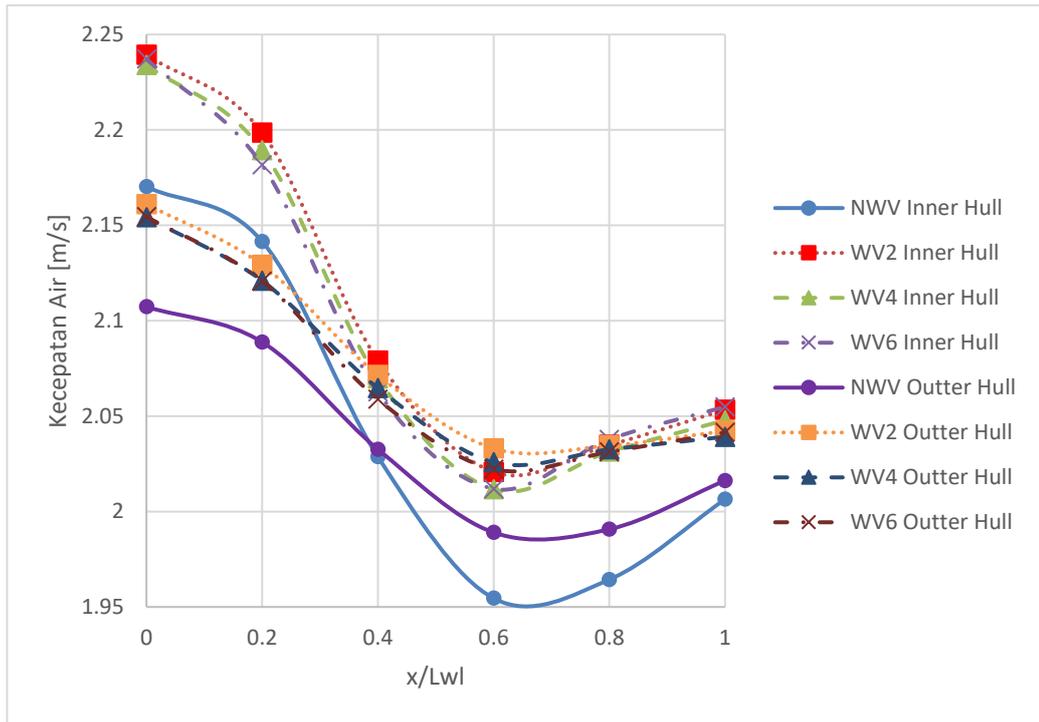
Gambar V. 16 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.37

Pada percobaan ke-3 menunjukkan pola distribusi yang sama untuk model haluan yang telah dimodifikasi di bagian haluan dengan *wave piercing*. Sedangkan untuk model NWV mengalami perubahan kecepatan fluida pada bagian haluan. Pada bagian haluan mengalami kenaikan daripada kecepatan fluida di belakangnya yaitu pada $x/Lwl = 0.8$. Secara garis besar puncak kecepatan aliran mengalami pergeseran semakin ke belakang yaitu pada $x/Lwl = 0.4$. Hal ini diakibatkan terjadinya interferensi gelombang berada di belakang ketika kapal mulai meninggalkan gelombang yang terbentuk akibat dari kedua demihull.

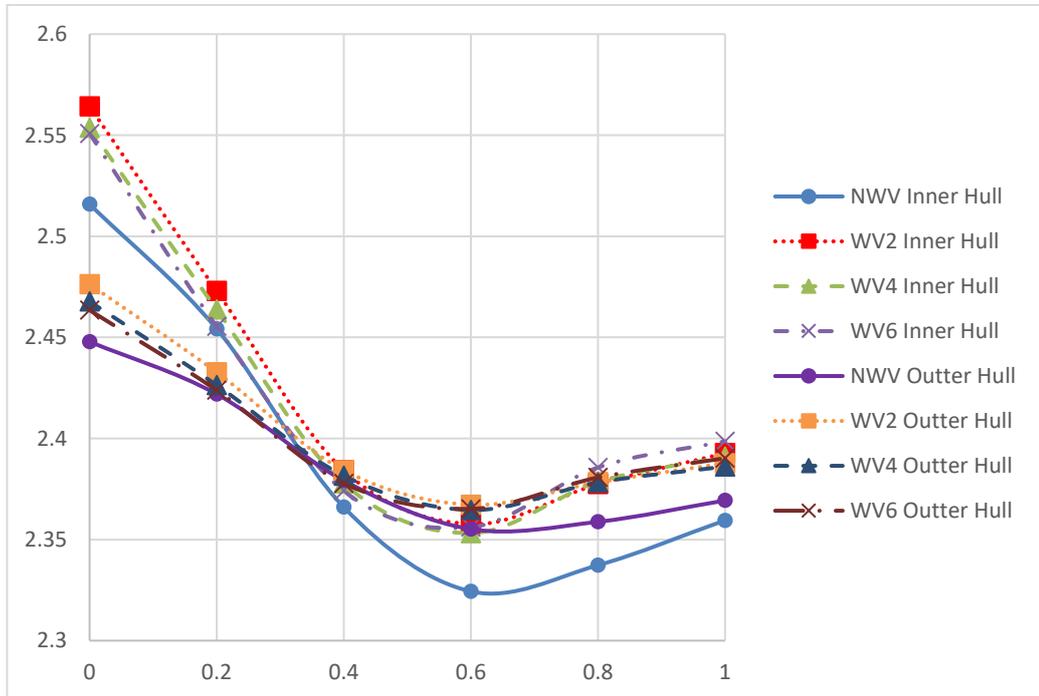


Gambar V. 17 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.46

Efek yang diberikan oleh *wave piercing* diberikan pada seluruh variasi dengan pola yang sama, meskipun dengan skala yang berbeda. Termasuk pada percobaan dengan Fr 0.46 terjadinya puncak kecepatan bergeser lebih ke belakang daripada pada percobaan dengan Fr. 0.37. Pergeseran titik kecepatan terendahpun bergeser ke belakang yang terjadi disekitar $x/Lwl = 0.6$. Di bagian haluan FP pada model WV6 katamaran dengan *wave piercing* mengalami kenaikan kecepatan 0.37% daripada pada titik $x/Lwl = 0.6$. Perbedaan kenaikan kecepatan ini yang terbesar daripada model lainnya. Model distribusi kecepatan fluida relative sama dengan percobaan berikutnya, puncak kecepatan akan bergeser ke belakang seiring dengan bertambahnya kecepatan kapal. Berikut distribusi kecepatan pada percobaan berikutnya ditunjukkan pada grafik di bawah ini.



Gambar V. 18 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer hull pada Fr 0.56



Gambar V. 19 Distribusi Kecepatan Fluida di Bagian Inner Hull dan Outer Hull pada Fr 0.65

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

VI.1. Kesimpulan

CFD telah mampu melakukan simulasi untuk mendapatkan nilai hambatan. Setelah dilakukan simulasi CFD dan menganalisa model *wave piercing* pada kapal katamaran dengan hasil eksperimen, maka kesimpulan dari hasil analisa pada tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Hasil perbandingan simulasi CFD dengan eksperimen pada model NWV nilai koefisien hambatan total dengan presentase selisih tertinggi dari kedua metode adalah 7.56% pada $Fr = 0.37$. Untuk koefisien hambatan viskos presentase terbesar hingga 6.01% pada $Fr = 0.19$, sedangkan untuk koefisien hambatan gelombang sebesar 11.84%. pada $Fr = 0.37$
2. *Wave piercing* mulai menunjukkan perannya dalam mengurangi hambatan pada $Fr > 0.37$. Nilai penurunan hambatan maksimum oleh *wave piercing* berada pada posisi ketika $Fr = 0.46$. Model WV2 mengalami penurunan sebesar 13.79%, WV4 penurunan sebesar 14.10% dan untuk WV6 mengalami penurunan terbesar yaitu 16.19%
3. Adanya modifikasi haluan dengan *wave piercing* dapat mengubah pola distribusi kecepatan aliran fluida yang terjadi pada sekitar lambung kapal. Semakin tinggi kecepatan kapal maka puncak kecepatan akan semakin bergeser ke belakang. Model WV6 relatif lebih aktif dalam mengubah pola aliran kecepatan fluida.

VI.2. Saran

Berdasarkan analisa dan kesimpulan yang didapat pada tugas akhir ini, maka diberikan saran sebagai berikut :

1. Penentuan *meshing* yang lebih optimal untuk mendapatkan hasil yang akurat.
2. Adanya penelitian lebih lanjut *wave piercing* dengan variasi lebih panjang pada simulasi CFD untuk mendapatkan nilai yang lebih optimum.
3. Perlu adanya studi lanjut mengenai penerapan *wave piercing* pada kapal.
4. Untuk memperlancar proses simulasi CFD disarankan untuk menggunakan spesifikasi komputer yang digunakan minimal seperti penulis, karena akan mempengaruhi hasil dari simulasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- AIAA, G 077. (1998). Guide for The Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics SIMulations. NPARC.
- Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T. J. (1997). *Turbulence Modelling, Validation, Testing and Development*. NASA Technical Memorandum 110446.
- Carlton, J. S. (2007). *Marine Propellers and Propulsion* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd.
- CFX. (2006, December). *Ansys CFX Tutorials*. Ansys.
- Couser, P. R., Molland, A. F., Armstrong, N. A. and Utama, I. K. A. P. (1997). *Calm Water Powering Prediction for High Speed Catamarans*. Sydney, Australia: Fast '97.
- Deng, R., Huang, D., Cheng, J.Li.X., and Yu, L. (2010). *Discussion of Grid Generation for Catamaran Resistance Calculation*. Journal of marine Sci. Appl., 9, 187-191.
- Hughes G. (1954). *Friction and Form Resistance in Turbulent Flow and a Proposed Formulation fo Use in Model and Ship Correlation*. 96. Transactions of RINA.
- Insel, Mustafa and Molland, A. F. (1990). *An Investigation into The Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans*. University of Southampton, Ph.D. Thesis.
- ITTC . (2011). *Resistance Test*. Recommended Procedures and Guidelines, (pp. 1-13).
- ITTC. (1999). *Performance, Propulsion 1978 ITTC Performance Prediction Method*. Recommended Procedures, (pp. 1-31).
- ITTC. (2006). *Testing and Extrapolation Methods, General Density and Viscosity of Water*. Recommended Procedures and Guidelines, (pp. 1-6).
- ITTC. (2014). *Practical Guidelines fo Ship Resistance CFD*. Recommended Procedures and Guidelines, (pp. 1-10).
- Jamaluddin, A., Utama, I. K. A. P. and Aryawan, W. D. (2012). *Experimental Investigation Into The Drag Interference of Symmetrical and Asymmetrical Staggered and Unstaggered Catamarans*. Ocean Technology.
- Kracht, Alfred M. (1978). *Design of Bulbous Bows*. 86, 197-217.
- Li, Tieli. and Lin, Yan. (2008). *Study on Resistance Performance of the Wave Piercing Catamaran*. International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver, Canada: ISOPE.

- Menter, F. R. (1993). *Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Model for Flows*. AIAA, 93-290.
- Menter, F. R. (1994). *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Model for Engineering Applications*. AIAA, 289.
- Molland, A.F. (2008). *A Guide to Ship Design, Construction and Operation*. Butterworth-Heinemann, Elsevier: The Maritime Engineering Reference Book.
- Prohaska, C. W. (1966). *Resistance Session*. Feltham.
- Rawson, K. J. and Tupper, E.C. (2001). *Basic Ship Theory*. Butterworth-Heinemann: Elsevier.
- Sahoo, Prasanta K. and Doctors, Lawrence J. (2003). *A Study of Wave Resistance of High-Speed Displacement Hull Forms in Restricted Depth*. 7th International Conference on Fast Sea Transportation. Ischia, Italy.
- Sahoo, Prasanta. K., Doctors, Lawrence J. and Pretlove, L. (2006). *CFD Prediction of THE Wave Resistance of a Catamaran*. International Conference in Marine Hydrodynamics, (pp. 867-879). Australia.
- Salas, M. Adolfo., Sahoo, P. and Salman, Richard L. (2015). *Experimental and CFD Resistance Calculation of a Small Fast Catamaran*.
- Swennberg, S. (2000). *A Test of Turbulence Models for Steady Flows around Ships*. In : Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics.
- Thompson, J.F., Soni, B.K., and Weatherill, N.P. (1999). *Handbook of Grid Generation*. CRC Press.
- Tuck, E. O., Scullen, D. C. and Lazauskas, L. (2002). *Wave Patterns and Minimum Wave Resistance for High-Speed Vessels*. 24th Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Utama, I. K. A. P. (1999). *Investigation of The Viscous Resistance Components of Catamaran Form*. UK : University of Southampton.
- Utama, I. K. A. P. and Molland, A.F. (2001). *Experimental and Numerical Investigations into Catamaran Viscous Resistance*. (pp. 295-301). Fast 2001.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (2nd ed.). Harlow, England: Pearson Education Limited.
- Xiaoping, Lu., Yan, Huang and Kun, Shi Zhong. (2000). *Wave Resistance of Wave Piercing Catamarans*. *Hydrodynamics, Ser B, 4* , 88-98.

LAMPIRAN

Lampiran A Hasil Simulasi *Free Surface* pada CFD

Lampiran B Hasil Simulasi Kekentalan Murni pada CFD

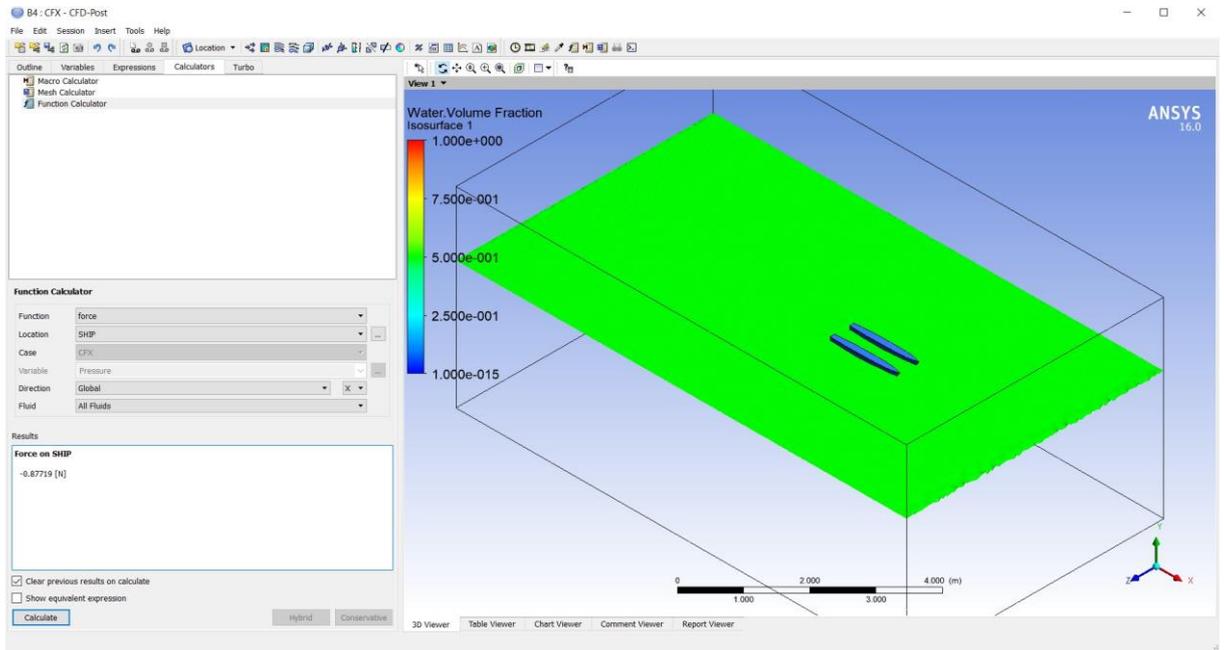
Lampiran C Distribusi Kecepatan Pada *Inner Hull* dan *Outer Hull*

Lampiran D Visualisasi Distribusi Kecepatan

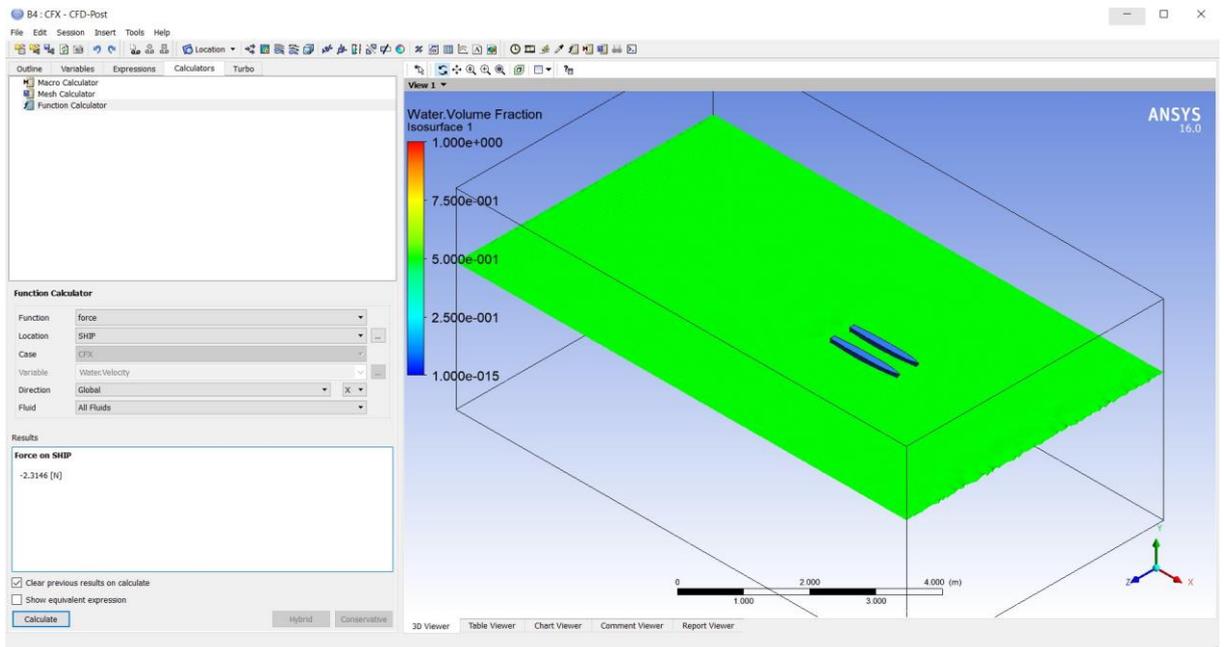
LAMPIRAN A
HASIL SIMULASI *FREE SURFACE* PADA *CFD*

A. Model NWW

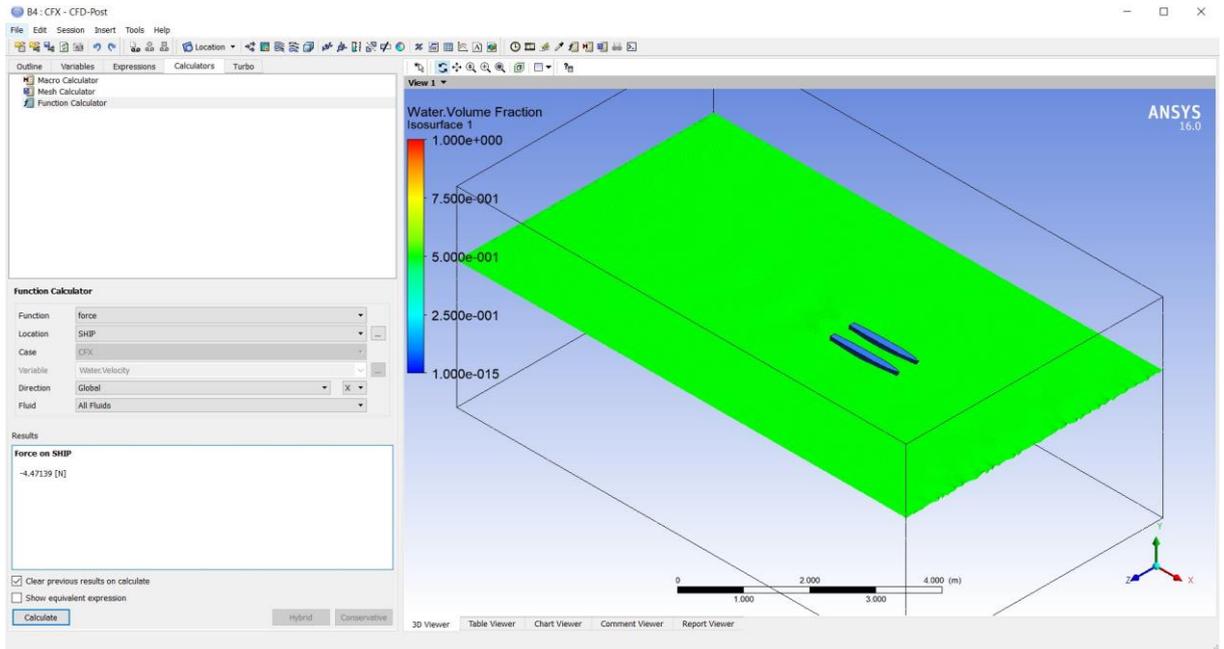
➤ Fr 0.19



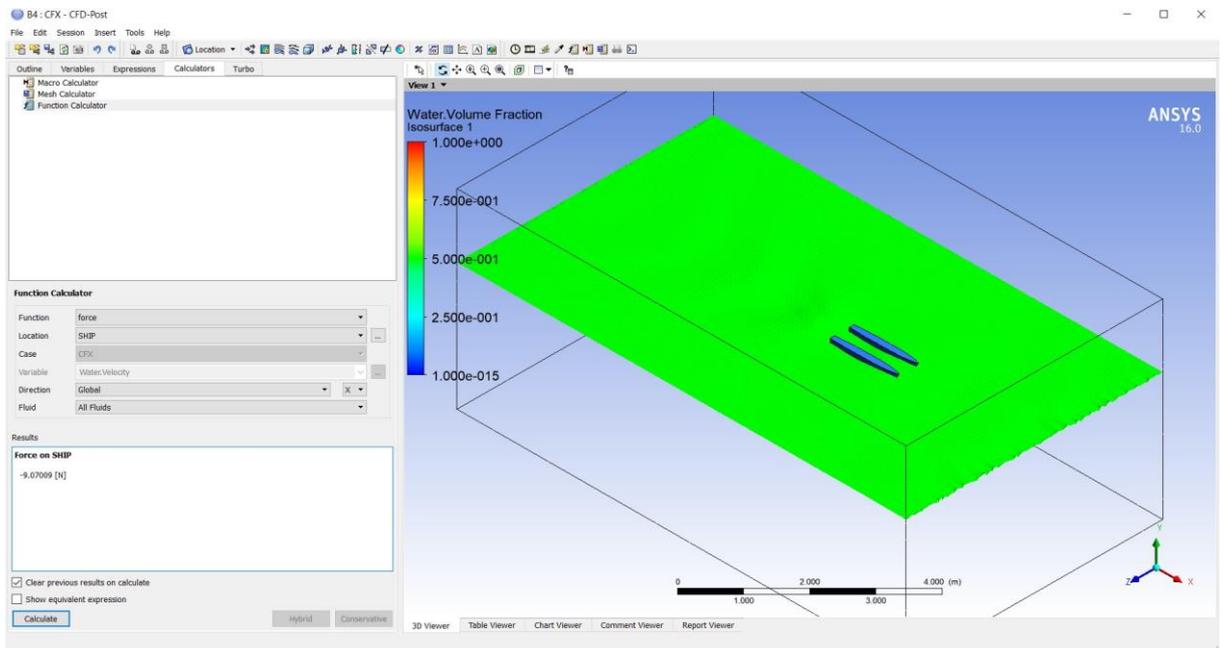
➤ Fr 0.28



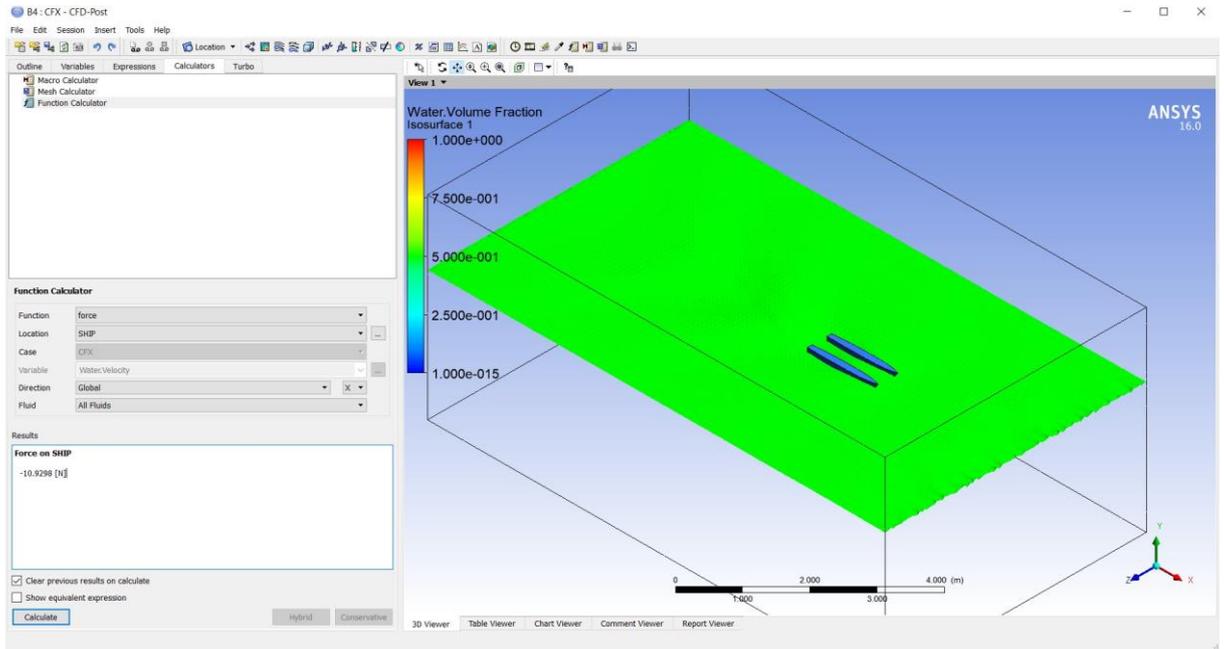
➤ Fr 0.37



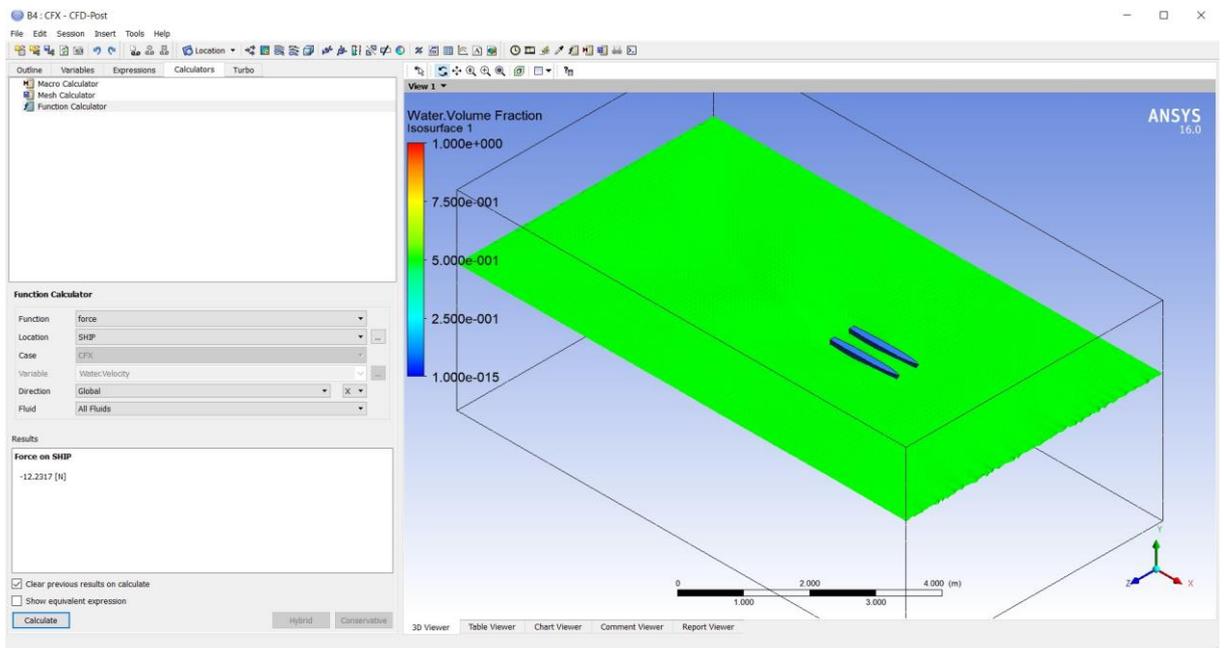
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

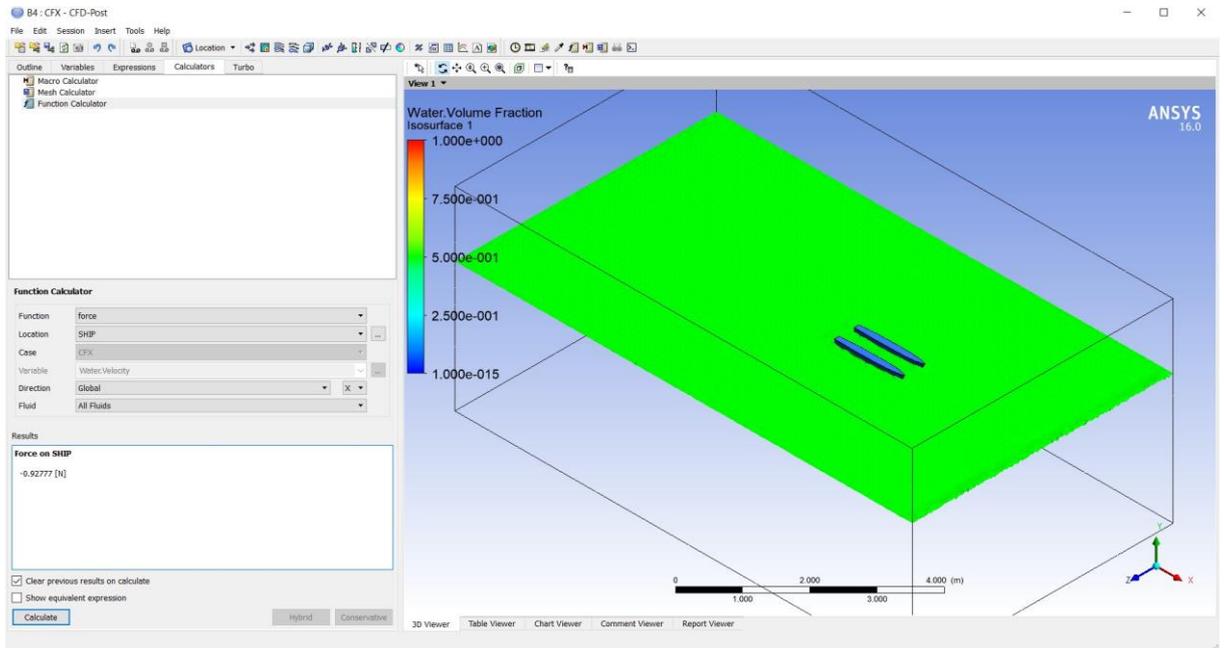


➤ Fr 0.65

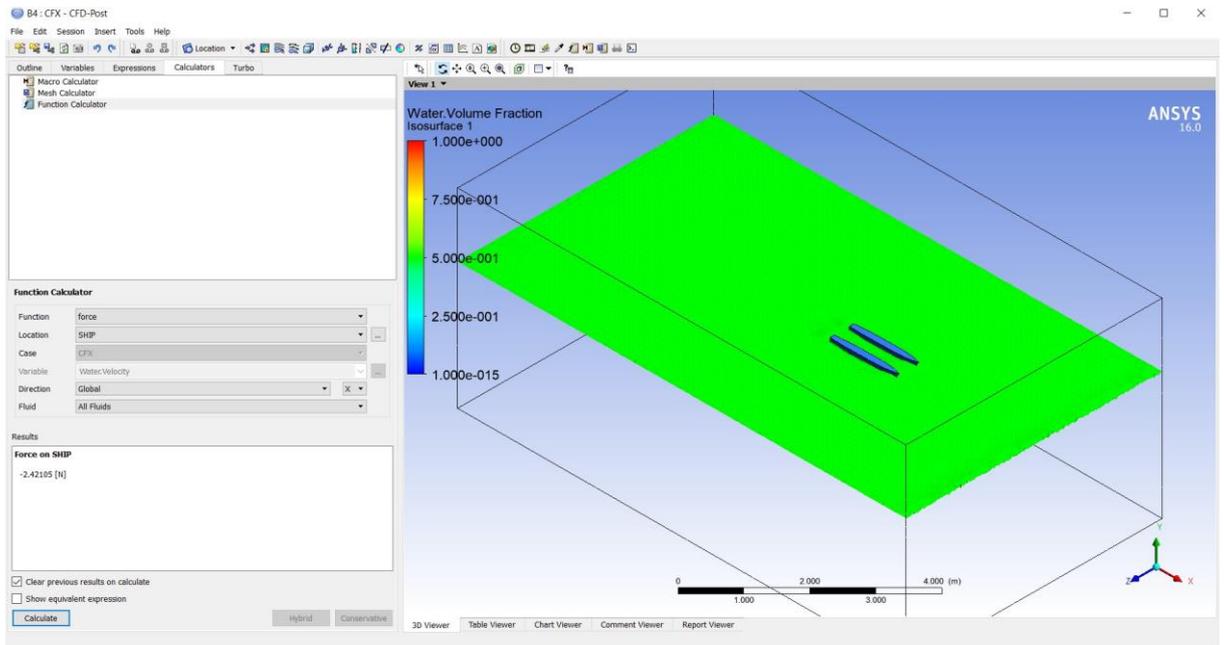


B. Model WV2

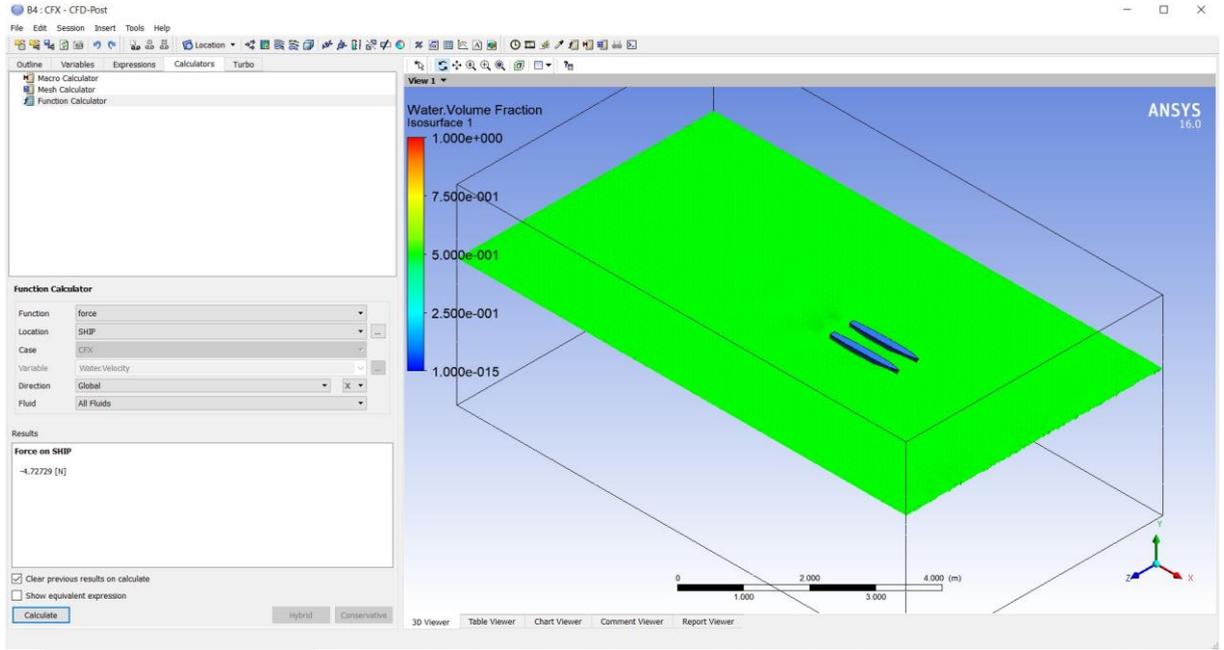
➤ Fr 0.19



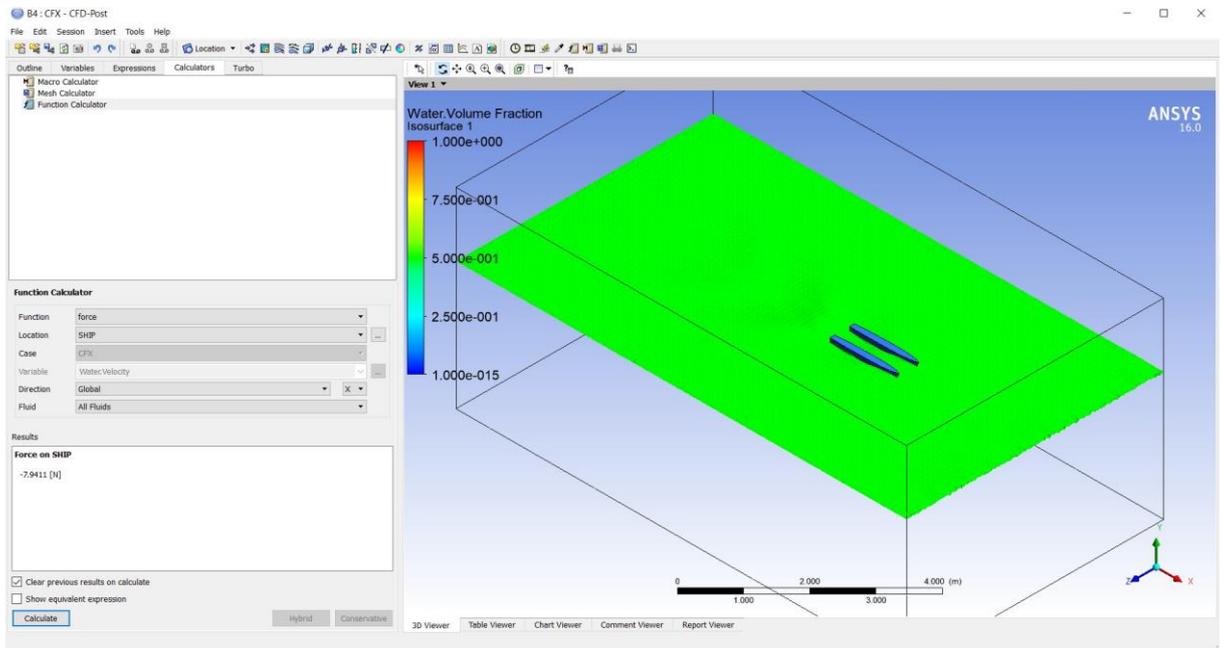
➤ Fr 0.28



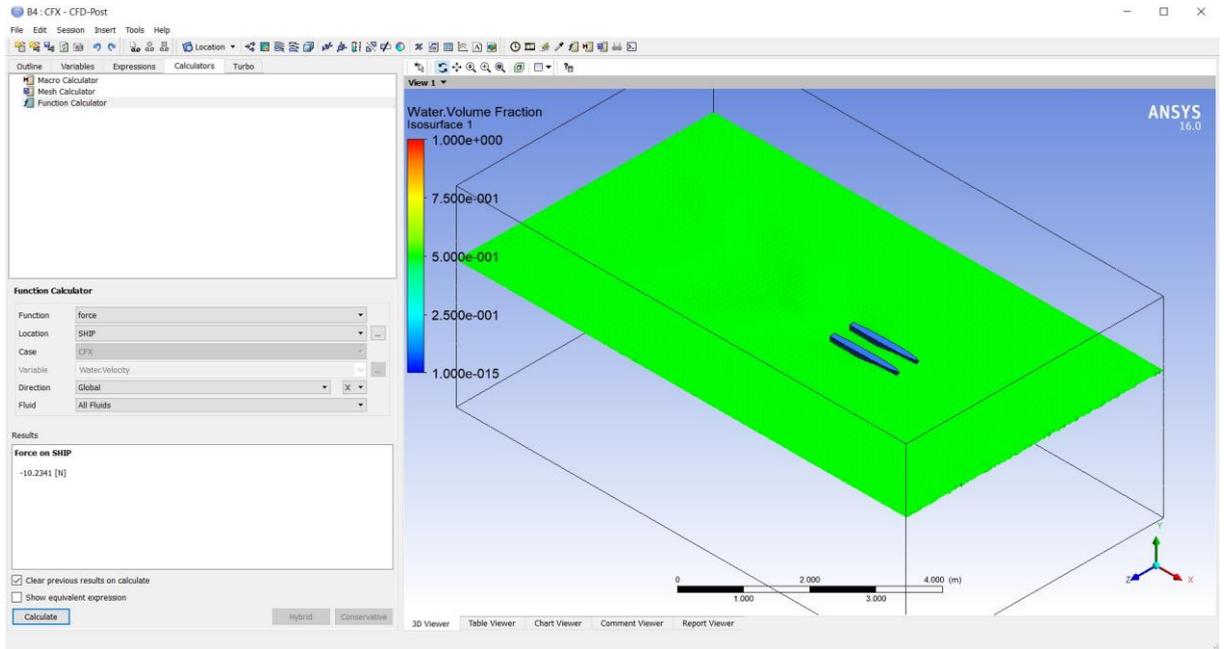
➤ Fr 0.37



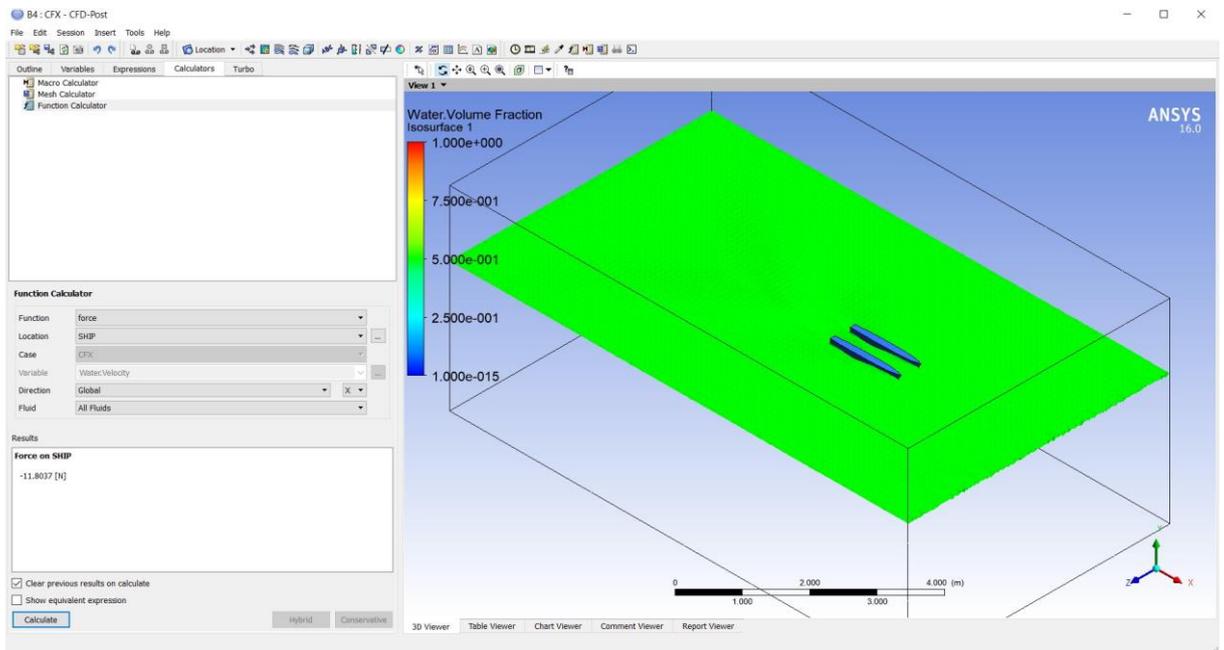
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

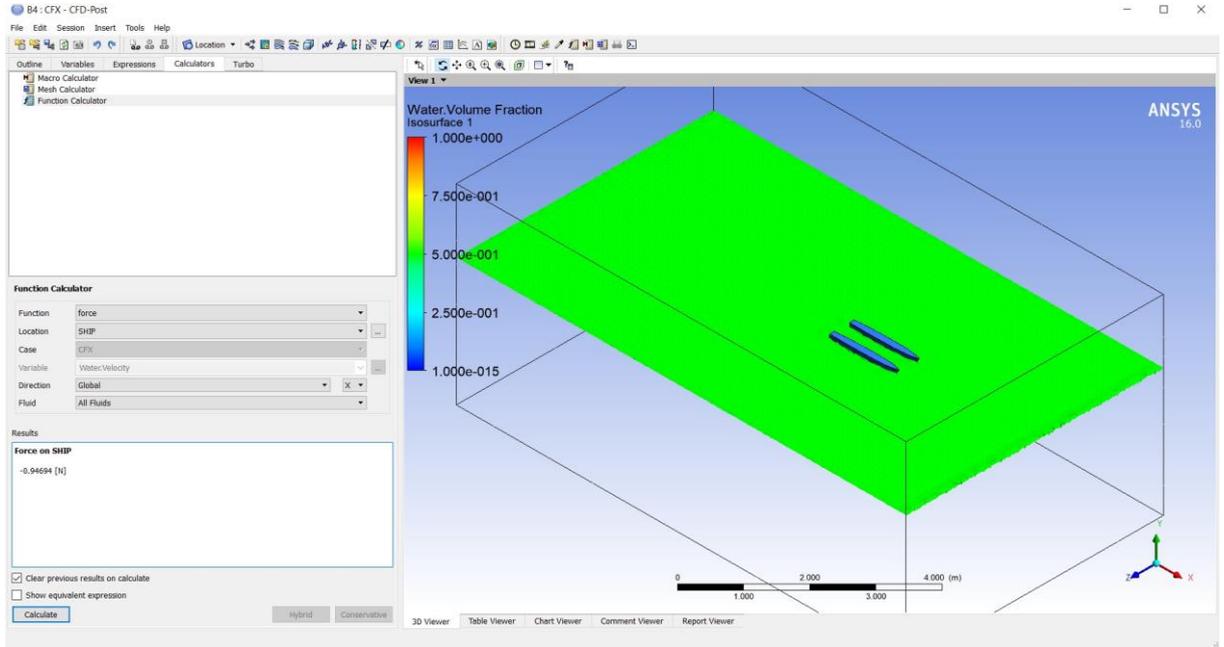


➤ Fr 0.65

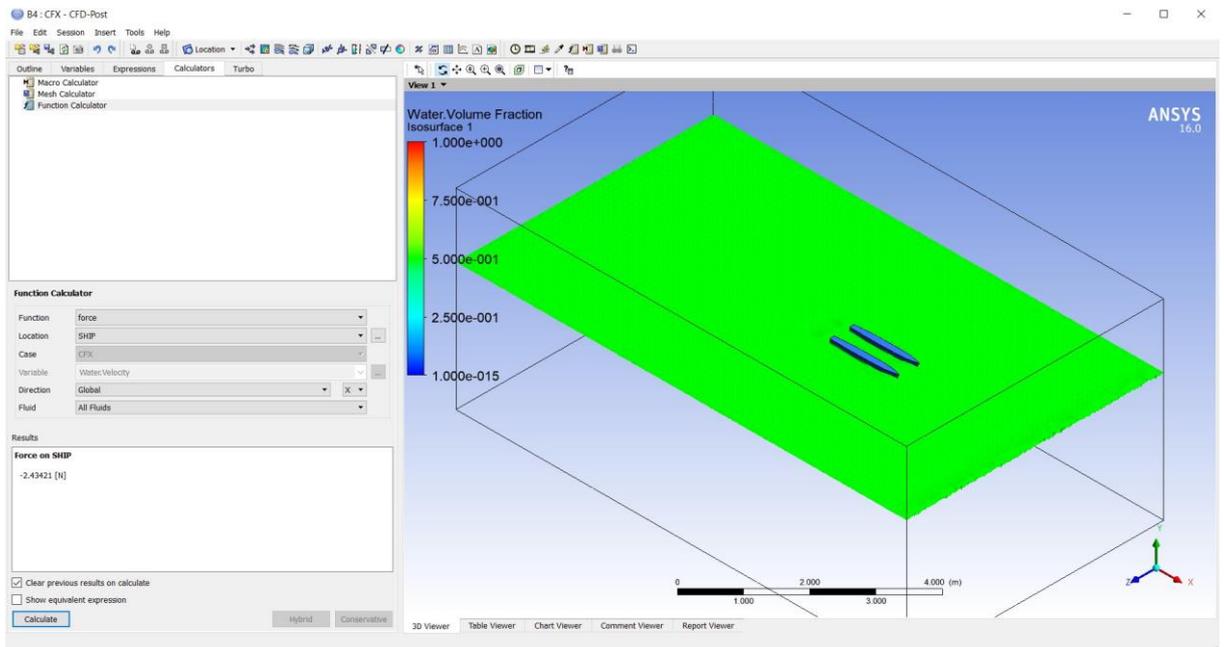


C. Model WV4

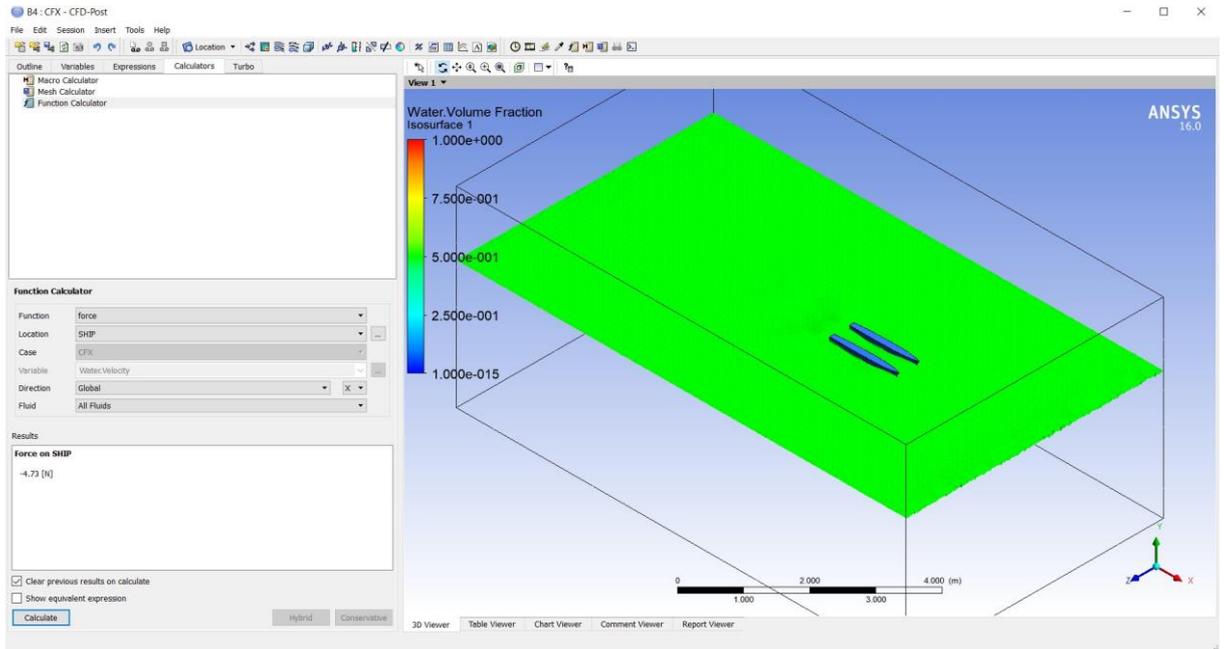
➤ Fr 0.19



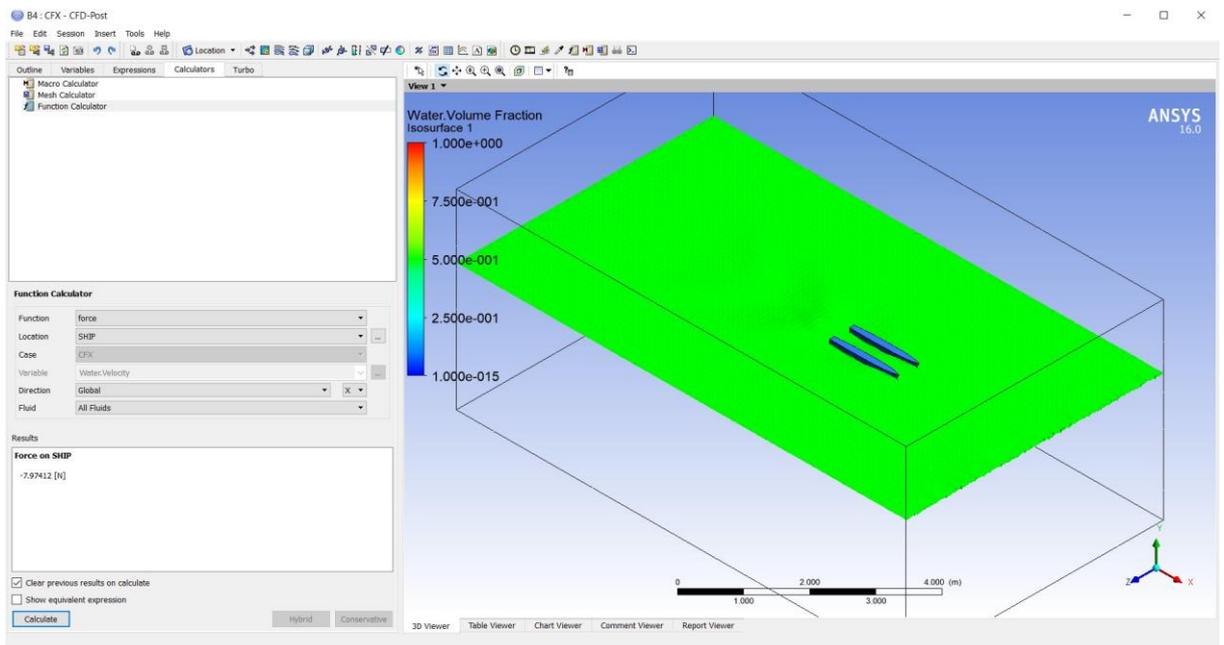
➤ Fr 0.28



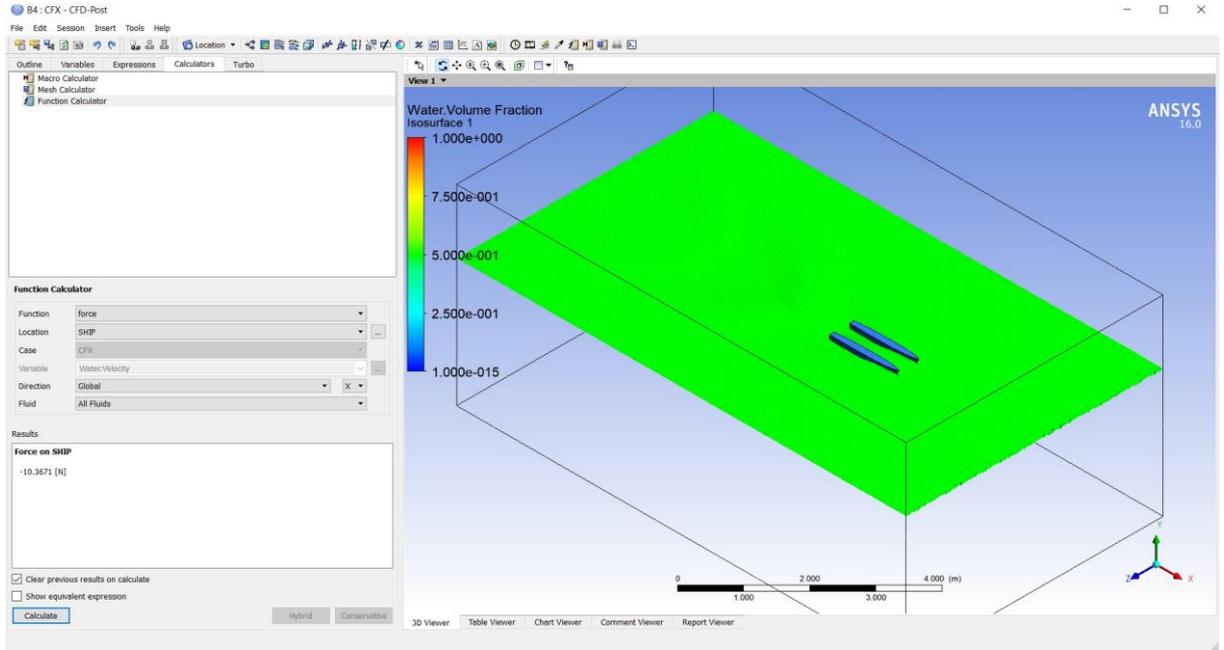
➤ Fr 0.37



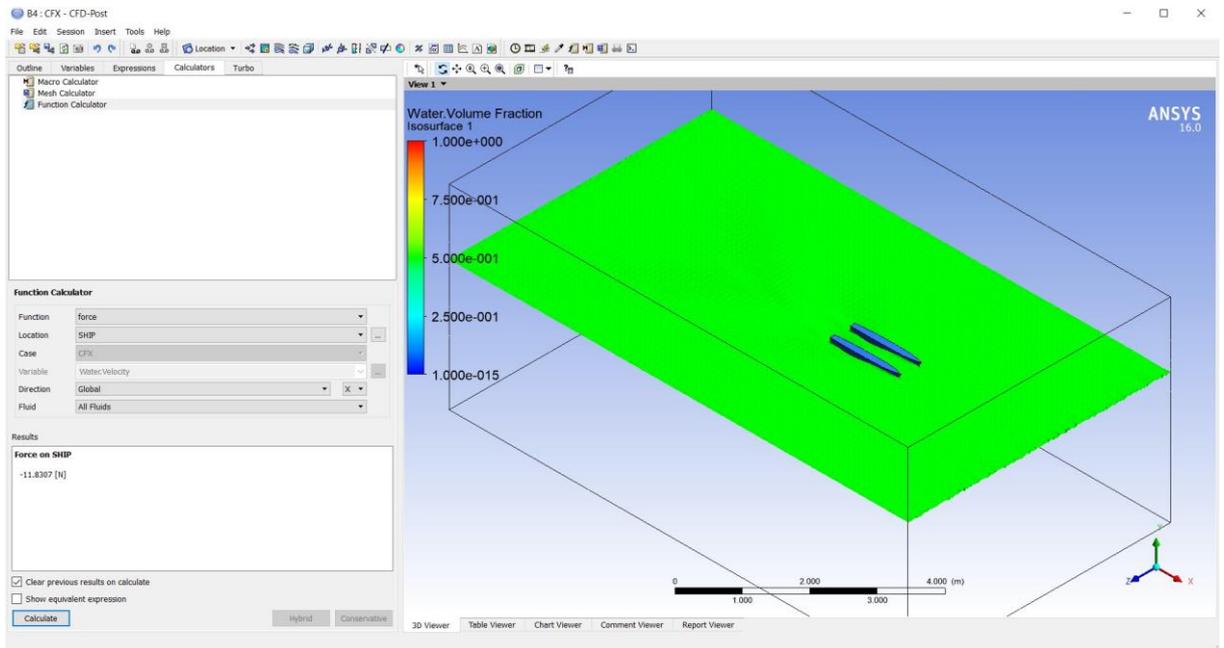
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

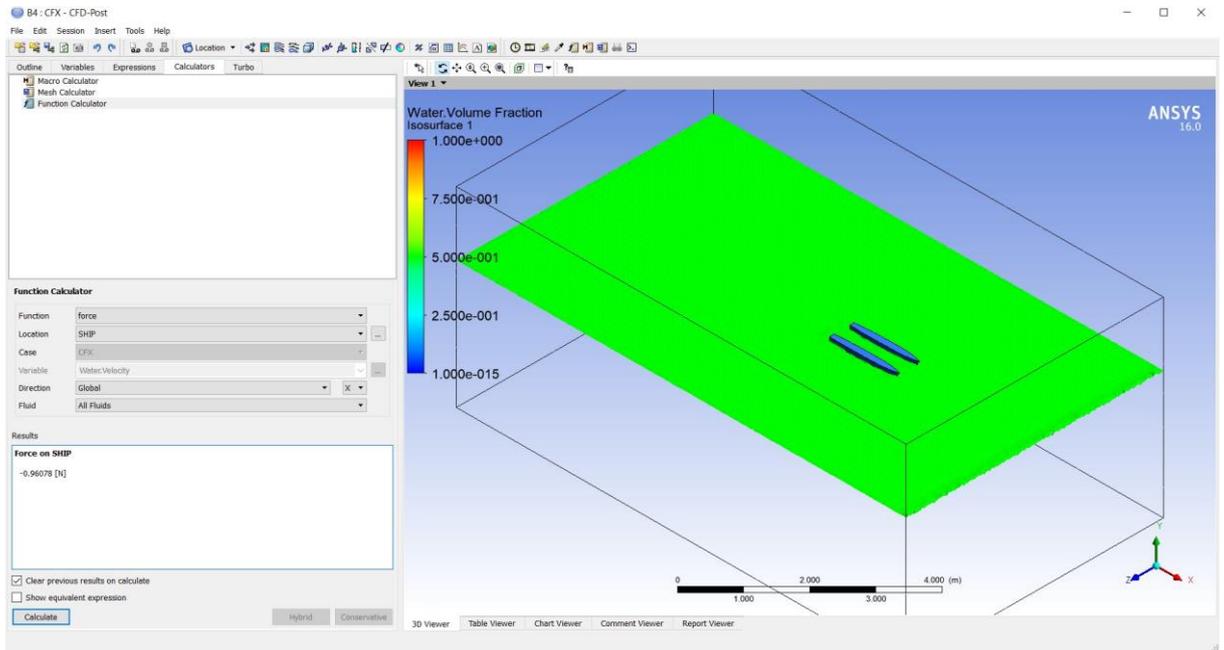


➤ Fr 0.65

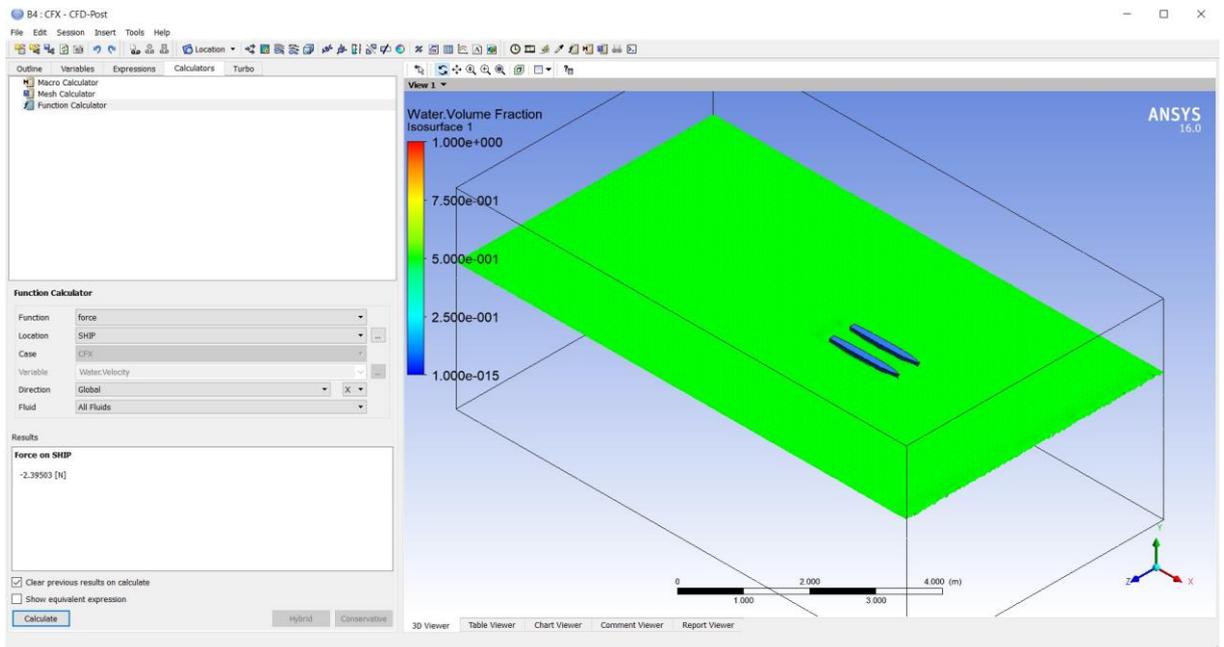


D. Model WV6

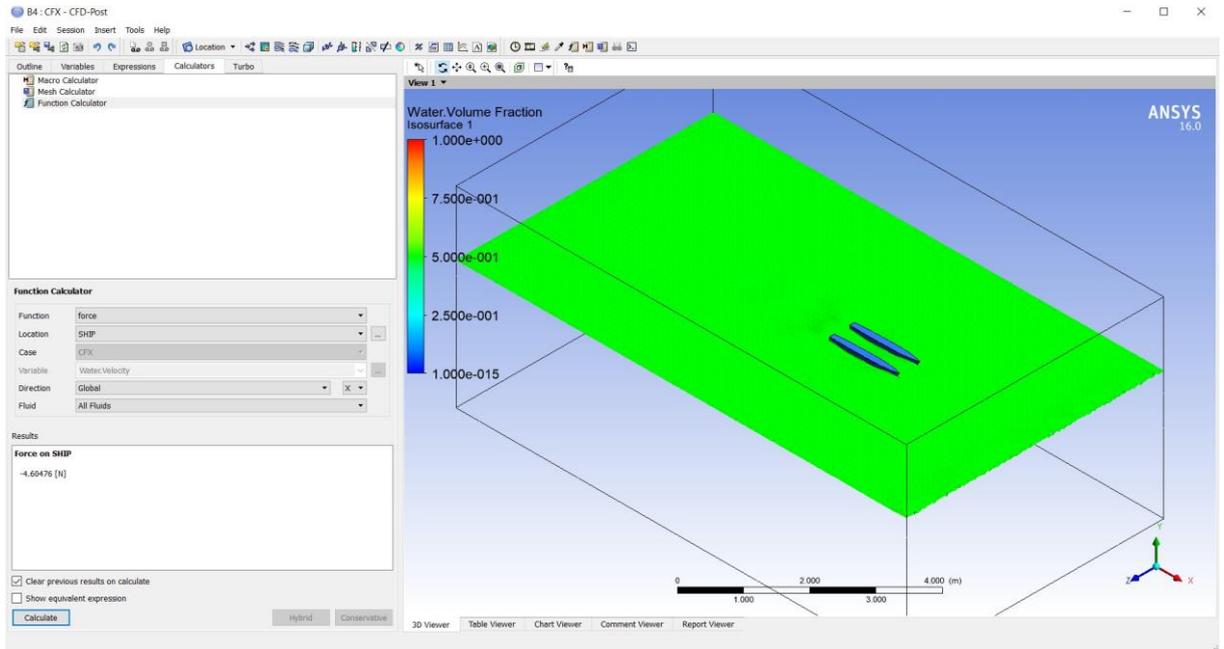
➤ Fr 0.19



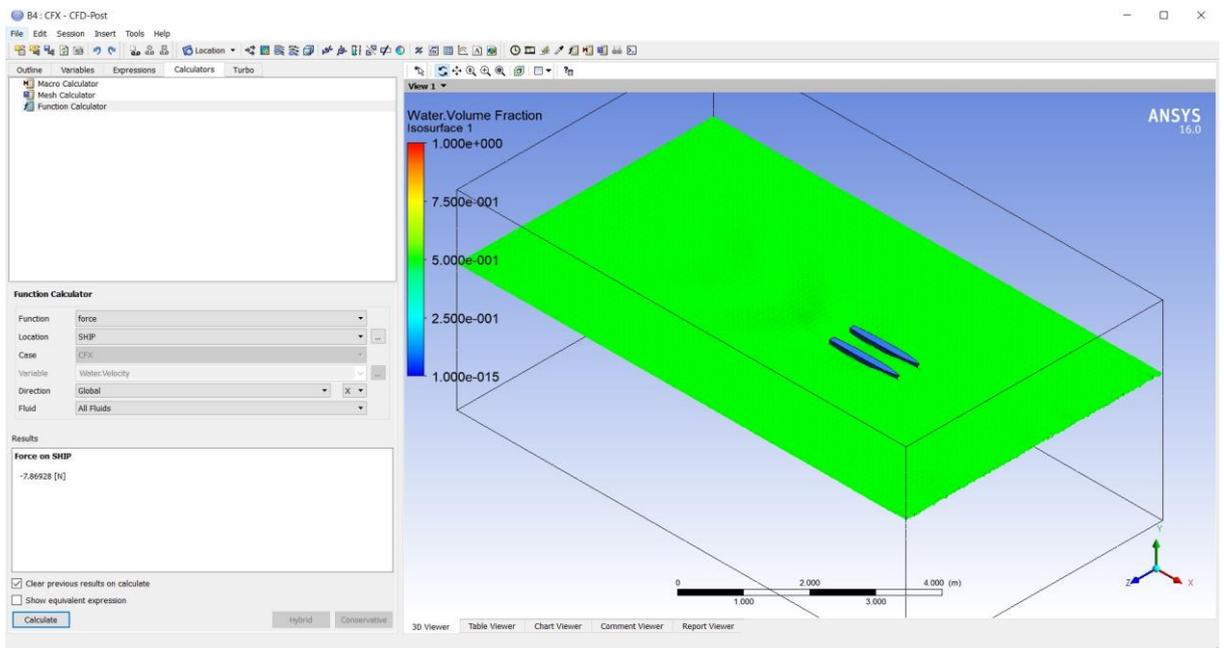
➤ Fr 0.28



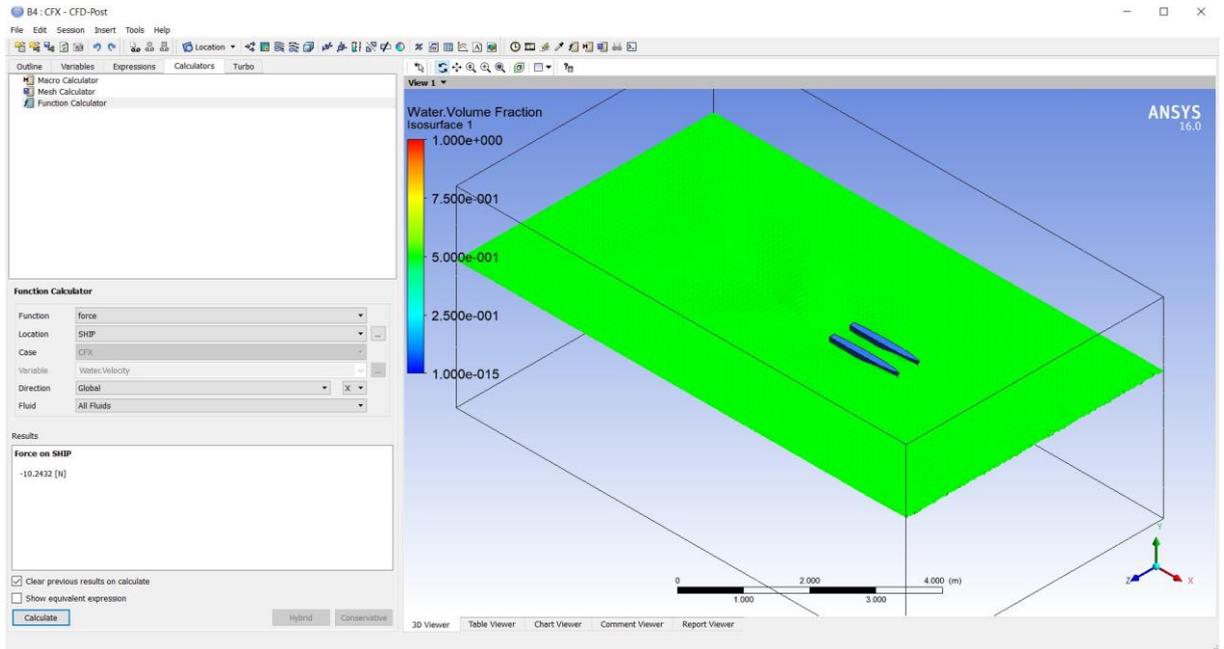
➤ Fr 0.37



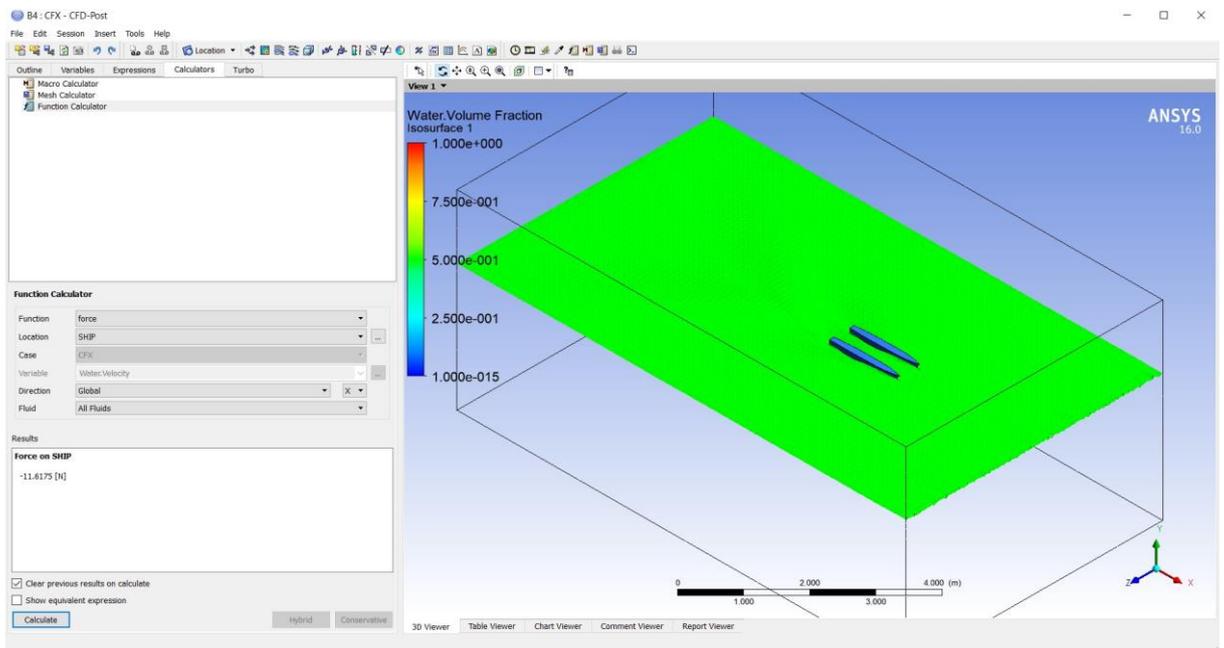
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56



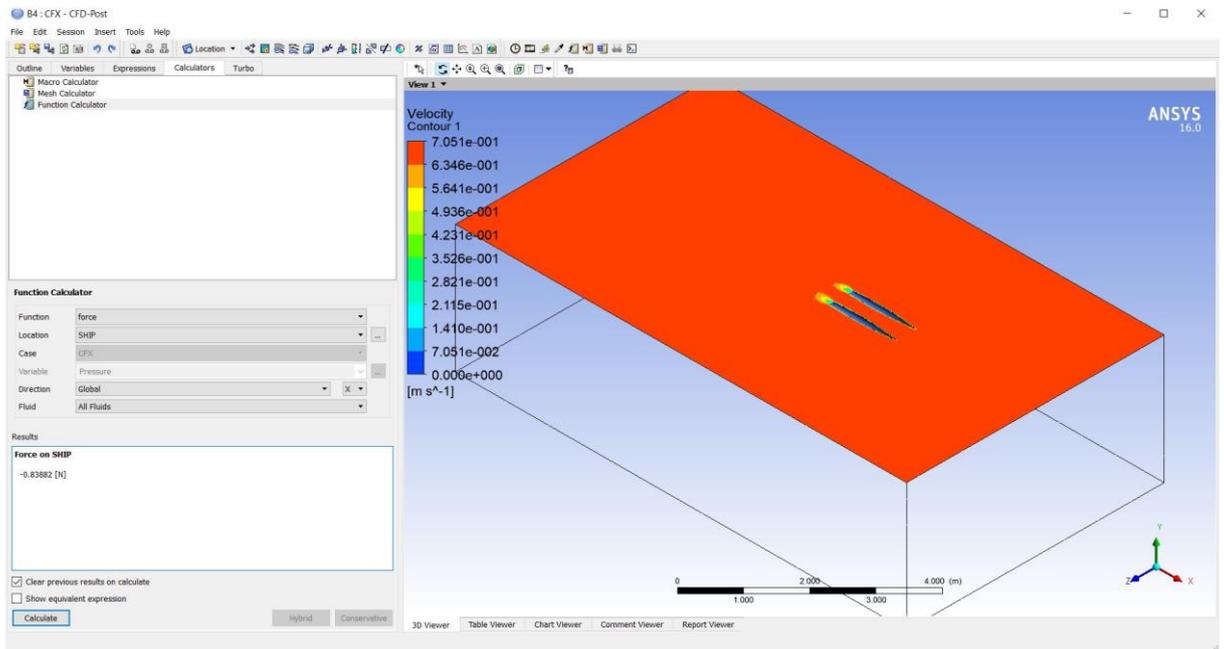
➤ Fr 0.65



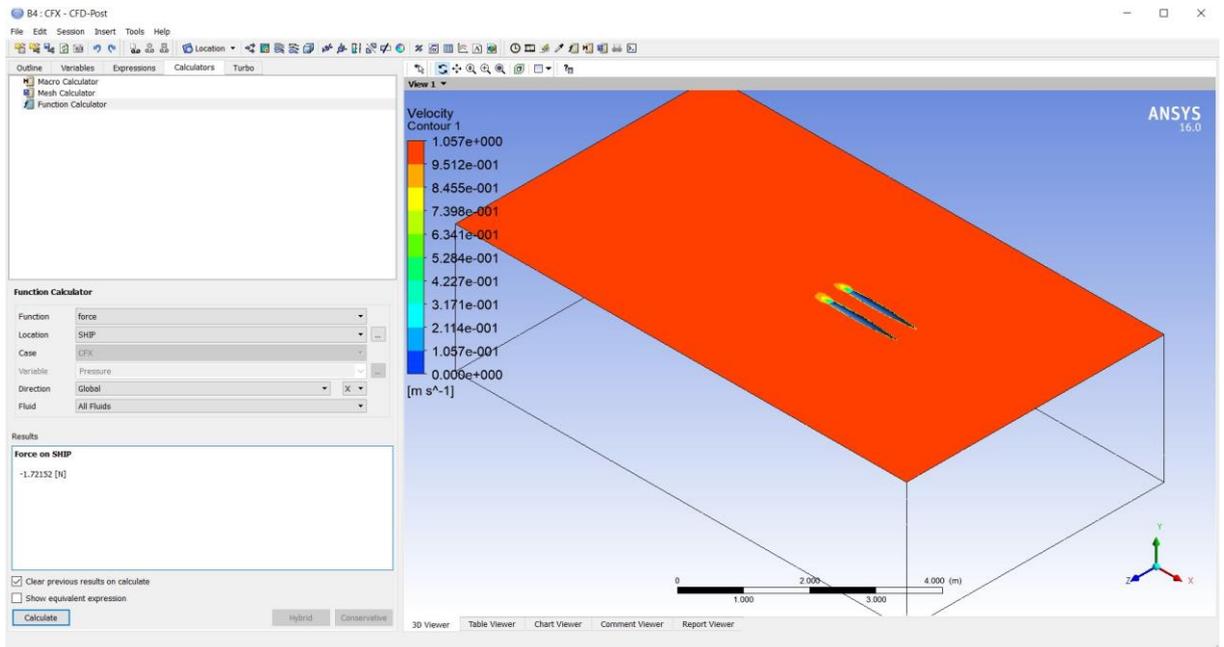
LAMPIRAN B
HASIL SIMULASI KEKENTALAN MURNI PADA CFD

A. Model NWW

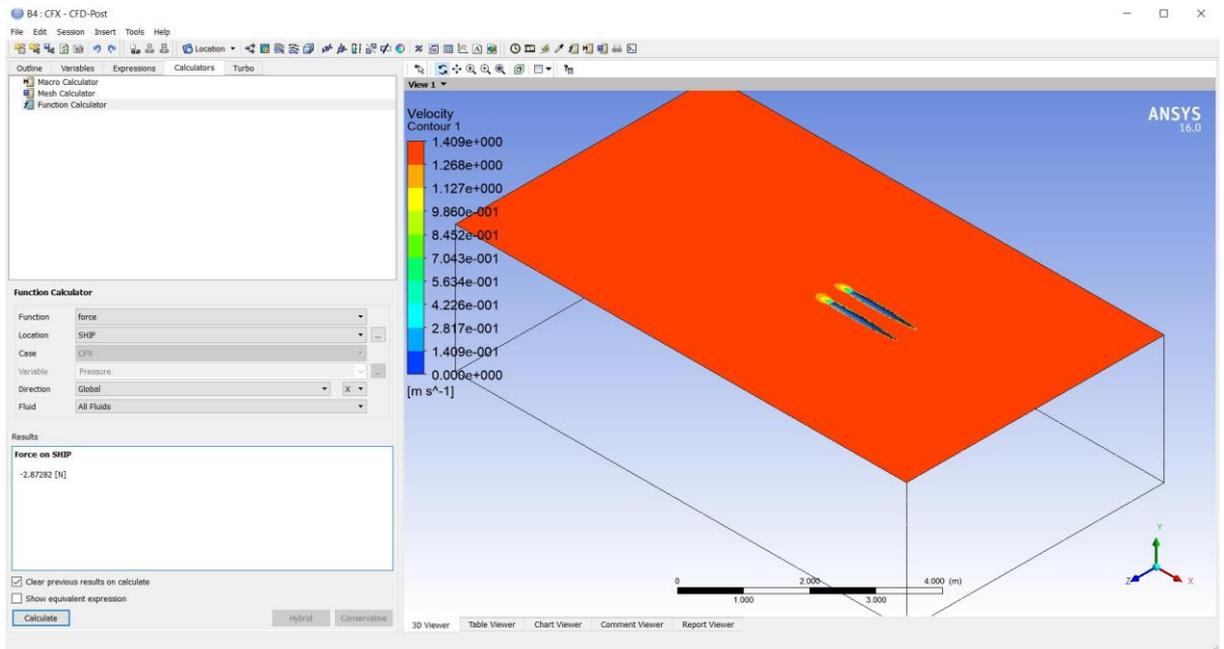
➤ Fr 0.19



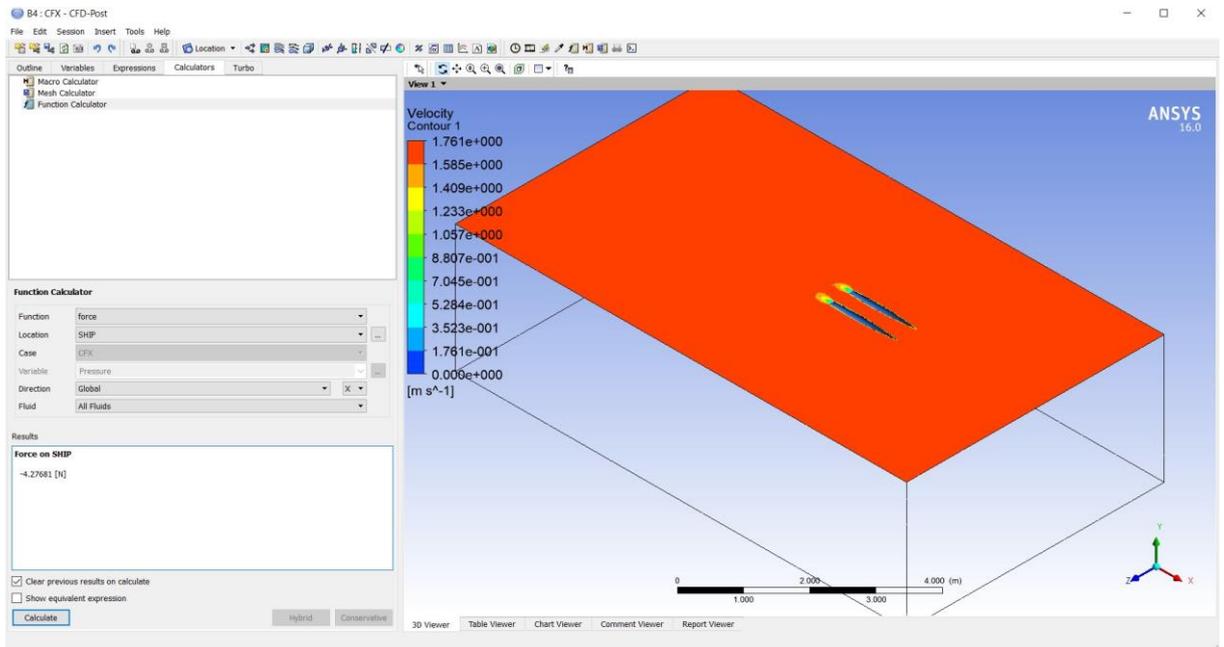
➤ Fr 0.28



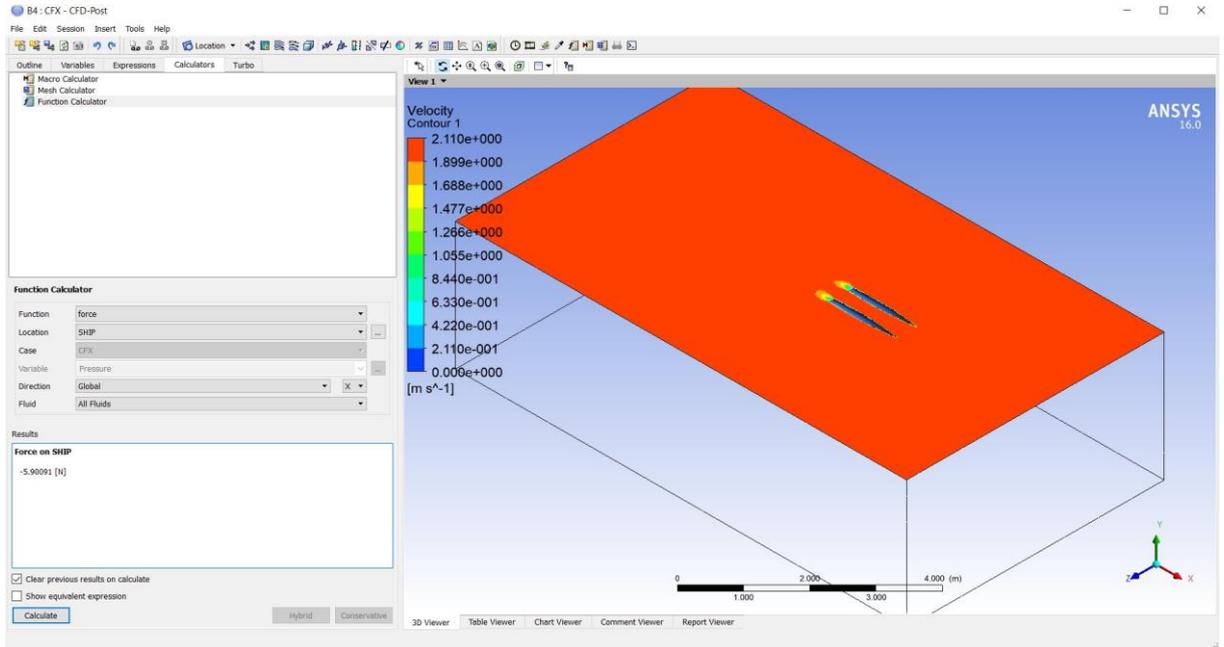
➤ Fr 0.37



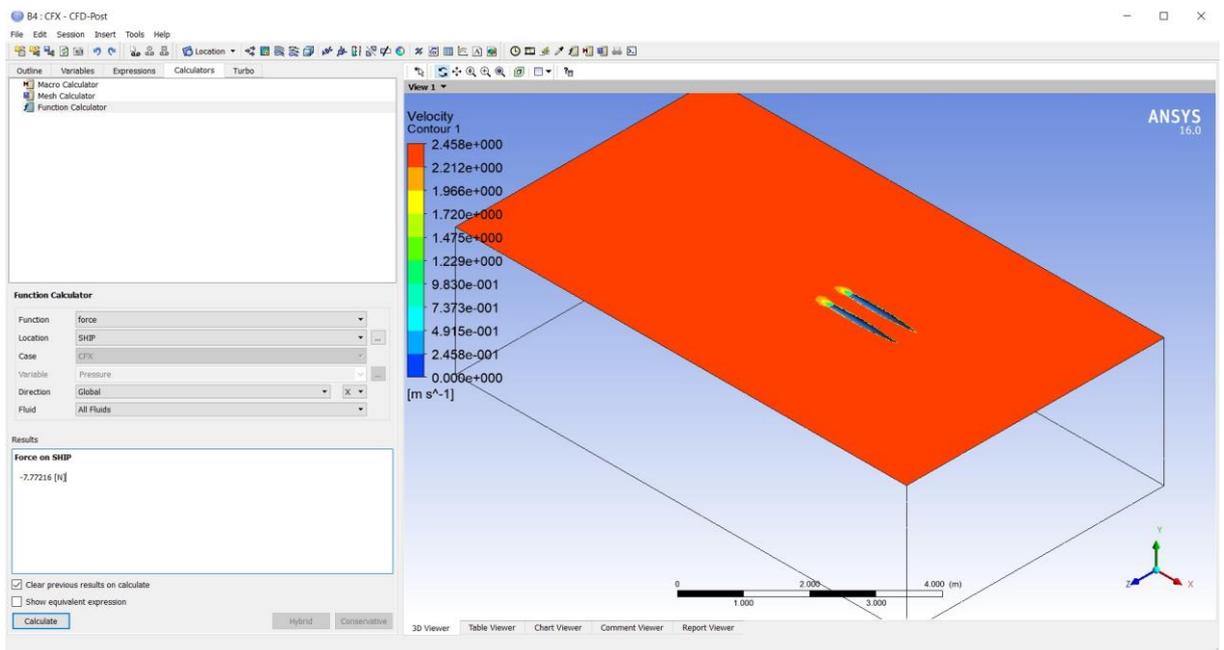
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

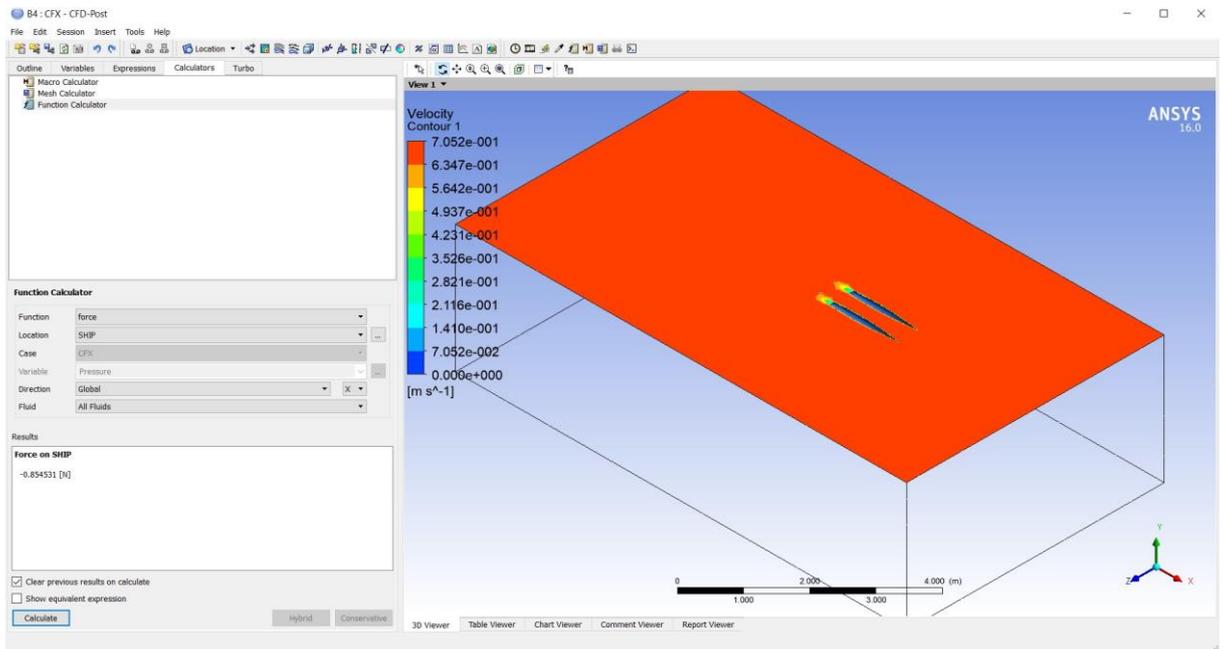


➤ Fr 0.65

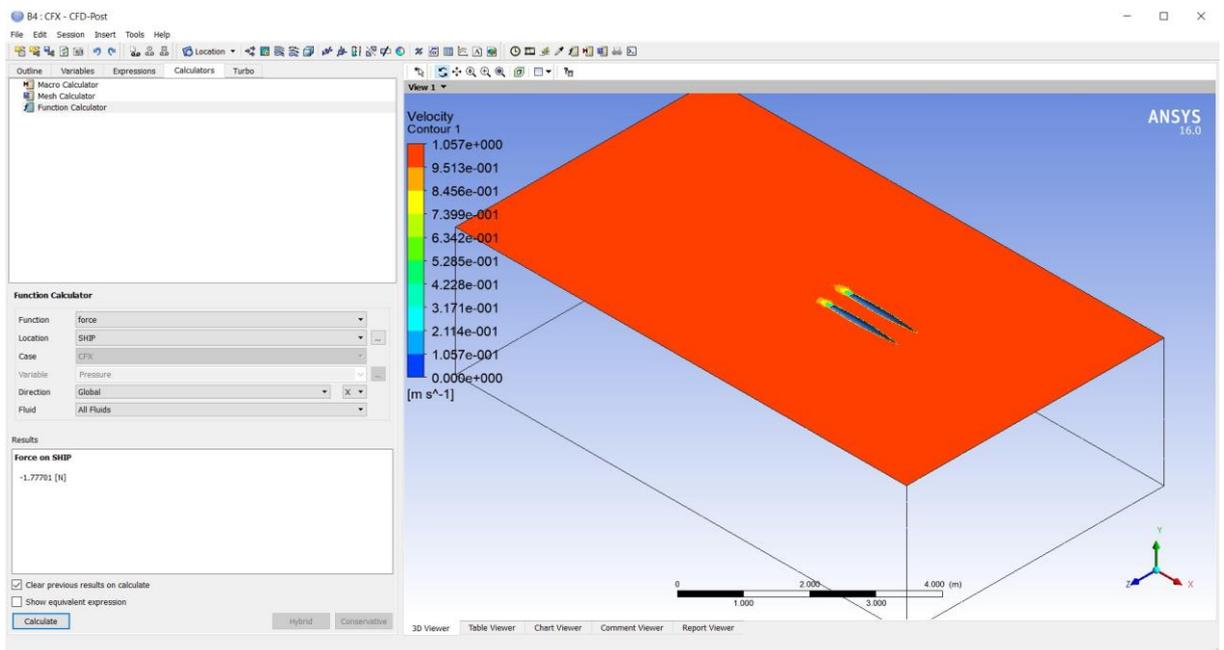


B. Model WV2

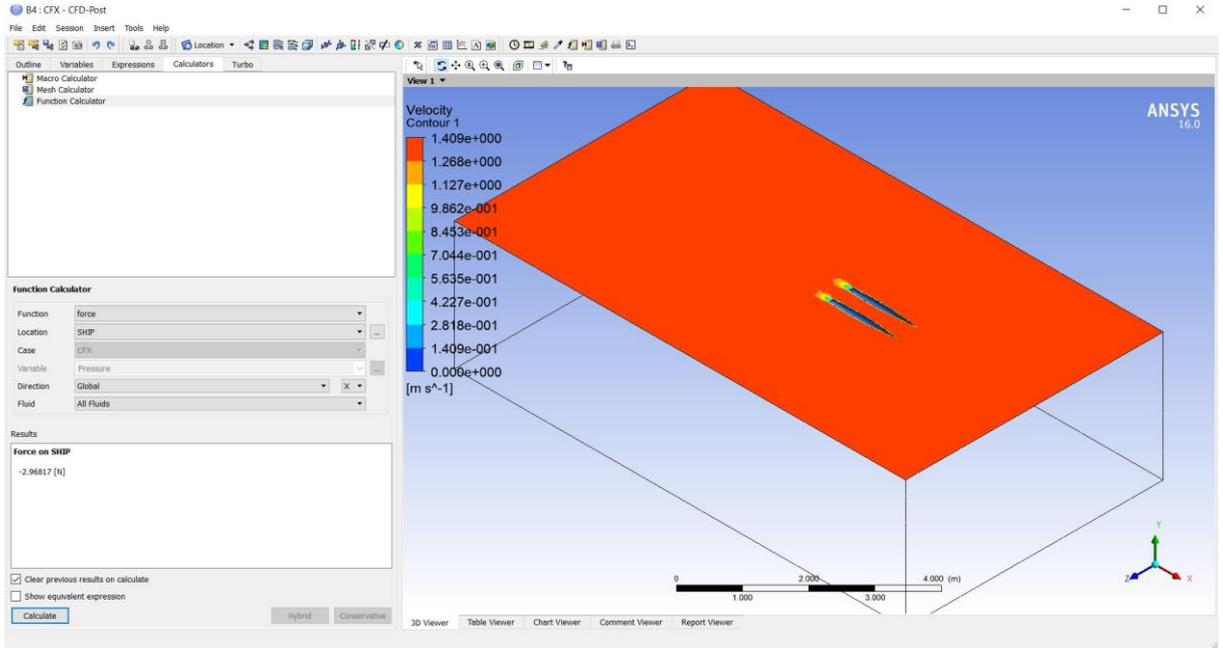
➤ Fr 0.19



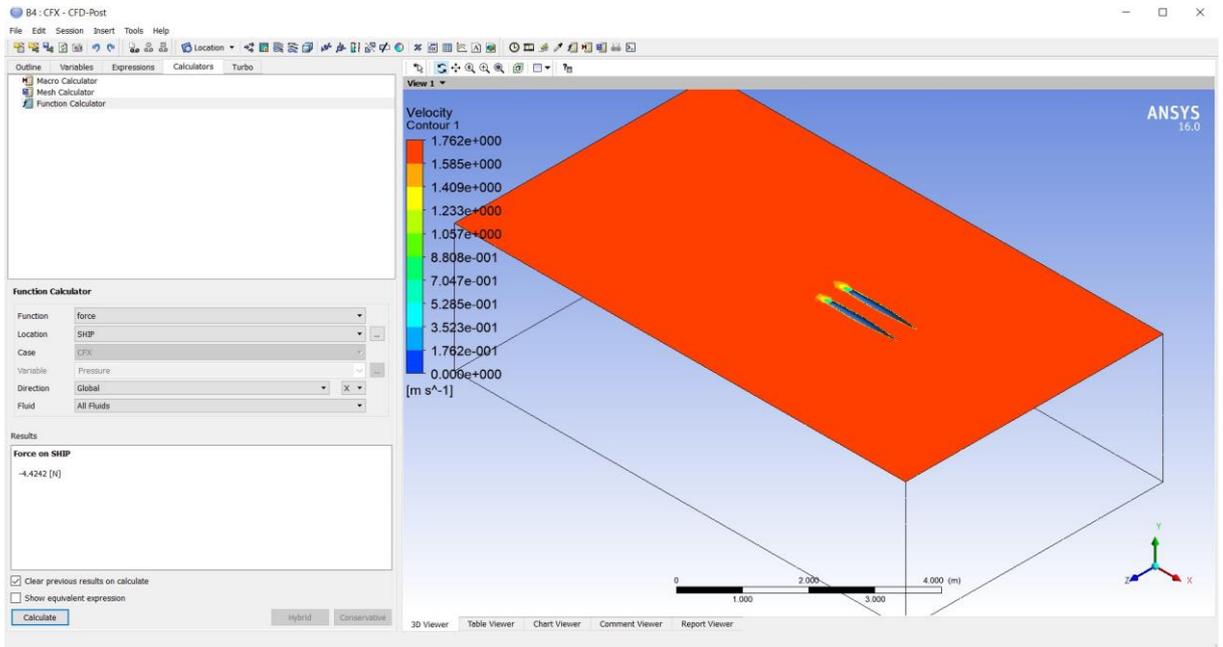
➤ Fr 0.28



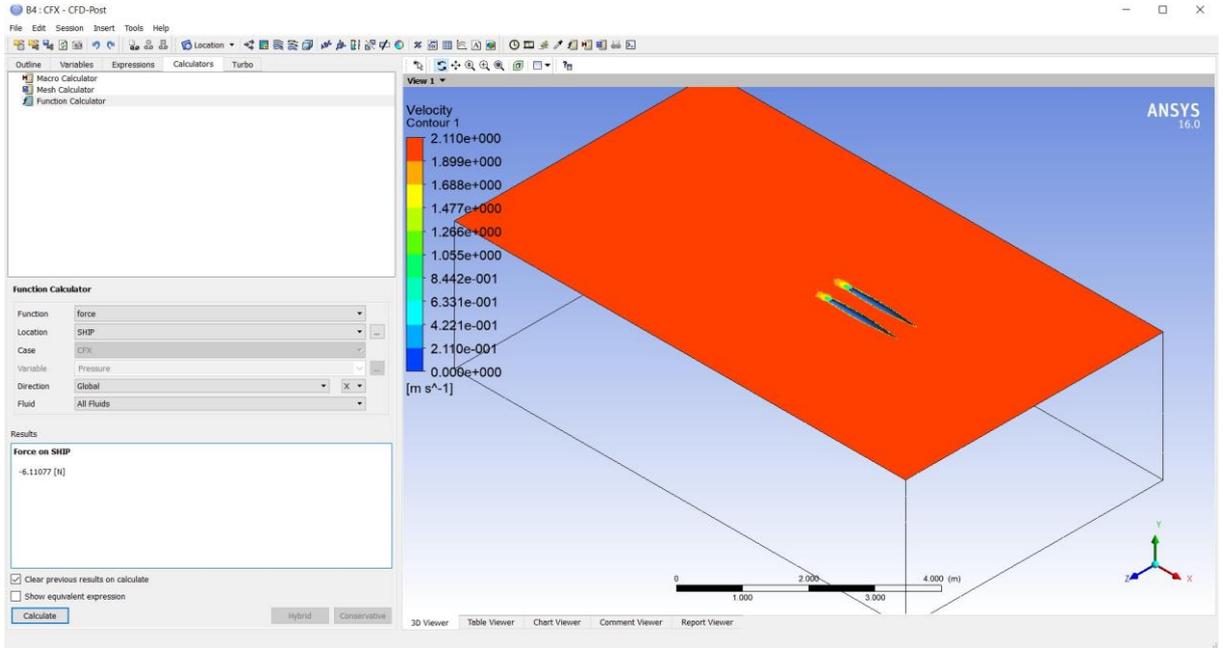
➤ Fr 0.37



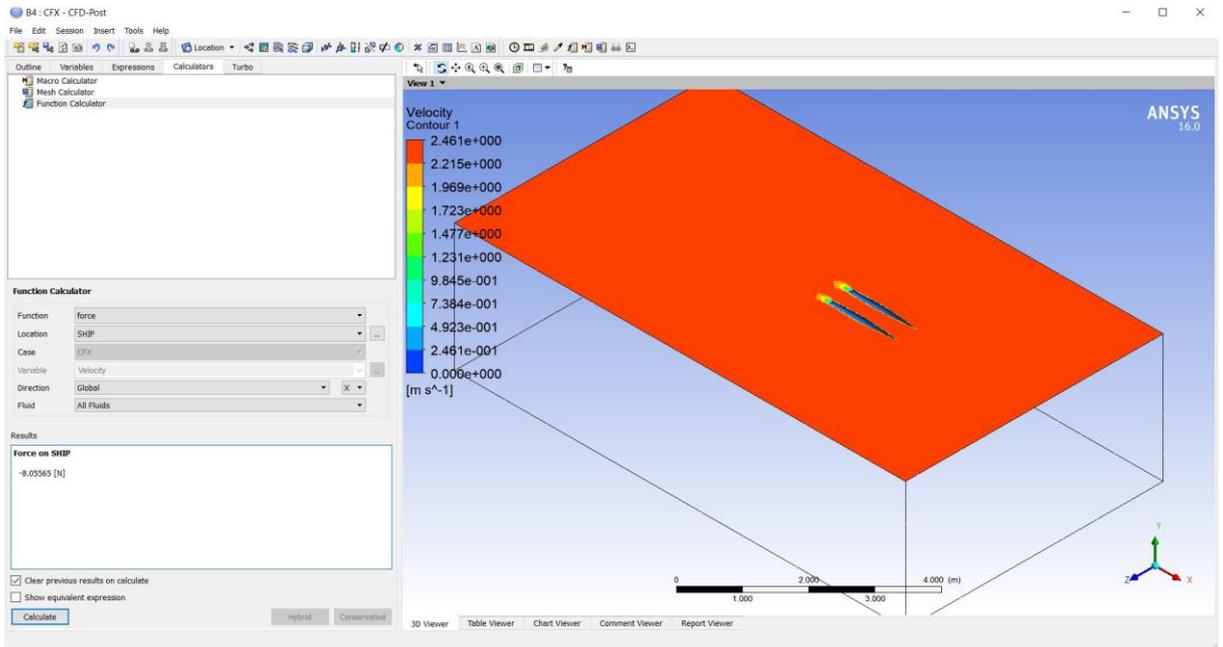
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

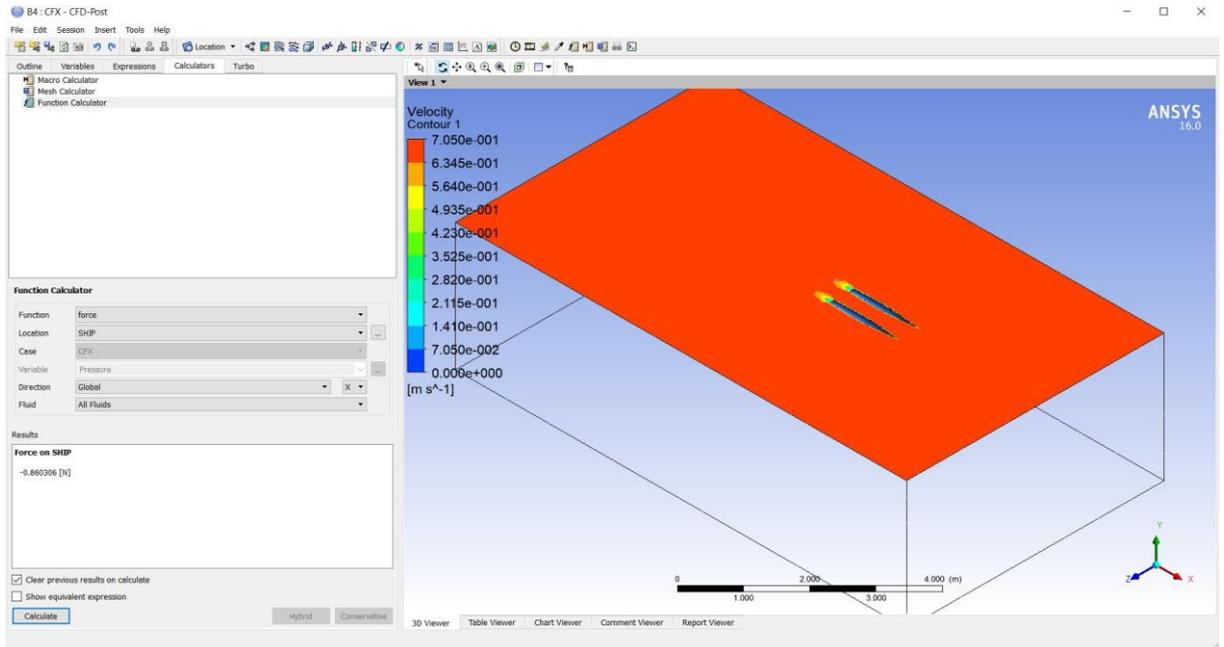


➤ Fr 0.65

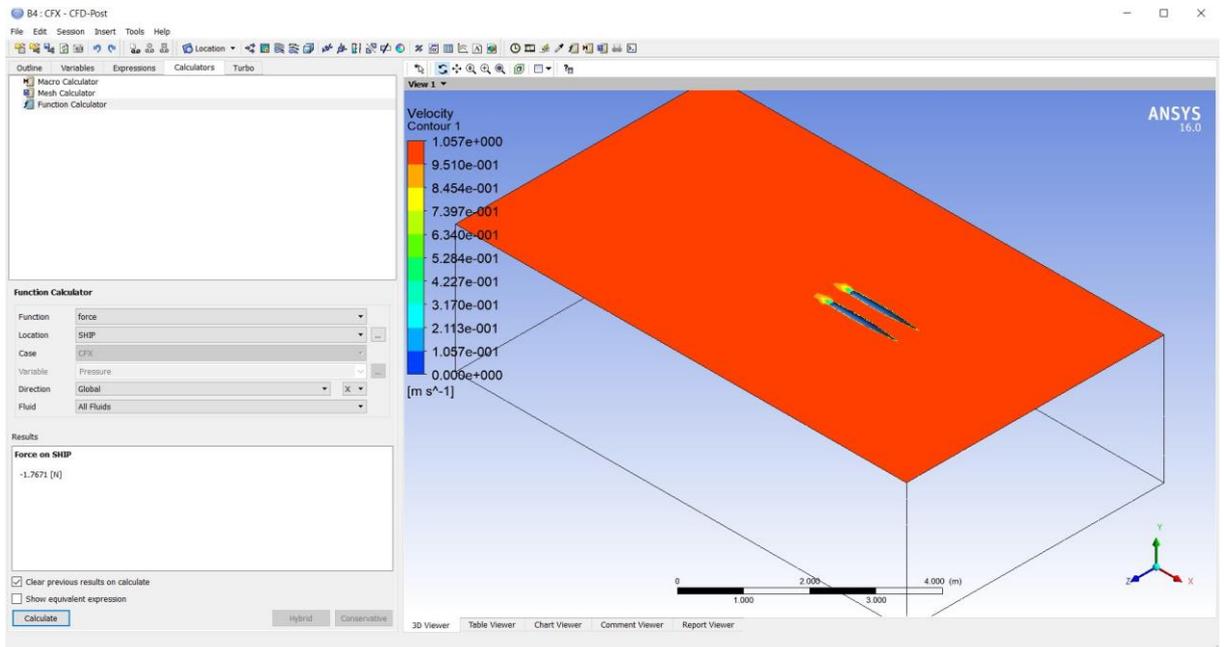


C. Model WV4

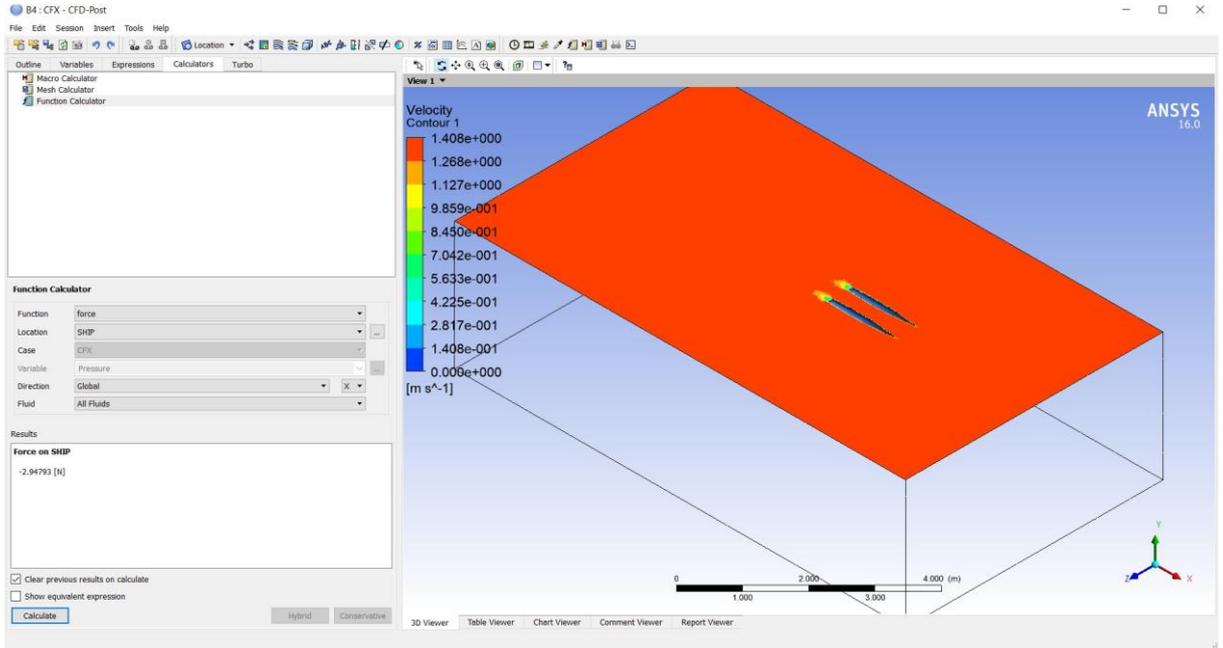
➤ Fr 0.19



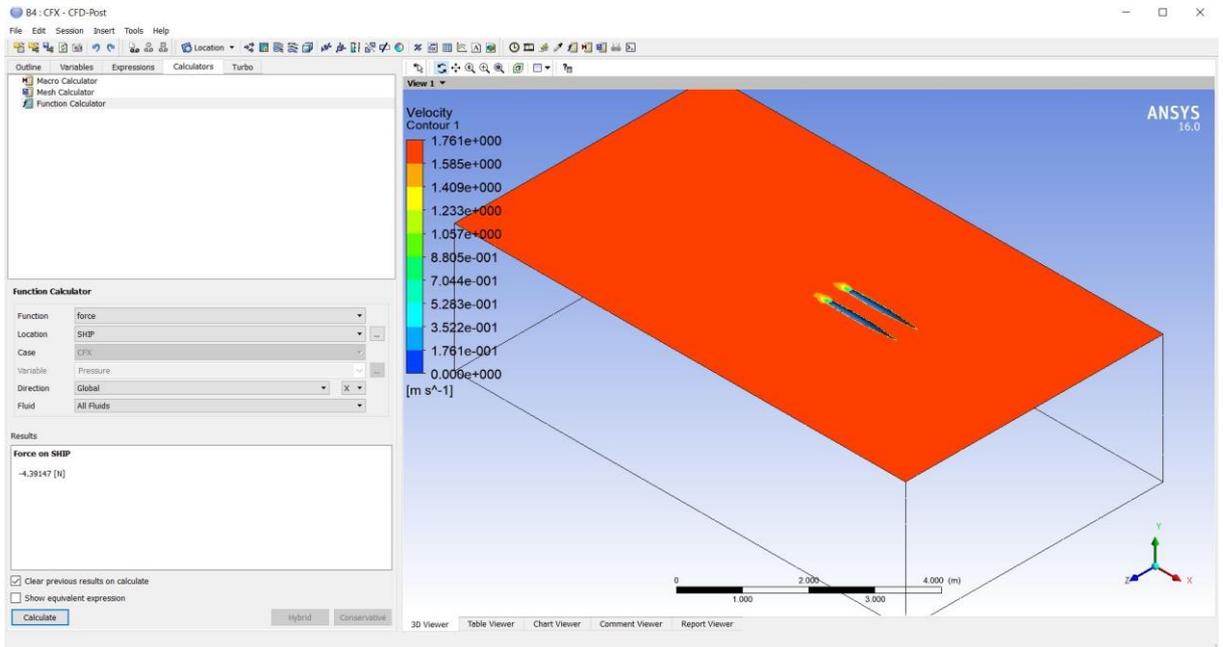
➤ Fr 0.28



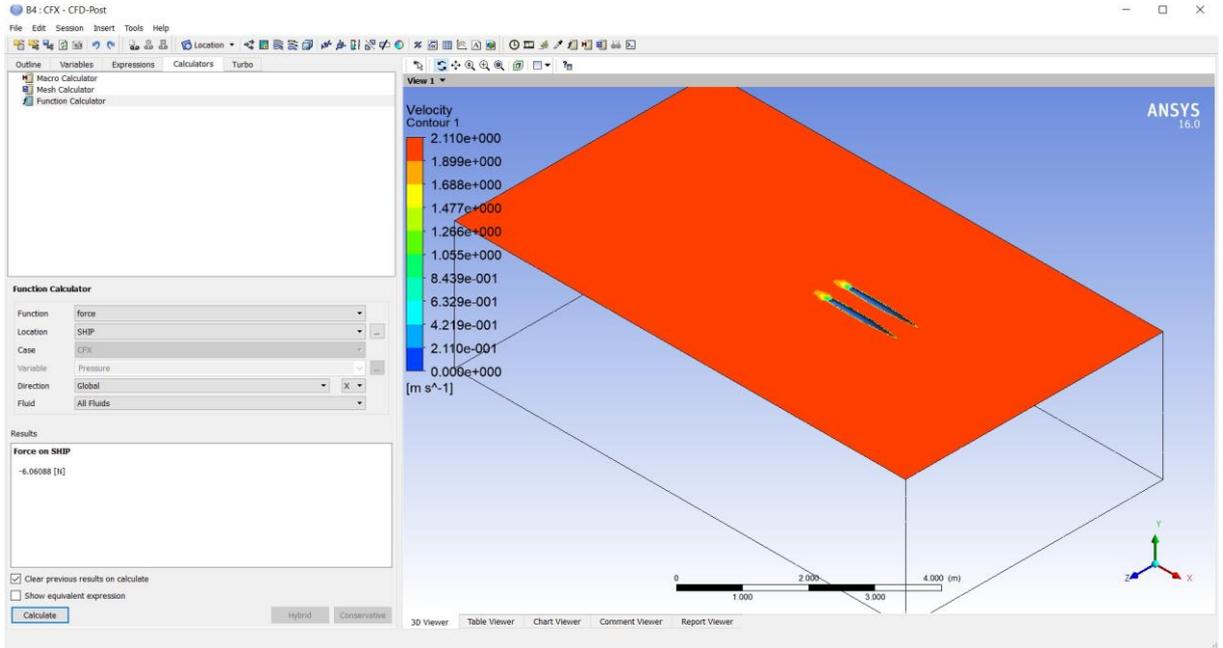
➤ Fr 0.37



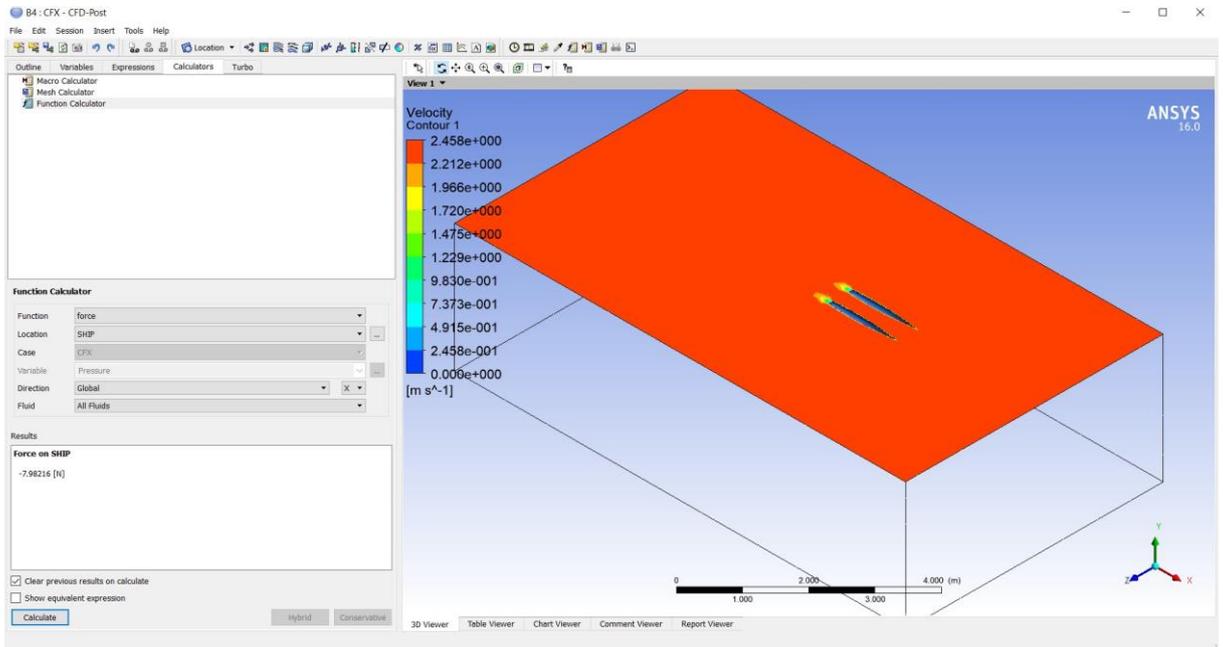
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

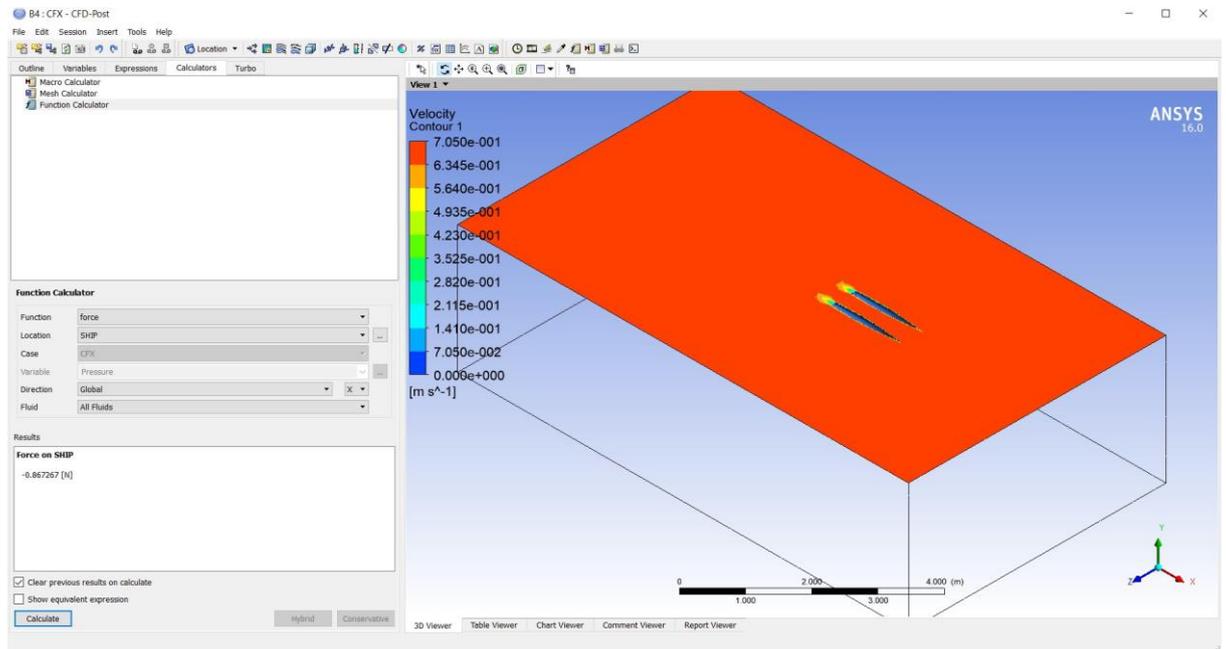


➤ Fr 0.65

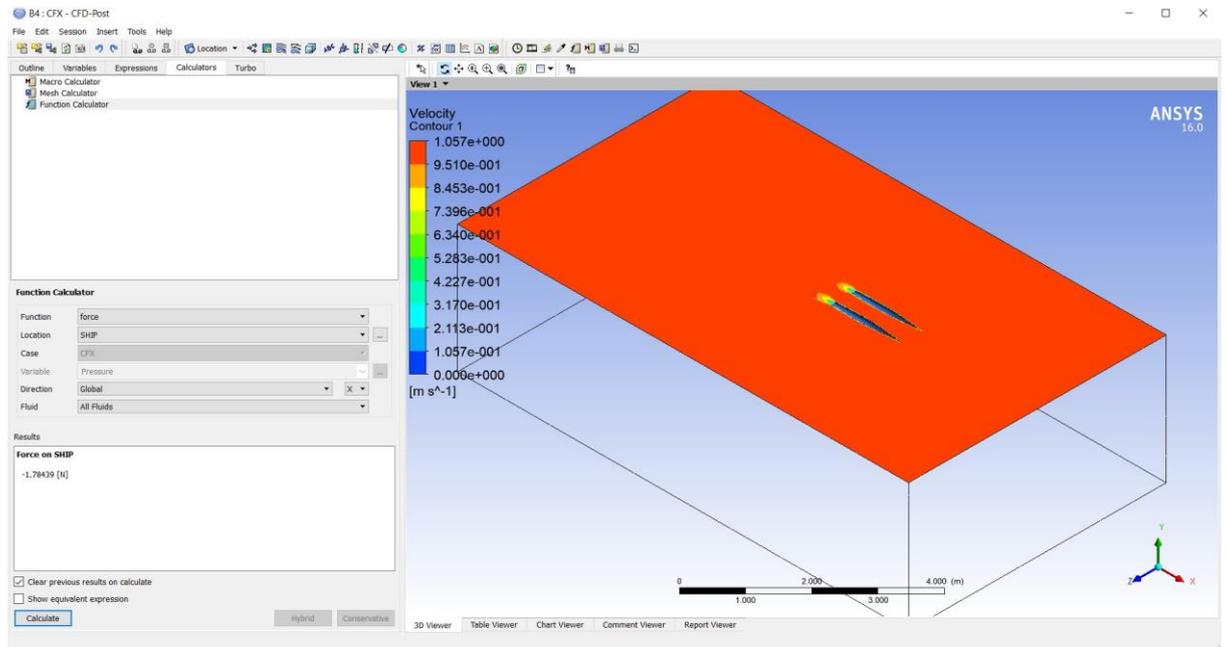


D. Model WV6

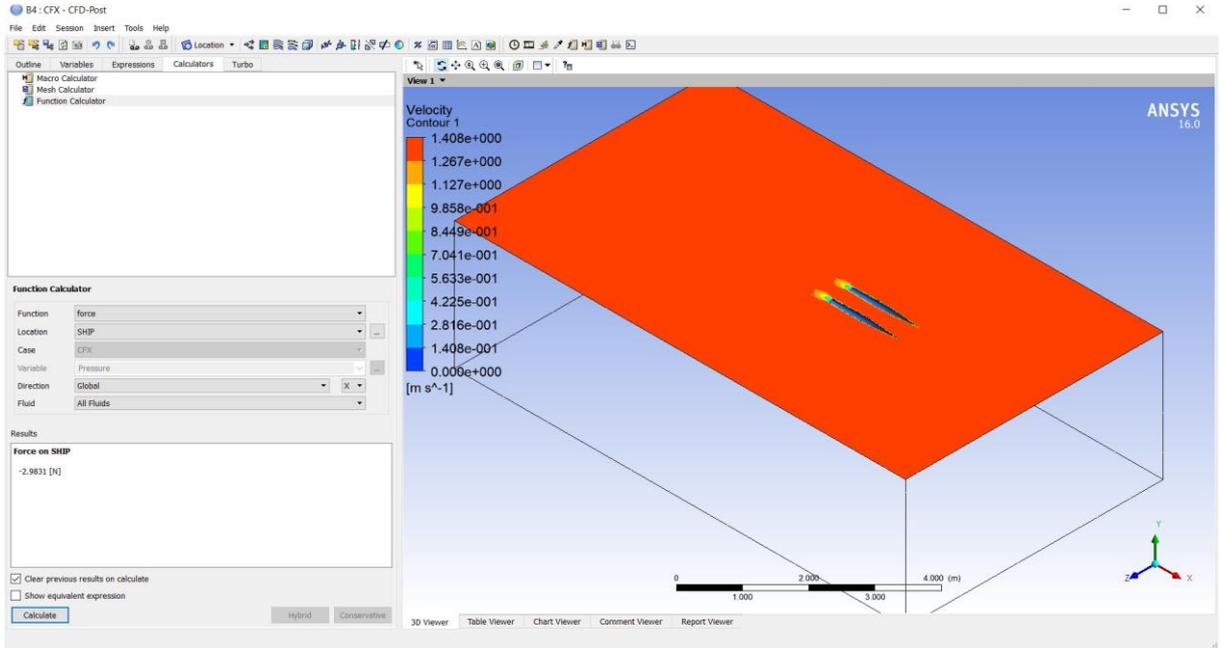
➤ Fr 0.19



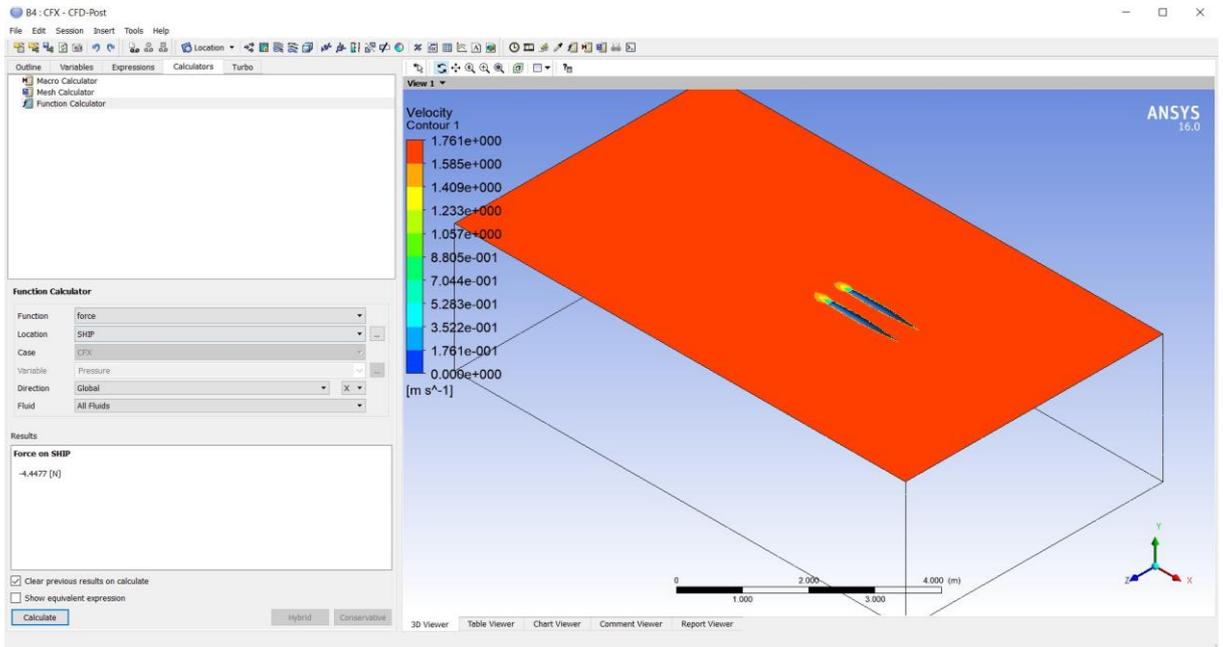
➤ Fr 0.28



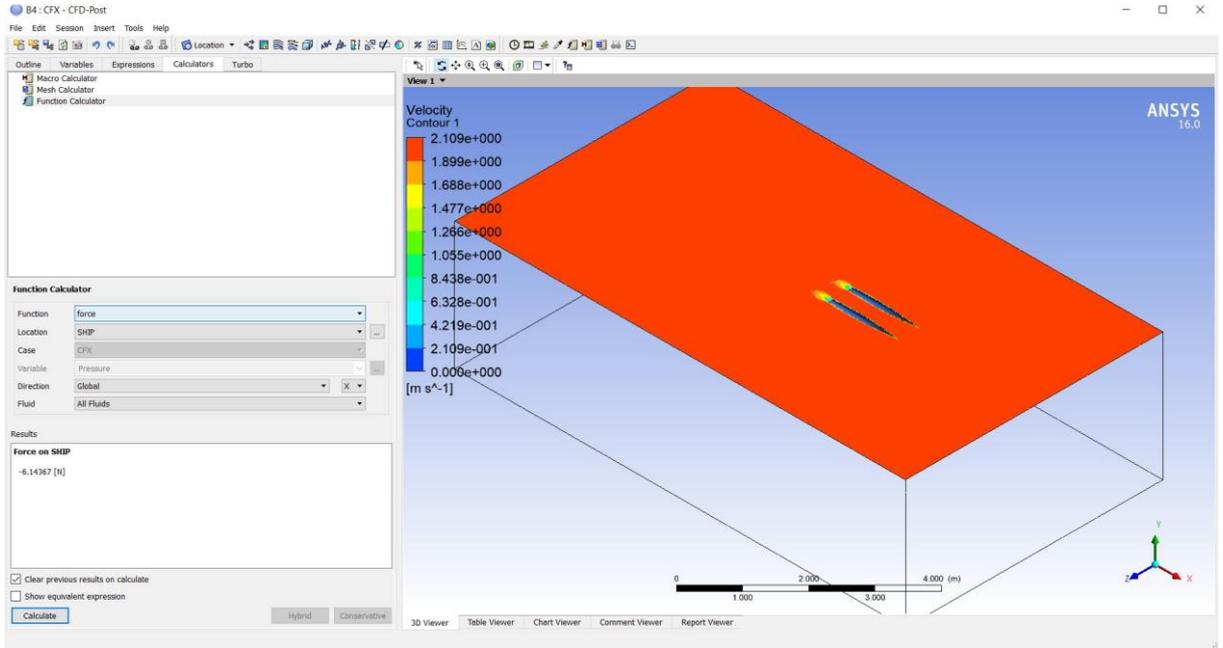
➤ Fr 0.37



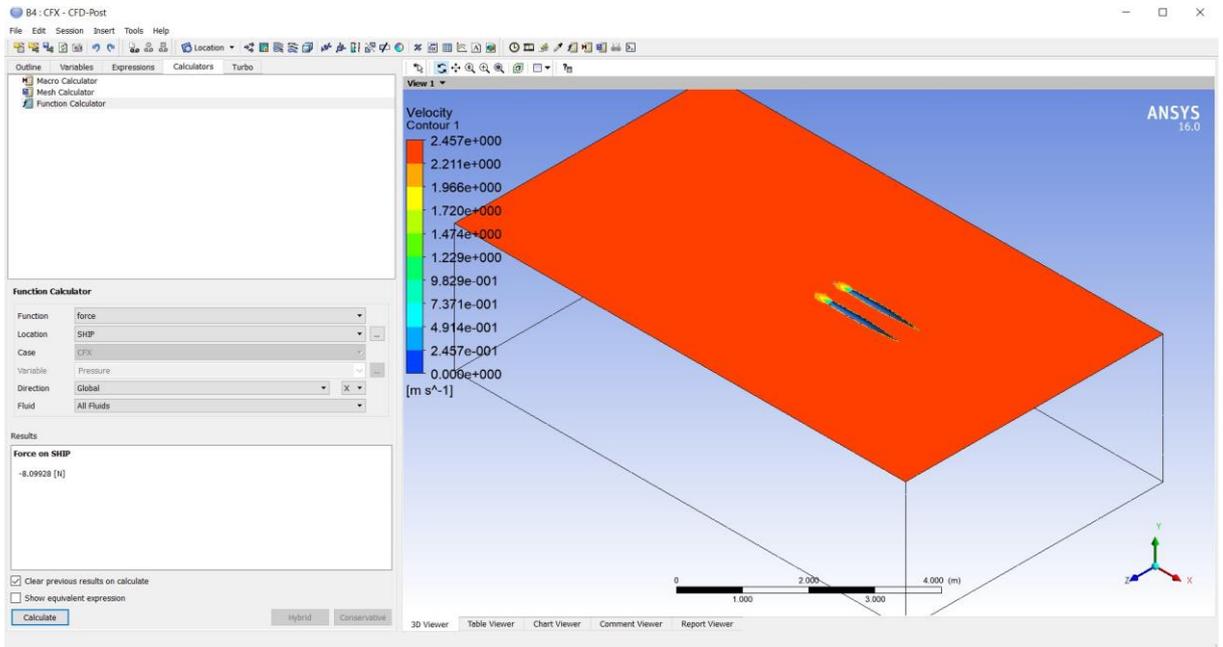
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56



➤ Fr 0.65



LAMPIRAN C
DISTRIBUSI KECEPATAN PADA *INNER HULL* DAN *OUTER HULL*

C.1 Data Distribusi Kecepatan Aliran Fluida Air pada Inner Hull

Pengambilan data distribusi kecepatan fluida air diambil pada simulasi 2 fluida. Data yang didapatkan yaitu *water velocity* berdasarkan *node* yang telah ditentukan.

➤ Fr 0.19

Node	Inner Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	0.663713	0.622722	0.625388	0.633300
0.2	0.665540	0.692317	0.687317	0.697614
0.4	0.671490	0.742748	0.745741	0.733766
0.6	0.658478	0.757889	0.760096	0.747864
0.8	0.636700	0.749454	0.750570	0.742475
1	0.631453	0.700191	0.704787	0.706538

➤ Fr 0.28

Node	Inner Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	1.00790	1.00280	1.00598	1.00863
0.2	1.02833	1.07547	1.06410	1.07747
0.4	1.03444	1.10467	1.10817	1.10613
0.6	1.02323	1.13105	1.11497	1.11452
0.8	0.97952	1.03963	1.04159	1.04001
1	0.96993	1.04232	1.04147	1.04426

➤ Fr 0.37

Node	Inner Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	1.34340	1.34905	1.34603	1.35477
0.2	1.38403	1.47575	1.46716	1.46628
0.4	1.41622	1.51619	1.50605	1.49644
0.6	1.36953	1.41760	1.40578	1.40445
0.8	1.29233	1.35932	1.35920	1.35990
1	1.30915	1.38137	1.37462	1.38200

➤ Fr 0.46

Node	Inner Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	1.74950	1.81771	1.81035	1.81770
0.2	1.81177	1.89851	1.88663	1.88134
0.4	1.77359	1.80500	1.79674	1.78914
0.6	1.66364	1.70482	1.69767	1.69707
0.8	1.62551	1.70235	1.70067	1.70677
1	1.65057	1.72259	1.71545	1.72273

➤ Fr 0.56

Node	Inner Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	2.17022	2.23934	2.23407	2.23713
0.2	2.14153	2.19848	2.18935	2.18160
0.4	2.02872	2.07914	2.06974	2.06265
0.6	1.95456	2.02077	2.01166	2.01193
0.8	1.96438	2.03492	2.03136	2.03784
1	2.00642	2.05335	2.04785	2.05488

➤ Fr 0.65

Node	Inner Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	2.51586	2.56420	2.55364	2.55081
0.2	2.45421	2.47295	2.46373	2.45537
0.4	2.36603	2.38421	2.37770	2.37407
0.6	2.32437	2.35765	2.35319	2.35610
0.8	2.33731	2.37741	2.37853	2.38566
1	2.35950	2.39270	2.39100	2.39862

C.2 Data Distribusi Kecepatan Aliran Fluida Air pada Outer Hull

Pengambilan data distribusi kecepatan fluida air diambil pada simulasi 2 fluida. Data yang didapatkan yaitu *water velocity* berdasarkan *node* yang telah ditentukan.

➤ Fr 0.19

Node	Outer Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	0.665865	0.699648	0.693531	0.697384
0.2	0.672597	0.709721	0.705947	0.712935
0.4	0.673938	0.715498	0.712856	0.714045
0.6	0.666663	0.706171	0.694879	0.697855
0.8	0.657475	0.700413	0.688909	0.693888
1	0.648858	0.676750	0.668475	0.671197

➤ Fr 0.28

Node	Outer Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	1.00774	1.03811	1.03586	1.03470
0.2	1.02089	1.06336	1.05358	1.05854
0.4	1.02434	1.06419	1.06263	1.05863
0.6	1.01491	1.06662	1.05189	1.05591
0.8	0.995806	1.02709	1.01859	1.02154
1	0.986778	1.02256	1.01414	1.01726

➤ Fr 0.37

Node	Outer Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	1.34859	1.38094	1.37493	1.37385
0.2	1.37157	1.43423	1.4266	1.42702
0.4	1.38437	1.43633	1.43115	1.42835
0.6	1.36461	1.39323	1.37982	1.38249
0.8	1.31799	1.35947	1.35473	1.35347
1	1.32454	1.36511	1.35916	1.36162

➤ Fr 0.46

Node	Outer Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	1.73183	1.79124	1.78463	1.78246
0.2	1.75729	1.80235	1.79545	1.79746
0.4	1.74054	1.75776	1.75134	1.74964
0.6	1.68564	1.71078	1.70198	1.70170
0.8	1.65523	1.70517	1.70177	1.70067
1	1.66499	1.71186	1.70687	1.70796

➤ Fr 0.56

Node	Outter Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	2.10729	2.16105	2.15421	2.15450
0.2	2.08880	2.12922	2.12095	2.12075
0.4	2.03265	2.07152	2.06469	2.05884
0.6	1.98906	2.03306	2.02586	2.02220
0.8	1.99075	2.03458	2.03256	2.03130
1	2.01621	2.04225	2.03920	2.04152

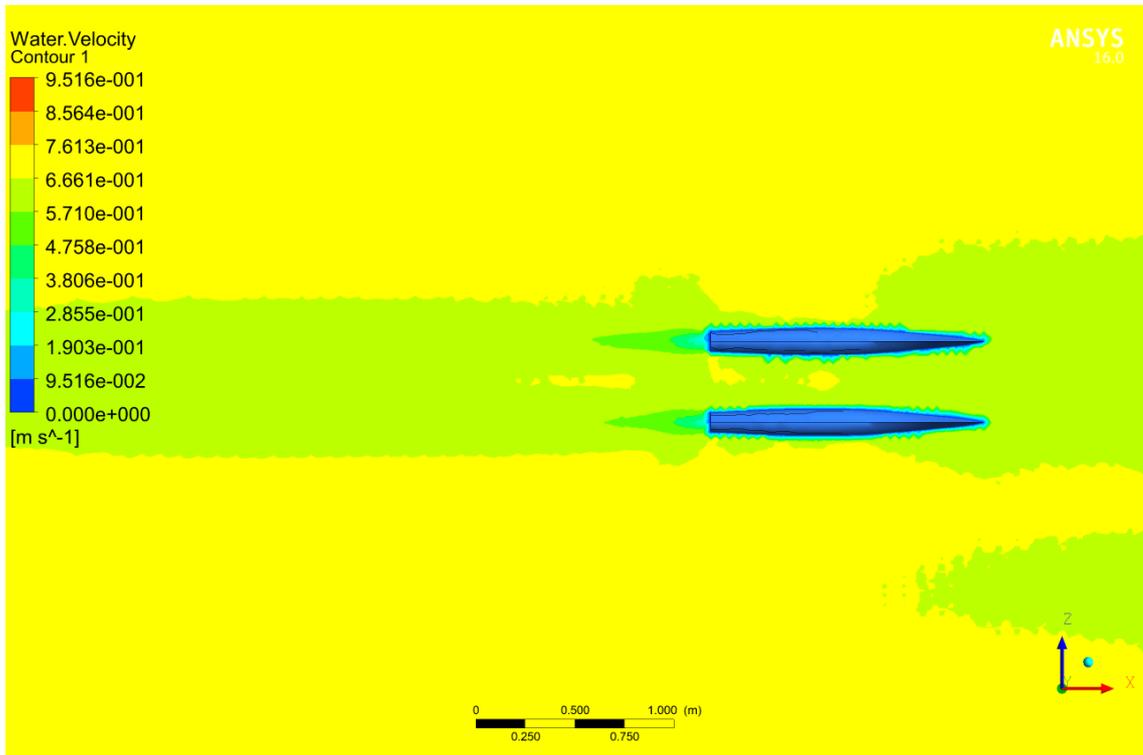
➤ Fr 0.65

Node	Outter Hull			
	NWV	WV2	WV4	WV6
0	2.44785	2.47620	2.46775	2.46344
0.2	2.42195	2.43275	2.42639	2.42383
0.4	2.37913	2.38421	2.38153	2.37774
0.6	2.35516	2.36723	2.36461	2.36518
0.8	2.35879	2.37830	2.37826	2.38069
1	2.36933	2.38776	2.38609	2.39022

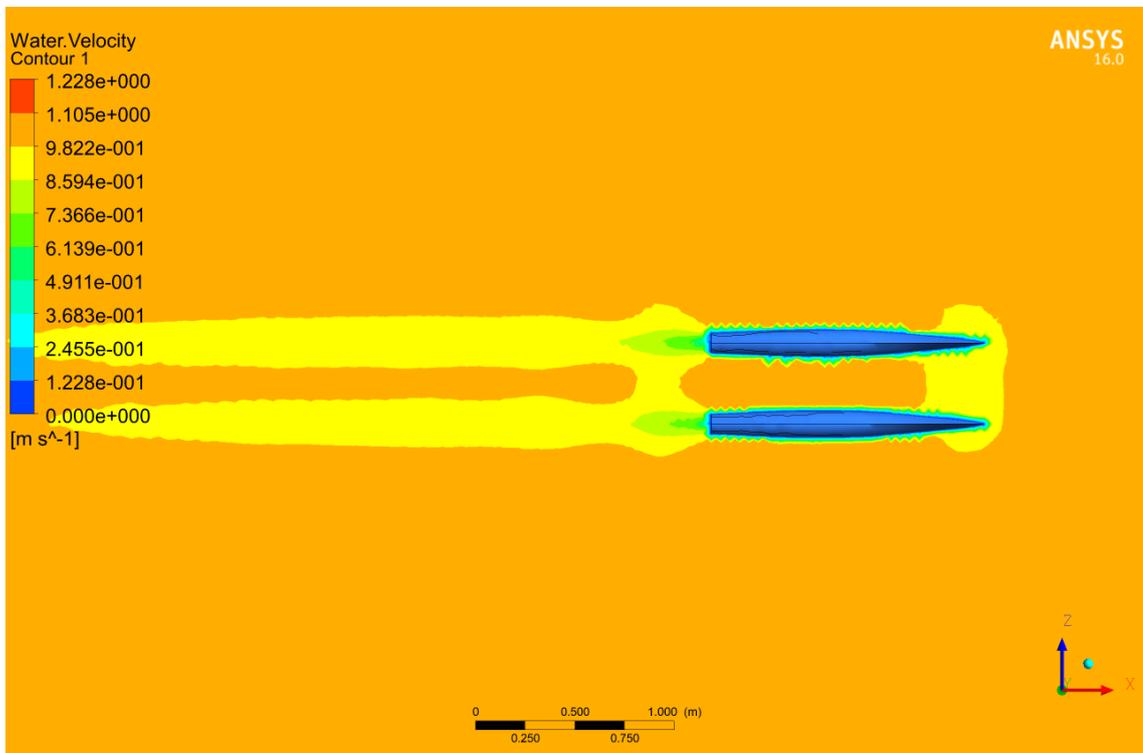
LAMPIRAN D
VISUALISASI DISTRIBUSI KECEPATAN

A. Model NWV

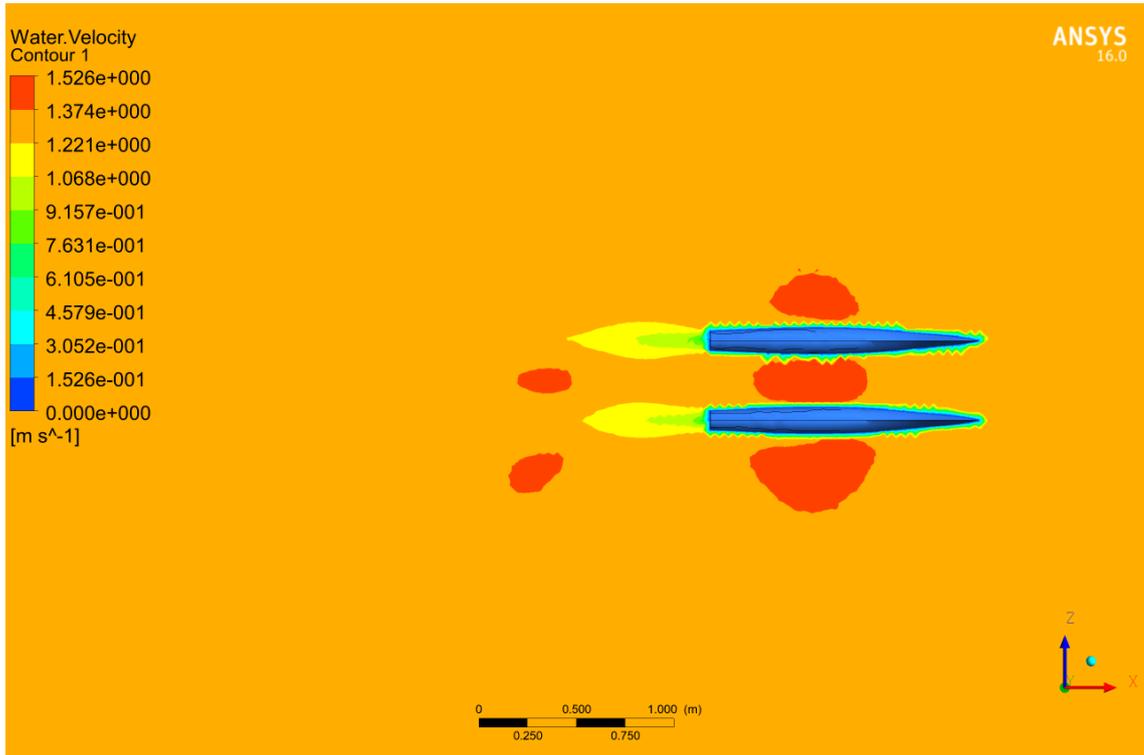
➤ Fr 0.19



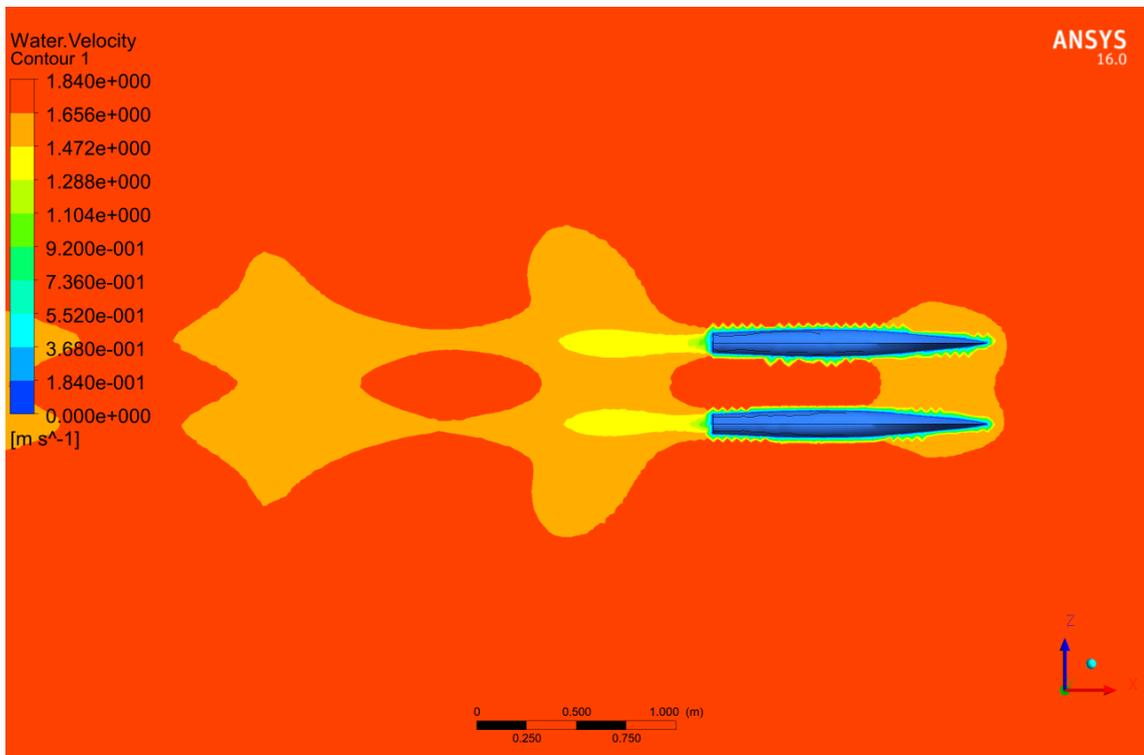
➤ Fr 0.28



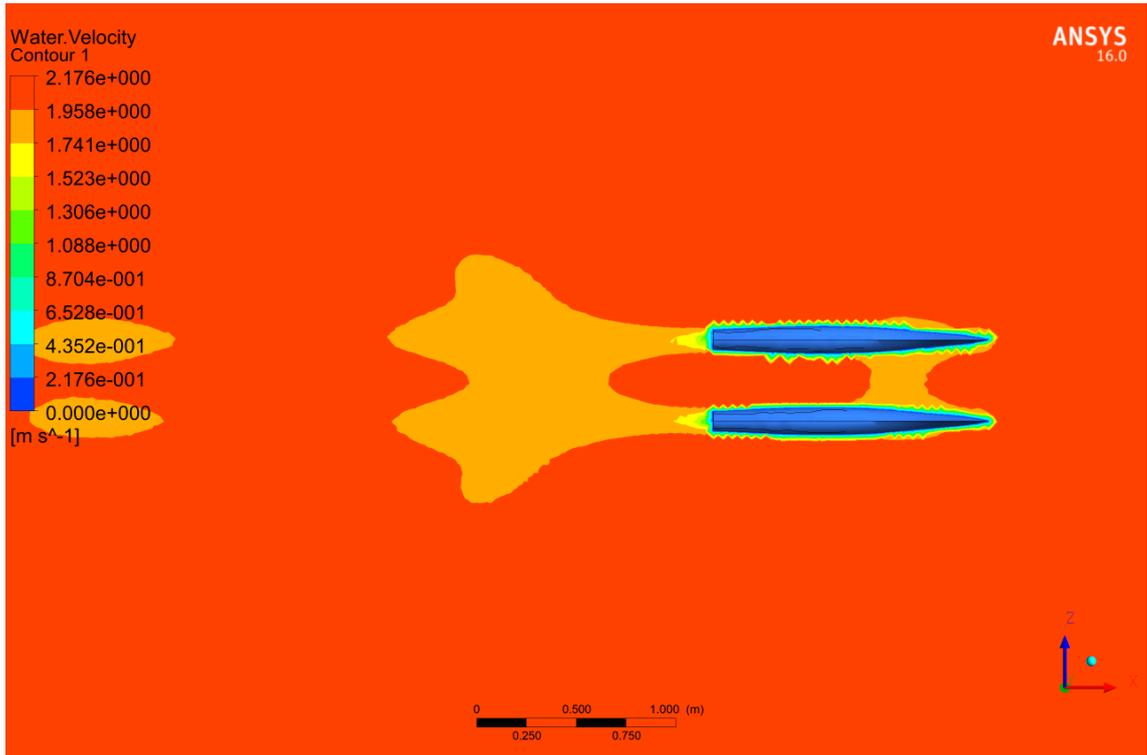
➤ Fr 0.37



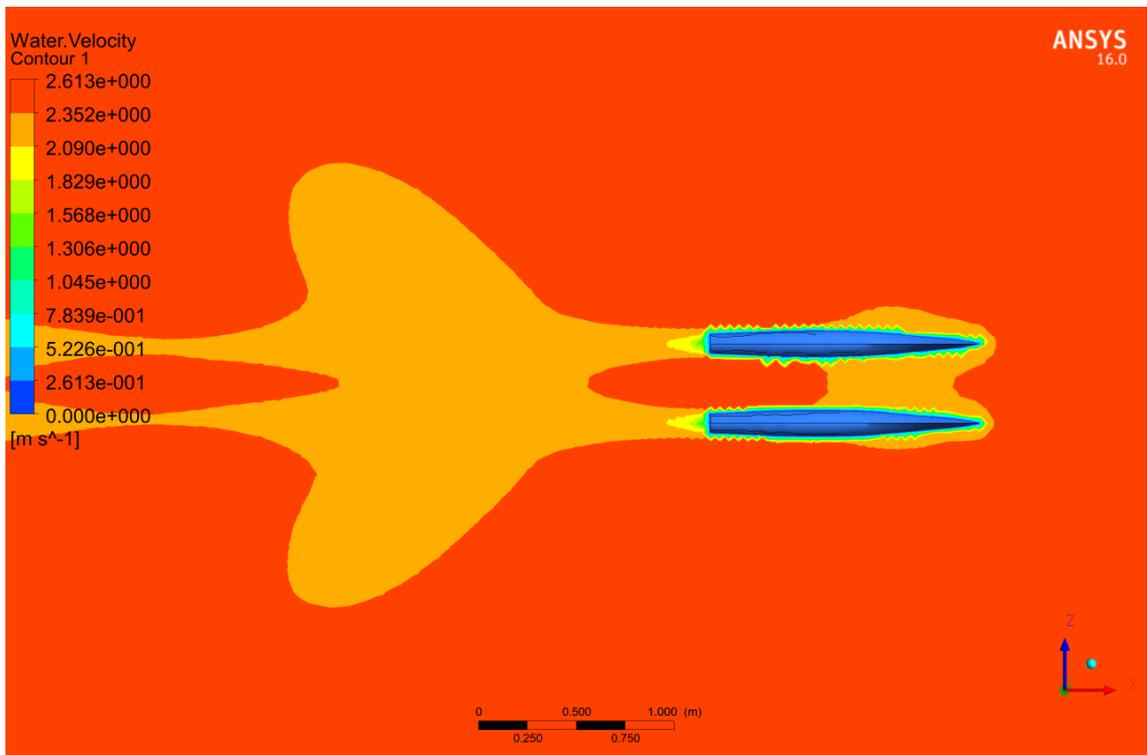
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

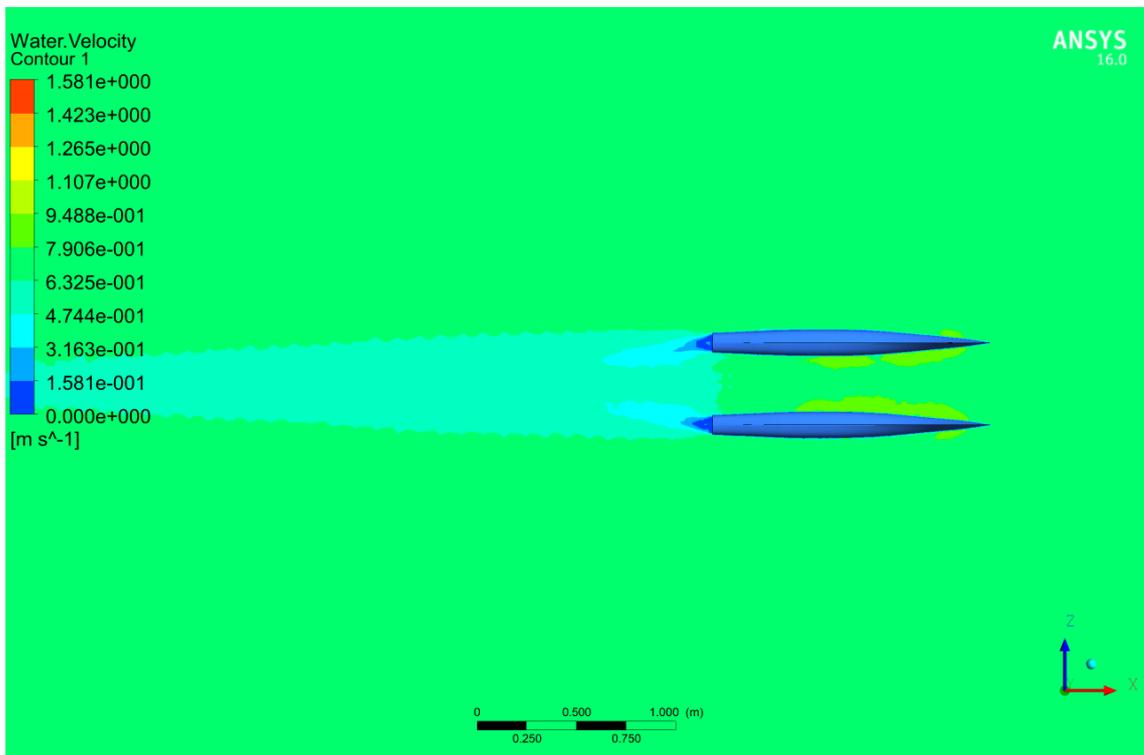


➤ Fr 0.65

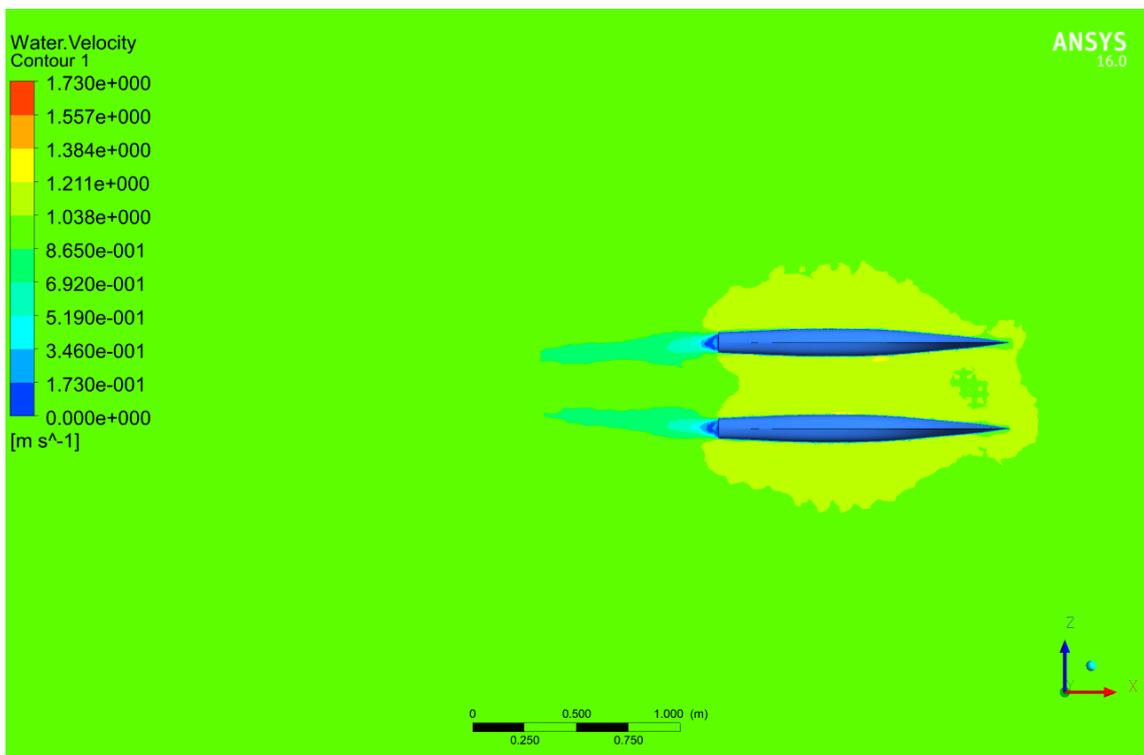


B. Model WV2

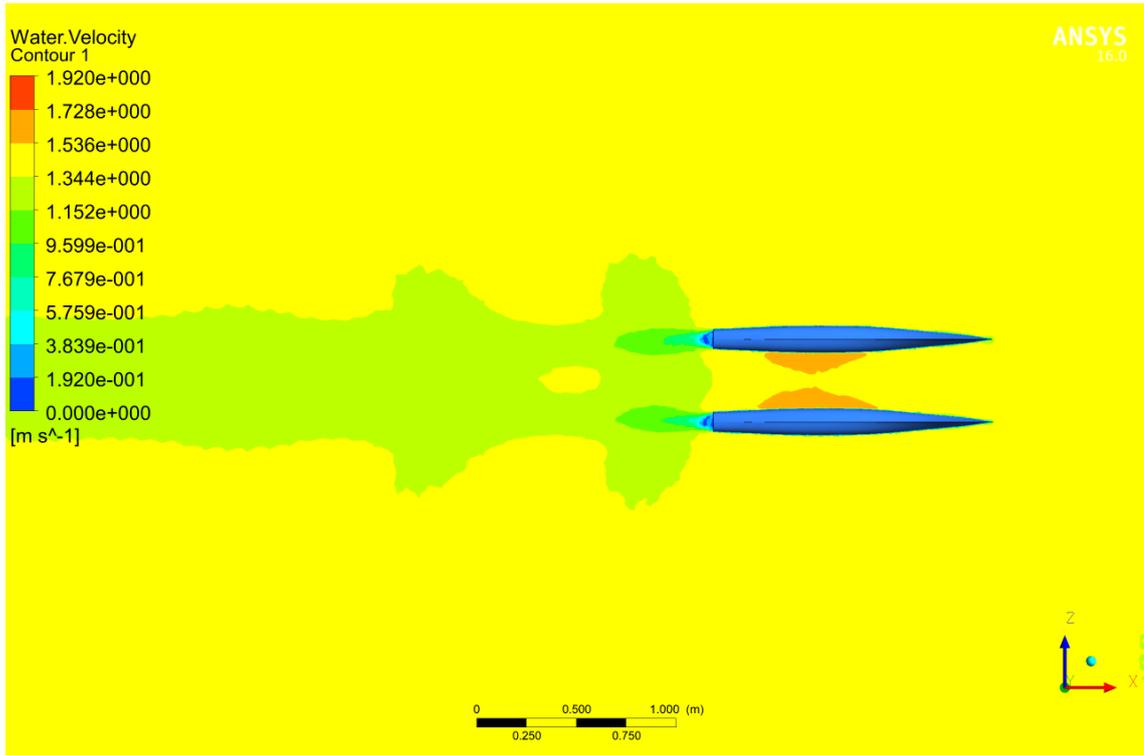
➤ Fr 0.19



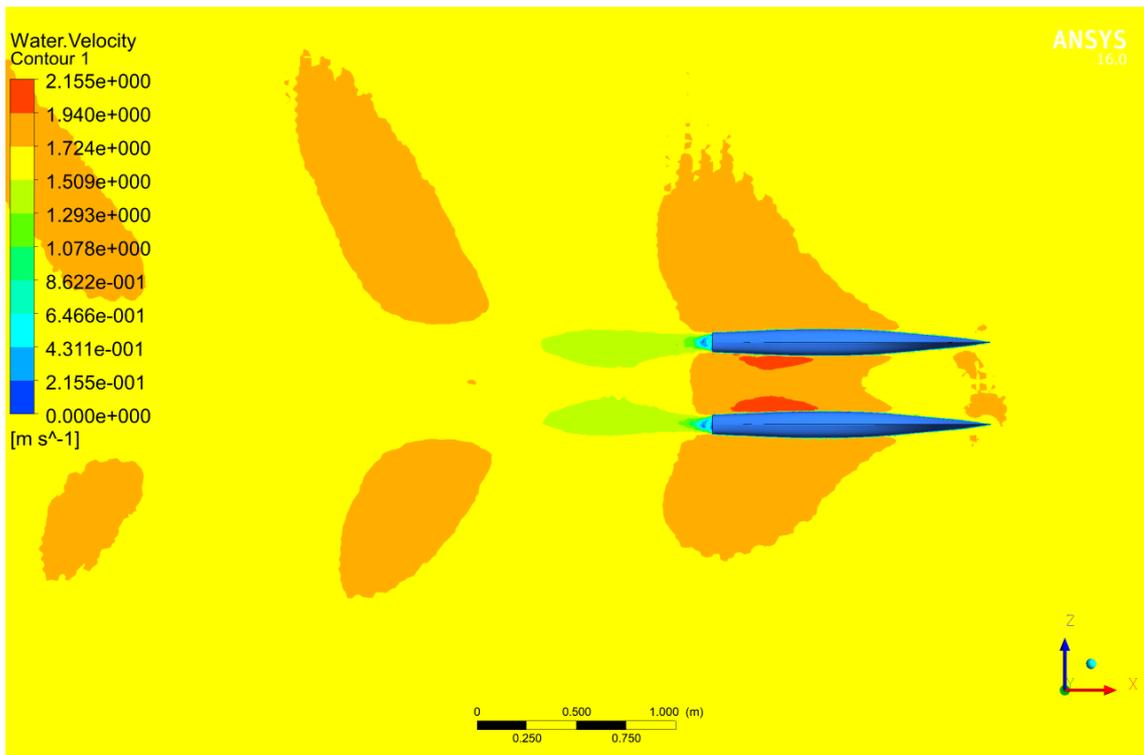
➤ Fr 0.28



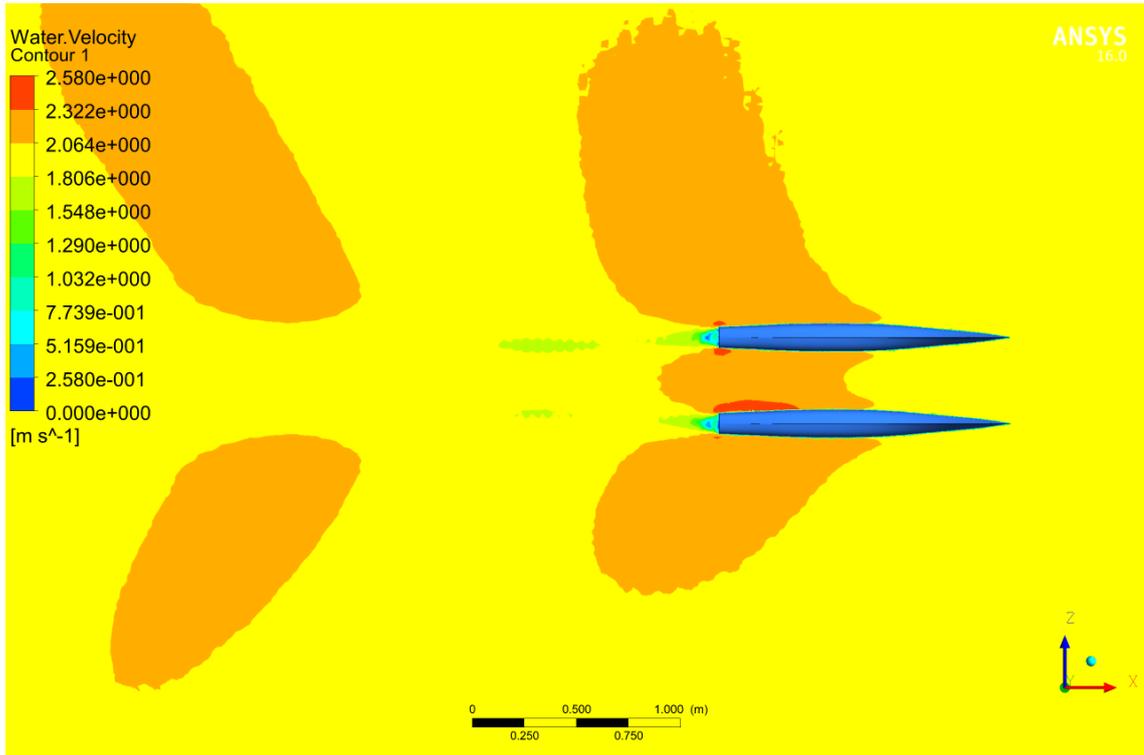
➤ Fr 0.37



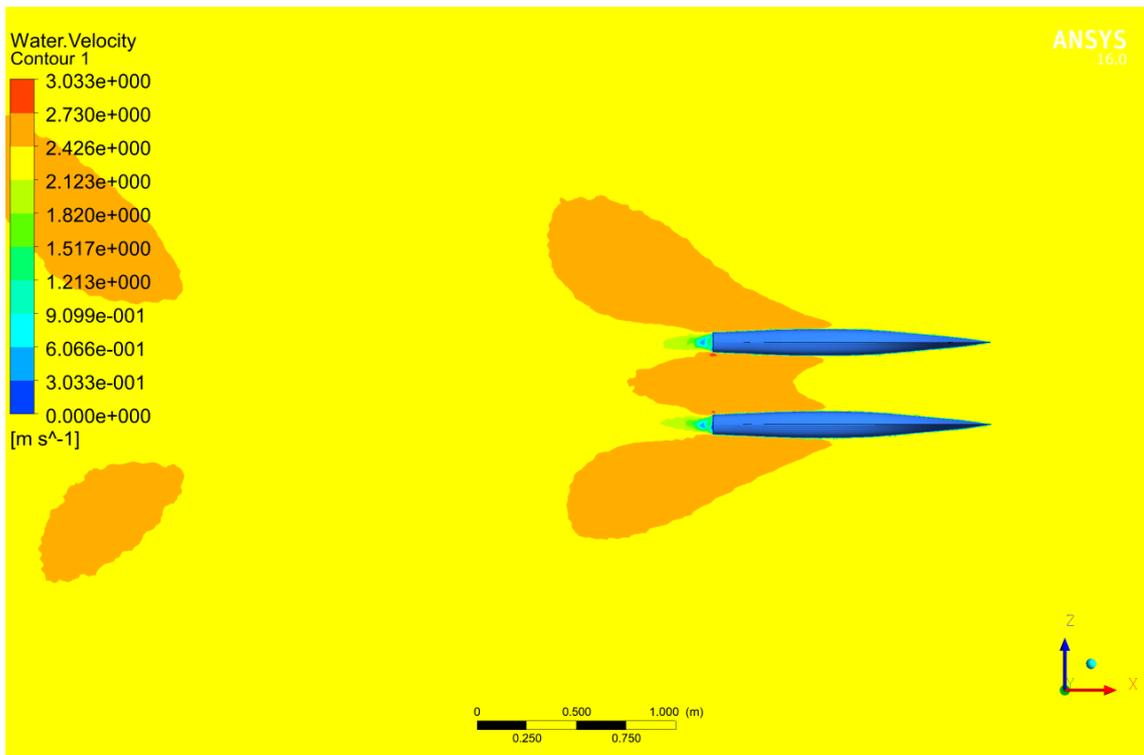
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

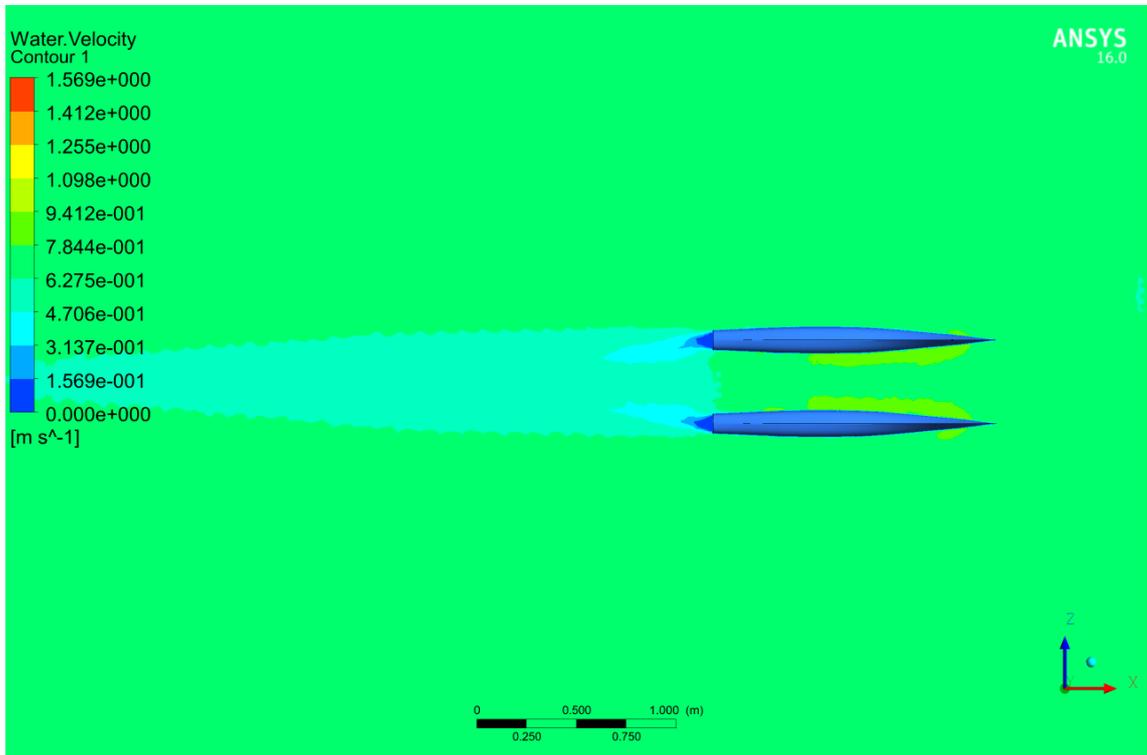


➤ Fr 0.65

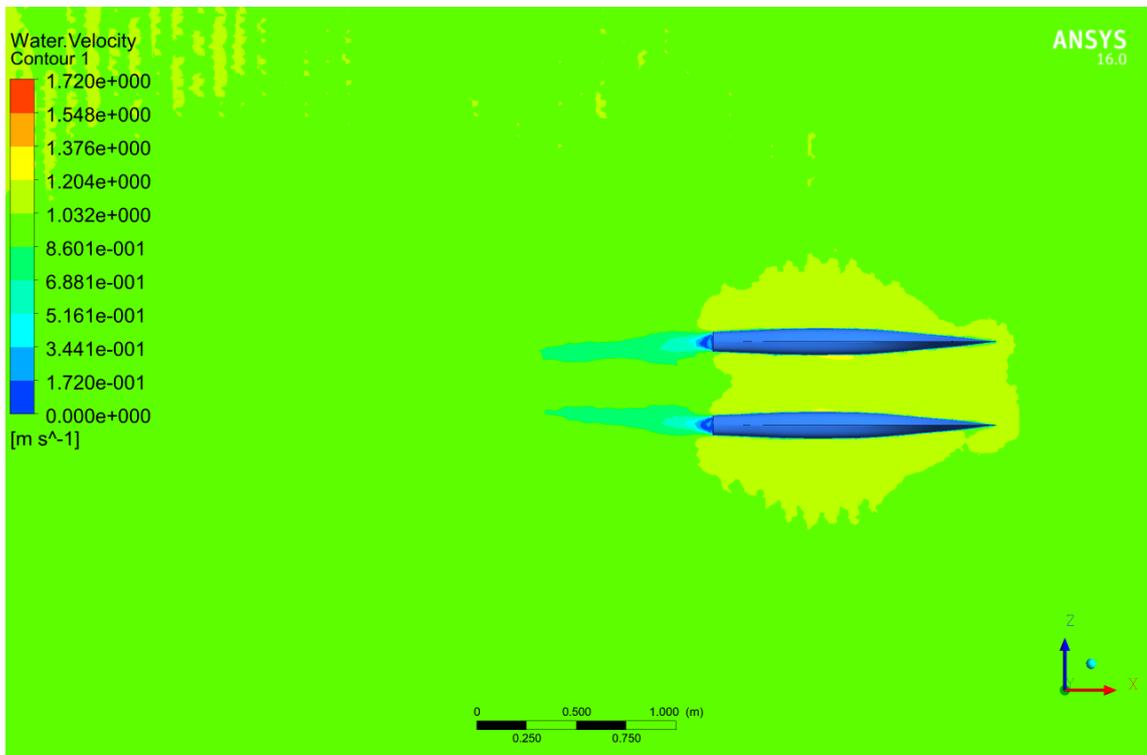


C. Model WV4

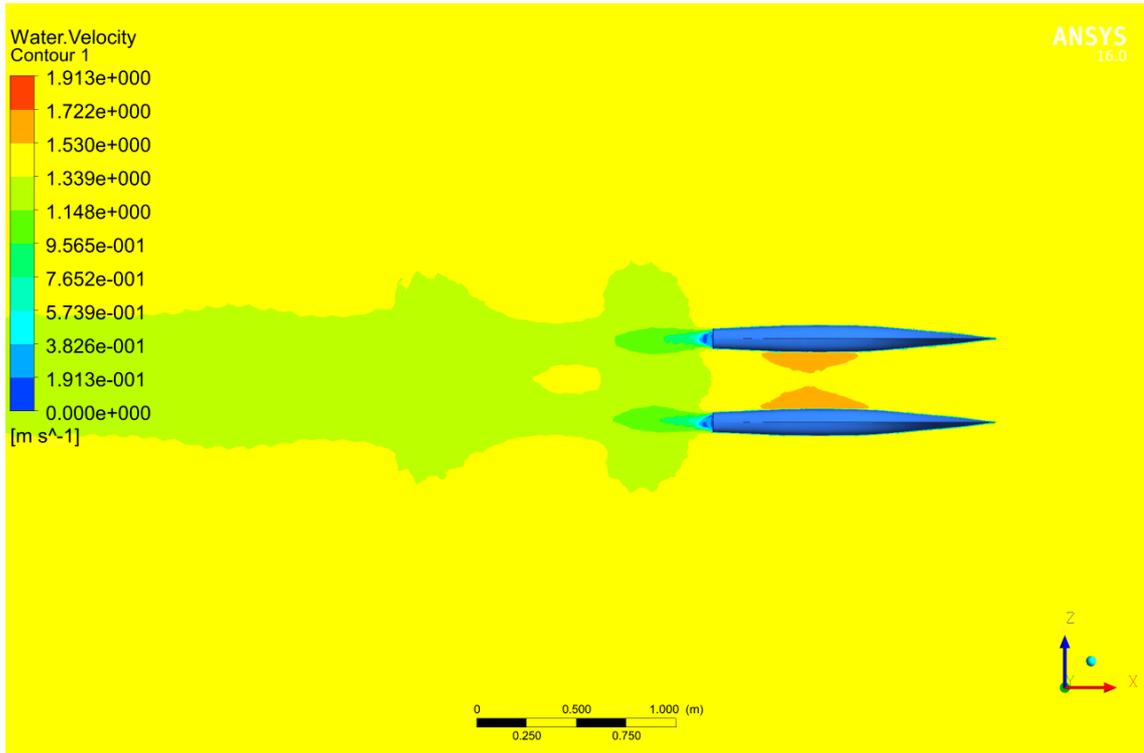
➤ Fr 0.19



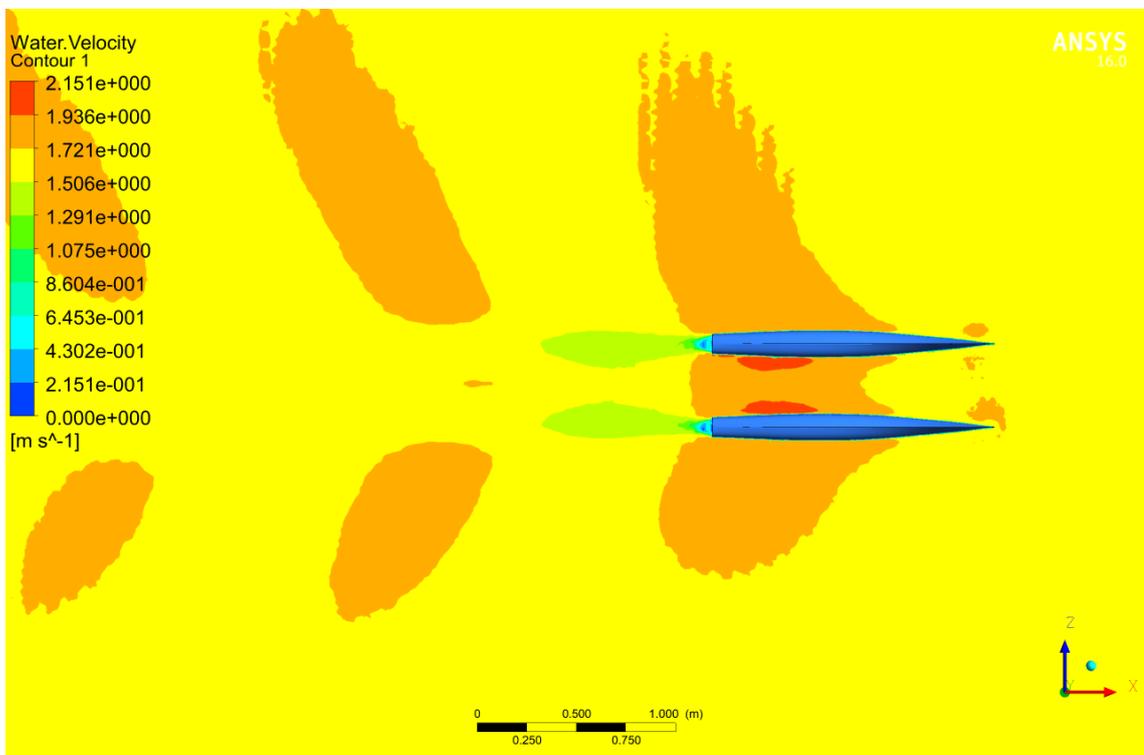
➤ Fr 0.28



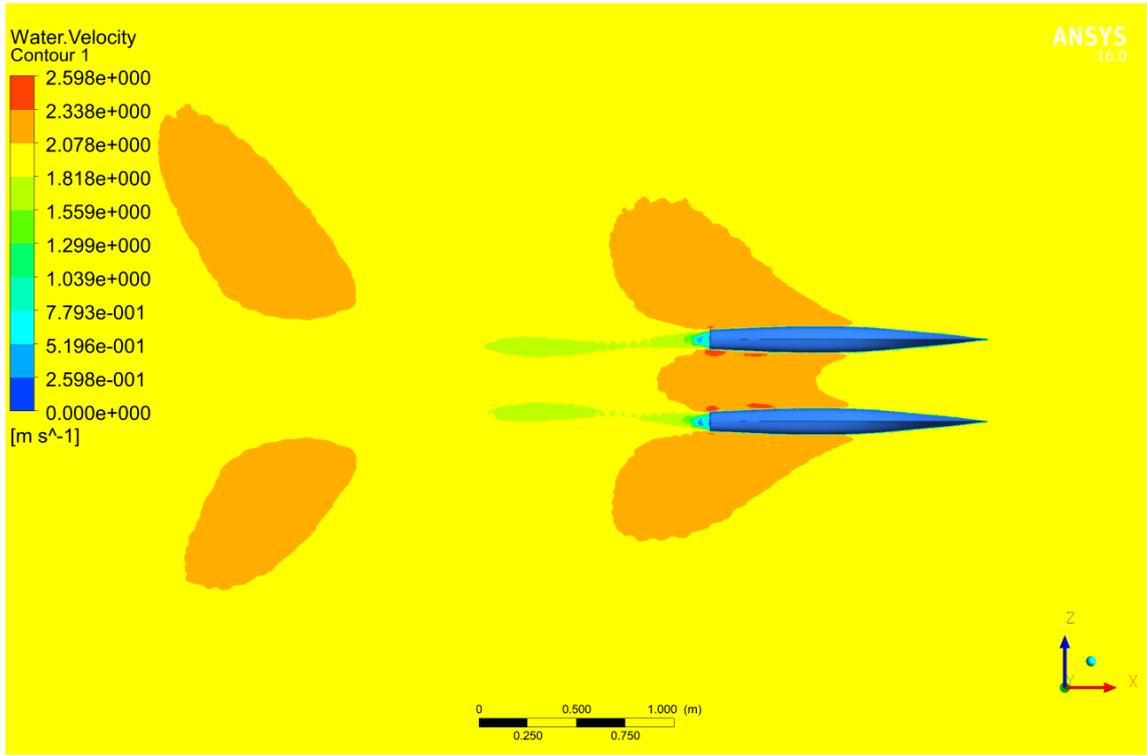
➤ Fr 0.37



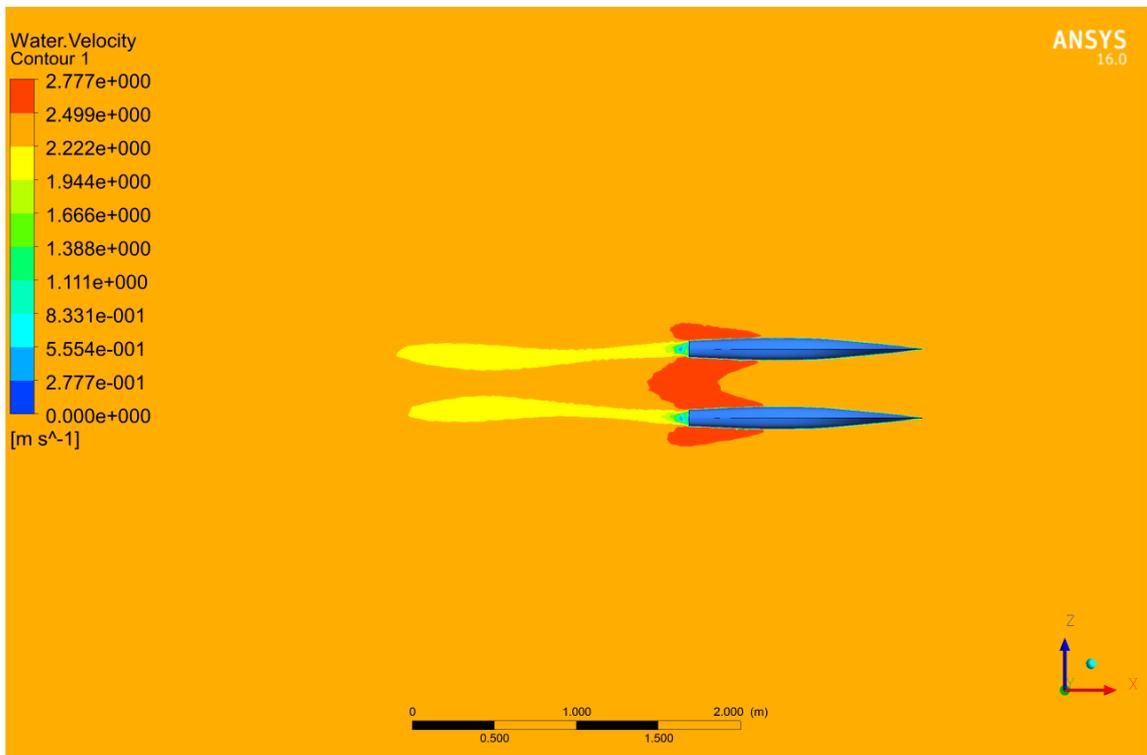
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56

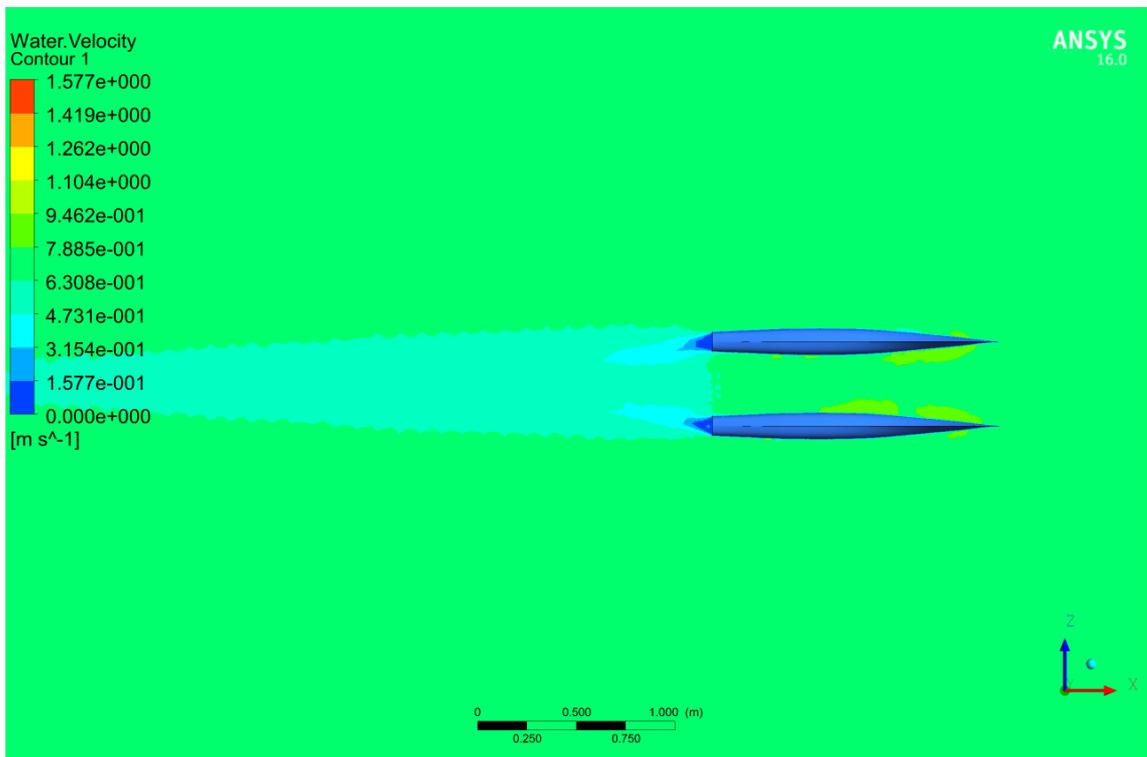


➤ Fr 0.65

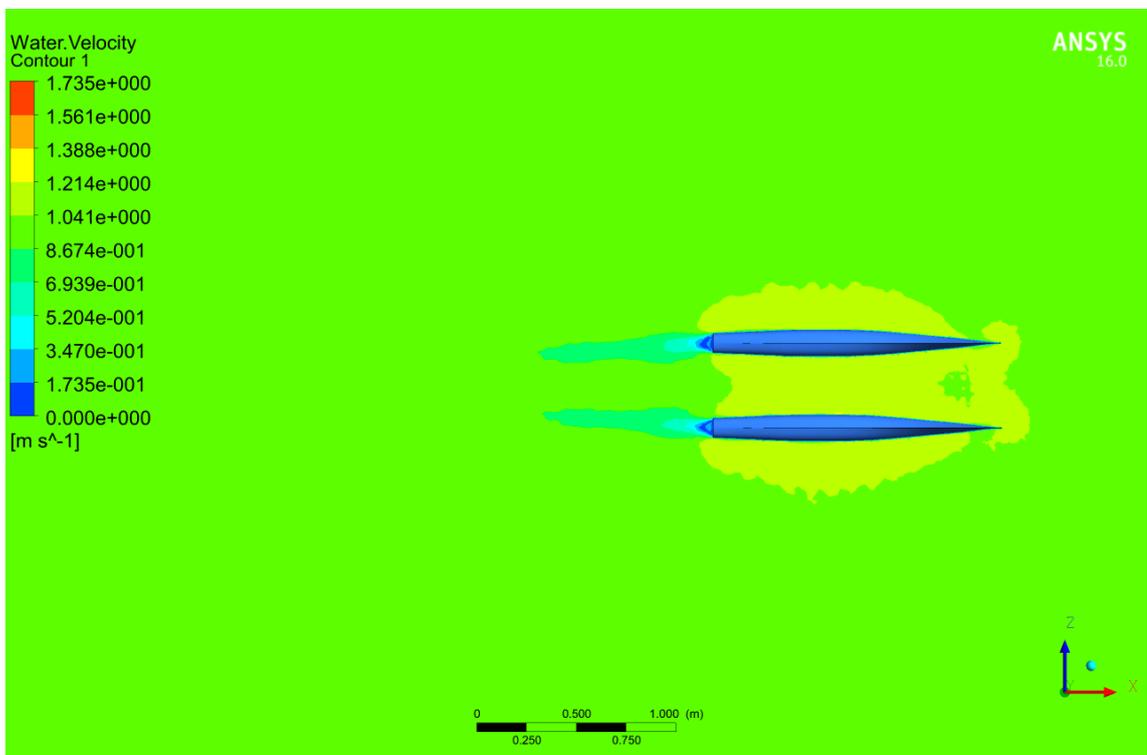


D. Model WV6

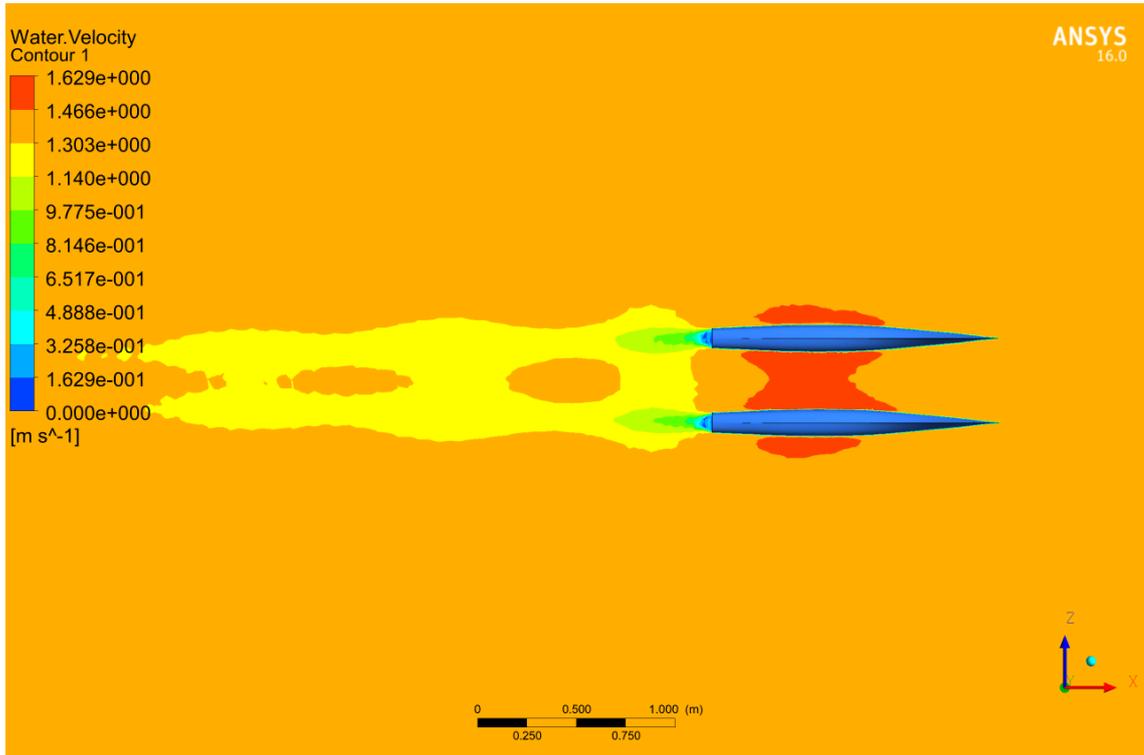
➤ Fr 0.19



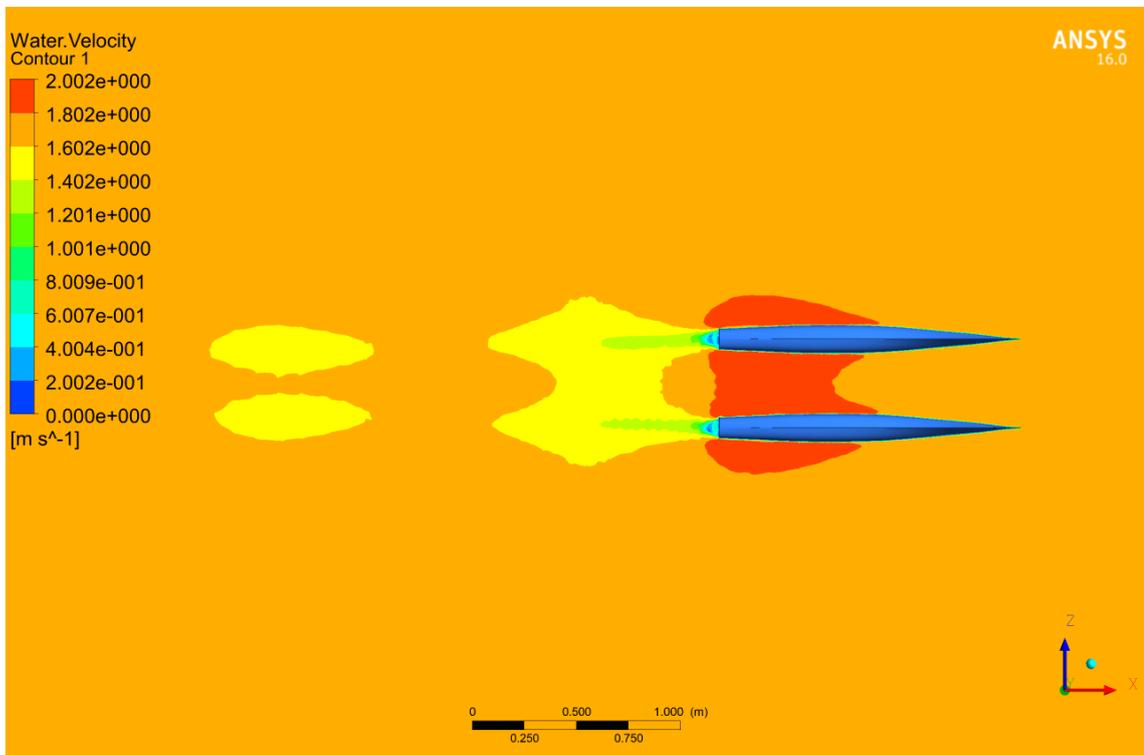
➤ Fr 0.28



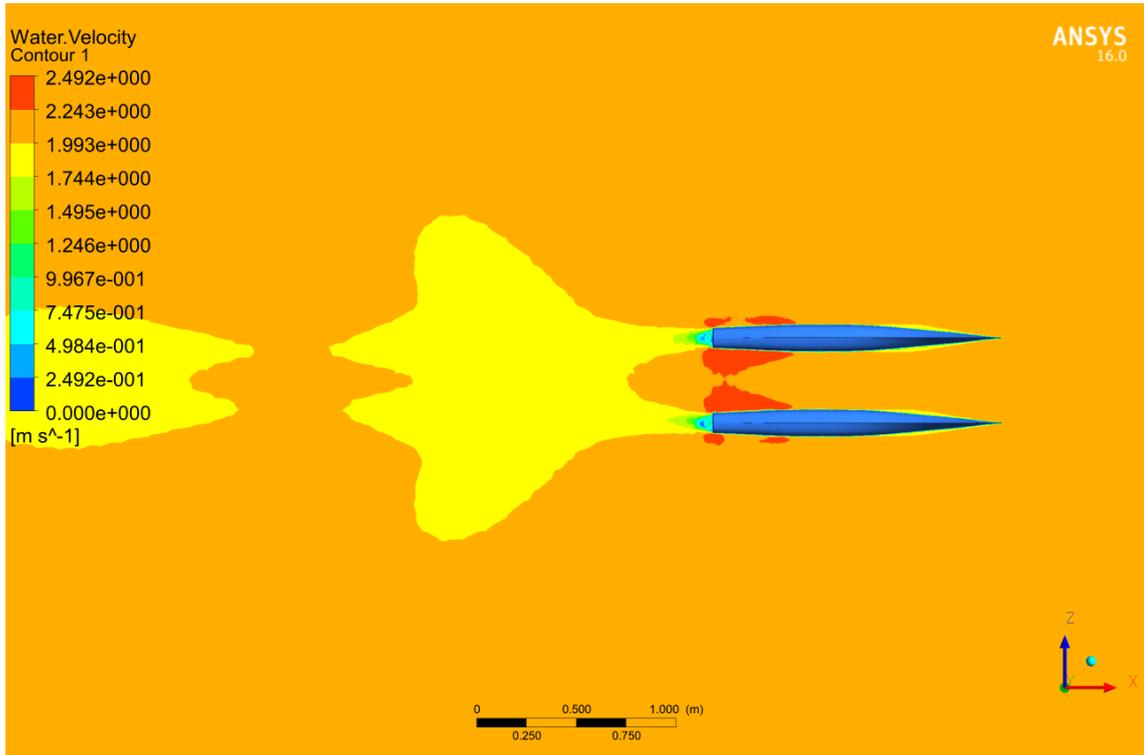
➤ Fr 0.37



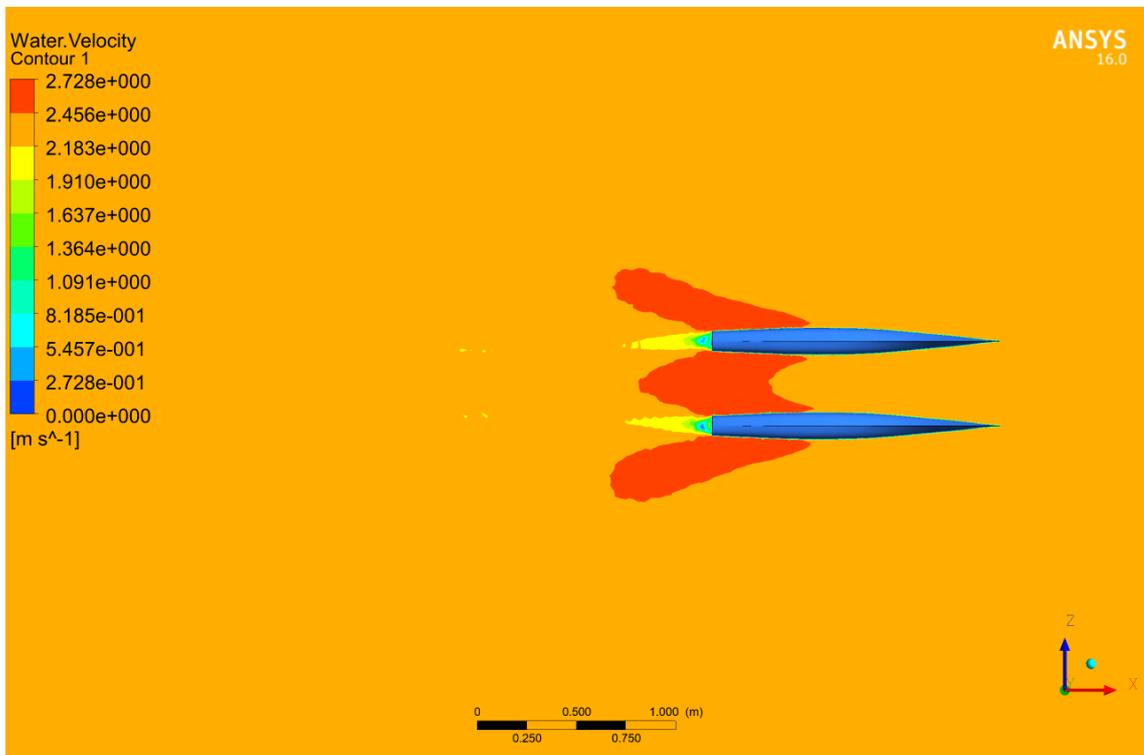
➤ Fr 0.46



➤ Fr 0.56



➤ Fr 0.65



BIODATA PENULIS



Abdul Hakim Lillah, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Bangkalan pada 8 November 1995 silam, Penulis merupakan anak kedua dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK tunas Mekar, kemudian melanjutkan ke SDN Mlajah 2, SMPN 2 Bangkalan dan SMAN 3 Pamekasan. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2014 melalui jalur SBMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi *staff* Departemen Riset dan Teknologi Himatekpal ITS 2015/2016, selanjutnya menjadi Kepala Departemen Riset dan Teknologi Himatekpal 2016/2017. Selain itu, Penulis juga pernah menjadi peserta dalam lomba HYDROCONTEST 2017.

Penulis tercatat pernah menjadi *grader* untuk mata kuliah Menggambar Teknik dan Getaran Kapal.

Email: hakim14@mhs.na.its.ac.id/hqq.hakim@gmail.com