



TESIS - MN185401

STUDI EKSPERIMENTAL DAN NUMERIK PENGARUH PENGUNAAN FOIL PADA KAPAL KATAMARAN TERHADAP HAMBATAN KAPAL

AHMAD FIRDHAUS
04111750032003

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc
NIP. 196912312006041178

Program Magister
Teknik Produksi Dan Material Kelautan
Program Studi Pascasarjana Teknologi Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TESIS - MN142532

STUDI EKSPERIMENTAL DAN NUMERIK PENGARUH PENGUNAAN FOIL PADA KAPAL KATAMARAN TERHADAP HAMBATAN KAPAL

AHMAD FIRDHAUS

04111750032003

DOSEN PEMBIMBING

Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc

NIP. 196912312006041178

Program magister

Teknik produksi dan material kelautan

Program studi teknologi kelautan

Fakultas teknologi kelautan

Institut teknologi sepuluh nopember

Surabaya

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

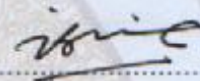
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh:

AHMAD FIRDHAUS
NRP: 04111750032003

Tanggal Ujian: 16 Januari 2020
Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:
Pembimbing:

Dr. Ir. I Ketut Suastika M.Sc
NIP. 19691231 200604 1 178

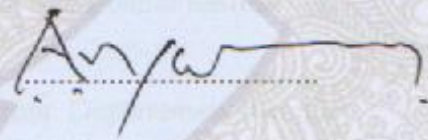


Penguji:

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



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



Kepala Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat kepada Allah SWT. Shalawat serta salam semoga selalu tercurah pada junjungan Nabi besar Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabatnya, yang telah menjadi suri tauladan sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Penggunaan Foil pada Kapal Katamaran terhadap Hambatan Kapal”. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikannya. Oleh karena itu, dengan rasa tulus penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan segalanya kapanpun, dimanapun dan dalam keadaan apapun serta yang selalu menyayangi salah satu hamba-Nya ini, penulis.
2. Bapak Kiryanto dan Ibu Sawitri selaku orang tua tercinta, yang dengan sabarnya, sayangnya, gigihnya selalu memberikan yang terbaik dalam hal apapun kepada anaknya ini. Sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
3. Mas Adhi dan Mbak Sinta selaku kakak yang telah membantu dalam banyak hal sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Keluarga besarku yang dengan tulus dan sabarnya telah memberikan bimbingan, doa dan perhatiannya kepada penulis sejak masa balita sampai saat ini.
5. Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph. D selaku ketua Departemen Teknik Perkapalan FTK-ITS yang sudah banyak membantu penulis sebagai mahasiswa dalam perkuliahan.
6. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir dan sekaligus ketua program studi pascasarjana teknik perkapalan ITS yang telah meluangkan banyak waktu dan ilmu, serta memberikan arahan dan masukan selama pengerjaan Tesis maupun dalam masa perkuliahan.
7. Prof. I Ketut Pria Utama, M.Sc, Ph.D, ceng, FRINA selaku kepala laboratorium hidrodinamika beserta staf Pak Langgeng Condro dan Pak Rudie

Sebastian yang telah banyak membantu dalam proses pengujian hambatan di Laboratorium Hidrodinamika ITS.

8. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen beserta staf dan karyawan di Departemen Teknik Perkapalan, FTK-ITS yang telah memberikan ilmu dan bantuak kepada penulis selama masa perkuliahan
9. Teman-teman pascasarjana tahun ajaran 2018-2019 yang telah banyak membantu dalam proses perkuliahaan dan pengerjaan penelitian ini kepada penulis
10. Teman SMA ku Aufiena Nur Ayu Merzistya
11. Temanku Raudi, Alvian, Fathin, Nugo, Luqman, Fathin, Lazu, dan Titod yang selalu memberikan motivasi, nasihat, dan bantuan kepada penulis, serta
12. Semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Tesis ini.

Penulis berharap dapat memberikan manfaat bagi para pembaca, dan penulis menyadari bahwa dalam pelaksanaan dan penyusunan Tesis ini masih jauh dari kata sempurna, untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran untuk kesempurnaan pada riset yang akan datang. Akhir kata, penulis mohon maaf apabila terdapat penulisan kata yang salah dan kurang berkenan untuk para pembaca. Terima kasih.

Surabaya, 6 Januari 2020

Ahmad Firdhaus

Studi Eksperimental Dan Numerik Pengaruh Penggunaan Foil Pada Kapal Katamaran Terhadap Hambatan Kapal

Nama Mahasiswa : Ahmad Firdhaus
NRP : 04111750032003
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc

ABSTRAK

Penggunaan *hydrofoil* pada kapal katamaran dapat mengurangi hambatan yang dihasilkan oleh kapal pada kondisi tertentu. Pengurangan hambatan kapal terjadi karena gaya angkat yang menangkat lambung kapal di atas permukaan air sehingga mengurangi area permukaan basah kapal. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh penambahan foil pada lambung kapal katamaran terhadap hambatan total kapal menggunakan pendekatan CFD dan eksperimen. Pada penelitian ini menggunakan objek kapal katamaran dengan panjang 44 meter dengan 2 variasi *hydrofoil*: 1 foil yang diletakan pada bagian haluan, dan 2 foil (1 foil pada bagian haluan dan 1 foil pada bagian buritan). *Hydrofoil* yang digunakan adalah foil NACA 64₁-212 dengan aspek rasio 16.34. hasil peneltian menunjukkan bahwa ada peningkatan hambatan total kapal. pada kecepatan dinas ($Fr = 0.7$) nilai hambatan total kapal katamaran tanpa foil adalah 114.59 kN. Terjadi peningkatan hambatan kapl katamaran dengan 1 foil dan 2 foil masing-masing 31% dan 59% lebih tinggi daripada kapal katamaran tanpa foil

Kata Kunci: Katamaran, CFD, *Hydrofoil*, Hambatan Kapal, *Towing-tank* Test

Halaman ini sengaja dikosongkan

Experimental and Numerical Study of Effects of the Application of Hydrofoil on Catamaran Ship Resistance

Name : Ahmad Firdhaus
NRP : 04111750032003
Supervisor : Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc

ABSTRACT

The use of hydrofoil on a catamaran can reduce the resistance produced by the ship at a certain condition. This occurs because of the lifting force that lifts the ship's hull above the waterline so that it reduces the wetted surface area. This research aims to study the effect of adding foil in the hull of a catamaran on the total resistance of the ship using experimental and numerical CFD methods. A 44m catamaran was considered with two variations of hydrofoil: 1 foil on bow section, and 2 foil (1 on bow section and 1 on the stern section). The hydrofoil is rectangular NACA 64₁-212 section with aspect ratio of 16.34. the results indicate that there is increasing in ship resistance instead of decreasing it on the catamaran with foil. At service speed ($Fr = 0.7$) total resistance value occurs in case 0 as the existing catamaran without foil is 114.59 kN, catamaran with 1 added foil on the bow section and catamaran with 2 added foil on both bow and stern section is respectively 31% and 59% higher than the catamaran without foil.

Keywords: Catamaran, CFD, Hydrofoil, Resistance, Towing-tank Test

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	VI
ABSTRAK	VIII
ABSTRACT	X
DAFTAR ISI	XII
DAFTAR GAMBAR	XVI
DAFTAR TABEL	XXII
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
1.6. Hipotesa	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1. <i>Hysucat/ Hysuwac</i>	5
2.2. Bentuk Lambung <i>Hysucat/ Hysuwac</i>	10
2.3. <i>Hydrofoil</i>	13
2.4 <i>Lift</i> dan <i>Drag</i>	15
2.5. Hambatan Kapal.....	17
2.5.1. Hambatan kapal <i>monohull</i>	17
2.5.2. Hambatan kapal katamaran	25
2.6. Simulasi CFD	27
2.7 Pengujian Hambatan Kapal di <i>Towing Tank</i>	31
2.7.1. Kesamaan geometris.....	32
2.7.2. Kesamaan kinematis	32
2.7.3. Kesamaan dinamis.....	33
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1. Diagram Alir Penelitian (<i>Flow Chart</i>).....	35
3.2. Studi Literatur.....	37

3.3. Pengumpulan Data.....	37
3.3.1. Data primer.....	37
3.3.2. Data sekunder.....	38
3.4. Perhitungan <i>lift</i> dan <i>drag</i> foil NACA 64 ₁ -212.....	39
3.5. Pembuatan Model Kapal Katamaran dengan dan tanpa Foil	39
3.6. <i>Benchmarking Test</i> pada CFD	39
3.7. Perhitungan Hambatan Kapal dengan Simulasi CFD.....	39
3.8. Pengujian Hambatan kapal di <i>Towing Tank</i>	40
3.9. Analisis dan Pembahasan	40
BAB 4 SIMULASI CFD	41
4.1. Simulasi Foil tanpa Kapal.....	41
4.1.1. Pembuatan model	43
4.1.2. <i>Grid independece</i>	46
4.1.3. Simulasi <i>lift</i> dan <i>drag</i> foil NACA 64 ₁ -212	47
4.2. Simulasi Kapal Katamaran tanpa dan dengan Foil.....	53
4.2.1. Proses simulasi CFD menggunakan <i>NUMECA</i>	53
4.2.2. <i>Grid independence</i>	69
4.2.3. <i>Benchmarking test</i> CFD	70
4.2.4. Simulasi CFD hambatan <i>demihull</i> kapal katamaran	75
4.2.5. Simulasi CFD hambatan kapal tanpa foil (K0)	77
4.2.6. Simulasi CFD hambatan kapal dengan 1 foil (K1)	82
4.2.7. Simulasi CFD hambatan kapal dengan 2 foil (K2)	88
4.3. Hasil Simulasi CFD Kapal Katamaran tanpa dan dengan Foil	94
4.4. Simulasi CFD Kecepatan Tinggi	95
BAB 5 PENGUJIAN HAMBATAN DI <i>TOWING TANK</i>	97
5.1. Pendahuluan Pengujian Hambatan	97
5.2. Persiapan Uji Model Kapal.....	98
5.3. <i>Turbulent Stimulation</i>	99
5.4. Pengujian Hambatan Kapal di <i>Towing Tank</i>	100
5.5. Dasar Perhitungan Hambatan Kapal menggunakan Uji Model Kapal	104
5.6. Hasil Pengujian Hambatan di <i>Towing Tank</i>	106
5.6.1. Hasil pengujian hambatan kapal tanpa <i>foil</i> (K0).....	106

5.6.2. Hasil pengujian hambatan kapal dengan 1 foil (K1).....	107
5.6.3. Hasil pengujian hambatan kapal dengan 2 foil (K2).....	109
BAB 6 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	113
6.1. Analisis Foil NACA 64 ₁ -212.....	113
6.2. Analisis Simulasi Hambatan Lambung <i>Demihull</i> dan Kapal Katamaran tanpa dan dengan Foil menggunakan CFD.....	114
6.3. Analisis Pengujian Hambatan Model Uji Kapal Katamaran tanpa dan dengan Foil di <i>Towing Tank</i>	117
6.4. Analisis dan Pembahasan	120
6.4.1. Nilai <i>lift</i> yang terjadi pada foil	120
6.4.2. Perubahan luasan permukaan kapal yang tercelup air (WSA).....	123
6.4.3. Hambatan yang terjadi pada kapal katamaran	125
6.4.4. Analisis komparatif dengan penelitian sebelumnya.....	133
BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN.....	134
7.1. Kesimpulan.....	135
7.2. Saran	136
DAFTAR PUSTAKA	137
DAFTAR LAMPIRAN.....	141
LAMPIRAN A	142
LAMPIRAN B	147
LAMPIRAN C	157
LAMPIRAN D.....	175

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konfigurasi <i>Hysucat</i> (Hoppe, 1995)	7
Gambar 2.2 Perbandingan <i>Hysucat</i> dengan planing katamaran (Migeotte, 2015). .	9
Gambar 2.3 Fase pada <i>Hydrofoil Assisted Catamaran</i> (Loveday, 2006).	9
Gambar 2.4 Jenis konfigurasi foil pada katamaran (Hoppe, 1980).....	10
Gambar 2.5 Bentuk lambung kapal katamaran	11
Gambar 2.6 Konfigurasi umum kapal <i>hysucat</i>	12
Gambar 2.7 Bentuk lambung <i>planning hysucat</i> oleh Calkins (1984)	12
Gambar 2.8 Bentuk lambung <i>deep-v-hull</i> oleh Hoppe (1989).....	13
Gambar 2.9 Bentuk lambung NPL model 6a oleh Manoharan dan Sahoo (2010) 13	
Gambar 2.10 Gaya dan momen yang bekerja pada <i>hydrofoil</i> (kiri) dan sudut serang (kanan) (Gudmundsson, 2014).....	14
Gambar 2.11 Arus di sekitar objek (Nakayama, 2000).....	15
Gambar 2.12 <i>Drag</i> dan <i>lift</i> (Nakayama, 2000)	16
Gambar 2.13 Diagram komponen hambatan kapal (Molland dkk, 2011).....	22
Gambar 2.14 Ekstrapolasi model pendekatan Foude (Molland dkk, 2011).....	24
Gambar 2.15 Ekstrapolasi model pendekatan Hughes (Molland dkk, 2011)	25
Gambar 2.16 Model-model aliran (a & b) pendekatan kontrol volume hingga, (c & d) model-model pendekatan elemen fluida tak hingga (Anderson, 1995) .	28
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	36
Gambar 3.2 Rencana garis kapal katamaran	38
Gambar 4. 1 <i>Profile section</i> foil NACA 64 ₁ -212.....	43
Gambar 4.2 Geometri dari foil NACA 64 ₁ -212 pada CAD	43
Gambar 4.3 <i>Meshing</i> foil NACA 64 ₁ -212 pada CFD dengan <i>size function</i> ; <i>curvature, relevance center; fine</i> , dan jumlah elemen 450343	44
Gambar 4.4 <i>Domain</i> dari foil NACA 64 ₁ -212	45
Gambar 4.5 <i>Grid Independence</i> foil NACA 64 ₁ -212.....	46
Gambar 4.6 Koefisien <i>lift</i> (C_{L,c_l}) dan <i>drag</i> (C_{D,c_d}) Foil NACA 64 ₁ -212 fungsi sudut serang (α) dari CFD dan dari <i>database</i> NACA, $Re = 1 \times 10^7$	48

Gambar 4.7 koefisien <i>lift</i> C_L dan koefisien <i>drag</i> C_D Foil NACA 64 ₁ -212 fungsi dari sudut serang	49
Gambar 4.8 Kontur tekanan foil NACA 64 ₁ -212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 2^\circ$	51
Gambar 4.9 Kontur dan <i>Streamline</i> foil NACA 64 ₁ -212, $\alpha = 2^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$	52
Gambar 4.10 <i>streamline</i> foil NACA 64 ₁ -212, $\alpha = 24^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$	52
Gambar 4.11 Tampilan <i>FINE™/Marine</i>	53
Gambar 4.12 Tampilan “ <i>Maxsurf Modeller</i> ”	54
Gambar 4.13 Tampilan “ <i>Rhinoceros</i> ”	54
Gambar 4.14 Tampilan “ <i>Autodesk Inventor</i> ”	55
Gambar 4.15 Tampilan “ <i>C-Wizard</i> ”	56
Gambar 4.16 Tampilan ‘ <i>Project Management</i> ’	57
Gambar 4.17 Tampilan ‘ <i>Body Configuration</i> ’	58
Gambar 4.18 Tampilan ‘ <i>Flow Definition</i> ’	59
Gambar 4.19 Tampilan ‘ <i>Additional Input</i> ’	59
Gambar 4.20 Tampilan ‘ <i>Mesh Set-up</i> ’	60
Gambar 4.21 Tampilan hasil ‘ <i>Initial Mesh</i> ’	61
Gambar 4.22 Tampilan hasil ‘ <i>Adapt to Geometry</i> ’	62
Gambar 4.23 Tampilan hasil ‘ <i>Adapt to Geometry</i> ’	63
Gambar 4.24 Tampilan hasil ‘ <i>Optimize</i> ’	64
Gambar 4.25 Tampilan hasil ‘ <i>Viscous Layers</i> ’	64
Gambar 4.26 Tampilan ‘ <i>FINE™/Marine</i> ’	65
Gambar 4.27 Spesifikasi Komputer	68
Gambar 4.28 Tampilan ‘ <i>Monitor</i> ’	68
Gambar 4.29 Geometri model kapal DTMB 5415	71
Gambar 4.30 <i>Grid Independence</i> C_T Kapal DTMB 5414	71
Gambar 4.31 <i>Monitor Solver</i> dari kapal DTMB 5414	72
Gambar 4.32 <i>Wave Pattern</i> kapal DTMB 5414 (a dan b)	74
Gambar 4.33 <i>Wetted Surface Area</i> kapal DTMB 5414	74
Gambar 4. 34 Model kapal katamaran <i>round bilge</i> tanpa foil	75
Gambar 4. 35 Grafik hambatan total lambung <i>demihull</i> dan kapal katamaran terhadap kecepatan kapal (Fr)	76
Gambar 4. 36 <i>Wave Pattern</i> lambung kapal <i>demihull</i>	76

Gambar 4.37 Model kapal katamaran <i>round bilge</i> tanpa foil	77
Gambar 4.38 Tampak atas model katamaran <i>round-bilge</i> tanpa Foil.....	78
Gambar 4.39 <i>Bodyplan</i> kapal katamaran <i>round bilge</i> tanpa foil	78
Gambar 4.40 <i>Grid Independence</i> dari R_T kapal katamaran tanpa foil	78
Gambar 4.41 nilai F_x pada <i>Monitor Solver</i> kapal katamaran tanpa foil (K0).....	79
Gambar 4.42 Grafik simulasi CFD hambatan kapal katamaran tanpa foil (K0)...	80
Gambar 4.43 <i>Wave Pattern</i> kapal katamaran tanpa foil (K0) (gambar a dan b)...	81
Gambar 4.44 <i>Wetted Surface Area</i> kapal katamaran tanpa foil (K0).....	82
Gambar 4.45 Model kapal katamaran <i>round bilge</i> dengan 1 foil di haluan.....	83
Gambar 4.46 Tampak atas model katamaran <i>round-Bilge</i> dengan 1 foil ditempatkan di haluan	83
Gambar 4.47 <i>Bodyplan</i> kapal katamaran <i>round bilge</i> dengan 1 foil di haluan....	83
Gambar 4.48 <i>Grid Independence</i> dari R_T Kapal Katamaran 1 Foil.....	84
Gambar 4.49 Nilai F_x pada <i>Monitor Solver</i> kapal katamaran dengan 1 foil (K1)	85
Gambar 4.50 Grafik Simulasi CFD hambatan kapal katamaran dengan 1 foil (K1)	86
Gambar 4.51 <i>Wave Pattern</i> kapal katamaran 1 foil (K1) (gambar a dan b)	87
Gambar 4.52 <i>Wetted Surface Area</i> kapal katamaran 1 foil (K1)	87
Gambar 4.53 Model kapal katamaran <i>Round Bilge</i> dengan 2 foil	88
Gambar 4.54 Tampak atas model katamaran <i>round-bilge</i> dengan menggunakan 2 foil yang ditempatkan di haluan (posisi 1) dan di buritan.....	89
Gambar 4.55 <i>Bodyplan</i> kapal katamaran <i>round bilge</i> dengan 2 foil.....	89
Gambar 4.56 <i>Grid Independence</i> dari R_T Kapal Katamaran dengan 2 foil	89
Gambar 4.57 Nilai F_x pada <i>Monitor Solver</i> kapal katamaran dengan 2 foil (K2)	91
Gambar 4.58 Simulasi CFD hambatan kapal katamaran dengan 2 foil (K2).....	92
Gambar 4.59 <i>Wave Pattern</i> kapal katamaran 2 foil (K2) (gambar a dan b)	93
Gambar 4.60 <i>Wetted Surface Area</i> kapal katamaran 2 foil (K2)	93
Gambar 4. 61 Simulasi CFD hambatan kapal katamaran kondisi K0, K1 dan K2	95
Gambar 4. 62 Simulasi CFD hambatan kapal fungsi dari bilangan Froude (0.7-2.5)	96
Gambar 5.1 Letak titik berat LCG dan VCG pada model uji kapal	99
Gambar 5.2 Model uji kapal pada keadaan sarat penuh dan <i>even keel</i>	99

Gambar 5.3 Kontur contoh plot berdasarkan Re untuk rentang model/ <i>appendage</i> dan <i>Froude number</i>	100
Gambar 5.4 <i>Setting</i> kolam uji	101
Gambar 5.5 <i>Setting</i> model kapal.....	102
Gambar 5.6 Nilai hasil kalibrasi model uji kapal	102
Gambar 5.7 Hasil visual kamera 1 berupa bagian haluan kapal.....	103
Gambar 5.8 Hasil visual kamera 2 berupa bagian buritan kapal	103
Gambar 5.9 Grafik hubungan hambatan kapal katamaran tanpa foil (K0) dengan <i>Froude Number</i> (Fr) kapal	107
Gambar 5.10 Grafik hubungan daya kapal (EHP) kapal tanpa foil (K0) dengan bilangan Froud (<i>Froude Number</i>) Fr.....	107
Gambar 5.11 Grafik hubungan hambatan kapal katamaran 1 foil (K1) dengan <i>Froude Number</i> (Fr).....	108
Gambar 5.12 Grafik hubungan daya kapal (EHP) kapal 1 foil (K1) dengan bilangan Froud (<i>Froude Number</i>) Fr.	109
Gambar 5.13 Grafik hubungan hambatan kapal katamaran 2 foil (K2) dengan <i>Froude Number</i> (Fr).....	110
Gambar 5.14 Grafik hubungan daya kapal (EHP) kapal 2 foil (K2) dengan bilangan Froud (<i>Froude Number</i>) Fr.....	111
Gambar 6. 1 Hambatan total kapal (R_T) tanpa foil (K0) dengan Hambatan total kapal (K1 dan K2) simulasi CFD fungsi dari bilangan <i>Froude</i> (Fr).....	115
Gambar 6. 2 Koefisien hambatan kapal (R_T) tanpa foil (K0) dengan Hambatan total kapal (K1 dan K2) simulasi CFD fungsi dari bilangan <i>Froude</i> (Fr).....	115
Gambar 6.3 Koefisien Hambatan <i>demihull</i> dan katamaran fungsi dari bilangan <i>froude</i> (Fr)	116
Gambar 6. 4 Hambatan total <i>demihull</i> , $2 \times$ <i>demihull</i> dan katamaran fungsi dari bilangan <i>froude</i> (Fr)	117
Gambar 6.5 Hambatan total kapal (R_T) tanpa foil (K0) dengan Hambatan total kapal (K1 dan K2) pengujian <i>towing tank</i> fungsi dari bilangan <i>Froude</i> (Fr)	119
Gambar 6. 6 Koefisien kapal (R_T) tanpa foil (K0) dengan Hambatan total kapal (K1 dan K2) pengujian <i>towing tank</i> fungsi dari bilangan <i>Froude</i> (Fr)	119

Gambar 6. 7 <i>Streamline</i> foil NACA 64 ₁ -212, $V= 10.289$ m/s, $\alpha = 2^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$ foil tanpa kapal.....	122
Gambar 6. 8 <i>Streamline</i> foil NACA 64 ₁ -212, $V= 10.289$ m/s, $\alpha = 2^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$ foil haluan pada kapal katamaran dengan 1 foil (K1)	122
Gambar 6. 9 <i>Streamline</i> foil NACA 64 ₁ -212, $V= 10.289$ m/s, $\alpha = 2^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$ foil buritan pada kapal katamaran dengan 2 foil (K2)	123
Gambar 6.10 grafik distribusi perhitungan hambatan kapal hasil simulasi CFD dengan fungsi eksperimen (kapal katamaran tanpa foil K0, K1 dan K2).	126
Gambar 6.11 Hambatan total kapal (R_T) tanpa foil (K0) dengan Hambatan total kapal (K1 dan K2) simulasi CFD, dan eksperimen di <i>towing tank</i> fungsi dari <i>Froude number</i> (Fr).....	127
Gambar 6. 12 Simulasi CFD hambatan kapal katamaran kondisi K0, K1 dan K2	129
Gambar 6. 13 grafik hambatan kapal per displasemen fungsi dari bilangan Froude displasemen.....	130
Gambar 6. 14 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 2 Foil pada Fr 0.3.....	131
Gambar 6. 15 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 2 Foil pada Fr 2.375.....	131
Gambar 6. 16 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 2 Foil pada Fr 2.5.....	132
Gambar 6. 17 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 1 Foil pada Fr 0.3.....	132
Gambar 6. 18 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 1 Foil pada Fr 2.5.....	133

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Ukuran utama kapal katamaran.....	38
Tabel 4. 1 <i>Type</i> dan Dimensi Foil	41
Tabel 4.2 <i>Coordinat & Station</i> NACA 64 ₁ -212.....	42
Tabel 4. 3 <i>Grid Independence</i> simulasi CFD.....	47
Tabel 4.4 Hasil perhitungan <i>lift</i> dan <i>drag</i> foil NACA 64 ₁ -212 dengan sudut serang yang berbeda menggunakan CFD.....	47
Tabel 4.5 Nilai gaya <i>lift</i> dan <i>drag</i> dari foil NACA 64 ₁ -212 dari	50
Tabel 4.6 <i>Boundary condition</i>	66
Tabel 4.7 Ukuran utama DTMB 5414	70
Tabel 4. 8 <i>Grid Independence</i> simulasi CFD.....	72
Tabel 4. 9 Perbandingan koefisien hambatan (C_T) DTMB 5414.....	73
Tabel 4. 10 Nilai hambatan total lambung <i>demihull</i>	76
Tabel 4. 11 Ukuran utama kapal katamaran tanpa foil	77
Tabel 4.12 <i>Grid Independence</i> simulasi CFD katamaran tanpa foil.....	79
Tabel 4. 13 Ukuran utama kapal katamaran dengan 1 foil	82
Tabel 4.14 <i>Grid Independence</i> simulasi CFD katamaran dengan 1 foil	84
Tabel 4. 15 Ukuran utama kapal katamaran dengan 2 foil	88
Tabel 4.16 <i>Grid Independence</i> simulasi CFD kapal katamaran dengan 2 foil.....	90
Tabel 4.17 Hasil Simulasi CFD kapal tanpa foil (K0), 1 foil (K1) dan 2 foil (K2)	94
Tabel 5.1 Ukuran utama kapal dan ukuran model uji kapal	97
Tabel 5.2 Kecepatan uji kapal.....	98
Tabel 5.3 Hubungan hambatan total kapal, daya (<i>power</i>) kapal katamaran tanpa foil (K0) dengan kecepatan kapal V dan <i>Froude Number</i> (Fr)	106
Tabel 5. 4 Hubungan hambatan total kapal, daya (<i>power</i>) kapal katamaran 1 foil (K1) dengan kecepatan kapal V dan <i>Froude Number</i> (Fr).....	108
Tabel 5.5 Hubungan hambatan total kapal, daya (<i>power</i>) kapal katamaran 2 foil (K2) dengan kecepatan kapal V dan <i>Froude Number</i> (Fr).....	110
Tabel 6.1 Nilai gaya <i>lift</i> dan <i>drag</i> dari foil NACA 64 ₁ -212 hasil simulasi CFD	113

Tabel 6.2 Nilai gaya <i>lift</i> dan <i>drag</i> dari foil NACA 64 ₁ -212 hasil simulasi CFD pada kapal katamaran.....	113
Tabel 6.3 Hasil Simulasi CFD kapal tanpa foil (K0), 1 foil (K1) dan 2 foil (K2)	114
Tabel 6. 4 Nilai hambatan total lambung <i>demihull</i> dan kapal katamaran.....	116
Tabel 6.5 Hasil Pengujian hambatan kapal eksperimen di <i>towing tank</i> untuk kapal tanpa foil (K0) , 1 foil (K1) dan 2 foil (K2)	118
Tabel 6.6 Nilai gaya <i>lift</i> dari foil NACA 64 ₁ -212 tanpa lambung kapal katamaran hasil simulasi CFD	120
Tabel 6.7 Nilai gaya <i>lift</i> dari foil NACA 64 ₁ -212 dipasang pada lambung	121
Tabel 6.8 WSA kapal katamaran ketika di sumulasikan menggunakan CFD	124
Tabel 6.9 <i>Persentase relatif error</i> hambatan total kapal tanpa foil dan dengan foil menggunakan simulasi eksperimen dan CFD	126
Tabel 6.10 Perbandingan hambatan total kapal tanpa foil K0 dan dengan foil K1, K2 menggunakan simulasi CFD dan eksperimen	127
Tabel 6. 11 Hasil Simulasi CFD hambatan kapal tanpa foil (K0), 1 foil (K1), 2 foil (K2) pada kecepatan tinggi dan luas permukaan basah lambung kapal (WSA K2)	129

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Bidang industri di Indonesia baik manufaktur maupun maritim masih banyak bergantung pada tersedianya bahan bakar fosil berupa minyak bumi dan batu bara. Sampai saat ini, minyak bumi masih merupakan sumber energi yang utama dalam memenuhi kebutuhan di dalam negeri. Ketergantungan yang sangat besar pada bahan bakar fosil mendorong, Pemerintah mengeluarkan Peraturan Presiden nomor 5 tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional. Salah satu sasaran kebijakan energi nasional seperti yang tertuang di dalam peraturan tersebut tentang adalah terwujudnya konsumsi energi primer yang optimal pada tahun 2025 dari energi baru dan energi terbarukan lainnya. Untuk mendukung kebijakan pemerintah, perlu dilakukan langkah-langkah pencarian sumber-sumber energi alternatif disamping energi fosil yang dipakai saat ini dan langkah efisiensi energi.

Dalam bidang kemaritiman dan lebih khusus bidang perkapalan ada banyak hal yang bisa kita lakukan dalam upaya untuk efisiensi energi antara lain desain kapal yang tepat, penggunaan tenaga alternatif di kapal, dan salah satunya memanfaatkan *hydrofoil* pada kapal.

Penggunaan *hydrofoil* pada kapal umumnya dapat mengurangi hambatan kapal. Hal ini terjadi karena adanya gaya angkat yang dapat mengangkat sebagian lambung kapal ke permukaan air, sehingga memperkecil luas permukaan basah. Luas permukaan basah yang berkurang akan memperkecil hambatan yang terjadi akibat gaya gesek lambung kapal yang tercelup dengan air. Kapal *hydrofoil* katamaran atau biasa disebut *Hysucat* adalah kapal dengan tipe *hybrid*, yang menggabungkan kapal dengan *hydrofoil* dan kapal katamaran. Kapal jenis ini memiliki efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan kapal cepat atau jenis katamaran dengan bentuk lambung V. *Hysucat* menunjukkan adanya pengurangan pada tenaga propulsi dan memiliki karakteristik *seakeeping* yang baik pada *rough water* (Hoppe, 1995). Kapal *Hysucat* menggunakan prinsip pesawat, menggunakan foil untuk menghasilkan gaya angkat tambahan. Gaya angkat ini digunakan untuk

mengangkat lambung kapal yang akan menghasilkan trim dan mengurangi luas permukaan basah (WSA) kapal lambung kapal. Jika WSA total kapal berkurang, maka akan dapat mengurangi hambatan kapal. Oleh karena itu dengan daya yang sama, kapal *Hysucat* memiliki kecepatan yang lebih tinggi sehingga meningkatkan efisiensi kapal

Dalam penelitian ini data kapal katamaran mengacu hasil penelitian desain kapal katamaran dengan ukuran utama tertentu untuk kapal penyeberangan/Ferry Ro-Ro (Satriawansyah, 2016). Selanjutnya dengan ukuran utama kapal katamaran tersebut dilakukan analisis hambatan kapal katamaran dengan bentuk lambung *Round Bilge* tanpa hydrofoil dan penambahan hydrofoil dengan tipe berdasarkan data hasil penelitian (Suastika, 2018) dengan jumlah 1 dan 2 pada posisi foil tertentu menggunakan metode pendekatan CFD dan eksperimen pada *Towing Tank*.

1.2. Rumusan Masalah

Dengan memperhatikan pokok permasalahan yang terdapat pada latar belakang maka diambil beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana hambatan kapal katamaran dengan bentuk lambung kapal *Round Bilge* tanpa foil ?
2. Bagaimana hambatan kapal katamaran bentuk lambung *Round Bilge* dengan penambahan 1 *hydrofoil* di bagian haluan kapal ?
3. Bagaimana hambatan kapal katamaran bentuk lambung kapal *Round Bilge* dengan penambahan 2 *hydrofoil*, 1 *hydrofoil* ditempatkan di bagian buritan dan 1 *hydrofoil* ditempatkan di haluan kapal?

1.3. Batasan Masalah

Batasan –batasan masalah yang ada dalam penelitian adalah :

1. Foil yang digunakan adalah jenis NACA 64₁-212 dengan sudut serang 2°
2. Kecepatan pengujian model kapal pada *Towing Tank* dibatasi berdasarkan panjang model kapal dengan *Froude number* (Fn) 0,3 - 0,7
3. Kapal katamaran dirancang untuk kapal penyeberangan (Ferry ro-ro)

4. Desain lambung katamaran mengacu pada hasil desain dengan ukuran :
 $LWL \times B \times H \times T \times Cb = 44,00 \text{ m} \times 20,60 \text{ m (demihull 3 m)} \times 3,80 \text{ m} \times 1,40 \text{ m} \times 0,491$

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan hambatan kapal katamaran dengan bentuk lambung kapal *Round Bilge* tanpa penambahan *hydrofoil*
2. Mendapatkan hambatan kapal katamaran bentuk lambung *Round Bilge* dengan penambahan 1 *hydrofoil* di bagian haluan kapal
3. Mendapatkan hambatan kapal katamaran bentuk lambung kapal *Round Bilge* dengan penambahan 2 *hydrofoil*, 1 *hydrofoil* ditempatkan di bagian buritan dan 1 *hydrofoil* ditempatkan di haluan kapal

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menjadi salah satu sumbangan pemikiran dalam pengembangan kapal “*Hysucat*” sebagai salah satu inovasi dalam bidang perkapalan mengatasi dan menanggulangi permasalahan penghematan bahan bakar fosil.
2. Memberikan informasi lebih tentang karakteristik hambatan kapal dengan penambahan *hydrofoil*, sehingga dapat digunakan sesuai jenis kapal yang dibutuhkan.

1.6. Hipotesa

Berdasarkan studi literatur akan diperoleh kesimpulan awal yang dapat menjawab pertanyaan sementara dari riset yang akan dilakukan dan dibuktikan melalui penelitian dengan menggunakan pendekatan CFD dan eksperimen. Adapun hipotesa penelitian ini adalah sebagai berikut:

Penambahan *hydrofoil* pada kapal cepat pada umumnya akan dapat mengangkat lambung kapal pada kondisi *planing*, sehingga dapat mengurangi luas permukaan basah yang tercelup air (WSA) kapal dan sekaligus mengurangi hambatan kapal. Demikian pula dengan penambahan *hydrofoil* pada kapal

katamaran yang digunakan pada penelitian ini. Penggunaan *hydrofoil* pada kapal katamaran akan menyebabkan lambung kapal terangkat pada kondisi *planing* yang dihasilkan oleh gaya *lift* dari foil, sehingga WSA kapal berkurang dan dapat mengurangi hambatan kapal. Penambahan hambatan kapal akibat dari gaya *drag* yang dihasilkan oleh foil tentunya tidak boleh lebih besar daripada pengurangan hambatan akibat dari gaya *lift* yang mengurangi luasan permukaan lambung (WSA) kapal pada kecepatan tertentu. Dengan demikian hambatan total kapal akan berkurang dan kondisi sebaliknya akan menambah hambatan kapal.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. *Hysucat/ Hysuwac*

Penelitian dan pengembangan terkait kapal *Hysucat* (*hydrofoil supported catamaran*) dan *Hysuwac* (*hydrofoil supported watercraft*) dimulai akhir tahun 1970an atau awal 1980an di Universitas Stellenbosch, Afrika Selatan, yang dipimpin oleh Prof. Karl Gunter Hoppe (1980, 1982). Selain oleh Hoppe, hasil penelitian terkait penggunaan foil pada katamaran juga dilaporkan oleh Calkins (1984) dengan mempelajari bentuk lambung yang baru. Meskipun penelitian dan pengembangan kapal *Hysucat* dan *Hysuwac* telah dimulai empat dekade silam, penelitian di bidang ini sampai dengan saat ini masih dipakai untuk penelitian.

Kapal *Hysucat* adalah kapal yang menggunakan hydrofoil yang dipasang pada kapal katamaran biasanya menggunakan satu foil utama (*main foil*) yang dipasang sedikit di depan LCG dan satu trim foil di bagian belakang kapal. Pada sisi lain, kapal *Hysuwac* biasanya menggunakan sistem foil tandem, dimana foil utama biasanya diletakkan cukup jauh di depan LCG dan sebuah stern foil di bagian belakang kapal. Kedua jenis kapal ini mempunyai efisiensi yang lebih besar (30-40% lebih besar) jika dibandingkan dengan kapal cepat katamaran pada umumnya yang tidak menggunakan bantuan dari *hydrofoil* (Hoppe, 1989, 1995. Milandri, 2006). Di samping itu, penggunaan *hydrofoil* pada kapal katamaran juga meningkatkan karakteristik kemampuan *seakeeping* kapal di samping dapat mengurangi hambatan kapal (Miyata, 1989).

Teori hidrodinamika terkait mekanisme *Hysucat* dan *Hysuwac* telah dikembangkan berdasarkan teori *planing hull* dari Savitsky (1964) dan teori tentang *hydrofoil* (Lewis, 1998). Keberhasilan penerapan prinsip *Hysucat* dan *Hysuwac* pada berbagai jenis kapal, seperti kapal patroli cepat polisi dan angkatan laut (*navy*), *luxury yacht*, kapal rekreasi telah dilaporkan sebelumnya (Hoppe, 2001).

Terkait aplikasi *hydrofoil* pada kapal cepat, Besnard et al. (1998) melakukan penelitian untuk memperoleh rasio gaya *lift* dengan *drag* maksimum. Penelitian mereka menggunakan *panel method* untuk menghitung aliran tiga dimensi dengan

berbagai konfigurasi dan dengan memodelkan pengaruh dari permukaan bebas (*free surface*). Mereka mengoptimasi penampang foil, penampang *strut*, dan melakukan analisis struktur foil. Alat komputasi diintegrasikan ke dalam desain multi disiplin (pendekatan optimasi) yang diterapkan pada desain *monofoil* dan dua foil yang optimum. Namun, pada penelitian tersebut, metode optimasi yang digunakan tidak mempertimbangkan aspek *seakeeping* dari kapal.

Andrewartha et al. (2003) mempresentasikan metode numerik untuk menghitung hambatan kapal *Hysucat* untuk berbagai variasi parameter desain (jumlah foil, ukuran foil, posisi perletakan foil di arah memanjang dan di arah vertical (kedalaman perletakan foil). Hasil numerik dibandingkan dengan hasil eksperimen. Metode yang dikembangkan sangat fleksibel dan mampu menghitung berbagai konfigurasi foil dan bentuk lambung.

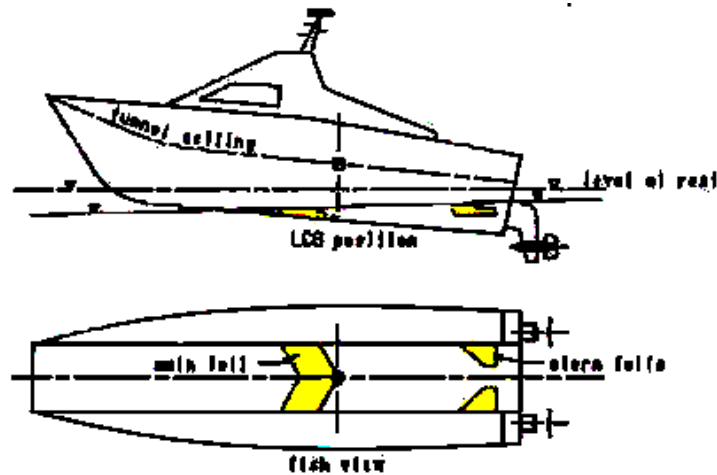
Manoharan dan Sahoo (2010) mempresentasikan metode analitis untuk menghitung hambatan konfigurasi NPL *round bilge Hysucat* dengan menggunakan pendekatan numerik. Dalam penelitian ini menggunakan jenis lambung NPL tipe 6a dengan jumlah foil yang digunakan adalah dua, satu foil di sekitar *Center of Gravity* (CoG) dan satu trim foil di bagian belakang kapal. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa reduksi yang substansial dari hambatan dapat dicapai. Namun, eksperimen perlu dilakukan untuk memverifikasi solusi analitis yang diusulkan untuk memperoleh basis ilmu yang lebih *robust*.

Prastowo et al. (2016) mempelajari penggunaan *hydrofoil* pada kapal katamaran 25 m dengan menggunakan CFD. Mereka menyimpulkan antara lain bahwa penggunaan foil pada kapal katamaran 25 m ini dapat meningkatkan efisiensi daya (*power*) sebesar 8.19%.

Suastika et al. (2018) melakukan simulasi numerik kapal *Hysucat monofoil* dengan menggunakan CFD. Hasil simulasi menunjukkan bahwa posisi perletakan *hydrofoil* di arah memanjang sangat mempengaruhi besarnya hambatan kapal. Posisi yang paling optimum adalah posisi persis di bawah *Center of Gravity* (CoG) dari kapal.

Hysucat merupakan kepanjangan dari *Hydrofoil Supported Catamaran*, yang merupakan gabungan dari kapal katamaran dengan *planing hull* dan *hydrofoils* yang terendam sepenuhnya dan dipasang di bagian haluan dan buritan (Calkins, 1984).

Bentuk lambung dikembangkan dengan menambahkan rasio perbandingan panjang/lebar yang besar, *deadrise* yang tinggi pada *sidehull* sepanjang lunas pada masing-masing lambung katamaran. Bagian *sidehull*, merupakan bagian yang terendam saat *Hysucat* bergerak dengan lambung terangkat di atas air, menghasilkan gaya apung tambahan.



Gambar 2.1 Konfigurasi *Hysucat* (Hoppe, 1995)

Secara umum jenis kapal *Hysucat* menggunakan sebuah foil ditempatkan pada posisi LCG kapal dan membentang pada celah antara *demihull* berada dekat *keel*. Pada kecepatan tinggi, *hydrofoil* yang didesain untuk mengangkat *demihull* keluar dari air. Gaya angkat yang besar menyebabkan berkurangnya hambatan kapal, karena *hydrofoil* memiliki efisiensi gaya angkat yang lebih tinggi daripada lambung kapal (Hoppe, 1989).

Kapal katamaran dengan *monofoil* sangat sensitif terhadap perubahan LCG kapal dan memerlukan sebuah *trim device* dalam pengoperasiannya. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka digunakan sistem dua foil. Foil utama diletakkan sedikit didepan posisi LCG kapal dan *trim foil* dipasang dekat transom dengan posisi di atas *keel* supaya foil beroperasi pada permukaan air. Foil utama dapat mengangkat sekitar 40-75 % berat kapal pada kecepatan tertentu yang tergantung pada ukuran dan displasemen kapal (Migeotte & Hoppe, 1999).

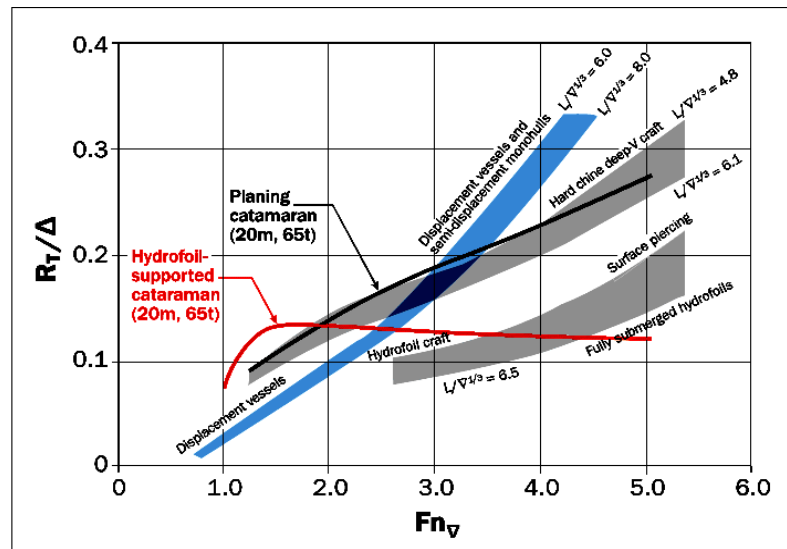
Sistem *fixed hydrofoil*, yang terdiri dari foil utama yang terletak sedikit ke depan dari titik pusat gravitasi dan dua buah *trim foil* yang berada dekat transom memberikan trim stabilitas dinamis akibat pengaruh *hydrofoil surface effect*. Gaya angkat *foil* berkurang, ketika foil mencapai permukaan air pada kecepatan tinggi. Inilah yang dinamakan *hydrofoil surface effect* yang mencegah *hydrofoil* keluar dari permukaan air, ketika kecepatan melebihi batas. Foil dapat berfungsi pada kedalaman tertentu, dimana gaya angkat dan *planing force* bergabung untuk mengimbangi berat kapal.

Pengurangan hambatan kapal katamaran akan terjadi, ketika *hydrofoil* yang berada didalam terowongan antar *demihull* mengangkat sebagian berat kapal pada kecepatan tertentu sehingga badan kapal terangkat keluar dari air, yang mengakibatkan berkurangnya hambatan karena *hydrofoil* mempunyai efisiensi gaya angkat yang lebih besar dibandingkan lambung kapal.

Menurut Hoppe (1989) dan Milandri (2006), *Hysucat* memiliki keunggulan dibandingkan *planing hull* yaitu

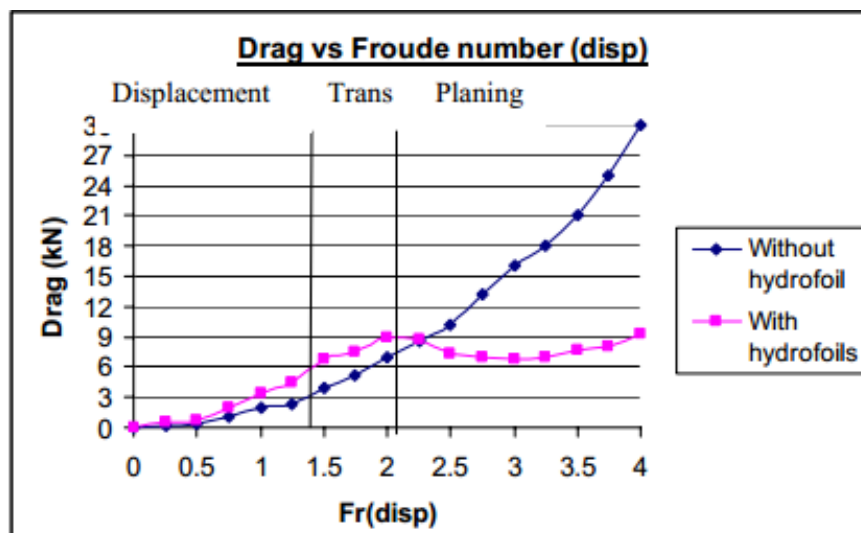
- Meningkatkan kecepatan kapal
- Meningkatkan kapasitas daya tampung
- Mengurangi hambatan gesek dan *wave making resistance* akibat sebagian lambung kapal terangkat
- Meningkatkan efisiensi bahan bakar akibat berkurangnya hambatan

Gunther Migeotte juga menyatakan dalam artikelnya di *Professional Boatbuilder* (2015) bahwa keuntungan lain dair kapal katamaran dengan penambahan foil adalah pada kecepatan *planning*, hambatan kapal dapat berkurang sampai 50% yang setara dengan kecepatan kapal yang lebih tinggi atau *power* dari kapal yang dibutuhkan menjadi lebih rendah. Untuk penurunan *power* yang dibutuhkan kapal biasanya sekitar 10-30% untuk penggunaan bahan bakar kapal pada kecepatan *planning*. Gambar 2.2 menunjukkan tren hambatan kapal untuk berbagai lambung, dan juga kurva hambatan kapal katamaran dengan menggunakan *hydrofoil*, yang umumnya datar atau bahkan miring ke bawah pada kecepatan tertentu.



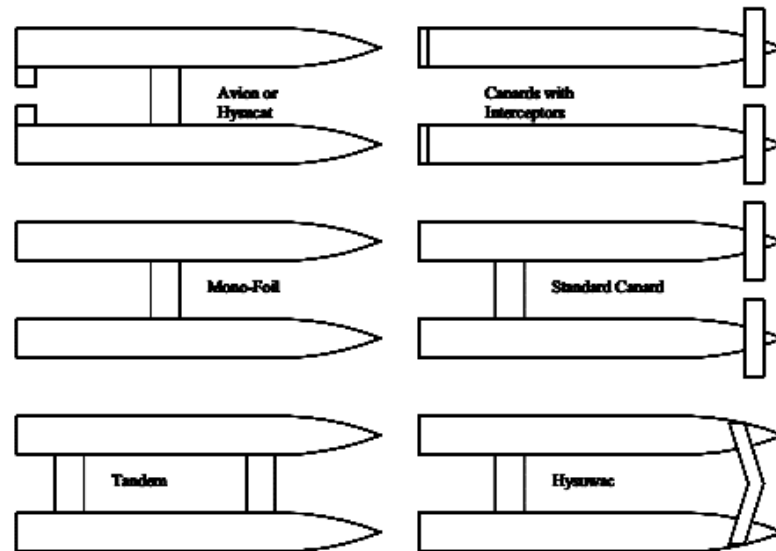
Gambar 2.2 Perbandingan *Hysucat* dengan planing katamaran (Migeotte, 2015).

Dari analisis yang dilakukan pada data hasil eksperimen pada kapal katamaran dengan penambahan foil telah dikumpulkan oleh Universitas Stellenbosch yang diketahui bahwa, kapal katamaran dengan foil akan mengalami 3 tahapan/fase operasi sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.3 yang terdiri fase displasemen, fase transisi dari displasemen menuju *planing*, dan fase *planing*.



Gambar 2.3 Fase pada *Hydrofoil Assisted Catamaran* (Loveday, 2006).

Selain jenis *hysucat* yang disebutkan di atas, terdapat konfigurasi foil terdiri dari beberapa variasi dan jenis seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut ini.

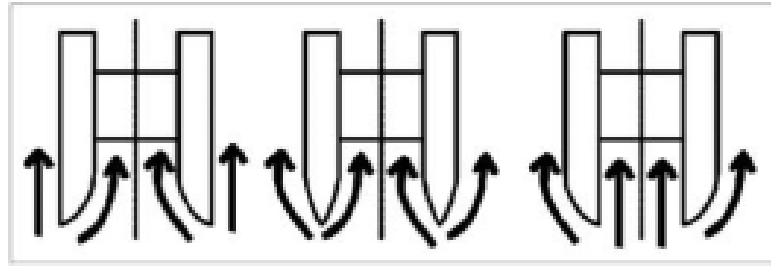


Gambar 2.4 Jenis konfigurasi foil pada katamaran (Hoppe, 1980).

Penggunaan konfigurasi tipe tandem dan standar *canard* merupakan konfigurasi yang paling populer digunakan pada jenis kapal semi displasemen dan telah banyak kapal yang menggunakan dua jenis konfigurasi ini. Hal ini disebabkan adanya kemampuan *lifting* yang menghasilkan badan kapal terangkat dari air, saat beroperasi. Konfigurasi ini tidak terlalu sensitif terhadap perubahan titik berat secara memanjang (LCG) dan *overloading*. Penerapan konfigurasi *avion* atau *hysucat* relatif banyak ditemukan pada kapal *planing* berukuran 5 m sampai 20 m. Serupa dengan sistem *monofoil* yang hanya terlihat berhasil pengaplikasiannya pada kapal semi displasemen 40 m.

2.2. Bentuk Lambung *Hysucat/ Hysuwac*

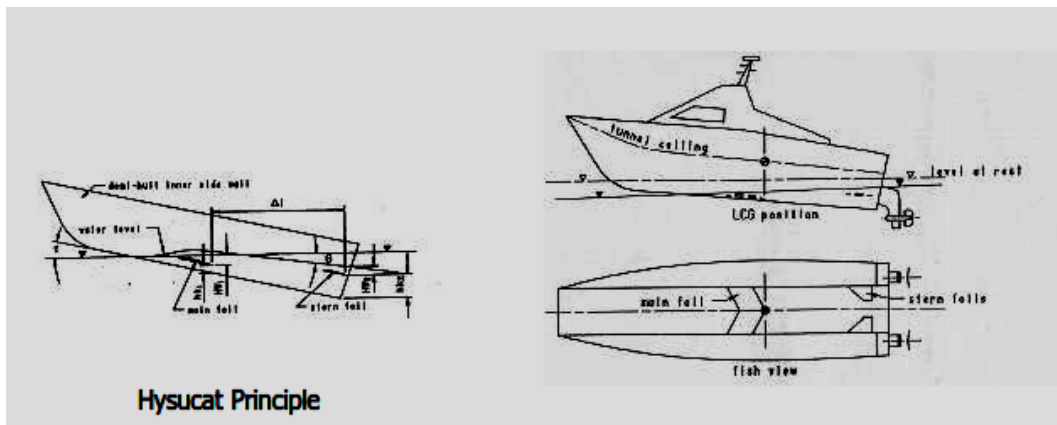
Bentuk lambung kapal katamaran memiliki banyak model, tetapi secara umum ada tiga bentuk dasar dari kapal katamaran, yakni kapal katamaran; simetris, asimetris dengan lambung bagian dalam lurus, dan asimetris dengan lambung bagian luar lurus. Gambar berikut adalah bentuk lambung kapal katamaran berdasarkan Insel dan Molland (1991)



Gambar 2.5 Bentuk lambung kapal katamaran

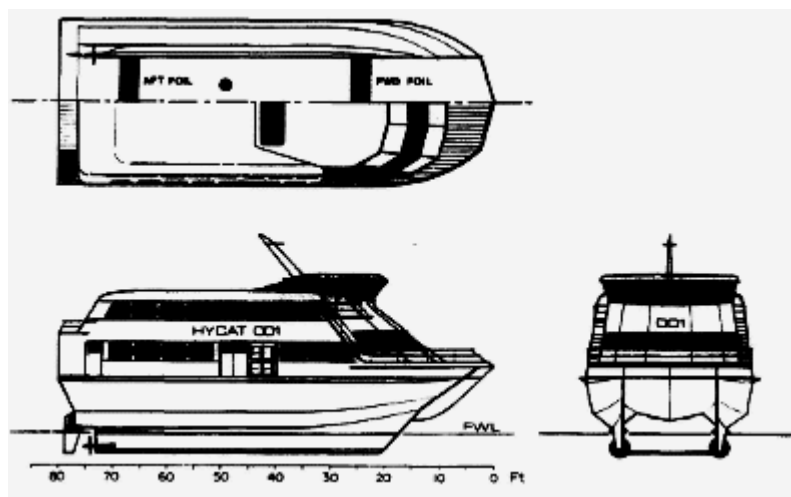
Keuntungan dari prinsip *Hysucat* didasarkan pada kesimpulan logis bahwa kombinasi dari dua elemen yang efisien, bentuk lambung katamaran dan *hydrofoil*. Aplikasi *Hysucat* atau dalam beberapa kasus hanya mendesai sistem *hydrofoil* untuk kapal katamaran yang sudah ada telah diterapkan pada beberapa jenis kapal mulai dari kapal dengan ukuran 5 m hingga 45 m. Prinsip *Hysucat* menawarkan keuntungan untuk jenis kapal berkecepatan tinggi khusus seperti feri, kapal pesiar, kapal patroli, kapal penangkap ikan permainan dan polisi dan kapal patroli khusus yang membutuhkan geladak yang luas.

Kapal *Hysucat* telah dikembangkan untuk kapal feri dengan ukuran 17 m hingga 20 m di Jerman dan di Afrika selatan (Rheinjet, Nordblitz, Sea Princess) serta kapal angkatan laut dan kapal patroli dengan ukuran 10 m hingga 19 m di Afrika Selatan, Jerman dan Thailand. *Hysucat yachts* dengan ukuran 8.5 m hingga 36 m (*Chief Flying Sun*), *Prout Panther* 64 di U.K dan 21 m *Kingcat* di Prancis. Kapal *Hysucat* terbesar adalah 45 m E-Cat yang dikembangkan oleh Halter Marine di New Orelans, USA dengan sistem foil *Hysuwac* yang meningkatkan kecepatan dari 33 knots hingga maksimum 44 knots. *Hysucat* terkecil adalah kapal *semi rigid inflatable* 6.5 m yang dirancang oleh penelitian yang bekerja sama dengan Malan Conradie dari Aqua Fun di teluk Gordon. Prinsip *Hysucat* dan konfigurasi dapat dilihat pada gambar 2.6 , Penjelasan lebih rinci dapat ditemukan dalam publikasi Hoppe (1991, 1991a, 1992 dan 1995).



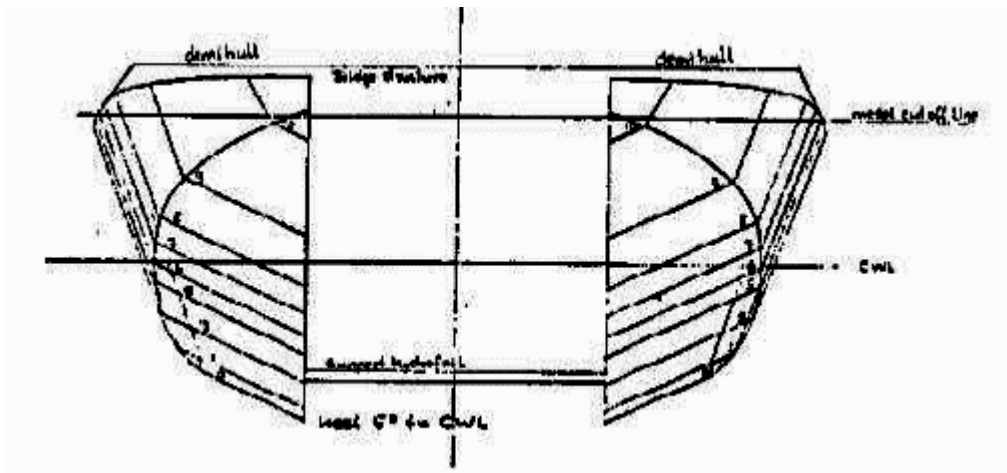
Gambar 2.6 Konfigurasi umum kapal hysucat

Berbagai bentuk lambung katamaran dengan *hydrofoil* telah dikembangkan oleh beberapa peneliti. Calkins (1984) meneliti *hybrid hydrofoil* catamaran dengan menggunakan bentuk lambung kapal katamaran *planning* seperti dilihat pada gambar 2.7



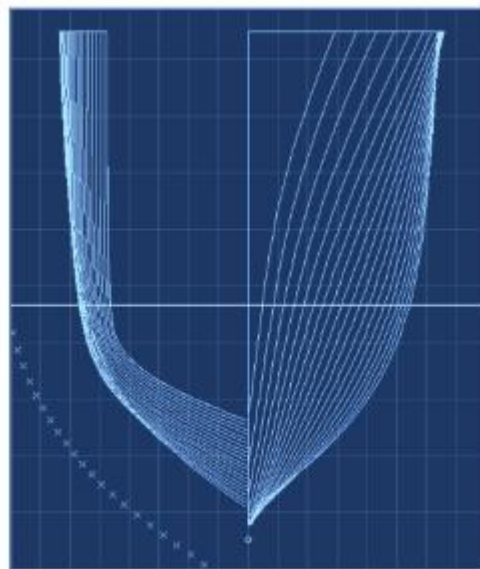
Gambar 2.7 Bentuk lambung *planning hysucat* oleh Calkins (1984)

K.G . Hoppe (1989) meneliti tentang *hysucat* dengan bentuk lambung *deep-v-delta monohull* sebagai bentuk *demihull* nya dengan *deadrise angle of attack* 20° hingga 24° dan dengan *prismatic hull* pada hampir sepanjang lambung kapal. Berikut adalah gambar bentuk lambung yang digunakan pada penelitiannya.



Gambar 2.8 Bentuk lambung *deep-v-hull* oleh Hoppe (1989)

Monoharan dan Sahoo (2010) meneliti tentang pengurangan *drag* pada *hysucat* dengan bentuk lambung kapal NPL model 6a *round bilge* dengan rasio L/B 15.1 dan B/T 1.5 Berikut adalah gambar desain NPL model 6a.

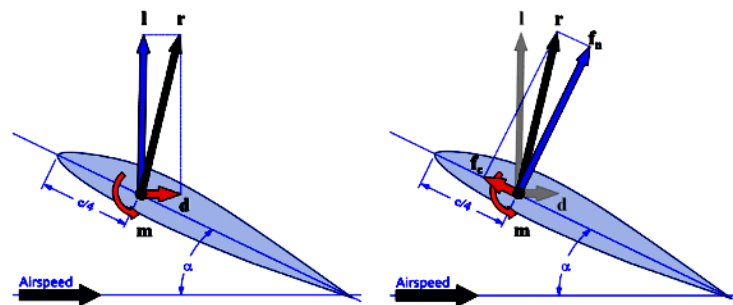


Gambar 2.9 Bentuk lambung NPL model 6a oleh Manoharan dan Sahoo (2010)

2.3. Hydrofoil

Hydrofoil adalah foil yang beroperasi dalam air yang bentuk dan fungsinya menyerupai *aerofoil* yang digunakan oleh pesawat terbang. *Hydrofoil* biasanya terdiri dari struktur seperti sayap yang dipasang pada penyangga di bawah lambung

kapal atau melintasi lambung kapal katamaran di berbagai kapal. Seiring peningkatan kecepatan pada kapal yang dilengkapi dengan *hydrofoil*, elemen *hydrofoil* di bawah lambung memberi gaya angkat tambahan yang cukup untuk mengangkat lambung keluar dari air, yang sangat mengurangi hambatan lambung. Hal ini memberikan peningkatan kecepatan dan efisiensi bahan bakar. Ketika suatu *hydrofoil* dilewati oleh aliran fluida, maka adanya pengaruh interaksi antara aliran fluida dengan permukaan akan timbul variasi kecepatan dan tekanan disepanjang permukaan atas dan bawah serta bagian depan dan belakang. Perbedaan tekanan antara permukaan atas dan bawah menimbulkan gaya resultan yang arahnya tegak lurus dengan arah datangnya aliran fluida, gaya ini disebut sebagai gaya angkat (*lift force*). Perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang akan menimbulkan gaya resultan yang arahnya searah dengan arah datangnya aliran fluida, gaya ini disebut sebagai gaya hambat (*drag force*) (Teddy& Sudarja, 2008).



Gambar 2.10 Gaya dan momen yang bekerja pada *hydrofoil* (kiri) dan sudut serang (kanan) (Gudmundsson, 2014)

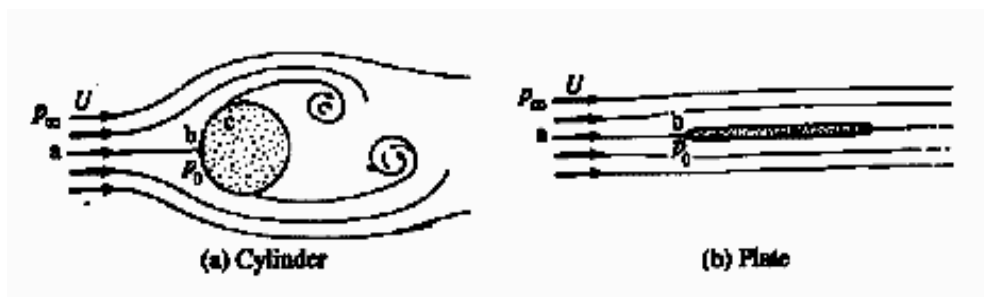
Sudut serang pada *hydrofoil* digunakan untuk menganalisis dan menggambarkan distribusi tekanan. Pada *hydrofoil* simetris mempunyai nilai koefisien distribusi tekanan yang sama pada negatif maupun positif sudut serang. Perbedaan tekanan antara bagian atas dan bagian bawah *hydrofoil* ditentukan beberapa parameter antara lain; karakteristik *hydrofoil section*, *Reynolds number*, dan sudut serang.

Beberapa eksperimen sudah dilakukan (Yahiaoui, 2015) menunjukkan bahwa saat momentum sudut permukaan meningkat, gaya angkat keseluruhan meningkat

dan gaya *drag* turun. Selain meningkatkan *lift*, permukaan bergerak menghambat terjadinya *stall* pada sudut serang yang tinggi.

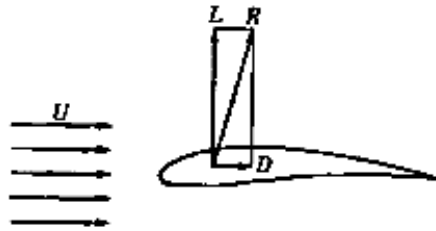
2.4 Lift dan Drag

Hydrodynamic merupakan cabang dari ilmu mekanika fluida yang diterapkan dan berfokus pada gaya dan momen yang terjadi ketika objek bergerak di air (Liu, 2017). Secara umum, aliran yang mengalir di sekitar objek yang ditempatkan di aliran seragam menghasilkan lapisan tipis di sepanjang permukaan objek dengan kecepatan yang berubah-ubah, sebagai contoh; *boundary layer* yang dihasilkan karena kekentalan fluida. Aliran tersebut memisahkan bagian belakang objek, menghasilkan arus *eddies*. Gambar 2.3 menunjukkan aliran disekitar sebuah silinder dan plat datar. Aliran dari titik hulu 'a' berhenti pada titik 'b'. untuk silinder, aliran berpisah di titik 'c' menghasilkan arus *eddies*



Gambar 2.11 Arus di sekitar objek (Nakayama, 2000).

Tekanan pada titik 'a', dimana tidak dipengaruhi oleh objek, dianggap P_∞ , kecepatan alirannya U , dan tekanan pada titik stagnasi berupa P_0 . Kemudian ketika benda ditempatkan didalam aliran, benda merupakan subjek untuk gaya dari fluida disekitarnya. Ketika plat datar ditempatkan di arah aliran, plat tersebut merupakan subjek untuk gaya pada arah hilir. Sebuah foil, merupakan subjek gaya R yang mengikuti arus seperti pada gambar 2.12. Secara umum, gaya R bekerja pada benda dibagi menjadi komponen D pada arah aliran U dan komponen L pada arah normal U , dimana D merupakan gaya *drag*, dan L merupakan gaya *lift* (Nakayama, 2000)



Gambar 2.12 *Drag* dan *lift* (Nakayama, 2000)

Gaya pada sayap atau foil dihasilkan oleh fenomena aliran fluida pada luasan permukaan sayap. Pada sayap kecepatan aliran fluida pada permukaan cembung (bagian atas) lebih cepat dari pada kecepatan aliran permukaan yang datar (bagian bawah). Berdasarkan hukum Bernoulli hal tersebut akan mengakibatkan tekanan permukaan bagian bawah lebih besar dan permukaan bagian atas lebih kecil sehingga mengakibatkan gaya angkat keatas (*lift force*).

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = C \quad (2.1)$$

Karena foil yang digunakan tipis, maka h dapat diabaikan sehingga didapatkan: $p + \frac{1}{2}\rho v^2 = C$

$$p_{lift} + \frac{1}{2}\rho v^2 = C \quad (2.2)$$

$$p_{drag} + \frac{1}{2}\rho v^2 = C \quad (2.3)$$

Dimana;

p = tekanan fluida

ρ = massa jenis fluida

v = kecepatan aliran fluida

Dari persamaan Bernoulli di atas jumlah energi adalah konstan, pada aliran di sekitar sayap/foil kecepatan aliran fluida pada permukaan bagian atas (cembung) lebih besar sedangkan kecepatan aliran fluida pada permukaan bagian bawah (datar) lebih kecil, sebaliknya tekanan pada bagian atas akan mengecil dan bagian bawah akan membesar.

Hukum Newton II menyatakan bahwa perubahan momentum yang terjadi pada partikel fluida adalah sama dengan jumlah gaya-gaya pada partikel tersebut. Sehingga gaya yang terjadi akibat tekanan fluida sama dengan perubahan momentum aliran fluida.

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.4)$$

$$\frac{F}{S} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.5)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho S v^2 \quad (2.6)$$

Gaya hidrodinamis yang bekerja pada sayap mempunyai persamaan umum sebagai berikut:

$$F = C_F \frac{1}{2} \rho S v^2 \quad (2.7)$$

dimana;

F = gaya yang bekerja pada foil

C_F = koefisien gaya

ρ = massa jenis fluida

v = kecepatan

S = proyeksi luasan foil tegak lurus dari arah gaya

Untuk analisis gaya angkat (*lift force*) dan *drag* yang bekerja pada sayap (*foil*) dapat dinyatakan dalam besaran berupa koefisien seperti berikut:

$$C_L = \frac{F_{lift}}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \quad (2.8)$$

$$C_D = \frac{F_{drag}}{\frac{1}{2} \rho S V^2} \quad (2.9)$$

2.5. Hambatan Kapal

2.5.1. Hambatan kapal *monohull*

Hambatan kapal adalah gaya fluida pada kapal yang arahnya berlawanan terhadap gerakan kapal pada kecepatan tertentu (Harvald, 1983). Biasanya,

koefisien hambatan total kapal (C_T) digunakan untuk merepresentasikan hambatan total kapal.

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} \quad (2.10)$$

dimana;

C_T = koefisien hambatan total kapal (*non dimensional*)

P = massa jenis fluida (kg/m^3)

v = kecepatan kapal (m/s)

S = luas permukaan basah lambung kapal (m^2)

Hambatan total kapal merupakan total dari keseluruhan gaya yang bekerja melawan arah gerakan kapal. Nilai hambatan kapal yang didapatkan pada kondisi air tenang. Besaran hambatan total akan naik secara kontinu seiring dengan bertambahnya kecepatan kapal.

Menurut Lewis (1998), hambatan total dalam kapal dapat dibagi menjadi beberapa komponen yaitu :

1. Hambatan viskos, yaitu merupakan hambatan yang muncul karena adanya efek viskositas dari fluida tersebut. Hambatan viskos mempunyai dua komponen utama yaitu hambatan gesek dan hambatan tekan (*friction and pressure resistance*). Komponen tersebut memiliki arah sumbu kerja yang berbeda. Sumbu kerja hambatan tekan adalah tegak lurus terhadap permukaan lambung kapal (gaya normal). Sedangkan arah sumbu kerja hambatan gesek adalah tangensial mengikuti garis arus (*stream line*) terhadap lambung kapal disebut gaya gesek.

Hambatan viskos dapat diperkecil dengan beberapa cara, diantaranya adalah membuat bentuk lambung seramping mungkin atau membuat nilai rasio panjang kapal terhadap lebar kapal (L/B) setinggi mungkin. Model yang ramping ini akan memberikan perbedaan tekanan yang sangat kecil di bagian haluan dan buritan kapal. Selain itu menurunkan faktor bentuk K serta menaikkan nilai *Reynolds Number* (Re) juga dapat menurunkan komponen gaya normal hambatan viskos.

2. Hambatan gesek (*frictional resistance*), merupakan komponen gaya dari hambatan viskos. Hambatan ini timbul akibat dari gesekan antara lambung

kapal terhadap fluida. Hal-hal yang mempengaruhi hambatan ini adalah viskositas (kekentalan fluida disekitar lambung kapal), kecepatan dan luas permukaan basah kapal. Hambatan gesek diformulasikan sebagai berikut :

$$R_F = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_F \quad (2.11)$$

dimana;

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

V = kecepatan kapal (m/s)

S = luas permukaan basah (m^2)

C_F = Koefisien hambatan gesek

Besaran koefisien hambatan gesek (C_F) didapatkan melalui eksperimen panjang dimana eksperimen yang dilakukan dengan mengasumsikan luasan daerah lambung kapal yang tercelup air sebagai luasan dari pelat datar yang besarnya adalah sama.

Pada tahun 1957 ITTC mengeluarkan formula C_F sebagai berikut

$$C_F = \frac{0.075}{(\text{Log}_{10} Re - 2)^2} \quad (2.12)$$

$$Re = \frac{L V_s}{\nu} \quad (2.13)$$

dimana

Re = Reynolds Number

L = panjang kapal (m)

V_s = kecepatan kapal (m/s)

ν = viskositas kinematis (m^2/s)

Nilai C_F yang memiliki arah gerak tangensial terhadap lambung kapal sangat dipengaruhi oleh besarnya angka *Reynolds Number* (Re). Besarnya Re bergantung pada tingkat kemulusan permukaan lambung kapal serta bentuk aliran fluida. Jika Re kurang dari 2×10^5 maka aliran fluida tersebut dinamakan aliran *laminar*. Jika Re berada antara $2 - 3 \times 10^5$ maka aliran

tersebut dinamakan aliran transisi. Jika Re lebih dari 3×10^5 maka aliran tersebut dinamakan aliran turbulen.

3. Hambatan tekan (*pressure resistance*) merupakan komponen kedua dari hambatan viskos yang arah kerjanya tegak lurus terhadap lambung kapal. Hambatan ini dipengaruhi oleh tekanan yang bekerja pada lambung kapal di bawah permukaan air. Besarnya tekanan pada haluan kapal akan sangat besar dikarenakan fluida akan langsung menabrak haluan kapal. Kecepatan aliran fluida akan bertambah ketika fluida melewati bentuk lambung kapal ke arah buritan kapal. Besarnya normal komponen merupakan hasil dari perkalian antara faktor K dengan koefisien hambatan gesek C_F .

$$C_V = KC_F \quad (2.14)$$

4. Hambatan gelombang (*wave-making resistance*), merupakan komponen hambatan yang berkaitan dengan energi yang dikeluarkan secara terus menerus oleh kapal pada gelombang yang terbentuk pada permukaan air. Hambatan ini disebabkan oleh gelombang yang dihasilkan oleh gerak kapal. Gelombang yang dihasilkan memiliki dua sistem gelombang, yaitu *transversal* dan *divergen*.

Sistem gelombang *transversal* memiliki bentuk pola melintang tegak lurus dengan arah gerakan kapal. Kecepatan gerak gelombang ini sama dengan kecepatan gerak kapal. Pada kecepatan rendah, beberapa puncak gelombang akan muncul di sepanjang lambung kapal, hal ini dikarenakan panjang gelombang dari sistem ini lebih pendek dari pada panjang kapal. Namun, bila kecepatan kapal ditingkatkan, maka kecepatan gelombang ini akan naik. Ketika panjang gelombang mendekati panjang kapal, maka *wave-making* hambatan akan naik dengan sangat cepat.

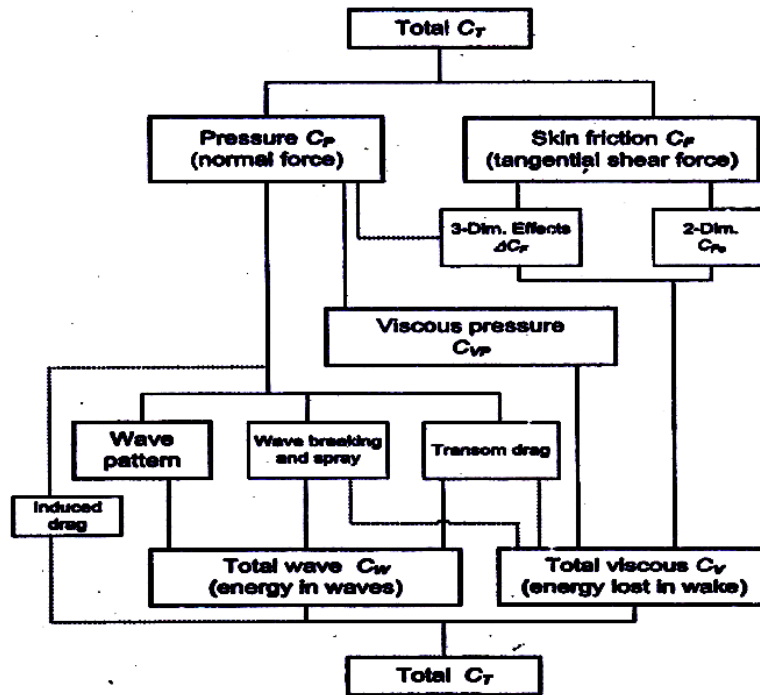
Sedangkan pola gelombang *divergen* terdiri dari dua gelombang yang dihasilkan oleh kontak fluida dengan haluan kapal dan juga kontak fluida dengan buritan kapal. Interaksi dari dua gelombang tersebut akan menghasilkan *hollow* dan *hump*. Kondisi *hollow* terjadi apabila gelombang akibat haluan dan buritan berinteraksi pada fase yang sama dimana keadaan

ketika dua puncak gelombang bertemu pada waktu yang sama, sehingga timbul superposisi gelombang yang sangat tinggi sehingga disebut dengan bukit (*hump*). Namun ketika kedua gelombang tersebut bertemu pada fase yang berlawanan maka akan terjadi pengurangan amplitudo gelombang. Kondisi ini dinamakan lembah (*hollow*).

Komponen hambatan ini dapat dihitung sebagai pengaruh dari perbandingan panjang dan lebar kapal (L/B), displasemen, bentuk lambung, dan *Froude number*.

5. Hambatan pusar (*eddy resistance*), adalah komponen hambatan yang terkait dengan energi yang terbawa pergi oleh pusaran yang dihasilkan dari lambung. Hambatan ini disebabkan oleh energi yang dihasilkan oleh pusaran yang terjadi di daerah buritan kapal, dimana kelengkungan kurva badan kapal terlalu tajam sehingga aliran air tidak lagi dapat mengikutinya dan selanjutnya akan ‘pecah’.
6. Hambatan gelombang (*wave-making resistance*) dan Hambatan pusar *eddy resistance* dapat dikelompokkan menjadi satu dan disebut sebagai hambatan sisa (*residual resistance*)
7. Hambatan udara (*air resistance*), adalah komponen hambatan yang disebabkan oleh udara dan angin. Hal-hal yang mempengaruhi hambatan ini adalah proyeksi luas penampang dari bangunan kapal di atas permukaan air. Nilainya sekitar 4-8% dari hambatan total.

Pada Gambar 2.8 Molland dkk (2011) menjelaskan bahwa ketika mempertimbangkan gaya yang bekerja pada lambung kapal, hambatan total dihasilkan dari penjumlahan dua komponen utama yaitu gaya normal (*normal force*) atau gaya tekan (C_P) dengan arah gaya tegak lurus terhadap lambung kapal dan gaya tangensial (*tangential shear*) atau gaya gesek (C_F) dengan arah tangensial terhadap lambung kapal.



Gambar 2.13 Diagram komponen hambatan kapal (Molland dkk, 2011)

Total gaya gesek (C_F) terdiri dari gaya gesek 2 dimensi pelat datar dan pengaruh 3 dimensi. Sedangkan hambatan tekan (C_P) terdiri dari tekanan viskos (C_{VP}) dan total hambatan gelombang (C_W). Komponen tekanan viskos (C_{VP}) dipisahkan dari hambatan tekan (C_P) dan digabungkan dengan gaya gesek (C_F) menjadi total hambatan viskos (C_V).

$$\begin{aligned}
 C_T &= C_P + C_F \\
 C_T &= (C_W + C_{PV}) + C_F \\
 &= C_W + (C_{PV} + C_F) \\
 &= C_W + C_V
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Total hambatan gelombang terdiri dari *wave breaking and spray*, *transom drag*, *wave pattern* dan *induced drag*. *Wave breaking and spray* dan *transom drag* terjadi pada jenis kapal cepat, sedangkan *induced drag* terjadi pada jenis kapal *yachts*, dimana gaya tersebut dihasilkan dari gaya angkat yang disebabkan oleh kemudi dan *keel*.

Ketika memprediksi daya kapal menggunakan uji model eksperimen, hasil uji hambatan model kapal harus diskalakan atau diekstrapolasi sehingga menjadi hasil hambatan kapal untuk ukuran sebenarnya (Molland dkk, 2011). Terdapat 2 metode untuk mengekstrapolasi hasil hambatan model kapal, yaitu :

1) Pendekatan Tradisional : Froude

Pada tahun 1970an Foude memperkenalkan bahwasanya komponen hambatan total kapal terdiri dari 2 yaitu hambatan gesek (*skin friction resitance*) dan hambatan sisa (*residuary resitance*). Jika direpresentasikan dalam koefisien hambatan, maka

$$C_T = C_F + C_R \quad (2.16)$$

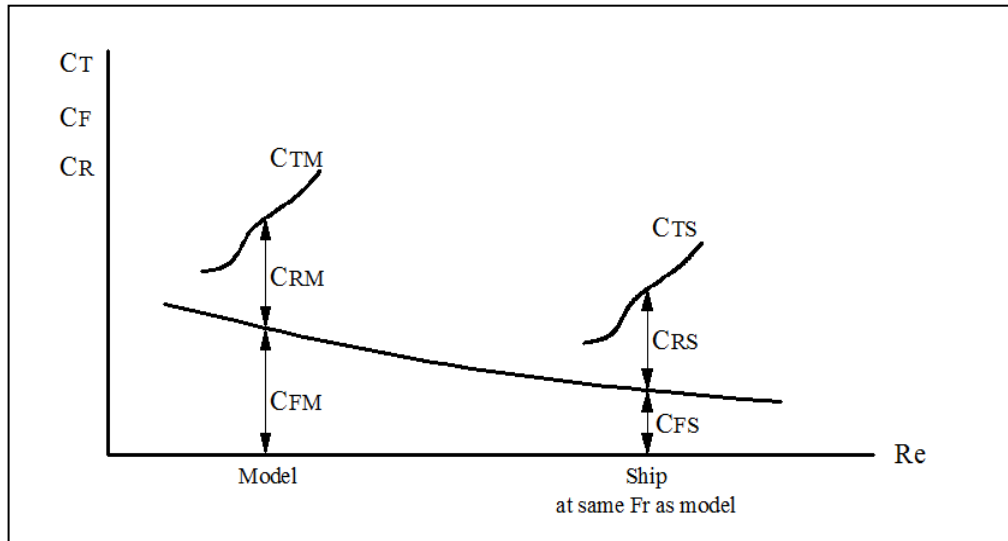
C_T adalah koefisien hambatan total dan C_F adalah koefiseien hambatan gesek yang diestimasi dari data pelat datar yang mempunyai panjang, luas permukaan basah dan kecepatan yang sama terhadap model kapal maupun kapal yang sesungguhnya. C_R adalah koefisien hambatan sisa.

Untuk mendapatkan kecepatan model kapal yang sama dengan kecepatan kapal sesungguhnya dapat menggunakan Bilangan *Froude* atau *Froude Number* (Fr) yaitu:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (2.17)$$

Fr adalah *Froude Number* (*non dimensional*), v adalah kecepatan kapal (m/s), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2) dan L adalah panjang kapal (m). Sehingga untuk Fr yang sama dan mengikuti hukum *Froude* maka $C_{RS} = C_{RM}$, dimana koefisien hambatan sisa kapal sama dengan koefisien hambatan sisa model. Sehingga untuk mendapaatkan koefisien hambatan total kapal sesungguhnya adalah

$$\begin{aligned} C_{TS} - C_{FS} &= C_{TM} - C_{FM} \\ C_{TS} &= C_{TM} - C_{FM} + C_{FS} \\ C_{TS} &= C_{TM} - (C_{FM} - C_{FS}) \end{aligned} \quad (2.18)$$



Gambar 2.14 Ekstrapolasi model pendekatan Foude (Molland dkk, 2011)

2) Pendekatan faktor bentuk (*Form Factor*) : Hughes

Pada tahun 1950an Hughes menggunakan efek bentuk lambung kapal untuk diperhitungkan dalam ekstrapolasi. Sehingga menurut Hughes komponen hambatan total terdiri dari hambatan viskos (*viscous resistance*) dan hambatan gelombang (*wave resistance*). Jika direpresentasikan dalam koefisien hambatan, maka :

$$C_T = C_V + C_W \quad (2.19)$$

dimana

$$C_V = C_F + kC_F$$

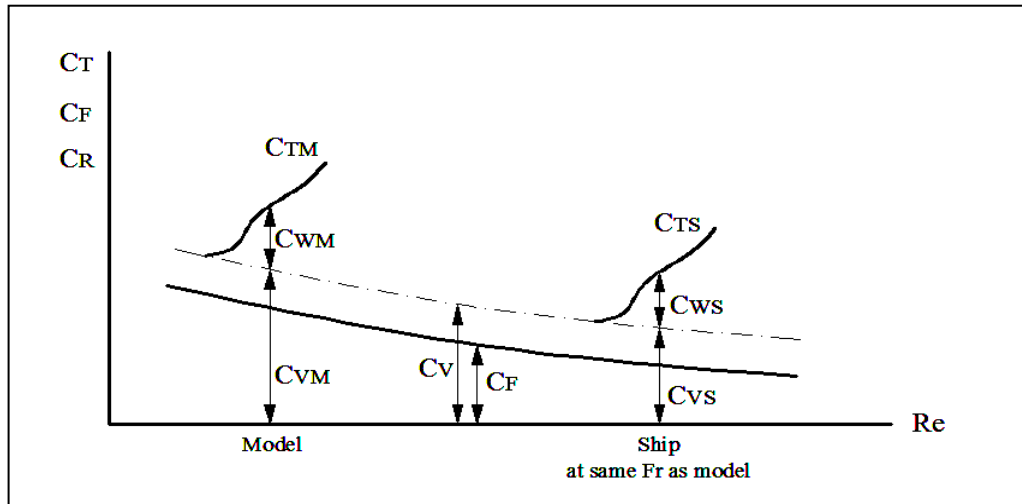
$$C_V = (1+k)C_F \quad (2.20)$$

sehingga

$$C_T = (1+k)C_F + C_W \quad (2.21)$$

C_T adalah koefisien hambatan total. C_V adalah koefisien hambatan viskos yang melibatkan *skin friction* (C_F) dan *viscous pressure* (kC_F). Berdasarkan hukum *Froude*, $C_{WS} = C_{WM}$. Koefisien hambatan gelombang kapal sama dengan koefisien hambatan model kapal, sehingga untuk mendapatkan koefisien hambatan total kapal adalah:

$$\begin{aligned}
C_{TS} - C_{VS} &= C_{TM} - C_{VM} \\
C_{TS} &= C_{TM} - C_{VM} + C_{VS} \\
C_{TS} &= C_{TM} - [(1+k)C_{FM}] + [(1+k)C_{FS}] \\
C_{TS} &= C_{TM} - (1+k)(C_{FM} - C_{FS}) \tag{2.22}
\end{aligned}$$



Gambar 2.15 Ekstrapolasi model pendekatan Hughes (Molland dkk, 2011)

2.5.2. Hambatan kapal katamaran

Hambatan kapal merupakan faktor terpenting yang menentukan daya kapal yang dibutuhkan (Barras, 2004). Berikut merupakan beberapa cara untuk menghitung hambatan kapal:

- *Model Testing*
- *Empirical Methods*
- *Computational Techniques*

Perhitungan dan analisis menunjukkan bahwa katamaran dan konfigurasi trimaran memberikan jumlah yang lebih rendah resistensi dari *monohull* satu dengan perpindahan yang sama. Faktor utama dan paling signifikan adalah geometri lambung kapal dan pengaturan permukaan kapal yang dibasahi. (Murdijanto et.al., 2011).

Kapal katamaran cenderung memiliki sarat air yang rendah sehingga kapal ini dapat dioperasikan pada perairan dangkal. Bentuk lambung yang langsing (*slender*) dapat memperkecil timbulnya sibakan air (*wave wash*) dibanding kapal lambung

tunggal (*monohull*). Komponen hambatan kapal katamaran memiliki fenomena yang lebih kompleks dibanding dengan *monohull*, sebab adanya pengaruh interaksi diantara dua lambung kapal yang menimbulkan interferensi hambatan kapal.

Interferensi hambatan tersebut dalam masing-masing komponen hambatannya yaitu interferensi komponen hambatan viskos dan hambatan gelombang. Interferensi hambatan viskos disebabkan oleh aliran air yang tidak simetri (*asymmetric flow*) di sekitar lambung, yang mana memberikan pengaruh pada formasi lapisan batas (*boundary layer*) dan *longitudinal vortices*. Sedangkan interferensi gelombang disebabkan interaksi dari gelombang yang ditimbulkan oleh masing-masing lambung kapal katamaran. Interferensi hambatan katamaran didapatkan dengan cara membandingkan hambatan katamaran dengan penjumlahan hambatan dari masing-masing lambung

Rumus empiris yang digunakan berdasarkan persamaan dari penelitian oleh Jamaluddin et al. (2012) dimana merupakan modifikasi dari metode pada Molland et al. (1996) dimana persamaan digunakan untuk menghitung hambatan viskositas pada kapal katamaran dan interferensi gelombang sebagai berikut

$$C_T = (1 + \beta k)C_F + \tau C_W \quad (2.23)$$

Dimana;

- C_T = Koefisien Hambatan total
- $(1 + \beta k)$ = viskositas *formfactor*
- C_F = Koefisien hambatan gesek
- τ = Inteferensi hambatan gelombang
- C_W = Koefisien hambatan gelombang

C_f didapatkan dari melalui persamaan pada ITTC-57 dan $(1 + \beta k)$ dan τ didapatkan melalui persamaan pada penelitian Jamaluddin et al. (2012).

$$(1 + \beta k) = 3.03 (L/Vol^{1/3})^{-0.4} + 0.016 \left(\frac{S}{L}\right)^{-0.65} \quad (2.24)$$

$$\tau = 0.068 \left(\frac{S}{L}\right)^{-1.38}, \text{ at } Fr = 0.19$$

$$\tau = 0.359 \left(\frac{S}{L}\right)^{-0.87}, \text{ at } Fr = 0.28$$

$$\tau = 0.574 \left(\frac{S}{L}\right)^{-0.33}, \text{ at } Fr = 0.37$$

$$\tau = 0.790 \left(\frac{S}{L}\right)^{-0.14}, \text{ at } Fr = 0.47$$

$$\tau = 0.504 \left(\frac{S}{L}\right)^{-0.31}, \text{ at } Fr = 0.56$$

$$\tau = 0.501 \left(\frac{S}{L}\right)^{-0.18}, \text{ at } Fr = 0.65$$

Pada penelitian ini digunakan analisis hambatan kapal melalui perhitungan komputer, dan pengujian melalui eksperimen untuk melakukan validasi dari simulasi CFD.

2.6. Simulasi CFD

Computational Fluid Dynamics merupakan suatu program yang dapat digunakan untuk menganalisis aliran fluida beserta karakteristik yang ditimbulkan akibat Bergeraknya suatu benda pada fluida tersebut. Persamaan dasar yang digunakan pada CFD merupakan persamaan yang didasarkan pada dinamika fluida yaitu persamaan kontinuitas, momentum dan energi. Persamaan-persamaan tersebut merupakan pernyataan matematis dari tiga prinsip dasar fisika sebagai berikut:

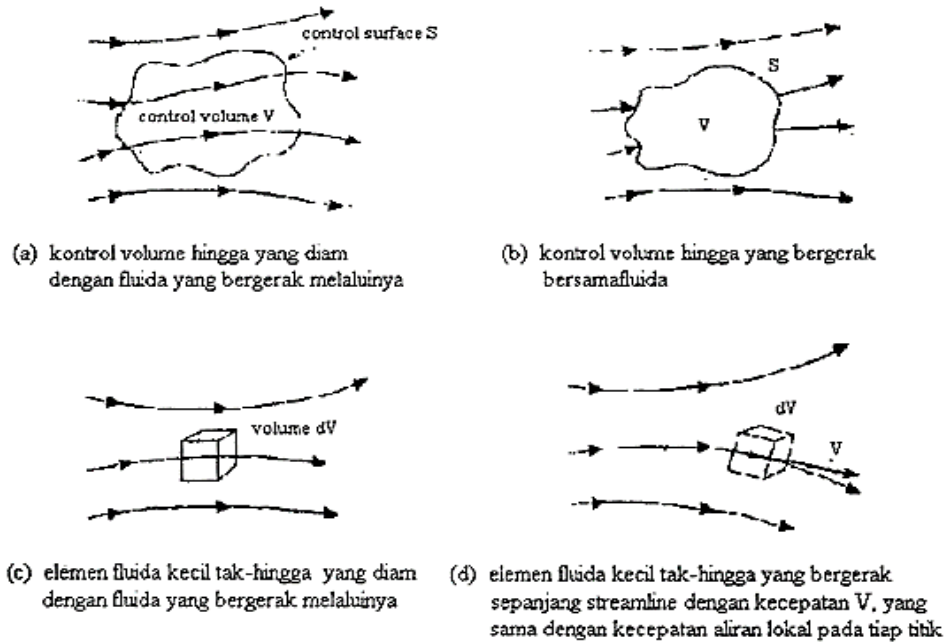
1. Hukum kekekalan massa
2. Hukum kedua Newton, $F = m.a$
3. Hukum kekekalan energi

Pada proses mendapatkan persamaan gerak fluida maka terdapat tiga hal yang harus menggunakan prinsip-prinsip sebagai berikut:

1. Memilih prinsip fisika dasar dari hukum-hukum fisika yaitu hukum kekekalan massa, hukum kedua Newton dan hukum kekekalan energi.
2. Menetapkan prinsip-prinsip fisika tersebut dalam pemodelan aliran.

3. Pada penerapan ini, dapat diuraikan persamaan matematis yang meliputi prinsip-prinsip fisika.

Pada proses pemodelan aliran maka dapat digunakan beberapa metode yaitu metode kontrol volume dan metode elemen fluida. Pemilihan metode aliran dapat dijelaskan melalui gambar dibawah ini



Gambar 2.16 Model-model aliran (a & b) pendekatan kontrol volume hingga, (c & d) model-model pendekatan elemen fluida tak hingga (Anderson, 1995)

Pada pemodelan dengan menggunakan prinsip (a) dan (c) maka dapat diperoleh persamaan yang disebut dengan *conservation form*. Sedangkan pemodelan dengan menggunakan prinsip (b) dan (d) maka akan diperoleh persamaan yang disebut *non conservation form*. Dari penurunan keempat model tersebut, pada dasarnya akan menghasilkan persamaan yang sama tetapi dengan proses matematis yang berbeda

Simulasi CFD pada penelitian ini menggunakan software *NUMECA*. Untuk proses *solver* pada *NUMECA* menggunakan *ISIS-CFD flow solver* yang dikembangkan oleh *EMN*, yakni menggunakan *incompressible unsteady Reynolds-averange navier stoke equation (RANSE)*. *Solver* berdasarakan dari *finite volume*

method. Untuk *mass*, *momentum*, dan *volume fraction* memiliki persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_d) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_i (\mathbf{U} - \mathbf{U}_d) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S (\tau_{ij} I_j - p I_i) \cdot \mathbf{n} dS + \int_S \rho g_i dV \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V c_i dV + \int_S c_i (\mathbf{U} - \mathbf{U}_d) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (2.27)$$

Pada persamaan di atas, V merupakan kontrol volume, yang dibatasi oleh *surface* tertutup S dengan *normal vector* n yang bergerak pada kecepatan U_d , U adalah kecepatan dan p adalah *pressure*, sedangkan, τ_{ij} merupakan *turbulent stress tensor*, g_i adalah komponen dari *vector* gravitasi, I_j adalah *vector* dimana komponennya nol kecuali untuk $j = 1$ dan c_i adalah *volume fraction* pada fluida i dan digunakan untuk membedakan keberadaan ($c_i = 1$) dan ketiadaan dari ($c_i = 0$) pada fluida i .

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}) = \tau_{t_{ij}} S_{ij} - \beta \cdot \rho \omega k \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) = P_\omega - \beta \rho \omega^2 + \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.29)$$

Turbulence model menggunakan SST $k - \omega$ model (SST untuk *shear-stress transport*), dimana k adalah *turbulent kinetic energy* dan ω adalah *specific dissipation rate*. Fungsi utama dari model adalah zona *blending* dari *modeling*, menggunakan Wilcox's $k - \omega$ model untuk aliran yang dekat dengan *solid walls* dan menggunakan standar $k - \varepsilon$ model (transformasi menjadi $k - \omega$ formula) untuk aliran yang dekat dengan *boundary layer edges* dan di dalam *free shear layers*. Pergerakan persamaan untuk k dan ω adalah representasi berikut, dimana koefisien $F1$ model bercampur dengan koefisien dari ω dan ε .

Bidang kecepatan dapat diperoleh dari persamaan konservasi momentum dan bidang tekanan yang diekstrak dari konservasi kondisi batas massa, atau persamaan kontinuitas yang berubah menjadi persamaan tekanan. Pada aliran turbulen, penambahan persamaan peralihan untuk variasi model yang diselesaikan ke dalam

bentuk yang mirip dengan persamaan momentum dan dapat didiskresi dan diselesaikan menggunakan prinsip yang sama. Fase aliran *incompressible* dan *non-compressible* dimodelkan melalui penggunaan persamaan konservasi untuk setiap *volume fraction fase*

Kode-kode pada CFD terstruktur dari algoritma numerik yang dapat menyelesaikan masalah aliran fluida. Terdapat tiga kode yang bekerja pada CFD:

1) **Preprocessor**, yaitu tahap awal pemrograman ini terdiri dari input masalah aliran untuk CFD melalui *interface* kemudian mengubahnya. Tahap ini secara garis besar adalah membuat model dengan *type / bentuk* yang dapat dideskripsi oleh *solver*, meliputi:

- a. Membentuk geometri benda dan daerah sekeliling benda sebagai *domain / boundary* komputasi.
- b. Membentuk *Grid generation* atau membagi *domain* yang telah ditentukan menjadi bagian yang lebih kecil (subdomain).
- c. Penentuan kondisi – kondisi yang dimiliki maupun dialami oleh model misal: penentuan sifat-sifat fluida, seperti pendefinisian nilai kecepatan, temperatur fluida, kondisi permukaan benda dan lain-lain.
- d. Penentuan kondisi batas model geometri, lokasi pembuatan kondisi batas harus ditentukan baik pada daerah disekeliling benda maupun pada aliran yang diperhitungkan.
- e. Penentuan besar kecilnya atau kekasaran *Grid (Mesh)*. Jumlah *Cell / bagian kecil* dalam *Grid (Mesh)* menentukan akurasi penyelesaian CFD.
- f. Pada umumnya semakin banyak *Cell* semakin akurasi penyelesaiannya. Daerah yang memiliki perubahan bentuk yang sangat tajam, biasanya proses *Meshing* dilakukan dengan sangat halus, sedang untuk daerah yang lain dilakukan agak kasar.

2) *Solver* (penyelesaian perhitungan)

Solver dibagi menjadi tiga jenis, yaitu *finite difference*, *finite element* dan *finite volume*. Secara umum metode numerik *solver* tersebut terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Pendeteksian bentuk-bentuk sesuai keperluan untuk *running* dan *Meshing*; menjadi *surface*, *edge*, *point* dan *solid*.
- b. Pembuatan *Mesh* dan memasukkan label kondisi.
- c. Penyelesaian dari persamaan aljabar menggunakan iterasi dan *loop*.

3) *Post Processor & Visualisasi*

Disini proses perhitungan secara iterasi kemudian memberikan hasil *file* yang kemudian dapat ditampilkan dan diolah sesuai dengan item yang ingin dianalisis contoh *velocity*, *pressure*, dll.

Salah satu metode yang digunakan untuk membuktikan keakuratan hasil simulasi adalah dengan menggunakan *Grid Independence*. *Grid Independence* merupakan metode untuk mengetahui pengaruh jumlah elemen terhadap hasil simulasi. Penggunaan jumlah elemen yang lebih besar pada model dapat menghasilkan hasil yang mendekati sebenarnya. Namun tidak selamanya jumlah elemen yang besar akan menjamin hasil simulasi akurat. Selain jumlah elemen, distribusi elemen juga penting untuk diperhatikan. Jumlah elemen yang besar mempengaruhi lamanya waktu *solver*. *Grid Independence* dilakukan untuk menghasilkan hasil simulasi yang paling optimal yang artinya selisih persentase hasil dari simulasi CFD tersebut terhadap jumlah total elemen kurang dari 5% sehingga waktu iterasi yang dihasilkan dapat relatif minimum dengan perbedaan jumlah elemen lebih kurang 1,5-2 kali lebih banyak dari jumlah elemen sebelumnya. Selain dari jumlah total elemen, waktu iterasi juga dipengaruhi oleh spesifikasi komputer yang digunakan dalam simulasi.

2.7 Pengujian Hambatan Kapal di *Towing Tank*

Pada dasarnya hambatan kapal dapat diestimasi dengan menggunakan suatu pendekatan analisis dan hidrostatis dengan simulasi CFD. Namun demikian percobaan secara eksperimental juga diperlukan karena memiliki tingkat

keakurasian yang lebih tinggi. Berdasarkan hal tersebut penelitian menggunakan model kapal berukuran kecil yang memiliki skala terhadap skala kapal yang sebenarnya sebagai media model uji kapal. Dalam pengujian model ini, dulakukan pada *Towing Tank*. Data yang diperoleh saat pengujian model uji tarik bukanlah hambatan dari kapal yang sebenarnya, melainkan hanya hambatan dari model uji kapal. Selanjutnya data yang diperoleh dari pengujian model kapal ini akan dikonversi dengan perhitungan matematis didasarkan pada perhitungan *Froude*, sehingga didapatkan nilai hambatan kapal yang sebenarnya.

Dalam pengujian hambatan di *Towing Tank*, ukuran kapal sebenarnya dirubah menjadi ukuran skala model kapal dengan menggunakan hukum perbandingan. Hukum perbandingan tersebut harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut (Digul Siswanto, 1998). Ada beberapa hukum kesamaan atau perbandingan yaitu: hukum kesamaan geometris, kesamaan kinematis dan kesamaan dinamis.

2.7.1. Kesamaan geometris

Kondisi geometris yang dapat terpenuhi dalam suatu model pengujian hanya kesamaan geometris yang dimensinya linear dengan model skala penuh, misalnya: Hubungan antara kapal dan model dinyatakan dengan λ dimana:

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{T_s}{T_m} \quad (2.30)$$

Dimana;

λ = Skala perbandingan

L_s = Panjang kapal skala penuh (m) L_m = Panjang kapal model (m)

B_s = Lebar kapal skala penuh (m) B_m = Lebar kapal model (m)

T_s = Sarat kapal skala penuh (m) T_m = Saraat kapal model (m)

2.7.2. Kesamaan kinematis

Kesamaan kinematis antara model dan kapal lebih adalah hubungan antara kecepatan model dengan kecepatan kapal sebenarnya. Adanya skala yang menunjukkan hubungan antara angka *Froude* model dan angka *Froude* kapal yang

sebenarnya merupakan kesamaan kinematis yang digunakan pada pengujian hambatan pada model kapal.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.L}} \quad (2.31)$$

atau

$$\frac{V_m}{\sqrt{g.L_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{g.L_s}} \quad (2.32)$$

Dimana;

$Fr = Froude number$

$V_s =$ Kecepatan kapal (m/s)

$L_s =$ Panjang kapal skala penuh (m)

$V_m =$ Kecepatan kapal model (m/s)

$L_m =$ Panjang kapal model (m)

$g =$ Percepatan gravitasi (m/s²)

2.7.3. Kesamaan dinamis

Gaya-gaya yang bekerja berkenaan dengan gerakan fluida di sekeliling model dan kapal pada setiap titik harus mempunyai besar dan arah yang sama, dalam hal ini satuan harga Reynolds menggambarkan perbandingan gaya-gaya inersia dengan viskositas:

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \quad (2.30)$$

$$\frac{V_m L_m}{\nu} = \frac{V_s L_s}{\nu} \quad (2.31)$$

Dimana;

$Re =$ Reynolds number

$V_s =$ Kecepatan kapal (m/s)

$L_s =$ Panjang kapal skala penuh (m)

$V_m =$ Kecepatan kapal model (m/s)

$L_m =$ Panjang kapal model (m)

$g =$ Percepatan gravitasi (m/s²)

$\nu =$ viskositas kinematis fluida (m²/s)

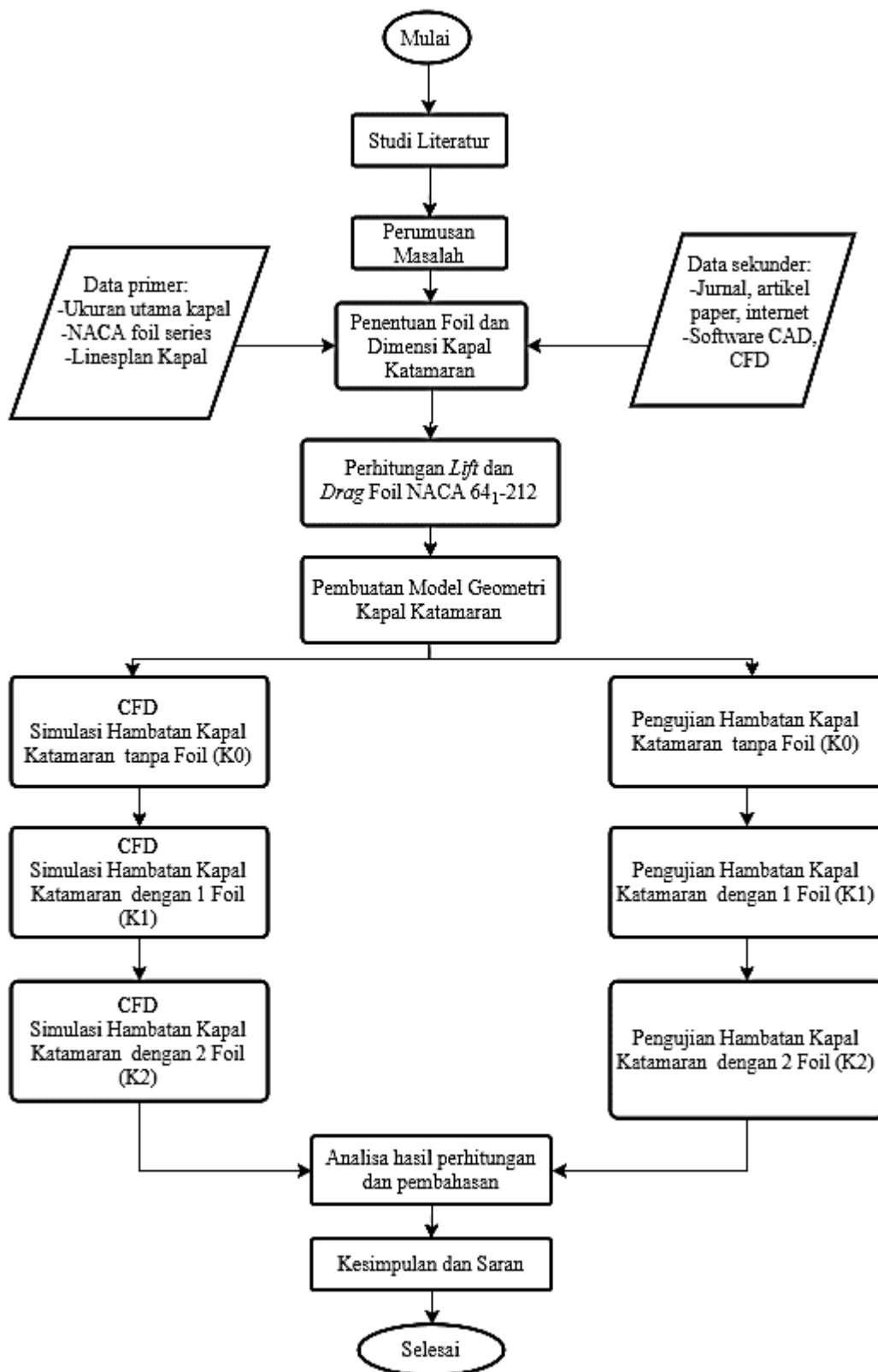
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian (*Flow Chart*)

Penyusunan penelitian/tesis ini didasarkan pada sistematika yang diuraikan berdasarkan urutan kegiatan sebagaimana pada diagram alir gambar 3.1. Kegiatan penelitian ini dimulai dengan tahap pertama yaitu, studi literatur yang meliputi artikel jurnal, artikel posiding, *paper*, *software* CFD. Kemudian dilanjutkan dengan identifikasi dan perumusan masalah. Pengumpulan data kapal dan data penunjang diperoleh dari data primer yang berupa ukuran utama kapal, gambar rencana garis kapal/*linesplan* dan jenis foil (*foil type*) NACA. Pembuatan model kapal katamaran, model foil NACA menggunakan *software CAD* merupakan tahapan setelah diperoleh data primer. Tahap berikutnya adalah pembuatan model CFD diikuti perhitungan numerik dan pengujian eksperimen. Perhitungan numerik dan pengolahan data dilakukan dengan bantuan *software* CFD dan sedangkan pengujian eksperimen dilakukan di laboratorium hidrodinamika ITS. Pada akhirnya dilanjutkan ke tahap analisis data hasil dari perhitungan CFD dan hasil eksperimen. Tahap analisis dan pembahasan urutan berikutnya hasil pengolahan dan perhitungan CFD dan hasil pengujian model kapal dengan uji tarik di laboratorium hidrodinamika Teknik perkapalan ITS. Hasil akhir dari pembahasan ini kemudian diperoleh didapatkan *output* yang bersesuaian dengan tujuan, sehingga diperoleh kesimpulan sebagai hasil akhir dari penelitian ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2. Studi Literatur

Dalam tahap studi literatur ini, penulis mencari sumber informasi yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Secara keseluruhan, penelitian ini meliputi pemodelan numerik dengan menggunakan komputer dan pengujian model menggunakan metode eksperimen pada *Towing Tank* di Laboratorium Hidrodinamika Teknik Perkapalan ITS. Penelitian tentang desain penggunaan *hydrofoil* pada kapal katamaran dimaksudkan untuk mengkaji lebih dalam mengenai hubungan antara penambahan *hydrofoil* diantara *demihull* kapal katamaran terhadap hambatan dan kebutuhan daya yang dibutuhkan. Dalam studi literatur dipelajari tinjauan teori yang mendasari dalam perancangan, pemodelan, perhitungan foil pada umumnya dan foil pada kapal katamaran pada khususnya yang akan digunakan dalam penelitian. Literatur yang dipakai sebagai referensi yaitu berupa buku, artikel jurnal, artikel prosiding, pendapat para ahli, internet dan lain-lain. Dasar teori dan referensi yang juga dijadikan dasar untuk pengolahan data dan membahas hasil penelitian antara lain: *hydrofoil*, kapal katamaran, dan hambatan kapal.

3.3. Pengumpulan Data

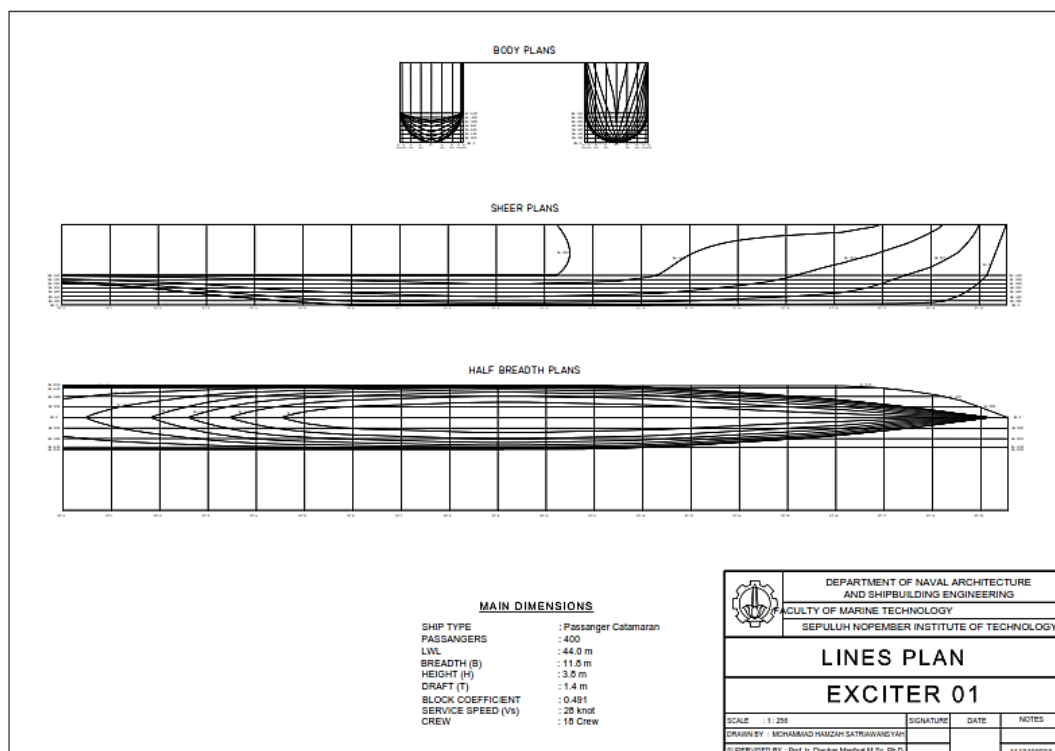
Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam rangka mencapai tujuan penelitian. Oleh karena itu prosedur yang harus dilakukan adalah mempersiapkan data-data teknis yang kemudian dilakukan pemodelan dan pengujian eksperimen serta menganalisis, meneliti berbagai macam dokumen yang berguna untuk bahan analisis. Dalam pengumpulan data terdapat dua jenis sumber data yaitu data primer dan data sekunder.

3.3.1. Data primer

Data-data primer yang berhasil dikumpulkan antara lain: data ukuran utama kapal katamaran, rencana garis kapal, dan data foil kapal. Berikut merupakan data ukuran utama kapal katamaran dan data rencana garis:

Tabel 3.1 Ukuran utama kapal katamaran

Ukuran Utama	<i>Catamaran</i>	<i>Demihull</i>
<i>LWL</i> (m)	44.00	44.00
<i>B</i> (m)	20.6	3.00
<i>T</i> (m)	1.40	1.40
<i>H</i> (m)	3.80	3.80
<i>V</i> (Knot)	28	28
<i>C_b</i>	0.491	0.491
<i>Displacement</i> (ton)	185.50	92.75



Gambar 3.2 Rencana garis kapal katamaran

3.3.2. Data sekunder

Sumber data skunder diperoleh secara tidak langsung, melalui media perantara. Pada umumnya data sekunder berupa bukti, catatan, atau laporan historis yang telah tersusun dalam arsip baik yang dipublikasikan maupun tidak dipublikasikan. Untuk mempelajari permasalahan dan penyelesaian atau solusi dilakukan dengan bantuan berbagai referensi, yaitu berupa buku, artikel, jurnal, prosiding.

3.4. Perhitungan *lift* dan *drag* foil NACA 64₁-212

Foil NACA 64₁-212 dimodelkan menggunakan bantuan software *CAD*, dan kemudian disimulasikan menggunakan bantuan software *CFD* untuk mendapatkan nilai *lift* dan *drag* dari foil. Nilai *lift* dan *drag* hasil simulasi *CFD*, kemudian dilakukan validasi dengan cara dibandingkan dengan nilai *lift* dan *drag* dari penelitian terdahulu berupa nilai *lift* dan *drag foil* NACA 64₁-212 dengan bentuk 2D atau aspek rasio tak terhingga.

3.5. Pembuatan Model Kapal Katamaran dengan dan tanpa Foil

Pembuatan model variasi model kapal katamaran tanpa foil dan katamaran dengan penambahan foil menggunakan *Software CAD*, yang untuk selanjutnya dilakukan eksperimen dan perhitungan numerik menggunakan *software CFD*.

3.6. *Benchmarking Test* pada *CFD*

Benchmarking test pada penelitian ini bertujuan untuk menguji apakah *software CFD* yang digunakan penulis dapat menghasilkan data yang akurat dengan cara mensimulasikan sebuah model *CFD* yang sebelumnya telah dilakukan oleh peneliti-peneliti lain, dan membandingkan hasil antara simulasi penulis dan simulasi dari peneliti lain.

3.7. Perhitungan Hambatan Kapal dengan Simulasi *CFD*

Software yang digunakan untuk menganalisa hambatan dari kapal katamaran dan variasinya dengan metode *Finite Volume Method* dan *Free Surface* menggunakan *multiphase*. Pada domain yang digunakan terdiri dari fluida liquid (*water*) dan udara (*air*). *Software* yang digunakan adalah *FINE™/Marine 7.2-1*. *Software* ini merupakan salah satu fitur dari *software CFD NUMECA* yang didesain untuk simulasi *CFD* dibidang perkapalan

3.8. Pengujian Hambatan kapal di *Towing Tank*

Penelitian ini melakukan perhitungan hambatan kapal dengan pengujian hambatan kapal katamaran dan variasinya pada *Towing Tank* di laboratorium hidrodinamika Fakultas Teknologi Kelautan, ITS, Surabaya. Hal penting yang perlu disiapkan untuk melakukan pengujian di *Towing Tank* adalah model uji kapal. Model uji kapal katamaran dengan skala 1:50 dibuat dari bahan fiberglass dan pembuatan foil NACA 64₁-212 dari bahan tembaga.

3.9. Analisis dan Pembahasan

Analisis dan pembahasan merupakan bagian akhir untuk mencapai hasil penelitian, yaitu didapatkan kesimpulan penelitian bersesuaian dengan tujuan yang telah ditetapkan. Analisis dan pembahasan didasarkan pada pola-pola aliran *dan gaya-gaya* yang terjadi (*Lift* dan *Drag*) pada masing-masing perubahan kombinasi lambung kapal. Penempatan *hydrofoil* dan jumlah foil dan pengaruhnya terhadap hambatan daya yang dibutuhkan, hasil perhitungan dan pengolahan semua data berupa gambar, grafik, tabel dan selanjutnya akan dilakukan proses analisis. Pembahasan didasarkan pada standar dan ketentuan dan kriteria tertentu.

BAB 4

SIMULASI CFD

4.1. Simulasi Foil tanpa Kapal

Pada sub bab ini akan dijelaskan analisis hambatan kapal tanpa foil dan dengan penambahan foil diawali dengan perhitungan *lift* dan *drag* foil menggunakan simulasi CFD. Pada penelitian ini menggunakan Foil NACA 64₁-212 berdasarkan penelitian Suastika et al. (2017). Berikut adalah detail dari dimensi foil.

Tabel 4. 1 *Type* dan Dimensi Foil

ρ (kg/m ³)	1025
<i>Chord</i> (m)	1
<i>Span</i> (m)	17.6
α	2°
<i>A</i> (m ²)	17.6
<i>AR</i>	17.6

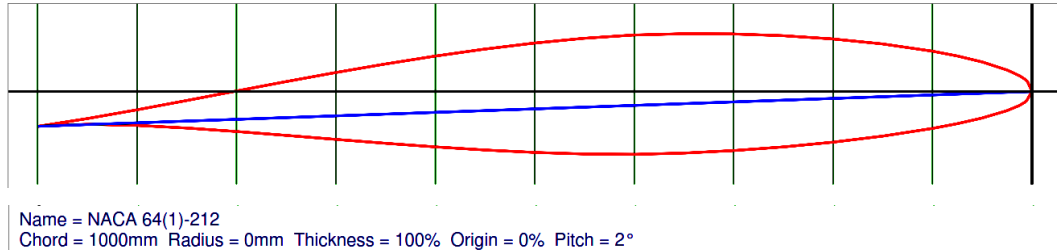
Foil NACA 64₁-212 dimodelkan menggunakan bantuan *software CAD*, dan kemudian disimulasikan menggunakan bantuan *software CFD* untuk mendapatkan nilai *lift* dan *drag* dari foil, kemudian dibandingkan dengan nilai *lift* dan *drag* dari data yang didapatkan dari website NACA berupa nilai *lift* dan *drag* foil NACA 64₁-212 dengan bentuk 2D atau *aspect ratio* tak terhingga untuk memvalidasi hasil simulasi CFD.

Foil NACA 64₁-212 yang merupakan bentuk foil *asimetris* dipilih berdasarkan penelitian dari Suastika (2018) dimana pada penelitian tersebut foil NACA 64₁-212 juga digunakan pada kapal katamaran. Ukuran foil NACA 64₁-212 dinyatakan dalam data koordinat foil yang merupakan Persentase dari panjang *Chord*. Tabel 4.3 merupakan data *offset* untuk foil NACA 64₁-212 sesuai referensi Abbot (1958).

Tabel 4.2 *Coordinat & Station NACA 64₁-212*

<i>Upper Surface</i>		<i>Lower Surface</i>	
<i>Section</i>	<i>Ordinate</i>	<i>Section</i>	<i>Ordinate</i>
<i>X-Direction</i>	<i>Y-Direction</i>	<i>X-Direction</i>	<i>Y-Direction</i>
0,000	0,0000	0,000	0,0000
0,004	0,0103	0,006	-0,0093
0,007	0,0125	0,008	-0,0111
0,011	0,0159	0,014	-0,0138
0,024	0,0222	0,026	-0,0185
0,049	0,0312	0,051	-0,0249
0,074	0,0382	0,076	-0,0297
0,099	0,0439	0,101	-0,0335
0,149	0,0529	0,151	-0,0395
0,199	0,0597	0,201	-0,0438
0,249	0,0647	0,251	-0,0468
0,299	0,0682	0,301	-0,0487
0,349	0,0701	0,351	-0,0495
0,400	0,0705	0,400	-0,0491
0,450	0,0689	0,450	-0,0470
0,500	0,0658	0,500	-0,0438
0,550	0,0615	0,550	-0,0396
0,600	0,0562	0,600	-0,0348
0,650	0,0500	0,650	-0,0294
0,700	0,0432	0,700	-0,0238
0,750	0,0359	0,750	-0,0180
0,800	0,0283	0,800	-0,0123
0,850	0,0205	0,850	-0,0071
0,900	0,0130	0,900	-0,0027
0,950	0,0060	0,950	0,00003
1,000	0,0000	1,000	0,00000

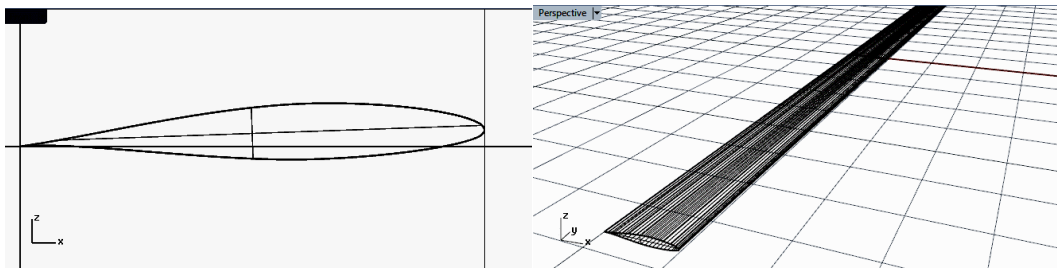
Gambar 4.1 merupakan *Profile section* dari NACA 64₁-212 ditampilkan untuk mengetahui bentuk kontur foil yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 4. 1 *Profile section* foil NACA 64₁-212

4.1.1. Pembuatan model

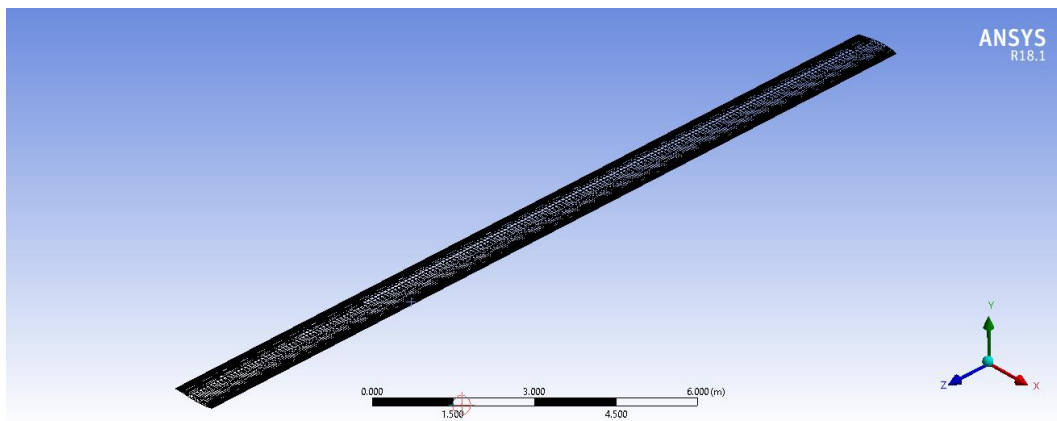
Berdasarkan data koordinat yang merupakan Persentase antara *section* dan *ordinat*, maka dimensi foil disesuaikan kebutuhan dengan panjang *chord*. Untuk mendapatkan hasil *drag* dan *lift*, maka digunakan metode pemodelan 3 dimensi, yakni foil sesuai ukuran dengan skala 1:1. Demikian juga lebar foil di-*input*-kan. Mengacu data foil tersebut kemudian di *import* menggunakan bentuk *solid* dengan format *igs*. Setelah dilakukan proses *import* model selesai, maka selanjutnya diberikan batas-batas dan *domain*, sehingga menjadi referensi dalam simulasi. Setelah ilustrasi geometri selesai, maka dilanjutkan dengan proses *Meshing*.



Gambar 4.2 Geometri dari foil NACA 64₁-212 pada CAD

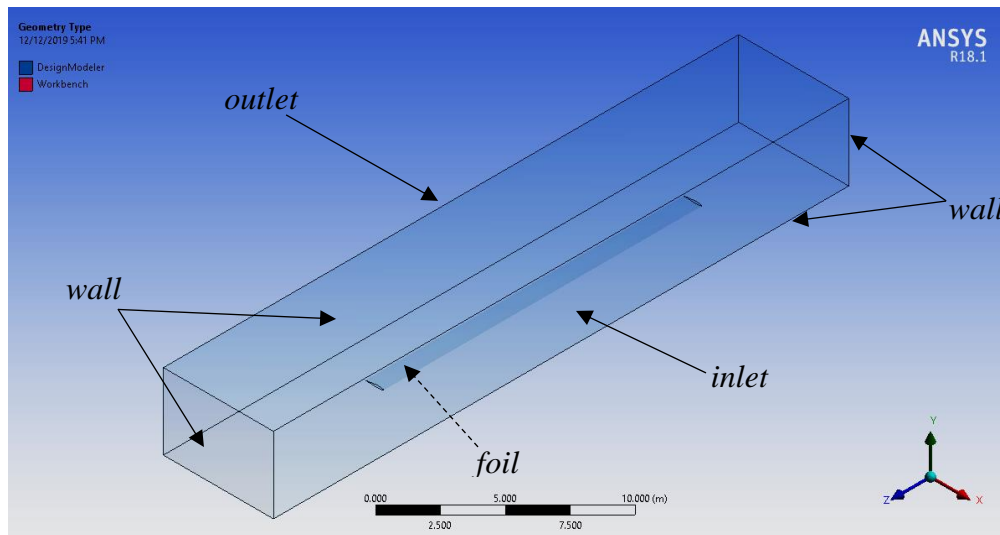
Boundary condition untuk simulasi *domain* numerik sesuai dengan penelitian Versteeg dan Malalasekera (2007) yakni pada *inlet boundary* jaraknya 1 *chord* dari *leading edge object foil* dan diberikan aliran yang *uniform* sesuai dengan kecepatan kapal. Pada *outlet boundary* jaraknya sebesar 4 *chord* dari *leading edge* dan jarak antara bagian *bottom* dan *top* dengan jarak 2 *chord* di samping kanan dan kiri.

Dalam proses pengaturan *Meshing* perlu diperhatikan bahwa *Meshing* digunakan sebagai *physical reference* CFD. Dengan pengaturan pada *relevance center*, *smoothing* dan *transition*, maka akan diatur secara otomatis. Pengaturan *Setting* menggunakan *default*, apabila di-*Setting* secara *manual* ada kemungkinan tidak sesuai dimensi *cells*-nya yang nantinya akan mengakibatkan *error*. Berikut tampilan pengaturan (*setting*) pada *Meshing*.



Gambar 4.3 *Meshing* foil NACA 64₁-212 pada CFD dengan *size function*; *curvature*, *relevance center*; *fine*, dan jumlah elemen 450343

Setelah selesai pengaturan *Mesh* kemudian dilanjutkan *Generate Mesh* atau proses pembuatan *Mesh*. Proses membuat *Mesh* membutuhkan waktu, sehingga semakin banyak jumlah *Mesh*-nya maka waktu yang dibutuhkan akan semakin lama.



Gambar 4.4 Domain dari foil NACA 64₁-212

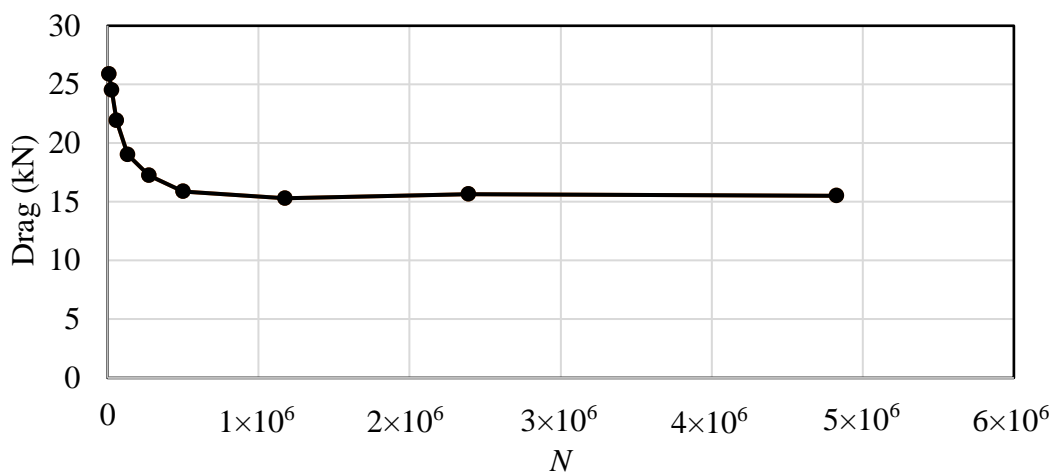
Proses selanjutnya dengan membuka *software fluent solver* dan dilakukan *import Meshing* yang sudah dilakukan ditahap sebelumnya. Langkah berikutnya dengan memasukkan nilai tertentu yang diatur (*setting*) untuk melakukan simulasi. Berikut *resume Setting value* pada *fluent*.

- Model* : $k-\omega$ *Shear stress transport* (SST)
- Material* : Fluida dari *water* dan *solid*
- Boundary condition* : *Inlet* = kecepatan fluida
Outlet = tekanan konstan
Wall = *symmetry (free slip condition)*
Foil = *wall (no slip condition)*
- Solution method* : *simple* dengan *turbulent second order*
- Rms residual target value* : Konvergen pada 10^{-5}

Setelah dilaksanakan proses *Setting value*, maka dilanjutkan tekan tombol *calculate*, sehingga *solver* akan bekerja melakukan proses perhitungan dengan iterasi sampai didapatkan nilai yang *convergen*.

4.1.2. *Grid independence*

Pencarian nilai *Grid Independence* perlu dilakukan untuk memastikan bahwa *output* dari perhitungan pada *software* CFD tidak tergantung pada *element cell* yang dihasilkan oleh *solver* pada *software*, akan tetapi dapat mewakili dari objek aslinya. Gambar 4.5 berikut ini adalah hasil proses *Grid Independence* dengan variasi jumlah *Grid* 1.5 sampai $2 \times$ *cell* sebelumnya dan deviasi yang diijinkan maksimal 2% dari jumlah *Grid* sebelumnya.



Gambar 4.5 *Grid Independence* foil NACA 64₁-212

Setelah beberapa simulasi dengan jumlah elemen yang berbeda mendapatkan hasil yang konvergen pada kecepatan 20 knot atau 10.289 m/s, didapatkan jumlah *Cells* pada 4.8×10^6 yang dilakukan pada pengujian ke-9 sesuai dengan selisih nilai *drag* yakni 1.05 %. Pada pengujian ke-6 dengan jumlah *Cells* 1.17×10^6 didapatkan selisih nilai *drag* yang ada sebesar 3.63%, akan tetapi waktu yang diperlukan *solver* untuk melakukan perhitungan memerlukan waktu 3 kali lebih cepat dari pengujian ke-9. Selanjutnya untuk simulasi numerik jumlah *cells* yang dipakai adalah 1.7×10^6 dengan pertimbangan antara hasil *output* yang masih pada *range* dibawah 5% dan waktu proses lebih cepat 3 kali dari waktu yang dibutuhkan dalam proses *solver* ke-9. Nilai *Grid Independence* sebagaimana pada gambar 4.5 dan tabel 4.3.

Tabel 4. 3 *Grid Independence* simulasi CFD

No	Element	<i>Drag</i> (kN)	Deviasi (%)
1	10000	25.858	
2	26146	24.509	5.22
3	58305	21.917	10.58
4	132452	19.014	13.25
5	274758	17.228	9.39
6	500000	15.882	7.81
7	1176188	15.305	3.63
8	2390983	15.665	-2.35
9	4825159	15.501	1.05

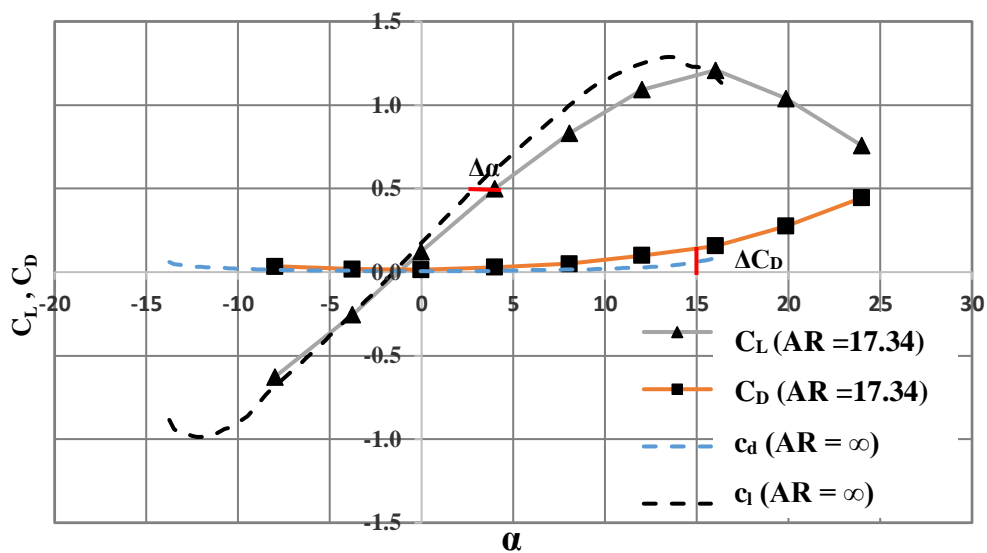
4.1.3. Simulasi *lift* dan *drag* foil NACA 64₁-212

Setelah *Grid Independence* didapatkan, kemudian dilanjutkan dengan simulasi CFD yang menggunakan jumlah *grid* yang telah ditentukan. Hasil simulasi CFD yang dibuat dengan melakukan variasi sudut serang pada kecepatan yang sama yaitu 20 *knots* (10.289 m/s) dengan tipe foil NACA 24(1)212, sehingga dapat diketahui karakteristik dari foil dengan *aspect ratio*. Dengan demikian diperoleh hasil berupa gaya *lift* (L) dan *drag* (D). Selanjutnya dilakukan perbandingan antara kedua gaya tersebut, sehingga diperoleh hasil sesuai tabel 4.4

Tabel 4.4 Hasil perhitungan *lift* dan *drag* foil NACA 64₁-212 dengan sudut serang yang berbeda menggunakan CFD

A	<i>Drag</i>	<i>Lift</i>	C _D	C _L	C _L /C _D	<i>L/D</i>	Re
-8	32.35	-590.27	0.034	-0.627	-18.25	-0.0182	1×10 ⁷
-4	16.79	-239.12	0.018	-0.254	-14.24	-14.241	1×10 ⁷
0	13.67	116.74	0.015	0.124	8.54	8.53772	1×10 ⁷
4	28.15	470.71	0.013	0.500	16.20	16.724	1×10 ⁷
8	47.48	782.32	0.024	0.831	13.80	16.4777	1×10 ⁷
12	93.89	1028.04	0.050	1.092	10.95	10.9488	1×10 ⁷
16	148.51	1138.18	0.100	1.209	7.66	7.66395	1×10 ⁷
20	258.75	979.08	0.208	1.040	3.78	3.78382	1×10 ⁷
24	419.03	712.66	0.349	0.757	1.70	1.70072	1×10 ⁷

Setelah didapatkan karakteristik foil pada beberapa sudut serang, selanjutnya hasil simulasi dari CFD perlu diverifikasi dengan hasil dari perhitungan eksperimen. Hasil perhitungan eksperimen merupakan nilai C_L/C_D dari foil pada kondisi 2 dimensi atau dengan kondisi *span* yang tak terhingga, dimana tidak ada *aspect ratio* (AR). Pada C_L tertentu, perbedaan nilai pada garis horizontal antara nilai dari CFD (AR = 17.34) dengan nilai dari eksperimen (AR = ∞).



Gambar 4.6 Koefisien *lift* (C_L, c_l) dan *drag* (C_D, c_d) Foil NACA 64₁-212 fungsi sudut serang (α) dari CFD dan dari *database* NACA, $Re = 1 \times 10^7$

Karakteristik foil yang didapatkan dari simulasi CFD diverifikasi dengan hasil teoritis, pergeseran dalam koefisien lift dan drag pada foil dengan *span* tak terhingga (foil 2D) sesuai dengan teori dari White, F.M (2011) . Untuk C_L tertentu, pergeseran secara horizontal pada α karena perbedaan *span* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta\alpha = \frac{C_L}{\pi AR} \quad (4.3)$$

Selanjutnya, untuk sudut serang tertentu (α), peningkatan C_D karena perbedaan *span* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta C_D = \frac{C_L^2}{\pi AR} \quad (4.4)$$

dimana;

$\Delta\alpha$ = Perbedaan sudut serang (α)

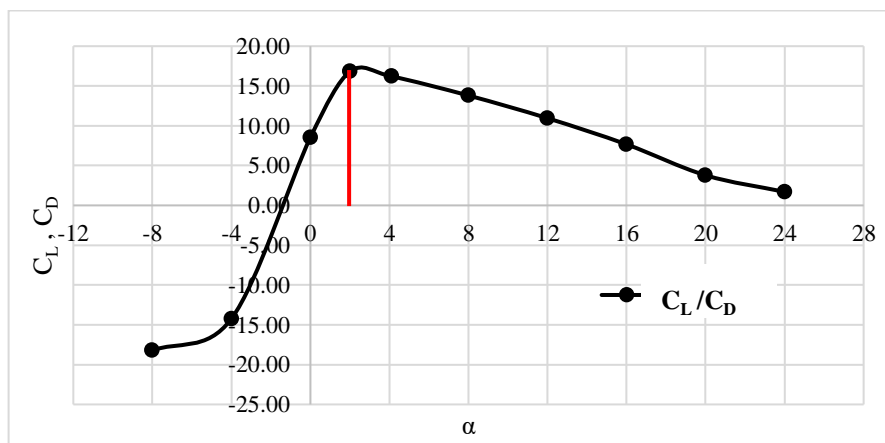
C_L = koefisien *lift*

AR = Aspek rasio

ΔC_D = Perbedaan koefisien *drag*

Gambar 4.6 menunjukkan koefisien *lift* dan *drag* untuk NACA 64₁-212 bagian dengan *span* tak terhingga dibandingkan dengan foil NACA 64₁-212 dengan *aspect ratio* $AR = 17.34$ ($Re = 1 \times 10^7$). Kemiringan kurva *lift* untuk α antara -8° dan 12° untuk *span* tak terhingga sekitar 0,1 per derajat dan kondisi *stall* berlangsung di α kira-kira 15° sesuai dengan prediksi teoritis (Abbot, 1959). Nilai hasil dari simulasi CFD dibandingkan dengan C_L hasil perhitungan eksperimental yang didapatkan dari literatur untuk memastikan bahwa perhitungan menggunakan CFD dapat dipercaya dengan memplot grafik C_L dari CFD dan eksperimen seperti pada gambar 4.6. Pergeseran sudut serang (α) antara hasil simulasi CFD dan data dari NACA sekitar 0.5° , yang sesuai dengan perhitungan yang berarti simulasi CFD sesuai dengan teori

Kemudian membuat grafik C_L / C_D dari simulasi untuk menentukan sudut serang yang digunakan pada foil, dengan mencari nilai C_L / C_D yang paling optimum. Berikut adalah grafik C_L / C_D .



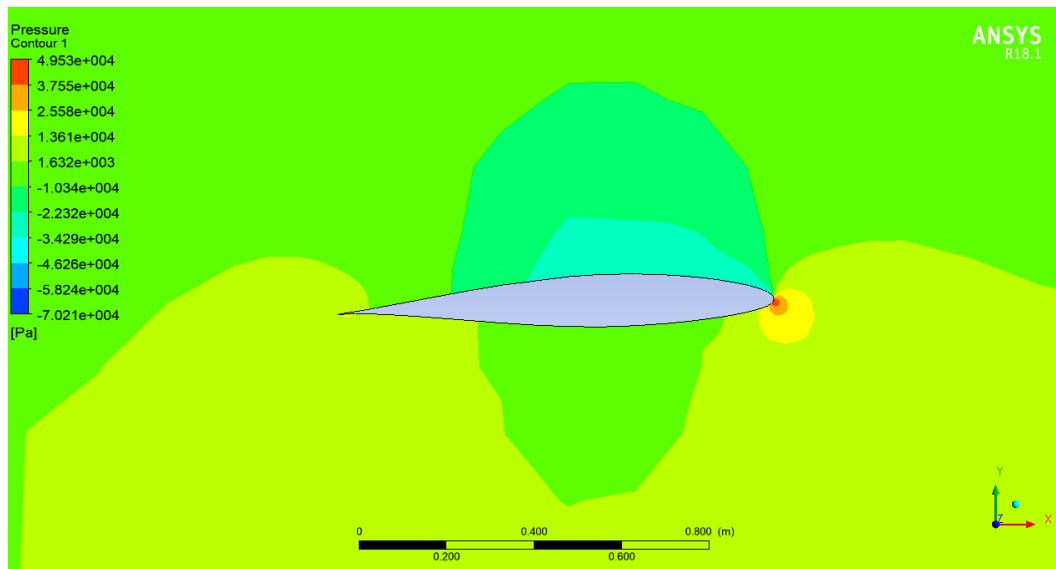
Gambar 4.7 koefisien *lift* C_L dan koefisien *drag* C_D Foil NACA 64₁-212 fungsi dari sudut serang

Sudut serang 2° merupakan sudut serang yang optimum karena memiliki C_L/C_D tertinggi sesuai dengan penelitian dari Suastika, et al (2017, 2018) Selanjutnya dilakukan simulasi foil NACA 64₁-212 menggunakan CFD dengan *aspect ratio* 17.34 dan sudut serang (α) 2° pada variasi kecepatan sesuai dengan kecepatan kapal katamaran yang digunakan pada penelitian ini untuk mendapatkan nilai gaya *lift* dan gaya *drag*. Tabel 4.5 berikut adalah hasil simulasi dari CFD

Tabel 4.5 Nilai gaya *lift* dan *drag* dari foil NACA 64₁-212 dari hasil simulasi CFD, $\alpha = 2^\circ$

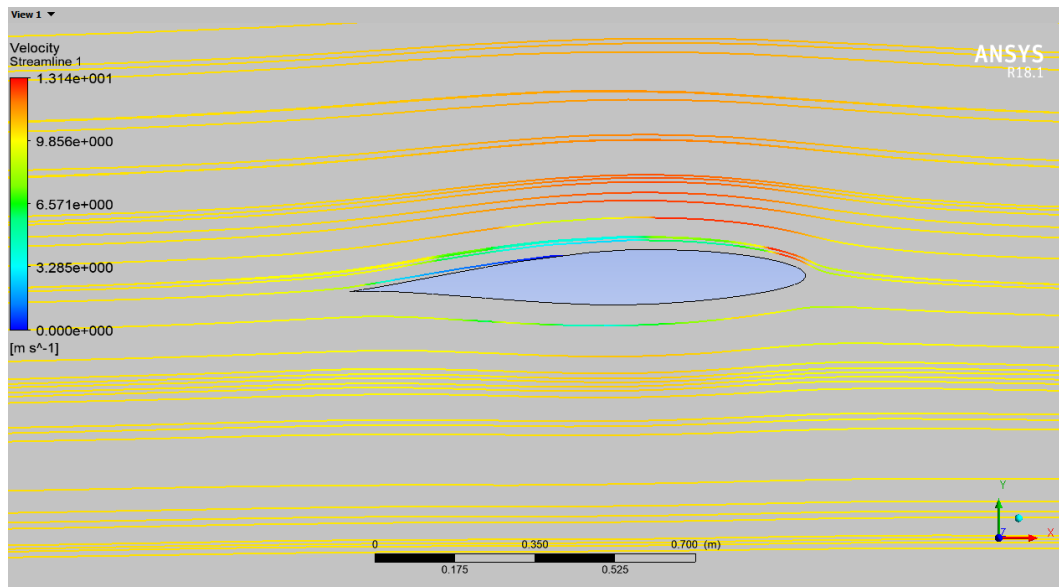
No	Re	V (Knots)	V (m/s)	L (kN)	D (kN)
1	6×10^6	12	6.17	67.83	11.61
2	8×10^6	16	8.23	119.71	20.72
3	1×10^7	20	10.29	184.53	32.75
4	1.2×10^7	24	12.35	249.25	50.48
5	1.4×10^7	28	14.40	327.88	70.32

Untuk mendapatkan ilustrasi dari simulasi perhitungan *lift* dan *drag* dari foil NACA 64₁-212 dapat dilihat melalui fokus pada kontur tekanan yang disajikan dalam gambar 4.8. dengan sudut serang (*angle of attack*) 2° . Pada bagian *leading edge* terdapat tekanan maksimal, dikarenakan bagian tersebut secara langsung *frontal* berinteraksi dengan fluida. Sedangkan pada *upper surface* tekanan didominasi nilai negatif jika dibandingkan dengan *lower surface* yang positif. Kemudian pada *trailing edge* aliran dari kedua *surface* bertemu, sehingga mengakibatkan tekanan bertambah. Dari sudut tersebut gaya angkat sangat optimal, dikarenakan perbedaan tekanan antara *upper* dan *lower* (Sugeng, 2019).



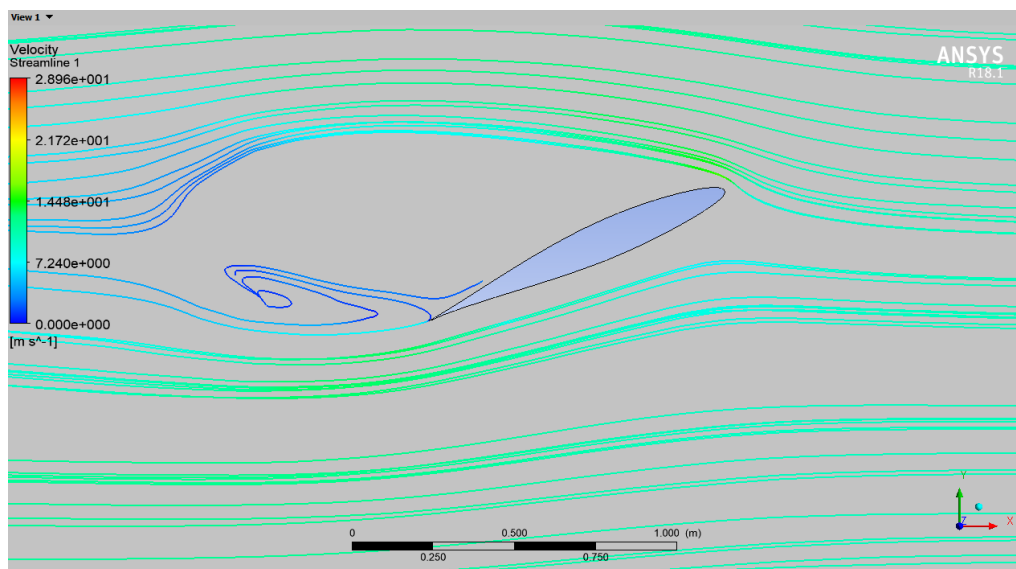
Gambar 4.8 Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 2^\circ$

Pada penelitian ini digunakan sudut serang (*angle of attack*) 2° untuk *hydrofoil* pada kapal katamaran saat kapal dalam kondisi *even keel* dan dengan sistem *fixed hydrofoil*. Gambar 4.8 adalah kontur tekanan foil hasil simulasi CFD saat *running* pada kondisi hanya foil saja dengan sudut serang 2° dan $Re = 1 \times 10^7$ dimana profil kecepatan aliran air disekitar foil di daerah *leading edge* terlihat kecepatan pada *upper surface* lebih tinggi dibandingkan pada *lower surface*. Hal ini yang menyebabkan terjadinya gaya *lift* keatas. Sedangkan pada *trailing edge* bentuk aliran (*pattern flow*) antara *lower surface* dan *upper surface* terdapat perbedaan yang jelas. Hal tersebut dikarenakan karena foil jenis NACA yang dipakai tidak *mirror* sempurna, akan tetapi pada bagian belakang cenderung lebih kedalam. Sedangkan bentuk aliran daerah *trailing edge* kecepatan aliran pada *level* rendah (*blue-green*). Pada sudut ini nilai *lift* dan *drag* sangat optimal, sehingga dipakai dalam simulasi *stern foil*. Gambar 4.9. adalah visual *streamline* foil hasil simulasi CFD.



Gambar 4.9 Kontur dan *Streamline* foil NACA 64₁-212, $\alpha = 2^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$

Hasil simulasi CFD foil tanpa kapal juga menunjukkan fenomena hidrodinamika, dimana terjadi *eddy* pada bagian belakang *trailing edge*, hal ini terjadi karena aliran fluida yang terhalang oleh badan foil dengan sudut 24° dan menghasilkan aliran dengan arah berbalik yang menghasilkan pusaran. Dengan terjadinya fenomena ini sesuai pada gambar 4.10, merupakan salah satu bukti bahwa simulasi CFD yang dilakukan benar.

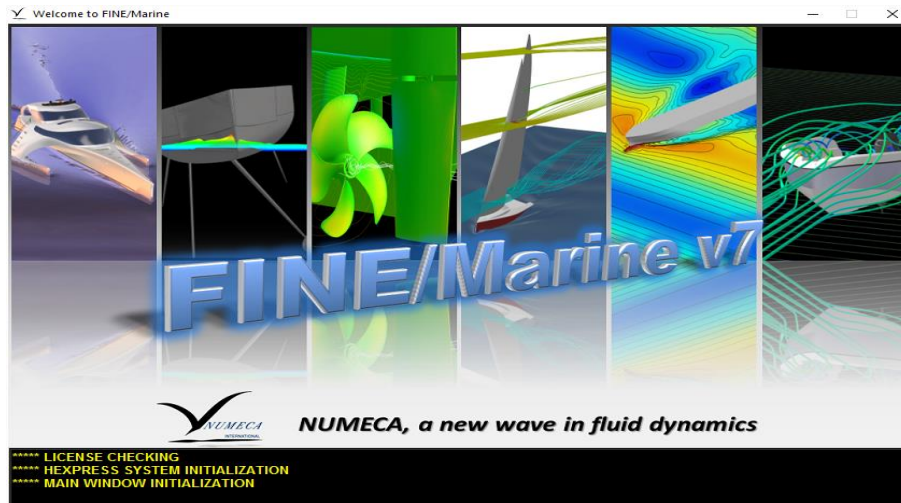


Gambar 4.10 *streamline* foil NACA 64₁-212, $\alpha = 24^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$

4.2. Simulasi Kapal Katamaran tanpa dan dengan Foil

4.2.1. Proses simulasi CFD menggunakan NUMECA

Pada pengerjaan tesis ini *tools* CFD yang digunakan adalah *NUMECA FINE™/Marine*. Pada tahap ini digunakan aplikasi CFD sebagai *solver* dan *simulator* dalam penelitian /tesis ini. Berikut ini merupakan tahapan yang digunakan dalam simulasi CFD:



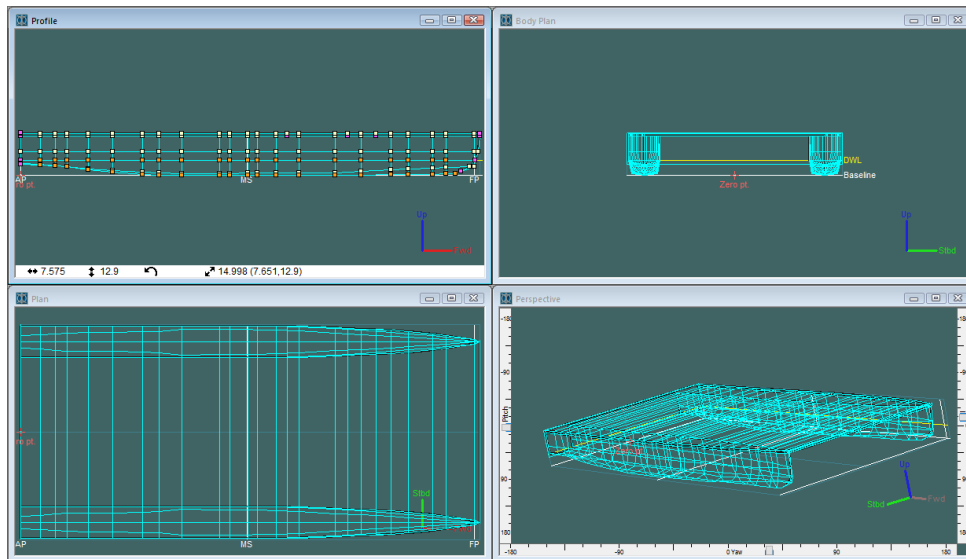
Gambar 4.11 Tampilan *FINE™/Marine*

a. *Pre-Processor*

a.1. Pembuatan Geometri Model Kapal

FINE™/Marine menyediakan *tools* untuk membuat geometri layaknya perangkat *CAD* (*Computer Aided Design*). Geometri digunakan menggunakan *Maxsurf Modeller* dengan menggunakan input data dari *linesplan*. Garis-garis/*linesplan* diimpor ke *Maxsurf* sebagai *background* untuk memudahkan pembuatan garis/ *lines* yang disediakan oleh *Maxsurf Modeller*. Kemudian ketika garis *lines* sudah ada di *modeller maxsurf* maka Dipilih lah menu “*surface-add surface-buttock plane*”. Perlu ditambahkan *control point* agar kita bisa lebih mudah untuk mengatur bentuk lambungnya. Untuk *Setting refference point* agar titik *station 0* agar tidak berubah. Sebagai kontrol perlu ditambahkan *design Grid section, buttock*, dan *waterline* sesuai dengan rencana garis kapal. Apabila ternyata terdapat bentuk *station* yang lurus bisa diabaikan agar memudahkan *surface*-nya. Setelah *surface* terbentuk dari garis *station* maka perlu dilakukan pengaturan sarat dengan

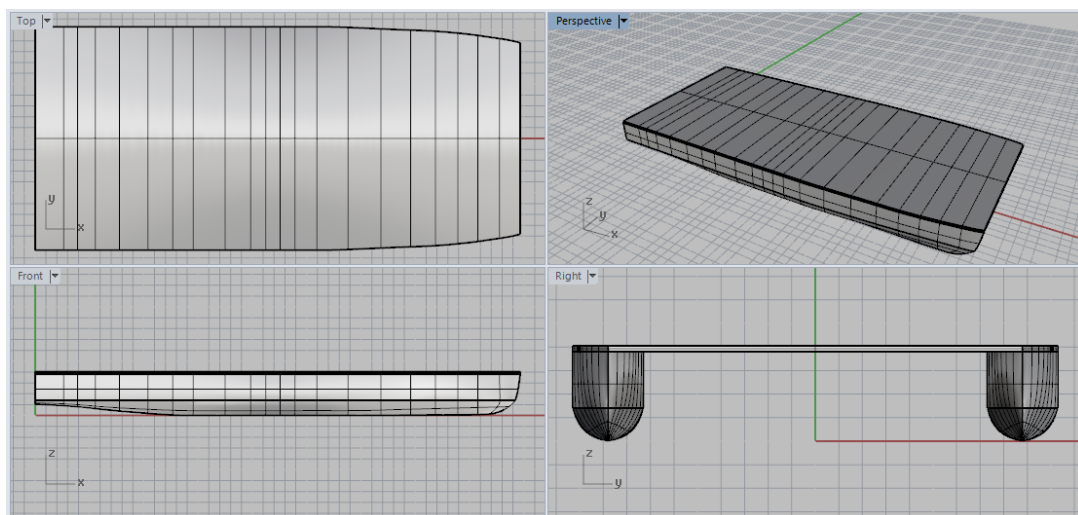
mengubah DWL sesuai dengan *reference* ukuran utama kapal. Berikut gambar dari *surface modeller maxsurf* yang sudah jadi.



Gambar 4.12 Tampilan “Maxsurf Modeller”

Model dari *Maxsurf Modeller* dioutputkan *iges* untuk diekspor ke *software Rhinoceros*, yang nantinya digunakan untuk *software FINE™/Marine*.

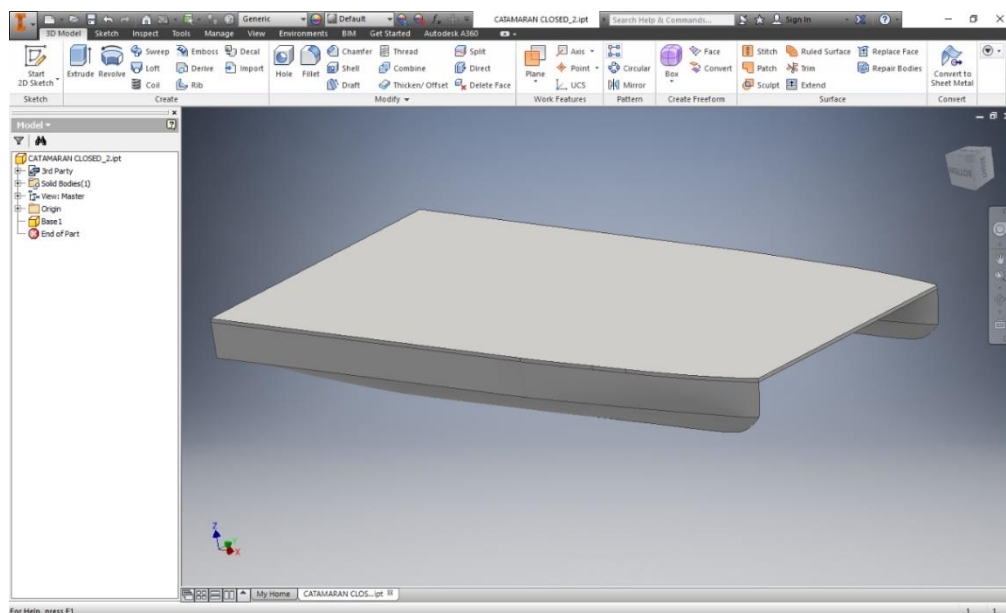
Dalam permodelan menggunakan *software Rhinoceros* berfungsi untuk memperbaiki model agar nantinya model dapat di baca dengan baik oleh *solver CFD*. Berikut adalah hasil *surface* yang suda selesai dilakukan dan dijadikan satu kesatuan menjadi *solid* oleh *Rhinoceros*.



Gambar 4.13 Tampilan “Rhinoceros”

Untuk mendapatkan bentuk *solid* yang ada sebelum dilakukan *joint* antara *surface* dengan *surface* yang lain maka dilakukan pengecekan *edge*. Pengecekan *edge* dilakukan agar diketahui apabila terdapat *surface* yang tidak tersambung dengan sempurna. Proses tersebut membutuhkan ketelitian. Dalam proses tersebut terdapat beberapa *surface* yang tidak tersambung dengan baik, sehingga dilakukan pembuatan ulang *surface*. Pembuatan *surface* tersebut dilakukan dengan membuat batasan-batasan yang memang tersambung dengan baik dengan *surface* yang lain. Setelah dilakukan pembuatan *surface*, selanjutnya dilakukan penggabungan dengan perintah *joint* pada *software* tersebut, maka dilakukan pengecekan *edge*. Proses di atas dilakukan sampai pada *surface* tidak terdapat lagi bagian yang tidak tersambung antar *surface* dengan *surface*.

Setelah selesai proses *create solid* dengan kondisi sudah ter-*joint* maka untuk memastikan model sudah menjadi *solid* dilakukan *export* ke *software Autodesk Inventor*. Pada *software* ini terdapat *tools* untuk memperbaiki model untuk mengetahui apakah model terdapat *error* seperti garis yang bertumpuk, hingga sudut-sudut yang tidak menyambung. Berikut adalah tampilan model geometri kapal katamaran yang sudah menjadi *solid*.

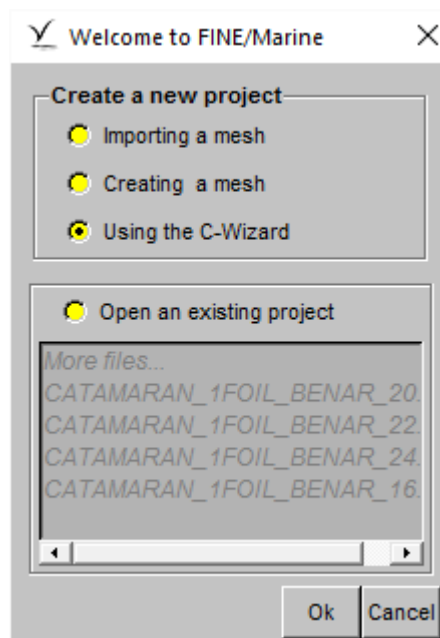


Gambar 4.14 Tampilan “Autodesk Inventor”

a.2. *Input C-Wizard pada FINE™/Marine*

Selanjutnya setelah dipastikan model *solid*, model di *export* ke *format file parasolid*, dimana bentuk *parasolid* mempunyai ekstensi *file* yakni *x_t*. *File* tersebut nantinya akan digunakan untuk meng-*input* model saat proses *Setting C-Wizard* pada *FINE™/Marine*. Tahapan proses (*launching*) bagian pertama *plugin C-Wizard* dilakukan dari antarmuka *FINE™/Marine*.

1. Buka perangkat lunak *FINE™/Marine*
2. *Plugin C-Wizard* membuat proyek sendiri sebagai langkah dari prosedur pengaturan proyek. Klik tombol menggunakan *C-Wizard* untuk meluncurkan *wizard* selanjutnya buat proyek dengan mengklik tombol “*Create*”proyek. Pada *browser*, tentukan nama proyek pada direktori pilihan anda.



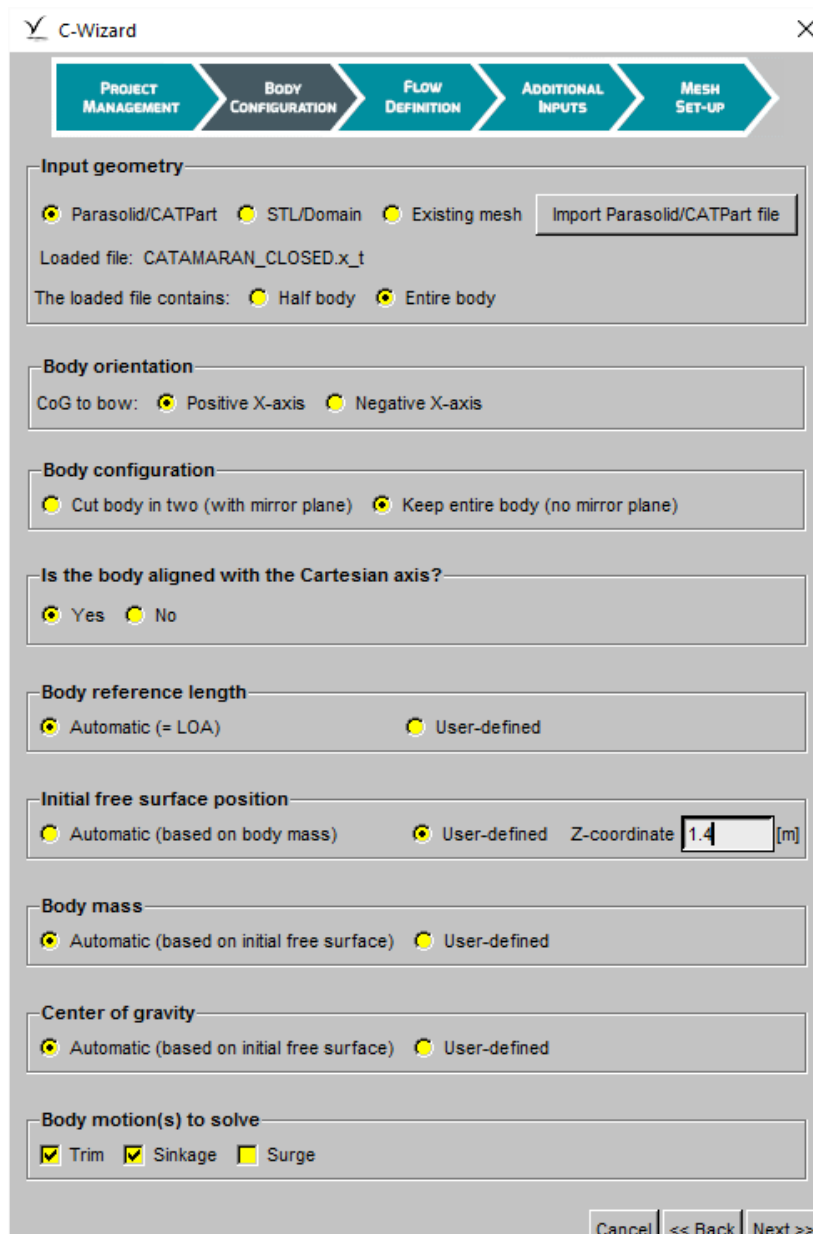
Gambar 4.15 Tampilan “*C-Wizard*”

3. Pilih hambatan di bagian aplikasi dan klik tombol *Next >>* untuk pindah ke langkah setup selanjutnya. Pada jendela *C-Wizard* yang muncul, pengaturan proyek akan tersedia pertama
4. Di bawah ‘*Input geometry*’: pilih *Parasolid / CATPart* dan klik tombol *Impor Parasolid / CATPart* (format ‘**.x_t*’ dan ‘**.CATPart*’ tersedia di sini).



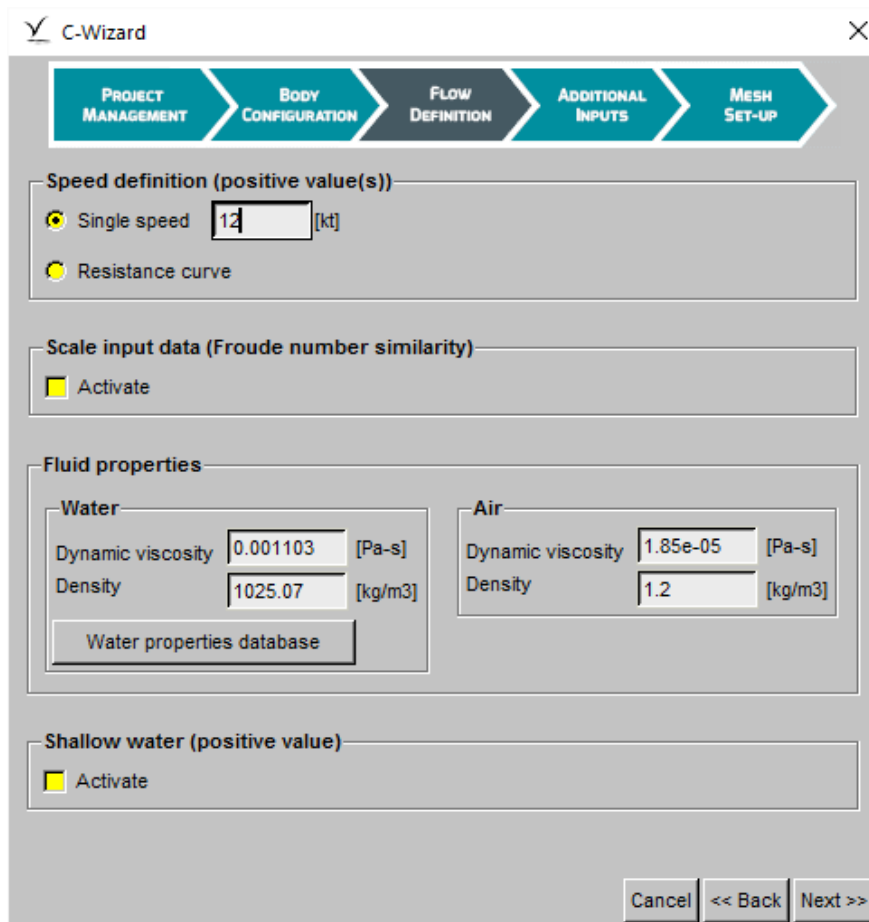
Gambar 4.16 Tampilan 'Project Management'

5. *Impor file Parasolid* yang sebelumnya telah disiapkan. Saat geometri diimpor, lakukan pengaturan berikut:
 - a. Pilih *No* di bawah bagian *Is the input half of the body?*.
 - b. Di bawah bagian *Body Orientation*, aktifkan *Positive X-axis* untuk *CoG to bow* dan *Positive Y-axis* untuk *CoG ke side*.
 - c. Pilih *Yes* di bawah bagian *Is the body aligned with Cartesian axis?*
 - d. Pilih *Automatic (= LOA)* di bawah bagian *Body reference length*. Panjang referensi akan secara otomatis ditetapkan ke LOA
 - e. Pilih *User defined* dan atur *Z-coordinate* menjadi <1.4> pada bagian *Initial free surface position*.
 - f. Pilih *Automatic (based on initial free surface)* di bawah bagian *Body mass*. Massa tubuh akan dihitung secara otomatis berdasarkan posisi kesetimbangan
 - g. Pilih *Automatic (based on initial free surface)* di bawah bagian *Center of Gravity*. Pusat posisi gravitasi akan secara otomatis dihitung berdasarkan posisi kesetimbangan
 - h. Biarkan *Trim* dan *Sink* pada *Body motion(s) to solve* tetap aktif. Selanjutnya pilih *Next>>*



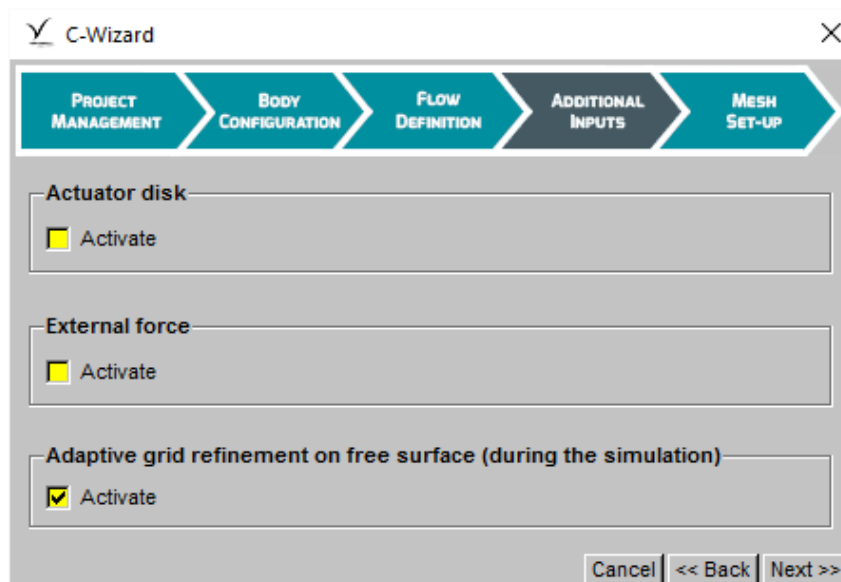
Gambar 4.17 Tampilan ‘*Body Configuration*’

6. Di bagian definisi kecepatan: aktifkan kecepatan tunggal dan atur kecepatan referensi sesuai dengan kecepatan yang akan diuji.
7. Di bagian Model fluida: pilih properti untuk *Air* dan klik tombol basis data properti *Water* untuk mengubah properti air menjadi sesuai kondisi yang dipilih. Klik OK untuk memvalidasi properti baru. Klik *Next* >> untuk melanjutkan ke pengaturan input tambahan.



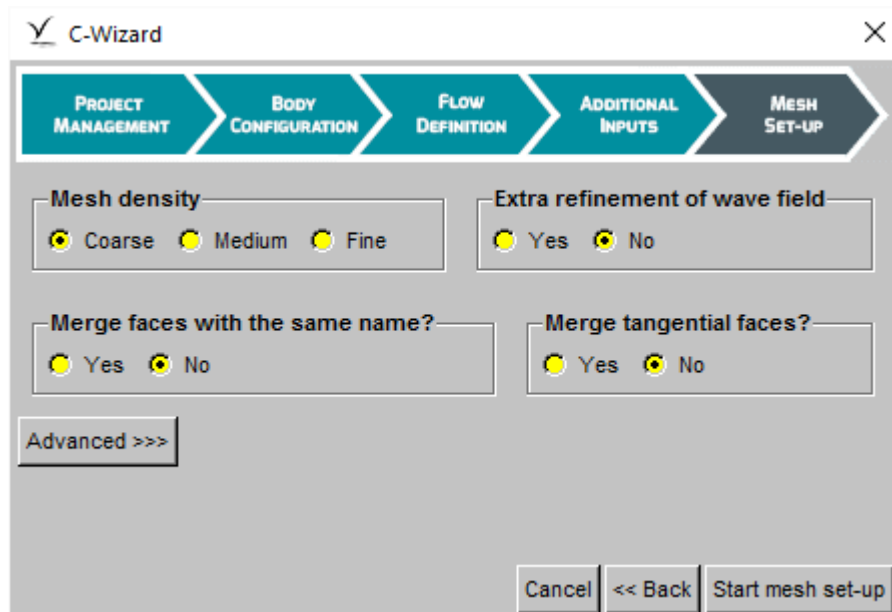
Gambar 4.18 Tampilan 'Flow Definition'

8. Klik *Activate* pada *Adaptive Grid refinement on free surface*.



Gambar 4.19 Tampilan 'Additional Input'

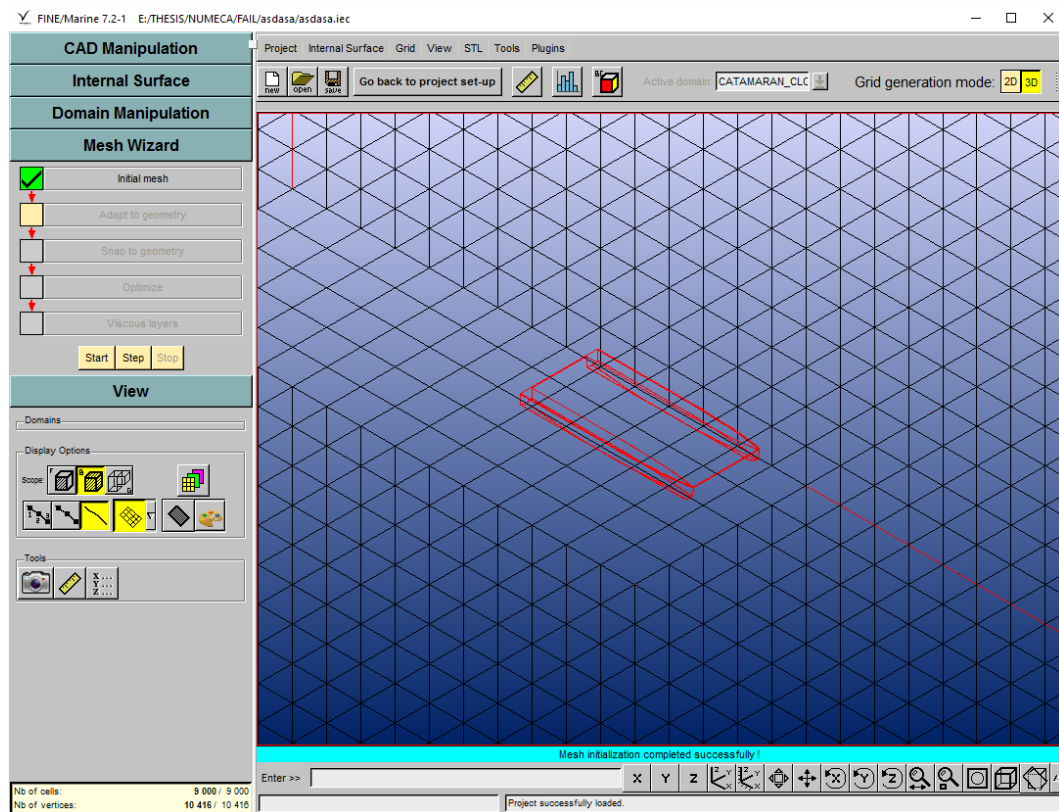
9. Klik pada *Next* >> untuk melanjutkan ke pembuatan *domain* dan pengaturan *Mesh*.



Gambar 4.20 Tampilan ‘*Mesh Set-up*’

a.3. Proses *Meshing model* pada *HEXPRESS™*

Ketika *surface* sudah tidak mengalami kendala pada *input C-Wizard*, selanjutnya adalah proses pembuatan *Mesh* melalui *HEXPRESS™*. Pada initial *Mesh software HEXPRESS™* membuat secara otomatis sebuah initial dari *Hexahedral Mesh* pada *bounding box* dari *computational domain*. Sistem tersebut menghitung menjadi *isotropic subdivision* dari *domain* dengan minimum jumlah *Cells*. Hasil dari otomatis *initial Mesh* sesuai dengan gambar 4.26 dibawah ini

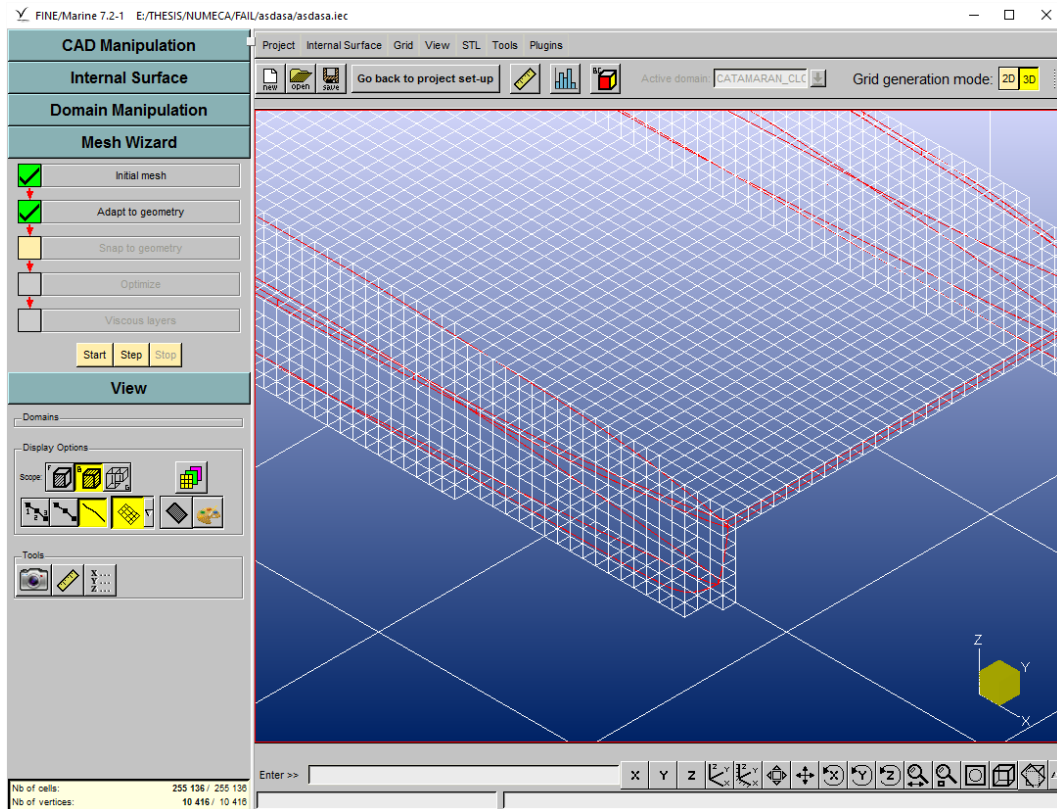


Gambar 4.21 Tampilan hasil 'Initial Mesh'

Untuk selanjutnya *Adapt to Geometry*, *software* tersebut secara khusus beradaptasi *Meshnya* terhadap bentuk objek dengan *Cells anisotropic subdivision* sampai besarnya *Cells* sesuai dengan *spesifik geometry criteria*. Pengaturan *adaption criteria* sesuai dengan *user* sebagai berikut :

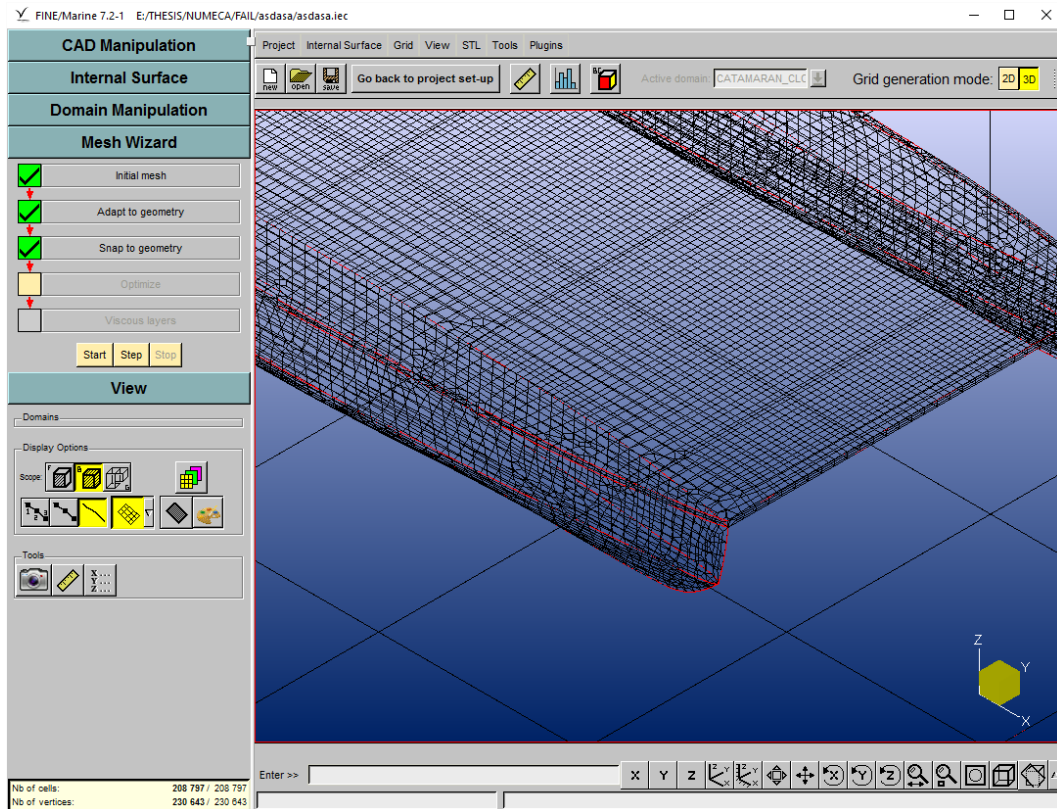
- *Software* tersebut secara otomatis menghitung besar *Cells* untuk mengisi jarak yang sempit diantara *surface* dengan jumlah *Cells* dan diperhalus besaran *Cells* nya pada daerah mendekati bentuk *geometry* yang berkurva.
- Dan juga dapat menghilangkan *Cells* yang letaknya diluar daerah *domain* atau *intersection* dari *geometry* yang ada.

Hasil dari *Adapt to Geometry* ditampilkan pada gambar 4.22 berikut ini.



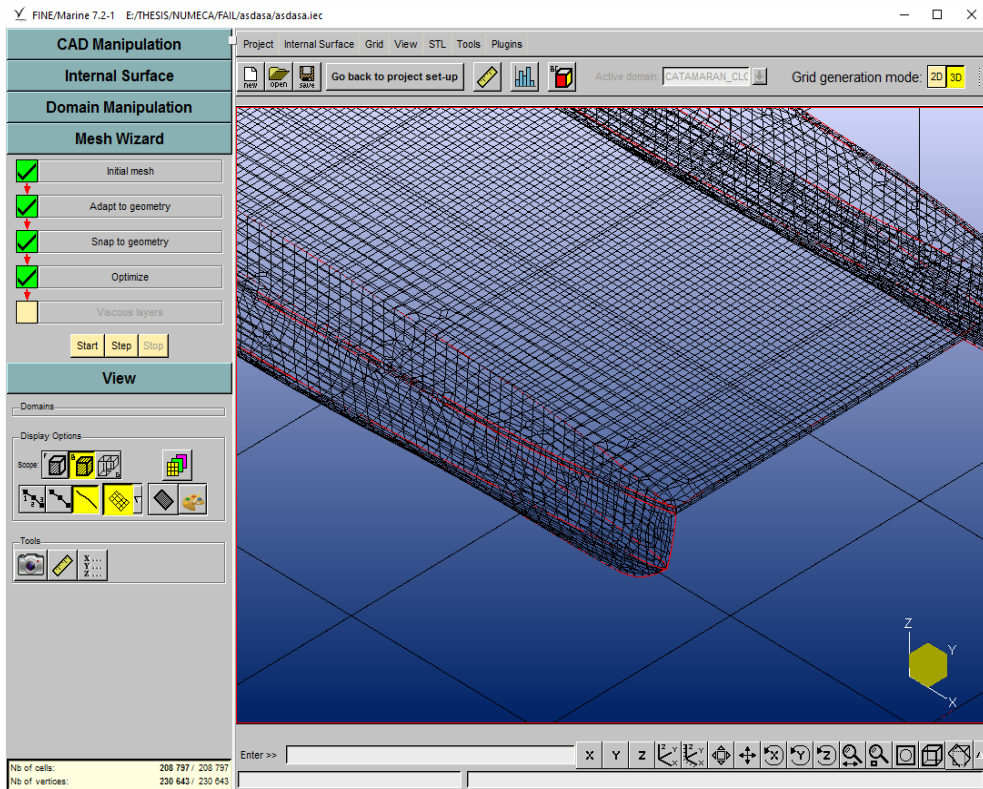
Gambar 4.22 Tampilan hasil 'Adapt to Geometry'

Langkah selanjutnya adalah *snap to geometry* yakni *software* tersebut melakukan *Mesh* pada *geometry* dan melingkupi dimensi terendah dari *geometry* dengan beberapa *corner* yang *spesifik* dan meng-*capture* nya. Secara umum dengan akurasi dan algoritma khusus *software* tersebut dapat menyelesaikannya, seperti tampilan pada gambar 4.23

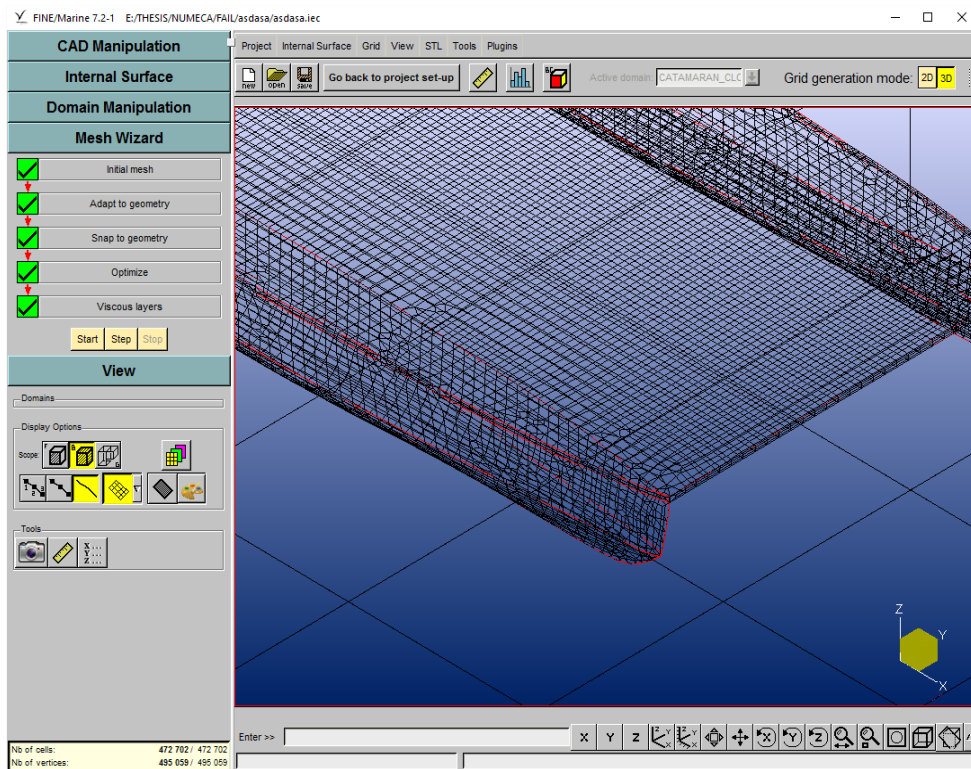


Gambar 4.23 Tampilan hasil 'Adapt to Geometry'

Proses selanjutnya adalah *Optimize* yakni mengoptimalkan *Mesh* untuk memastikan semua *Cells* pada kondisi *convex* dan memiliki kualitas yang tinggi seperti tampak pada gambar 4.24. Dan proses terakhir adalah *viscous layer*, *software* tersebut menambahkan *layer* dengan aspek rasio yang tinggi pada *Cells* dengan *anisotropic Cells subdivision* untuk mendapatkan dan menghasilkan *Mesh* yang sesuai dengan resolusi aliran yang ada, dan tampak pada gambar 4.24



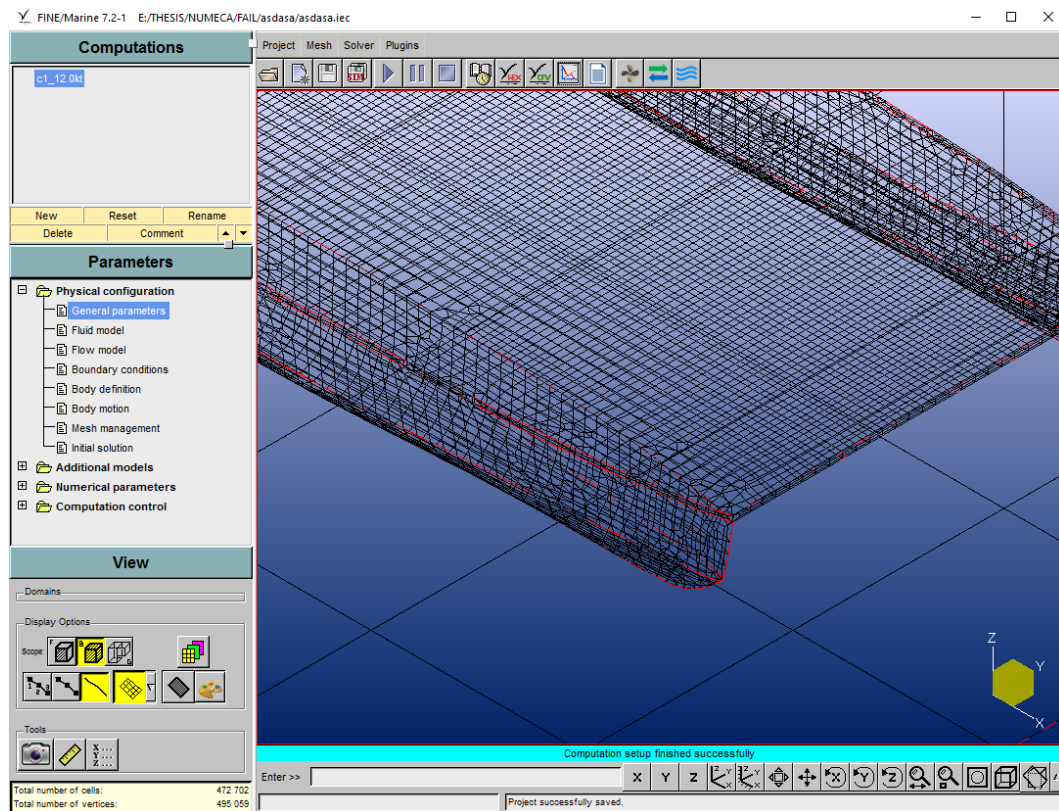
Gambar 4.24 Tampilan hasil 'Optimize'



Gambar 4.25 Tampilan hasil 'Viscous Layers'

a. Processor/Solver

Setelah proses pada *Meshing* pada *HEXPRESS™* sudah selesai, tahap berikutnya membuka *FINE™/MARINE software*. Pada *software* ini inpu berupa fluida, *flow model*, *boundary condition*, *body defision*, sampai proses *solver*. Tampilan *FINE™/MARINE* sesuai dengan gambar 4.26.



Gambar 4.26 Tampilan ‘*FINE™/Marine*’

Data-data yang harus diinputan menentukan dari hasil *output solver*nya. Sehingga kita harus memahami fungsi dari masing masing proses. Untuk inputan akan kita jelaskan sebagai berikut :

- *General parameter*

Pada general parameter ini terdapat pilihan *time configuration*. Pada simulasi ini menggunakan *steady* dengan peruntukan *multi phase*.

- *Fluid model*

Sedangkan pada menu fluid model, kita mendefinisikan dari fluida yang kita gunakan. Untuk *free surface analysis* menggunakan 2 fluida yakni

fluida liquid berupa air dan udara. Properties dari fluida kita inputan yakni berupa *dynamic viscosity* dan *density*.

a. Fluida-1 properties

- *Name* = *Water*
- *Dynamic Viscosity* = 0.001103 (Pa.s)
- *Density* = 1025.07 (Kg/m³)

b. Fluida-2 properties

- *Name* = *Air*
- *Dynamic Viscosity* = 1.185e-005 (Pa.s)
- *Density* = 1.2 (Kg/m³)

- *Flow model*

Pada *flow model parameter* terdapat nilai-nilai yang harus diinputkan sebagai berikut :

- *Mathematical model turbulence* = k-omega (SST-Menter)
- *Gravity intensity* = -9.81 m/s² (sumbu koordinat Z)
- *Reference length* = 44.67 m
- *Reference velocity* = 6.17 m/s (kecepatan 12 knot)

- *General parameter*

Pada menu *boundary condition*, terdapat 3 *sub menu* lagi yang terdiri dari *solid*, *external*, dan *mirror*. Untuk pengisian dari sub menu berikut sesuai dengan tabel dibawah

Tabel 4.6 *Boundary condition*

<i>Description</i>	<i>Type</i>	<i>Condition</i>
<i>Zmax</i>	<i>EXT</i>	<i>Prescribed Pressure</i>
<i>Ymin</i>	<i>EXT</i>	<i>Far Field</i>
<i>Xmin</i>	<i>EXT</i>	<i>Far Field</i>
<i>Ymax</i>	<i>EXT</i>	<i>Far Field</i>
<i>Zmin</i>	<i>EXT</i>	<i>Prescribed Pressure</i>
<i>Xmax</i>	<i>EXT</i>	<i>Far Field</i>
<i>Ship Hull</i>	<i>SOL</i>	<i>Wall Function</i>

- **Body motion**

Pada menu *body motion* terdapat 2 sub menu yakni *motion definition* dan *dynamic parameter*.

a. Motion definition

Degree of freedom sesuai dengan koordinat pergerakan sebagai berikut :

- Tx0 : *motion type* menggunakan *imposed* dengan $\frac{1}{2}$ sinusoidal *ramp*.
- Ty0 : *motion type* menggunakan *fixed* karena simetris
- Tz0 : *motion type* menggunakan *solved*
- Rx2 (Roll) : *motion type* menggunakan *Fixed*
- Ry1 (Pitch) : *motion type* menggunakan *Solved*
- Rz0 (Yaw) : *motion type* menggunakan *Fixed*

b. Dynamic parameters

Inertial data yang harus diisikan sesuai dengan kondisi model kapal yakni;

- *Geometry* : *Entire Body*
- *Centre of gravity* : $X_{CG}=20.84\text{ m}$; $Y_{CG}=-6.74\text{ m}$; $Z_{CG}=3.23\text{ m}$
- *Mass (entire body)* : 186911.9kg

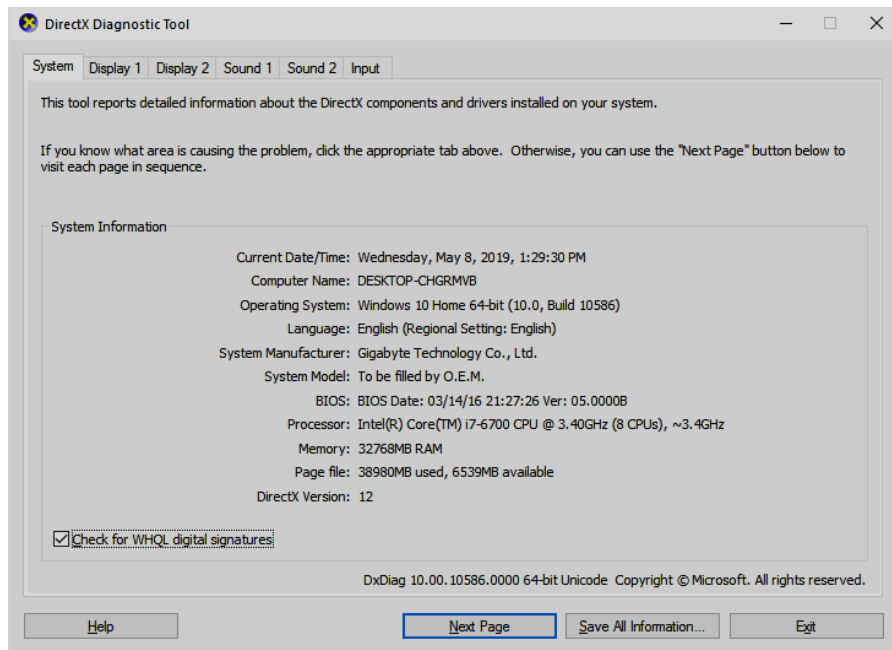
- *Initial solution parameter*, untuk *multi phase* dengan *interface position* (z)=1.4 m.

- *Computational Control*

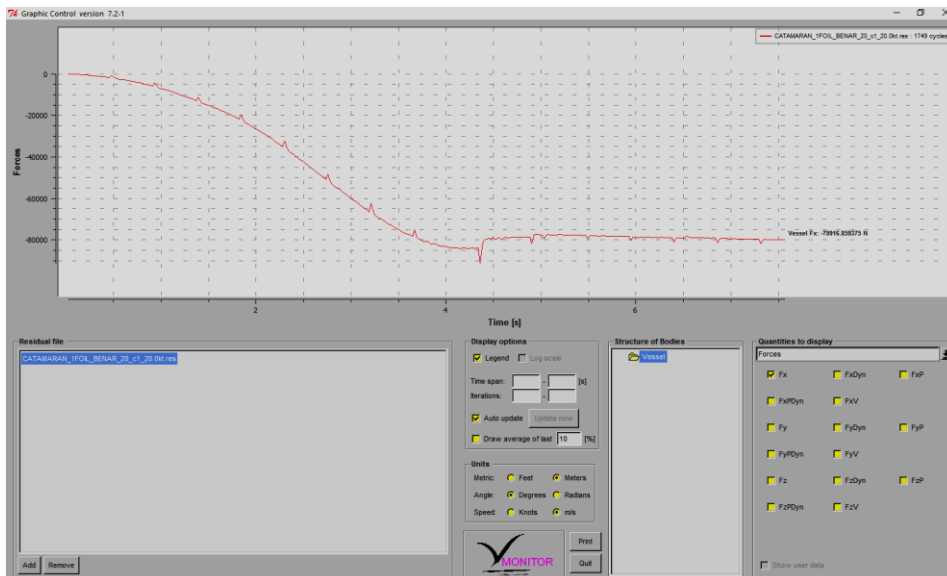
Pada menu ini menginputkan parameter berkaitan dengan batasan *solver* iterasi, berikut input nya

- *convergence criteria* : 2 orders
- *Save solution every* : 100 time steps
- *Number of time steps* : 1500 time.

Setelah pengisian setiap menu maka dilakukan *running solver* menggunakan *pararel mode setting*. Untuk *pararel computation* menggunakan 8 core secara bersamaan, hal ini sesuai dengan spesifikasi komputer yang digunakan pada gambar 4.27. Untuk proses *running solver* dapat di *Monitor* dengan *graphic control* sesuai dengan gambar 4.28



Gambar 4.27 Spesifikasi Komputer



Gambar 4.28 Tampilan 'Monitor'

b. Post Processor

Pada tahap ini dilakukan perhitungan hasil serta visualisasi melalui *software*. Aplikasi ini menyediakan informasi berupa data, gambar dan animasi. Pada tahap selanjutnya setelah data yang telah diperoleh dari hasil numerik dengan CFD akan divalidasi. Terdapat parameter yang digunakan pada tahap validasi data yaitu: *Grid Independensi*

Besarnya jumlah elemen atau *Grid* yang digunakan dalam perhitungan akan menentukan keakurasian hasil yang diperoleh karena jumlah elemen mempengaruhi perubahan bentuk geometri pada saat pemrosesan hasil. Pada tahap ini hasil numerik yang telah didapatkan diuji dengan jumlah elemen yang berbeda dengan selisih jumlah elemen dari perhitungan sebelumnya kurang lebih 1,5-2 kali. Dari proses yang ada sesuai dengan *software* tersebut maka dilakukan pengetesan *Grid Independence* sehingga nantinya jumlah *Cells* yang didapatkan optimal dengan waktu *running solver* dikarenakan keterbatasan *processor computer* yang digunakan dalam perhitungan *solver* sehingga mendapatkan hasil yang *convergen* sesuai dengan referensi Anderson (1995)

Penambahan jumlah *Grid* untuk mendapatkan *Grid* yang optimum harus dilaksanakan secara massif yakni 1.0x sampai 2.0x dari jumlah *element* sebelumnya dan disesuaikan juga dengan *software Meshing generator*-nya. Jumlah *Grid* yang optimum adalah apabila terdapat penambahan *Grid* nilai *output* yang didapatkan tidak terjadi perubahan yang signifikan, akan tetapi waktu yang dibutuhkan akan semakin lama. Jumlah *Grid* yang diambil adalah jumlah *Grid* yang sudah memasuki hasil yang konstan. Akan tetapi kita mendapatkan waktu proses simulasi lebih efisien

4.2.2. *Grid independence*

Grid Independence merupakan proses pemilihan jumlah *Grid* yang optimum berdasarkan hasil simulasi dan waktu yang dibutuhkan untuk proses perhitungan pada *solver*. Ukuran *Grid* yang akan digunakan sangat mempengaruhi hasil *output*. Ukuran *Grid* yang besar akan mempengaruhi hasil keakuratan *output*. Sedangkan ukuran *Grid* yang terlalu kecil akan mempengaruhi waktu yang diperlukan dalam proses *running solver*. *Grid* yang terlalu banyak bisa menjadi tidak efektif karena hasil *output* sudah optimum dan memerlukan waktu yang lebih panjang. *Grid Independence* merupakan salah satu proses yang utama untuk mendapatkan akurasi hasil *output*. Dari proses yang ada sesuai dengan *software* tersebut maka dilakukan pengetesan *Grid Independence* sehingga nantinya jumlah *Cells* yang optimum dengan waktu *running solver* dikarenakan keterbatasan *processor computer* yang digunakan dalam perhitungan *solver* sehingga mendapatkan hasil yang konvergen sesuai dengan referensi Anderson (1995). Penambahan jumlah *Grid* untuk

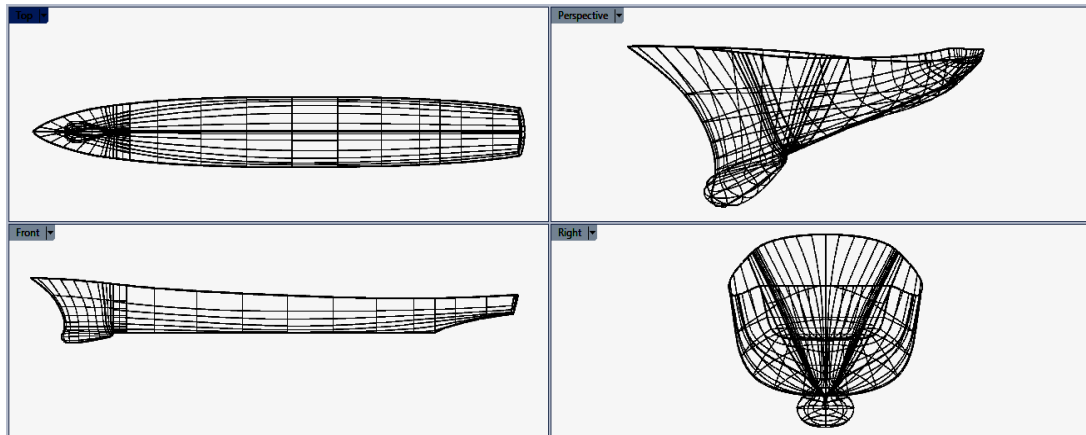
mendapatkan *Grid* yang optimum harus dilaksanakan secara masif yakni $1.5\times$ sampai $2.0\times$ dari jumlah *element* sebelumnya. Jumlah *Grid* yang optimum adalah apabila terdapat penambahan *Grid* akan tetapi tidak terjadi perubahan nilai *output* hasil simulasi yang signifikan. Jumlah *Grid* yang diambil adalah jumlah *Grid* yang sudah memasuki hasil yang konstan. Akan tetapi kita mendapatkan waktu proses simulasi lebih efisien.

4.2.3. Benchmarking test CFD

Pentingnya *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sebagai alat utama untuk analisis dan desain masalah dinamis fluida saat ini tidak perlu dipertanyakan lagi. Sebenarnya itu berevolusi dari hari-hari awal, di pertengahan abad lalu, di mana sebagian besar dilihat sebagai bidang sempit dan sangat terbatas oleh alat pengujian, menjadi komponen utama penelitian dinamika fluida. Hari ini CFD berada pada level yang sama dengan pendekatan berdasarkan eksperimen atau dalam analisis teoritis. Sangat penting untuk menguji dan menyesuaikan model CFD dengan membandingkan hasil prediksi dengan uji *benchmarking*. *Benchmarking* dapat digunakan untuk menguji program baru, untuk pemilihan model turbulensi, studi ketergantungan grid, pengujian skema numerik dan kode sumber yang berbeda serta pengujian kondisi batas yang berbeda. Pada penelitian ini *benchmarking* menggunakan kapal US Navy *Combatant*, DTMB 5415. Dengan data ukuran utama pada tabel 4.67 dan gambar 4.29 sebagai berikut :

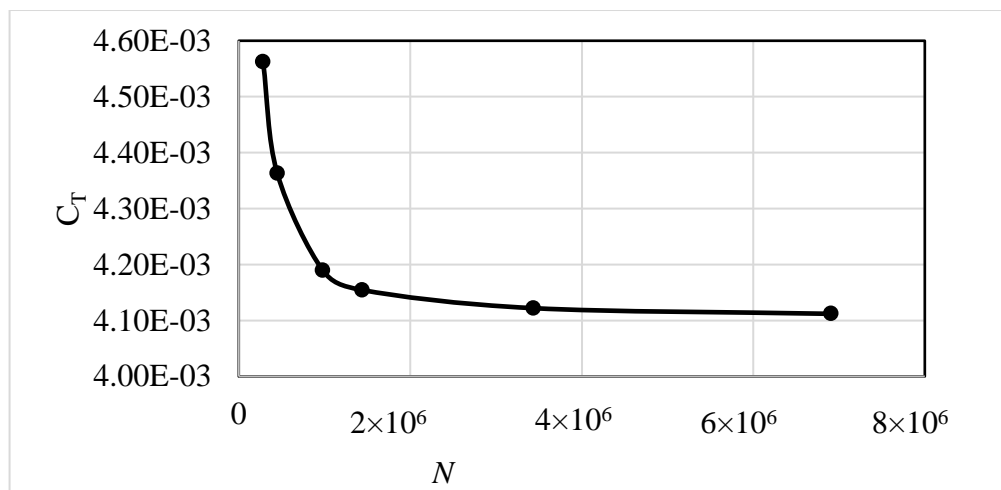
Tabel 4.7 Ukuran utama DTMB 5414

Ukuran Utama	<i>Full Scale</i>	INSEAN Skala 1 : 24.830
<i>LPP</i>	142 m	5.719 m
<i>LWL</i>	142.218 m	5.726 m
<i>B</i>	19.06 m	0.768 m
<i>T</i>	6.15 m	0.248 m
<i>Fn</i>	0.248	0.248
<i>Cb</i>	0.507	-
<i>Displacement</i>	8424.4 m ³	0.554 m ³



Gambar 4.29 Geometri model kapal DTMB 5415

Proses penentuan nilai *Grid Independence* dilakukan untuk memastikan bahwa *output* dari simulasi *software* CFD mewakili dari objek aslinya. Berikut adalah hasil proses *Grid Independence* dengan variasi jumlah *Grid* $1.5-2 \times cell$ sebelumnya dan deviasi yang diperbolehkan maksimal 2% dari *Grid* sebelumnya.



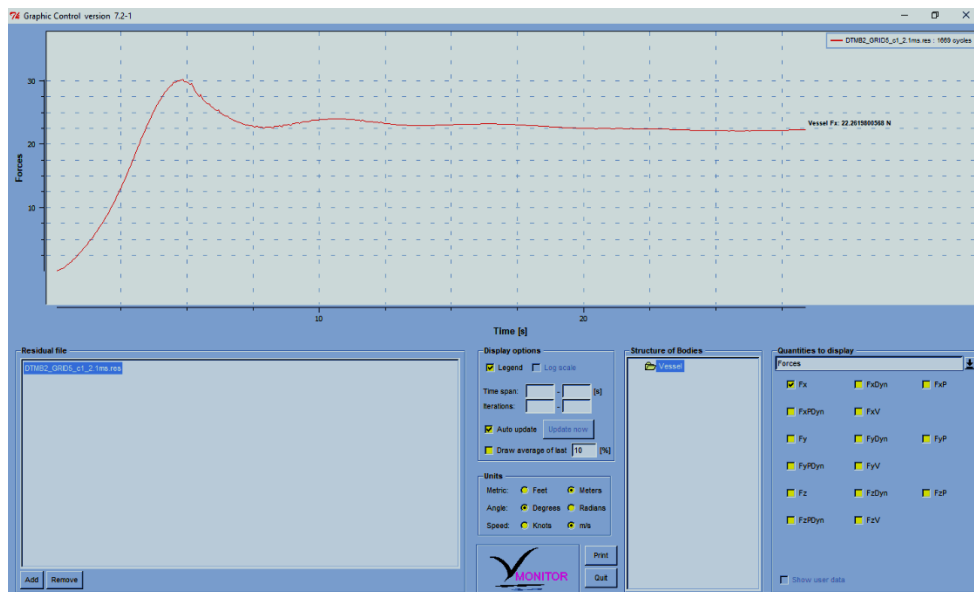
Gambar 4.30 *Grid Independence* C_T Kapal DTMB 5414

Berdasarkan hasil simulasi CFD didapatkan jumlah *Cells* yakni pada 3.4×10^6 yang dilakukan pada pengujian ke-5 sesuai dengan selisih koefisien hambatan yakni 0.78 %. Pada pengujian ke-6 dengan jumlah *Cells* 6.9×10^6 didapatkan selisih

hambatan yang ada sebesar 0.24%, akan tetapi waktu yang diperlukan *solver* melakukan dengan spesifikasi komputer memerlukan waktu 2 kali dari pengujian ke-5. Selanjutnya untuk simulasi numerik jumlah *Cells* yang dipakai adalah 3.4×10^6 dengan pertimbangan antara hasil *output* masih pada *range* dibawah 2% dan waktu proses lebih cepat 0.5 dari waktu yang dibutuhkan dalam proses *solver* ke-6. Untuk nilai *Grid Independence* sesuai dengan gambar 4.31 dan tabel 4.8.

Tabel 4. 8 *Grid Independence* simulasi CFD

No Simulasi	1	2	3	4	5	6
Jumlah <i>Cells</i>	0.2×10^6	0.4×10^6	0.9×10^6	1.4×10^6	3.4×10^6	6.9×10^6
C_T	4.56×10^{-3}	4.36×10^{-3}	4.19×10^{-3}	4.15×10^{-3}	4.12×10^{-3}	4.11×10^{-3}
Deviasi %		4.35	3.98	0.84	0.78	0.24



Gambar 4.31 *Monitor Solver* dari kapal DTMB 5414

Hasil pengujian *benchmarking* dengan menggunakan *software NUMECA* pada kapal DTMB 5415 sebagaimana disajikan pada tabel 4.9 berikut ini.

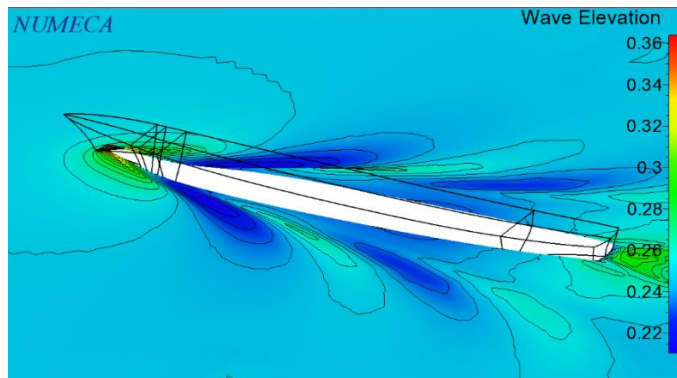
Tabel 4. 9 Perbandingan koefisien hambatan (C_T) DTMB 5414

<i>Froude Number</i> (F_R)	C_T Eksperimen (Ahmed & Guedes, 2009)	C_T CFD	
		Ahmed & Guedes, 2009	Penelitian ini
$F_R = 0.8$	4.230×10^{-3}	4.330×10^{-3}	4.150×10^{-3}

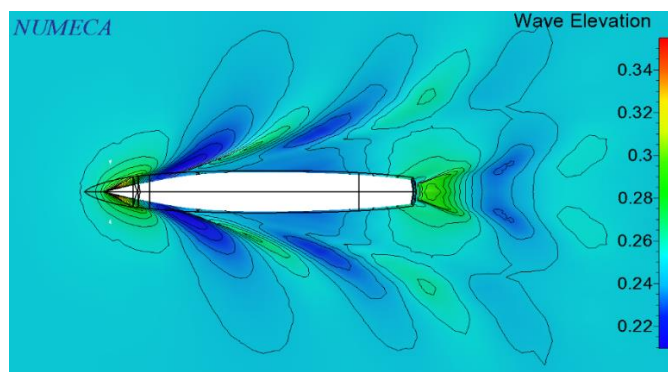
Pada tabel 4.9 dapat dilihat perbandingan hasil perhitungan komponen koefisien hambatan antara *software* CFD yang digunakan pada penelitian ini terhadap hasil eksperimen dan numerik dari penelitian Ahmed & Guedes (2009), (2009) dengan deviasi 2% terhadap nilai hasil eksperimen dan 4% terhadap nilai hasil dari penelitian Ahmed & Guedes (2009). Berdasarkan hasil di atas dapat disimpulkan, bahwa *software* CFD yang digunakan pada penelitian ini mampu memprediksi nilai praktis yang sama untuk koefisien resistansi, seperti halnya dengan koefisien eksperimental. Hal ini memberi indikasi tentang tingkat akurasi yang cukup signifikan ketika memprediksi nilai resistansi secara numerik.

Pada gambar 4.31 di atas diperoleh dari hasil simulasi CFD dengan nilai F_x , yaitu menampilkan gaya yang terjadi pada model geometri kapal pada sumbu X-axis dengan kapal melaju dikecepatan 6.17m/s atau $F_R = 0.294$, didapatkan nilai F_x sebesar 22.261 N. Gaya F_x merupakan gaya yang terjadi pada geometri kapal pada arah sumbu X-axis atau dapat dikatakan sebagai hambatan total pada proses *benchmarking test* kapal DTMB 5414. Dengan bentuk grafik seperti di atas menunjukkan bahwa proses perhitungan hambatan pada CFD telah mencapai konvergen.

Pada gambar 4.32 menunjukkan hasil simulasi CFD dengan *Wave Pattern* yakni menampilkan ketinggian gelombang dengan kapal melaju pada kecepatan 6.17m/s atau $F_R = 0.294$. Pada sisi kanan dari gambar ditampilkan pengukuran dari warna biru sampai dengan warna merah, dimana warna biru untuk ketinggian gelombang yang terendah dan warna merah untuk ketinggian gelombang yang tertinggi pada proses *benchmarking test* kapal DTMB 5414

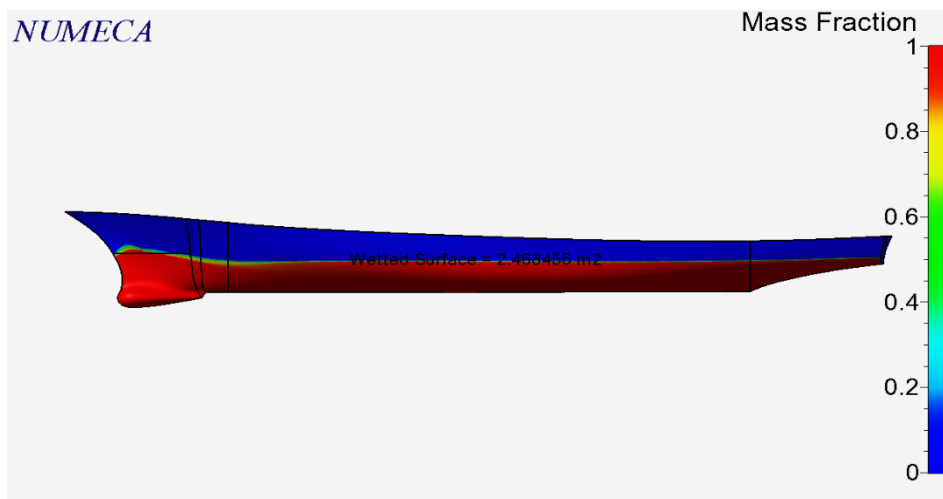


(a)



(b)

Gambar 4.32 *Wave Pattern* kapal DTMB 5414 (a dan b)



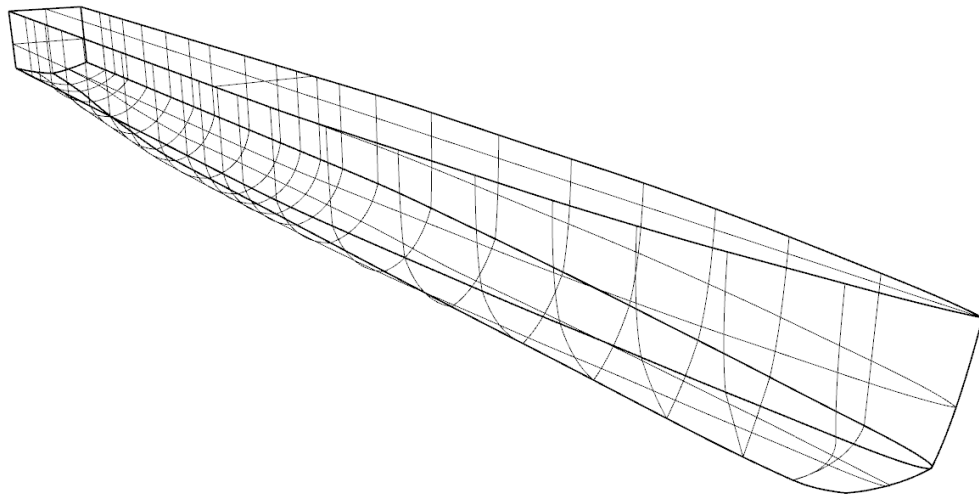
Gambar 4.33 *Wetted Surface Area* kapal DTMB 5414

Pada gambar 4.33 di atas didapatkan hasil dari simulasi CFD dengan *Wetted Surface Area (WSA)* yaitu menampilkan luasan kapal yang tercelup air dan perpindahan fluida yang terjadi akibat kapal melaju pada kecepatan 6.17m/s atau

$F_R = 0.294$. Pada sisi kanan dari gambar ditampilkan pengukuran garis warna biru sampai dengan warna merah, dimana warna biru untuk perpindahan massa yang terendah dan warna merah untuk perpindahan massa yang tertinggi pada proses *benchmarking test* kapal DTMB 5414.

4.2.4. Simulasi CFD hambatan *demihull* kapal katamaran

Pada penelitian ini dilakukan simulasi hambatan lambung *demihull* dari kapal katamaran untuk mengetahui interferensi hambatan yang terjadi, selain itu juga untuk memverifikasi hasil simulasi CFD dengan teori hambatan kapal katamaran yang ada. Gambar dibawah ini adalah model 3D geometri lambung *demihull* kapal katamaran

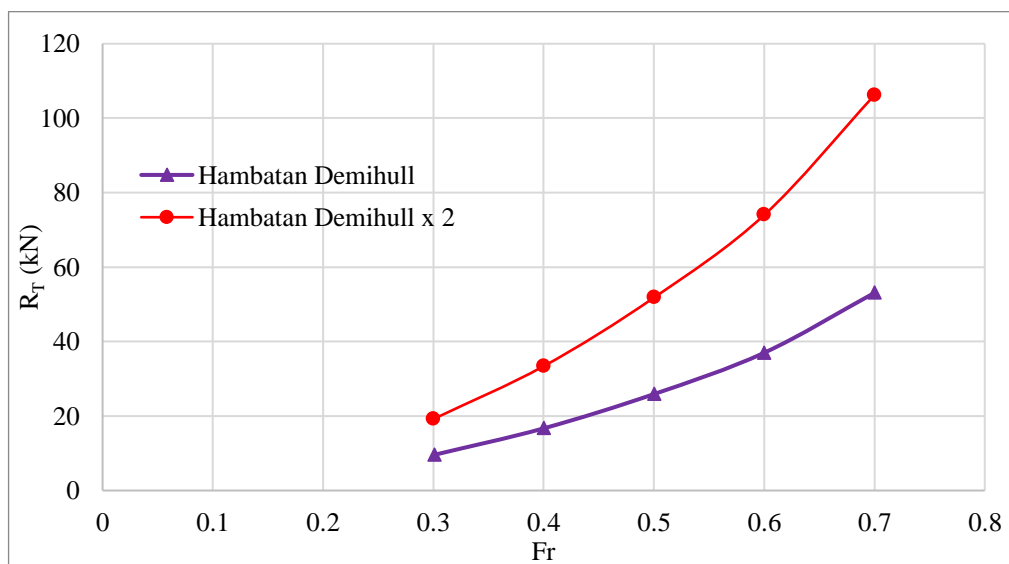


Gambar 4. 34 Model kapal katamaran *round bilge* tanpa foil

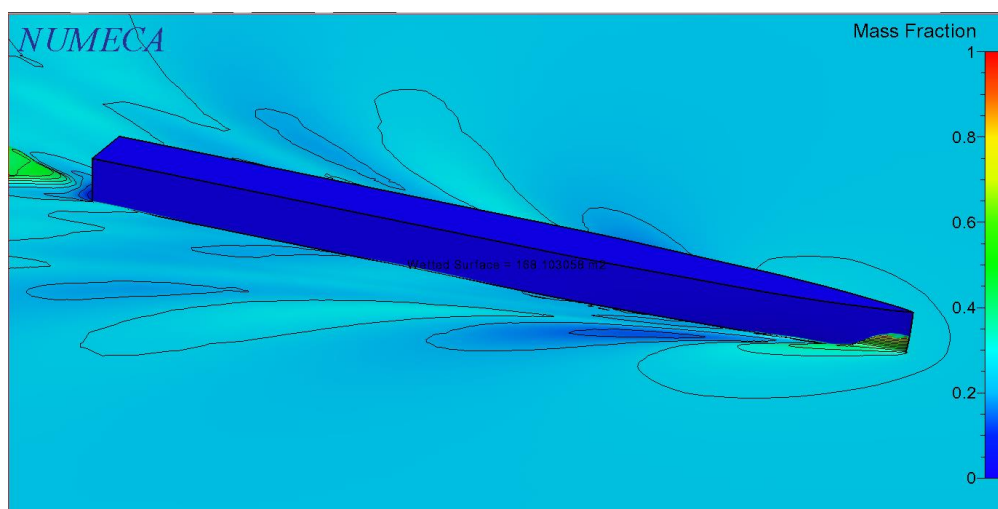
Perhitungan hambatan kapal katamaran menggunakan simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan bantuan komputer. Pada perhitungan simulasi CFD untuk mendapatkan hambatan dilakukan pada lambung kapal *demihull*. Hasil simulasi CFD menggunakan *software NUMECA* untuk mendapatkan hambatan kapal pada model geometri kapal katamaran tanpa foil dengan variasi kecepatan 12, 16, 20, 24 dan 28 knot diuraikan berikut ini

Tabel 4. 10 Nilai hambatan total lambung *demihull*

Fr	V (Knot)	R _T Demihull (kN)	R _T Demihull × 2 (kN)
0.3	12	9.6	19.2
0.4	16	16.7	33.4
0.5	20	25.9	51.8
0.6	24	37	74
0.7	28	53.1	106.2



Gambar 4. 35 Grafik hambatan total lambung *demihull* dan kapal katamaran terhadap kecepatan kapal (Fr)



Gambar 4. 36 *Wave Pattern* lambung kapal *demihull*

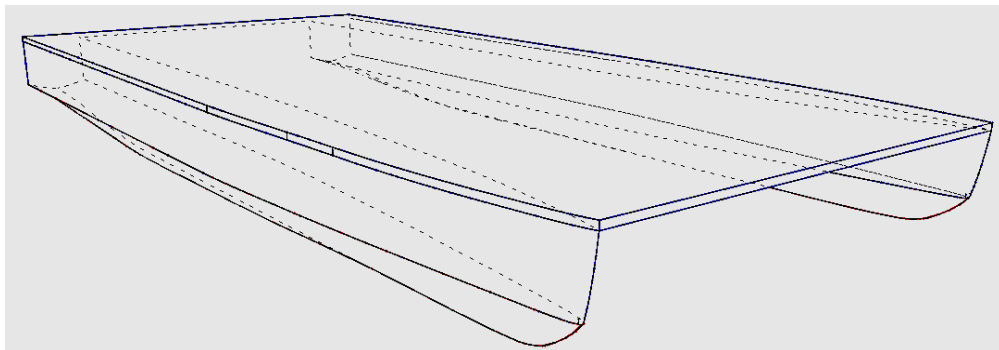
4.2.5. Simulasi CFD hambatan kapal tanpa foil (K0)

Pembuatan model lambung kapal katamaran menggunakan *Software Rhinoceros*. Ukuran utama mengacu pada referensi pada tabel 4.10 dengan Jarak antara demihull adalah $S/L = 0,4$ (nilai S/L untuk kapal katamaran berkisar 0,2 sampai dengan 0,4) (Sakti, 2012). Selanjutnya melakukan variasi penambahan foil pada kapal katamaran sebagaimana dijelaskan pada gambar 4.34 hingga 4.36 dibawah ini

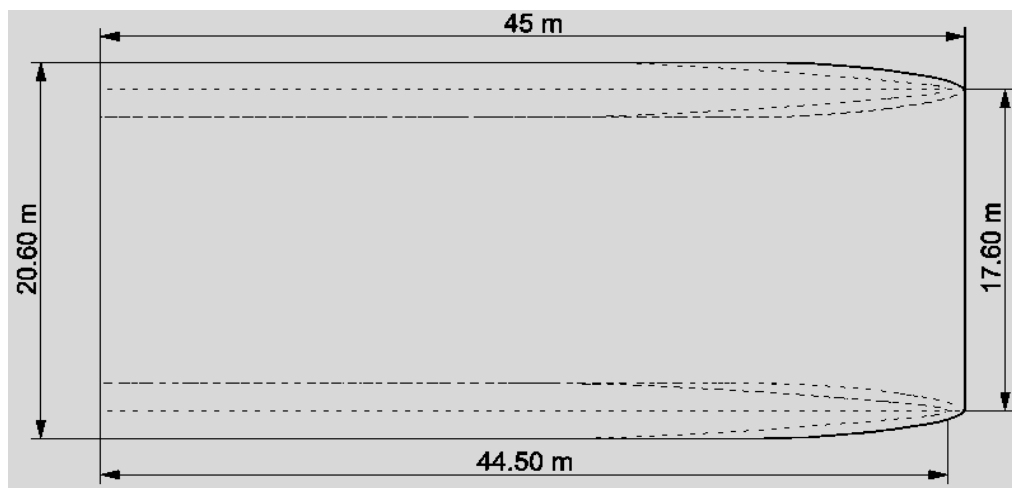
Tabel 4. 11 Ukuran utama kapal katamaran tanpa foil

Model kapal	LWL	<i>B</i> Katamaran	<i>B</i> Demihull	<i>T</i>	Displacement
Round Bilge	44 m	20.6 m	3 m	1.4 m	185.5 ton

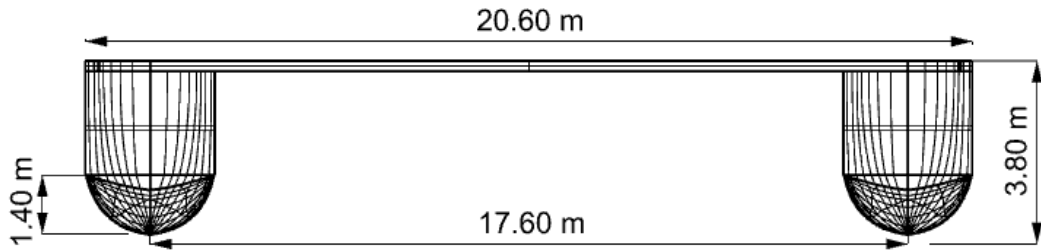
a) Model lambung kapal katamaran kondisi 1(K0):



Gambar 4.37 Model kapal katamaran *round bilge* tanpa foil

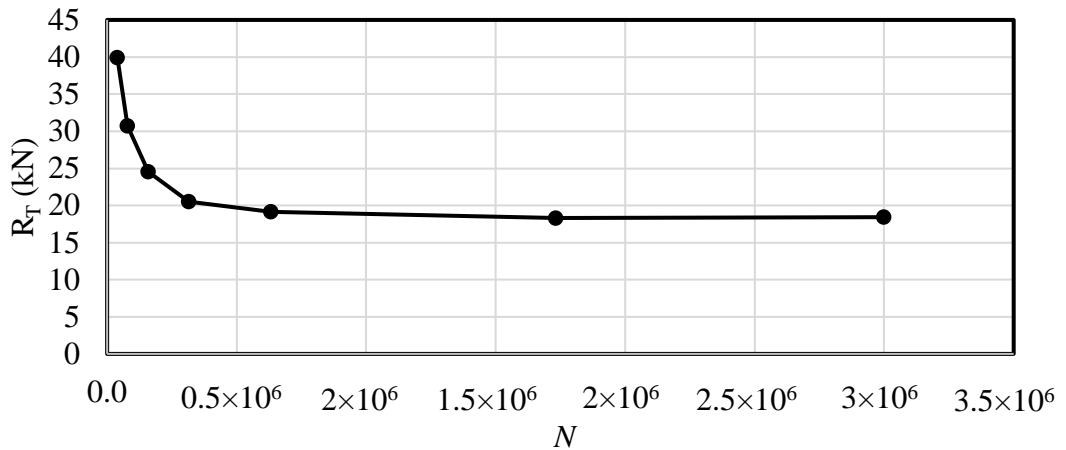


Gambar 4.38 Tampak atas model katamaran *round-bilge* tanpa Foil



Gambar 4.39 *Bodyplan* kapal katamaran *round bilge* tanpa foil

Selanjutnya dilakukan proses *grid independence* untuk mendapatkan jumlah elemen yang sesuai dan digunakan untuk simulasi CFD, berikut adalah hasil dari *grid independence*



Gambar 4.40 *Grid Independence* dari R_T kapal katamaran tanpa foil

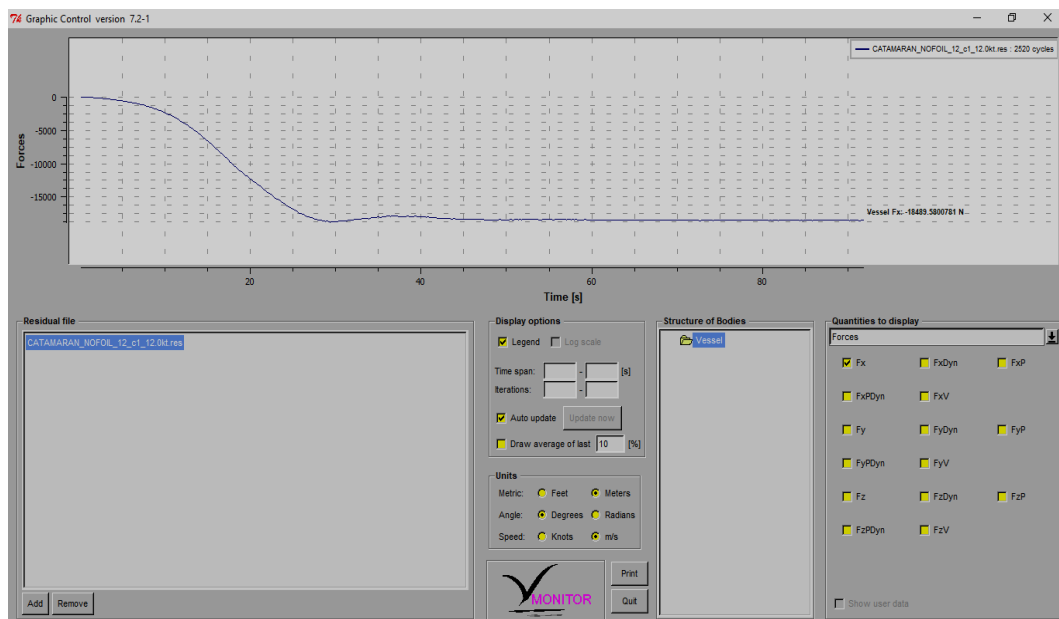
Proses simulasi CFD model kapal katamaran tanpa foil pada kecepatan kapal F_R 0.3 telah mendapatkan hasil yang konvegen, sehingga didapatkan jumlah *Cells* yakni pada 2.99×10^6 pada pengujian ke-7 sesuai dengan selisih hambatan yakni 0.73 %. Pada pengujian ke-6 dengan jumlah *Cells* 1.73×10^6 memerlukan waktu 3 kali lebih cepat dari pengujian ke-7. Selanjutnya untuk simulasi numerik jumlah *Cells* yang dipakai adalah 1.73×10^6 dengan pertimbangan antara hasil *output* masih pada *range* dibawah 5% dan waktu proses lebih cepat dari waktu yang dibutuhkan

dalam proses *solver* ke-7. Untuk nilai *Grid Independence* sesuai dengan gambar 4.37 dan tabel 4.11

Tabel 4.12 *Grid Independence* simulasi CFD katamaran tanpa foil

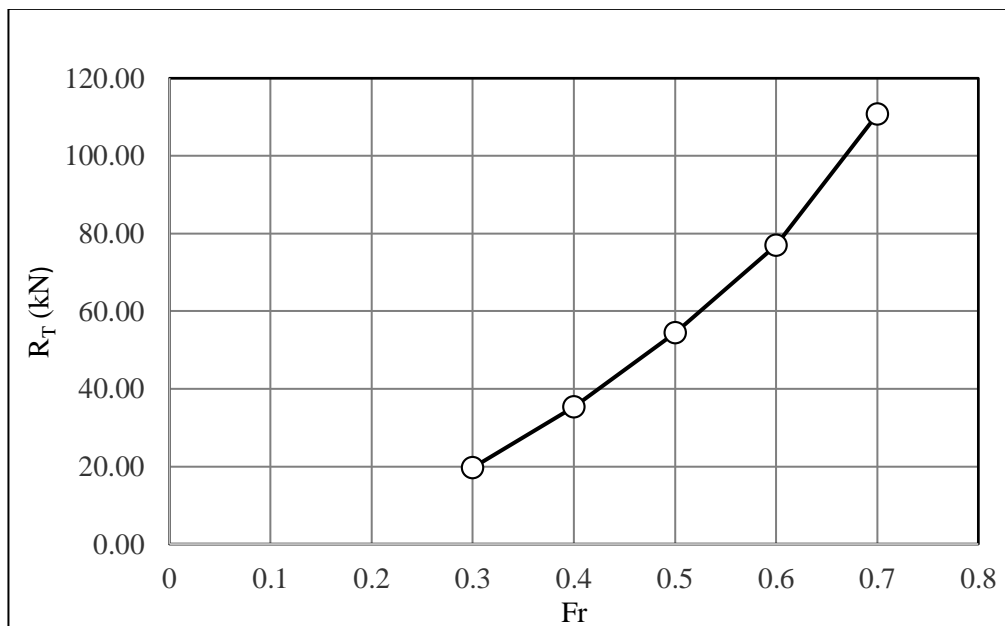
No. Pengujian	1	2	3	4	5	6	7
Jumlah <i>Cells</i>	0.02×10^6	0.06×10^6	0.15×10^6	0.3×10^6	0.6×10^6	1.6×10^6	2.9×10^6
R_T	39.92	30.71	24.56	20.47	19.13	18.31	18.44
Deviasi %		30.12	25.17	19.89	7.1	4.28	0.73

Perhitungan hambatan kapal katamaran menggunakan simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan bantuan komputer. Pada perhitungan simulasi CFD untuk mendapatkan hambatan dilakukan pada kapal katamaran tanpa foil. Hasil simulasi CFD menggunakan *software NUMECA* untuk mendapatkan hambatan kapal pada model geometri kapal katamaran tanpa foil dengan variasi kecepatan 12, 16, 20, 24 dan 28 knot diuraikan berikut ini



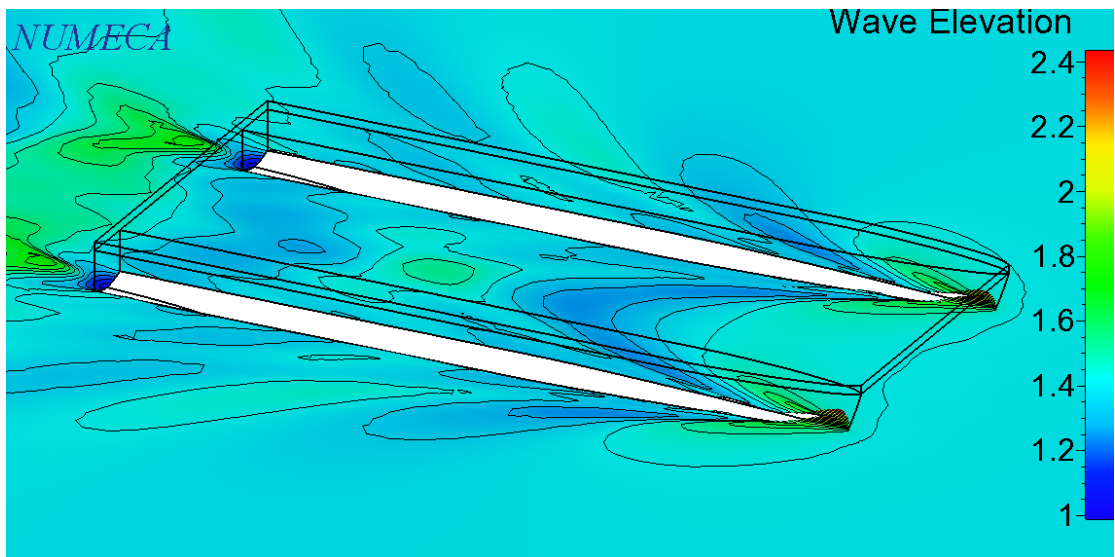
Gambar 4.41 nilai F_x pada *Monitor Solver* kapal katamaran tanpa foil (K0)

Pada gambar 4.38 diperoleh dari hasil simulasi CFD dengan nilai F_x , yang menampilkan gaya yang terjadi pada model geometri kapal pada sumbu X-axis akibat kapal melaju dikecepatan 6.17 m/s atau $F_R = 0.3$ didapatkan nilai F_x sebesar 19.71 kN. Gaya F_x yang merupakan gaya yang terjadi pada geometri kapal pada arah sumbu X-axis yang disebut sebagai hambatan total pada proses simulasi CFD kapal katamaran tanpa *foil*. Dengan bentuk grafik seperti di atas menunjukkan bahwa proses perhitungan hambatan pada CFD telah mencapai konvergensi. Dengan cara yang sama simulasi CFD dilakukan untuk kecepatan kapal 16, 20, 24 dan 28 knot, hasil hambatan total kapal adalah 35.32 kN; 54.40 kN; 77.12 kN dan 110.72 kN. Berikut adalah grafik hambatan hasil simulasi CFD

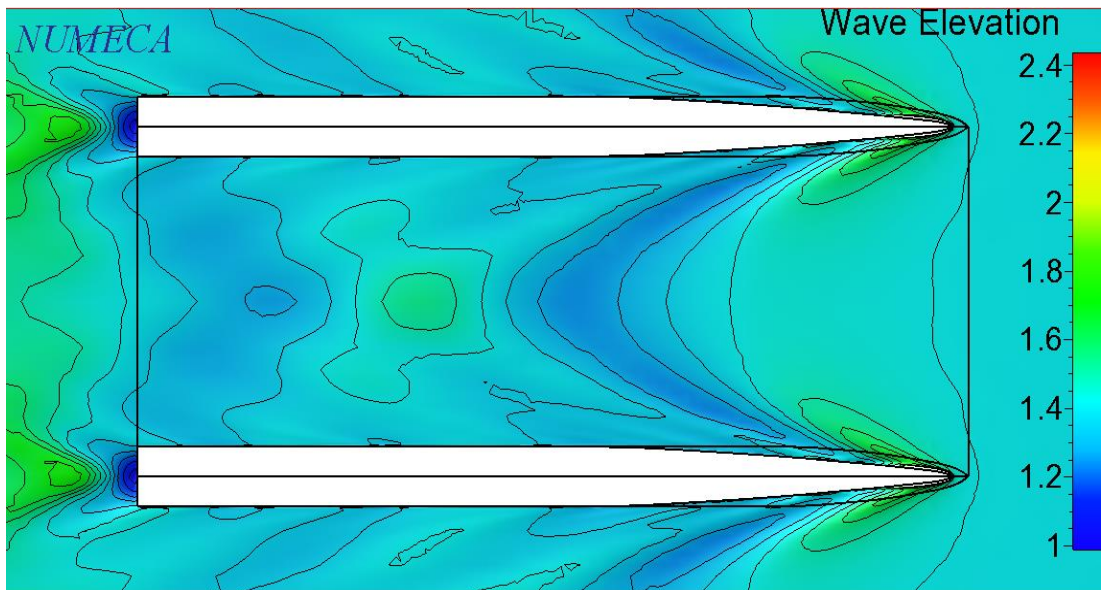


Gambar 4 42 Grafik simulasi CFD hambatan kapal katamaran tanpa foil (K0)

Pada gambar 4.39 didapatkan hasil simulasi CFD dengan *Wave Pattern* yakni menampilkan ketinggian gelombang kapal melaju pada kecepatan 6.17m/s atau $F_R = 0.3$ pada sisi kanan dari gambar ditampilkan pengukuran warna biru sampai dengan warna merah, dimana warna biru untuk ketinggian gelombang yang terendah dan warna merah untuk ketinggian gelombang yang tertinggi pada proses simulasi CFD kapal katamaran tanpa foil

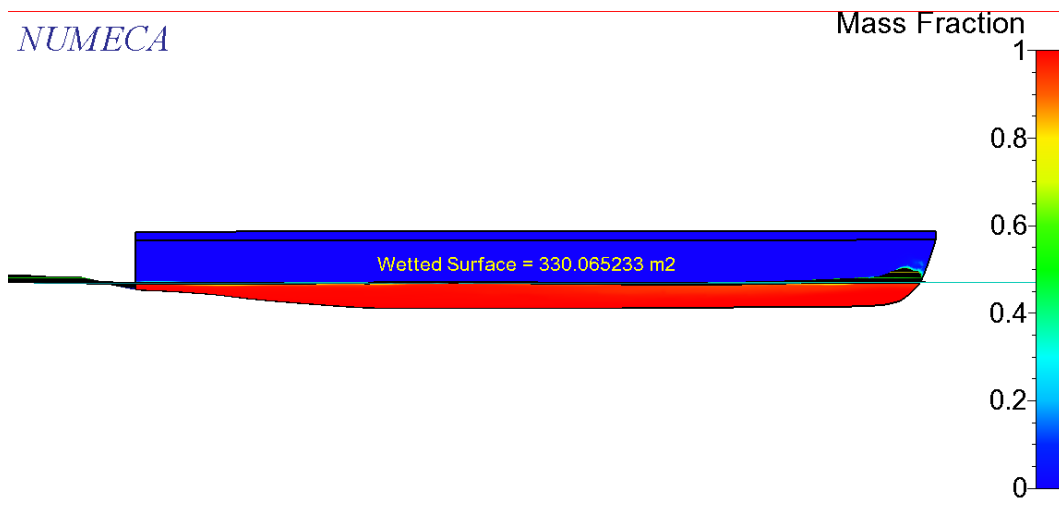


(a)



(b)

Gambar 4.43 *Wave Pattern* kapal katamaran tanpa foil (K0) (gambar a dan b)



Gambar 4.44 *Wetted Surface Area* kapal katamaran tanpa foil (K0)

Pada gambar 4.41 di atas ini didapatkan hasil dari simulasi CFD dengan *Wetted Surface Area* (WSA) yakni menampilkan luasan kapal yang tercelup air dan perpindahan fluida yang terjadi akibat kapal melaju dikecepatan 6.17 m/s atau $F_R = 0.3$. Pada sisi kanan dari gambar ditampilkan pengukuran garis warna biru sampai dengan warna merah, dimana warna biru untuk perpindahan massa yang terendah dan warna merah untuk perpindahan massa yang tertinggi pada proses simulasi CFD kapal katamaran tanpa foil. Untuk visual dari hasil CFD pada kecepatan 16 knot, 20 knot, 24 knot, dan 28 knot akan di lampirkan.

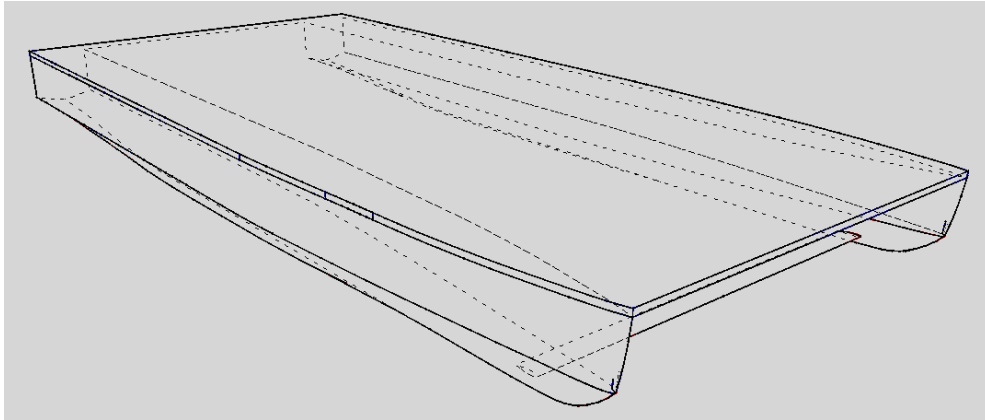
4.2.6. Simulasi CFD hambatan kapal dengan 1 foil (K1)

Pembuatan model lambung kapal katamaran menggunakan *Software Rhinoceros*. Ukuran utama mengacu pada referensi pada tabel 4.10 dengan Jarak antara demihull adalah $S/L = 0,4$ (nilai S/L untuk kapal katamaran berkisar 0,2 sampai dengan 0,4) (Sakti, 2012). Selanjutnya melakukan variasi penambahan foil pada kapal katamaran sebagaimana dijelaskan pada gambar 4.42 hingga 4.44 dibawah ini

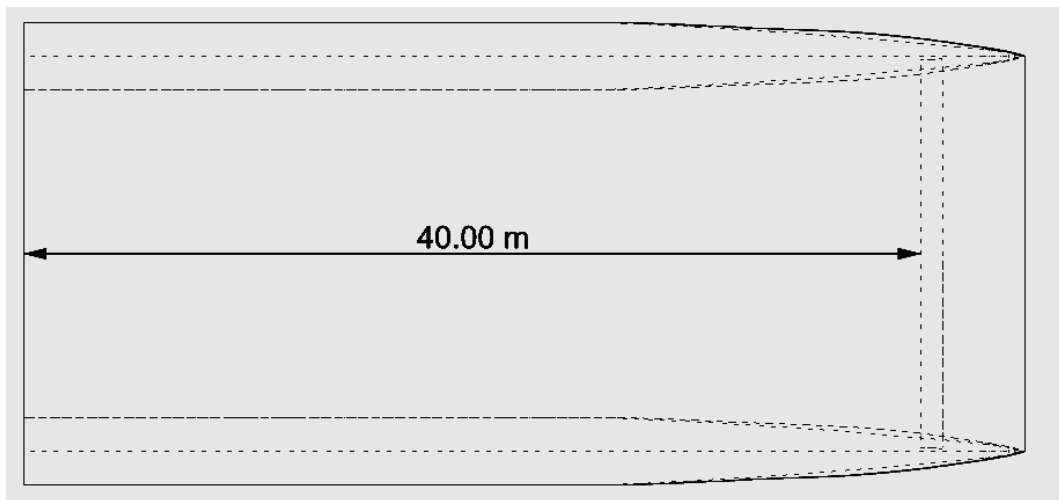
Tabel 4. 13 Ukuran utama kapal katamaran dengan 1 foil

Model kapal	<i>LWL</i>	<i>B</i> Katamaran	<i>B</i> Demihull	<i>T</i>	<i>Displacement</i>
<i>Round Bilge</i>	44 m	20.6 m	3 m	1.4 m	185.5 ton

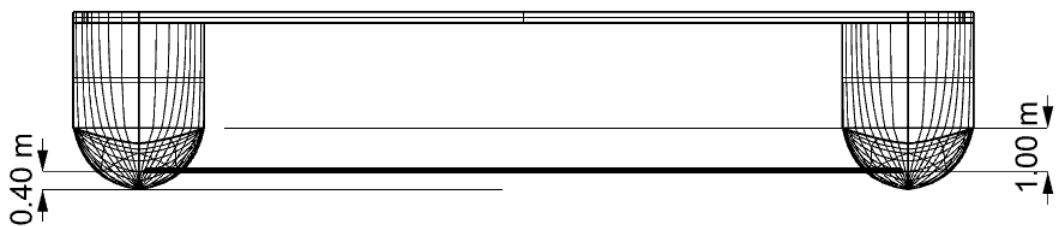
a) Model lambung kapal katamaran kondisi 2 (K1):



Gambar 4.45 Model kapal katamaran *round bilge* dengan 1 foil di haluan

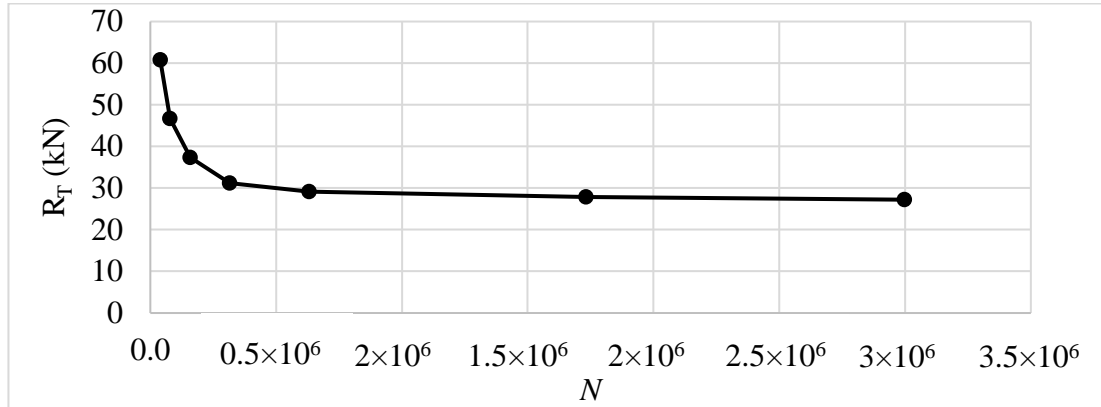


Gambar 4.46 Tampak atas model katamaran *round-Bilge* dengan 1 foil ditempatkan di haluan



Gambar 4.47 *Bodyplan* kapal katamaran *round bilge* dengan 1 foil di haluan

Selanjutnya dilakukan proses *grid independence* untuk mendapatkan jumlah elemen yang sesuai dan digunakan untuk simulasi CFD, berikut adalah hasil dari *grid independence*



Gambar 4.48 *Grid Independence* dari R_T Kapal Katamaran 1 Foil

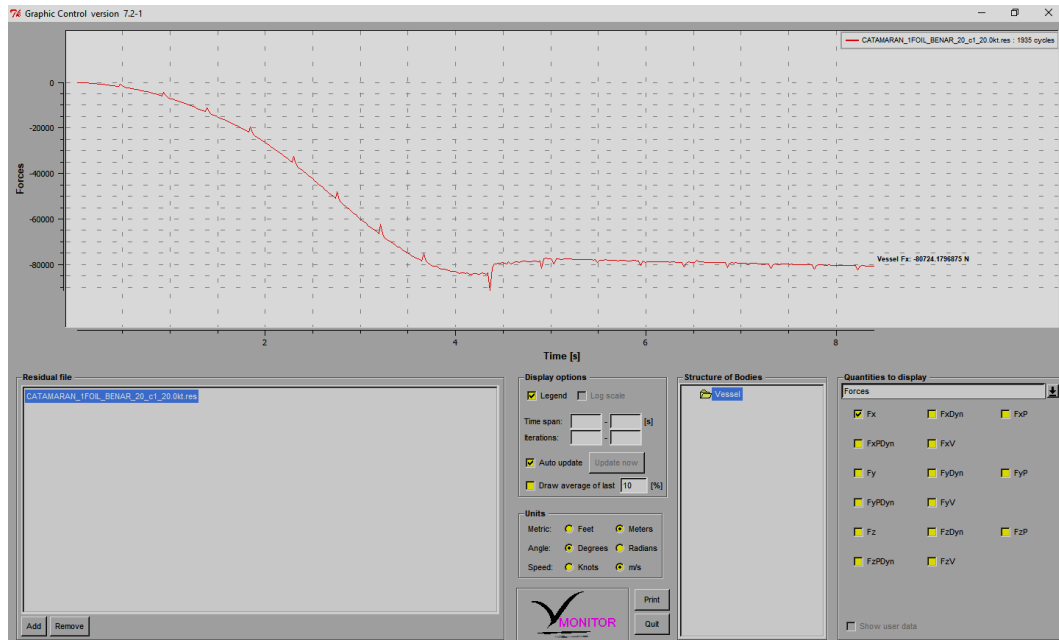
Proses simulasi CFD model kapal katamaran tanpa foil pada kecepatan kapal F_R 0.3 telah mendapatkan hasil yang konvergen, sehingga didapatkan jumlah *Cells* yakni pada 2.99×10^6 pada pengujian ke-7 sesuai dengan selisih hambatan yakni 2.11 %. Pada pengujian ke-6 dengan jumlah *Cells* 1.73×10^6 memerlukan waktu 3 kali lebih cepat dari pengujian ke-7. Selanjutnya untuk simulasi numerik jumlah *Cells* yang dipakai adalah 1.73×10^6 dengan pertimbangan antara hasil *output* masih pada *range* dibawah 5% dan waktu proses lebih cepat dari waktu yang dibutuhkan dalam proses *solver* ke-7. Untuk nilai *Grid Independence* sesuai dengan gambar 4.45 dan tabel 4.13

Tabel 4.14 *Grid Independence* simulasi CFD katamaran dengan 1 foil

No. Pengujian	1	2	3	4	5	6	7
Jumlah <i>Cells</i>	0.03×10^6	0.07×10^6	0.15×10^6	0.3×10^6	0.6×10^6	1.7×10^6	3×10^6
R_T	60.76	46.74	37.39	31.16	29.12	27.81	27.21
Deviasi %		23.07	20	16.66	6.54	4.50	2.11

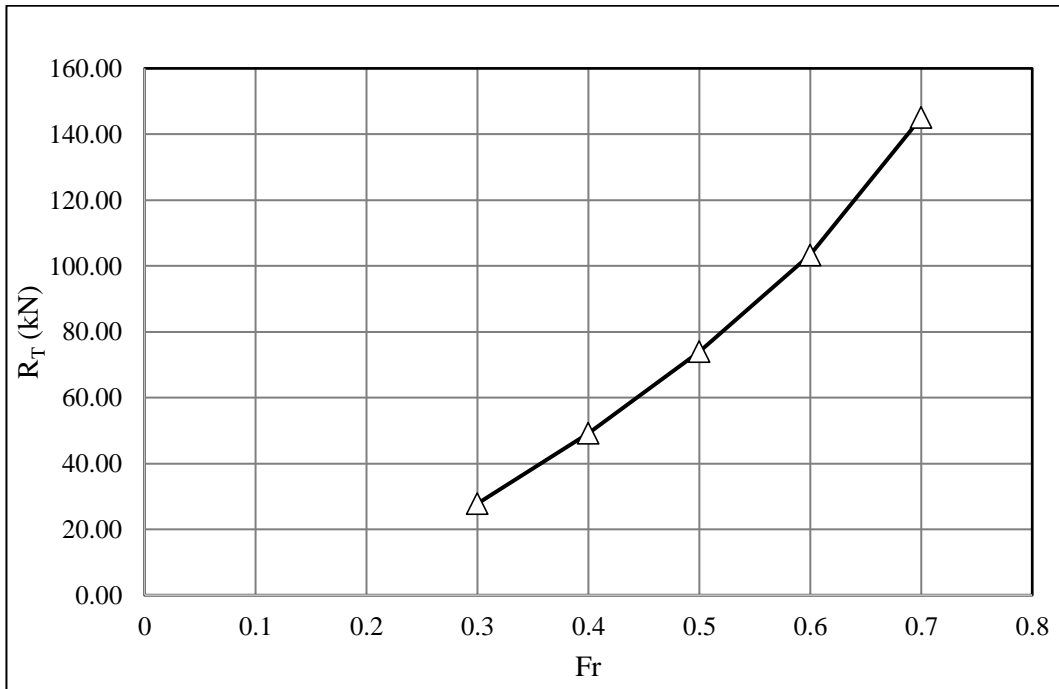
Perhitungan hambatan kapal dengan 1 *foil* menggunakan simulasi CFD dilakukan untuk mendapatkan hambatan kapal. Pada simulasi CFD untuk

mendapatkan hambatan dilakukan pada kapal dengan dengan 1 *foil* di bagian haluan kapal (K1). Berikut ini adalah hasil simulasi CFD menggunakan *software NUMECA* untuk mendapatkan hambatan kapal pada model geometri kapal katamaran menggunakan 1 *foil* di bagian haluan kapal dengan variasi kecepatan 12, 16, 20, 24 dan 28 knot.



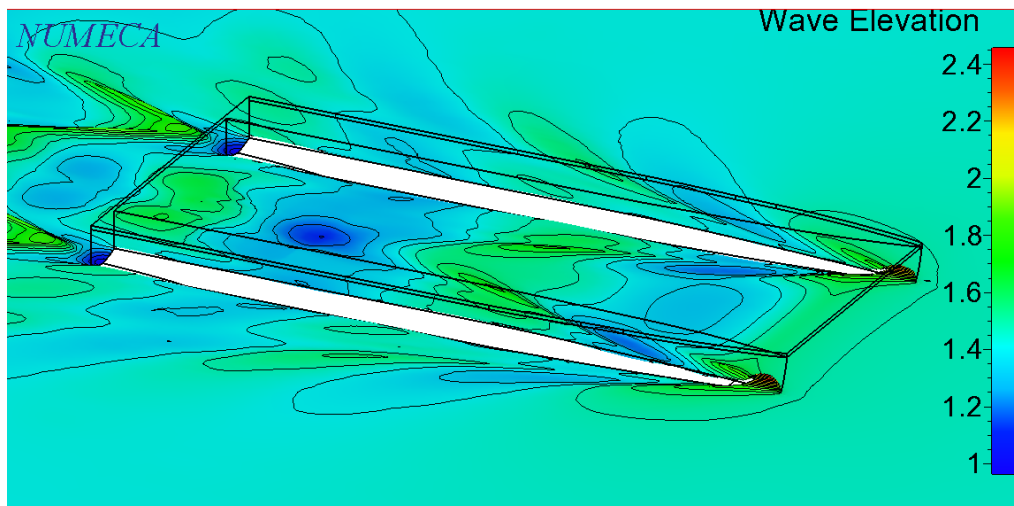
Gambar 4.49 Nilai Fx pada *Monitor Solver* kapal katamaran dengan 1 foil (K1)

Pada gambar 4.46 di atas didapatkan dari hasil simulasi CFD dengan nilai Fx, yaitu menampilkan gaya yang terjadi pada model geometri kapal pada sumbu X-axis akibat kapal melaju dikecepatan 6.17 m/s atau $F_R = 0.3$. didapatkan nilai Fx sebesar 27.81 kN. Gaya Fx merupakan gaya yang terjadi pada geometri kapal pada arah sumbu X-axis atau dapat dikatakan sebagai hambatan total pada proses simulasi CFD kapal katamaran dengan 1 *foil*. Dengan bentuk grafik seperti di atas menunjukkan bahwa proses perhitungan hambatan pada CFD telah mencapai konvergensi. Dengan cara yang sama simulasi CFD dilakukan untuk kecepatan kapal 16, 20, 24 dan 28 knot dengan hasil hambatan kapal total adalah 49.19 kN; 74.01 kN; 103.41 kN; dan 145.09 kN. Berikut ini adalah grafik hambatan hasil simulasi CFD.

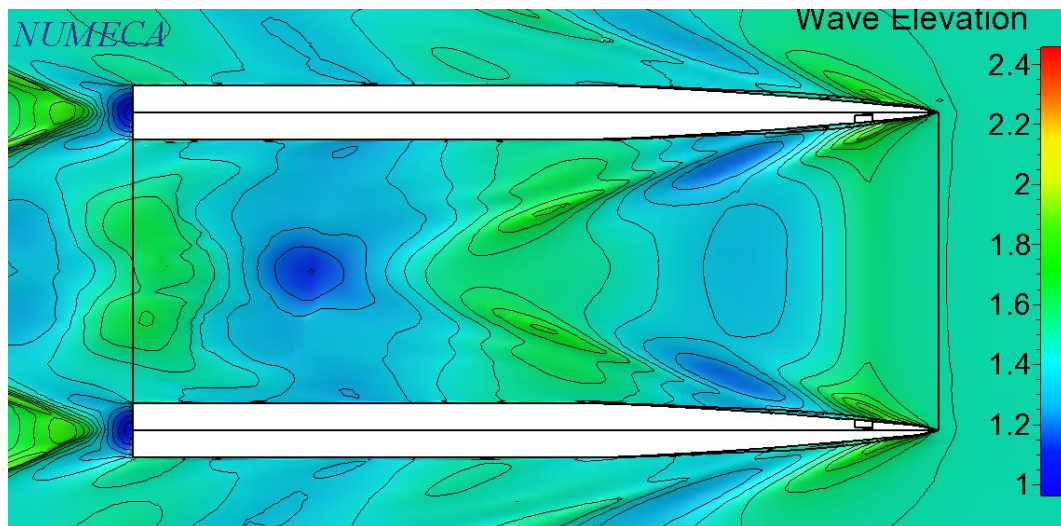


Gambar 4.50 Grafik Simulasi CFD hambatan kapal katamaran dengan 1 foil (K1)

Pada gambar 4.48 didapatkan hasil dari simulasi CFD dengan *Wave Pattern* yakni menampilkan ketinggian dari gelombang akibat kapal melaju dikecepatan 6.17 m/s atau $Fr = 0.3$ pada sisi kanan dari gambar ditampilkan pengukurand ari warna biru sampai dengan warna merah, dimana warna biru untuk ketinggian gelombang yang terendah dan warna merah untuk ketinggian gelombang yang tertinggi pada proses simulasi CFD kapal katamaran 1 foil.

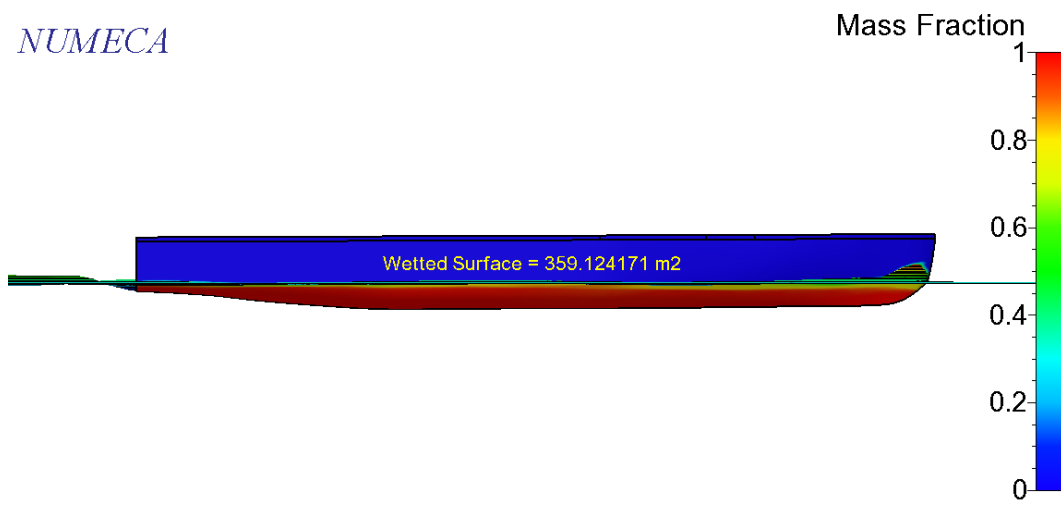


(a)



(b)

Gambar 4.51 *Wave Pattern* kapal katamaran 1 foil (K1) (gambar a dan b)



Gambar 4.52 *Wetted Surface Area* kapal katamaran 1 foil (K1)

Pada Gambar 4.49 di atas didapatkan hasil dari simulasi CFD dengan *Wetted Surface Area* yakni menampilkan luasan kapal yang tercelup air dan perpindahan fluida yang terjadi akibat kapal melaju dikecepatan 6.17m/s atau $F_R = 0.3$ pada sisi kanan dari gambar ditampilkan pengukurand gari warna biru sampai dengan warna merah, dimana warna biru untuk perpindahan massa yang terendah dan warna merah untuk perpindahan massa yang tertinggi pada proses simulasi CFD kapal

katamaran 1 *foil*. Untuk visual dari hasil CFD pada kecepatan 16 knot, 20 knot, 24 knot, dan 28 knot akan di lampirkan.

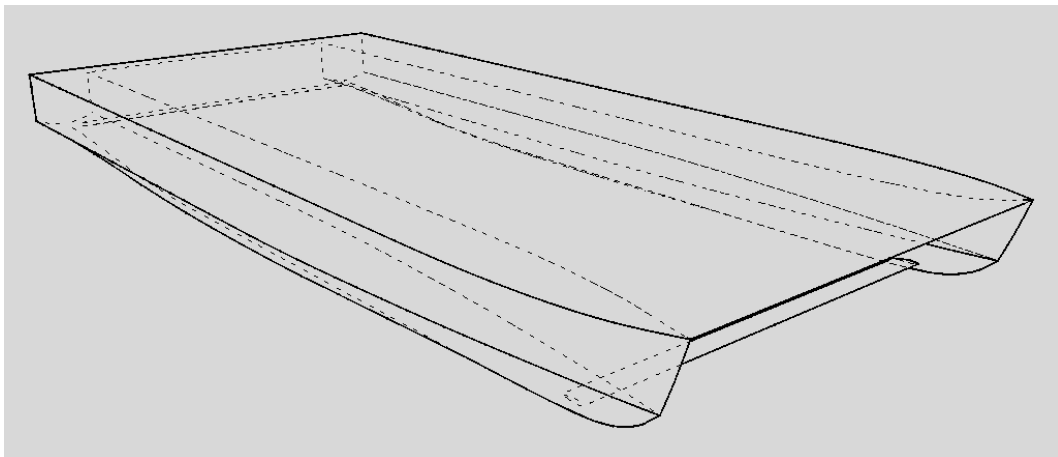
4.2.7. Simulasi CFD hambatan kapal dengan 2 foil (K2)

Pembuatan model lambung kapal katamaran menggunakan *Software Rhinoceros*. Ukuran utama mengacu pada referensi pada tabel 4.10 dengan Jarak antara demihull adalah $S/L = 0,4$ (nilai S/L untuk kapal katamaran berkisar 0,2 sampai dengan 0,4) (Sakti, 2012). Selanjutnya melakukan variasi penambahan foil pada kapal katamaran sebagaimana dijelaskan pada gambar 4.50 hingga 4.52 dibawah ini

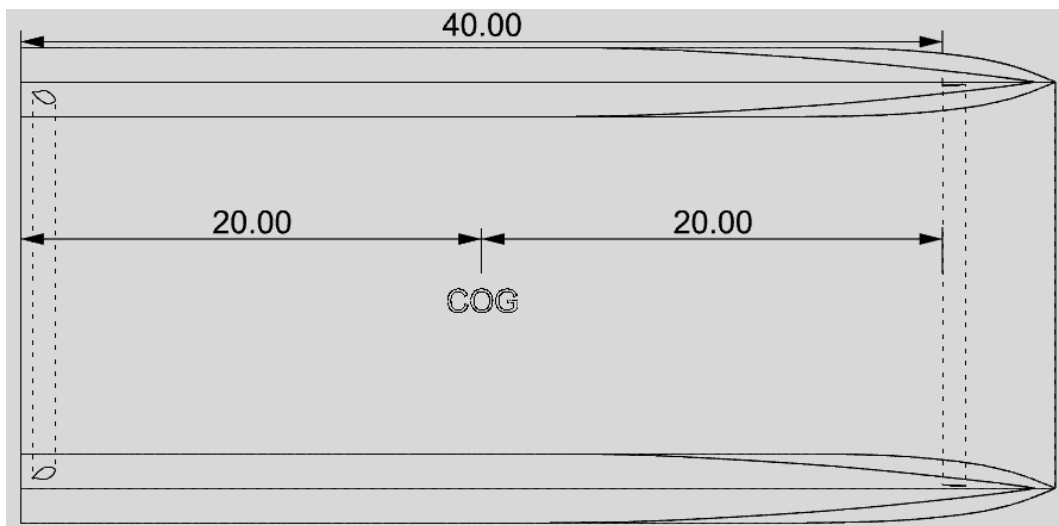
Tabel 4. 15 Ukuran utama kapal katamaran dengan 2 foil

Model kapal	<i>LWL</i>	<i>B</i> Katamaran	<i>B</i> Demihull	<i>T</i>	<i>Displacement</i>
<i>Round Bilge</i>	44 m	20.6 m	3 m	1.4 m	185.5 ton

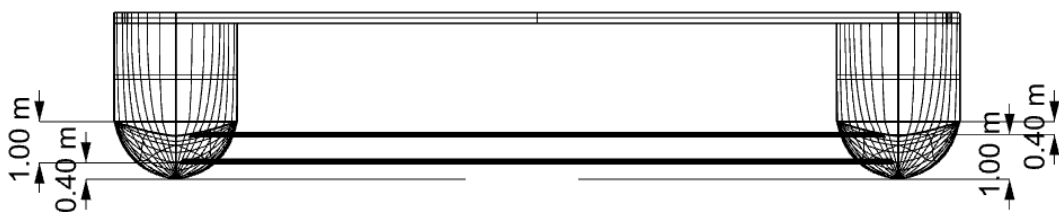
a) Model lambung kapal katamaran kondisi 3 (K2):



Gambar 4.53 Model kapal katamaran *Round Bilge* dengan 2 foil

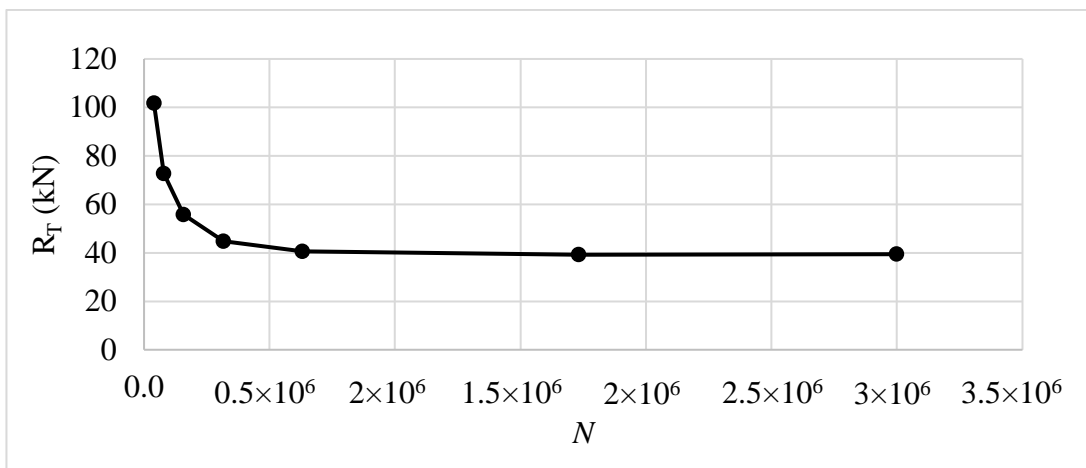


Gambar 4.54 Tampak atas model katamaran *round-bilge* dengan menggunakan 2 foil yang ditempatkan di haluan (posisi 1) dan di buritan



Gambar 4.55 *Bodyplan* kapal katamaran *round bilge* dengan 2 foil

Selanjutnya dilakukan proses *grid independence* untuk mendapatkan jumlah elemen yang sesuai dan digunakan untuk simulasi CFD, berikut adalah hasil dari *grid independence*



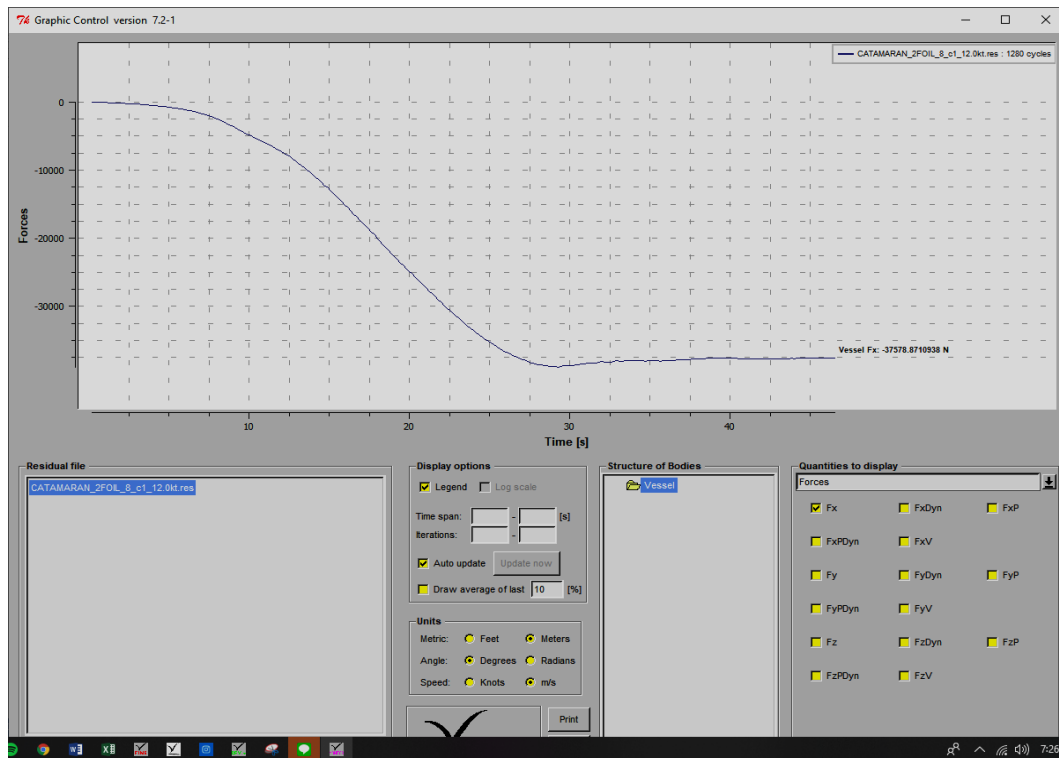
Gambar 4.56 *Grid Independence* dari R_T Kapal Katamaran dengan 2 foil

Proses simulasi CFD model kapal katamaran tanpa foil pada kecepatan kapal F_R 0.3 telah mendapatkan hasil yang konvegen, sehingga didapatkan jumlah *Cells* yakni pada 2.99×10^6 pada pengujian ke-7 sesuai dengan selisih hambatan yakni 0.56 %. Pada pengujian ke-6 dengan jumlah *Cells* 1.73×10^6 memerlukan waktu 3 kali lebih cepat dari pengujian ke-7. Selanjutnya untuk simulasi numerik jumlah *Cells* yang dipakai adalah 1.73×10^6 dengan pertimbangan antara hasil *output* masih pada *range* dibawah 5% dan waktu proses lebih cepat dari waktu yang dibutuhkan dalam proses *solver* ke-7. Untuk nilai *Grid Independence* sesuai dengan gambar 4.53 dan tabel 4.15

Tabel 4.16 Grid Independence simulasi CFD kapal katamaran dengan 2 foil

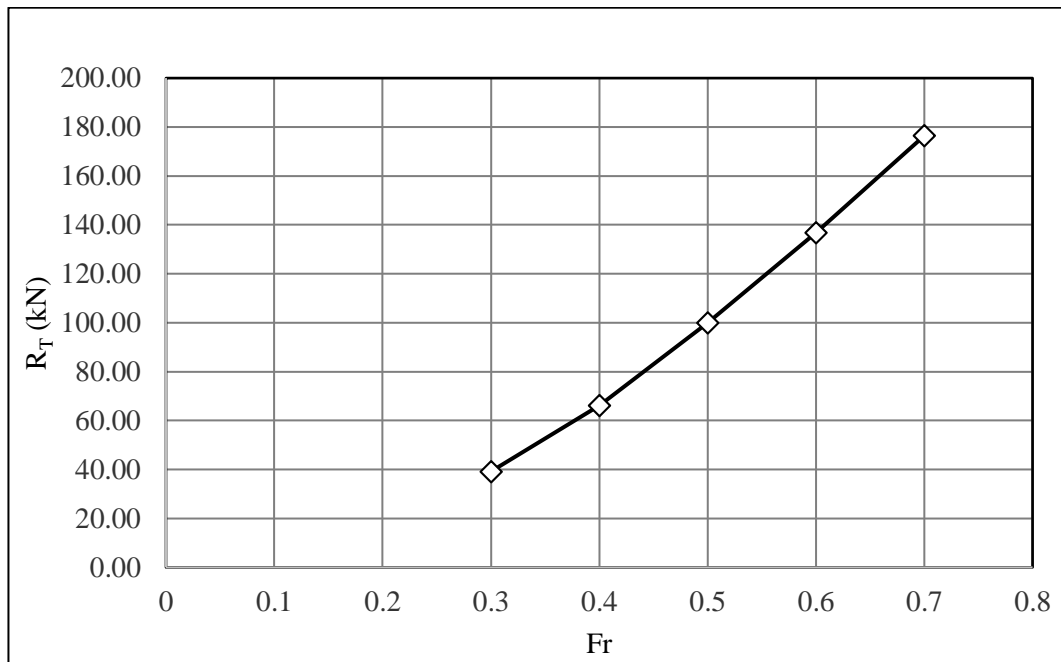
No. Pengujian	1	2	3	4	5	6	7
Jumlah <i>Cells</i>	0.03×10^6	0.07×10^6	0.16×10^6	0.4×10^6	0.7×10^6	1.6×10^6	3×10^6
R_T	101.72	72.66	55.89	44.71	40.65	39.21	39.43
Deviasi %		28.57	23.07	20	9.09	3.54	-0.56

Perhitungan hambatan kapal dengan 2 *foil* menggunakan simulasi CFD dilakukan untuk mendapatkan hambatan kapal. Perhitungan simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan bantuan komputer. Pada simulasi CFD untuk mendapatkan hambatan dilakukan pada kapal dengan menggunakan 1 *foil* di bagian haluan kapal dan 1 *foil* di bagian buritan kapal. Berikut adalah hasil simulasi CFD menggunakan *software NUMECA* untuk mendapatkan hambatan kapal pada model geometri kapal katamaran menggunakan 1 *foil* di bagian haluan kapal dan 1 *foil* di bagian buritan kapal (K2) dengan variasi kecepatan 12, 16, 20, 24 dan 28 knot.



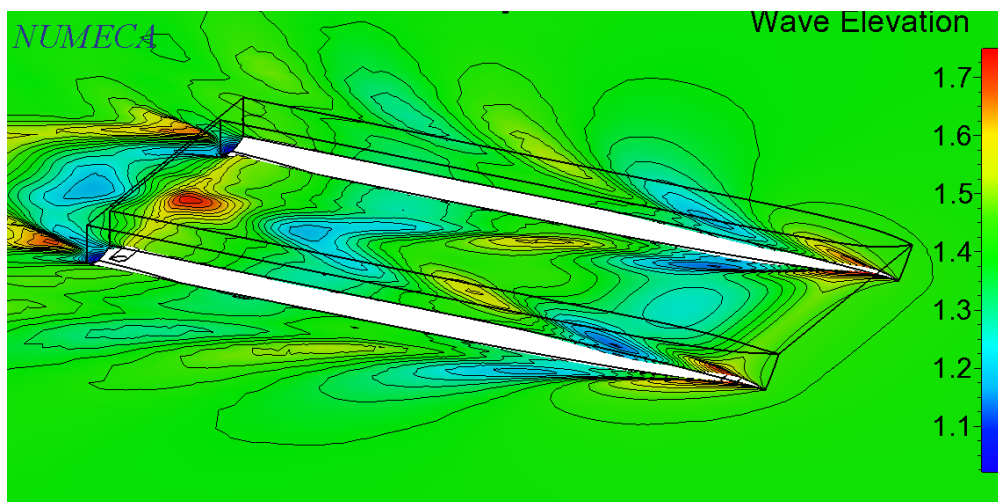
Gambar 4.57 Nilai Fx pada *Monitor Solver* kapal katamaran dengan 2 foil (K2)

Pada gambar 4.54 di atas diperoleh dari hasil simulasi CFD dengan nilai Fx, yaitu menampilkan gaya yang terjadi pada model geometri kapal pada sumbu X-axis akibat kapal melaju dikecepatan 6.17m/s atau $F_R = 0.3$. didapatkan nilai Fx sebesar 39.21 N. Gaya Fx merupakan gaya yang terjadi pada geometri kapal pada arah sumbu X-axis atau dapat dikatakan sebagai hambatan total pada proses simulasi CFD kapal katamaran tanpa foil. Dengan bentuk grafik seperti di atas menunjukkan bahwa proses perhitungan hambatan pada CFD telah mencapai konvergensi. Dengan cara yang sama simulasi CFD dilakukan untuk kecepatan kapal 16, 20, 24 dan 28 knot dengan hasil hambatan kapal total adalah 66.22 kN; 99.12 kN; 136.82 kN; dan 176.40 kN. Berikut ini adalah grafik hambatan hasil simulasi CFD

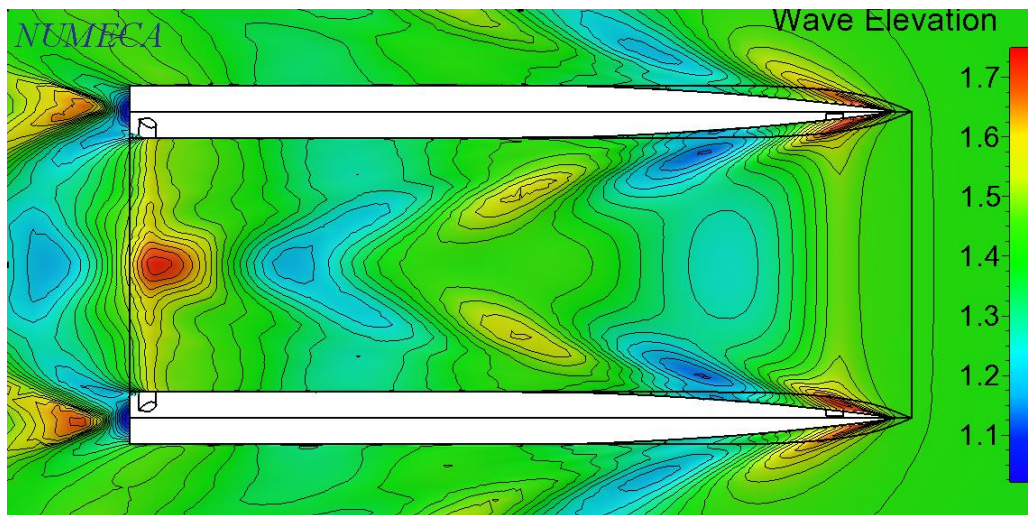


Gambar 4.58 Simulasi CFD hambatan kapal katamaran dengan 2 foil (K2)

Pada Gambar 4.56 didapatkan hasil dari simulasi CFD dengan *Wave Pattern* yakni menampilkan ketinggian dari gelombang akibat kapal melaju pada kecepatan 6.17m/s atau $Fr = 0.3$ pada sisi kanan dari gambar ditampilkan pengukuran dari warna biru sampai dengan warna merah, dimana warna biru untuk ketinggian gelombang yang terendah dan warna merah untuk ketinggian gelombang yang tertinggi pada proses simulasi CFD kapal katamaran dengan 2 foil

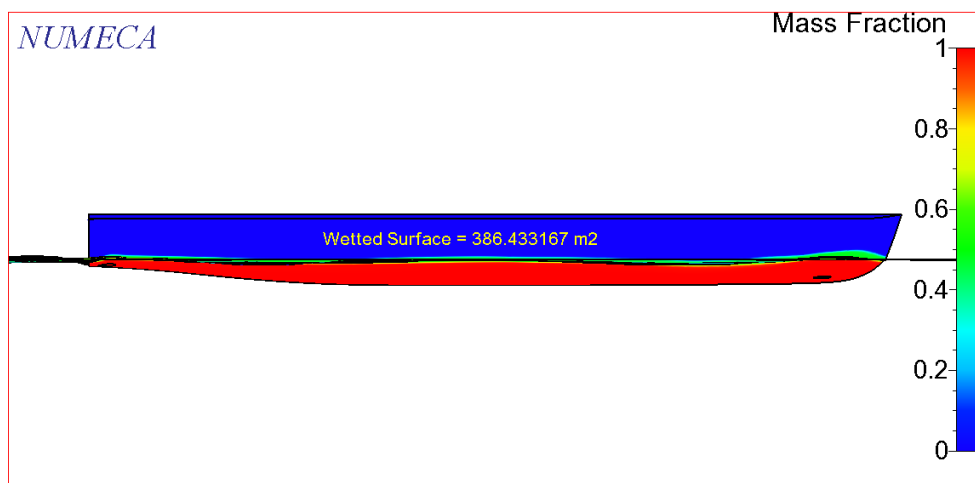


(a)



(b)

Gambar 4.59 *Wave Pattern* kapal katamaran 2 foil (K2) (gambar a dan b)



Gambar 4.60 *Wetted Surface Area* kapal katamaran 2 foil (K2)

Pada Gambar 4.57 di atas ini didapatkan hasil dari simulasi CFD dengan *Wetted Surface Area* yakni menampilkan luasan kapal yang tercelup air dan perpindahan fluida yang terjadi akibat kapal melaju dikecepatan 6.17m/s atau $F_R = 0.3$ pada sisi kanan dari gambar ditampilkan pengukurand gari warna biru sampai dengan warna merah, dimana warna biru untuk perpindahan massa yang terendah dan warna merah untuk perpindahan massa yang tertinggi pada proses simulasi CFD kapal katamaran *2 foil*

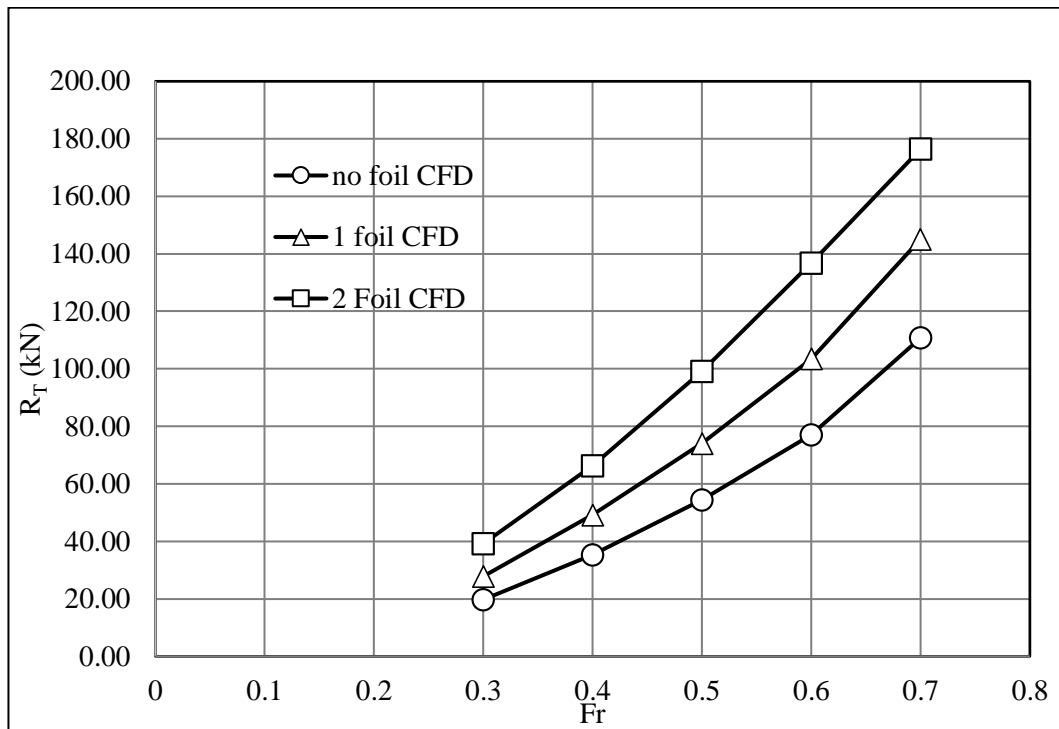
4.3. Hasil Simulasi CFD Kapal Katamaran tanpa dan dengan Foil

Berdasarkan hasil simulasi CFD dilakukan pada kapal katamaran tanpa foil dan dengan foil pada sub di atas yaitu; 4.2.4 sampai dengan 4.2.6, selanjutnya diakumulasi dalam tabel 4.16 berikut ini. Simulasi CFD model kapal kondisi K0 adalah kapal katamaran tanpa foil. Sedangkan untuk model kapal dengan foil divariasikan menjadi 2 variasi yakni kondisi K1 dengan 1 foil di bagian haluan, dan kondisi K2 untuk 2 foil yang dipasang di bagian haluan dan buritan kapal. Simulasi CFD hambatan total kapal dengan variasi kecepatan 12, 16, 20, 24, dan 28 knot.

Tabel 4.17 Hasil Simulasi CFD kapal tanpa foil (K0), 1 foil (K1) dan 2 foil (K2)

Run ke-	V (knot)	V (m/s)	F_R	K0 (kN)	K1 (kN)	K2 (kN)
1	12	6.17	0.3	19.71	27.81	39.21
2	16	8.23	0.4	35.32	49.19	66.22
3	20	10.29	0.5	54.40	74.01	99.12
4	24	12.35	0.6	77.12	103.41	136.82
5	28	14.403	0.7	110.72	145.09	176.40

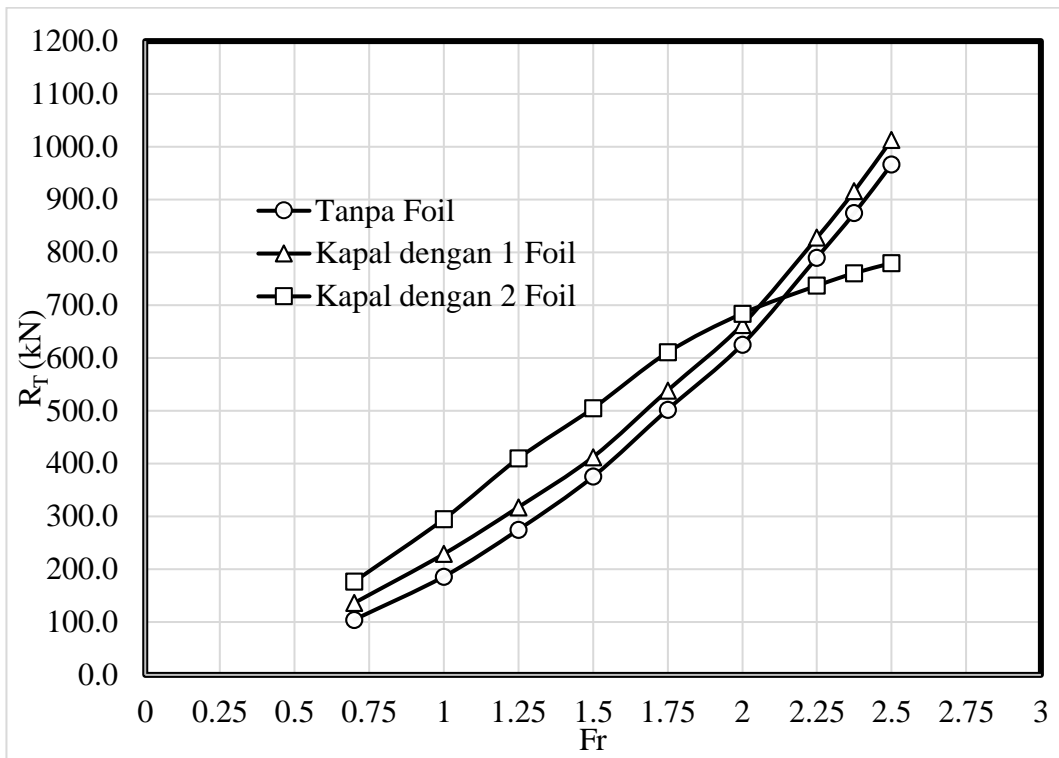
Pada hasil hambatan total sesuai dengan tabel 4.16 yang kemudian kita plotkan kedalam grafik, sehingga menghasilkan gambar 4.58. Grafik pada gambar 4.58 tersebut, dimana kondisi kapal tanpa foil (K0) hambatan bertambah seiring dengan meningkatnya kecepatan di *Froude number* 0.3 sampai 0.7. Pada grafik gambar tersebut terlihat pula bahwa, pada model kapal katamaran dengan penambahan 1 foil di bagian haluan (K1), terjadi penambahan hambatan total kapal terhadap kapal katamaran tanpa foil (K0) pada setiap kecepatan dari *Froude number* 0.3 sampai dengan 0.7. Demikian pula untuk model kapal katamaran dengan penambahan 2 foil dipasang di bagian haluan dan buritan kapal (K2), terjadi penambahan hambatan total kapal terhadap kapal katamaran tanpa foil (K0).



Gambar 4. 61 Simulasi CFD hambatan kapal katamaran kondisi K0, K1 dan K2

4.4. Simulasi CFD Kecepatan Tinggi

Simulasi CFD kapal katamaran dilakukan pada variasi kecepatan Fr 0.3 - 0.7, dengan kondisi K0, K1 dan K2. Hasil yang diperoleh dari simulasi hambatan kapal katamaran dengan penambahan foil pada Fr 0.3-0.7 belum memberikan efek pengurangan hambatan, tetapi justru menambah hambatan kapal. Oleh karena itu selanjutnya dilakukan simulasi CFD pada kecepatan yang lebih tinggi, Fr: 1.0 - 2.5. Hal ini dilakukan terpisah karena simulasi awal menyesuaikan dengan kapasitas pengujian hambatan kapal di *towing tank* yaitu hanya dapat dilakukan sampai kecepatan, Fr 0.7. Sedangkan simulasi CFD dapat dilakukan sampai pada kecepatan sangat tinggi. Simulasi hambatan kapal pada kecepatan tinggi dimaksudkan untuk mengetahui lebih lanjut pengaruh dari penambahan foil pada kapal katamaran. Berikut adalah hasil simulasi CFD kapal katamaran pada kecepatan tinggi.



Gambar 4. 62 Simulasi CFD hambatan kapal fungsi dari bilangan Froude (0.7-2.5)

BAB 5

PENGUJIAN HAMBATAN DI *TOWING TANK*

5.1. Pendahuluan Pengujian Hambatan

Pada dasarnya hambatan kapal dapat diestimasi dengan menggunakan pendekatan analisis dan hidrostatis yang diolah dengan simulasi. Namun demikian pada akhirnya pendekatan percobaan secara eksperimental model uji kapal juga diperlukan, karena memiliki tingkat akurasi data yang lebih tinggi. Berdasarkan hal tersebut penelitian mengenai hambatan kapal akan lebih efektif dengan menggunakan model uji kapal berukuran kecil yang memiliki skala tertentu terhadap skala kapal yang sebenarnya. Pengujian model uji kapal dilakukan di *Towing Tank*.

Pengujian hambatan kapal dilakukan pada tanggal 10 - 14 Oktober 2019 di Laboratorium Hidrodinamika Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan ITS, Surabaya. Hal-hal yang perlu disiapkan adalah model uji kapal dengan skala 1:50. Model uji kapal dibuat sesuai dengan data lines plan yang ada dengan menggunakan *fiberglass*. Tabel 5.1 berikut adalah ukuran utama kapal dan ukuran model uji kapal yang digunakan dalam pengujian laboratorium.

Tabel 5.1 Ukuran utama kapal dan ukuran model uji kapal

Ukuran	Kapal sebenarnya	Kapal model uji
<i>Loa</i>	44.9 m	0.9 m
<i>Lpp</i>	44 m	0.88 m
<i>B</i>	23.6 m	0.474 m
<i>B₁</i>	3 m	0.061 m
<i>H</i>	3.80 m	0.08 m
<i>T</i>	1.40 m	0.028 m
<i>WSA</i>	330.262 m ²	0.132 m ²
Δ	185.5 ton	0.0015 ton

Pengujian eksperimen model uji kapal yang dilakukan di laboratorium *Towing Tank* dengan kondisi sebagai berikut:

1. Kondisi 1 (K0) : kapal tanpa foil
2. Kondisi 2 (K1) : kapal dengan penambahan 1 foil di haluan kapal
3. Kondisi 3 (K2) : kapal dengan penambahan 1 foil di haluan kapal, dan 1 foil di buritan kapal

Kondisi 1 (K0) dengan foil haluan di tempatkan di haluan kapal dengan posisi 1 m (1 *cord*) di bawah permukaan garis air (WL) dan 40 m dari transom. Sedangkan kondisi (K1) adalah posisi foil haluan tetap seperti pada kondisi K0 dan posisi foil buritan diletakan di transom (posisi 0 m) dan kedalaman 0,4 m (0,4 *cord*) di bawah permukaan garis air.

Kecepatan model uji kapal pada eksperimen di *Towing Tank* dilakukan dengan variasi 12 knot sampai 28 knot sebagaimana tabel berikut:

Tabel 5.2 Kecepatan uji kapal

No	V kapal (knot)	V kapal (m/s)	V model	Re	Fr
1	12	6.17	0.87	6×10^6	0.3
2	16	8.23	1.16	8×10^6	0.4
3	20	10.28	1.45	1×10^7	0.5
4	24	12.34	1.74	1.2×10^7	0.6
5	28	14.40	2.03	1.4×10^7	0.7

5.2. Persiapan Uji Model Kapal

Sebelum dilakukan pengujian diperlukan penentuan titik berat model uji kapal untuk penempatan posisi *load cell*. Posisi titik berat kapal sebenarnya adalah sebagai berikut:

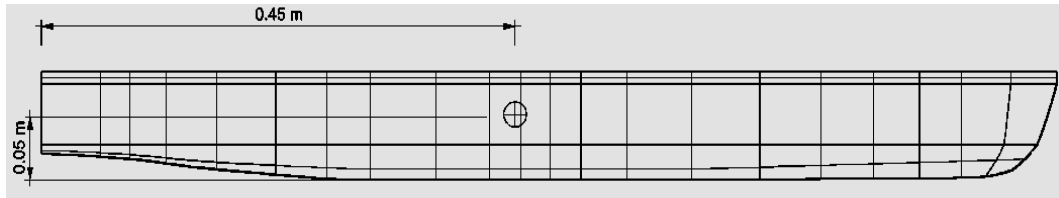
- Arah memanjang : LCG = 20.83 m dari AP
- Arah melintang : CoG = 0 m
- Arah vertikal : VCG = 2.18 m dari keel

Sedangkan pada model uji kapal dengan skala 1:50 didapatkan posisi titik berat:

- Arah memanjang : LCG = 0.45 m dari AP

- Arah melintang : CoG = 0 m
- Arah vertikal : $\underline{VCG} = 0.05$ m dari keel

Ilustrasi posisi penempatan *load keel* pada model uji kapal sebagaimana pada gambar berikut ini



Gambar 5.1 Letak titik berat LCG dan VCG pada model uji kapal

Berat dari model uji menggunakan acuan dari sarat kapal, sehingga saat model uji dimasukkan kedalam *Towing Tank* dan permukaan air belum mencapai sarat kapal, maka akan diberikan penambahan beban berupa plastisin atau logam sehingga kondisi model uji kapal *even keel* dan telah mencapai sarat kapal dari model uji seperti terlihat pada gambar 5.2 berikut.

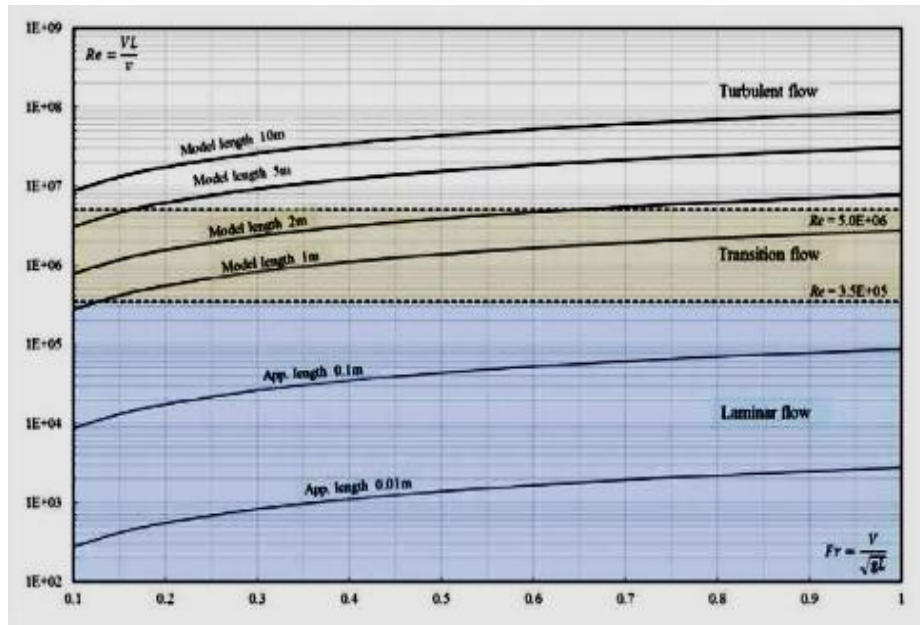


Gambar 5.2 Model uji kapal pada keadaan sarat penuh dan *even keel*

5.3. *Turbulent Stimulation*

Sesuai dengan rekomendasi pada *ITTC-Recommended Procedure and Guide Lines 7.5-01-01-01*, persyaratan *strip turbulent* digunakan pada *range transition*

flow dan *turbulent flow* seperti terlihat di gambar 5.3. Sedangkan pada model uji kapal catamaran memiliki bilangan reynolds (*reynold number*) $Re = 7.2 \times 10^6$, sehingga untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan kapal maka, diperlukan *turbulent stimulation* yang biasa berupa *sand strip* yang dipasang pada 5% Lpp dari FP. Penentuan pemasangan *sand strip* didasarkan grafik pada gambar 5.3 berikut.



Gambar 5.3 Kontur contoh plot berdasarkan Re untuk rentang model/*appendage* dan *Froude number*.

Pemasangan *turbulence stimulation* yang terbuat dari amplas dengan kekasaran 100 dengan lebar 50 mm dan terpasang dengan *leading edge* sekitar 5% LPP dibelakang FP sesuai rekomendasi ITTC (ITTC- *Recommended Procedures and Guideleines, Ship Model Manufacture*, 2002). Tujuan *turbulence stimulation* pada model uji kapal adalah untuk menstabilkan hambatan gesek model, sehingga kesesuaian hambatan gesek model tersebut dengan kondisi sebenarnya dapat dihitung secara akurat.

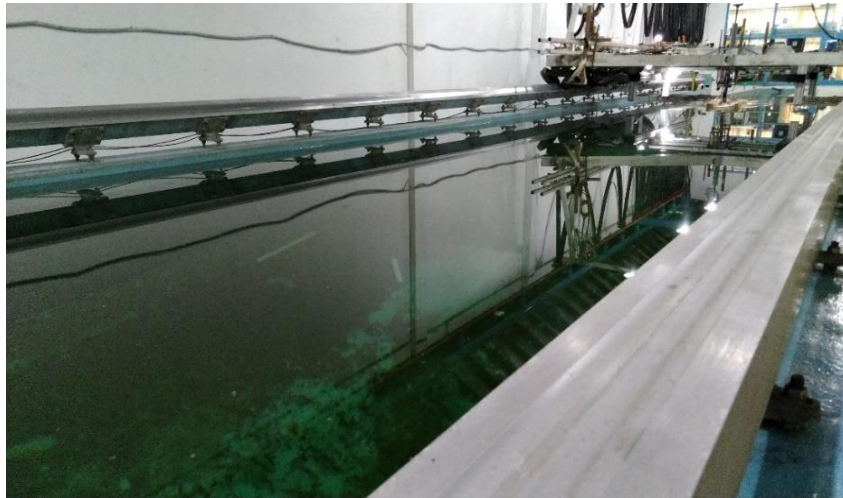
5.4. Pengujian Hambatan Kapal di *Towing Tank*

Pengujian eksperimen untuk mendapatkan hambatan kapal dilaksanakan di Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS. Hal-hal yang perlu disiapkan adalah model uji kapal, penyetelan kolam uji, pemasangan dan penyetelan model uji kapal di

kolam uji, kalibrasi. Pengujian hambatan ini mempunyai batas maksimum model dengan kecepatan aktual 28 knot atau $F_R = 0.7$. Jangkauan kecepatan pengujian adalah 12 knot sampai 28 knot. Adapun tahap pengujian hambatan kapal di *Towing Tank* adalah sebagai berikut :

1. *Setting* Kolam Uji

Sebagai persiapan awal harus dipastikan bahwa, isi air pada kolam uji cukup dan kereta uji pada kondisi siap untuk dioperasikan untuk pengujian model uji kapal. Dimensi kolam uji tarik (*Towing Tank*) Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS adalah panjang = 50 m, lebar = 3 m dan kedalaman = 1,8 m.



Gambar 5.4 *Setting* kolam uji

2. *Setting* Model Kapal

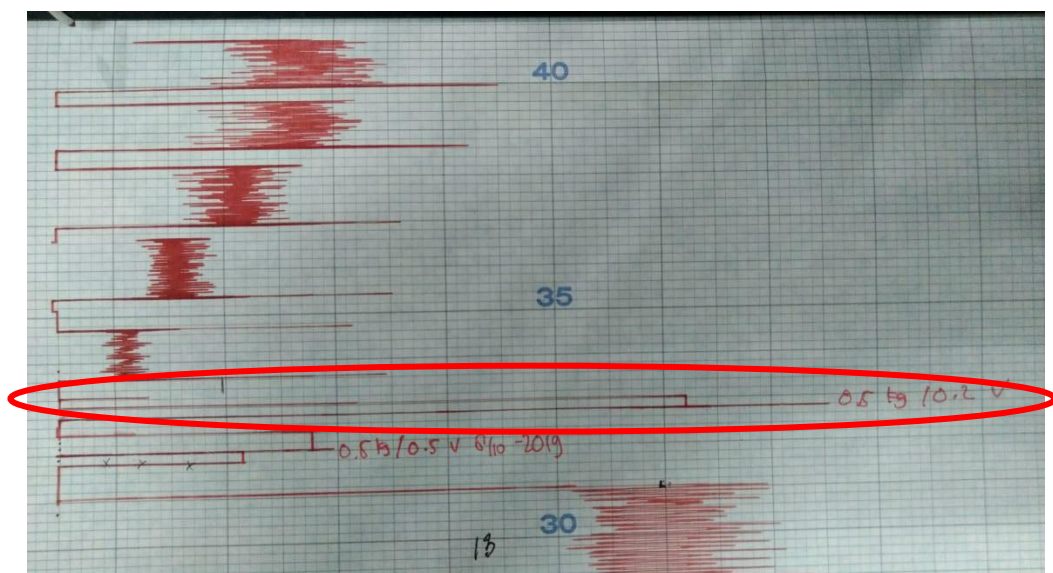
Pada tahap ini model diatur (*setting*) dengan memasang *loadcell* dan *holder-holder* di bagian depan dan belakang sehingga mempunyai pergerakan bebas terhadap gerakan maju-mundur (*surge*). Kemudian dilanjutkan dengan *Setting* displasemen model uji kapal dengan menaruh beban pada kapal untuk mencapai sarat kapal yang diinginkan sesuai displasemen. *Setting* selanjutnya adalah menghubungkan kapal dengan *loadcell* pada titik KG model melalui tali di antara *loadcell* itu sendiri dan bagian haluan kapal.



Gambar 5.5 Setting model kapal

3. Kalibrasi

Sebelum pelaksanaan pengujian model uji kapal di *Towing Tank* terlebih dahulu dilakukan kalibrasi dari *load Cells*. Kalibrasi dilakukan dengan cara menggantungkan beban dengan berat tertentu pada model uji kemudian di bagian buritan kapal, kemudian pada *loadcell* akan mengukur berapa gaya penolakan yang diterima kapal dengan tegangan listrik/voltase (*voltage*) tertentu. Dalam pengujian ini *voltage* yang digunakan adalah 0,2 volt. Gambar 5.6 merupakan strip chart Hasil kalibrasi yang menunjukkan bahwa dengan beban seberat 0.5 kg, pada *strip chart* menghasilkan 56 kotak.

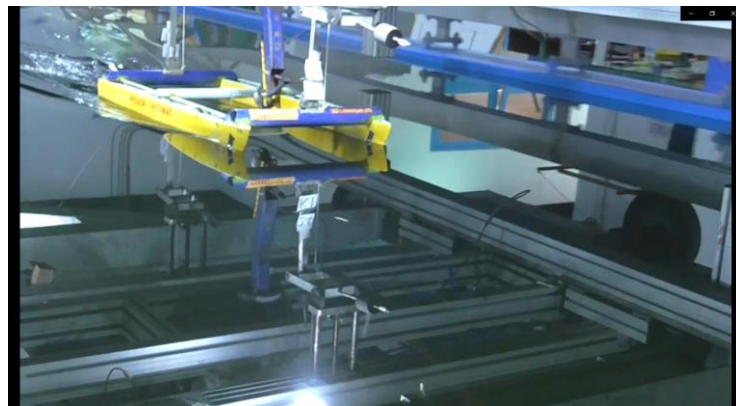


Gambar 5.6 Nilai hasil kalibrasi model uji kapal

4. Proses Uji Hambatan Kapal

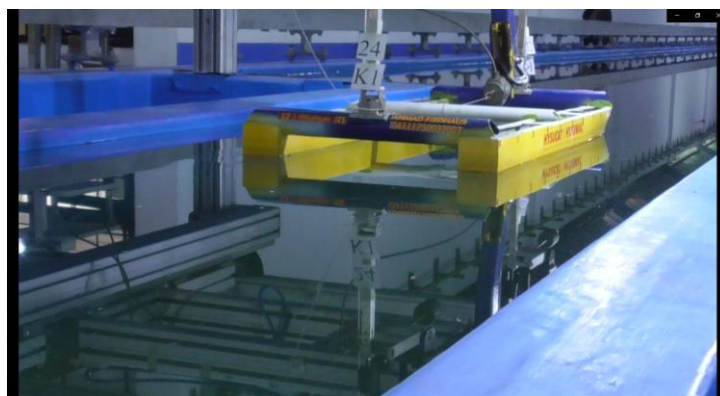
Setelah proses kalibrasi dilakukan, maka selanjutnya pemasangan kamera pada kereta *Towing Tank* yang berguna untuk menangkap visual saat kapal sedang ditarik. Dengan demikian dapat melihat dan menangkap fenomena yang terjadi pada model uji kapal. Kamera dipasang pada 2 posisi dengan fokus yang berbeda-beda,

- a) Hasil visual kamera 1 yang diletakan di bagian depan kereta yang dapat melihat bagian haluan kapal sehingga dapat menganalisis fenomena yang terjadi pada bagian haluan model kapal ketika ditarik



Gambar 5.7 Hasil visual kamera 1 berupa bagian haluan kapal

- b) Hasil visual kamera 2 yang diletakan di bagian belakang kereta yang dapat melihat bagian buritan kapal sehingga dapat menganalisis fenomena yang terjadi pada bagian buritan model kapal ketika ditarik



Gambar 5.8 Hasil visual kamera 2 berupa bagian buritan kapal

5.5. Dasar Perhitungan Hambatan Kapal menggunakan Uji Model Kapal

Dalam pengujian hambatan kapal menggunakan uji model di *Towing Tank*, nilai hambatan kapal didapatkan tidak dalam komponen yang terpisah. Pada hambatan total kapal terdiri dari beberapa komponen yakni hambatan gesek (*friction resistance*) dan hambatan gelombang (*wave making resistance*). perhitungan hambatan dari model perlu diubah menjadi nilai hambatan dari kapal skala penuh menggunakan persamaan empiris dasar. Persamaan empiris tersebut sesuai dengan *International Towing Tank Conference ke-57 (ITTC-57)* dengan penjelasan berikut ini.

1. Dari hasil pengujian didapatkan nilai R_{TM} (hambatan total model), kemudian didapatkan C_{TM} (koefisien hambatan model) pada setiap kecepatan dengan persamaan

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2}\rho_M V_M^2 S_M} \quad (5.1)$$

dimana : R_{TM} = Nilai hambatan total model

ρ_M = Berat jenis fluida pada *Towing Tank*

V_M = Kecepatan model

S_M = WSA model

2. Perhitungan koefisien hambatan gesek model menggunakan dari ITTC-57 dengan model yang dikorelasikan pada setiap kecepatan

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log_{10} Ren_M - 2)^2} \quad (5.2)$$

dimana

$$Ren_M = \frac{V_M L_M}{\nu_m} \quad (5.3)$$

dimana : C_{FM} = Koefisien hambatan gesek model

Ren_M = *Reynolds Number* model

V_M = Kecepatan model

L_M = Panjang model

ν_m = viskositas fluida kondisi pengujian

3. Perhitungan koefisien hambatan sisa C_R

$$C_R = C_{TM} - C_{FM} \quad (5.4)$$

4. Perhitungan koefisien hambatan gesek kapal skala penuh C_{FS} menggunakan ITTC-57

$$C_{FS} = \frac{0.075}{(\log_{10} Re_S - 2)^2} \quad (5.5)$$

Dimana

$$Re_S = \frac{V_S L_S}{\nu_S} \quad (5.6)$$

Dimana :

- C_{FS} = Koefisien hambatan gesek kapal skala penuh
- Re_S = Reynolds Number kapal skala penuh
- V_S = Kecepatan kapal skala penuh
- L_S = Panjang kapal skala penuh
- ν_S = viskositas fluida kondisi kapal asli

5. Perhitungan koefisien hambatan total kapal skala penuh

$$C_{TS} = C_{FS} + C_R \quad (5.7)$$

6. Penambahan kekasaran permukaan kapal C_A (incremental resistance coefficient). Nilai ini dapat divariasikan akan tetapi nilai C_A direkomendasikan adalah 0.00004

$$C_{TS} = C_{FS} + C_R + C_A \quad (5.8)$$

7. Perhitungan hambatan total kapal skala penuh

$$R_{TS} = \frac{1}{2} C_{TS} \rho_S V_S^2 S_S \quad (5.9)$$

Hambatan total kapal ini merupakan hambatan gesek yang terjadi pada lambung. Untuk analisis pengujian menggunakan sifat-sifat fisik sesuai dengan kondisi saat pengujian seperti uraian berikut

- Percepatan gravitasi, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- Massa jenis air laut, $\rho = 1022.25 \text{ kg/m}^3$

- Viskositas kinematis air laut, $\nu = 0.8847 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Massa jenis air tawar, $\rho = 996.45 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas kinematis air tawar, $\nu = 0.8540 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

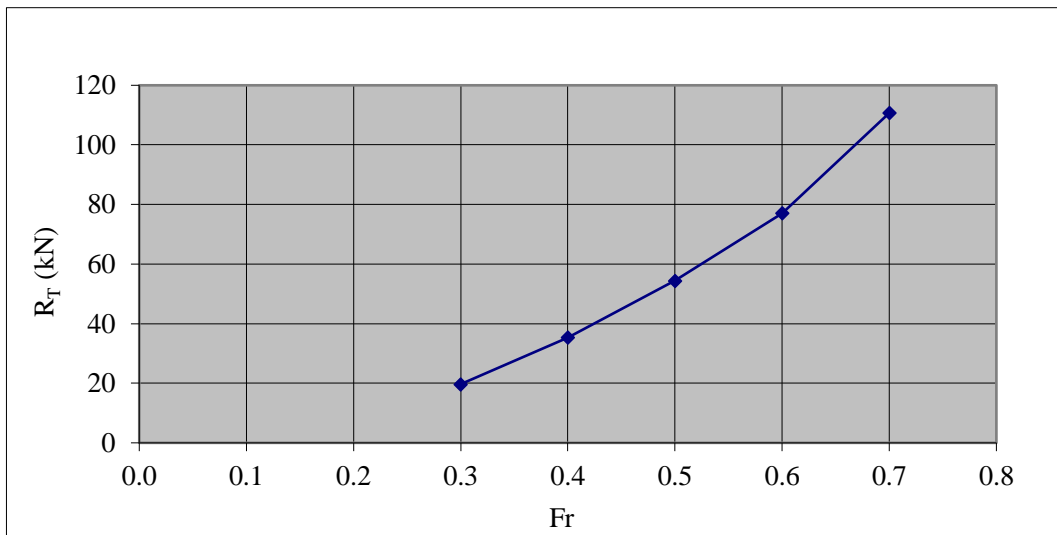
5.6. Hasil Pengujian Hambatan di *Towing Tank*

5.6.1. Hasil pengujian hambatan kapal tanpa *foil* (K0)

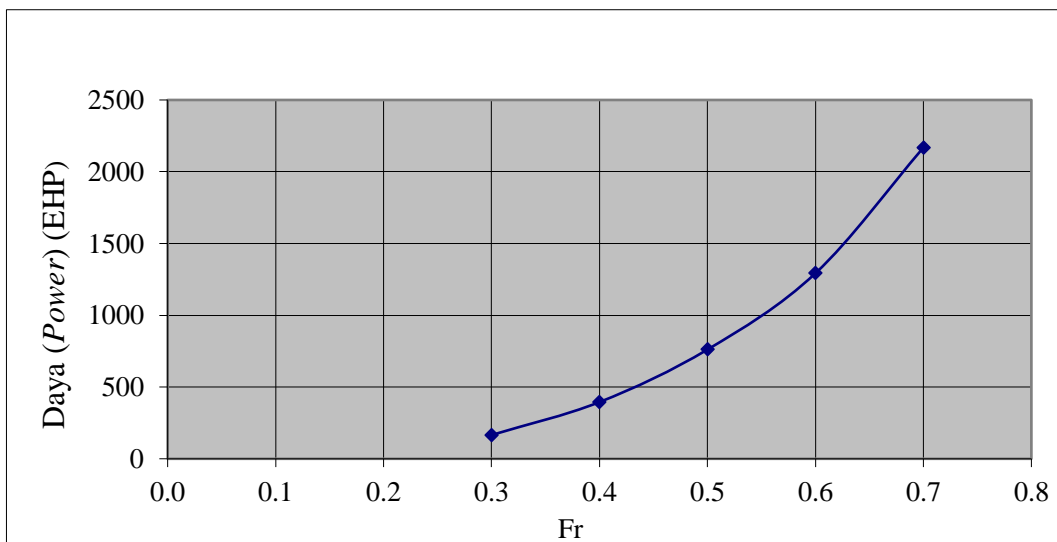
Pelaksanaan pengujian model uji kapal katamaran tanpa *foil* dilakukan untuk mendapatkan hambatan kapal yang nantinya akan dibandingkan dan menjadi referensi terhadap pengujian variasi penambahan *foil* pada kapal. Pelaksanaan kegiatan pengujian dilakukan secara berurutan agar mendapatkan hasil yang konsisten terhadap parameter-parameter yang dimungkinkan berbeda kondisi. Pengujian model uji kapal dengan sarat air (*draft*) sebesar 28.0 mm dengan displacement 1.5 kg. Tabel 5.3 dan gambar 5.9-5.10 berikut ini adalah hasil pengujian model uji kapal katamaran tanpa *foil* di *Towing Tank*.

Tabel 5.3 Hubungan hambatan total kapal, daya (*power*) kapal katamaran tanpa *foil* (K0) dengan kecepatan kapal V dan *Froude Number* (Fr)

<i>Run Ke:</i>	V (knot)	Fr	R_T (KN)	P_{wtr} (EHP)	C_T
1	12	0.3	20.69	173.73	2.39E-03
2	16	0.4	36.59	409.61	3.03E-03
3	20	0.5	55.01	769.64	3.44E-03
4	24	0.6	78.09	1311.20	3.21E-03
5	28	0.7	114.59	2244.71	2.94E-03



Gambar 5.9 Grafik hubungan hambatan kapal katamaran tanpa foil (K0) dengan *Froude Number* (Fr) kapal



Gambar 5.10 Grafik hubungan daya kapal (EHP) kapal tanpa foil (K0) dengan bilangan Froude (*Froude Number*) Fr

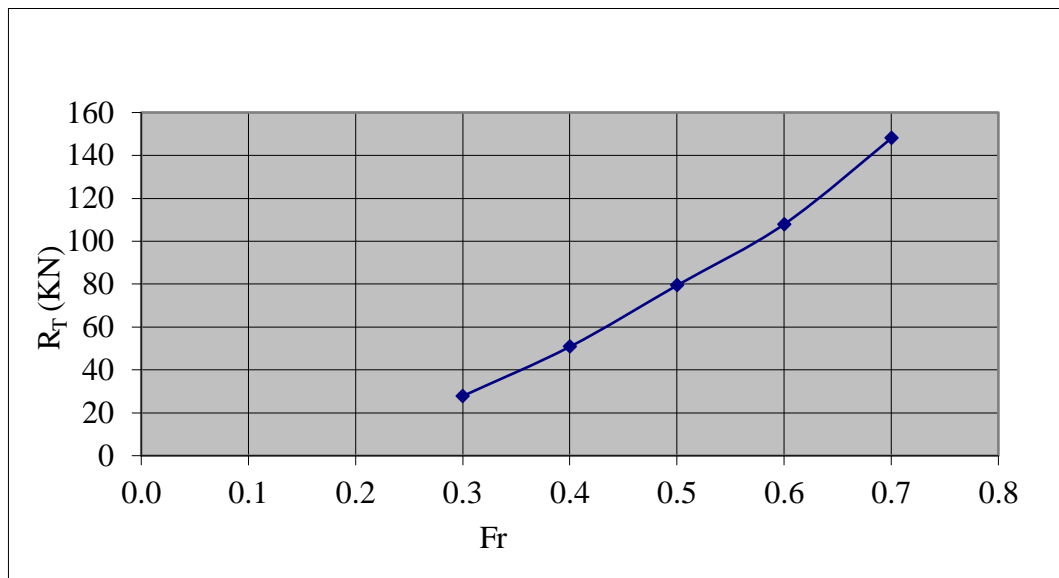
5.6.2. Hasil pengujian hambatan kapal dengan 1 foil (K1)

Pelaksanaan pengujian model uji kapal katamaran menggunakan 1 *foil* yang ditempatkan pada bagian haluan kapal. Pelaksanaan kegiatan pengujian dilakukan secara berurutan langsung agar mendapatkan hasil yang konsisten terhadap parameter-parameter yang dimungkinkan berbeda kondisi. Pada pengujian kapal katamaran dengan penambahan foil dilakukan dengan kondisi model uji kapal

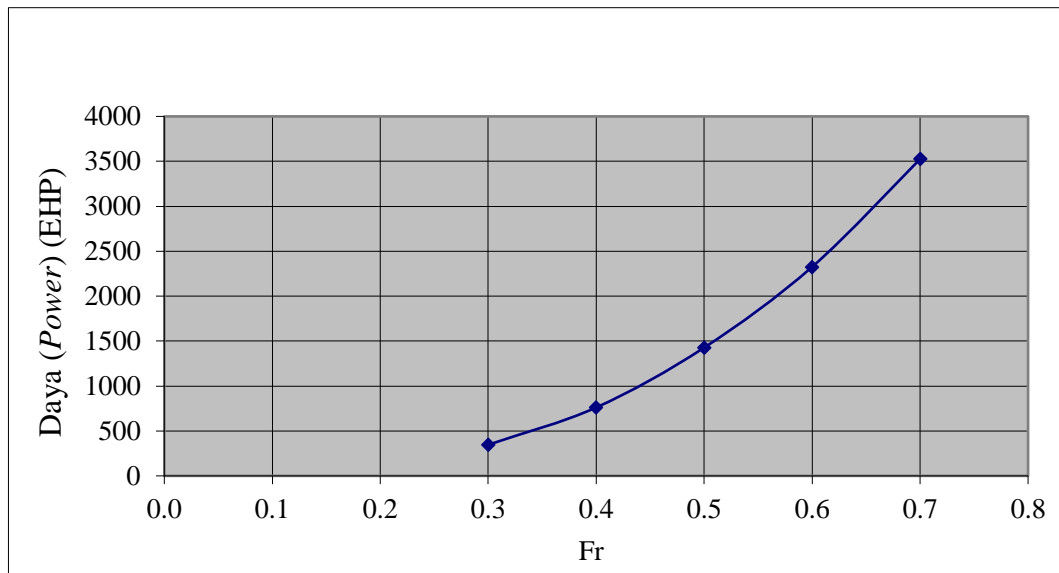
dengan sarat air (*draft*) 0.028 m dengan menggunakan foil dengan sudut serang foil 2° , dengan posisi foil 0.015 m dari lunas (*keel*), dan 0.8 m dari transom. Tabel 5.4 dan gambar 5.11-5.12 berikut ini adalah hasil pengujian model uji kapal katamaran dengan penambahan 1 foil di *Towing Tank*.

Tabel 5. 4 Hubungan hambatan total kapal, daya (*power*) kapal katamaran 1 foil (K1) dengan kecepatan kapal V dan *Froude Number* (Fr)

<i>Run Ke:</i>	V (knot)	Fr	R_T (kN)	$P_{wr}(EHP)$	C_T
1	12	0.3	27.79	233.3317	3.34E-03
2	16	0.4	50.79	568.5558	3.82E-03
3	20	0.5	79.39	1110.8568	4.29E-03
4	24	0.6	107.89	1811.5437	4.12E-03
5	28	0.7	147.99	2773.5951	3.68E-03



Gambar 5.11 Grafik hubungan hambatan kapal katamaran 1 foil (K1) dengan *Froude Number* (Fr).



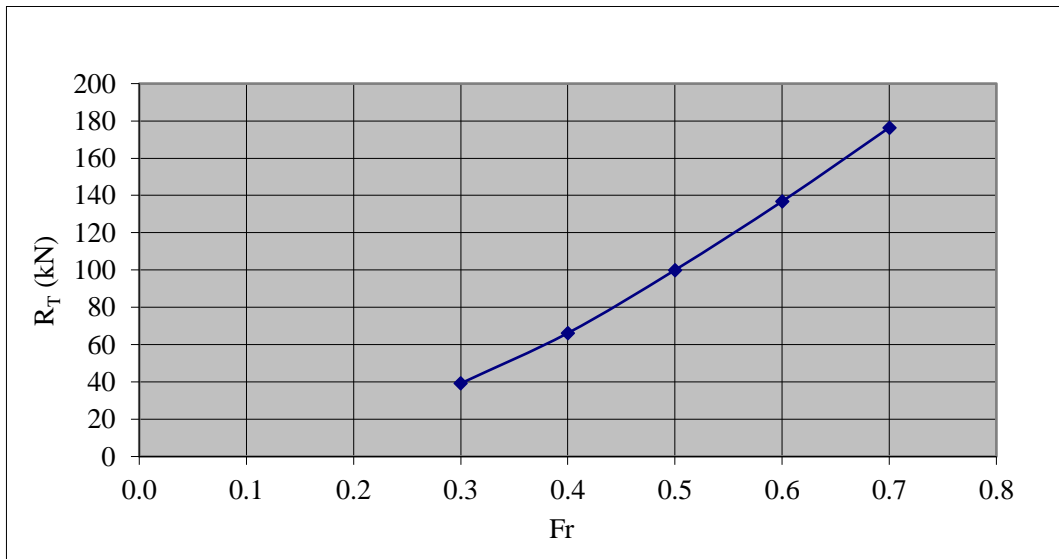
Gambar 5.12 Grafik hubungan daya kapal (EHP) kapal 1 foil (K1) dengan bilangan Froud (*Froude Number*) Fr.

5.6.3. Hasil pengujian hambatan kapal dengan 2 foil (K2)

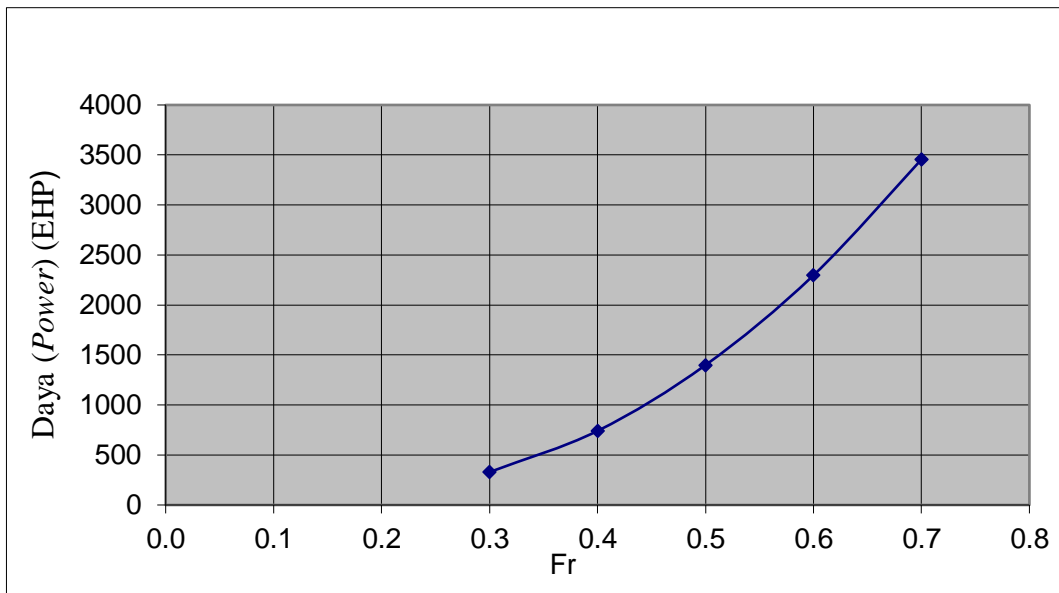
Pelaksanaan pengujian model uji kapal menggunakan 2 foil yang ditempatkan pada bagian haluan kapal dan buritan kapal dilakukan untuk mendapatkan hambatan kapal yang nantinya akan dibandingkan dengan kapal tanpa foil dan 1 foil. Pelaksanaan kegiatan pengujian dilakukan secara berurutan langsung agar mendapatkan hasil yang konsisten terhadap parameter-parameter yang dimungkinkan berbeda kondisi. Pada pengujian kapal katamaran dengan penambahan 2 foil dilakukan menggunakan model uji kapal dengan sarat air (*draft*) 0.028 m, dan foil dengan sudut serang 2° dipasang pada bagian haluan dan buritan kapal, dengan posisi 0.015m dari *keel*, dan terletak di 0.8m dari transom untuk foil haluan, sedangkan untuk foil buritan dipasang pada sarat air (*draft*) 0.028 m dan *trailing edge foil* berada di transom buritan. Tabel 5.5 dan gambar 5.13-5.14 berikut ini adalah hasil pengujian model uji kapal katamaran dengan penambahan 2 foil di *Towing Tank*.

Tabel 5.5 Hubungan hambatan total kapal, daya (*power*) kapal katamaran 2 foil (K2) dengan kecepatan kapal V dan *Froude Number* (Fr)

Run Ke:	V (knot)	Fr	R_T (KN)	Pwr(EHP)	C_T
1	12	0.3	41.19	345.82	4.16E-03
2	16	0.4	67.99	761.08	4.70E-03
3	20	0.5	101.99	1427.07	5.11E-03
4	24	0.6	138.49	2325.32	4.84E-03
5	28	0.7	179.99	3525.79	4.06E-03



Gambar 5.13 Grafik hubungan hambatan kapal katamaran 2 foil (K2) dengan *Froude Number* (Fr).



Gambar 5.14 Grafik hubungan daya kapal (EHP) kapal 2 foil (K2) dengan bilangan Froud (*Froude Number*) Fr.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 6

HASIL DAN PEMBAHASAN

6.1. Analisis Foil NACA 64₁-212

Pada analisis Foil NACA 64₁-212 menggunakan CFD, didapatkan nilai *lift* dan *drag* dari foil dan dapat diketahui karakteristik dari foil. Selanjutnya pada tabel 6.1 di bawah ini adalah nilai gaya *lift* dan *drag* foil menggunakan perhitungan simulasi CFD.

Tabel 6.1 Nilai gaya *lift* dan *drag* dari foil NACA 64₁-212 hasil simulasi CFD

No	<i>Fr</i>	<i>V</i> (Knots)	<i>V</i> (m/s)	<i>L</i> (kN)	<i>D</i> (kN)
1	0.3	12	6.17	67.83	11.61
2	0.4	16	8.23	119.71	20.72
3	0.5	20	10.29	184.53	32.75
4	0.6	24	12.35	249.25	50.48
5	0.7	28	14.40	327.88	70.32

Selain menggunakan simulasi CFD, nilai *lift* dan *drag* foil, juga didapatkan dari simulasi CFD ketika foil sudah dipasang pada kapal katamaran. Tabel 6.2 berikut adalah nilai *lift* dan *drag* foil, ketika foil sudah dipasang pada lambung kapal katamaran saat simulasi CFD.

Tabel 6.2 Nilai gaya *lift* dan *drag* dari foil NACA 64₁-212 hasil simulasi CFD pada kapal katamaran

<i>Fr</i>	<i>V_s</i> (knot)	<i>V_s</i> (m/s)	<i>Lift</i> (kN)		<i>Drag</i> (kN)	
			1 Foil	2 Foil	1 Foil	2 Foil
0.3	12	6.17	69.57	124.86	11.04	19.87
0.4	16	8.23	149.62	233.42	18.73	36.09
0.5	20	10.29	246.97	425.51	34.00	55.00
0.6	24	12.35	352.14	612.88	38.24	75.86
0.7	28	14.40	451.14	707.15	45.68	87.26

6.2. Analisis Simulasi Hambatan Lambung *Demihull* dan Kapal Katamaran tanpa dan dengan Foil menggunakan CFD

Pada simulasi CFD dilakukan pada lambung *demihull*, dan kapal katamaran tanpa foil dan dengan foil. Simulasi tanpa foil diberikan untuk kondisi K0. Penggunaan foil divariasikan menjadi 2 variasi yakni kondisi K1 (1 foil di bagian haluan), dan kondisi K2 (di bagian haluan dan buritan). Simulasi hambatan total dilaksanakan pada kecepatan 12, 16, 20, 24, dan 28 knot

Tabel 6.3 Hasil Simulasi CFD kapal tanpa foil (K0), 1 foil (K1) dan 2 foil (K2)

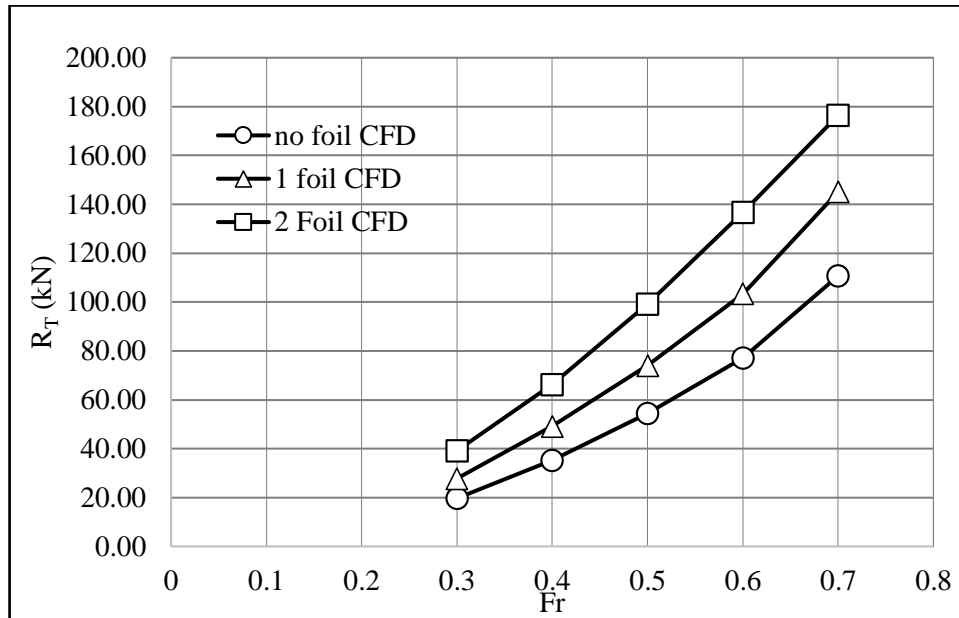
Run ke-	V (knot)	V (m/s)	F_R	K0 (kN)	K1 (kN)	K2 (kN)
1	12	6.17	0.3	19.71	27.81	39.21
2	16	8.23	0.4	35.32	49.19	66.22
3	20	10.29	0.5	54.40	74.01	99.12
4	24	12.35	0.6	77.12	103.41	136.82
5	28	14.403	0.7	110.72	145.09	176.40

Pada hasil hambatan total sesuai dengan tabel 6.3 yang kemudian kita plotkan ke grafik, sehingga menghasilkan gambar 6.1. Pada gambar tersebut pada kondisi tanpa foil (K0) hambatan bertambah seiring dengan meningkatnya kecepatan di *Froude number* 0.3 sampai 0.7. Nilai hambatan total kapal katamaran tanpa foil nantinya akan dijadikan patokan untuk mengetahui efek dari penambahan foil.

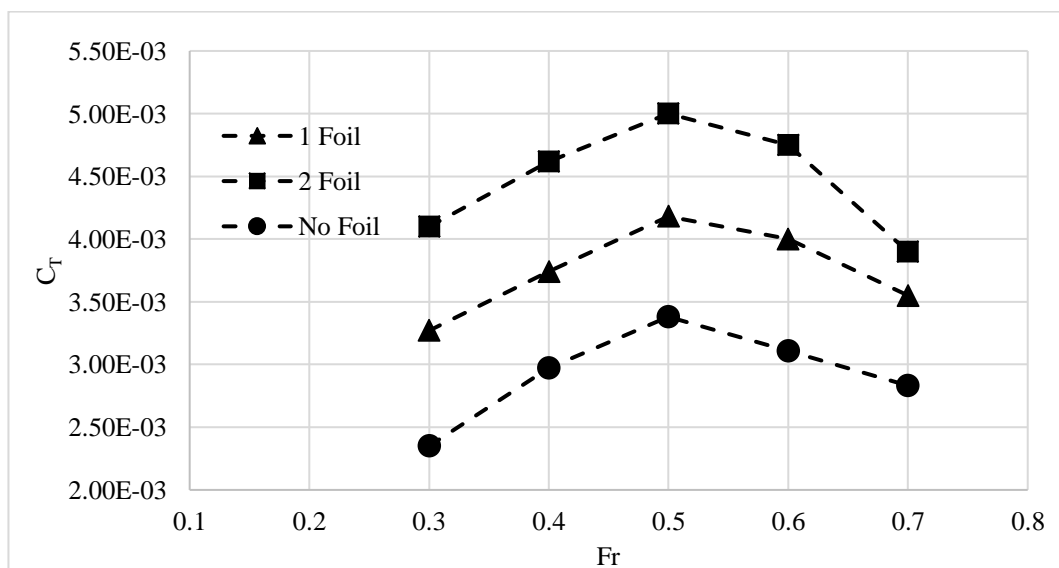
Dari grafik pada gambar 6.1 terlihat bahwa, pada model kapal katamaran dengan penambahan 1 foil di bagian haluan (K1), terjadi penambahan hambatan total kapal terhadap kapal katamaran tanpa foil (K0) pada setiap kecepatan dari *Froude number* 0.3 sampai dengan 0.7. Penambahan hambatan ini diakibatkan oleh gaya *drag* yang diakibatkan oleh penambahan foil pada kapal katamaran.

Pada model kapal katamaran dengan penambahan 1 foil di bagian haluan dan 1 foil di bagian buritan (K2), terjadi penambahan hambatan total kapal terhadap kapal katamaran tanpa foil (K0) dan kapal katamaran dengan 1 foil di bagian haluan (K1) pada setiap kecepatan dari *Froude number* 0.3 sampai dengan 0.7. Sebagaimana terlihat pada grafik gambar 6.1. Penambahan hambatan ini

diakibatkan oleh gaya *drag* yang diakibatkan oleh penambahan foil pada kapal katamaran dengan nilai yang lebih besar karena jumlah foil yang lebih banyak. Gambar 6.1 dan 6.2 berikut adalah grafik hambatan total dan koefisien hambatan.



Gambar 6. 1 Hambatan total kapal (R_T) tanpa foil (K_0) dengan Hambatan total kapal (K_1 dan K_2) simulasi CFD fungsi dari bilangan *Froude* (Fr)

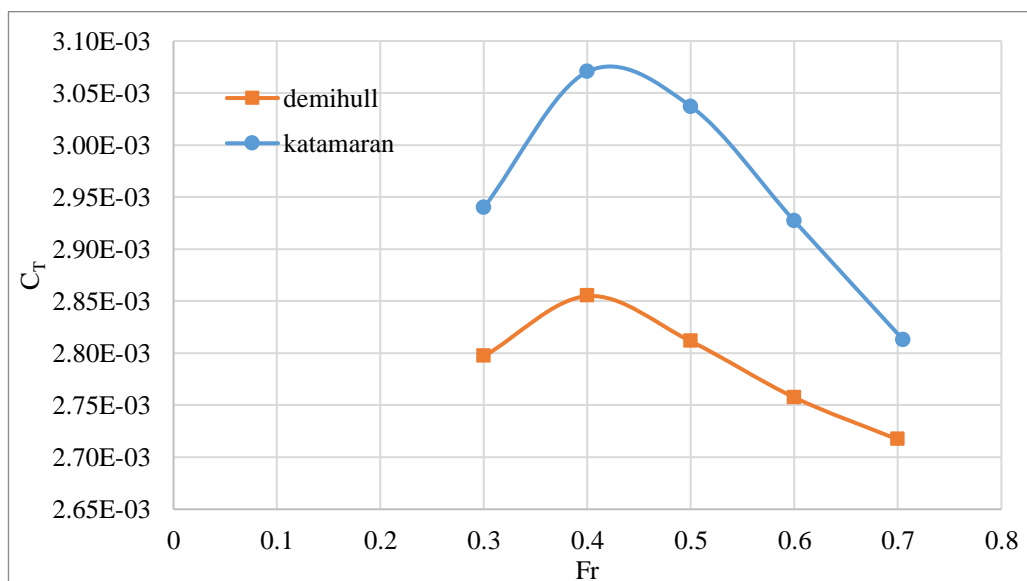


Gambar 6. 2 Koefisien hambatan kapal (R_T) tanpa foil (K_0) dengan Hambatan total kapal (K_1 dan K_2) simulasi CFD fungsi dari bilangan *Froude* (Fr)

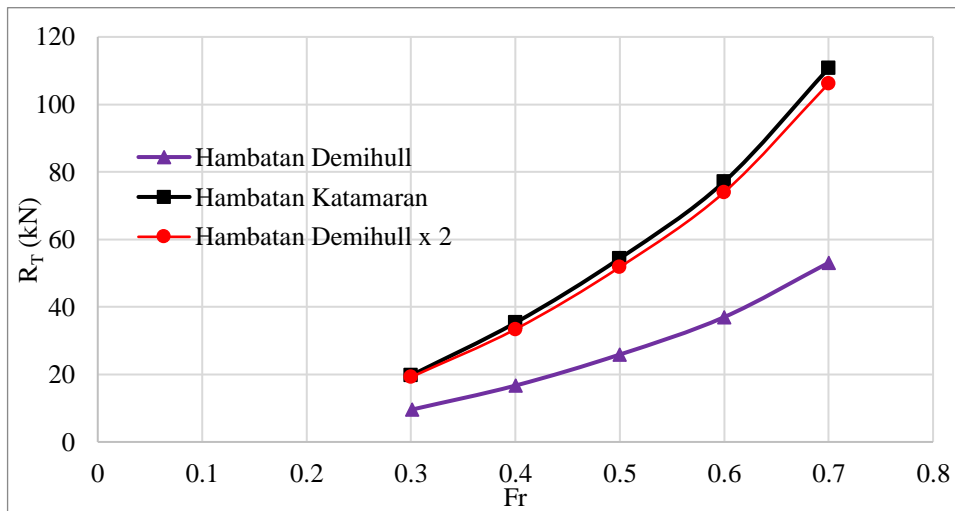
Pada penelitian ini dilakukan simulasi hambatan lambung *demihull* dari kapal katamaran untuk mengetahui interferensi hambatan yang terjadi, selain itu juga untuk memverifikasi hasil simulasi CFD dengan teori hambatan kapal katamaran yang ada. Gambar 6.2 dan 6.3 adalah hasil dari nilai CFD hambatan lambung *demihull* dan dibandingkan dengan nilai koefisien hambatan dan hambatan total lambung kapal katamaran pada variasi kecepatan yang sama.

Tabel 6. 4 Nilai hambatan total lambung *demihull* dan kapal katamaran

Fr	V (Knot)	R _T <i>demihull</i> (kN)	R _T Katamaran (kN)	R _T 2 × <i>demihull</i> (kN)	Interferensi	C _T <i>demihull</i>	C _T Katamaran
0.3	12	9.6	19.71	19.2	1.027	2.80E-03	2.94E-03
0.4	16	16.7	35.32	33.4	1.057	2.85E-03	3.07E-03
0.5	20	25.9	54.40	51.8	1.050	2.81E-03	3.04E-03
0.6	24	37	77.12	74	1.042	2.76E-03	2.93E-03
0.7	28	53.1	110.72	106.2	1.043	2.72E-03	2.81E-03



Gambar 6.3 Koefisien Hambatan *demihull* dan katamaran fungsi dari bilangan *froude* (Fr)



Gambar 6. 4 Hambatan total *demihull*, $2 \times$ demihull dan katamaran fungsi dari bilangan *froude* (Fr)

Berdasarkan hasil simulasi CFD pada gambar 6.2, terjadi perbedaan yang cukup signifikan antara koefisien hambatan dari *demihull* dan katamaran pada Fr 0.4-0.6, hasil ini sesuai dengan penelitian dari He et al. (2015). Interferensi terbesar terjadi antara Fr 0.45-0.5 sesuai dengan penelitian dari Zaghi et al (2010). Pengaruh interferensi hambatan saat kecepatan rendah ($Fr < 0.3$) pada kapal katamaran memberikan pengaruh yang kecil. Pada kecepatan ini, hambatan total didominasi hambatan viskos karena pada kecepatan rendah gelombang belum terbentuk (Sakti dan Utama, 2012). Peningkatan hambatan karena pengaruh interferensi antar lambung memiliki persentase antara 2.5% - 5.4%, hal ini sesuai dengan penelitian dari Insel dan Molland (1990) bahwa semakin besar jarak antar lambung (S/L) semakin kecil pengaruh interferensi antar lambung

6.3. Analisis Pengujian Hambatan Model Uji Kapal Katamaran tanpa dan dengan Foil di *Towing Tank*

Pada pengujian hambatan total model uji kapal katamaran di *towing tank* dilakukan pada kapal katamaran tanpa foil dan dengan foil. Simulasi tanpa foil diberikan kode K0. Penggunaan foil divariasikan menjadi 2 yakni: K1 (1 foil di bagian haluan), dan K2 (di bagian haluan dan buritan). Simulasi dari hambatan total

dilaksanakan pada kecepatan 12, 16, 20, 24, dan 28 knot. Untuk visual dari hasil CFD pada kecepatan 16 knot, 20 knot, 24 knot, dan 28 knot akan di lampirkan.

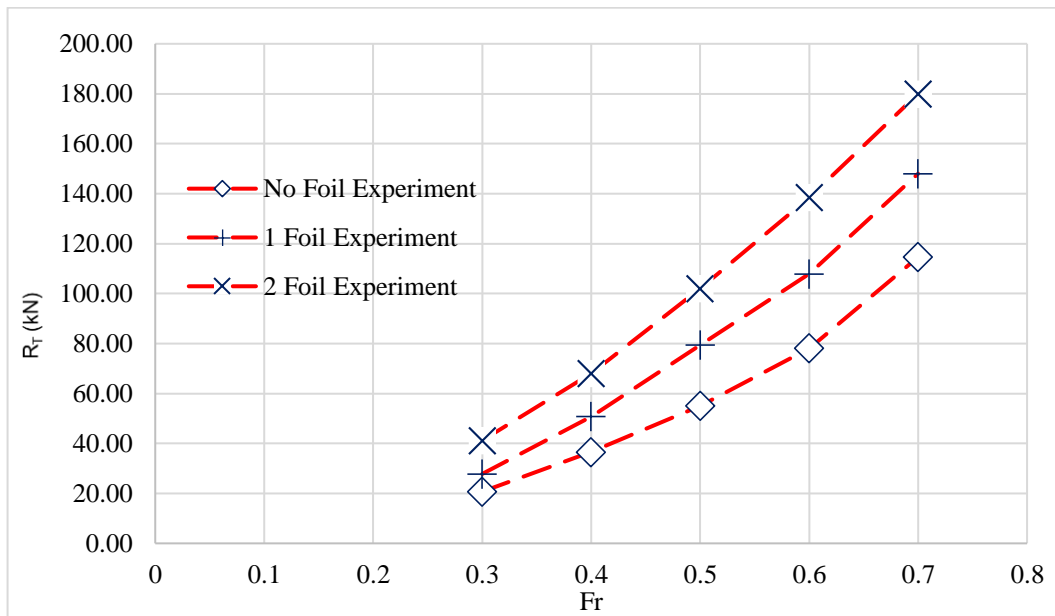
Tabel 6.5 Hasil Pengujian hambatan kapal eksperimen di *towing tank* untuk kapal tanpa foil (K0) , 1 foil (K1) dan 2 foil (K2)

Run ke-	V (knot)	V (m/s)	F_R	K0 (kN)	K1 (kN)	K2 (kN)
1	12	6.17	0.3	20.69	27.79	41.19
2	16	8.23	0.4	36.59	50.79	67.99
3	20	10.29	0.5	55.01	79.39	101.99
4	24	12.35	0.6	78.09	107.89	138.49
5	28	14.403	0.7	114.59	147.99	179.99

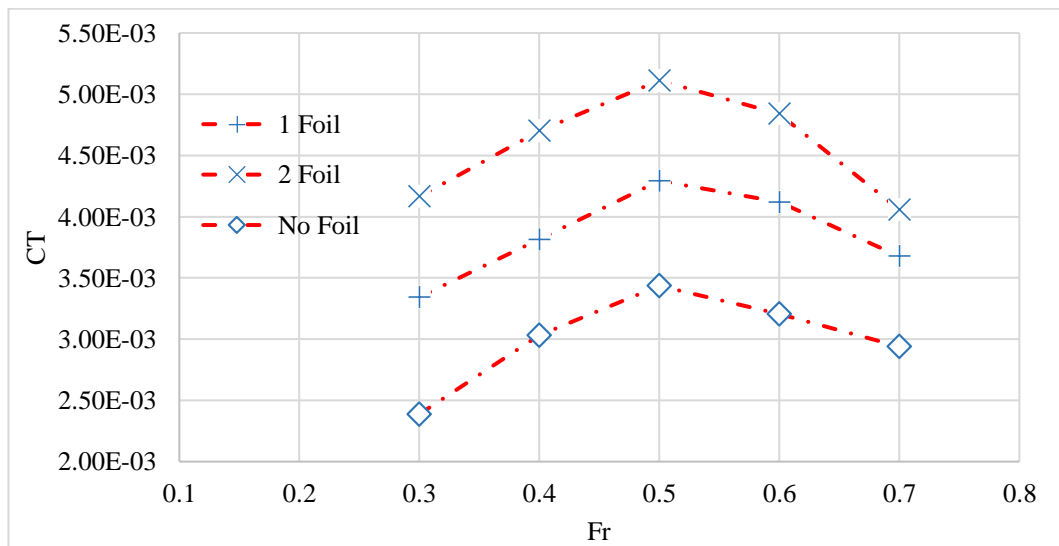
Pada hasil hambatan total sesuai dengan tabel 6.4 yang kemudian kita plotkan ke grafik sehingga menghasilkan gambar 6.2. Pada gambar tersebut pada kondisi tanpa foil (K0) hambatan total bertambah seiring dengan meningkatnya kecepatan di *Froude number* 0.3 sampai 0.7. Nilai hambatan pada kapal katamaran tanpa foil dijadikan patokan untuk mengetahui efek dari penambahan foil.

Dari grafik pada gambar 6.2 terlihat, pada model kapal katamaran dengan penambahan 1 foil di bagian haluan (K1), terjadi penambahan hambatan total kapal terhadap kapal katamaran tanpa foil (K0) pada setiap kecepatan dari *Froude number* 0.3 sampai dengan 0.7. Penambahan hambatan ini diakibatkan oleh gaya *drag* yang diakibatkan oleh penambahan foil pada kapal katamaran

Pada model kapal katamaran dengan penambahan 2 foil yaitu; 1 foil di bagian haluan dan 1 foil di bagian buritan (K2), terjadi penambahan hambatan total kapal terhadap kapal katamaran tanpa foil (K0) dan kapal katamaran dengan 1 foil di bagian haluan (K1) pada setiap kecepatan dari *Froude number* 0.3 sampai dengan 0.7. Sebagaimana terlihat pada grafik digambar 6.5. Penambahan hambatan total kapal ini diakibatkan oleh gaya *drag* yang ditimbulkan oleh penambahan foil pada kapal katamaran dengan 1 foil dan 2 foil. Gambar 6.5 dan 6.6 berikut adalah grafik hambatan total dan koefisien hambatan



Gambar 6.5 Hambatan total kapal (R_T) tanpa foil (K_0) dengan Hambatan total kapal (K_1 dan K_2) pengujian *towing tank* fungsi dari bilangan Froude (Fr)



Gambar 6. 6 Koefisien kapal (R_T) tanpa foil (K_0) dengan Hambatan total kapal (K_1 dan K_2) pengujian *towing tank* fungsi dari bilangan Froude (Fr)

Mengacu hasil simulasi CFD dan pengujian eksperimen di *towing tank* dengan dua variasi dan satu kondisi awal tanpa foil dapat diketahui bahwa, penambahan foil pada kapal katamaran untuk kecepatan rendah akan menambah hambatan kapal baik satu foil maupun dua foil. Hal ini disebabkan gaya angkat (*lift*) yang dihasilkan

oleh foil untuk mengurangi WSA lambung kapal masih belum cukup. Sehingga luas WSA lambung kapal katamaran dengan ditambah luas WSA foil masih lebih besar dibandingkan WSA kapal katamaran semula tanpa foil. Penambahan foil juga menghasilkan gaya *drag* tambahan, sehingga penambahan foil pada kapal katamaran belum memberikan keuntungan yang optimal, karena penambahan gaya *drag* akibat foil masih lebih besar daripada pengurangan hambatan karena gaya *lift*. Dengan demikian hambatan total kapal katamaran bertambah untuk pemasangan 1 foil dan 2 foil.

6.4. Analisis dan Pembahasan

6.4.1. Nilai *lift* yang terjadi pada foil

Untuk mengetahui pengaruh foil terhadap hambatan kapal katamaran, dilakukan proses simulasi CFD dan pengujian eksperimen model kapal katamaran di *towing tank*. Proses simulasi CFD terdiri dari simulasi foil NACA 64₁-212, simulasi kapal katamaran tanpa foil, dan simulasi kapal katamaran dengan foil. Pada simulasi CFD foil NACA 64₁212 diperoleh karakteristik dari foil. Setelah diperoleh grafik karakteristik dari simulasi CFD, kemudian di bandingkan dengan nilai C_l dan C_d foil NACA 64₁212 dari laman NACA *airfoirtools* dimana nilai C_l dan C_d dengan *aspect ratio* tak terhingga pada gambar 6.3. Setelah didapatkan karakteristik foil, dilakukan simulasi CFD pada foil untuk mengetahui nilai *lift* dan *drag* dengan kondisi sesuai dengan foil ketika ditambahkan dikapal, yaitu dengan sudut serang 2° dan variasi 5 kecepatan dari Fr 0.3-0.7. Tabel 6.6 adalah nilai *lift* dan *drag* dari foil NACA 64₁-212 hasil simulasi CFD.

Tabel 6.6 Nilai gaya *lift* dari foil NACA 64₁-212 tanpa lambung kapal katamaran hasil simulasi CFD

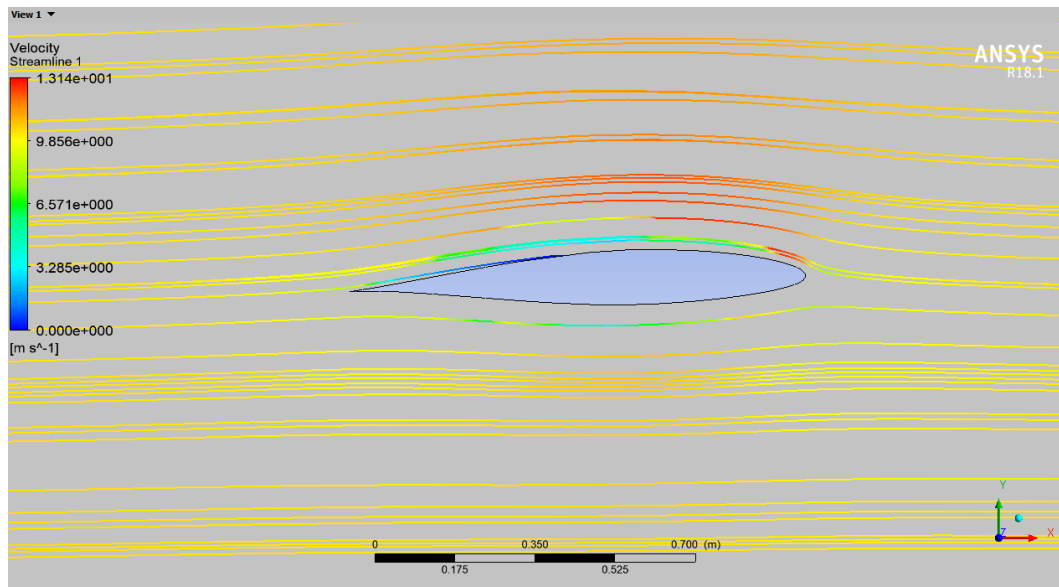
No	Fr	V (Knots)	V (m/s)	L (kN)
1	0.3	12	6.17	67.83
2	0.4	16	8.23	119.71
3	0.5	20	10.29	184.53
4	0.6	24	12.35	249.25
5	0.7	28	14.40	327.88

Selanjutnya melakukan analisis *lift* dan *drag* dari foil ketika berada pada kapal, hasil ini didapatkan dari analisis pada *software* CFD, ketika melakukan simulasi pada kapal katamaran dengan penambahan 1 foil dan 2 foil. Pada tabel 6.7 berikut dibawah ini nilai *lift* dan *drag* pada foil ketika ditambahkan pada kapal.

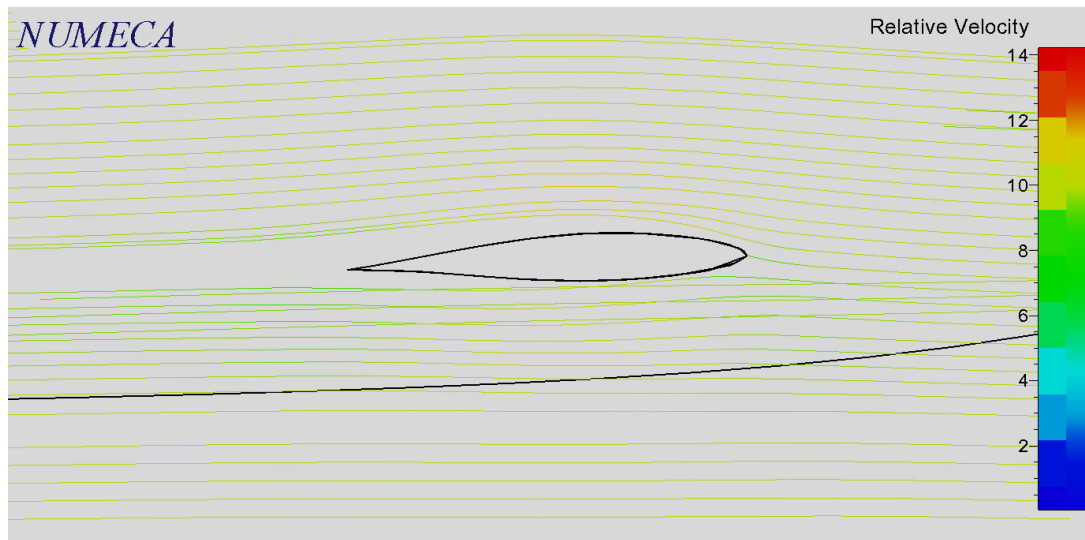
Tabel 6.7 Nilai gaya *lift* dari foil NACA 64₁-212 dipasang pada lambung

Fr	Vs (knot)	Vs (m/s)	Lift (L) (kN)	
			1 Foil	2 Foil
0.3	12	6.17	69.57	124.86
0.4	16	8.23	149.62	233.42
0.5	20	10.29	246.97	425.51
0.6	24	12.35	352.14	612.88
0.7	28	14.40	451.14	707.15

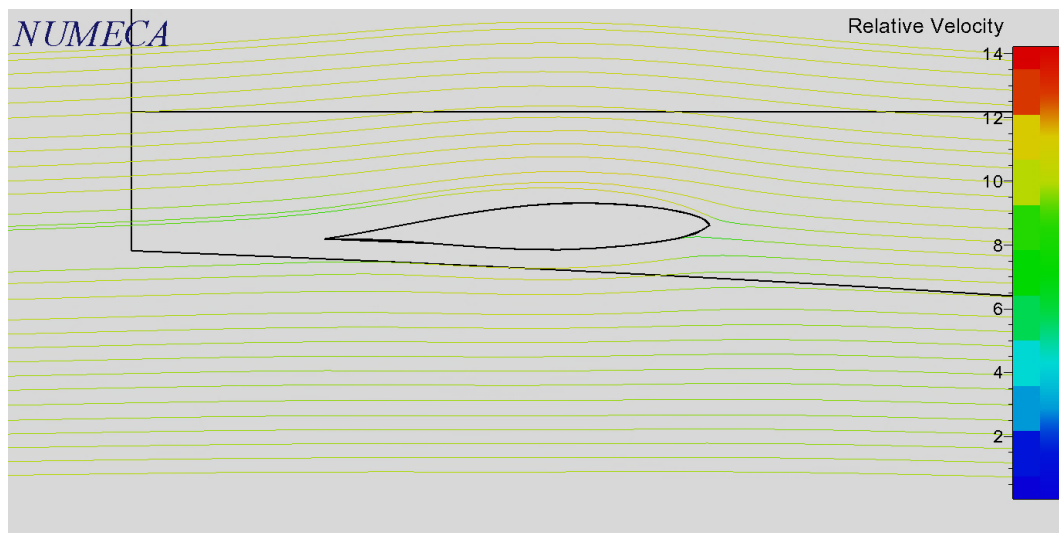
Berdasarkan hasil perhitungan tabel 6.6 dan tabel 6.7 dapat dilihat, bahwa nilai *lift* dan *drag* pada foil NACA 64₁212 memiliki nilai yang hampir mendekati, akan tetapi nilai *lift* dari foil ketika dipasangkan pada kapal mengalami peningkatan. Sedangkan nilai *drag* dari foil ketika dipasangkan pada kapal mengalami penurunan dibandingkan dengan nilai *lift* dan *drag* pada foil ketika di simulasikan tanpa badan kapal menggunakan CFD. Hal ini diakibatkan karena ketika foil dipasang diantara *demihull*, kedua ujung foil tertutup oleh lambung kapal, dan mengakibatkan efek seperti *wingtip* yang mempengaruhi aliran pada foil, sehingga mengakibatkan penurunan gaya *drag* dan peningkatan gaya *lift* dari foil. Gambar di bawah ini menunjukkan visualisasi dari *streamline* kecepatan pada foil NACA 64₁-212 dengan pada sudut serang 2°, dan kecepatan 10.289 m/s, gambar 6.5 adalah visualisasi *streamline* kecepatan CFD foil tanpa kapal, gambar 6.6 adalah visualisasi *streamline* kecepatan CFD 1 foil ketika dipasang di bagian haluan (K1), dan gambar 6.7 adalah visualisasi *streamline* kecepatan CFD 1 foil ketika dipasang di bagian buritan kapal (K2). Tidak terjadi perbedaan yang cukup signifikan pada *streamline* dari foil sendiri dan foil ketika dipasang di kapal katamaran.



Gambar 6. 7 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $V= 10.289$ m/s, $\alpha = 2^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$
foil tanpa kapal



Gambar 6. 8 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $V= 10.289$ m/s, $\alpha = 2^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$
foil haluan pada kapal katamaran dengan 1 foil (K1)



Gambar 6. 9 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $V= 10.289$ m/s, $\alpha = 2^\circ$, $Re = 1 \times 10^7$
foil buritan pada kapal katamaran dengan 2 foil (K2)

6.4.2. Perubahan luasan permukaan kapal yang tercelup air (WSA)

Luas permukaan badan kapal yang tercelup dalam air merupakan salah satu faktor yang sangat mempengaruhi hambatan kapal. Pada umumnya, untuk mengurangi hambatan pada kapal dilakukan berbagai optimasi, salah satunya dengan mengurangi permukaan badan kapal yang tercelup air (*Wetted Surface Area* WSA). Pada penelitian ini, penambahan foil pada kapal katamaran bertujuan untuk mengurangi luas permukaan kapal yang tercelup air (WSA) dengan cara mengangkat lambung kapal ke atas, karena efek yang diakibatkan dari gaya angkat foil pada kapal katamaran.

Penggunaan *software* CFD (*NUMECA*) untuk menghitung hambatan kapal sangat menguntungkan, karena salah satunya adalah fitur dimana kita dapat melihat berapa luasan lambung kapal yang tercelup air (WSA) pada kapal ketika di kondisi dan kecepatan tertentu. Tabel berikut ini adalah WSA kapal pada kapal katamaran tanpa foil dan dengan penambahan foil untuk masing-masing kecepatan.

Tabel 6.8 WSA kapal katamaran ketika di sumulasikan menggunakan CFD

No	Fr	V (Knots)	V (m/s)	WSA kapal (m ²)		
				tanpa foil (K0)	1 foil (K1)	2 foil (K2)
1	0.3	12	6.17	330.06	359.12	386.43
2	0.4	16	8.23	331.12	357.43	375.61
3	0.5	20	10.29	332.46	349.01	361.78
4	0.6	24	12.35	333.45	341.46	357.19
5	0.7	28	14.40	334.14	337.12	341.77

Luas permukaan basah yang tercelup air (WSA) untuk kapal katamaran yang dipasang foil akan bertambah dengan luasan foil yang digunakan, untuk K1 luas WSA adalah 359.12 m², dan luas WSA untuk K2 sebesar 386.43 m². Pada tabel 6.8 di atas dapat dilihat perubahan luasan kapal yang tercelup air WSA sebagai fungsi dari kecepatan kapal 12 knot sampai dengan 28 knot atau *Froude number* (0.3 sampai dengan 0.7). Untuk kapal katamaran tanpa foil K0, dengan seiring dengan bertambahnya kecepatan, maka WSA juga bertambah, walaupun tidak terlalu besar. Hal ini terjadi akibat semburan (*spray*) air ke lambung kapal yang menimbulkan gesekan antara lambung kapal dengan air.

Pada kapal katamaran dengan 2 foil K2, pada kondisi awal tentu saja WSA kapal akan bertambah signifikan, karena penambahan luas WSA 2 buah foil. Untuk kapal katamaran dengan 2 buah foil K2 mengalami fenomena, dimana semakin besar kecepatan kapal, WSA semakin berkurang. Hal tersebut terjadi karena efek gaya angkat (*lift*) dari foil yang mengangkat lambung kapal ke atas. Pengurangan WSA tersebut tentu akan mengurangi hambatan kapal, namun masih lebih kecil daripada penambahan hambatan 2 buah foil. Oleh karena itu hambatan total kapal yang terjadi pada kapal katamaran K2 masih lebih besar daripada kapal katamaran tanpa foil K0, sebagaimana ditunjukkan pada hasil simulasi CFD pada tabel 6.3 dan hasil eksperimen pada 6.5.

Sedangkan pada kapal katamaran dengan 1 foil di haluan K1, WSA kapal katamaran tentu bertambah dengan luasan foil. Ada fenomena yang terjadi pada

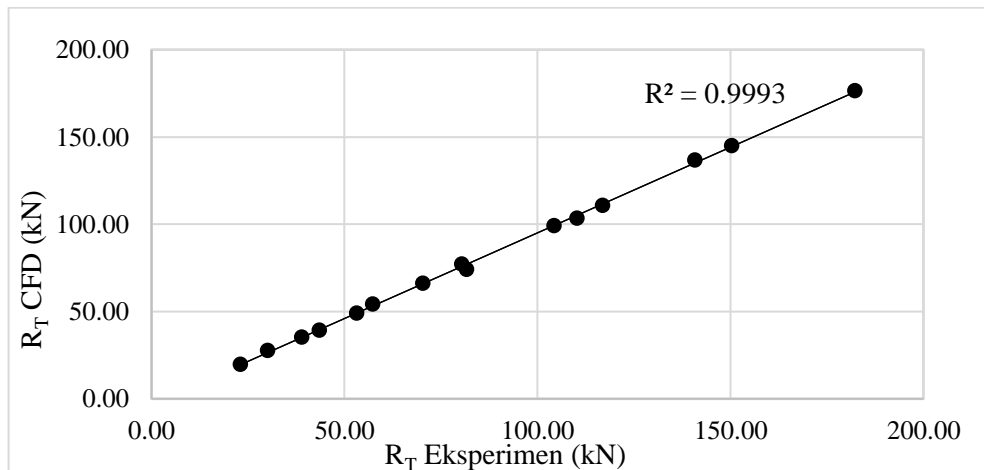
kapal katamaran K1 yaitu; pengurangan WSA dan trim buritan kapal. Pengurangan WSA terjadi seiring dengan bertambahnya kecepatan kapal. Hal ini terjadi disebabkan efek semburan (*spray*) air dihaluan kapal berkurang dengan adanya gaya angkat foil sehingga luasan WSA bagian haluan berkurang. Dengan adanya foil dihaluan kapal, maka akan mengalami trim buritan, sehingga luas permukaan basah WSA juga akan berkurang seiring dengan bertambahnya kecepatan. Namun pengurangan WSA tersebut masih lebih kecil daripada penambahan luas foil, sehingga hambatan kapal total akan bertambah. Dengan demikian dengan bertambahnya kecepatan kapal, maka hambatan kapal katamaran K1 lebih besar dibandingkan dengan kapal K0.

6.4.3.Hambatan yang terjadi pada kapal katamaran

Nilai hambatan pada kapal katamaran tanpa foil dan penambahan foil dilakukan dengan menggunakan 2 metode yang berbeda yaitu numerik dengan simulasi *software* CFD dan eksperimental di *towing tank*. Selanjutnya dilakukan perbandingan dari hasil kedua pendekatan tersebut.

Model kapal tanpa menggunakan foil didapatkan dari *linesplan* penelitian Satriawansyah (2017). Selanjutnya dimodelkan menggunakan *software* CAD untuk mendapatkan model 3D dan kemudian dianalisis menggunakan CFD. Selain itu data dari *linesplan* juga digunakan untuk membuat model uji kapal eksperimen dengan skala 1:50 untuk dilakukan analisis hambatan pada *towing tank*.

Perbandingan antara hambatan total kapal hasil simulasi CFD dan eksperimen dilakukan untuk mengukur keakuratan nilai hambatan kapal yang di dapat. Hambatan total kapal dari pengujian eksperimen dianggap sebagai pembanding yang benar karena kondisi pengujian eksperimen adalah kondisi yang paling mendekati keadaan sebenarnya pada tabel 6.10 yang menunjukkan perbandingan hambatan total kapal antara hasil simulasi CFD *NUMECA* dengan hasil pengujian eksperimen di *towing tank*.



Gambar 6.10 grafik distribusi perhitungan hambatan kapal hasil simulasi CFD dengan fungsi eksperimen (kapal katamaran tanpa foil K0, K1 dan K2).

Gambar 6.10 di atas menunjukkan bahwa grafik nilai dari hasil simulasi CFD dan hasil eksperimen *towing tank*, nilai regresi *linear* dari kedua sumbu di atas adalah $R^2 = 0.993$, yang berarti bahwa hasil dari kedua metode perhitungan hambatan kapal mendekati sama dan dapat divalidasi. Pada tabel 6.8 di bawah ini menjelaskan *Persentase relative error* dari hasil perhitungan hambatan menggunakan simulasi CFD dan eksperimen di *towing tank*

Tabel 6.9 *Persentase relatif error* hambatan total kapal tanpa foil dan dengan foil menggunakan simulasi eksperimen dan CFD

No	Fr	V_s (knot)	V_s (m/s)	<i>Error</i> (%)		
				No	1	2
1	0.3	12	6.17	4.76	-0.06	4.81
2	0.4	16	8.23	3.48	3.16	2.60
3	0.5	20	10.29	1.10	6.78	2.81
4	0.6	24	12.35	1.25	4.15	1.21
5	0.7	28	14.40	3.38	1.96	2.00

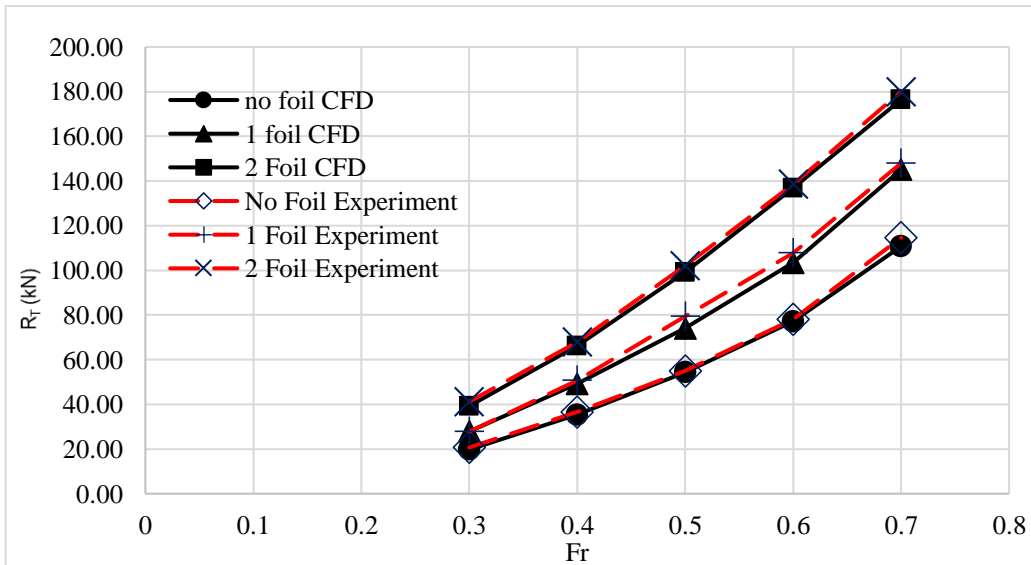
Hasil simulasi CFD dan *towing tank* dengan variasi tanpa foil (K0), dengan 1 foil di bagian haluan (K1), dan 1 foil di bagian haluan dan 1 foil di bagian buritan (K2) akan dibandingkan untuk mengetahui apakah hasil dari kedua metode dapat

digunakan. Pada gambar grafik dibawah ini dijelaskan hubungan antara nilai dari simulasi CFD dan nilai dari eksperimen di *towing tank*.

Tabel 6.10 Perbandingan hambatan total kapal tanpa foil K0 dan dengan foil K1, K2 menggunakan simulasi CFD dan eksperimen

No	Fr	V_s (knot)	V_s (m/s)	Simulasi CFD (kN)			Eksperimen (kN)		
				K0	K1	K2	K0	K1	K2
1	0.3	12	6.17	19.71	27.81	39.21	20.69	27.79	41.19
2	0.4	16	8.23	35.32	49.19	66.22	36.59	50.79	67.99
3	0.5	20	10.29	54.40	74.01	99.12	55.01	79.39	101.99
4	0.6	24	12.35	77.12	103.41	136.82	78.09	107.89	138.49
5	0.7	28	14.40	110.72	145.09	176.40	114.59	147.99	179.99

Tabel 6.10 ditampilkan keseluruhan hasil dari simulasi CFD dan pengujian eksperimen kapal katamaran tanpa foil K0 dan dengan penambahan 1 foil K1 dan penambahan 2 foil K2. Sedangkan nilai hambatan total dan koefisien hambatan pada tabel tersebut dinyatakan dalam bentuk grafik sebagaimana pada gambar 6.13 dan 6.14.

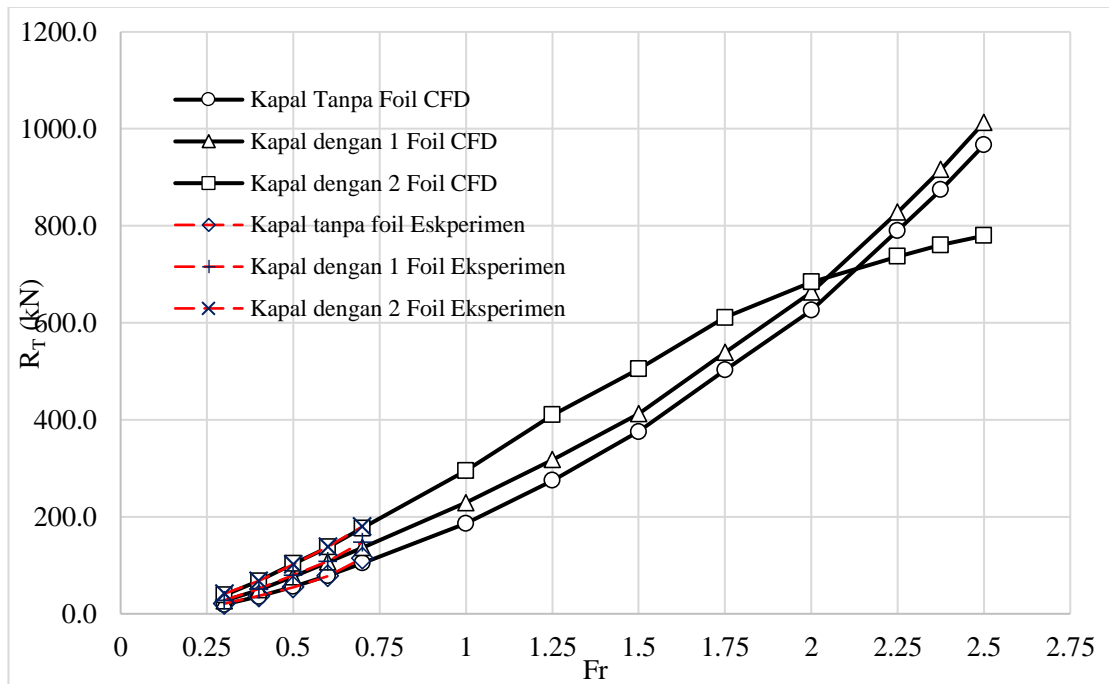


Gambar 6.11 Hambatan total kapal (R_T) tanpa foil (K0) dengan Hambatan total kapal (K1 dan K2) simulasi CFD, dan eksperimen di *towing tank* fungsi dari *Froude number* (Fr)

Dari simulasi CFD dan eksperimen *towing tank* terdapat kesamaan pola bekerjanya penambahan foil pada kapal katamaran, yakni pada kecepatan rendah sampai dengan kecepatan dinas (Fr 0,7) hambatan kapal masih bertambah, hal ini terjadi dikarenakan daya angkat yang dihasilkan oleh penambah foil pada kapal katamaran belum mampu mengurangi WSA total kapal sampai batas hambatan kapalnya sama. WSA kapal dengan penambahan foil masih lebih besar daripada kapal WSA tanpa foil. Namun demikian terjadi pengurangan WSA untuk kapal dengan 1 buah foil sebesar 7,41 % pada model kapal K1 dibandingkan saat diam (belum bergerak). Sedangkan pengurangan luas permukaan basah WSA untuk kapal katamaran dengan 2 buah foil adalah sebesar 4,12 % pada model kapal K2 dibandingkan dengan sebelum bergerak atau diam .

Untuk mencapai kondisi yang optimal dimana penambahan foil dapat mengurangi hambatan kapal katamaran pada penelitian ini terdapat beberapa metode antara lain dengan menambah kecepatan kapal untuk meningkatkan daya angkat yang dihasilkan oleh penambahan foil. Pengujian hambatan di *towing tank* Laboratorium hidrodinamika ITS tidak dapat dilakukan karena keterbatasan dari kereta tarik dan panjang dari *towing tank*. Analisa hambatan pada kecepatan yang relatif sangat tinggi hanya dilakukan dengan simulasi CFD karena salah satu kelebihan dari CFD adalah tidak ada batasan pada kecepatan ujinya. Akan tetapi untuk mencapai kondisi tersebut diperlukan *power* yang lebih besar, sedangkan kapal katamaran yang dijadikan obyek penelitian ditujukan untuk kapal penyeberangan dimana kecepatan kapal sudah ditentukan pada jangkauan (*range*) tertentu. Sehingga penambahan kecepatan untuk mencapai kondisi optimal dari penambahan foil tidak efisien.

Simulasi CFD kapal katamaran dilakukan pada variasi kecepatan Fr 1.0 - 2.5. Hal ini dilakukan terpisah karena simulasi awal menyesuaikan dengan kapasitas pengujian hambatan kapal di *towing tank* yaitu hanya dapat dilakukan sampai kecepatan, Fr 0.7. Sedangkan simulasi CFD dapat dilakukan sampai pada kecepatan sangat tinggi. Simulasi hambatan kapal pada kecepatan tinggi dimaksudkan untuk mengetahui lebih lanjut pengaruh dari penambahan foil pada kapal katamaran. Berikut adalah hasil simulasi CFD kapal katamaran pada kecepatan tinggi.



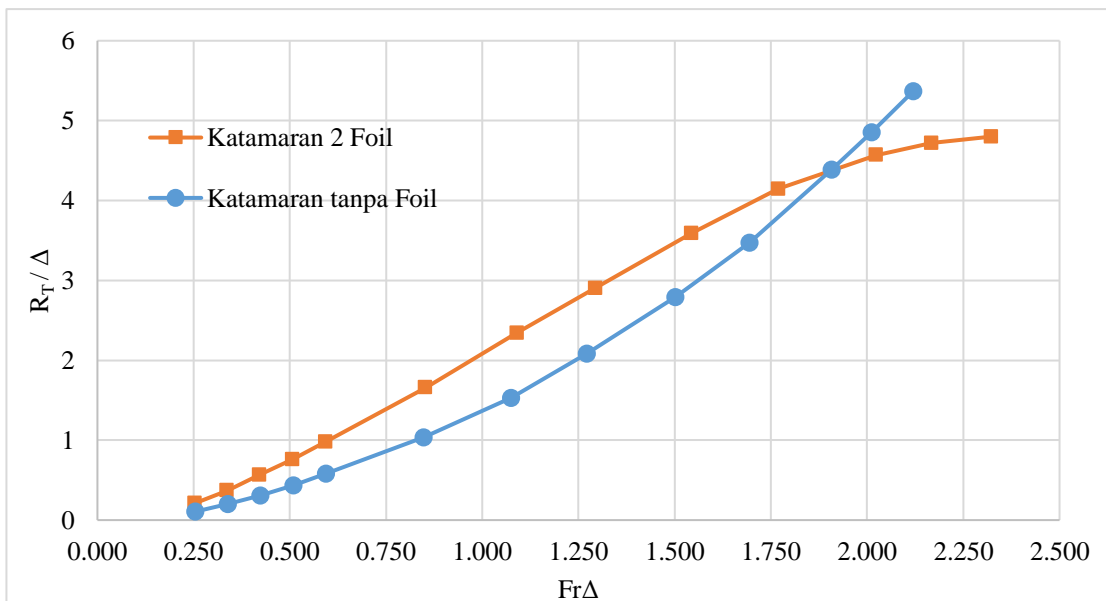
Gambar 6. 12 Simulasi CFD hambatan kapal katamaran kondisi K0, K1 dan K2 pada kecepatan tinggi Fr 1,0 sampai 2,5

Tabel 6. 11 Hasil Simulasi CFD hambatan kapal tanpa foil (K0), 1 foil (K1), 2 foil (K2) pada kecepatan tinggi dan luas permukaan basah lambung kapal (WSA K2)

Run ke-	V (knot)	V (m/s)	Fr	K0 (kN)	K1 (kN)	K2 (kN)	WSA K2 (m2)
1	12	6.17	0.3	19.2	26.6	38.3	383.443
2	16	8.23	0.4	35.7	49.1	67.2	371.61
3	20	10.29	0.5	55.7	76.2	103.4	363.78
4	24	12.35	0.6	78.3	106.7	137.4	351.19
5	28	14.40	0.7	104.5	136.2	176.6	342.53
6	40	20.58	1	186.2	228.9	294.9	330.72
7	50	26.08	1.25	274.9	317.6	410.0	318.73
8	60	30.86	1.5	375.4	412.5	505.0	302.45
9	70	36.42	1.75	502.5	538.7	610.6	285.17
10	80	41.10	2	625.7	663.1	684.2	261.68
11	90	46.30	2.25	790.2	827.8	736.9	236.21

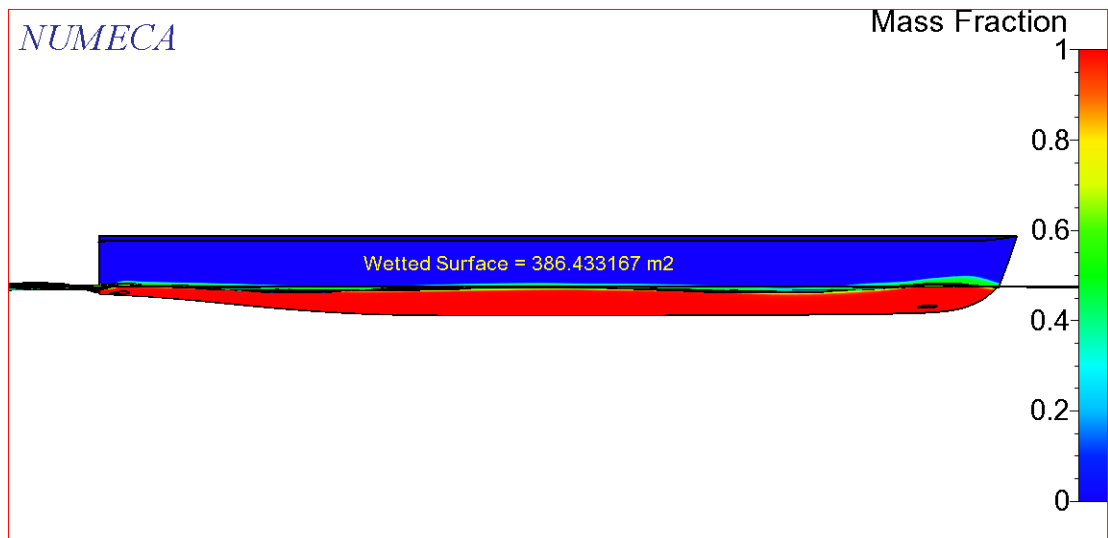
12	95	48.81	2.375	874.2	916.0	760.6	224.12
13	100	51.44	2.5	966.6	1013.0	779.6	212.14

Berdasarkan tabel 4.14 dan grafik pada gambar 4.54 di atas dapat dilihat bahwa penambahan foil pada kapal katamaran dapat memberikan efek pengurangan hambatan kapal katamaran pada kecepatan yang relatif tinggi untuk kapal katamaran dengan 2 foil pada $Fr > 2$ atau pada kondisi *planing*. Dengan demikian pengaruh positif penambahan foil dapat mengurangi hambatan kapal pada kecepatan tertentu sesuai dengan hipotesa dari penelitian ini, akan tetapi diperlukan kecepatan yang sangat tinggi untuk mencapai kondisi tersebut dimana diperlukan power yang jauh lebih besar sehingga kondisi tersebut tidak dimungkinkan untuk diterapkan pada dunia nyata. Simulasi pada kecepatan yang sangat tinggi tersebut hanya dilakukan untuk keperluan akademis. Pada simulasi hambatan dengan kecepatan yang tinggi, terjadi perubahan panjang kapal yang tercelup air (LWL) karena lambung kapal yang terangkat dan mengurangi WSA, maka diperlukan grafik antara R_T / Δ / Displasemen dengan fungsi dari FrV seperti gambar dibawah ini

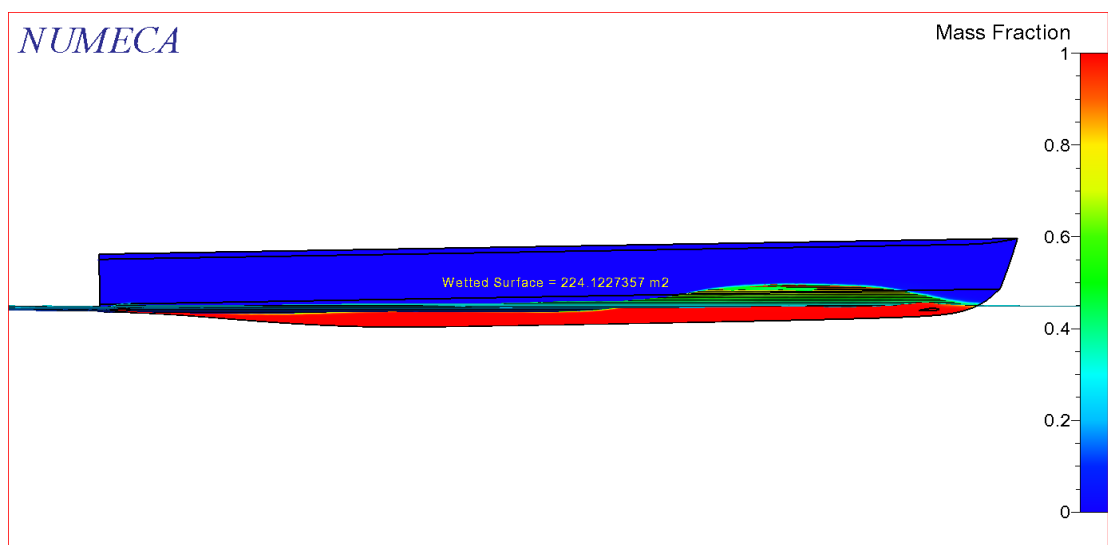


Gambar 6. 13 grafik hambatan kapal per displasemen fungsi dari bilangan Froude number volume

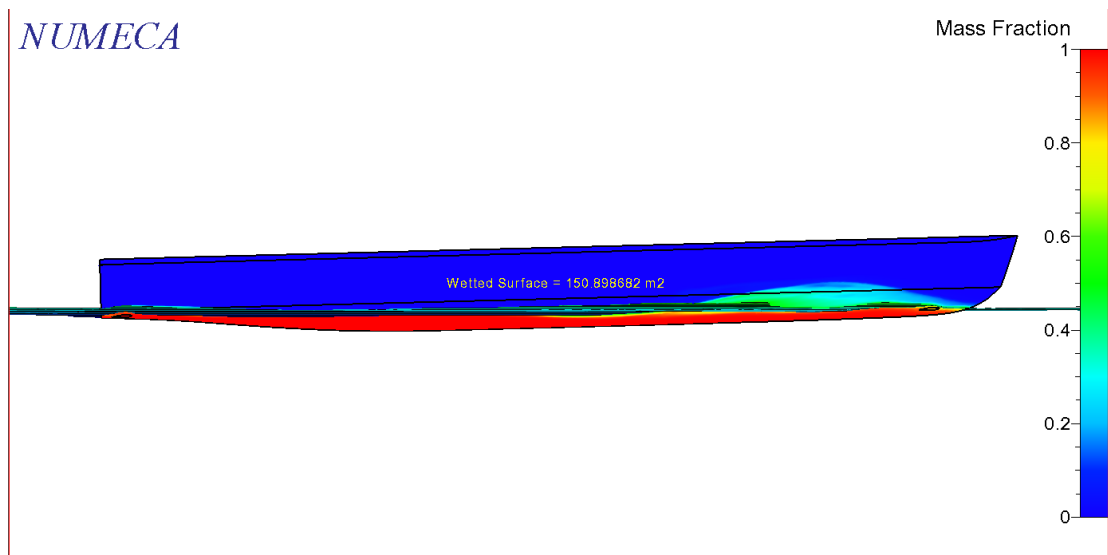
Pemasangan atau penambahan foil pada kapal katamaran dengan tujuan untuk mengurangi luas permukaan basah (WSA) dengan cara mengangkat lambung kapal ke atas, yang diakibatkan dari gaya angkat foil pada kapal katamaran. Ilustrasi pengurangan luas permukaan basah (WSA) dapat dilihat pada tabel 4.14 untuk kecepatan tinggi untuk kapal katamaran dengan 2 foil.



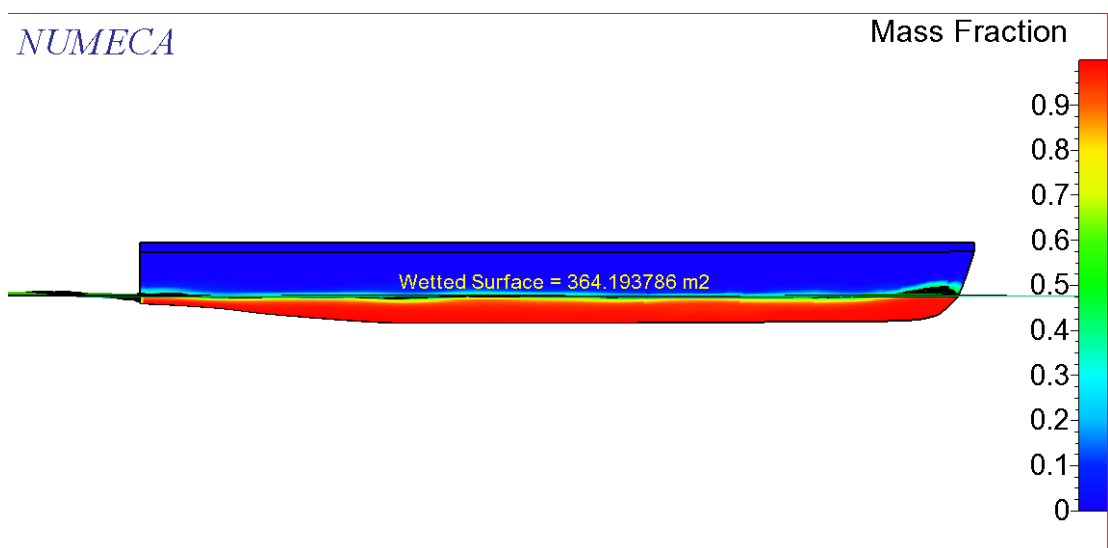
Gambar 6. 14 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 2 Foil pada Fr 0.3



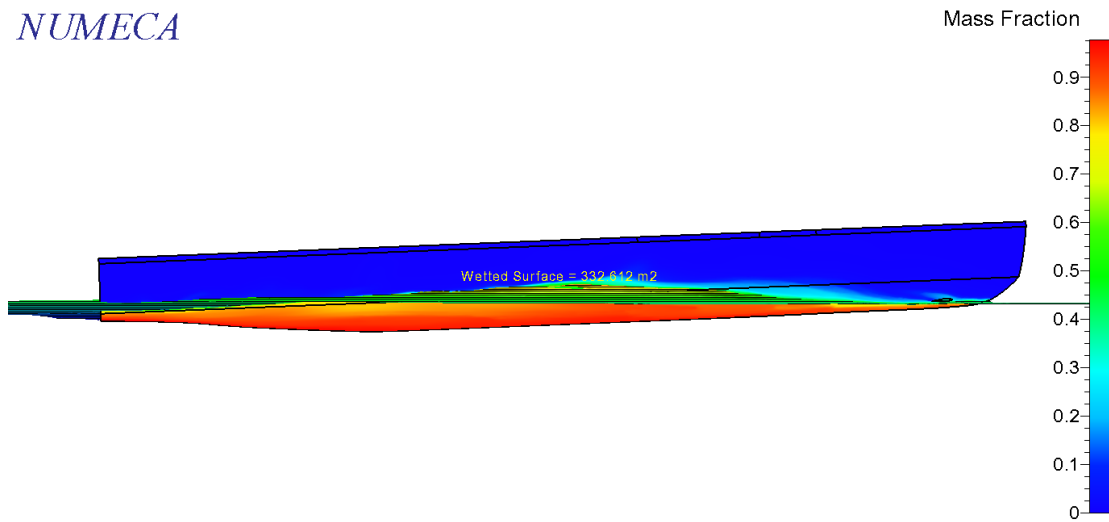
Gambar 6. 15 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 2 Foil pada Fr 2.375



Gambar 6. 16 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 2 Foil pada Fr
2.5



Gambar 6. 17 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 1 Foil pada Fr
0.3



Gambar 6. 18 WSA dan Visual kapal tampak samping Katamaran 1 Foil pada Fr 2.5

6.4.4. Analisis komparatif dengan penelitian sebelumnya

Pada penelitian ini didapatkan hasil dengan penambahan foil pada kapal katamaran mempengaruhi hambatan yang terjadi pada kapal. Pada kecepatan rendah, hambatan kapal katamaran dengan penambahan foil meningkat, hal ini terjadi karena adanya gaya *drag* tambahan dari foil pada kapal katamaran. Penambahan foil pada kapal katamaran baru memberikan efek yang positif pada kecepatan yang sangat tinggi, dimana hambatan kapal katamaran dengan 2 foil lebih kecil daripada hambatan kapal katamaran dengan foil pada $Fr > 2$ atau pada kondisi *planing*. Pada kondisi ini, gaya *lift* dari foil dapat mengangkat lambung kapal sehingga permukaan basah kapal berkurang dan hambatan kapal berkurang. Hal ini sesuai dengan penelitian dari Loveday et al (2008) dan Prastowo et al (2016) dimana pada penelitian sebelumnya terjadi pengurangan hambatan kecepatan yang sangat tinggi ($Fr > 1.75$), akan tetapi kondisi tersebut tidak dapat direalisasikan pada penelitian ini karena dengan ukuran kapal yang jauh lebih besar daripada penelitian sebelumnya dimana Loveday et al (2008) meneliti kapal dengan panjang 11 meter, Prastowo et al (2016) 26 meter, sedangkan pada penelitian ini panjang kapal 44 meter, sehingga diperlukan power yang jauh lebih besar untuk mencapai kondisi *planing*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 7

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Pada tesis ini setelah dilakukan analisis pada hasil simulasi numerik CFD dan eksperimental di *towing tank* sesuai dengan referensi, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Karakteristik foil NACA 64₁-212 pada penelitian ini didapatkan menggunakan simulasi CFD telah sesuai dengan teori, dan sudah divalidasi dengan nilai karakteristik foil dari *database* NACA.
2. Nilai hambatan kapal katamaran dengan penambahan foil berdasarkan simulasi CFD lebih besar daripada kapal katamaran tanpa foil karena penambahan WSA dan penambahan *drag* dari foil serta dimensi kapal yang cukup panjang untuk kapal *hysucat*. Pengurangan hambatan baru terjadi pada kondisi *planing* dimana pada kondisi ini pengurangan hambatan akibat WSA lebih besar daripada penambahan *drag* dari foil.
3. Nilai hambatan kapal katamaran dengan penambahan foil berdasarkan pengujian hambatan di *towing tank* lebih besar daripada kapal katamaran tanpa foil pada kecepatan rendah, pengujian hambatan pada kecepatan tinggi tidak dapat dilakukan karena keterbatasan fasilitas dimana kecepatan kereta tarik di *towing tank* hanya mampu sampai $Fr = 0.7$.
4. Berdasarkan hasil simulasi CFD dan pengujian *towing tank* nilai hambatan kapal memiliki kesamaan, dimana pada kecepatan rendah kapal katamaran dengan foil menambah hambatan kapal dibanding kapal katamaran tanpa foil. Pada simulasi CFD pengurangan hambatan kapal katamaran dengan 2 foil baru terjadi pada kondisi *planning* ($Fr > 2$) yang disebabkan adanya gaya angkat dari foil, Fenomena ini didapatkan dari keuntungan dan keunggulan simulasi CFD, dimana pada simulasi CFD simulasi jangkauan variasi kecepatan tidak memiliki keterbatasan sebagaimana pada pengujian di *towing tank*, akan tetapi untuk mencapai kecepatan tersebut diperlukan

power yang jauh lebih besar sehingga kondisi tersebut tidak mungkin untuk direalisasikan.

7.2. Saran

Pada proses pengerjaan simulasi dan eksperimen terdapat banyak saran sebagai berikut :

1. Perlu memperhatikan bentuk lambung kapal katamaran yang lebih optimal digunakan untuk kapal *hysucat* karena tidak semua lambung kapal katamaran dapat diaplikasikan menjadi kapal *hysucat*.
2. Perlu memperhatikan posisi foil terhadap kedalaman kapal untuk mendapatkan gaya angkat dan gaya *drag* tambahan yang optimal.
3. Untuk mendapatkan hasil lebih akurat perlu dilakukan pengujian model kapal dengan skala kapal yang lebih besar dan kereta tarik dengan kecepatan yang lebih tinggi, sehingga didapatkan hasil yang lebih teliti.
4. Diperlukan perangkat super komputer untuk melakukan simulasi CFD pada kecepatan yang sangat tinggi, sehingga didapatkan hasil yang lebih teliti dengan waktu yang tidak terlalu lama.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, Y & Soares, C. G. (2009), Simulation Of The Flow Around The Surface Combatant DTMB Model 5414 At Different Speeds, 13th congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean, (IMAM 2009), Istanbul, Turkey. 12-15 Oct. 2009
- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics The Basic with Application*. New York: Mc Graw -Hill.
- Andrewartha, M., Doctors, L., Kantimahanthi, K., and Brandner, P. (2003). A Numerical Method for Performance Prediction of *Hydrofoil Assisted Catamarans*. Proc Seventh International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '03), Naples, Italy, pp 9-16.
- Besnard, E., Hefasi, H., Schmitz, A., Kurai, O. (1998). Hydrofoil Design and Optimization for Fast Ships, ASME.
- Calkins, D.E, (1984). "HYCAT: Hybrid Hydrofoil Catamaran Concept". *OceanEngineering*, Vol. 11, No. 1, hal. 1-21
- FASTcc, Foil Assisted Ship Technologies cc, www.fastcc.co.za, accessed 19 Agustus 2018.
- He, W., Castiglione, T., dan Kandasamy, M., (2015), "Numerical Analysis of the Interference Effects on Resistance, Sinkage and Trim of a Fast Catamaran". *J Mar Sci Technol*, Vol. 20, hal: 292-308
- Hoppe, K.G. (1980). Boats, *Hydrofoil Assisted Catamaran*, SA Patent 80/5400 and corresponding foreign patents.
- Hoppe, K.G. (1982). Boats, Hydrofoil Supported Catamaran, SA Patent 82/3505 and corresponding foreign patents.
- Hoppe, K.G. (1989). The *Hysucat* Development. Internal Report, Department of Mechanical Engineering, University of Stellenbosch, Republic of South Africa.
- Hoppe, K.G. (1995). Optimization of Hydrofoil-supported Planing Catamarans. FAST'95, Third International Conference on Fast Sea Transportation, Vol. 1.
- Hoppe, K.G. (2001). Recent Applications of Hydrofoil-supported Catamarans, Fast Ferry International.

- Jamaluddin, A., Utama, I.K.A.P. and Molland, A.F., *Experimental Investigation Into the Drag Characteristics of Symmetrical and Asymmetrical Staggered and Unstaggered Catamaran*, International Conference on Ship & Offshore Technology (ICSOT) - Indonesia 2010, Surabaya, 11- 12 November 2010.
- Jamaluddin, A., et al., 2012. Experimental and numerical Study of the Hambatan Component Interactions of Catamarans. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Volume 227(1), pp 51-60.
- Larsson, and Raven, H.C., (2010), *The Principle of Naval Architecture Series*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey.
- Lewis, E.V. (1998). *Principles of Naval Architecture*, Second Revision, SNAME.
- Liu, Luo-Qin. (2017), *Unified Theoretical Foundations of Lift and Drag in Viscous and Compressible External Flows*, Thesis Ph.D., Peking University, Beijing.
- Loveday, H. (2006, April). *The Design of Hydrofoil System of Sailing Catamaran*. University of Stellenbosch.
- Manoharan, R. and Sahoo, P.K. (2010). *Drag Reduction of NPL Round Bilge Hull Forms in HYSUCAT Configuration: An Analytical Study*. Seventh International Conference on High-Performance Marine Vehicles, Melbourne, Florida, USA, 13-15 October 2010, pp. 235-251.
- Migeotte, G. (2015). *Hydrofoil Supported Catamaran*. *Professional Boat Builder*. Boston Boatworks.
- Milandri, G. S. (2006). *Seakeeping Control of HYSUCATs*, Master Thesis, University of Stellenbosch, Stellenbosch, Republic of South Africa.
- Miyata, H. (1989). *Development of a New-type Hydrofoil Catamaran*. *Journal of ship research*, Vol. 33, No. 2, pp. 135-144.
- Migeotte, G., & Hoppe, K. (1999). *Developments in Hydrofoil Assistance for Semi-Displacement Catamarans*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Molland A.F, Wellicome J.F and Couser P.R., (1996). *Hambatan experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms: variations of length– displacement ratio and breadth–draught ratio*. *RINA Trans*; 138: 55–71.

- Murdijanto, Utama, I.K.A.P., Jamaluddin, A., (2011). “An Investigation into the Hambatan/Powering and Seakeeping Characteristics of River Catamaran and Trimaran.” *Jurnal Ilmiah Teknologi Makara*, Vol. 15, No. 1, hal: 25-30
- Nakayama, Y. (1999), “*Drag and Lift*”, dalam *Introduction to Fluid Mechanics*, Boucher, R.F, Elsevier Butterworth-Heinemann, Boston, hal 148-163.
- Prastowo, H. Santoso, A. Arya, A. (2016). “Analysis and Optimation Hydrofoil Supported Catamaran (HYSUCAT) Size 25 Meter Based on CFD Method”, *Int. J. of Marine Engineering Innovation and Research*, Vol 1, No.1, hal. 31-37.
- Sakti, A.S., Utama, I.K.A.P. (2012) “Analisis CFD dan Eksperimen Hambatan Lambung Katamaran Asimetris *Flat Side Outside* dengan Varaisi Jarak *Demihull*” *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 1
- Savitsky, D. (1964). Hydrodynamic Design of Planing Hulls, *Marine Tech.*, 1(1), pp. 71–95.
- Satriawansyah, M. H. (2016). Design of Catamaran Passenger Ship for the Route of Boom Marina, Banyuwangi to Benoa Port, Final project, Department of Naval Architecture, Faculty of Marine Technology, ITS Surabaya.
- Suastika, K., Dikantoro, R.Y., Purwanto, D.B., Setyawan, D., Putra, W.H.A. (2018). Analysis of *lift* and *drag* of mono-foil *Hysucat* due to longitudinal foil-placement variation, *Int’l J. Marine Engng Innov. Res.*, Vol. 2, No. 2, pp. 176-181.
- Suastika, K., Hidayat, A., dan Riyadi, S., (2017). Effect of the Application of a Stern Foil on Ship Hambatan: a Case Study of an Orela Crew Boat, *Int’l J. Tech.*, Vol. 7, pp. 1266-1275.
- Teddy, N., Sudarja, (2008). “Pengaruh Lokasi Ketebalan Maksimum Airfoil Simetris Terhadap Koefisien Angkat Aerodinamisnya.” *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, Vol. 11, No. 1, Hal: 110-124.
- Yahiaoui, T. Belhenniche, M. Imine, B. (2015), “Effect of Moving *Surface* on NACA 63218 Aerodynamic Performance“, *Proceeding of EPJ Web of Conferences 92. 02114*. University of Sciences and Technology Algeria.
- Perera, et al., 2009, “A Ship Simulation System for Maritime Education”. Universtiy of Colombo, Srilanka.
- White, F.M., *Fluid Mechanics*, 7th ed., New York: McGraw-Hill, 2011.

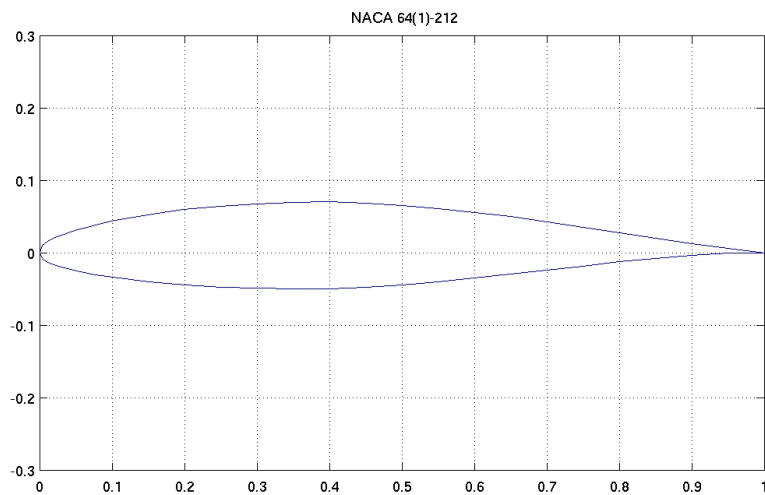
Zaghi, S., Broglia, R., di Mascio, A., 2010, “Experimental and Numerical Investigations on Fast Catamarans Interference Effects”, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22(5), supplement: 545-549.

DAFTAR LAMPIRAN

Daftar lampiran berikut terdiri dari:

- Lampiran A : bentuk foil dan eksperimen
- Lampiran B : Visualisasi CFD foil
- Lampiran C : Visualisasi CFD kapal katamaran tanpa foil dan dengan penambahan foil
- Lampiran D : Visualisasi pengujian hambatan kapal tanpa foil dan dengan penambahan foil di towing tank

LAMPIRAN A



Gambar 1. Profile section NACA 64₁-212

Xfoil polar. Reynolds number fixed. Mach number fixed

Polar key xf-n64212-il-1000000

Airfoil n64212-il

Reynolds number 1000000

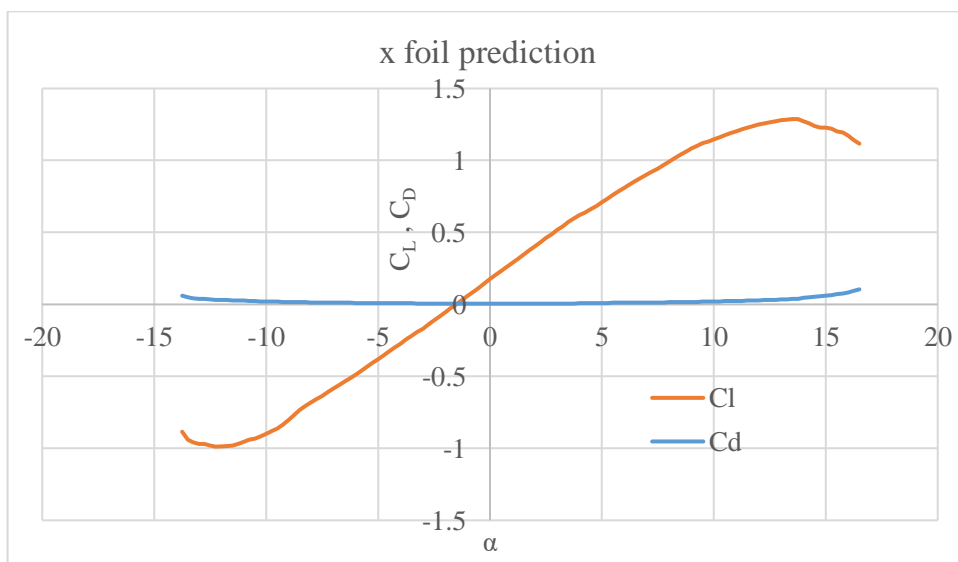
Ncrit 9

Mach 0

Max Cl/Cd 91.1603

Max Cl/Cd alpha 3.75

Url <http://airfoiltools.com/polar/csv?polar=xf-n64212-il-1000000>



Gambar 1. Grafik Cl dan Cd foil NACA 64₁-212

Alpha	Cl	Cd	Cdp	Cm	Top_Xtr	Bot_Xtr
-13.75	-0.883	0.05972	0.05753	-0.046	1	0.0105
-13.5	-0.94	0.04844	0.04587	-0.0522	1	0.0103
-13.25	-0.9597	0.04343	0.04066	-0.0539	1	0.0103
-13	-0.9703	0.03991	0.03697	-0.0545	1	0.0103
-12.75	-0.9704	0.03783	0.0348	-0.0544	1	0.0105
-12.5	-0.9815	0.03474	0.03152	-0.0536	1	0.0106
-12.25	-0.9861	0.03254	0.02915	-0.0522	1	0.0107
-12	-0.9862	0.03101	0.02749	-0.0503	1	0.0109
-11.75	-0.9856	0.02969	0.02606	-0.0478	1	0.0111
-11.5	-0.9811	0.02797	0.02415	-0.0458	1	0.0113
-11.25	-0.9698	0.02671	0.02274	-0.0444	1	0.0115
-11	-0.9544	0.02588	0.02179	-0.0433	1	0.0117
-10.75	-0.9382	0.02503	0.02083	-0.0423	1	0.0119
-10.5	-0.9321	0.02212	0.0176	-0.0404	1	0.0122
-10.25	-0.9178	0.02058	0.01595	-0.0391	1	0.0126
-10	-0.8992	0.01978	0.0151	-0.0382	1	0.0129
-9.75	-0.8798	0.01918	0.01446	-0.0373	1	0.0132
-9.5	-0.8612	0.01853	0.01375	-0.0361	1	0.0135
-9.25	-0.8348	0.01784	0.013	-0.0365	0.9957	0.0139
-9	-0.8022	0.01702	0.01209	-0.0382	0.9887	0.0144
-8.75	-0.7683	0.01626	0.01125	-0.0401	0.9819	0.0149
-8.5	-0.7337	0.01585	0.01077	-0.042	0.9728	0.0153
-8.25	-0.705	0.01461	0.0094	-0.043	0.9599	0.0159
-8	-0.6812	0.01369	0.0084	-0.0428	0.9441	0.0165
-7.75	-0.6578	0.01324	0.00789	-0.0422	0.9294	0.017
-7.5	-0.6341	0.01287	0.00746	-0.0416	0.9163	0.0176
-7.25	-0.6102	0.0125	0.00701	-0.041	0.9041	0.0183

-7	-0.5858	0.01213	0.00657	-0.0405	0.8931	0.0189
-6.75	-0.5606	0.01187	0.00623	-0.0401	0.8825	0.0195
-6.5	-0.536	0.01142	0.00571	-0.0397	0.8722	0.0202
-6.25	-0.5123	0.01081	0.00501	-0.0392	0.8627	0.0215
-6	-0.4864	0.01052	0.00469	-0.039	0.8531	0.0226
-5.75	-0.46	0.01026	0.00438	-0.0389	0.8443	0.0239
-5.25	-0.4073	0.00964	0.00363	-0.0386	0.8271	0.0273
-5	-0.3805	0.00941	0.00337	-0.0385	0.8187	0.0299
-4.75	-0.353	0.00923	0.00316	-0.0385	0.81	0.032
-4.5	-0.3262	0.00893	0.00282	-0.0384	0.802	0.0367
-4.25	-0.2987	0.00875	0.00261	-0.0384	0.7937	0.0407
-4	-0.2714	0.0085	0.00237	-0.0385	0.7859	0.0508
-3.75	-0.2445	0.00814	0.00213	-0.0385	0.7777	0.0848
-3.5	-0.2182	0.0076	0.00188	-0.0386	0.77	0.161
-3.25	-0.1929	0.00681	0.00156	-0.0388	0.7618	0.2934
-3	-0.1675	0.00601	0.00132	-0.0389	0.754	0.4503
-2.75	-0.1397	0.00584	0.00124	-0.039	0.7458	0.4985
-2.5	-0.1113	0.00574	0.00119	-0.0392	0.7382	0.5255
-2.25	-0.0829	0.0057	0.00115	-0.0393	0.7305	0.5438
-2	-0.0543	0.00565	0.00111	-0.0395	0.7231	0.5603
-1.75	-0.0258	0.00563	0.00108	-0.0396	0.7156	0.5759
-1.5	0.0028	0.0056	0.00107	-0.0398	0.7084	0.597
-1.25	0.0311	0.00557	0.00108	-0.0399	0.701	0.6194
-1	0.0598	0.00556	0.00108	-0.04	0.6939	0.6313
-0.75	0.0885	0.00557	0.00107	-0.0402	0.6864	0.6398
-0.5	0.1172	0.00557	0.00106	-0.0404	0.6795	0.6475
-0.25	0.146	0.00558	0.00106	-0.0406	0.6725	0.6553
0	0.1746	0.00559	0.00107	-0.0407	0.6661	0.6621
0.25	0.2035	0.0056	0.00108	-0.0409	0.6594	0.6692
0.5	0.232	0.00564	0.0011	-0.0411	0.6528	0.676
0.75	0.2609	0.00563	0.00112	-0.0413	0.6456	0.6833

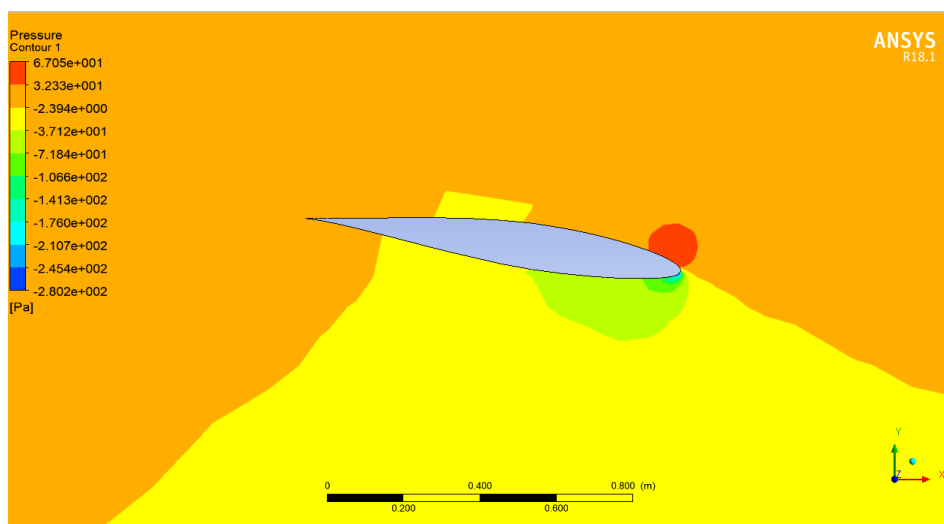
1.25	0.3181	0.00568	0.00119	-0.0416	0.6306	0.6983
1.75	0.3751	0.00574	0.00126	-0.0419	0.6128	0.714
2	0.4034	0.00579	0.0013	-0.042	0.5987	0.7216
2.25	0.4311	0.00587	0.00133	-0.042	0.5788	0.7297
2.5	0.4591	0.00594	0.00139	-0.042	0.5629	0.7375
2.75	0.4871	0.00602	0.00146	-0.0421	0.5472	0.7458
3	0.5153	0.00608	0.00154	-0.0422	0.5337	0.7538
3.25	0.5431	0.00618	0.00162	-0.0422	0.5153	0.7626
3.5	0.5706	0.0063	0.00173	-0.0422	0.4927	0.771
3.75	0.5971	0.00655	0.00186	-0.042	0.4503	0.7799
4	0.6185	0.00739	0.0022	-0.0413	0.3281	0.7884
4.25	0.6394	0.00834	0.00266	-0.0405	0.2111	0.7972
4.5	0.6615	0.00911	0.00307	-0.0399	0.1272	0.8063
4.75	0.685	0.00969	0.00343	-0.0394	0.0758	0.8152
5	0.7096	0.01013	0.00376	-0.039	0.0492	0.8248
5.25	0.7348	0.01044	0.00406	-0.0387	0.0394	0.8343
5.5	0.7602	0.01074	0.00438	-0.0383	0.0339	0.8441
5.75	0.7854	0.01103	0.00469	-0.038	0.0301	0.8544
6	0.8098	0.01136	0.00508	-0.0374	0.0267	0.8645
6.25	0.8346	0.01162	0.00538	-0.037	0.0244	0.8754
6.5	0.8566	0.01216	0.00597	-0.036	0.0214	0.8879
7	0.9034	0.01268	0.00663	-0.0345	0.0195	0.9158
7.25	0.9243	0.01299	0.00699	-0.0333	0.0185	0.9328
7.5	0.9432	0.01335	0.00742	-0.0316	0.0176	0.9585
7.75	0.9669	0.01423	0.00839	-0.0315	0.0166	1
8	0.9914	0.01463	0.00883	-0.0312	0.0162	1
8.25	1.0153	0.01506	0.00929	-0.0308	0.0157	1
8.5	1.0381	0.01556	0.00982	-0.0303	0.0151	1
8.75	1.0602	0.0161	0.01039	-0.0297	0.0146	1
9	1.0817	0.01666	0.01098	-0.029	0.0142	1
9.25	1.102	0.01729	0.01165	-0.0281	0.0138	1

9.5	1.1199	0.01811	0.0125	-0.0269	0.0134	1
9.75	1.1332	0.01934	0.01381	-0.0251	0.013	1
10	1.1457	0.02074	0.01532	-0.0233	0.0127	1
10.25	1.1621	0.02153	0.01617	-0.0218	0.0126	1
10.5	1.1769	0.02226	0.01698	-0.0201	0.0125	1
10.75	1.1905	0.02309	0.0179	-0.0184	0.0123	1
11	1.2031	0.02404	0.01893	-0.0166	0.0121	1
11.25	1.2163	0.02477	0.01973	-0.015	0.0118	1
11.5	1.2276	0.02582	0.02086	-0.0134	0.0115	1
11.75	1.2383	0.02693	0.02206	-0.0118	0.0114	1
12	1.2485	0.02804	0.02325	-0.0103	0.0111	1
12.25	1.2577	0.02927	0.02458	-0.0088	0.011	1
12.5	1.2654	0.03071	0.02611	-0.0074	0.0108	1
12.75	1.2736	0.03199	0.02747	-0.0063	0.0106	1
13	1.2804	0.03349	0.02904	-0.0051	0.0104	1
13.25	1.285	0.03528	0.03093	-0.0041	0.0103	1
13.5	1.2875	0.03738	0.03313	-0.0031	0.0102	1
13.75	1.2861	0.04002	0.0359	-0.0022	0.01	1
14	1.274	0.04412	0.04022	-0.0013	0.0098	1
14.25	1.2591	0.04864	0.04498	-0.001	0.0098	1
14.5	1.2382	0.05407	0.05067	-0.0014	0.0097	1
14.75	1.2281	0.05828	0.05505	-0.0023	0.0097	1
15	1.2279	0.06122	0.0581	-0.0033	0.0096	1
15.25	1.2208	0.06539	0.0624	-0.0049	0.0095	1
15.5	1.2033	0.07153	0.06872	-0.0074	0.0095	1
15.75	1.193	0.07688	0.07421	-0.0101	0.0095	1
16	1.1709	0.08477	0.08229	-0.0144	0.0095	1
16.25	1.1421	0.0947	0.09241	-0.0203	0.0095	1
16.5	1.1184	0.10459	0.10247	-0.0265	0.0095	1

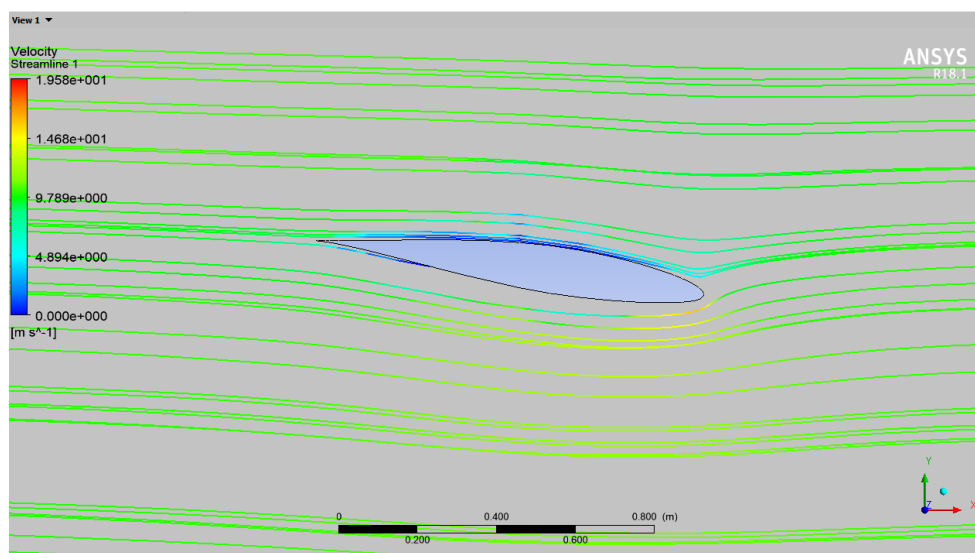
LAMPIRAN B

Lampiran visualisasi hasil simulasi CFD pada foil NACA 64₁-212 pada kecepatan 20 knot atau 10.289 m/s, dengan aspek rasio 17.34 pada sudut serang tertentu

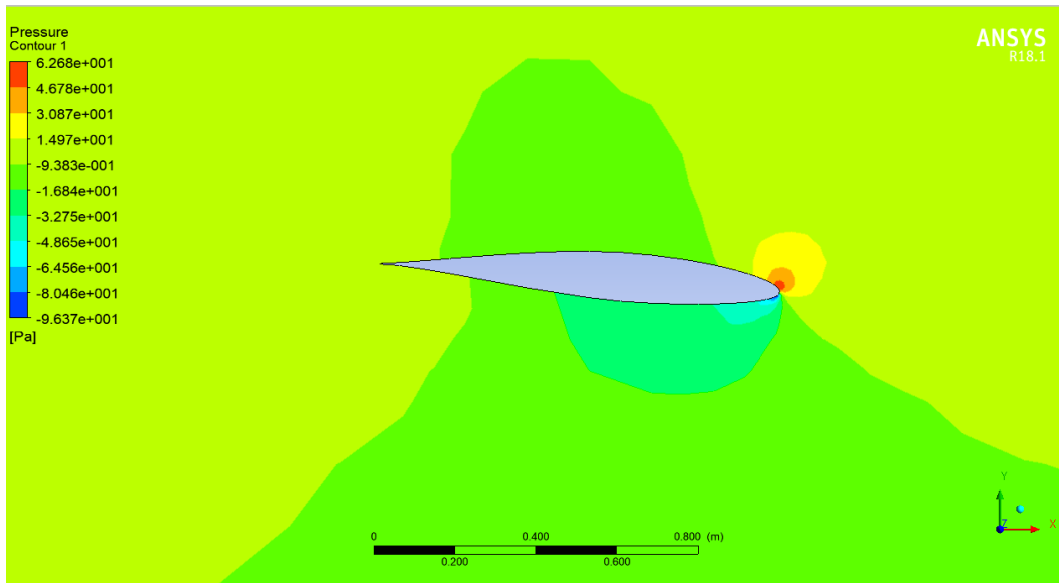
B.1. Visual kontur *static pressure* foil NACA 64₁-212 pada kecepatan 20 knot atau 10.289 m/s, $Re = 1 \times 10^7$



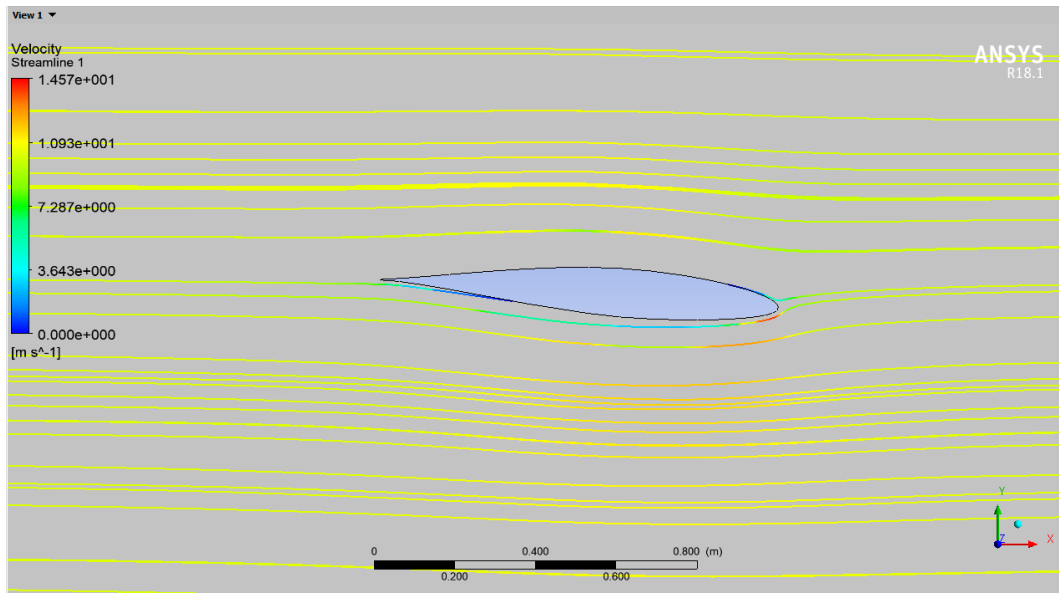
Gambar B. 1. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = -8^\circ$



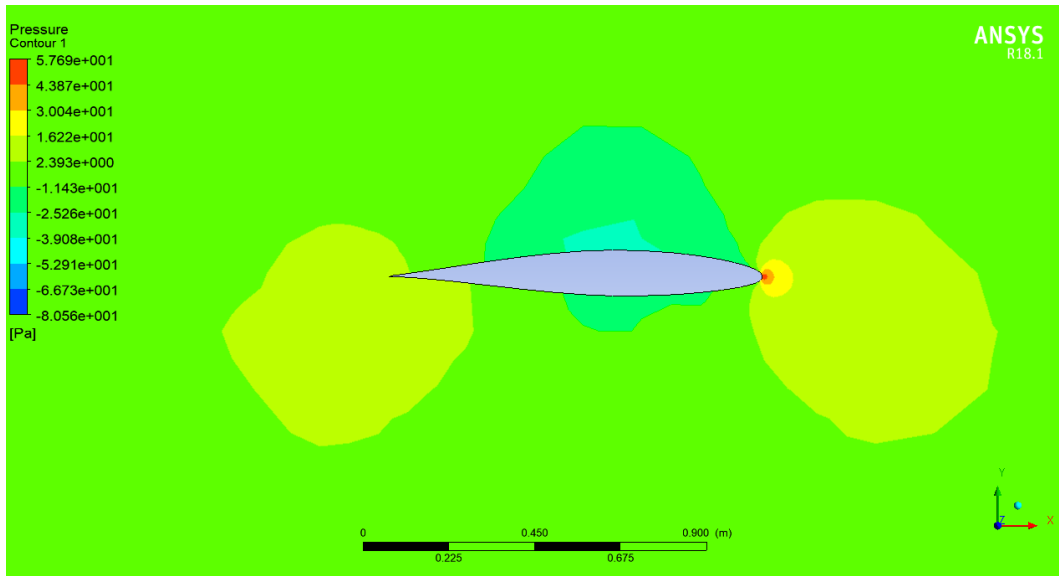
Gambar B. 2 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = -8^\circ$



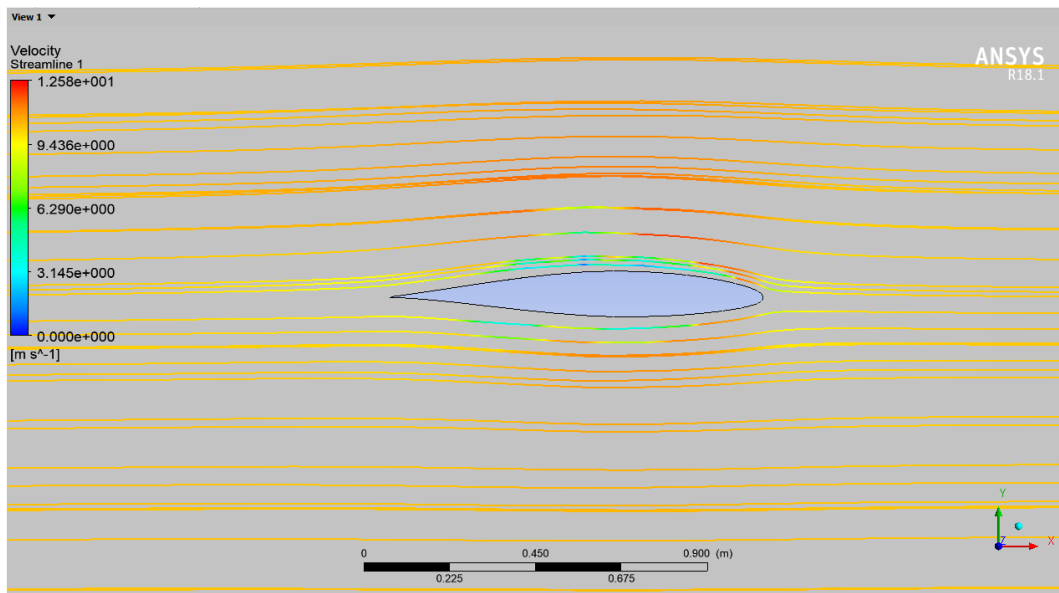
Gambar B. 3. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = -4^\circ$



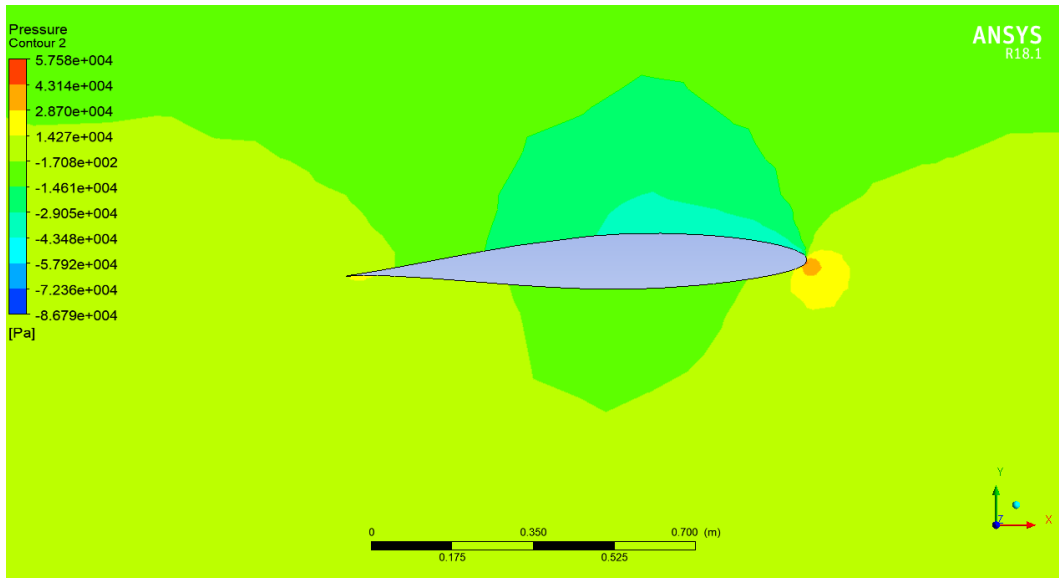
Gambar B. 4 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = -4^\circ$



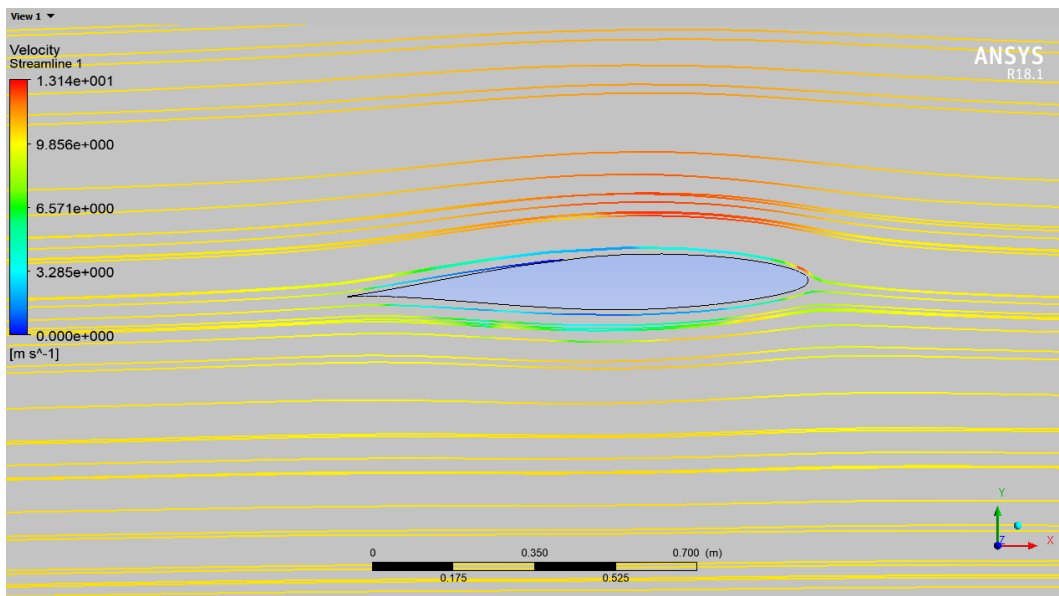
Gambar B. 5. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 0^\circ$



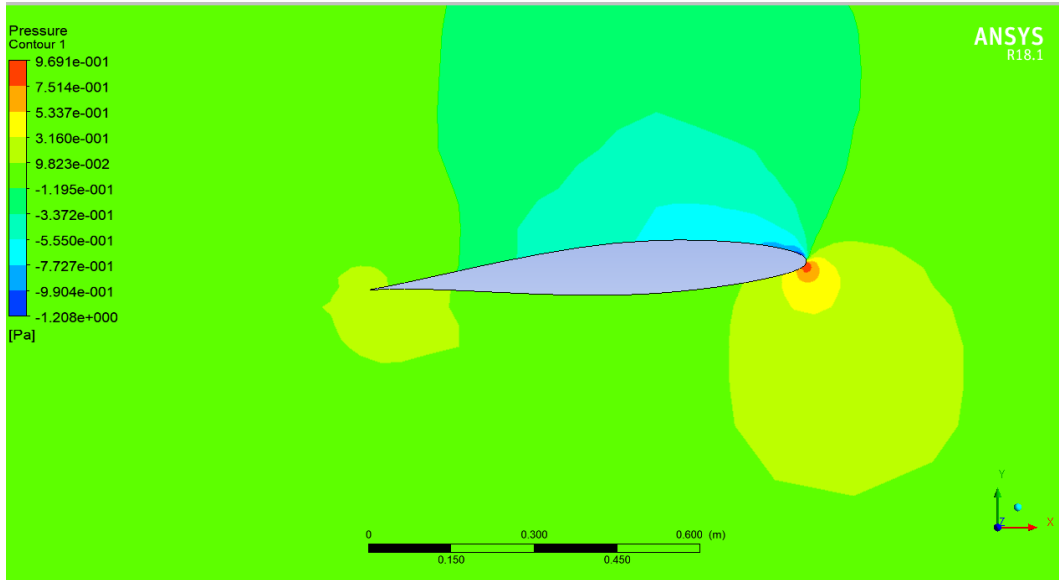
Gambar B. 6 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 0^\circ$



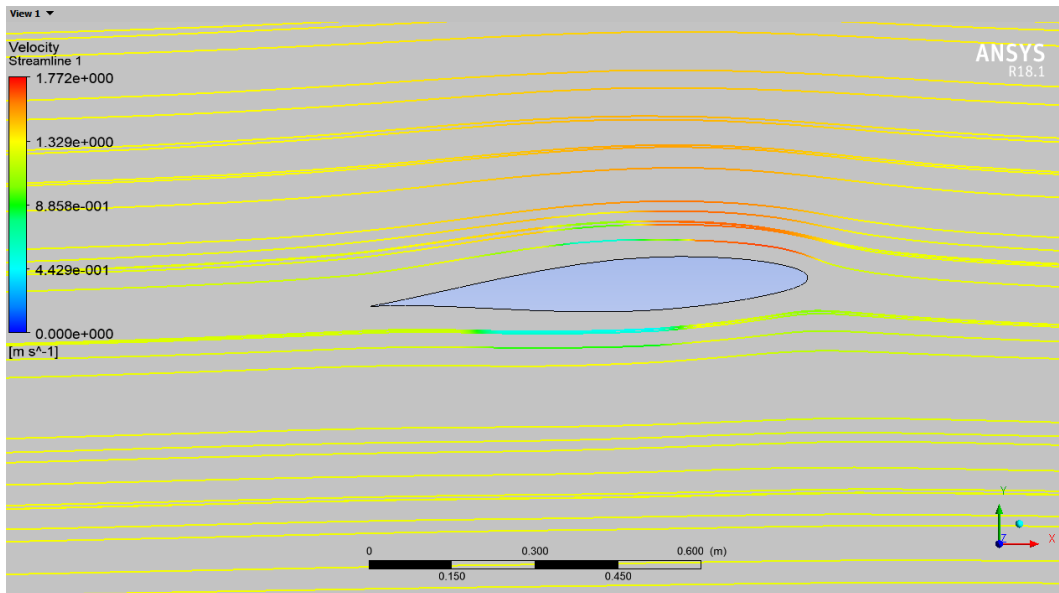
Gambar B. 7. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 2^\circ$



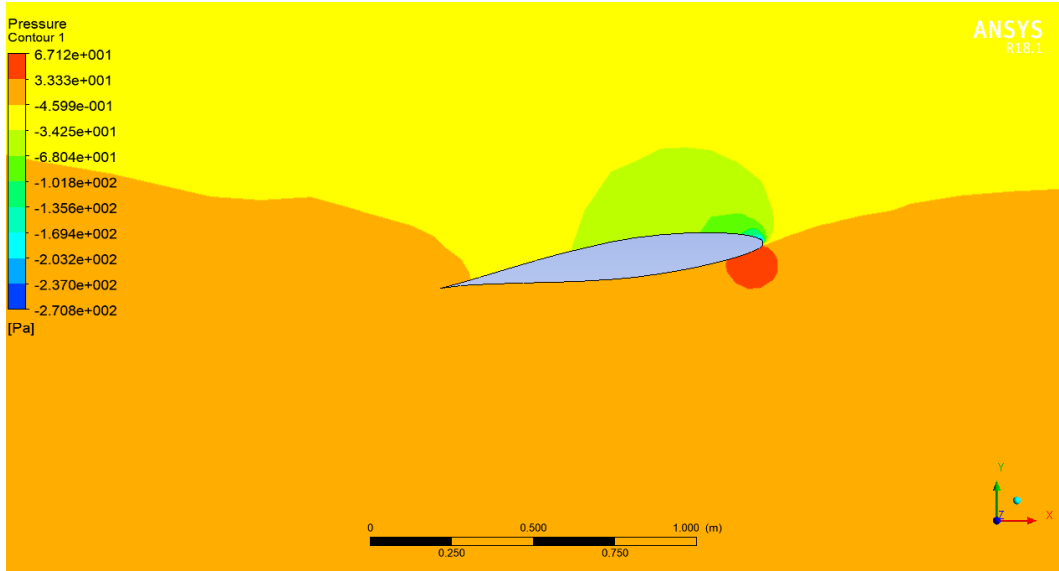
Gambar B. 8 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 2^\circ$



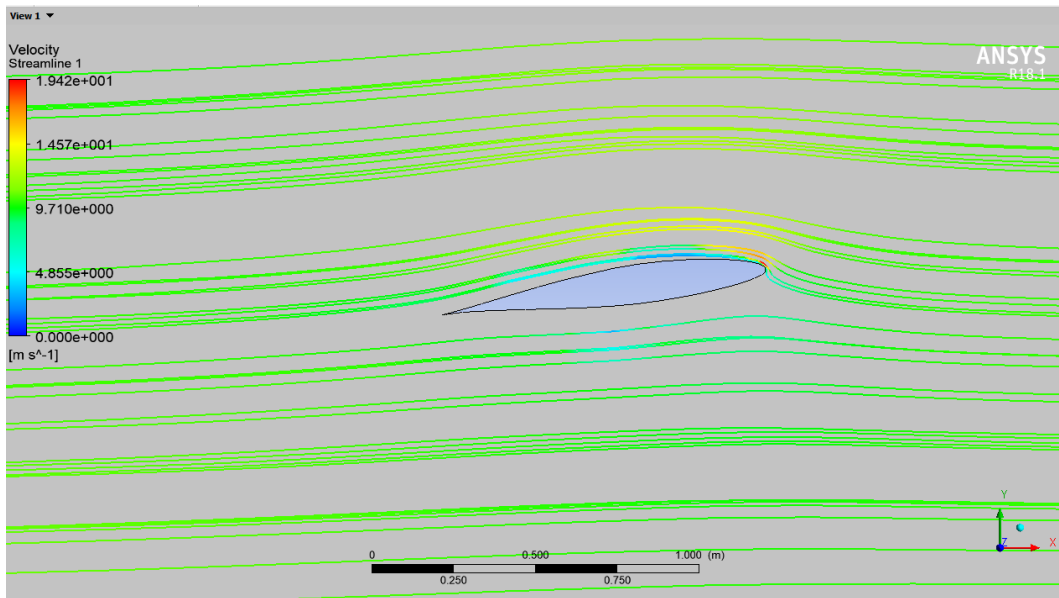
Gambar B. 9. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 4^\circ$



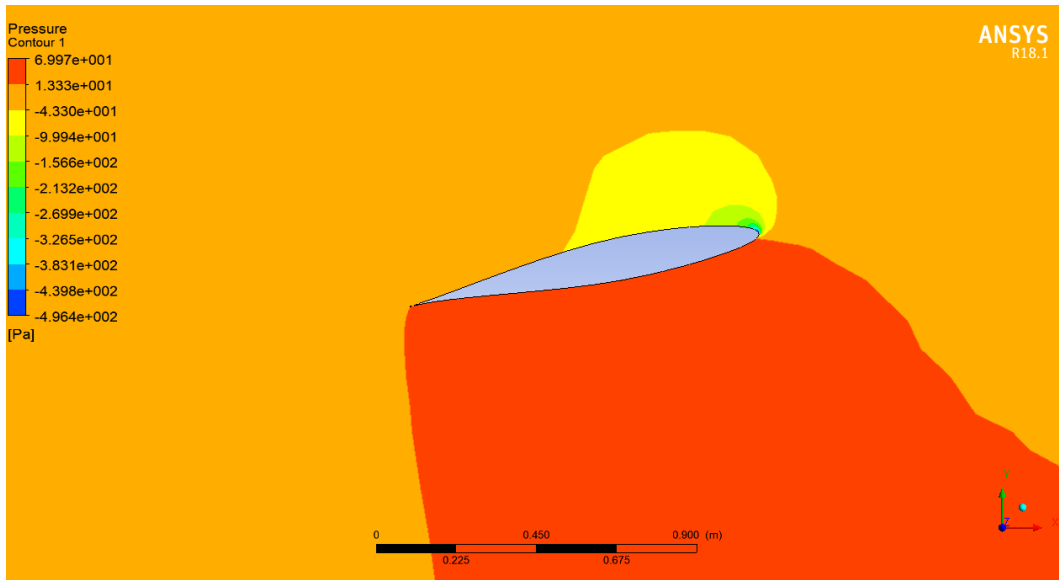
Gambar B. 10 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 4^\circ$



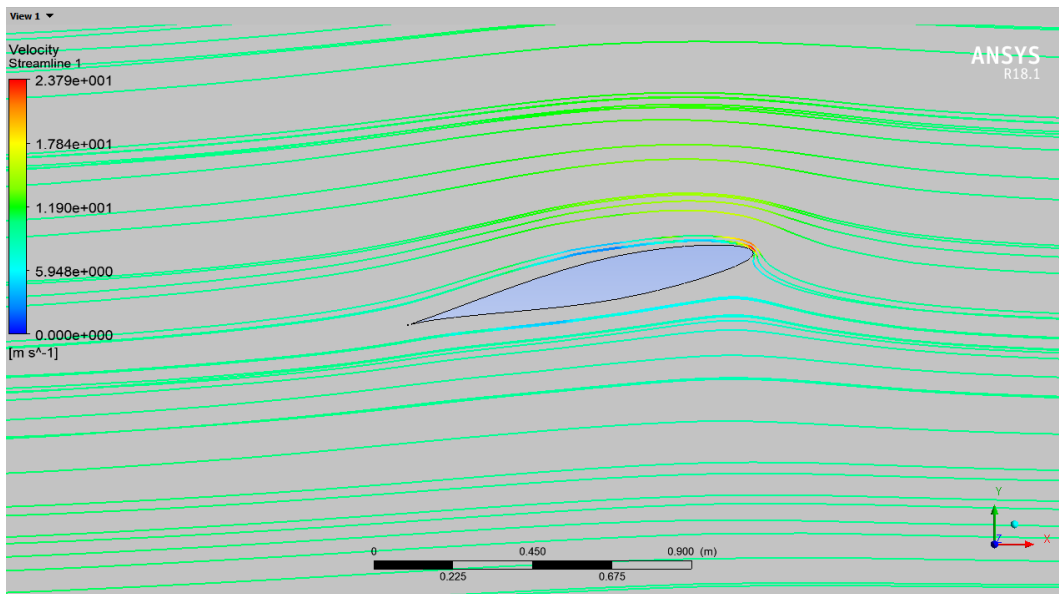
Gambar B. 11. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 8^\circ$



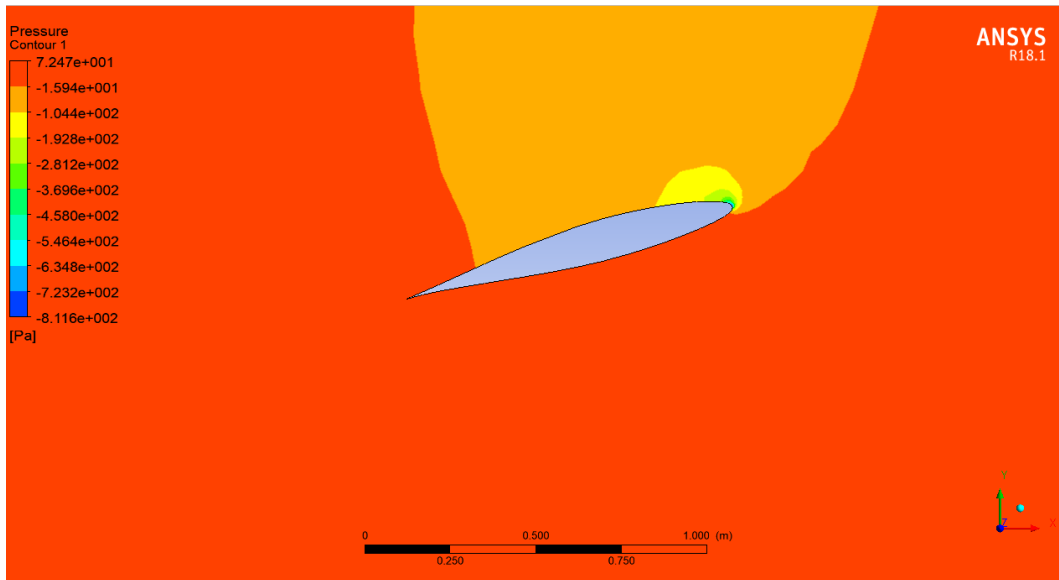
Gambar B. 12 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 8^\circ$



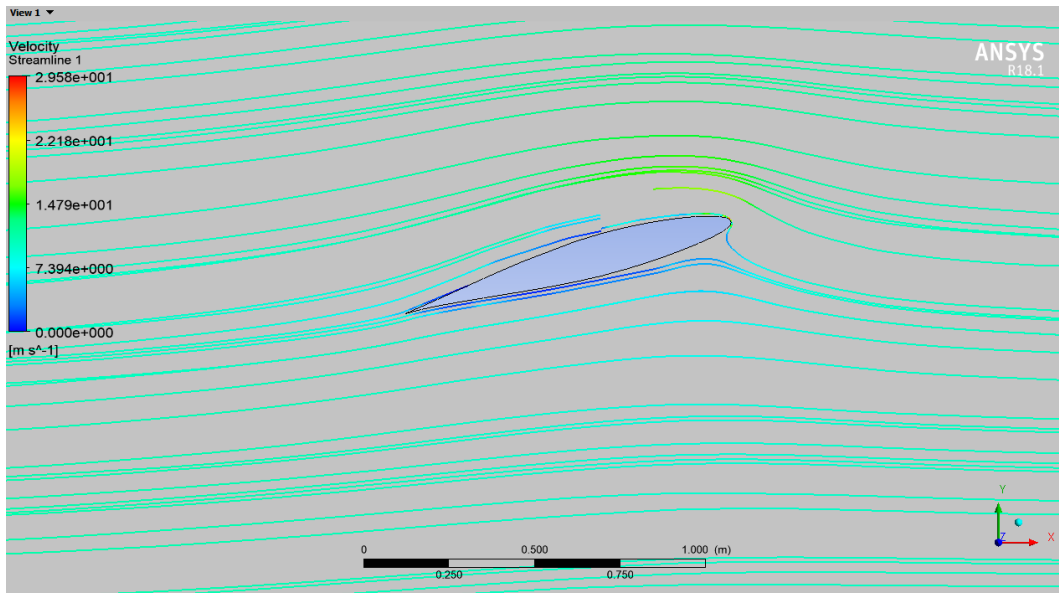
Gambar B. 13. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 12^\circ$



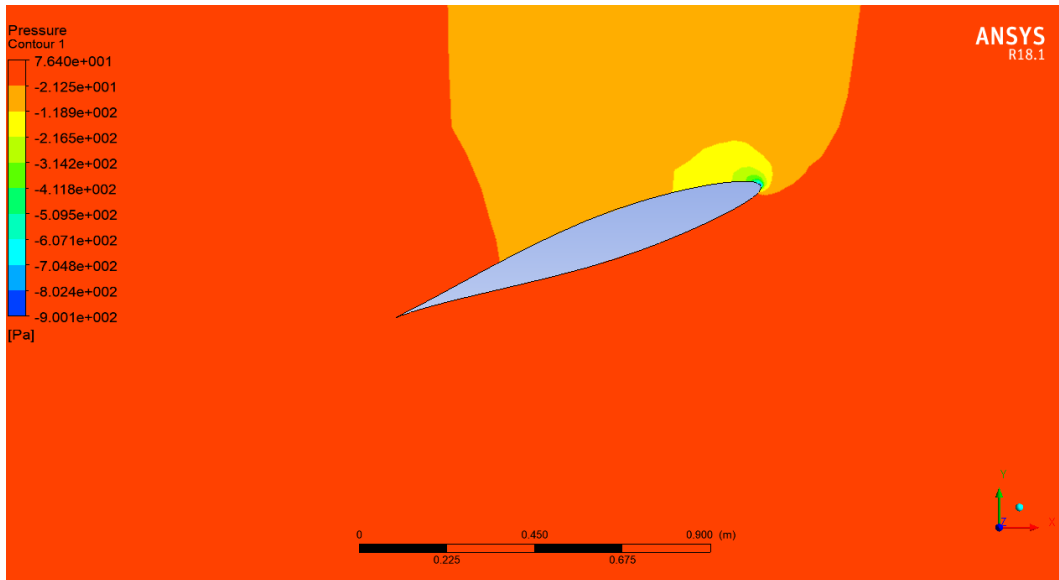
Gambar B. 14 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 12^\circ$



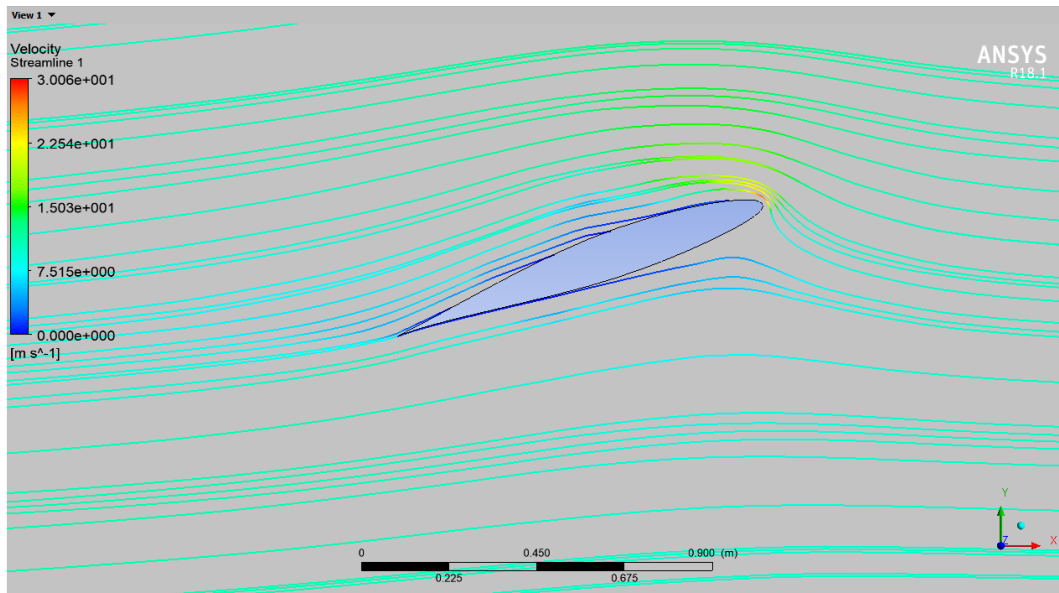
Gambar B. 15. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 16^\circ$



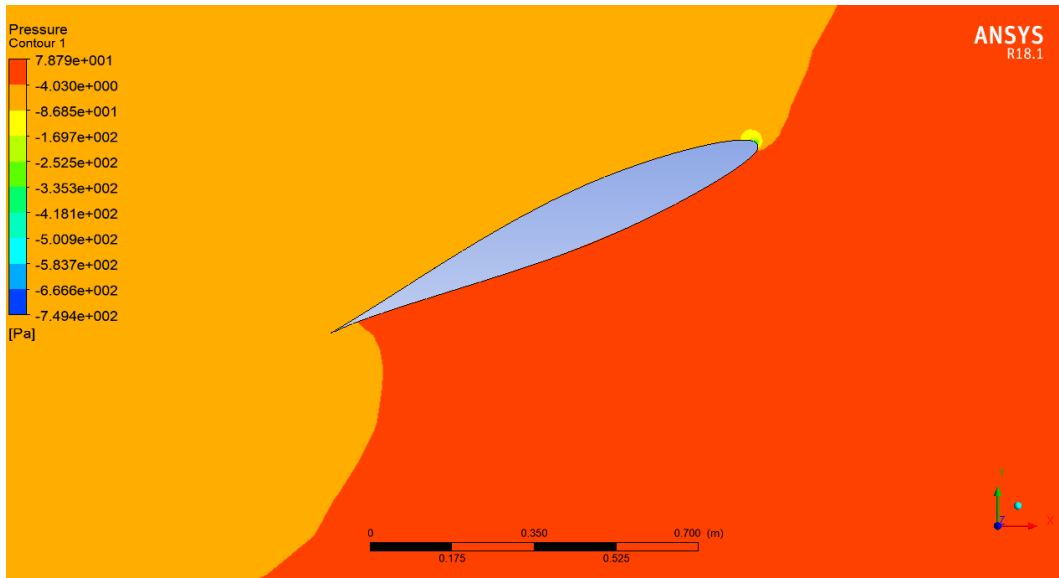
Gambar B. 16 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 16^\circ$



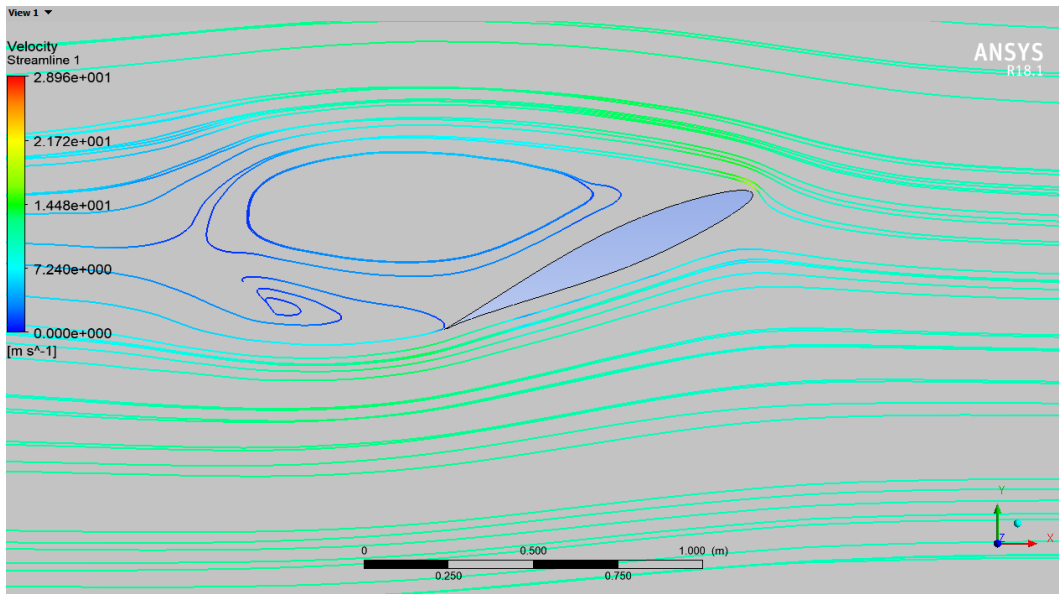
Gambar B. 17. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 20^\circ$



Gambar B. 18 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 20^\circ$

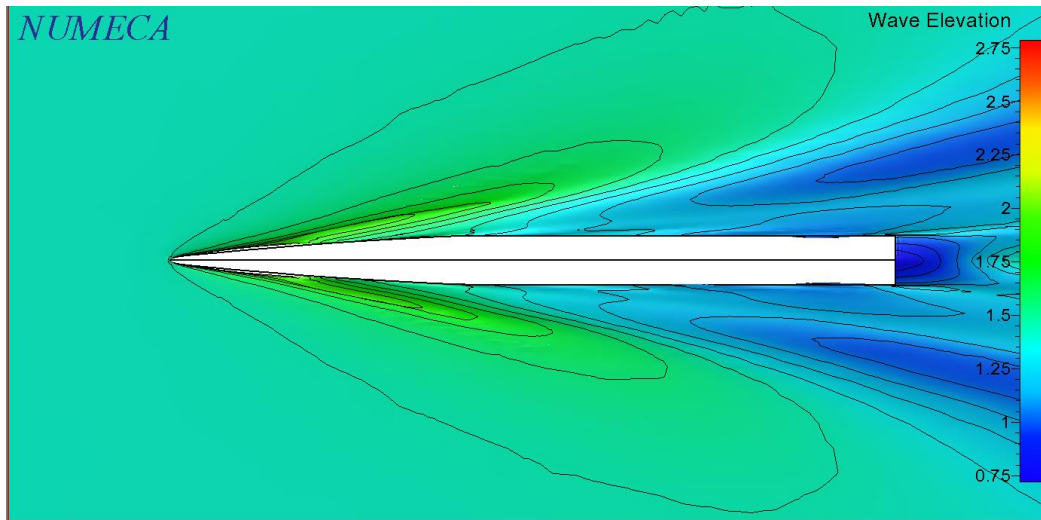


Gambar B. 19. Kontur tekanan foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 24^\circ$

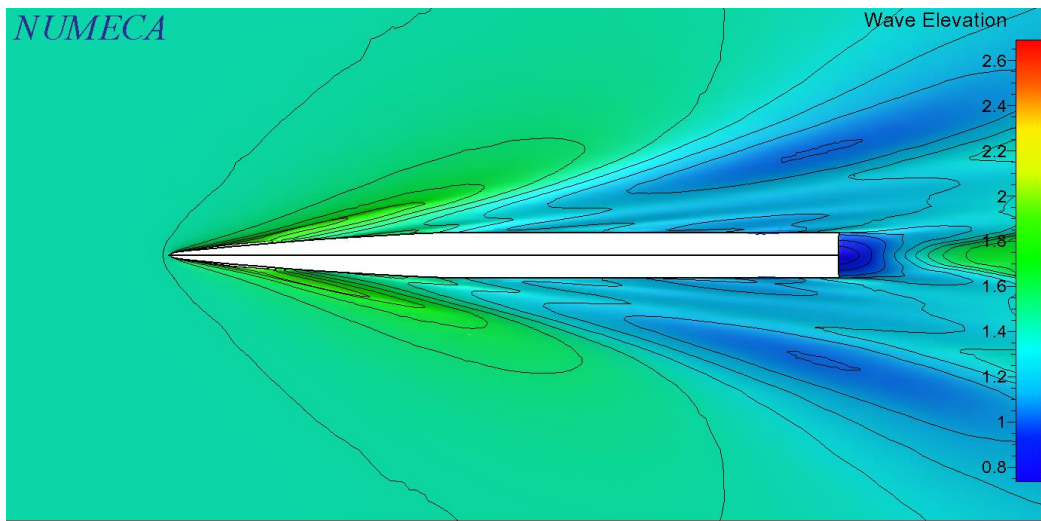


Gambar B. 20 *Streamline* foil NACA 64₁-212, $Re = 1 \times 10^7$, $\alpha = 24^\circ$

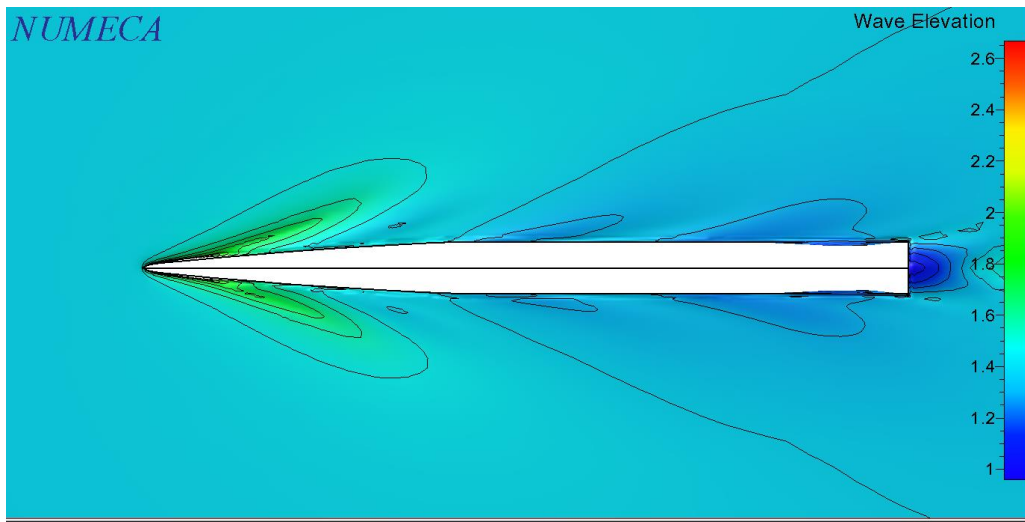
LAMPIRAN C



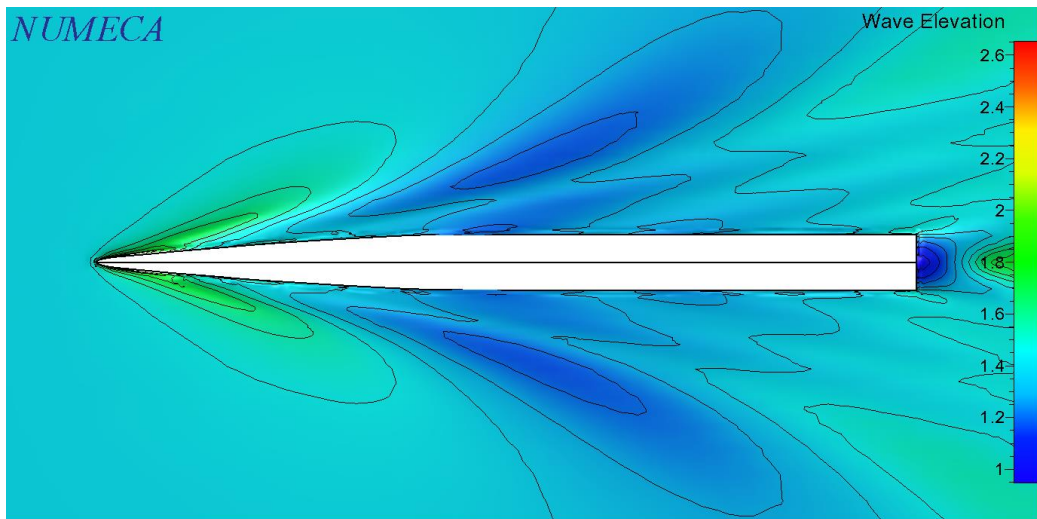
Gambar C. 1 Wave Elevation Lambung *Demihull*, $Fr = 0.3$



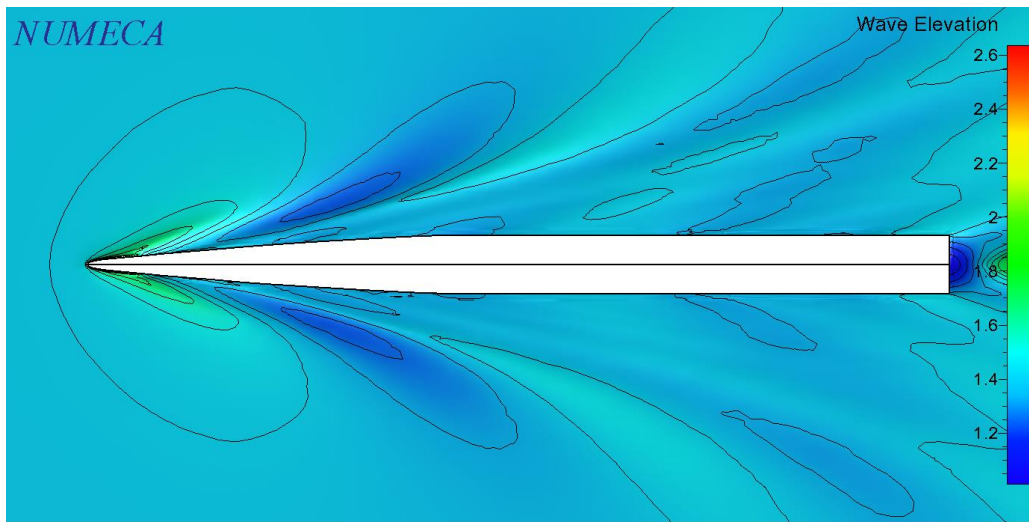
Gambar C. 2 Wave Elevation Lambung *Demihull*, $Fr = 0.4$



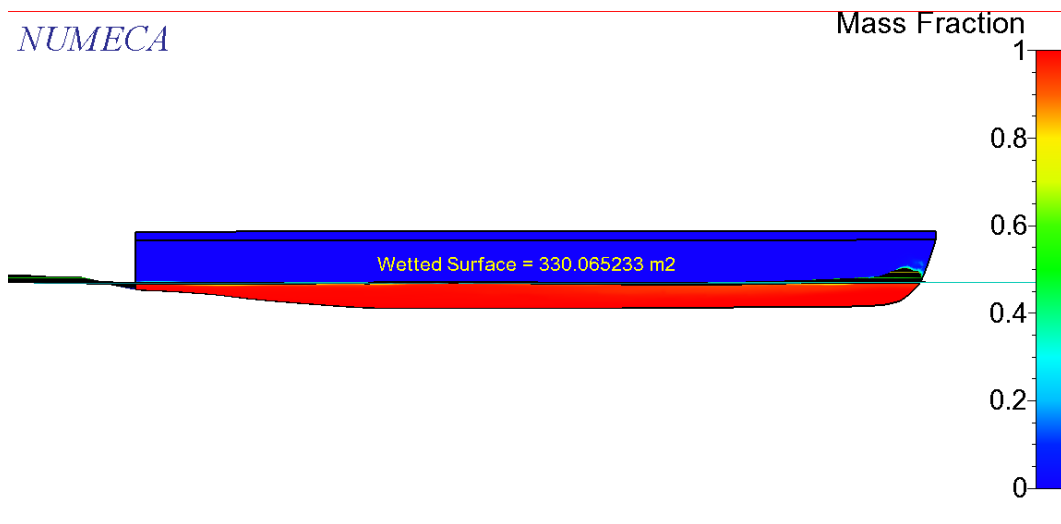
Gambar C. 3 Wave Eleveation Lambung *Demihull*, $Fr = 0.5$



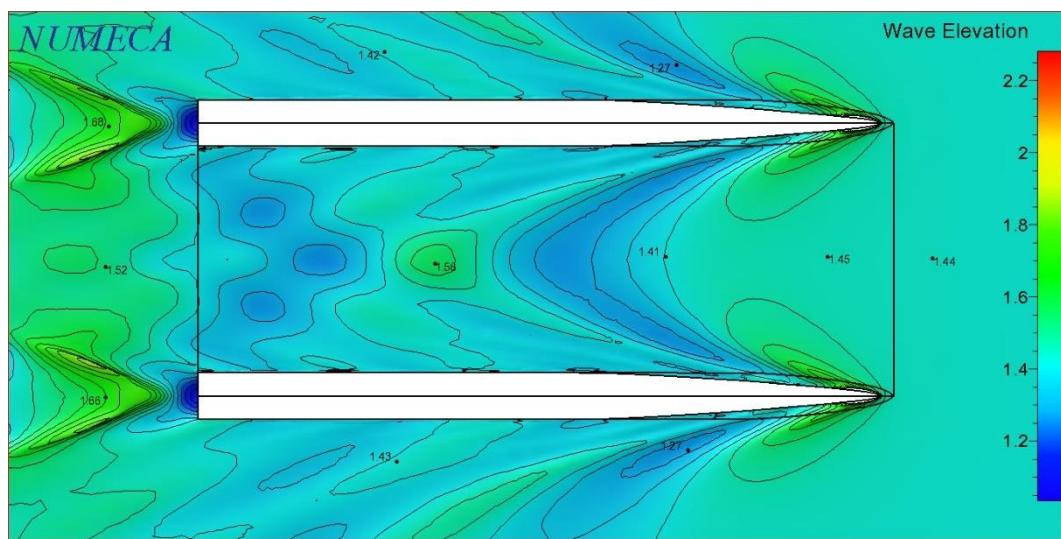
Gambar C. 4 Wave Eleveation Lambung *Demihull*, $Fr = 0.6$



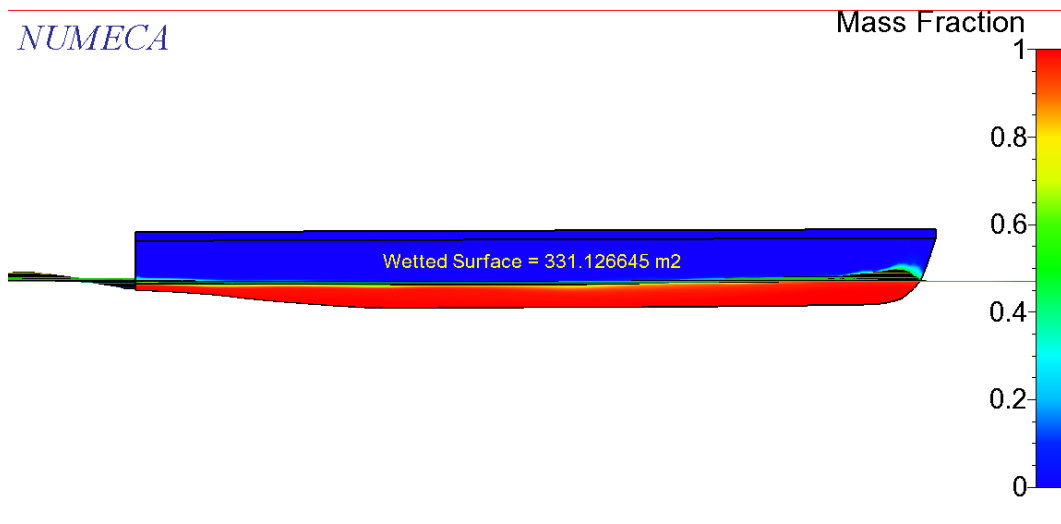
Gambar C. 5 Wave Elevation Lambung *Demihull*, $Fr = 0.7$



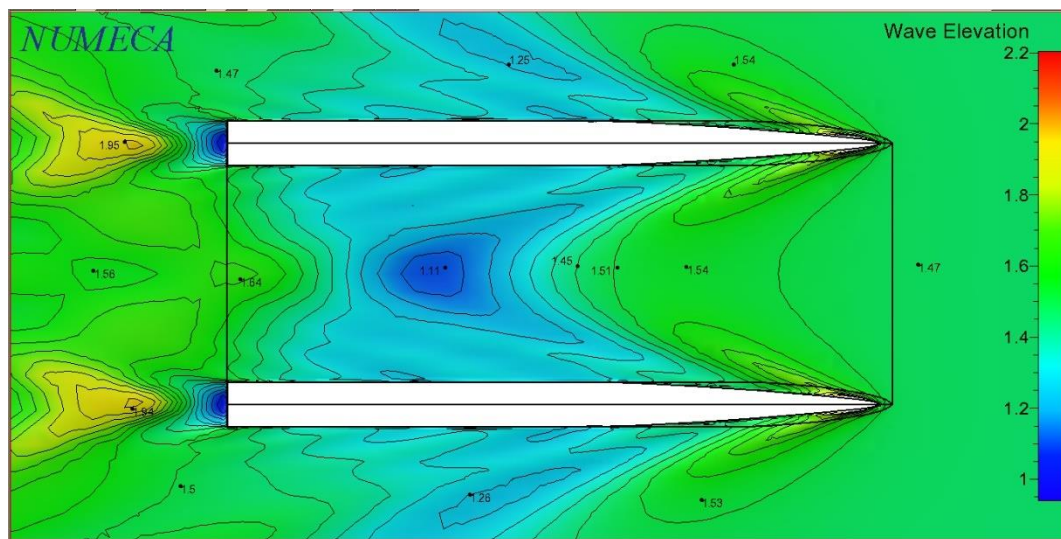
Gambar C. 6 WSA Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.3$



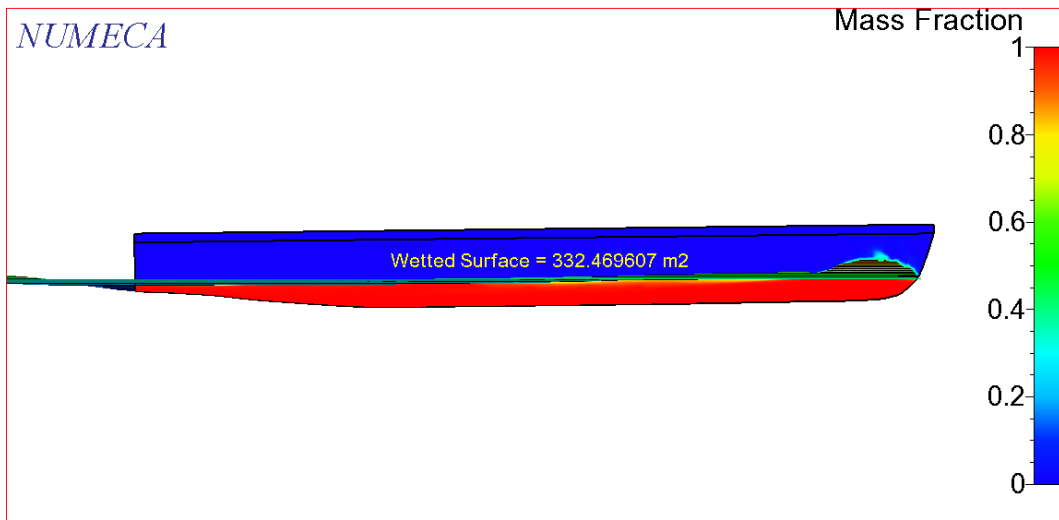
Gambar C. 7 Wave Eleveation Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.3$



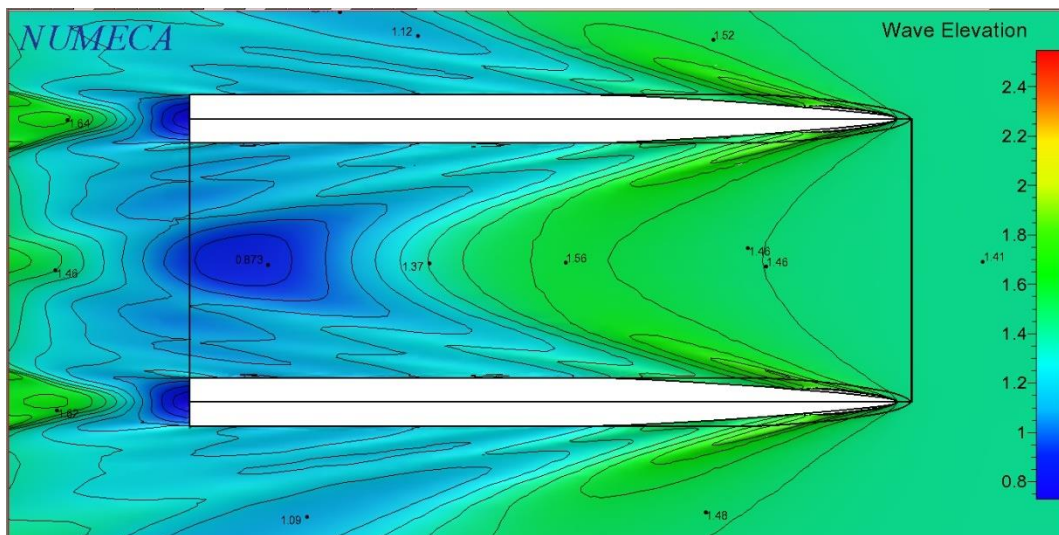
Gambar C. 8 WSA Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.4$



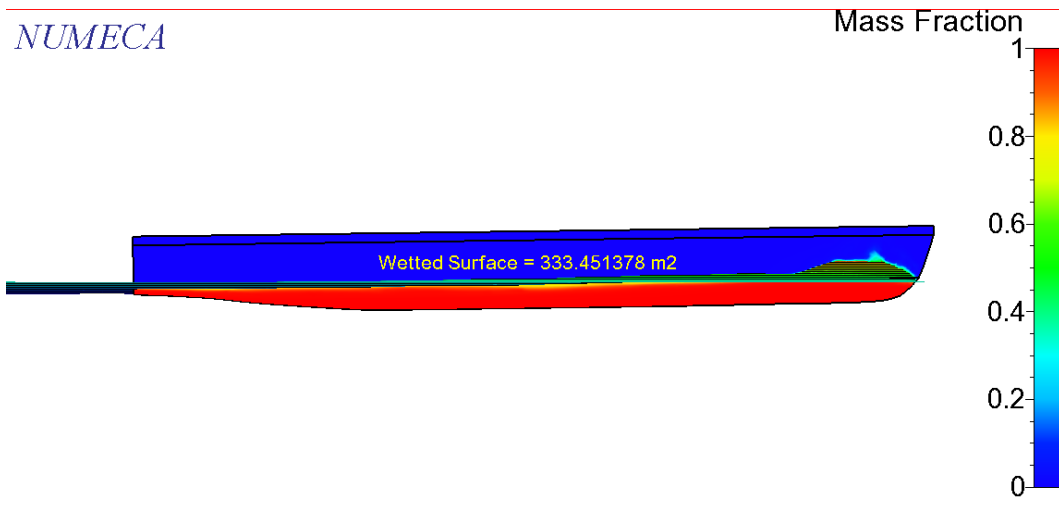
Gambar C. 9 Wave Elevation Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.4$



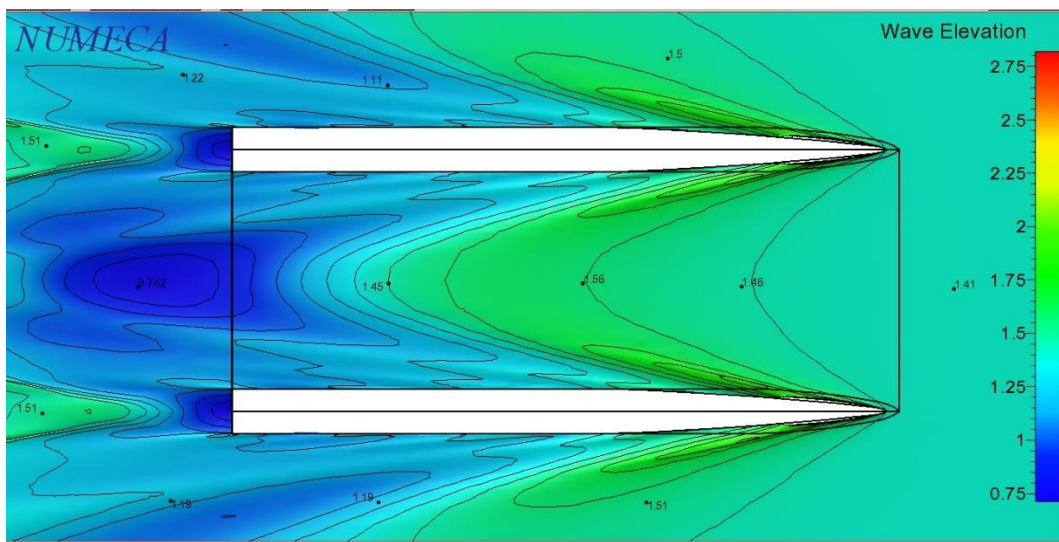
Gambar C. 10 WSA Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.5$



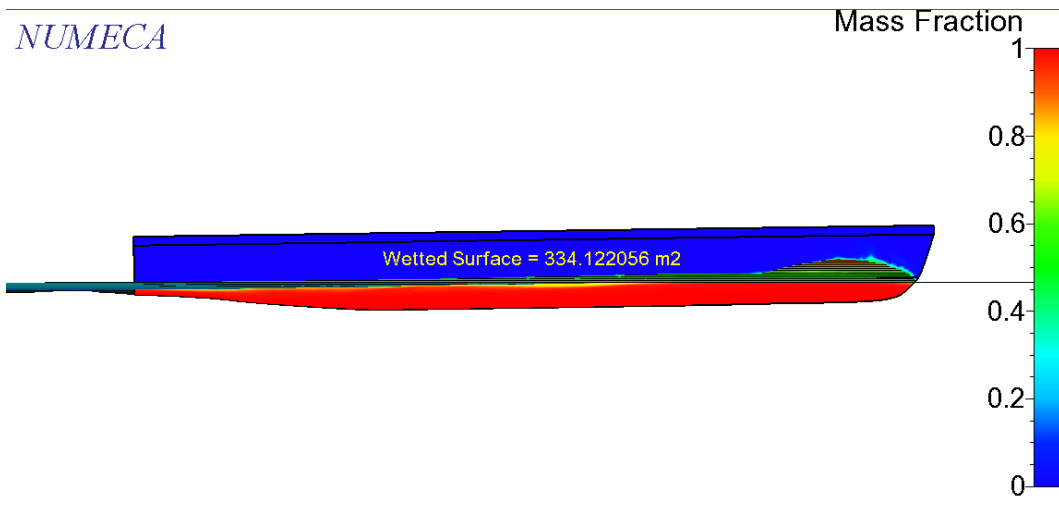
Gambar C. 11 Wave Elevation Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.5$



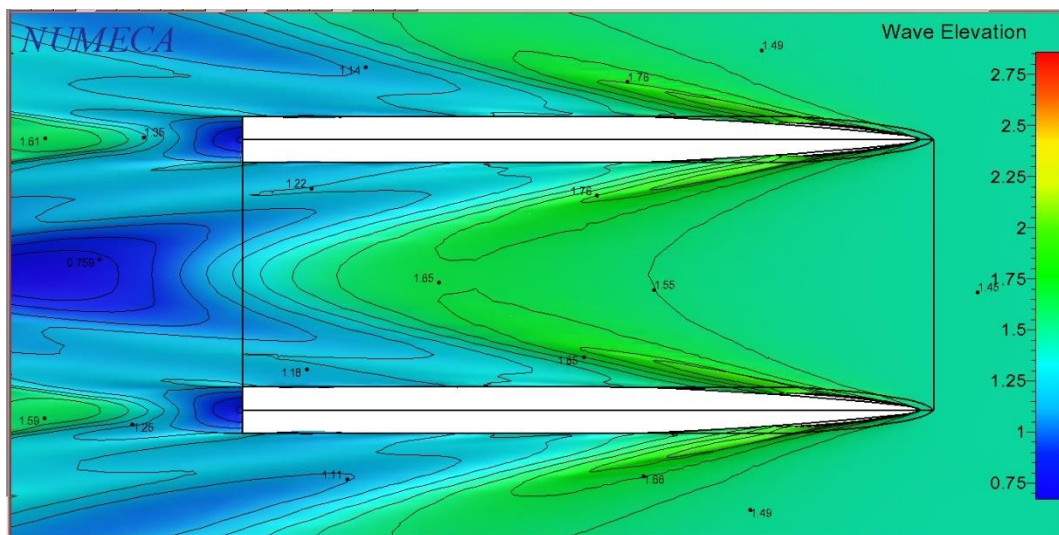
Gambar C. 12 WSA Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.6$



Gambar C. 13 Wave Elevation Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.6$



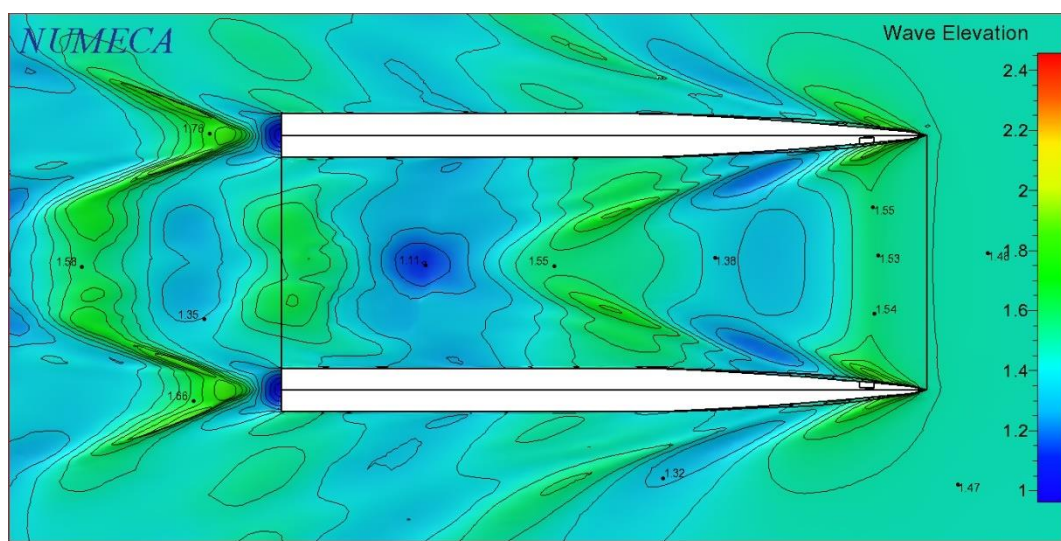
Gambar C. 14 WSA Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.7$



Gambar C. 15 Wave Elevation Kapal katamaran tanpa foil (K0), $Fr = 0.7$



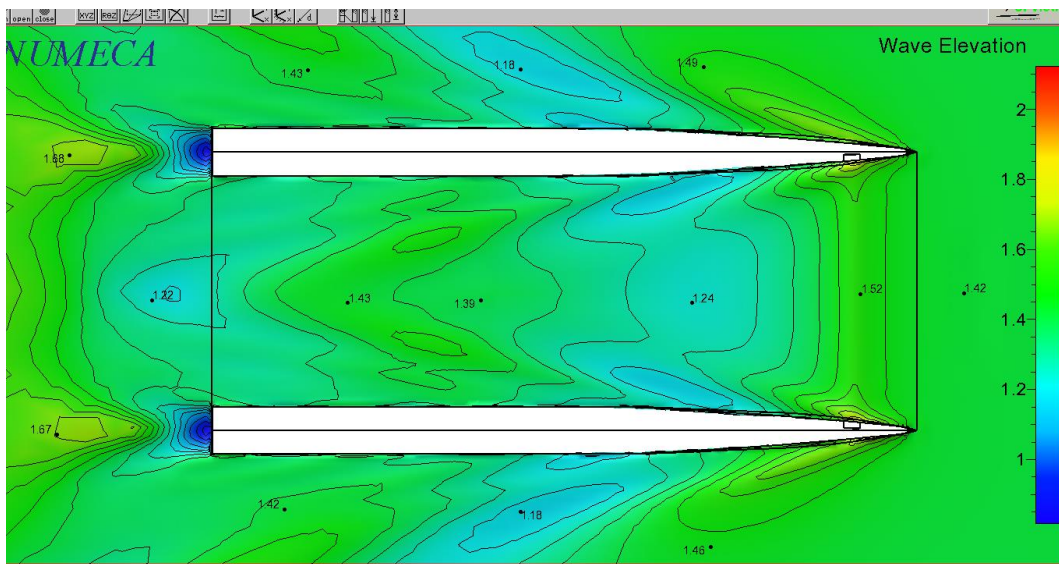
Gambar C. 16 WSA Kapal katamaran 1 foil (K1), $Fr = 0.3$



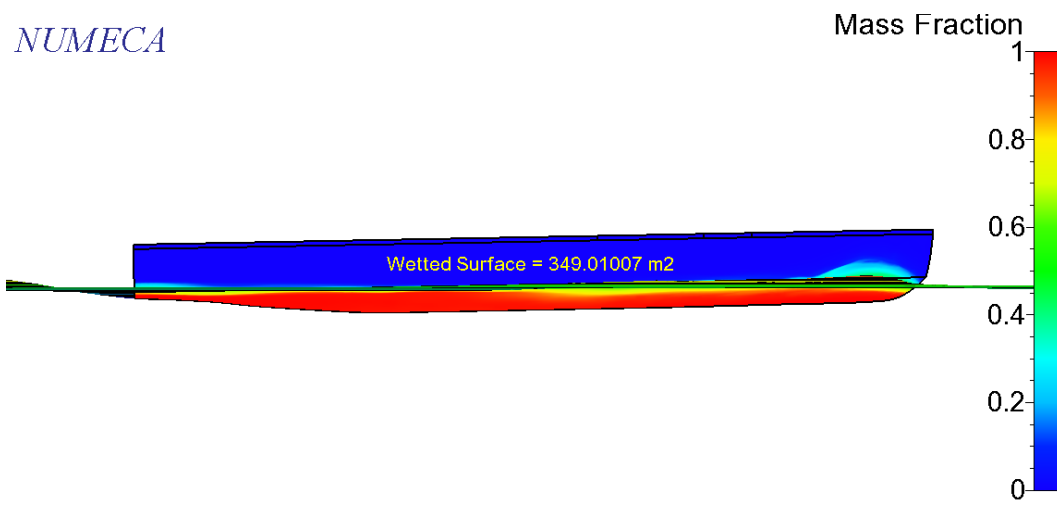
Gambar C. 17 Wave Elevation Kapal katamaran 1 foil (K1), $Fr = 0.3$



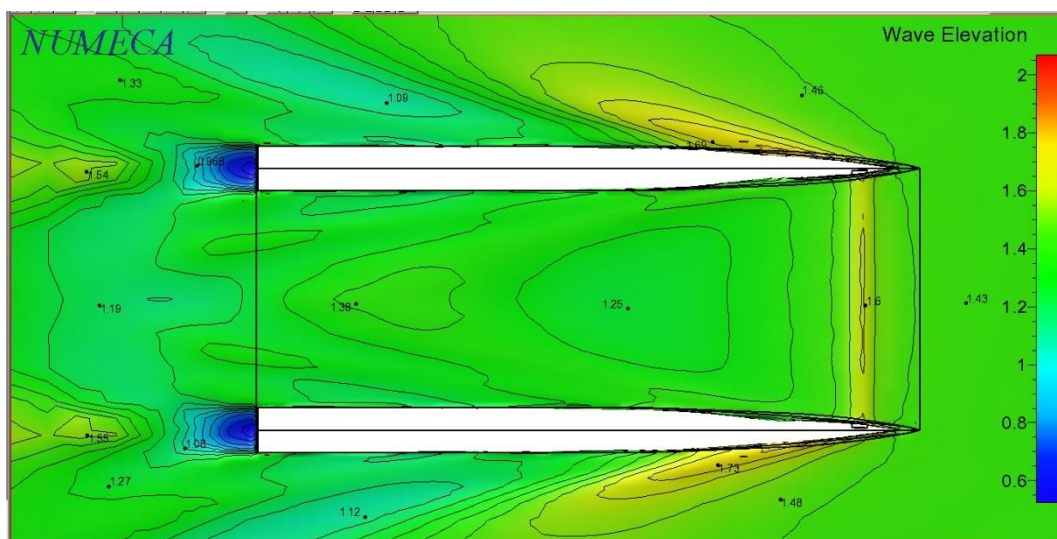
Gambar C. 18 WSA Kapal katamaran 1 foil (K1), $Fr = 0.4$



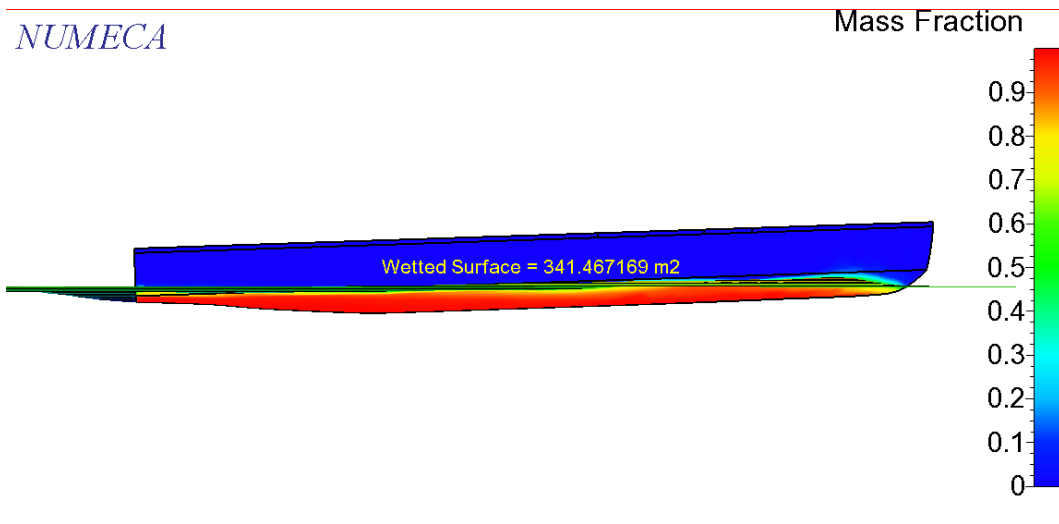
Gambar C. 19 Wave Elevation Kapal katamaran 1 foil (K1), $Fr = 0.4$



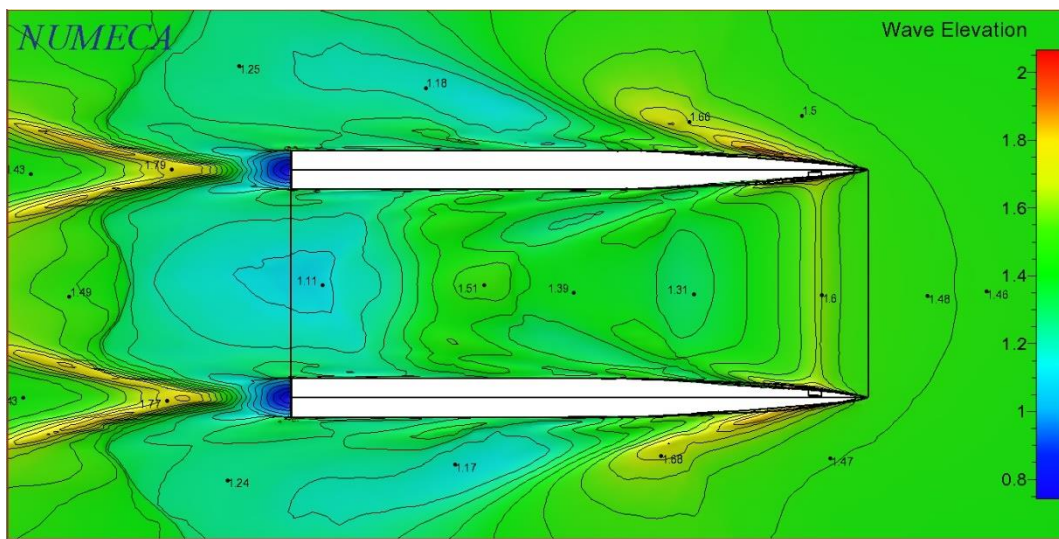
Gambar C. 20 WSA Kapal katamaran 1 foil (K1), $Fr = 0.5$



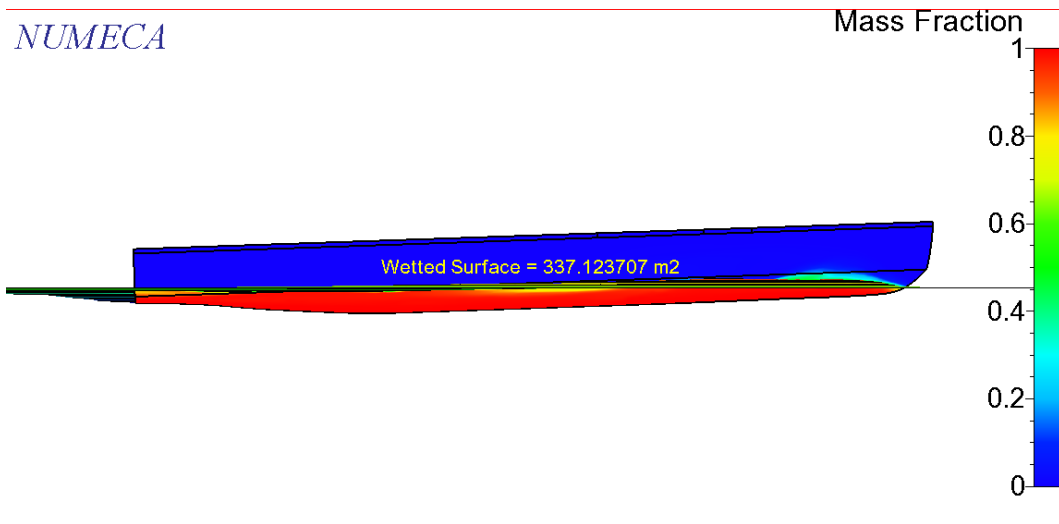
Gambar C. 21 Wave Elevation Kapal katamaran 1 foil (K1), $Fr = 0.5$



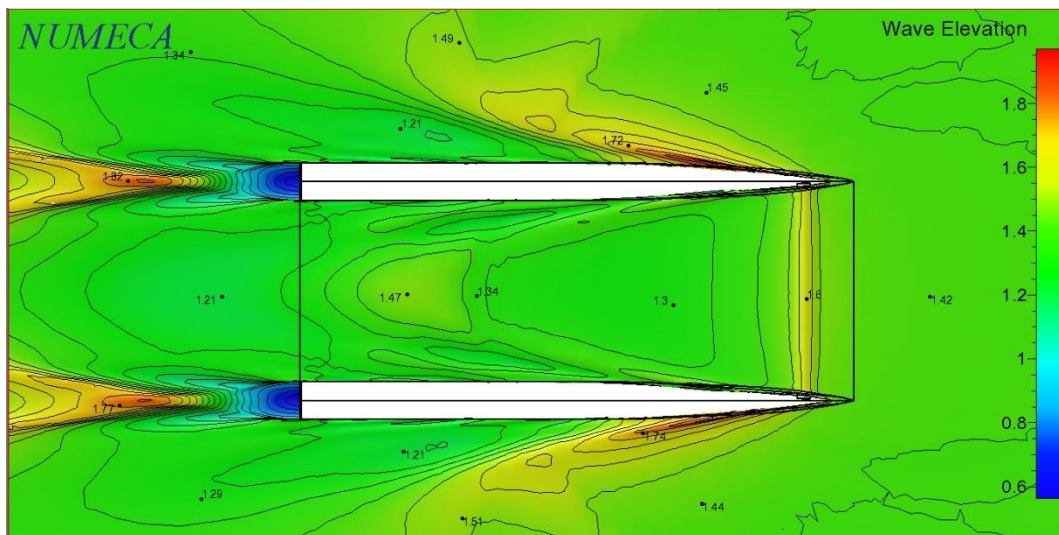
Gambar C. 22 WSA Kapal katamaran 1 foil (K1), Fr = 0.6



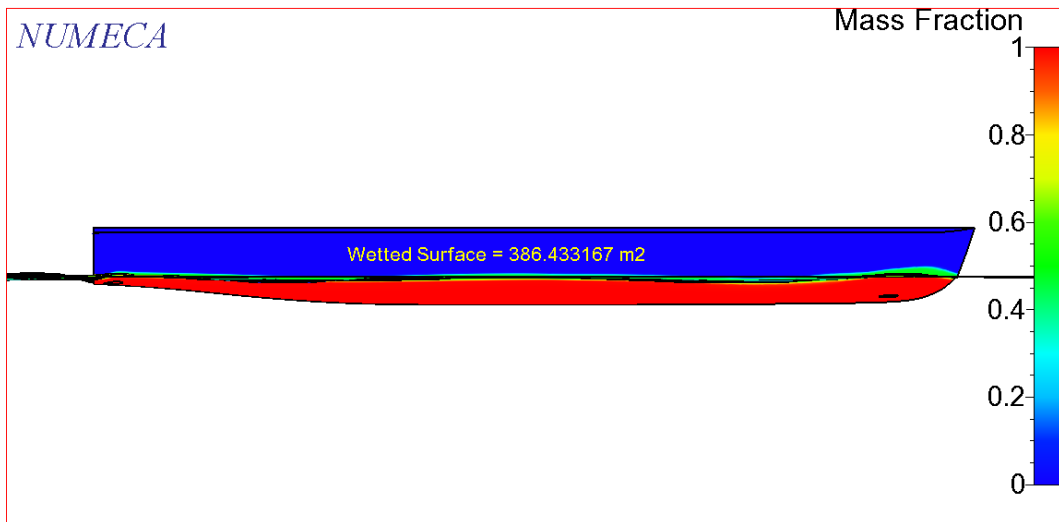
Gambar C. 23 Wave Elevation Kapal katamaran 1 foil (K1), Fr = 0.6



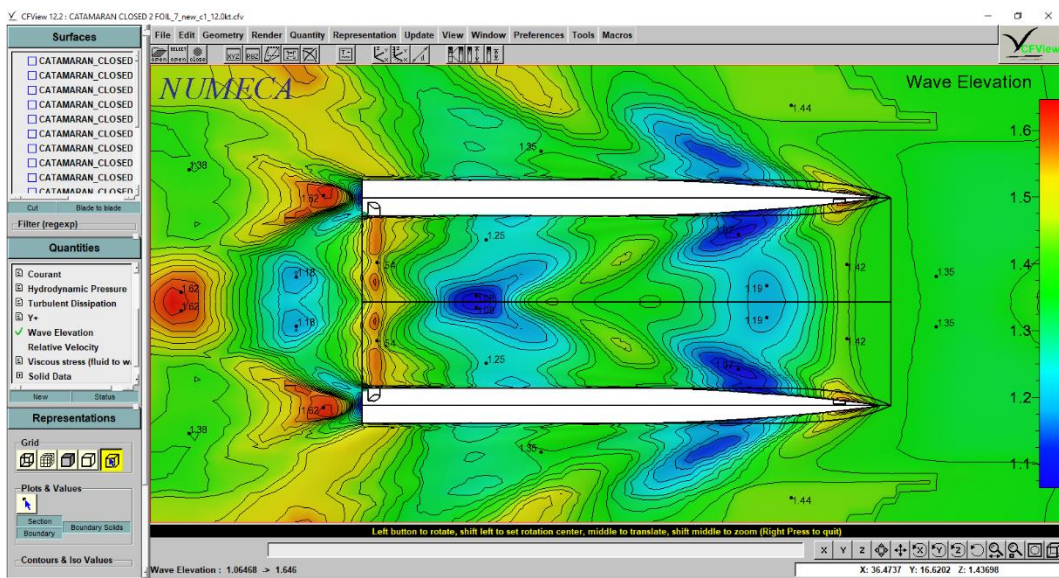
Gambar C. 24 WSA Kapal katamaran 1 foil (K1), Fr = 0.7



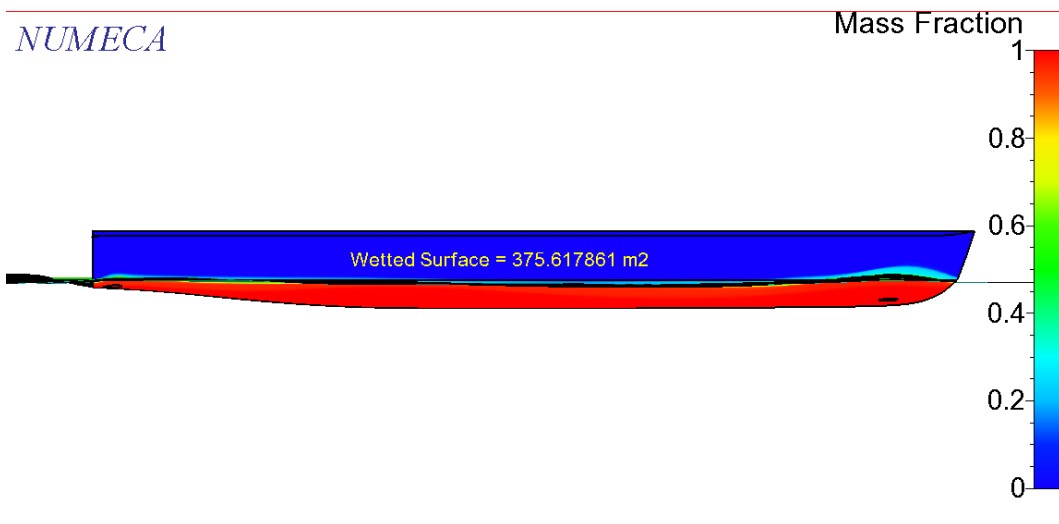
Gambar C. 25 Wave Elevation Kapal katamaran 1 foil (K1), Fr = 0.7



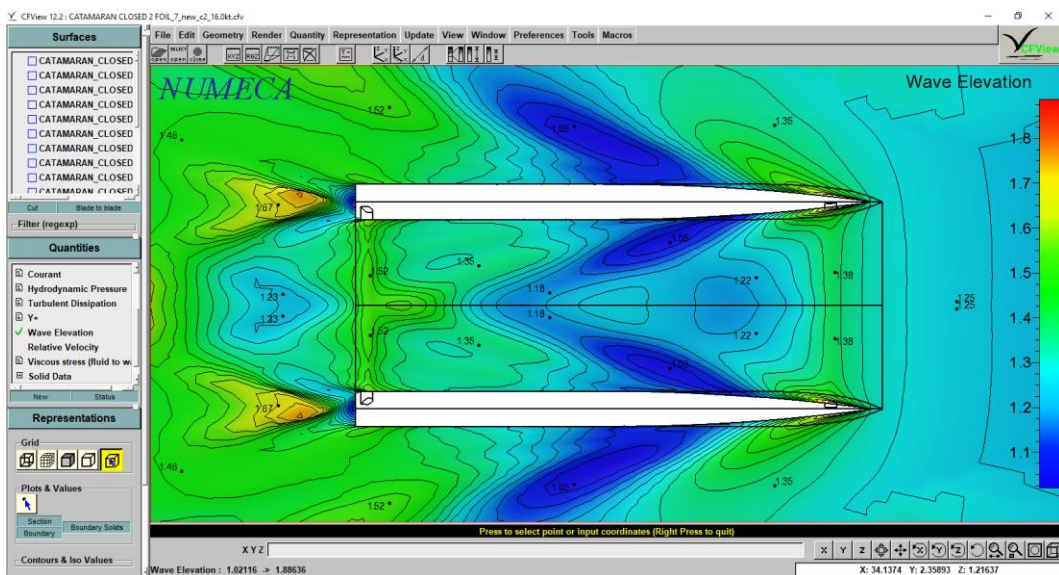
Gambar C. 26 WSA Kapal katamaran 2 foil (K2), $Fr = 0.3$



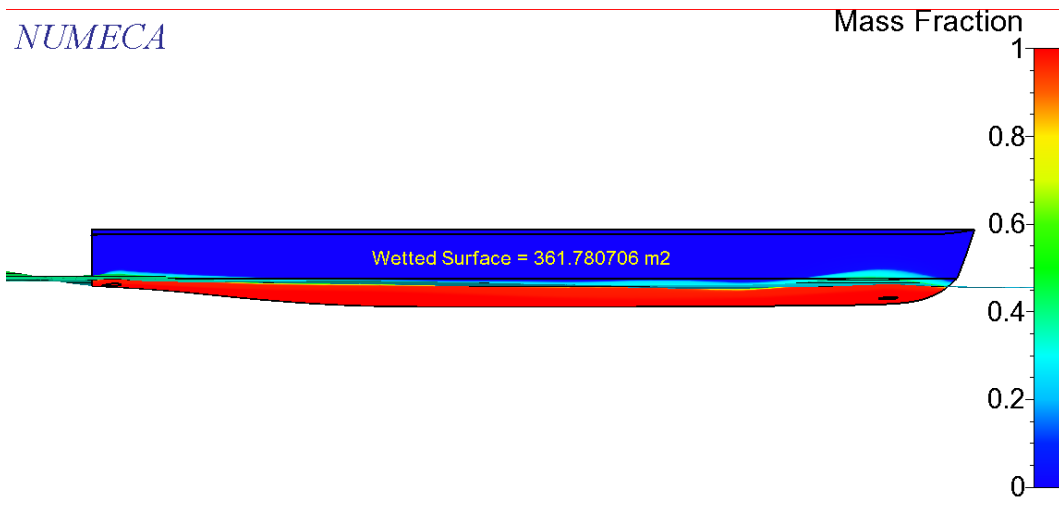
Gambar C. 27 Wave Elevation Kapal katamaran 2 foil (K2), $Fr = 0.3$



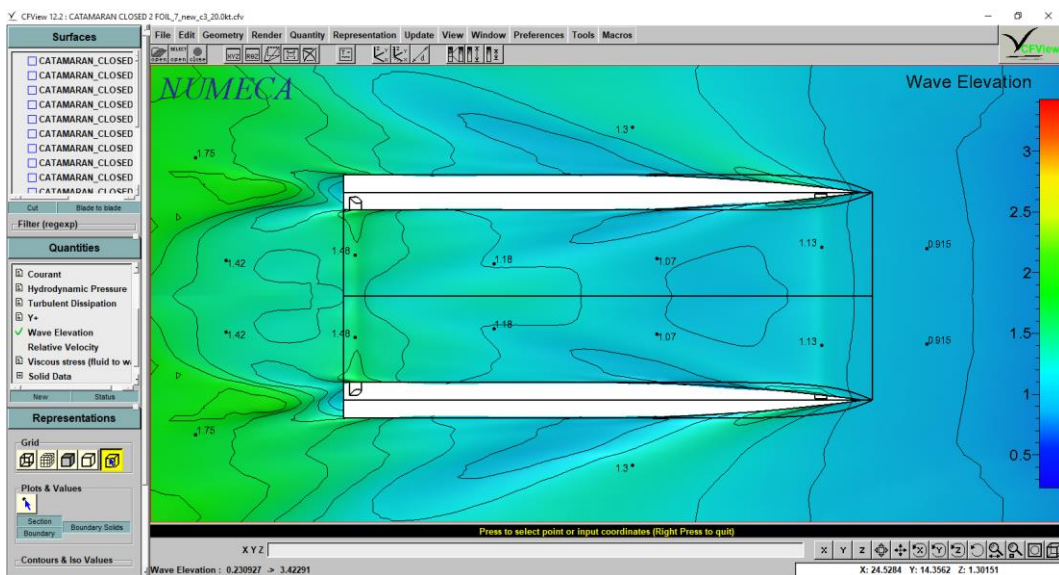
Gambar C. 28 WSA Kapal katamaran 2 foil (K2), $Fr = 0.4$



Gambar C. 29 Wave Elevation Kapal katamaran 2 foil (K2), $Fr = 0.4$

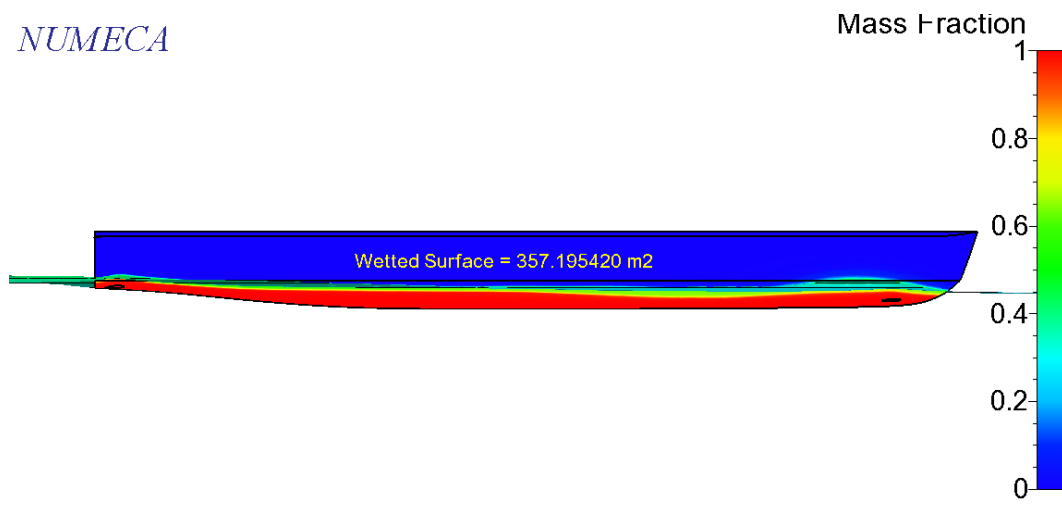


Gambar C. 30 WSA Kapal katamaran 2 foil (K2), $Fr = 0.5$

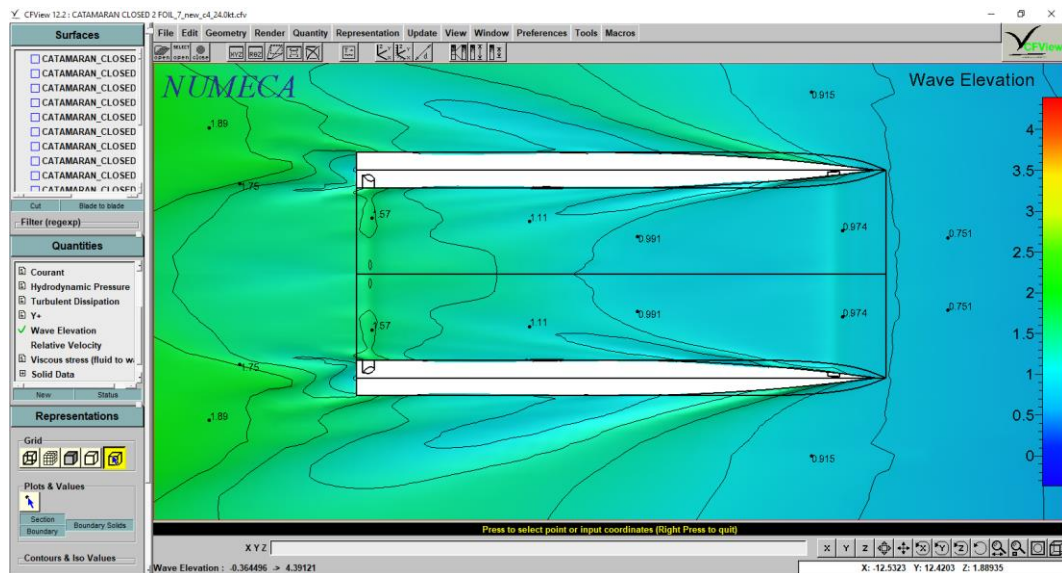


Gambar C. 31 Wave Elevation Kapal katamaran 2 foil (K2), $Fr = 0.5$

NUMECA

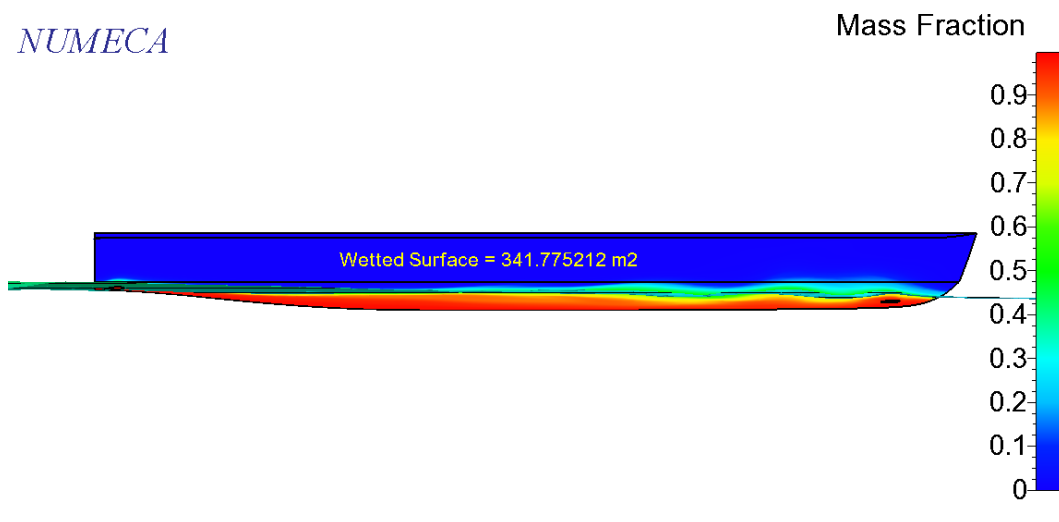


Gambar C. 32 WSA Kapal katamaran 2 foil (K2), Fr = 0.6

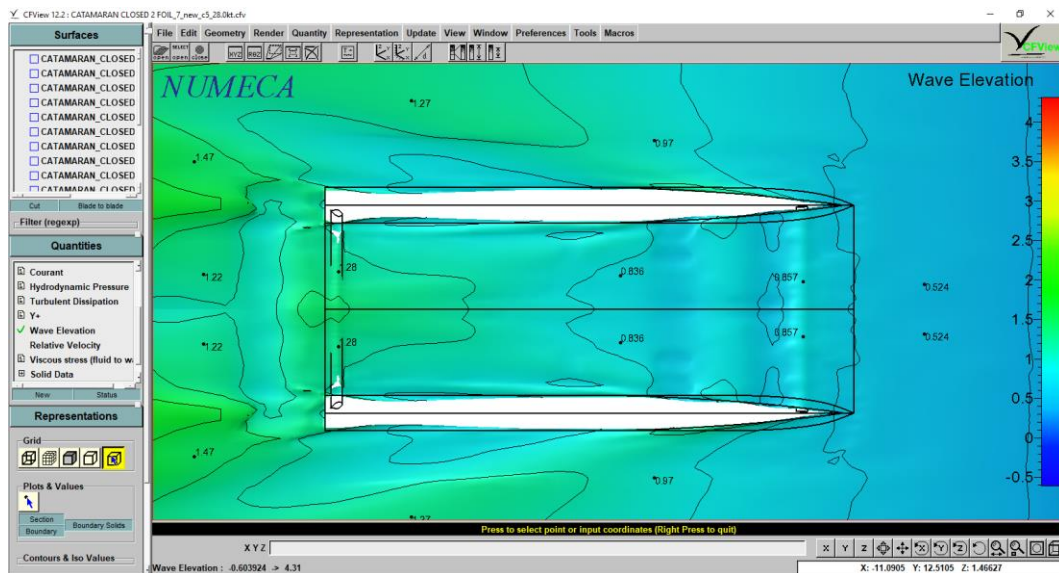


Gambar C. 33 Wave Elevation Kapal katamaran 2 foil (K2), Fr = 0.6

NUMECA



Gambar C. 34 WSA Kapal katamaran 2 foil (K2), $Fr = 0.7$



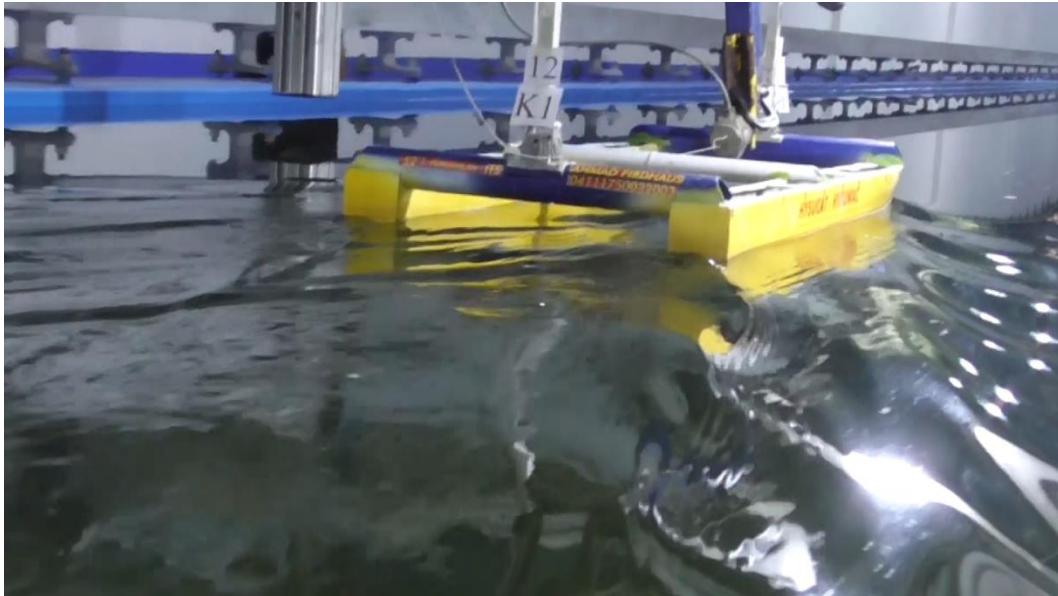
Gambar C. 35 Wave Elevation Kapal katamaran 2 foil (K2), $Fr = 0.7$

LAMPIRAN D

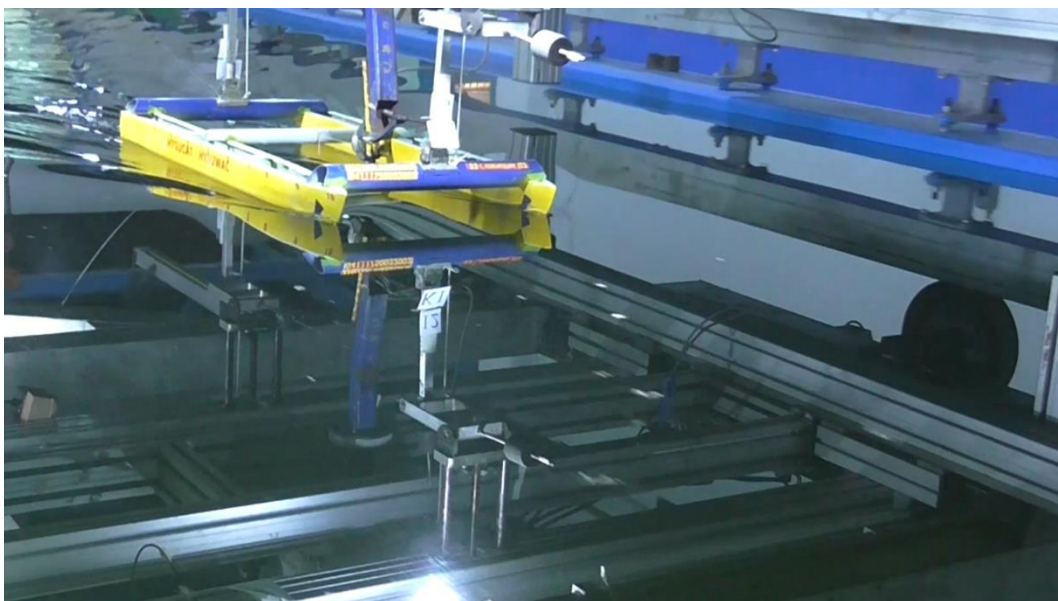
Lampiran visualisasi pengujian hambatan kapal tanpa foil dan dengan penambahan foil di *towing tank* Laboratorium Hydrodinamika, FTK, ITS, Surabaya

D.1. Kondisi 1, kapal katamaran tanpa foil (K0)

D.1.1. Kapal katamaran tanpa foil dengan kondisi kecepatan skala penuh 12 Knot, *Froude number* 0.3, dan kecepatan model 0.8730 m/s

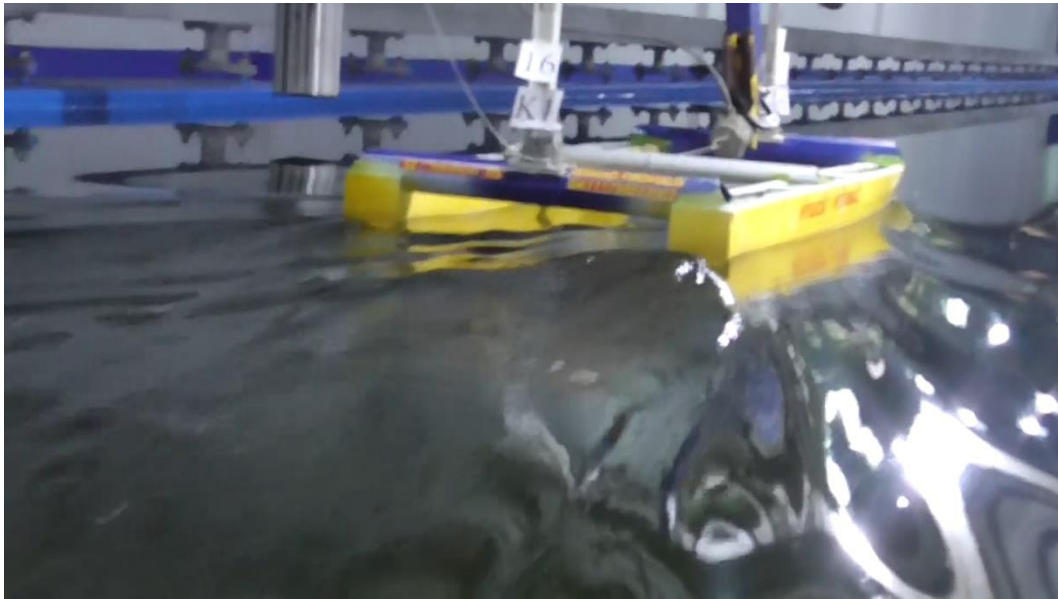


Gambar D.1 1 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

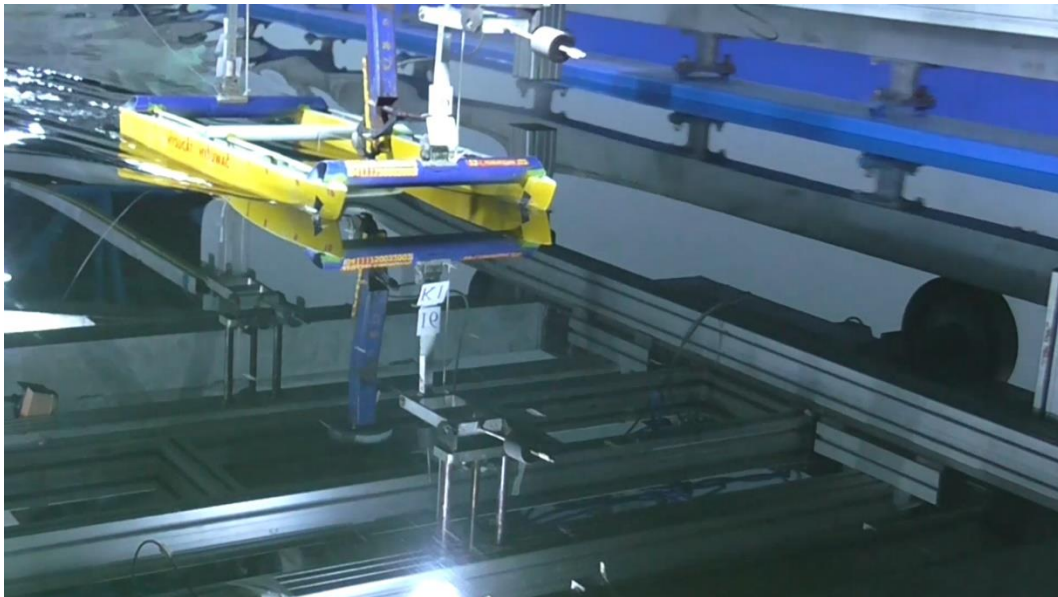


Gambar D.1 2 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.1.2. Kapal katamaran tanpa foil dengan kondisi kecepatan skala penuh 16 Knot, *Froude number* 0.4, dan kecepatan model 1.16 m/s



Gambar D.1 3 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

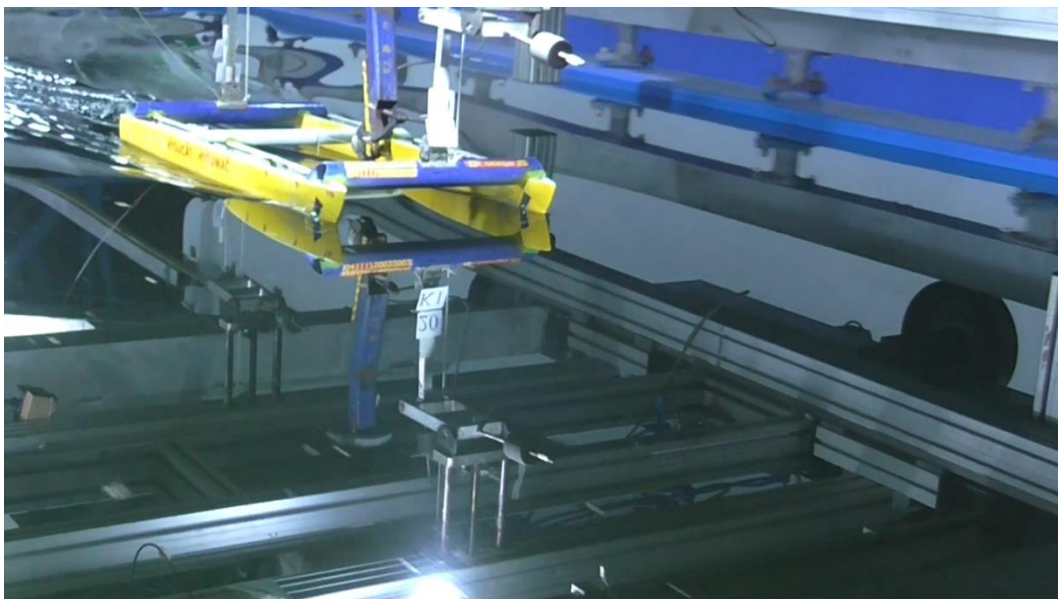


Gambar D.1 4 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.1.3. Kapal katamaran tanpa foil dengan kondisi kecepatan skala penuh 20 Knot, *Froude number* 0.5, dan kecepatan model 1.45 m/s

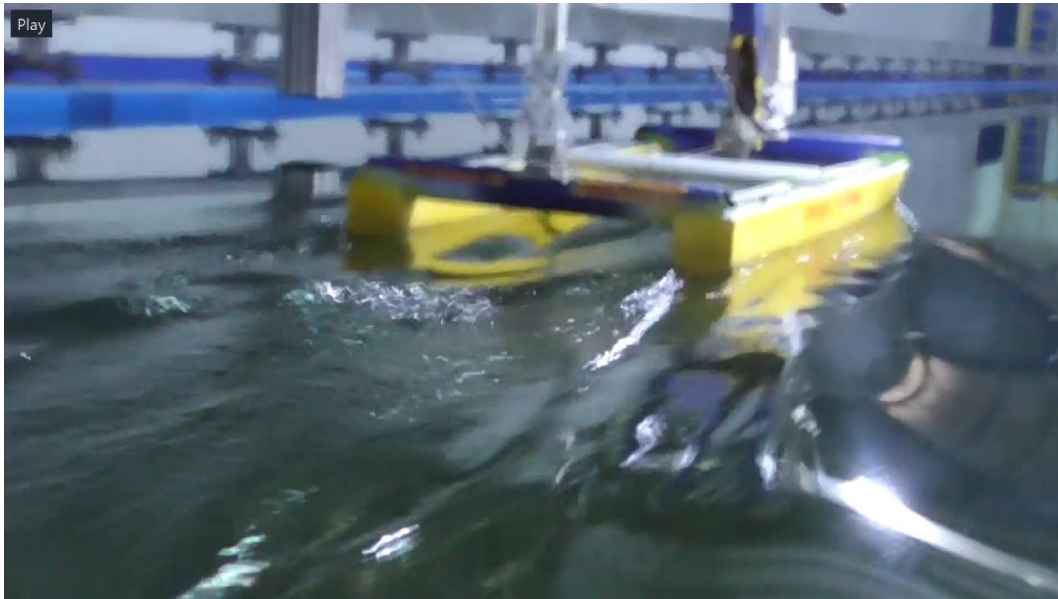


Gambar D.1 5 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

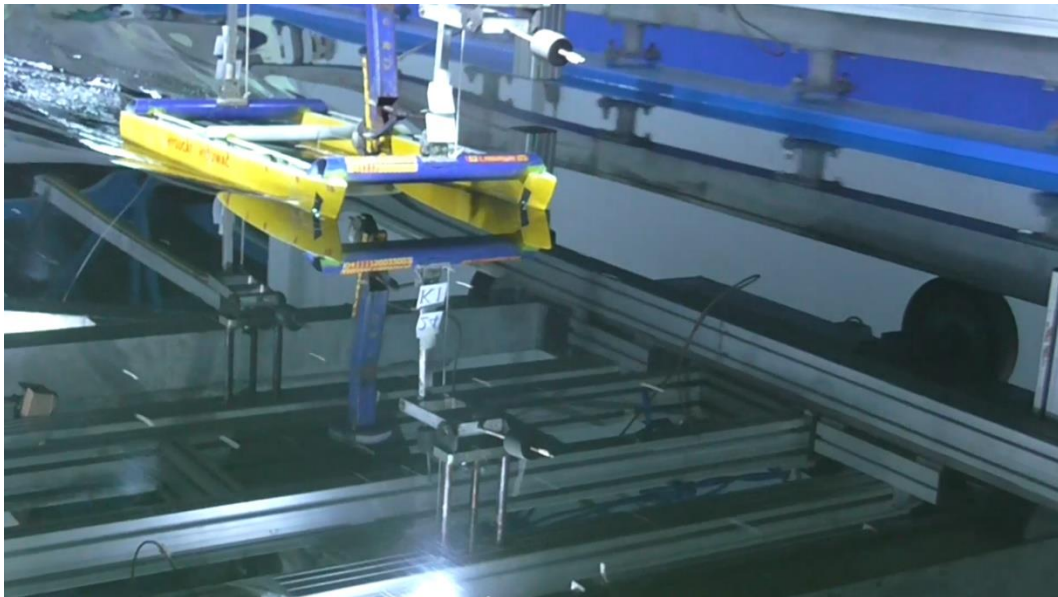


Gambar D.1 6 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.1.4. Kapal katamaran tanpa foil dengan kondisi kecepatan skala penuh 24 Knot, *Froude number* 0.6, dan kecepatan model 1.75 m/s

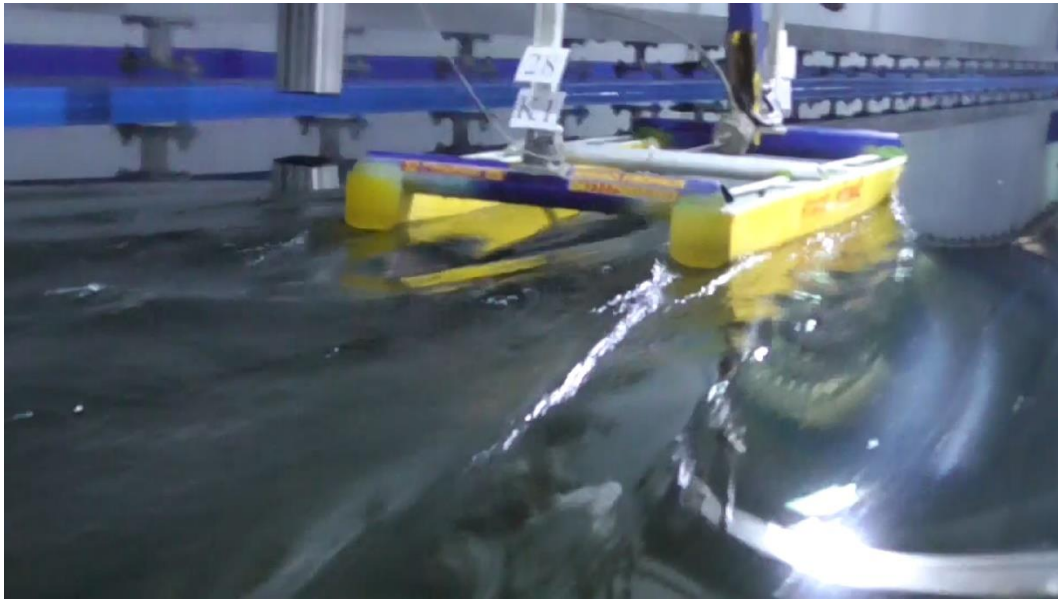


Gambar D.1 7 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

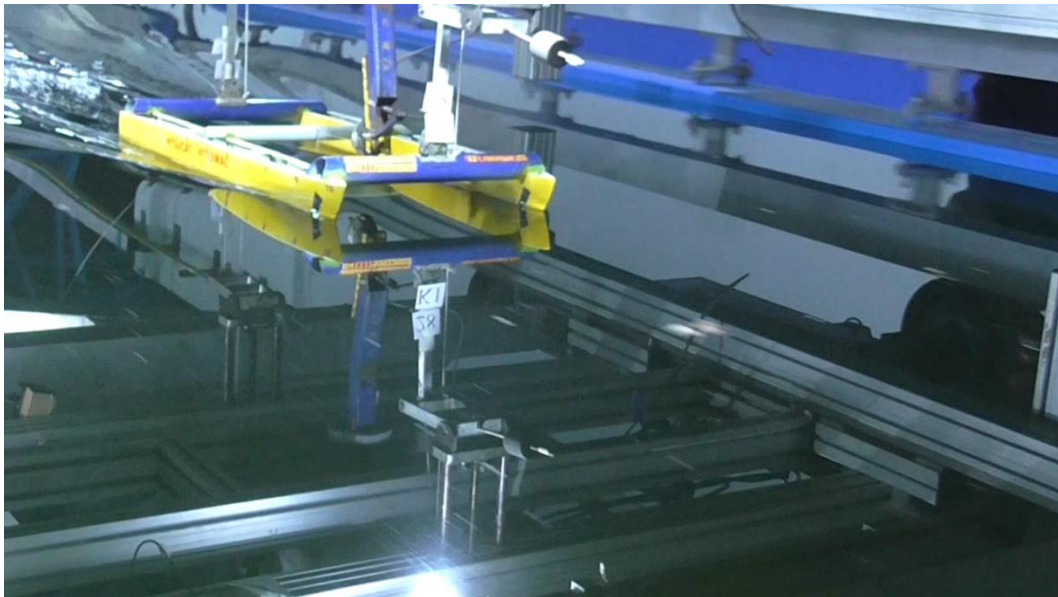


Gambar D.1 8 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.1.5. Kapal katamaran tanpa foil dengan kondisi kecepatan skala penuh 28 Knot, *Froude number* 0.7, dan kecepatan model 2.03 m/s



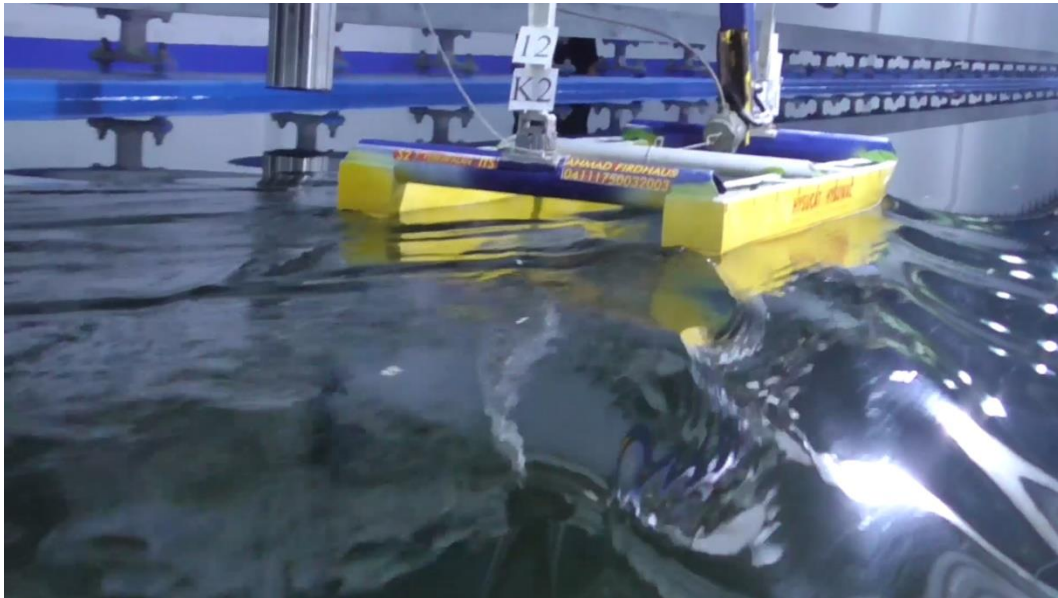
Gambar D.1 9 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)



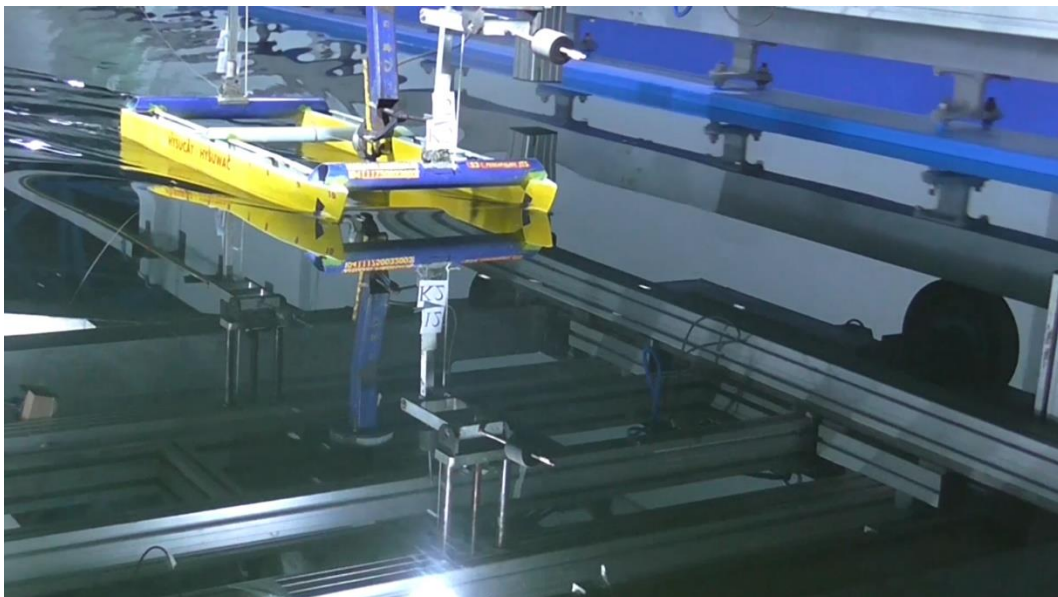
Gambar D.1 10 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

**D.2. Kondisi 2, kapal katamaran dengan penambahan 1 foil di bagian haluan
(K1)**

D.2.1. Uji model Kondisi 2 dengan kecepatan skala penuh 12 Knot, *Froude number* 0.3, dan kecepatan model 0.8730 m/s

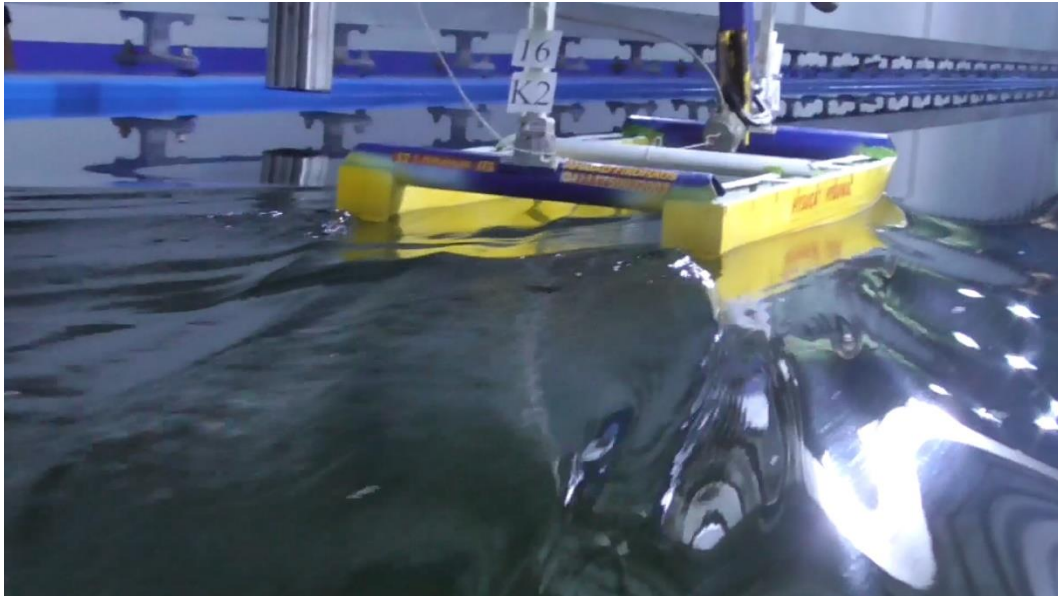


Gambar D.2 1 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

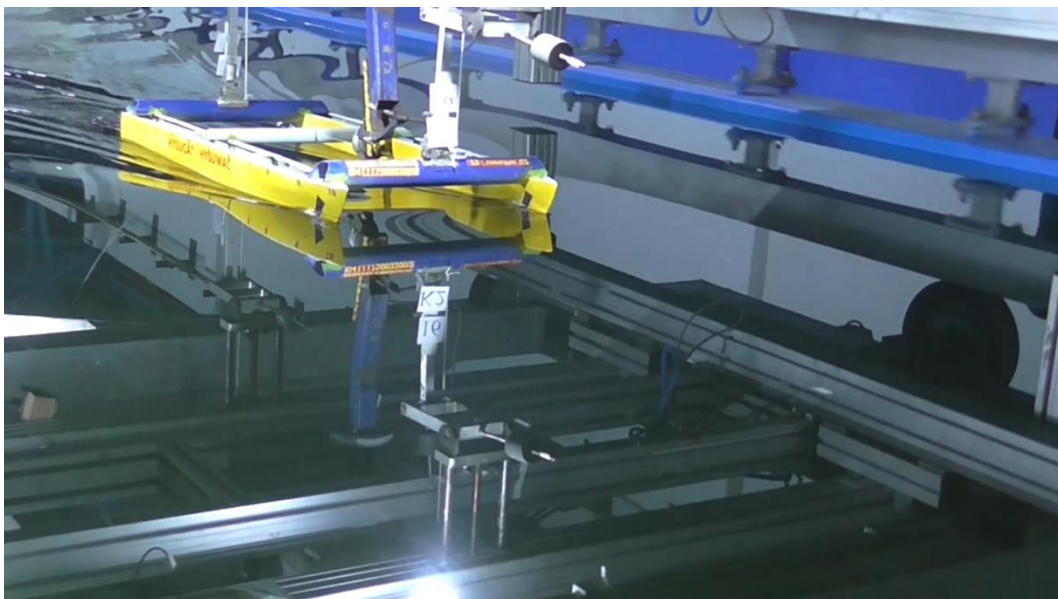


Gambar D.2 2 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.2.2. Uji model Kondisi 2 dengan kecepatan skala penuh 16 Knot, *Froude number* 0.4, dan kecepatan model 1.16 m/s



Gambar D.2 3 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

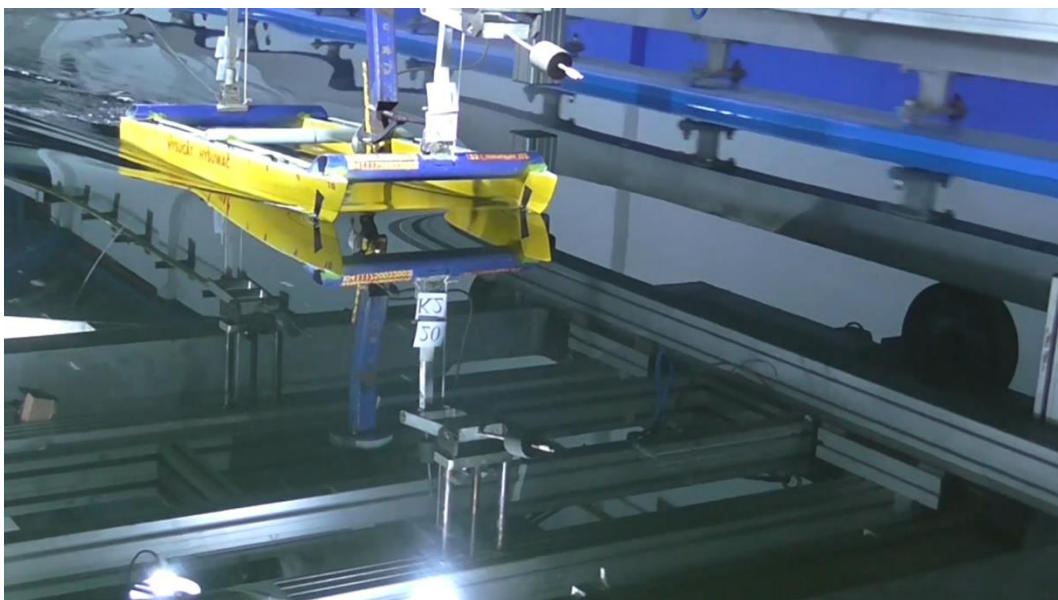


Gambar D.2 4 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.2.3. Uji model Kondisi 2 dengan kecepatan skala penuh 20 Knot, *Froude number* 0.5, dan kecepatan model 1.45 m/s



Gambar D.2 5 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

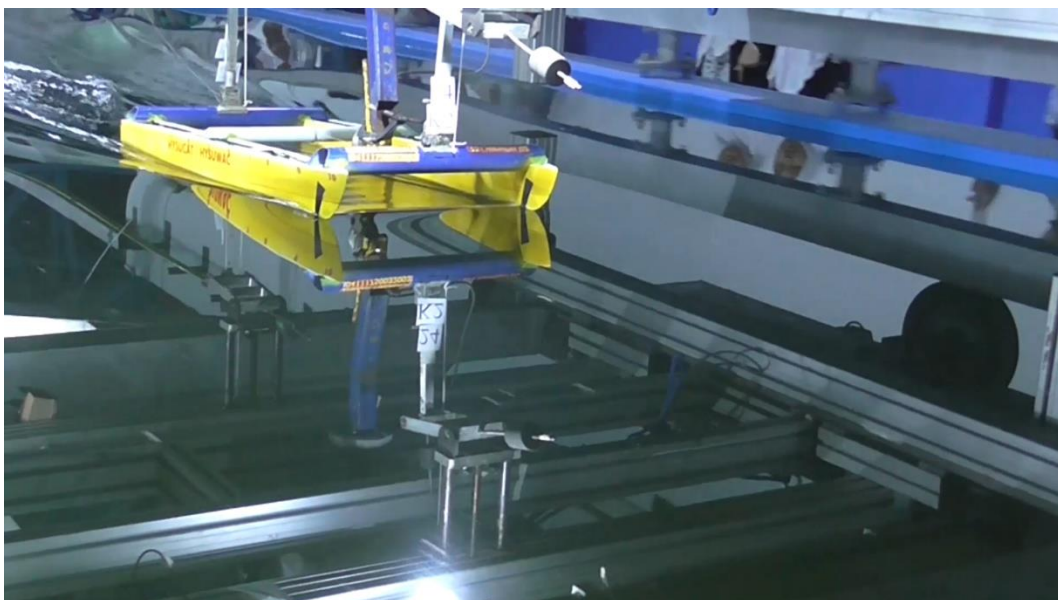


Gambar D.2 6 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.2.4. Uji model Kondisi 2 dengan kecepatan skala penuh 24 Knot, *Froude number* 0.6, dan kecepatan model 1.75 m/s

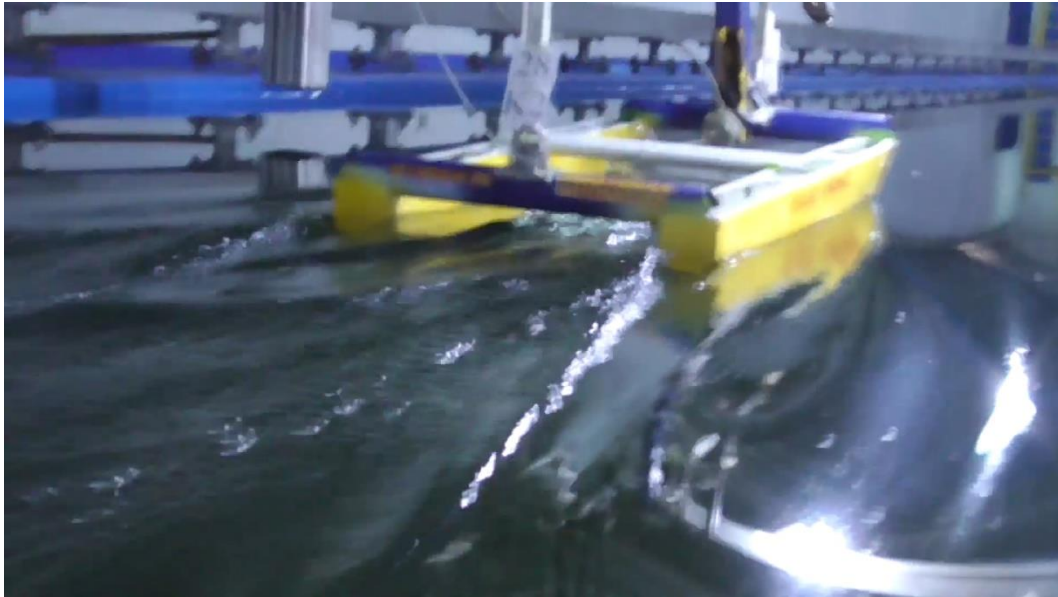


Gambar D.2 7 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

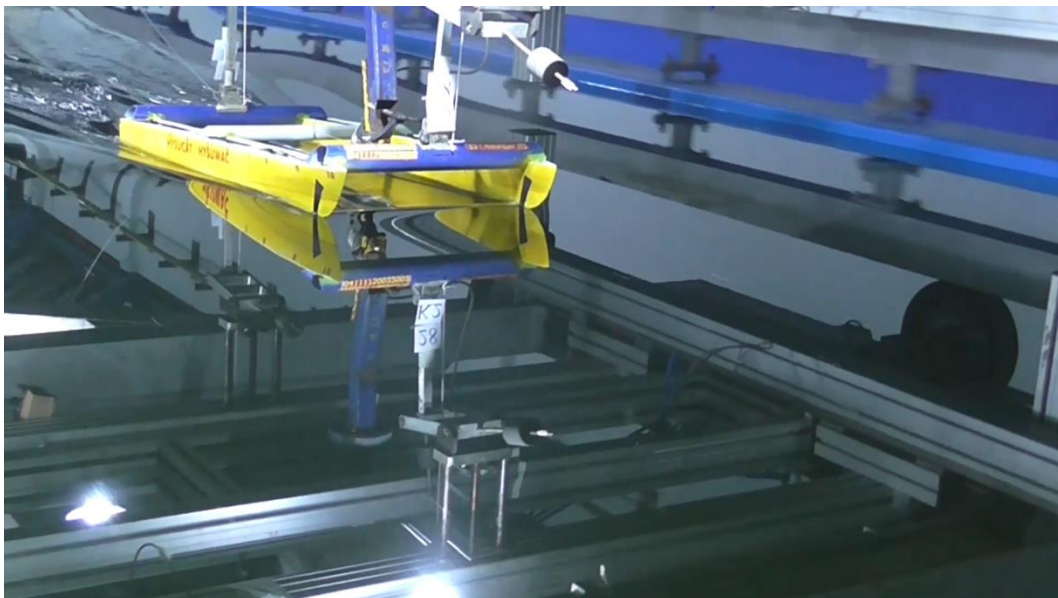


Gambar D.2 8 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.2.5. Uji model Kondisi 2 dengan kecepatan skala penuh 28 Knot, *Froude number* 0.7, dan kecepatan model 2.03 m/s



Gambar D.2 9 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)



Gambar D.2 10 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.3. Kondisi 3, kapal katamaran dengan penambahan 1 foil di bagian haluan dan 1 foil di bagian buritan (K2)

D.3.1. Uji model Kondisi 3 dengan kecepatan skala penuh 12 Knot, *Froude number* 0.3, dan kecepatan model 0.873 m/s

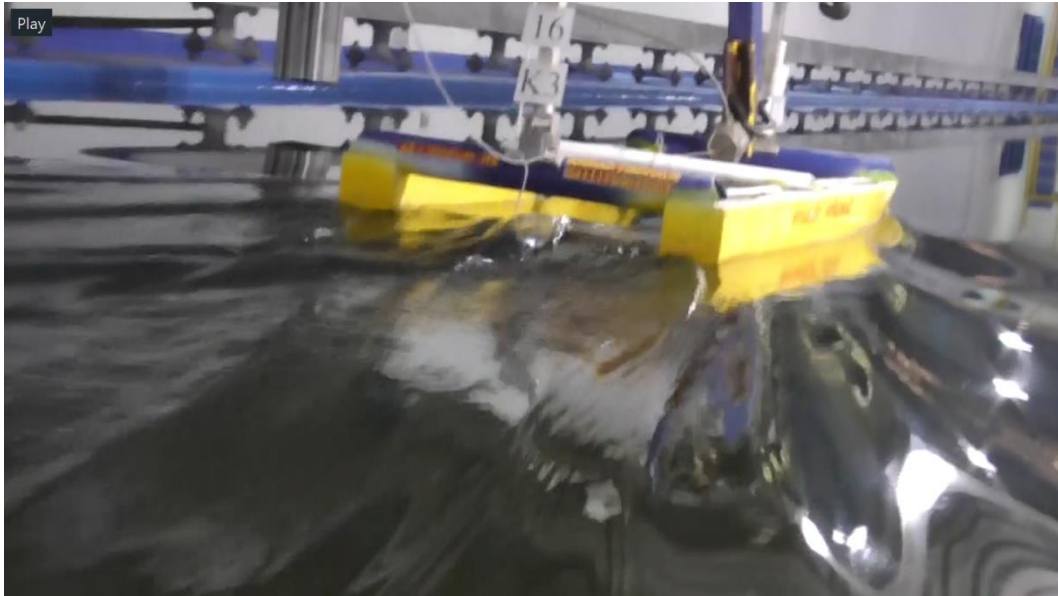


Gambar D.3 1 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

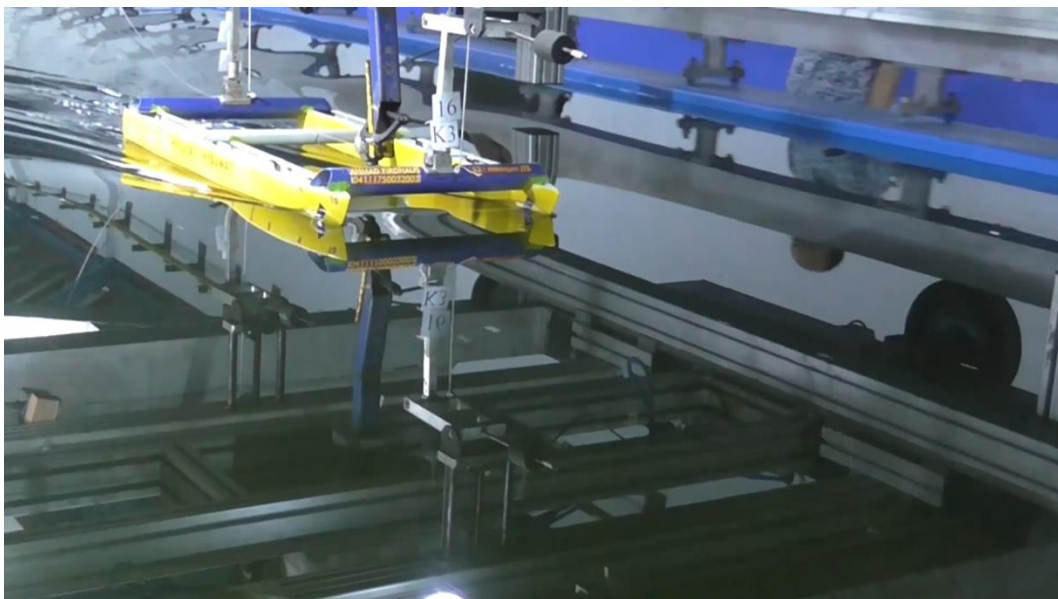


Gambar D.3 2 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.3.2. Uji model Kondisi 3 dengan kecepatan skala penuh 16 Knot, *Froude number* 0.4, dan kecepatan model 1.16 m/s



Gambar D.3 3 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

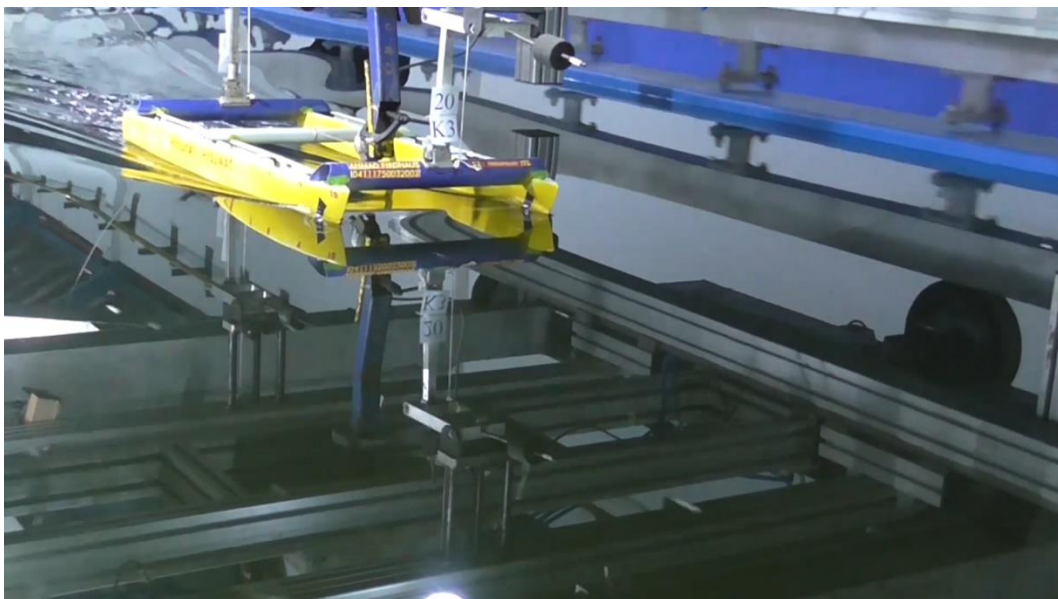


Gambar D.3 4 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.3.3. Uji model Kondisi 3 dengan kecepatan skala penuh 20 Knot, *Froude number* 0.5, dan kecepatan model 1.45 m/s



Gambar D.3 5 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

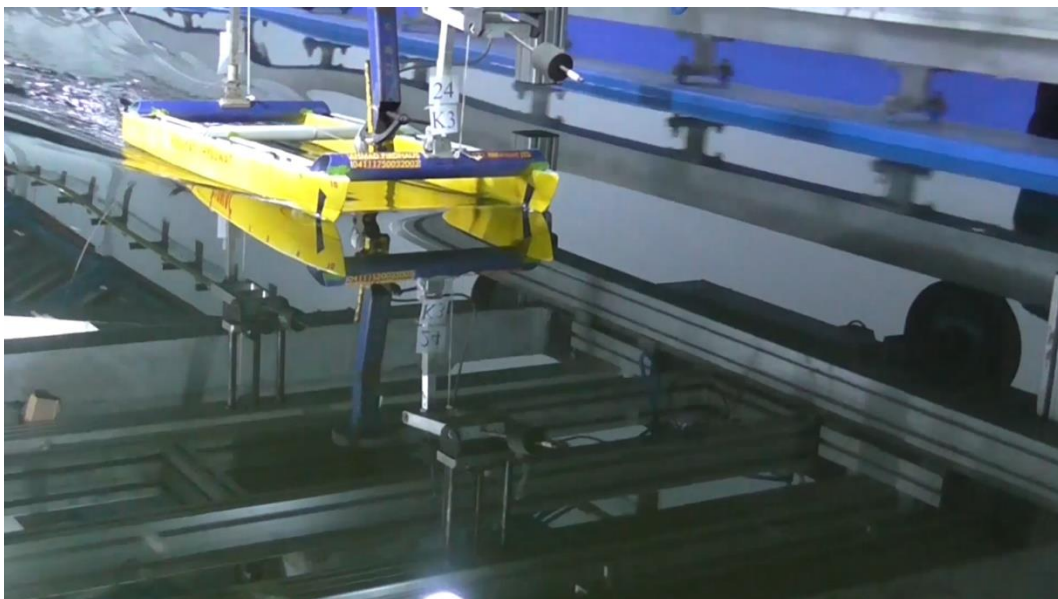


Gambar D.3 6 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.3.4. Uji model Kondisi 3 dengan kecepatan skala penuh 24 Knot, *Froude number* 0.6, dan kecepatan model 1.75 m/s



Gambar D.3 7 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)

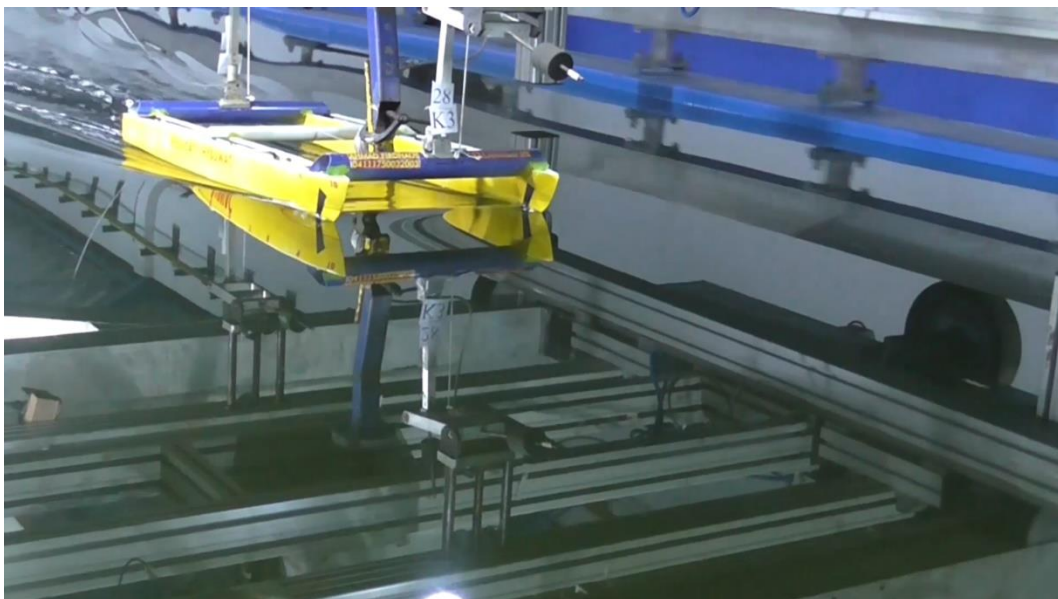


Gambar D.3 8 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)

D.3.5. Uji model Kondisi 3 dengan kecepatan skala penuh 28 Knot, Froude number 0.7, dan kecepatan model 2.036 m/s



Gambar D.3 9 Kamera Buritan (menangkap gambar gelombang di buritan)



Gambar D.3 10 Kamera Depan (menangkap gambar gelombang haluan)