



**TUGAS AKHIR - MN 184802**

**ANALISIS HAMBATAN LAMBUNG POLOS KAPAL SELAM  
DENGAN PENDEKATAN CFD : STUDI KASUS DENGAN  
VARIASI BENTUK HALUAN KAPAL**

**Muhammad Rais Amin  
NRP 0411134000006**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020**



**TUGAS AKHIR - MN 184802**

**ANALISIS HAMBATAN LAMBUNG POLOS KAPAL SELAM  
DENGAN PENDEKATAN CFD : STUDI KASUS DENGAN  
VARIASI BENTUK HALUAN KAPAL**

**Muhammad Rais Amin  
NRP 0411134000006**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020**



**FINAL PROJECT - MN 184802**

**RESISTANCE ANALYSIS OF SUBMARINE BARE HULL  
WITH CFD APPROACH : A CASE STUDY ON VARIATION  
OF THE BOW SHAPE OF SUBMARINE**

**Muhammad Rais Amin  
NRP 0411134000006**

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

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2020**

## LEMBAR PENGESAHAN

# ANALISIS HAMBATAN LAMBUNG POLOS KAPAL SELAM DENGAN PENDEKATAN CFD : STUDI KASUS DENGAN VARIASI BENTUK HALUAN KAPAL

### TUGAS AKHIR

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

Oleh:

**MUHAMMAD RAIS AMIN**  
NRP 0411134000006

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing

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

Mengetahui,  
Kepala Departemen Teknik Perkapalan

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

SURABAYA, Agustus 2020



# LEMBAR REVISI

## ANALISIS HAMBATAN LAMBUNG POLOS KAPAL SELAM DENGAN PENDEKATAN CFD : STUDI KASUS DENGAN VARIASI BENTUK HALUAN KAPAL

### TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir  
Tanggal 22 Juli 2020

Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**MUHAMMAD RAIS AMIN**  
NRP 0411134000006

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Dr. Ir. I Ketut Suastika
2. Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.
3. Dr.Eng Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T.



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Ir. I K A Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

SURABAYA, Juli 2020

## **HALAMAN PERUNTUKAN**

Dipersembahkan kepada kedua orang tua dan keluarga atas segala dukungannya

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunianya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Bapak Prof. Ir. I K A Pria Utama, M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Bapak Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS;
3. Bapak Wing Hendroprasetyo Akbar Putra, S.T., M.Eng. selaku Dosen Wali penulis;
4. Bapak Ahmad Nasirudin S.T., M.Eng. selaku Kepala Program Studi Sarjana Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS;
5. Dosen beserta Karyawan Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS;
6. Ayahanda Samsul Hadi dan Ibunda Siti Utiyah selaku kedua orang tua atas dukungan dan motivasinya selama ini;
7. Semua keluarga, Ibu Sri Wahyuni, Grovando Yun S, dan lainnya yang telah berkontribusi membantu penyelesaian Tugas Akhir ini;
8. Teman-teman dan semua pihak yang membantu terselesaikannya Tugas Akhir ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

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

Surabaya, 22 Juli 2020

Muhammad Rais Amin

# **ANALISIS HAMBATAN LAMBUNG POLOS KAPAL SELAM DENGAN PENDEKATAN CFD : STUDI KASUS DENGAN VARIASI BENTUK HALUAN KAPAL**

Nama Mahasiswa : Muhammad Rais Amin  
NRP : 04111340000006  
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan  
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

## **ABSTRAK**

Laporan ini membahas mengenai bentuk haluan lambung kapal selam yang menghasilkan hambatan minimum. Hambatan merupakan parameter penting dalam desain bentuk suatu kapal selam. Hambatan berhubungan erat dengan operasional suatu kapal selam, yang nantinya mempengaruhi kebutuhan tenaganya. Dalam laporan ini studi pada bentuk lambung kapal selam difokuskan pada bentuk lambung polos, tanpa bangunan tambahan. Pendekatan desain yang sudah teruji berfokus pada bentuk tetesan air dan bentuk silinder badan lambungnya. Permodelan bentuk lambung kapal selam terbagi menjadi tiga : haluan, lambung paralel dan buritan. Laporan ini dimaksudkan untuk mengkaji bentuk haluan yang optimum dari perolehan nilai hambatan minimum dan sebisa mungkin mendapatkan luasan basah yang besar. Hambatan yang dikaji dilakukan pada kondisi menyelam dan permukaan. Lima variasi bentuk haluan digunakan berdasarkan koefisien haluan  $nf$ , parameter untuk lambung paralel dan buritan adalah konstan. Untuk lebih mengetahui karakteristik bentuk haluan terhadap hambatan, digunakan empat variasi kecepatan, dan menghasilkan bentuk haluan yang optimum dengan nilai  $nf$  : 1,84.

Kata kunci: Lambung polos kapal selam,  $nf$ , kondisi selam, kondisi permukaan

# **RESISTANCE ANALYSIS OF SUBMARINE BAREHULL WITH CFD APPROACH : A CASE STUDY ON VARIATION OF THE BOW SHAPE OF SUBMARINE**

Author : Muhammad Rais Amin  
Student Number : 411134000006  
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology  
Supervisor : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

## **ABSTRACT**

This report discuss about the bow shape of submarine barehull corresponds to minimum resistance. Resistance shows as the most importance parameter due to design process of submarine shape. The resistance have strong correlation to the submarine operability, thus depends to the powering of a submarine. In this report, the study of the shape of submarine hull focused in barehull, without appendages. The major approach of submarine design shows in two shapes : tear drop shape and cylindrical middle body shape. Submarine model have three parts : bow/nose, parallel middle body and stern. The scope of this report is analyzing the optimum bow shape in correlation of minimum resistance and strongly to obtain the large of wetted surface area. The analysis of resistance done in submerged and surfaced condition. Five variations of bow shapes is used based on the  $\eta_f$  coefficient, and the rest of parallel body and stern is constant. To obtain more understanding in the characteristics of bow shape to resistance, four variations of velocity is used, result for optimum bow shape with value of  $\eta_f$ : 1,84.

Keywords: Submarine barehull,  $\eta_f$ , submerged condition, surfaced condition

# DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR REVISI.....	iv
HALAMAN PERUNTUKAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Tujuan .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	3
1.5. Manfaat .....	3
BAB 2 STUDI LITERATUR.....	5
2.1. Kapal Selam .....	5
2.2. Perkembangan Kapal Selam .....	8
2.3. Dasar Desain Kapal Selam.....	10
2.3.1. Geometri Lambung Kapal Selam.....	12
2.3.2. Geometri Haluan Kapal Selam.....	13
2.4. Hidrodinamika Kapal Selam.....	15
2.4.1. Aliran Pada Lambung Kapal Selam.....	15
2.4.2. Lapisan Batas .....	17
2.4.3. Hambatan Kapal Selam.....	19
2.4.4. Koefisien Hambatan Total .....	22
2.5. <i>Computational Fluid Dyamics</i> .....	24
2.5.1. Perhitungan.....	25
2.5.2. Perangkat Lunak.....	26
2.5.3. Permodelan <i>Boundary Layer</i> dalam CFD .....	28
BAB 3 METODOLOGI .....	31
3.1. Bagan Alir .....	31
3.2. Langkah Pengerjaan.....	32
3.2.1. Studi Literatur .....	32
3.2.2. Pengumpulan Data .....	32
3.2.3. Pembuatan Model.....	33
3.2.4. Simulasi CFD .....	33
3.2.5. Validasi Data .....	34
3.2.6. Analisis dan Pembahasan .....	34
3.2.7. Kesimpulan.....	35
BAB 4 PERMODEIAN DAN SIMULASI CFD.....	37
4.1. Permodelan Uji Numerik .....	37
4.1.1. Permodelan Lambung Polos Kapal Selam.....	37
4.1.2. Pendefinisian <i>Meshing</i> .....	39

4.2. Simulasi CFD.....	43
4.2.1. Tahap CFX-Pre Processor.....	43
4.2.2. Tahap CFX- Solver.....	50
4.2.3. Tahap CFX-Post Processor .....	52
4.3. Validasi <i>Grid Independence</i> .....	52
BAB 5 Analisis dan pembahasan .....	59
5.1. Pendahuluan.....	59
5.2. Perbandingan Hambatan Kondisi Menyelam .....	59
5.3. Perbandingan Hambatan Kondisi Permukaan .....	69
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN.....	73
5.4. Kesimpulan .....	73
5.5. Saran .....	74
DAFTAR PUSTAKA.....	75

## LAMPIRAN

LAMPIRAN A Simulasi Kondisi Menyelam

LAMPIRAN B Simulasi Kondisi Permukaan

## BIODATA PENULIS

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen kapal selam .....	5
Gambar 2.2	Mekanisme <i>ballast</i> kapal selam.....	6
Gambar 2.3	Ilustrasi kapal selam pada kondisi <i>snorkel</i> .....	6
Gambar 2.4	Struktur haluan kapal .....	7
Gambar 2.5	Evolusi desain kapal selam (a) Amerika Serikat (b) Russia.....	9
Gambar 2.6	Volume kapal selam dengan dan tanpa .....	10
Gambar 2.7	Konsep desain geometri kapal .....	12
Gambar 2.8	Bentuk lambung tanpa dan dengan.....	12
Gambar 2.9	Bentuk lambung dengan koefisien.....	15
Gambar 2.10	Aliran di sekeliling kapal selam .....	16
Gambar 2.11	Lapisan Batas pada pelat datar .....	17
Gambar 2.12	Hukum similitude kecepatan untuk lapisan batas turbulen .....	19
Gambar 2.13	Gaya hambat lambung polos .....	20
Gambar 2.14	Komponen hambatan dengan perbandingan L/D .....	21
Gambar 2.15	Koefisien hambatan model kapal selam pada kondisi permukaan .....	22
Gambar 4.1	Grafik $nf$ model .....	38
Gambar 4.2	Permodelan bentuk 2 dimensi.....	38
Gambar 4.3	Permodelan bentuk 3 dimensi.....	39
Gambar 4.4	Hasil <i>import</i> model di ICEM CFD .....	39
Gambar 4.5	(a) Pendefinisian domain fluida(b) Ukuran dinding <i>domain</i> fluida simetris.....	40
Gambar 4.6	Pengaturan <i>part meshing</i> .....	41
Gambar 4.7	Hasil <i>meshing</i> .....	42
Gambar 4.8	<i>Meshing</i> model.....	42
Gambar 4.9	<i>Meshing</i> disekitar model lambung polos .....	42
Gambar 4.10	Kondisi batas simulasi menyelam .....	43
Gambar 4.11	Pengaturan domain fluida.....	44
Gambar 4.12	Kondisi batas <i>Inlet</i> .....	44
Gambar 4.13	Kondisi batas <i>Outlet</i> .....	45
Gambar 4.14	Kondisi batas <i>Wall</i> .....	45
Gambar 4.15	Kondisi batas Model.....	45
Gambar 4.16	<i>Solver Control</i> .....	46
Gambar 4.17	Kondisi batas simulasi permukaan .....	46
Gambar 4.18	Pengaturan domain fluida.....	48
Gambar 4.19	Kondisi batas <i>Inlet</i> .....	48
Gambar 4.20	Kondisi batas <i>Outlet</i> .....	49
Gambar 4.21	Kondisi batas <i>Opening</i> .....	49
Gambar 4.22	<i>Solver Control Free Surface</i> .....	50
Gambar 4.23	Grafik simulasi kondisi menyelam .....	51
Gambar 4.24	Grafik simulasi kondisi permukaan .....	51
Gambar 4.25	<i>Grid Independence</i> Model $nf = 1,84$ .....	53
Gambar 4.26	<i>Grid Independence</i> Model $nf = 2,00$ .....	54
Gambar 4.27	<i>Grid Independence</i> Model $nf = 2,50$ .....	55
Gambar 4.28	<i>Grid Independence</i> Model $nf = 3,00$ .....	56
Gambar 4.29	<i>Grid Independence</i> Model $nf = 4,00$ .....	57

Gambar 4.30 Spesifikasi komputer .....	57
Gambar 5.1 Grafik perbandingan hambatan <i>viscous</i> .....	60
Gambar 5.2 Grafik koefisien hambatan <i>viscous</i> .....	61
Gambar 5.3 Grafik nilai hambatan selam pada setiap model .....	61
Gambar 5.4 <i>Pressure plot</i> Model $nf = 1,84$ pada 20 knot .....	62
Gambar 5.5 <i>Pressure plot</i> Model $nf = 2,00$ pada 20 knot .....	62
Gambar 5.6 <i>Pressure plot</i> Model $nf = 2,50$ pada 20 knot .....	63
Gambar 5.7 <i>Pressure plot</i> Model $nf = 3,00$ pada 20 knot .....	63
Gambar 5.8 <i>Pressure plot</i> Model $nf = 4,00$ pada 20 knot .....	64
Gambar 5.9 <i>Velocity plot</i> Model $nf = 1,84$ pada 20 knot .....	65
Gambar 5.10 <i>Velocity plot</i> Model $nf = 2,00$ pada 20 knot .....	65
Gambar 5.11 <i>Velocity plot</i> Model $nf = 2,50$ pada 20 knot .....	66
Gambar 5.12 <i>Velocity plot</i> Model $nf = 3,00$ pada 20 knot .....	66
Gambar 5.13 <i>Velocity plot</i> Model $nf = 4,00$ pada 20 knot .....	67
Gambar 5.14 Hubungan nilai hambatan total dengan $nf$ .....	68
Gambar 5.15 Hubungan nilai koefisien hambatan total dengan $WSA$ .....	68
Gambar 5.16 Grafik perbandingan hambatan total .....	70
Gambar 5.17 Fenomena adanya kritikal <i>Froude Number</i> .....	71

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tipikal nilai $C_R$ .....	24
Tabel 3.1 Asumsi permodelan pada pengujian numerik .....	33
Tabel 4.1 Perhitungan $y^+$ model dan kecepatan.....	41
Tabel 4.2 Pendefinisian CEL- <i>Pre Processor</i> .....	47
Tabel 4.3 <i>Grid Independence</i> Model $nf = 1,84$ .....	53
Tabel 4.4 <i>Grid Independence</i> Model $nf = 2,00$ .....	54
Tabel 4.5 <i>Grid Independence</i> Model $nf = 2,50$ .....	55
Tabel 4.6 <i>Grid Independence</i> Model $nf = 3,00$ .....	56
Tabel 4.7 <i>Grid Independence</i> Model $nf = 4,00$ .....	57
Tabel 5.1 Nilai hambatan kondisi menyelam untuk setiap variasi model.....	59
Tabel 5.2 Nilai hambatan kondisi permukaan untuk setiap variasi model.....	69

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Berdasarkan Deklarasi Djuanda 1957, Indonesia menganut prinsip-prinsip negara kepulauan (*Archipelagic State*), menyatakan bahwa segala perairan disekitar, diantara, dan penghubung pulau-pulau di dalamnya, dengan tidak memandang luas atau lebarnya merupakan wilayah NKRI. Pada 1982 Deklarasi Djuanda diterima dan ditetapkan dalam konvensi hukum laut PBB ke III (*United Nations Convention on the Law of the Sea/UNCLOS 1982*). Deklarasi ini dipertegas kembali dalam UU Nomor 17 Tahun 1985 tentang ratifikasi UNCLOS 1982, bahwa Indonesia adalah negara kepulauan.

Menurut Janhidros (2006) dalam Rumampuk (2013) luas wilayah daratan Indonesia sekitar 2.012.402 km<sup>2</sup>, luas perairannya sekitar 5.877.879 km<sup>2</sup>, terdiri atas 17.508 pulau dengan garis pantai sepanjang 81.000 km. Fakta fisik ini menjadikan Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia. Dengan luas perairan hampir 70% wilayahnya, Indonesia membutuhkan elemen pengamanan yang kuat.

Mengingat semakin besarnya potensi ancaman yang ada, strategi pengembangan teknologi pertahanan dan keamanan Indonesia, termasuk konsep dan strategi alutsista nasional haruslah mendapat perhatian serius, termasuk sistem pertahanan perairan Indonesia.

Melihat fakta yang ada, terbatasnya armada kapal selam yang dimiliki Indonesia saat ini mengakibatkan kurangnya alat pengamanan perairan Indonesia, perlu dilakukan pengembangan teknologi rancang bangun kapal selam di Indonesia secara berkelanjutan.

Kapal selam memiliki karakteristik pergerakan yang unik, aliran yang ditimbulkan sewaktu kapal selam bergerak bersifat fluktuatif. Aliran ini mula-mula diam, selanjutnya berubah sesuai dengan kecepatan, dan bentuk lambung kapal selam juga berpengaruh. Pada bagian haluan, kecepatan alirannya adalah nol, tetapi mempunyai tekanan yang maksimum, di daerah ini ditemukan adanya titik stagnasi (Gilver et al. 1991). Masalah yang ditimbulkan adalah bentuk lambung dalam kaitan dengan drag hidrodinamik dari lambung, terutama bentuk haluan kapal selam karena berpengaruh pada perhitungan lapisan batas yang ditimbulkan oleh haluan kapal.

Evolusi bentuk haluan kapal selam khususnya di bidang militer, dari tahun 1800-an melalui bentuk *ogive shape bow* dari *Philips Submarine*, sampai akhir tahun 2000-an dengan bentuk *elliptic bow shape* dari *Le Terrible Class*, menunjukkan perubahan signifikan dari segi bentuknya.

Pada proses desain kapal selam terkini Amerika Serikat, untuk memenuhi penyediaan *ICBMs (Intercontinental Ballistic Missiles)* yang besar, desain kapal selam semakin panjang dan *displacement* kapal juga semakin besar dan tidak lagi memperhatikan hubungan ideal dari bentuk badan kapal atau *cross-section* untuk hambatan minimum (Joubert, 2004). Karakteristik bentuk haluan juga mengalami perubahan dari *US E-Class Submarine* tahun 1911 sampai *Lafayette Class* tahun 1963, yang termasuk *Ballistic Missile Class Submarine*.

Dalam permasalahan di atas, desain kapal selam khususnya bentuk haluan yang selalu mengalami perubahan menunjukkan penelitian berkelanjutan dalam mendapatkan desain yang optimal. Hal ini dikarenakan dari sisi hidrodinamika, bentuk haluan sangat berpengaruh terhadap aliran pada badan kapal dan selanjutnya akan sangat berpengaruh pula pada hambatan keseluruhan kapal.

Berdasarkan jurnal Internasional yang ada, telah dilakukan analisis terhadap bentuk haluan kapal selam, maka perlunya dilakukan analisis lanjutan dengan perbedaan variasi. Perhitungan yang berbeda akan memperkaya penelitian dalam bidang kapal selam dalam kaitan dengan bentuk haluan kapal selam.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Sehubungan dengan latar belakang di atas, permasalahan yang dikaji dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana karakteristik hambatan yang terjadi pada kapal selam?
2. Bagaimana analisis terhadap variasi model lambung polos kapal selam pada kondisi hidrodinamik?
3. Bagaimana pengaruh variasi geometri haluan kapal selam terhadap nilai hambatan total?
4. Bagaimana permodelan lambung kapal selam khususnya geometri haluan yang paling optimal pada kondisi hidrodinamik?

### 1.3. Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik hambatan yang terjadi pada kapal selam.
2. Mengetahui metode analisis terhadap variasi model lambung polos kapal selam pada kondisi hidrodinamik
3. Mengetahui nilai hambatan total pada variasi geometri haluan kapal selam.
4. Mengetahui permodelan lambung kapal selam khususnya geometri haluan yang paling optimal pada kondisi hidrodinamik.

### 1.4. Batasan Masalah

Permasalahan dalam Tugas Akhir ini difokuskan pada :

1. Variasi geometri haluan dari 5 desain kapal selam berdasarkan variasi koefisien  $n_f$  : 1,84; 2,00; 2,50; 3,00; 4,00.
2. Ukuran utama beberapa kapal selam berdasarkan variasi geometri haluan dianggap konstan sehingga perbandingan L/D sama untuk semua variasi model.
3. Permodelan *middle body* berbentuk silinder dan *stern body* berbentuk kerucut.
4. Kecepatan yang digunakan model lambung polos kapal selam yaitu pada  $V_s$  : 10, 15, 20, 25 Knot. Kecepatan tersebut menghasilkan bilangan *Reynold* lebih dari 30.000.000.
5. Analisis hambatan dilakukan secara numerik dengan pendekatan CFD menggunakan perangkat lunak ANSYS.

### 1.5. Manfaat

Dari Tugas Akhir ini, diharapkan didapatkan manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan uraian tentang nilai hambatan yang terjadi pada lambung kapal selam.
2. Memberikan pemahaman pada permodelan lambung kapal selam, terutama proses desain geometri kapal selam.
3. Sebagai bahan pertimbangan pemilihan desain haluan kapal selam selanjutnya.
4. Menambah wawasan mengenai karakteristik hidrodinamik kapal selam.

Halaman ini sengaja dikosongkan

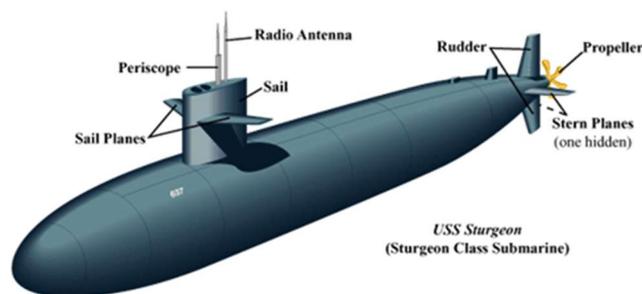
## BAB 2

# STUDI LITERATUR

### 2.1. Kapal Selam

Kapal selam adalah salah satu jenis kapal khusus yang dapat beroperasi di bawah permukaan air pada tekanan hidrostatis yang sangat besar, melebihi ambang batas kemampuan manusia untuk bertahan tanpa alat bantu. Kapal selam merupakan kendaraan bawah air yang terdiri dari *bare hull* (lambung polos), komponen-komponen tambahan seperti; *sail*, *hydroplane* depan dan belakang, dan *rudder* (kemudi) (Liu et al. 2010).

Konfigurasi umum kapal selam militer dapat dilihat seperti pada Gambar 2.1, yaitu konfigurasi *USS Sturgeon* yang dirancang dan dibuat *General Dynamic Electric Boat*, Amerika Serikat. Kapal selam ini mulai dibuat tahun 1961 dan diluncurkan di tahun 1966. Konfigurasi ini terdiri dari kapal selam bagian depan disebut *Nose/Bow* (Haluan Kapal Selam) yang memiliki tipikal bentuk revolusi parabolis.



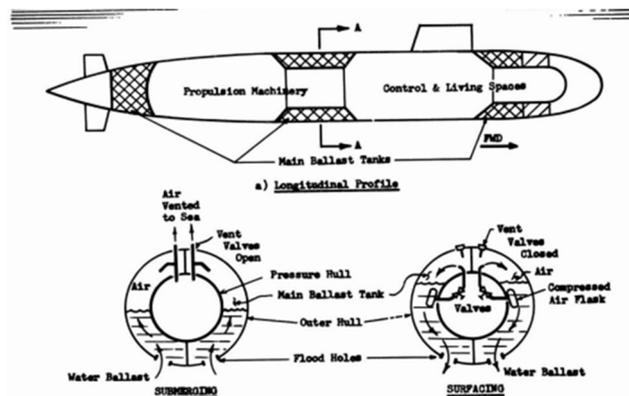
Gambar 2.1 Komponen kapal selam

Menurut Joubert (2006) dalam de Fretes (2014) bentuk dari haluan ini sangat penting, karena di sini ditempatkan sensor akustik dan tabung torpedo, serta merupakan awal mulanya terbentuk aliran di sekitar lambung. Pada bagian ini ditempatkan antena radio dan periskop, serta *hydroplane*. Bagian belakang kapal selam terpasang kemudi, *stern plane* atau *foil* belakang, dan *propeller* sebagai penggerak kapal.

Kapal selam dapat beroperasi di dalam air, di permukaan dan, dan mode *snorkeling* atau posisi mengapung pada saat mengambil oksigen. Kapal selam dapat mengapung karena adanya berat fluida (air laut) yang dipindahkan sebesar berat kapal. Fluida yang dipindahkan oleh *displacement* kapal ini akan menghasilkan gaya angkat, yang disebut *bouyant force*, yang arahnya berlawanan dengan arah gravitasi. Untuk bisa tenggelam dan mengapung, kapal selam

melakukan pengaturan berat menggunakan bantuan tangki *ballast* dan *hydroplane* depan. Untuk mempertahankan kondisi *even keel*, kapal selam memanfaatkan gaya angkat yang dihasilkan oleh *hydroplane* belakang.

Saat mengapung di permukaan, kapal selam dikatakan mempunyai gaya angkat positif. Tangki-tangki *ballast*-nya hampir tak terisi air. Pada kondisi menyelam, kapal memperoleh gaya angkat negatif karena udara yang ditampung oleh tangki *ballast* dikeluarkan melalui katup udara untuk digantikan air yang masuk.



Gambar 2.2 Mekanisme *ballast* kapal selam (Pohler et al., 1965)

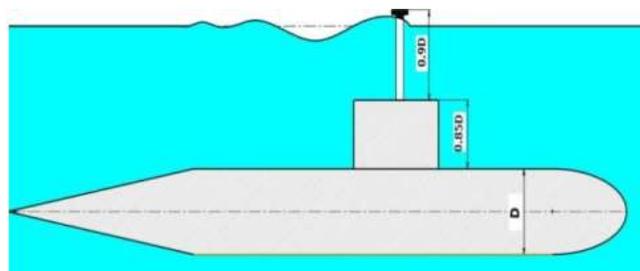
Secara umum, kondisi pelayaran kapal selam terbagi menjadi tiga kondisi, antara lain :

1. *Submerged Condition*

Kondisi dimana keseluruhan badan kapal selam berada di bawah permukaan air dengan kedalaman tertentu.

2. *Snorkel Condition*

Kondisi dimana ruang total dari kapal selam berada di bawah permukaan air, tetapi sangat dekat dengan permukaan laut, sehingga hanya tiang *snorkel*-nya saja yang keluar dari permukaan air.



Gambar 2.3 Ilustrasi kapal selam pada kondisi *snorkel* (Moonesun et al., 2015)

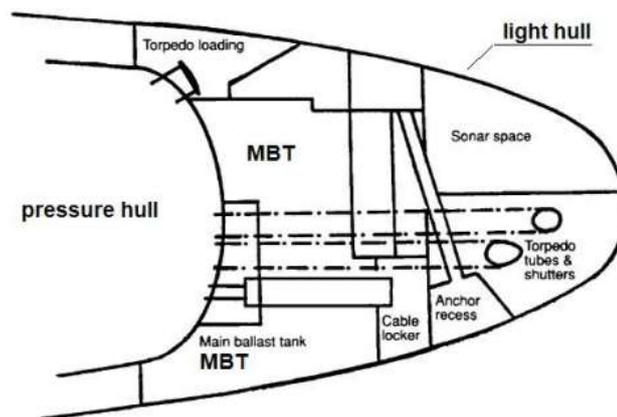
### 3. Surfaced Condition

Kondisi dimana sebagian badan kapal selam berada di atas permukaan air, dan sisanya berada di bawah permukaan air. Pada kondisi ini, kapal selam akan memiliki sarat (*draft*) (Moonesun et al., 2015).

Dalam kebutuhan arsitekturalnya, struktur lambung kapal selam mempunyai dua kategori utama yaitu ; *pressure hull* dan *light hull*.

*Pressure hull* terdiri dari ruang kering dalam tekanan atmosfer normal untuk kehidupan manusia, kelistrikan, dan peralatan lain yang sensitif terhadap kelembaban dan tekanan tinggi. *Light hull* terdiri dari ruang basah untuk keperluan peralatan kapal, dan dapat bertahan dalam keadaan tekanan tinggi pada kedalaman laut.

Secara umum struktur dalam haluan suatu kapal selam militer direncanakan berdasarkan kebutuhan pada sistem persenjataan dan sistem sonarnya.



Gambar 2.4 Struktur haluan kapal (Burcher & Rydill, 1994)

Sedangkan dalam hal ukuran, kapal selam dibagi atas tiga jenis utama, yaitu :

#### 1. Large Submarine

Termasuk kapal selam dengan bobot lebih dari 2000 ton saat kondisi menyelam (*submerged*). Jumlah kapal selam tipe ini tidak terlalu banyak. Beberapa contoh kapal selam tipe ini antara lain *Kilo-class* dan *Thyphoon-class* buatan Rusia. Beberapa tipe *Large Submarine* menggunakan tenaga penggerak berupa reaktor nuklir.

#### 2. Medium Submarine

Termasuk kapal selam dengan bobot saat menyelam (*submerged*) berada pada kisaran nilai 600-2000 ton. Kapal selam tipe ini lumayan banyak yang diproduksi, contohnya kapal

selam *Changbogo-class* milik TNI AL yang merupakan peningkatan versi dari *U-209* buatan Jerman.

### 3. *Midget Submarine*

Umumnya kapal ini didefinisikan sebagai kapal selam dengan bobot di bawah 150 ton. Namun beberapa varian *midget submarine* juga memiliki bobot lebih dari 300 ton.

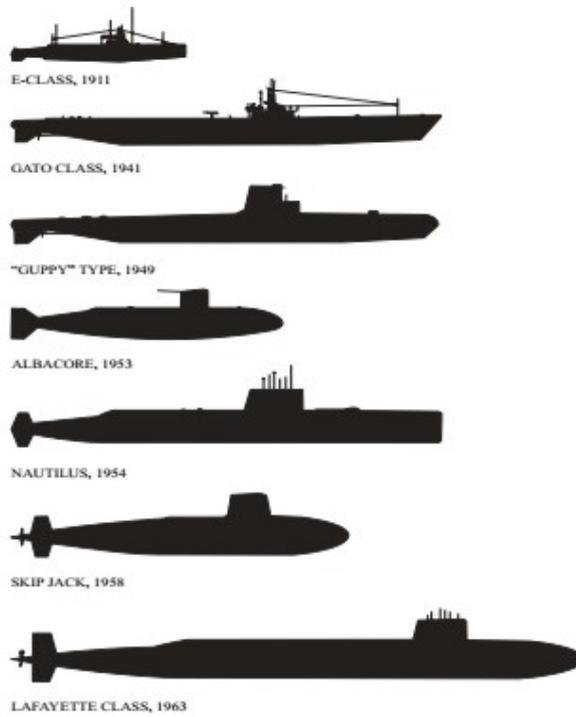
## 2.2. Perkembangan Kapal Selam

Penelitian kapal selam selama satu abad terakhir mampu menghasilkan perkembangan yang cukup signifikan dari mulai bentuk, ukuran, fungsi pelayaran, sampai teknologi di dalam kapal selam itu sendiri. Ditandai dengan Jerman pada akhir perang dunia II memproduksi *Type-21*, yang berhasil melewati capaian kapal selam terdahulu dengan kemampuan menyelam jauh lebih dalam mencapai 240 m.

Amerika Serikat juga mengembangkan kapal selam *Albacore-class* yang mampu mencapai kecepatan 33 knot pada kondisi menyelam dan 25 knot pada kondisi permukaan, hal ini bisa dicapai karena mempunyai koefisien drag pada kisaran nilai 0,1 dibandingkan dengan desain kapal sebelumnya sebesar 0,35. Namun karena *Albacore-class* tidak mempunyai parallel middle body (PMB) mengakibatkan terbatasnya kapasitas ruangnya. Untuk itu dikembangkan kapal selam *Barbel-class*, yang mengadopsi desain lambung dari *Albacore-class* dengan displacement sebesar 2.145 ton dan length-to-draft menyelam (L/D) sebesar 7,55 serta dapat mencapai kecepatan sampai 21 knot.

Seperti pada Gambar 2.5 menunjukkan desain kapal selam Amerika Serikat. Kapal selam *Lafayette-class* yang sangat besar pada akhirnya tidak bisa menyamai desain kapal selam Rusia terbaru yang ekstrem dari segi ukuran, yang memunculkan permasalahan baru. Desain kapal selam Rusia semakin panjang dan displacement kapal juga semakin besar dengan tidak lagi memperhatikan hubungan ideal dari bentuk badan kapal atau cross-section untuk hambatan minimum.

Seperti pada kapal selam Rusia *Typhoon-class* dengan panjang 170,7 m; lebar 24,4 m; sarat 12,8 m; displacement sebesar 18.800 ton pada kondisi permukaan dan 27.000 ton pada kondisi menyelam (Joubert, 2004).



(a)



(b)

Gambar 2.5 Evolusi desain kapal selam (a) Amerika Serikat (b) Russia (Joubert, 2004)

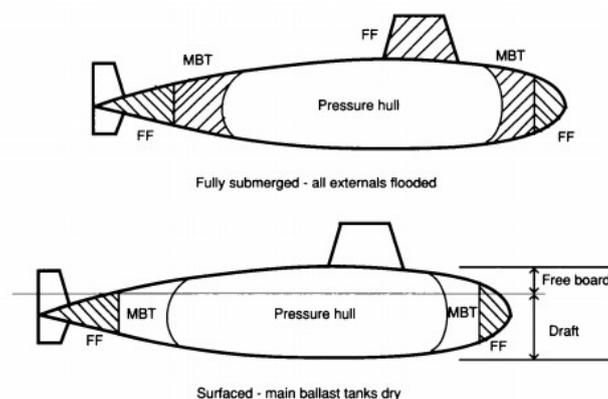
### 2.3. Dasar Desain Kapal Selam

Dalam pendekatan komputasi, esensi desain konsep suatu kapal selam adalah pada estimasi berat, seperti halnya aspek lain yang juga membutuhkan analisis komputasi yang tepat. Sangatlah penting untuk mempunyai basis data yang sebelumnya telah teruji dan dikembangkan dari desain yang terbukti berhasil (Jackson, 1992).

Seperti yang telah dijelaskan pada beberapa kondisi pelayaran kapal selam. Lebih lanjut, kapal selam mempunyai beberapa macam *displacement*. *Normal Surface Condition* (NSC) didefinisikan sebagai gabungan dari berat tetap ditambah *ballast* tetap dan variabel beban. Gabungan berat tetap dikenal dengan kondisi A-1. Ketika *ballast* tetap ditambahkan ke kondisi berat A-1, maka menjadi kondisi berat A. Washington Treaty 1922 (*The Washington Naval Treaty/Five-Power Treaty*) mengenal kondisi tersebut sebagai *displacement* standar kapal selam. Terkadang juga dianggap sebagai *light ship weight*.

Untuk mempertahankan keadaan kapal selam tetap setimbang dibutuhkan variabel *ballast* yang sesuai dengan kebutuhan kapal. Kapal selam seperti halnya kapal permukaan, dapat ditenggelamkan dengan menambah beratnya. Untuk itu *Main Ballast Tank* (MBT) dibuat di dalam lambung suatu kapal selam. Dibutuhkan juga penempatan dan ukuran yang tepat untuk mempertahankan kapal selam setimbang pada kondisi permukaan maupun kondisi menyelam secara keseluruhan.

Terdapat ruangan yang besar dan luas pada kapal selam sulit untuk dikedapkan, solusi terhadap permasalahan ini adalah membiarkannya terbuka terhadap air laut melalui bukaan yang cukup kecil. Ruangan itu disebut *Free Flood* (FF). Jika berat air pada MBT ditambahkan pada kondisi NSC maka kapal selam akan menyelam dan hasilnya dikenal sebagai *Submerged Displacement* (SUBD). Dan ketika FF ditambahkan pada SUBD maka hasilnya dikenal sebagai *Envelope Displacement* (ENVD).



Gambar 2.6 Volume kapal selam dengan dan tanpa (Burcher & Rydill, 1994)

Prinsip yang digunakan dalam perhitungan *volume*, adalah sama untuk semua bentuk lambung. Pemilihan revolusi badan kapal selam sekarang ini membuat permasalahan semakin sederhana. Selama pemilihan badan kapal selam merupakan sirkular dari sisi definisinya.

Metode matematis umum dapat digunakan untuk perhitungan. Perhitungan *Simpson* merupakan salah satu yang direkomendasikan.

Froude (1877) memperkenalkan konsep lambung kapal selam, bagian depan disebut *entrance*, tengah disebut *parallel middle body* (PMB), dan belakang disebut *run*. Chapman (1768) memperkenalkan konsep lambung kapal selam, bagian depan adalah revolusi dari bentuk parabolis, dan bagian belakang adalah revolusi dari bentuk elips.

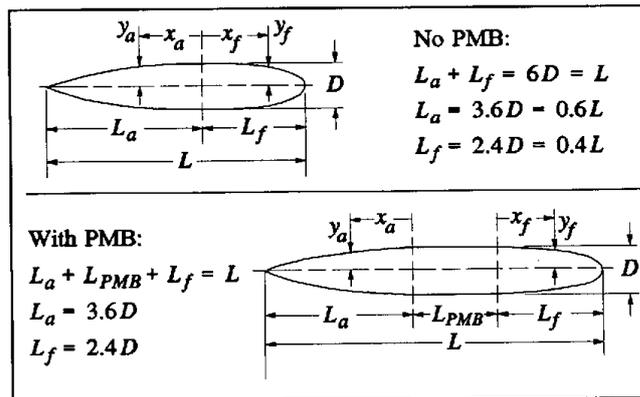
Hal ini dikembangkan dengan mengasumsikan revolusi badan dengan rasio panjang/diameter ( $L/D$ ) sebesar 6, dan maksimum diameter pada  $4L$ . Bagian depan mempunyai panjang  $L_f$ , sebesar  $2,4D$ . Bagian belakang mempunyai panjang  $L_a$ , sebesar  $3,6D$ . Bagian depan dapat dihitung sebagai revolusi bentuk elips dan bagian belakang sebagai revolusi bentuk parabolis, yang dirotasikan terhadap sumbu  $x$ . Jari-jari lambung pada tiap sumbu  $y$  didapatkan dengan perhitungan *offset* pada setengah diameter maksimum  $D/2$ .

Jika dihitung dengan persamaan terhadap bentuk asli elips dan parabola, bagian belakang kapal selam akan terlalu runcing untuk kapal selam kontemporer. *Displacement* kapal bisa diperbesar menggunakan eksponen  $n_f$  dan  $n_a$ . Menghasilkan perhitungan  $Y_f$  untuk bagian depan, dan  $Y_a$  untuk bagian belakang. Seperti pada persamaan 2.1 dan 2.2.

Jika *displacement* tambahan dibutuhkan, PMB berbentuk silinder dapat diselipkan pada diameter maksimum. Menggunakan konsep diatas, maka panjang PMB adalah panjang keseluruhan kapal kurang dari  $6D$ ;  $LOA-6D$ .

$$Y_f = R \left[ 1 - \left( \frac{x_f}{L_f} \right)^{n_f} \right]^{1/n_f} \quad (2.1)$$

$$Y_a = R \left[ 1 - \left( \frac{x_a}{L_a} \right)^{n_a} \right] \quad (2.2)$$



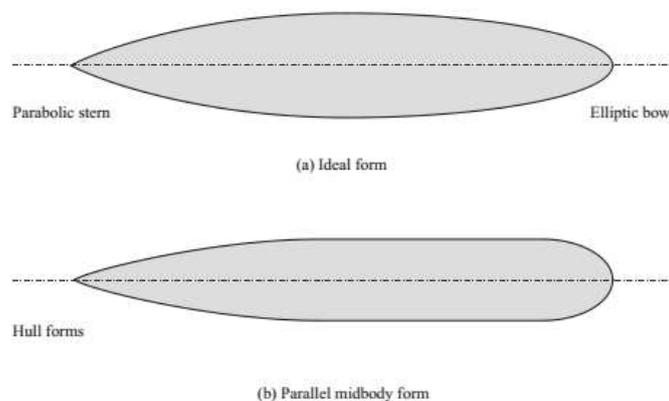
Gambar 2.7 Konsep desain geometri kapal (Jackson, 1992)

### 2.3.1. Geometri Lambung Kapal Selam

Bentuk ideal dari lambung polos (*bare hull*) kapal selam dideskripsikan sebagai sebuah kurva dengan bagian depan berbentuk elips dan bagian belakangnya berbentuk parabola. Kontinuitas perubahan diameter selalu terjaga sepanjang lambung kapal selam. Sehingga bentuk *streamline* terpenuhi (de Fretes, 2014).

Bentuk kurva yang sederhana dengan proporsi PMB yang ideal akan mengurangi biaya pembangunan kapal tanpa harus menanggung kerugian dari bertambahnya *drag* dan *noise*. Bagaimanapun pemilihan bentuk silinder untuk kapasitas ruang harus diperhitungkan dengan detail. Artinya dengan proporsi PMB yang lebih besar walaupun lebih murah dalam biaya pembangunan, tetapi akan berpengaruh pada penambahan biaya bahan bakar selama operasional kapal selam.

Penambahan panjang PMB akan mengakibatkan naiknya *form drag*. Namun pada proporsi yang kecil, hal tersebut tidak memberikan efek yang terlalu signifikan (Joubert, 2006).



Gambar 2.8 Bentuk lambung tanpa dan dengan (Joubert, 2004)

Variabel penting untuk menentukan unjuk kerja hidrodinamika dari sebuah kapal selam adalah rasio panjang dan diameter ( $L/D$ ). Dari banyak penelitian yang dilakukan oleh para ahli, menghasilkan sebuah desain nyata kapal selam *Albacore-class*. Didapatkan suatu rasio  $L/D$  optimum, yaitu sebesar 7,723 (Joubert, 2004).

### 2.3.2. Geometri Haluan Kapal Selam

Telah disebutkan di atas, bentuk haluan suatu kapal selam mempunyai peranan penting dalam operasional kapal. Dilihat dari perkembangan penelitian kapal selam, tentunya bentuk badan kapal keseluruhan telah mengalami banyak perubahan. Begitu juga dengan bentuk haluannya.

Pada periode awal pengembangan desain kapal selam militer. Desainnya masih mengikuti desain kapal permukaan yang berakibat pada terbatasnya kemampuan kapal selam pada kondisi menyelam. Maka untuk mendapatkan desain yang sempurna, pendekatan desain kapal selam mulai mengalami perubahan dengan lebih menekankan pada bentuk kapal yang hidrodinamis saat penyelaman. Sekaligus bisa stabil jika muncul ke permukaan.

Sebelum desain kapal selam banyak mengaplikasikan PMB. Desain yang ideal dari keseluruhan badan kapal selam berawal dari desain haluannya. Pendekatan perhitungan bentuk haluan merupakan perhitungan yang mencakup keseluruhan bentuk badan kapal selam. Dalam rangkuman Moonesun et al. (2016), berikut ini beberapa pendekatan perhitungan bentuk haluan kapal selam;

#### 1. DREA Model

DREA model terbagi dalam tiga bagian; *bow*, *middle body*, dan *tail*. Dengan  $L/D : 8,75$ . Panjang *bow* :  $1,75D$ ; PMB :  $4D$ ; dan *stern* :  $3D$ . Persamaan 2.1 merupakan persamaan DREA dari sumbu *bow* (haluan) :

$$\frac{r}{D} = 0,8685 \sqrt{\frac{x^F}{D}} - 0,3978 \frac{x^F}{D} + 0,006511 \left(\frac{x^F}{D}\right)^2 + 0,005086 \left(\frac{x^F}{D}\right)^3 \quad (2.3)$$

#### 2. Hull Envelope

*Envelope* merupakan kebanagan pertama dari bentuk tetesan air (*tear drop*) dengan komposisi panjang depan 40 persen dan panjang belakang 60 persen. Bentuk depan didapatkan dengan memutar bentuk elips pada sumbunya. Telah dijelaskan pada persamaan 2.1. Dengan  $X_f : 0$  sampai dengan  $L_f$ , dimana nilai 0 adalah ujung depan haluan kapal selam.

Persamaan 2.1 di tulis ulang menjadi persamaan 2.4 untuk menemukan koordinat baru, menghasilkan bentuk optimisasi yang memungkinkan untuk penyelaman yang dalam.

$$r_f = R \left[ 1 - \left( \frac{(x-L_a-L_c)}{L_f} \right)^{n_f} \right]^{1/n_f} \quad (2.4)$$

### 3. Myring

Perhitungan ini dikembangkan untuk mendapatkan hambatan minimum. Banyak *Autonomus Unmanned Vehicle* (AUV) dan *Underwater Unmanned Vehicle* (UUV) didesain menggunakan perhitungan ini. Persamaan 2.5 mengasumsikan nilai awal yang terletak pada haluan kapal selam. Bentuk haluan didasarkan pada modifikasi distribusi jari-jari semi elips.

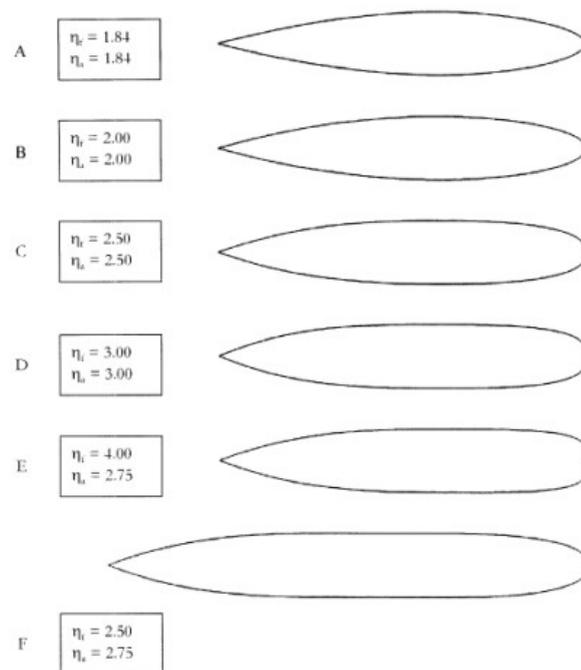
$$r(\Xi) = \frac{1}{2}d \left[ \left( \frac{\Xi + a_{offset} - a}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.5)$$

### 4. SUBOFF Model

Perhitungan SUBOFF berasal dari *Defence Advanced Research Project Agency* (DARPA). Dua model yang secara geometris sama persis didesain dengan rasio skala linear 24 dengan perhitungan detail beserta spesifikasi bentuk untuk komputasi yang dimodelkan dalam CFD dan eksperimen. Persamaan 2.6 merupakan persamaan bentuk haluan dalam  $0 < X < 3,333$  (ft).

$$r = R \{ 1,126395101x(0,3x - 1)^4 + 0,442874707x^2(0,3x - 1)^3 + 1 - (0,3x - 1)^4(1,2x + 1) \}^{1/2,1} \quad (2.6)$$

Berdasarkan komparasi Stenard (1988) telah membandingkan desain kapal selam kontemporer. Kemudian disimulasikan Mooneson et al. (2016), didapatkan variasi bentuk lambung kapal selam dengan koefisien  $n_a$  (*stern coefficient*) dan  $n_f$  (*bow coefficient*) yang berbeda.



Gambar 2.9 Bentuk lambung dengan koefisien (Moonesun et al., 2016)

## 2.4. Hidrodinamika Kapal Selam

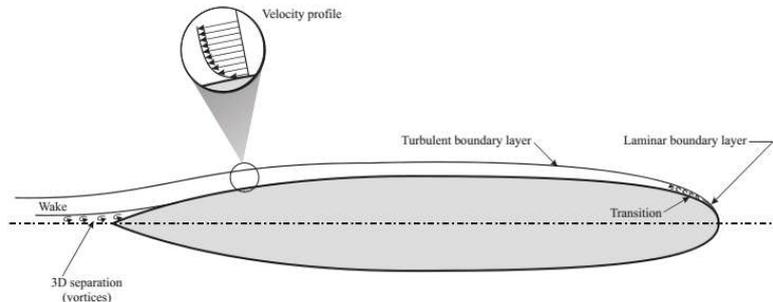
Aliran yang mengenai badan kapal selam mula-mula dipengaruhi oleh bentuk haluan kapal yang menentukan kondisi aliran sepanjang badan kapal. Pada kebanyakan kapal selam, tujuan utama desain haluan yaitu untuk mengontrol aliran laminar untuk diperpanjang sebisa mungkin. Dengan memastikan aliran laminar melewati bagian depan sonar. Tujuan ini bisa dicapai dengan menyempurnakan bentuk haluan kapal secara menyeluruh, untuk bisa menunda transisi aliran dengan menempatkan percepatan aliran melewati haluan kapal selam.

Sangat sulit untuk mempertahankan aliran laminar pada suatu objek besar yang bergerak melewati fluida. Seperti : pesawat terbang; kapal; maupun kapal selam. Pada pesawat terbang *subsonic* yang dilengkapi dengan sayap berbentuk khusus, aliran laminar dapat diwujudkan dengan keuntungan penurunan *aerodynamic drag* yang dapat meningkatkan kecepatan, memperbesar jangkauan terbang dan mengurangi kebutuhan bahan bakar. Jika aliran laminar bisa dipertahankan sesuai porsi yang signifikan pada permukaan kapal selam, maka akan bisa didapatkan keuntungan dalam kecepatan, jangkauan, bahkan bisa mengurangi *noise* suatu kapal selam.

### 2.4.1. Aliran Pada Lambung Kapal Selam

Aliran laminar dapat terjadi pada haluan kapal selam, setelah itu berubah menjadi aliran turbulen. Kecepatan aliran mengalami peningkatan pada lapisan batas dari nol pada permukaan

dan membesar terus seiring dengan perubahan jarak. Jika bentuk haluan tumpul, maka lapisan batas laminer yang terbentuk akan menimbulkan separasi aliran. Jaraknya sangat dekat dengan titik terdepan haluan, sehingga bentuk haluan ini harus dihindari.



Gambar 2.10 Aliran di sekeliling kapal selam(Joubert, 2004)

Mengingat adanya perubahan karakteristik aliran seperti yang telah disampaikan, maka hambatan dengan pola tertentu akan timbul pada lambung kapal selam. Adanya gesekan aliran fluida yang mengenai permukaan lambung menimbulkan hambatan gesek kulit atau *skin friction drag*. Hambatan gesek ini dapat dikaji berdasarkan percobaan pada sebuah pelat tipis sejajar. Aliran yang terbentuk bisa berupa aliran laminer, turbulen, ataupun campuran antara keduanya.

Aliran laminer sendiri terdiri atas satu lapisan fluida yang bergeser secara halus dari aliran di sekitarnya dengan kecepatan yang berbeda. Kecepatan berubah dari nol pada permukaan, semakin membesar ke arah menjauhi permukaan, dan akhirnya seragam sampai menjadi aliran bebas (*inviscid*) yang tidak terpengaruh oleh permukaan. Lapisan batas laminer memiliki gesekan yang kecil. Kondisi ini terjadi pada kecepatan aliran yang rendah dan sangat jarang ditemui pada kecepatan aliran tinggi.

Untuk menguji apakah suatu aliran dikatakan laminer atau turbulen, biasanya digunakan acuan nilai yang dikenal sebagai *Reynold Number* ( $R_E$ ). Bilangan *Reynold* dirumuskan sebagai rasio dari hasil perkalian antara kecepatan dan panjang benda, dibagi dengan viskositas fluida yang dilaluinya.

$$R_E = \frac{V.L}{\nu} \quad (2.7)$$

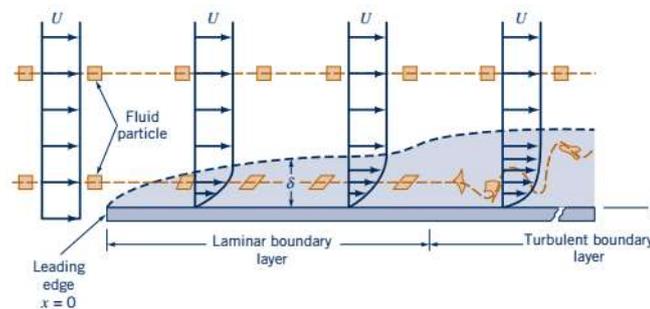
Persamaan 2.7 menjelaskan perhitungan bilangan *Reynold* dengan  $V$  : kecepatan kapal,  $L$  : panjang kapal, dan  $\nu$  : viskositas kinematis fluida.

Pada nilai bilangan *Reynold* yang tinggi, lapisan fluida yang bergeser pada lapisan batas laminer bergulung-gulung dan berputar dalam gumpalan-gumpalan. Pada kondisi ini *noise* dan hambatan gesek menjadi semakin besar. Daerah pada lapisan ini dikenal dengan lapisan batas

turbulen. Sedangkan area perubahan dari aliran laminar menjadi turbulen disebut daerah transisi.

## 2.4.2. Lapisan Batas

Lapisan batas atau *Boundary Layer* adalah lapisan fluida dari permukaan padat hingga suatu titik yang diukur terhadap permukaan padat, dimana efek viskositas dapat diabaikan. Berdasarkan pengertian tersebut, hanya dalam daerah lapisan batas saja efek viskositas penting untuk diperhitungkan. Sedangkan di luar daerah ini, lapisan batas dapat diperlakukan sebagai aliran bebas.



Gambar 2.11 Lapisan Batas pada pelat datar(Munson et al., 2012)

Pada aliran fluida aktual yang melalui permukaan suatu benda terdapat suatu daerah dimana aliran fluida masih dipengaruhi gesekan dengan permukaan benda. Pada daerah ini kecepatan bertambah, dari nol (pada permukaan benda) hingga mendekati kecepatan aliran utama (kecepatan di dalam lapisan batas dengan ketebalan sangat tipis). Semakin besar gradien kecepatan timbul, semakin penting pengaruh dari tegangan geser.

Aliran fluida yang melalui suatu permukaan benda dapat dikelompokkan menjadi dua bagian :

1. Aliran di dalam lapisan batas, dimana efek tegangan geser sangat penting.
2. Aliran di luar lapisan batas, dimana gradien kecepatan kecil sehingga efek viskositas dapat diabaikan.

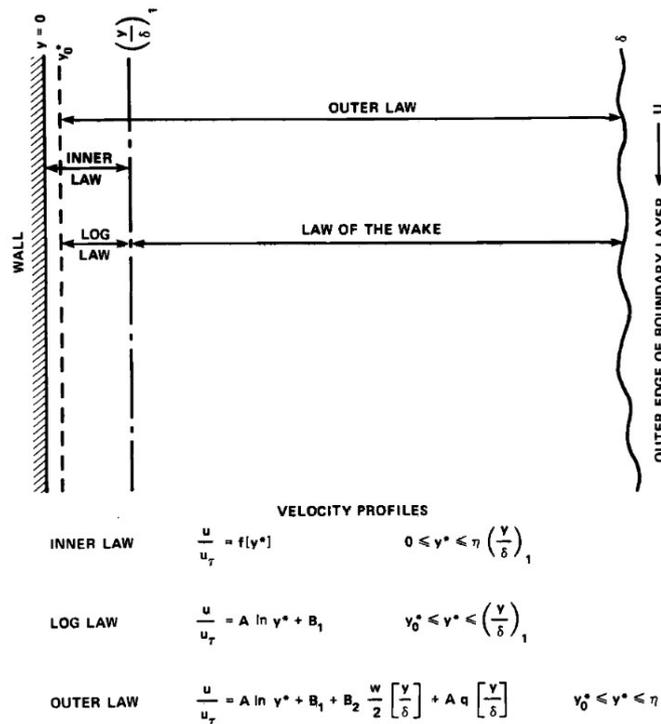
Pada proses perubahan aliran laminar menjadi aliran turbulen terjadi transisi lapisan batas. Penyebab terjadinya transisi antara lain disebabkan oleh ; kekasaran permukaan, turbulensi, pemanasan/pendinginan permukaan interkasi (*heat transfer*), kurvatur permukaan, kemampu-mampatan (*compressibility*), perbedaan tekanan (*pressure gradient*), fluktuasi tekanan yang menimbulkan kebisingan, serta penghisapan/pendorongan di permukaan kapal (*suction/blowing*).

Pada kecepatan tinggi suhu permukaan akan mengalami peningkatan, dengan insulasi yang baik, hal ini dapat dicegah. Perbedaan suhu antara benda dan lingkungan ini mempengaruhi transisi lapisan batas. Ketika suhu objek yang melewati fluida lebih dingin dibanding fluida yang dilewatinya maka aliran akan stabil.

Namun pada kasus kecepatan tinggi, permukaan objek selalu menjadi lebih panas dibanding fluida yang dilewatinya, sehingga cenderung tidak stabil. Mode mekanisme terjadinya transisi sangat banyak pada kecepatan tinggi, misalnya kekasaran. Tinggi kekasaran selama lebih kecil dari ukuran lapisan batasnya akan menjaga kestabilan, dimana semakin cepat objek bergerak, nilai kritis yang menandakan terjadinya transisi semakin besar, sehingga dapat dikatakan kekasaran menunda terjadinya transisi. Sedangkan pada kecepatan rendah, transisi terjadi akibat kurvatur, kekasaran permukaan, hingga gradien tekanan. (Tani 1969 dalam Wahyudi 2017).

Pada aliran melalui pelat datar, kecepatan di luar lapisan batas konstan sehingga tidak ada gradien kecepatan yang ditimbulkan. Lapisan batas dimulai saat aliran bebas  $U$  mulai bersinggungan dengan permukaan pelat datar, dengan semakin bertambahnya ketebalan lapisan batas, aliran di dalam lapisan batas semakin diperlambat. Lapisan batas yang terjadi di atas permukaan padat berkembang dari lapisan batas laminar, transisi, kemudian turbulen.

Lapisan batas turbulen dan laminar mempunyai perbedaan, diantaranya adalah profil kecepatannya. Pada lapisan batas turbulen profil kecepatannya lebih penuh bila dibandingkan dengan lapisan batas laminar. Lapisan batas turbulen berkembang lebih cepat daripada lapisan batas laminar dan lebih tahan terhadap separasi karena memiliki momentum yang kandungan energi kinetik yang besar dan mampu melawan gaya geser (*shear force*) maupun *adverse pressure*, apabila lapisan batas yang bergerak di daerah viskos tidak mampu melawan *wall shear stress* maupun *adverse pressure* mengakibatkan terjadinya perubahan kecepatan sepanjang kontur permukaan lengkung hingga aliran terseparasi hampir seluruhnya.



Gambar 2.12 Hukum similitude kecepatan untuk lapisan batas turbulen (Granville, 1975)

### 2.4.3. Hambatan Kapal Selam

Salah satu persyaratan dalam studi kapal selam adalah untuk memprediksi besaran tenaga yang dibutuhkan untuk menggerakkan kapal dalam kecepatan yang diinginkan, atau dengan kata lain untuk memprediksi kecepatan yang dihasilkan pada tenaga yang digunakan. Biasanya, prediksi tersebut diteliti berdasarkan pada kondisi gerak *steady-state* tanpa mempertimbangkan *maneuvering* kapal, yang diasumsikan untuk menyederhanakan proses komputasi. Dalam perhitungan geraknya, semua koordinat kecuali dalam arah gerak  $x$  dihilangkan, karena dalam asumsi gerak *steady-state* tanpa *maneuvering*, akan menghasilkan semua koefisien gerak pada nilai = 0, menghasilkan persamaan 2.8.

$$\Sigma X_{hy} = X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{qw}qw + X_{rv}rv + X_{u/u}u/u + X_{rr}r^2 + X_{qq}q^2 + X_{rp}rp + X_{app} + X_{prop} + X_{thr} + X_{bal} \quad (2.8)$$

Karena asumsi gerak yang digunakan hanya pada arah gerak  $x$ , semua nilai koefisien linear dan putar menjadi 0, maka menghasilkan persamaan 2.9.

$$\Sigma X_{hyd} = X_{u/u}u/u + X_{app} + X_{prop} + X_{thr} + X_{bal} \quad (2.9)$$

Ada beberapa metode yang digunakan untuk menghitung hambatan total kapal selam. Pada persamaan 2.9 merupakan dasar persamaan dari perhitungan hambatan yang digunakan biasanya dalam perancangan kapal, secara umum menurut Allmendinger (1990) hambatan kapal selam yang bergerak di dalam medium fluida dengan arah gerak longitudinal, terdiri dari

dua komponen hambatan, yaitu hambatan lambung polos (*bare hull*) dan hambatan bagian tambahan (*appendages*) antara lain ; *sail, fin, control surface, snorkel* dll.

$$R_T = R_{BH} + R_{APP} \quad (2.10)$$

Persamaan merupakan perhitungan hambatan dengan  $R_T$  : hambatan total,  $R_{BH}$  : hambatan lambung polos, dan  $R_{APP}$  : hambatan tambahan.

Hambatan lambung polos sendiri dapat diprediksi mengacu pada persamaan dasar mekanika fluida.

$$R_{BH} = \frac{1}{2} \rho AV^2 C_t \quad (2.11)$$

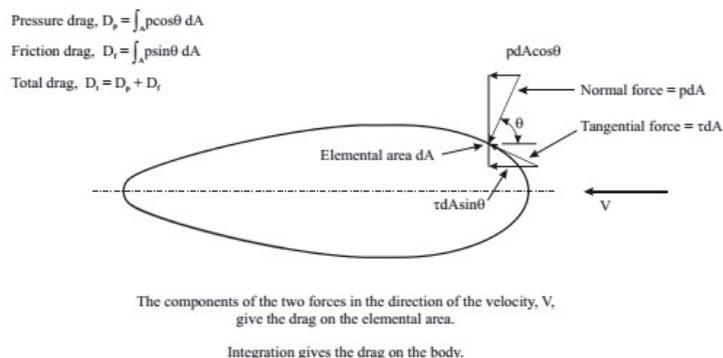
Persamaan 2.11 merupakan penjabaran persamaan 2.10 dengan acuan persamaan mekanika fluida dengan  $\rho$  : massa jenis fluida,  $A$  : luas permukaan basah, luas proyeksi, atau  $L^2$ ,  $V$  : kecepatan kapal dalam  $m/s$ ,  $C_t$  : koefisien hambatan.

Adapaun gaya hambat yang menjadi komponen hambatan total pada lambung polos kapal selam terdiri dari hambatan bentuk (*form drag*) atau disebut hambatan tekan (*pressure drag*) dan hambatan gesek (*skin friction drag*) ditulis pada persamaan 2.12.

$$R_{BH} = R_p + R_f \quad (2.12)$$

Sebuah benda pejal *streamline* yang bergerak di dalam fluida cair akan mengalami gaya hambat yang arahnya berlawanan dengan arah kecepatan benda tersebut. Gaya - gaya ini jika diuraikan, akan terbagi menjadi dua, yaitu gaya normal dan gaya tangensial. Gaya normal merupakan gaya yang arahnya tegak lurus dengan elemen luasan dari benda.

Integrasi dari komponen gaya normal pada setiap elemen luasan akan membentuk hambatan tekan. Gaya tangensial merupakan tegangan geser (*wall shear*) yang bekerja pada setiap titik di permukaan benda. Komponen tegangan geser di setiap elemen luasan tersebut jika diintegrasikan akan membentuk hambatan gesek. Pada kenyataannya seencer apapun keadaan pada medium fluida, tetap mempunyai viskositas yang dapat memperbesar gaya tangensial atau tahanan gesek.



Gambar 2.13 Gaya hambat lambung polos (Joubert, 2004)

Hambatan bentuk atau hambatan tekan merupakan gaya hambat yang diakibatkan oleh tekanan yang terjadi karena pergerakan lambung kapal selam di dalam medium fluida cair. Tekanan ini terjadi pada setiap titik sepanjang permukaan lambung kapal selam, dan nilainya semakin besar pada ujung depan haluan kapal selam yang merupakan titik stagnasi dari bentuk streamline kapal selam.

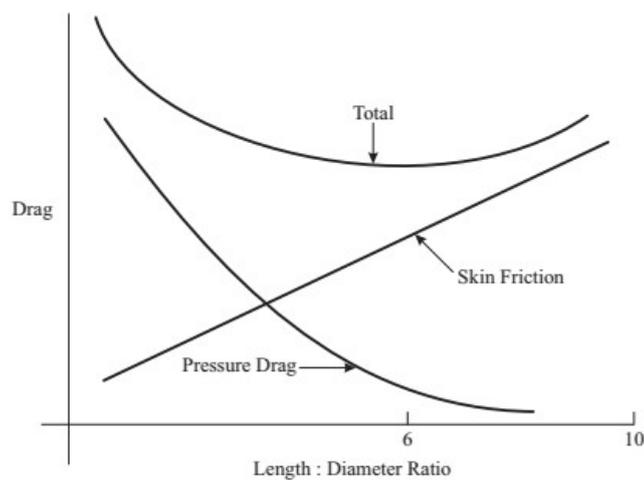
Dari titik stagnasi tekanan secara perlahan akan membesar mengikuti kontur lambung kearah belakang sampai dengan 3% panjang kapal, selanjutnya akan mengecil sampai bagian buritan, namun pada posisi ujung buritan, titik separasi mengakibatkan tekanan membesar lagi (de Fretes, 2014).

Kenaikan dan penurunan tekanan akan sesuai dengan persamaan *Bernoulli*. Nilai integral dari semua tekanan yang terjadi pada elemen luasan akan menjadi nol.

$$\int p dA = 0 \tag{2.13}$$

Hambatan bentuk dan hambatan gesek nilainya hampir sama pada bentuk kapal selam yang *streamline*. Hambatan bentuk akan semakin berkurang seiring dengan bertambah besarnya rasio L/D, yang menjadikan bentuk lambung kapal selam semakin panjang dan ramping.

Komponen kedua yang membentuk hambatan kapal selam adalah hambatan gesek. Hambatan gesek memiliki nilai yang proporsional dengan besar luasan basah kapal. Semakin besar luasan basah dari kapal selam maka akan semakin besar hambatan geseknya. Variasi dari dua jenis hambatan, hambatan tekan dan hambatan gesek terhadap rasio L/D pada volume konstan akan menunjukkan bahwa hambatan total minimum adalah pada rasio L/D sekitar 7.

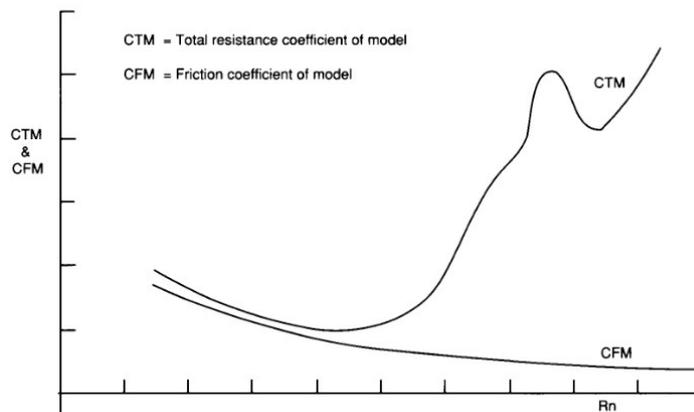


Gambar 2.14 Komponen hambatan dengan perbandingan L/D (Joubert, 2004)

#### 2.4.4. Koefisien Hambatan Total

Meskipun kapal selam modern didesain dengan dasar kemampuan pada kondisi menyelamnya, tidak bisa dipungkiri kapal selam juga beroperasi pada kondisi permukaan, seperti pada saat masuk dan keluar pelabuhan, dan kadang keperluan transit saat pelayaran.

Permasalahan hambatan kapal selam saat beroperasi pada kondisi permukaan memiliki persamaan dengan kapal permukaan biasa, kecuali untuk kapal selam adalah pada mayoritas *displacement*-nya dibawah permukaan air dengan sarat yang sangat kecil yang muncul di permukaan air. Kebanyakan kapal selam juga berukuran kecil jika dibandingkan kapal permukaan, dan ini berarti kapal selam beroperasi pada *Froude Number* tinggi untuk dapat mencapai kecepatan yang layak di atas permukaan air. Jadi komponen hambatan gelombang menjadi dominan untuk hambatan kapal pada kondisi permukaan (Burcher and Rydill 1994).



Gambar 2.15 Koefisien hambatan model kapal selam pada kondisi permukaan  
(Burcher & Rydill, 1994)

Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 2.4.3 mengenai hambatan kapal selam, bahwa gaya hambat pada hambatan total pada kapal selam terdiri dari hambatan tekan  $R_p$ , dan hambatan gesek  $R_f$ .

Berdasarkan *Principal of Naval Architecture* Lewis (1988) yang menghitung hambatan kapal secara umum, komponen penyusun hambatan total model kapal bisa ditulis ulang pada persamaan 2.14.

$$R_{TM} = R_{RM} + R_{FM(0)} \quad (2.14)$$

Dengan  $R_{TM}$  : hambatan total model kapal,  $R_{RM}$  : hambatan residual model,  $R_{FM(0)}$  : hambatan gesek pada pelat datar .

Komponen hambatan pada persamaan 2.14 bisa diuraikan sebagai persamaan 2.15 dengan menguraikan komponen hambatan residual berupa hambatan gelombang dan hambatan tekan.

$$R_T = R_W + R_{VP} + R_F \quad (2.15)$$

Dengan  $R_T$  : hambatan total,  $R_W$  : hambatan gelombang (*wave making*),  $R_{VP}$  : hambatan tekan berdasarkan kekentalan fluida (*viscous pressure*), dan  $R_F$  : hambatan gesek berdasarkan kekentalan fluida.

Secara umum untuk menghitung hambatan pada model lambung kapal dipergunakan koefisien hambatan total dengan komponen penyusun berupa hambatan kekentalan fluida (*viscous resistance*) dan hambatan gelombang (*wave making resistance*), ditulis pada persamaan 2.16.

$$C_T = C_V + C_W \quad (2.16)$$

Dalam perhitungan koefisien hambatan total pada kapal selam, Allmendinger (1990) menguraikan komponen penyusun koefisien hambatan total pada model lambung kapal selam, yang ditulis pada persamaan 2.17.

$$C_T = C_F + \Delta C_F + C_R(C_{form\ drag/pressure}) + C_W \quad (2.17)$$

Dengan  $C_F$  : koefisien hambatan gesek,  $\Delta C_F$  : koefisien hambatan tambahan,  $C_R$  : koefisien hambatan residual, dan  $C_W$  : koefisien hambatan gelombang (*wave making*). Komponen hambatan gelombang  $C_W$  sendiri dapat diabaikan ketika kapal selam beroperasi pada kedalaman lebih dari lima kali diamaternya.

Pada kecepatan rendah saat kapal selam beroperasi, komponen hambatan gesek  $C_F$  mendominasi hambatan pada lambung kapal selam. Gaya ini disebabkan karena gaya geser fluida (*shear force*) saat melewati lambung kapal. Gaya ini bergantung pada nilai bilangan *Reynolds* dan bisa dihitung berdasarkan eksperimen model. ITTC 1957 (*International Towing Tank Conference*) memberikan sebuah formulasi untuk perhitungan koefisien hambatan gesek. Dengan Perhitungan bilangan *Reynolds* dijelaskan pada Bab 2.4.1 persamaan 2.7.

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (2.18)$$

Bagaimanapun pergerakan suatu kapal selam pada saat beroperasi di laut mengakibatkan perhitungan hambatan gesek pada model tidak bisa sesuai dengan pendekatan perhitungan, untuk itu diberikan koefisien hambatan tambahan  $\Delta C_F$  dengan kisaran nilai sebesar 0.0004 – 0.0009. Komponen hambatan tambahan dihitung berdasarkan perbedaan kekasaran, skala, dan aspek-aspek korelasi antara model dengan kapal selam sebenarnya.

Hambatan residual  $C_R$  menggambarkan hambatan akibat adanya aliran pemisah (separasi) yang menghasilkan gradien tekanan yang berlawanan (dikenal juga sebagai hambatan bentuk/ hambatan tekan). Pada kecepatan tinggi hambatan residual akan sangat dominan.

Dikarenakan sifat fisika dari separasi aliran, prediksi analisis hambatan residual  $C_R$  sangat sulit dilakukan. Untuk menindaklanjuti ini, para perancang kapal melakukan pengujian pada ribuan model dan memperkirakan hambatan ini pada beberapa kecepatan. Dengan memanfaatkan porsi hambatan gesek yang dihitung berdasarkan persamaan ITTC 1957 dan disubstitusikan pada persamaan hambatan total, diketahui nilai hambatan residual. Komponen hambatan residual diasumsikan untuk menggambarkan hambatan akibat adanya aliran pemisah. Pada kapal permukaan biasa, hambatan residual terdiri dari komponen hambatan gelombang seperti dijelaskan pada paragraf sebelumnya.

Para perancang kapal menginterpolasikan nilai hambatan residual berdasarkan desain kapal yang sudah ada untuk memprediksi nilai  $C_R$  pada perancangan lambung kapal selam baru. Sayangnya, ditemukan sedikit desain dasar untuk pengujian lambung kapal selam jika dibandingkan dengan kapal permukaan dan kapal selam yang sudah ada. (Allmendinger 1990).

Tipikal nilai  $C_R$  berdasarkan luasan permukaan basah kapal bisa dihitung berdasarkan Tabel **Error! Reference source not found..**

Tabel 2.1 Tipikal nilai  $C_R$

Bentuk lambung	$C_R \times 10^3$
Deep Quest	0,677
DSRV	0,435
Fleet Submarine	0,390
Albacore	0,100

## 2.5. *Computational Fluid Dynamics*

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) diperkenalkan sebagai pendekatan baru dalam studi filosofi dan pengembangan disiplin ilmu dinamika fluida, disamping pendekatan teori dan eksperimental. Dengan datangnya teknologi komputer berkecepatan tinggi yang dikombinasikan dengan pengembangan algoritma numerikal yang akurat untuk memecahkan persoalan fisika pada komputer, telah merevolusi studi pada dinamika fluida dewasa ini.

Metode pendekatan *computational fluid dynamics* merupakan metode perhitungan numerik untuk mensimulasikan interaksi antara zat cair dan gas, dengan permukaan yang didefinisikan oleh kondisi batas yang melibatkan peran teknologi komputer (Anderson, 1995).

Kemampuan CFD semakin nyata dengan kecepataannya dan pencapaian yang mengesankan dalam hidrodinamika kapal, namun CFD diketahui mengalami perkembangan yang lambat dalam penggunaannya di bidang industri, karena sebagian besar penggunaannya terbatas pada kalangan universitas dan R&D laboratorium saja.

Meskipun begitu, lambat laun CFD dapat mengubah metode desain dalam ilmu teknik dari pendekatan desain spiral *build-and-test* menjadi pendekatan desain berbasis simulasi (SBD) yang menawarkan konsep desain berbeda dalam hal peningkatan keamanan, energi, dan ekonomi (Stern et al., 2015).

Pada bidang arsitektural kapal, perhitungan hambatan dan *seakeeping* kapal dapat dihitung dengan metode CFD. Prediksi nilai hambatan adalah penerapan pendekatan tertua dari CFD pada hidrodinamika kapal. Akurasinya telah mengalami peningkatan yang signifikan sejak Gothenburg 1980 (G1980), yaitu *workshop* pertama CFD yang digelar pada tahun 1980. Pada G1980, 89 naskah dalam prediksi hambatan telah didokumentasikan, yang menjadi jumlah terbanyak dalam gelaran *workshop* (Larsson et al., 2014 dalam Stern et al., 2015).

### 2.5.1. Perhitungan

Segala sesuatu yang berhubungan dengan CFD, dari permasalahan yang satu ke lainnya, saat ini berdasarkan pada perhitungan fundamental dari persamaan *Navier-Stokes*. Dalam literatur CFD saat ini, solusi *Navier-Stokes* berarti solusi untuk permasalahan aliran *viscous* menggunakan semua perhitungan didalamnya.

Persamaan *Navier-Stokes* menjelaskan pergerakan dari suatu fluida seperti cairan dan gas. Dalam persamaan ini, asumsi pertama adalah bahwa fluida tidak dapat dimampatkan (*incompressible*), yang meliputi persamaan kekekalan massa (*conservation of mass*).

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f \quad (2.19)$$

Persamaan 2.19 merupakan bentuk umum persamaan *Navier-Stokes* dengan  $V$  : kecepatan aliran,  $\Delta$  : perpindahan,  $\rho$  : massa jenis fluida,  $\mu$  : hambatan gesek (*frictional resistance*) yang mempresentasikan viskositas,  $f$  : gaya luar, dan  $t$  : waktu.

Metode yang biasa digunakan untuk menyelesaikan *governing equation* diatas adalah metode diskrit. Beberapa metode diskrit yang digunakan antara lain: *Finite Element Method* (FEM) dan *Finite Volume Method* (FVM).

*Finite element method* (FEM) menggunakan fungsi bentuk sederhana (linear ataupun kuadrat) pada elemen yang menggambarkan variasi variabel aliran. Persamaan pengendali dapat dipenuhi dengan penyelesaian secara eksak. Jika perkiraan persamaan tersebut tidak terpenuhi maka akan terjadi sisa (*residual*) yang dapat diukur kesalahannya. Kemudian sisa tersebut diminimalkan dengan cara mengalikan dengan fungsi berat dan pengintegralan. Hasilnya adalah fungsi aljabar untuk koefisien yang tidak diketahui dari fungsi perkiraan.

*Finite volume method* (FVM) dikembangkan dengan formulasi khusus metode beda hingga (*finite difference*). Secara global, algoritma numerik yang dimiliki oleh metode beda hingga adalah dengan melakukan pengintegralan persamaan pengendali aliran fluida terhadap seluruh kontrol volume dari domain penyelesaian. Kemudian dilanjutkan dengan pendiskritan yang meliputi substitusi berbagai pendekatan beda hingga dari suku-suku persamaan yang diintegrasikan tersebut. Sehingga menggambarkan proses aliran seperti konveksi, difusi dan *source*. Pada tahap ini setiap persamaan integral akan diubah menjadi persamaan aljabar. Setelah itu persamaan-persamaan aljabar diselesaikan dengan metode iterasi (Ahadyanti, 2014 dalam Putra, 2016).

### 2.5.2. Perangkat Lunak

Ada beberapa tahapan umum yang terdapat pada simulasi untuk proses tersebut, yaitu : *Pre Processor*, *Solver*, dan *Post Processor*.

#### 1. *Pre Processor*

*Pre processor* mengandung input dari permasalahan fluida. Beberapa tahapan dalam bagian ini antara lain :

- a. Pendefinisian dari geometri daerah kajian dan domain komputasi.
- b. *Grid generation*, yaitu pembagian domain ke beberapa domain yang lebih kecil yaitu *grid* atau *mesh* dari elemen kecil (*cells*).
- c. Pemilihan fenomena fisik dan kimia dari masalah yang dimodelkan.
- d. Pendefinisian properti fluida.
- e. Spesifikasi kondisi batas yang sesuai pada *cell* yang bersinggungan dengan batas domain.

Solusi dari masalah fluida didefinisikan pada titik di dalam tiap *cell*. Akurasi dari solusi CFD diatur oleh banyaknya jumlah *cell* dalam *grid*. Secara umum semakin besar jumlah *cell* maka akurasi dari solusi yang dihasilkan menjadi lebih baik. Terdapat 2 bagian dominan di dalam tahap *pre processor* ini, yaitu definisi geometri dari domain dan *grid generation* (Mahardika, 2007).

## 2. Solver

Terdapat beberapa teknik utama dalam mencari solusi numerik, yaitu *finite difference*, *finite element*, dan *spectral method*. Secara garis besar metode numerik yang menjadi dasar dari *solver*, terbagi dalam beberapa tahapan :

- a. Aproksimasi dari variabel aliran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi-fungsi sederhana.
- b. Diskritisasi dengan melakukan substitusi dari aproksimasi tersebut ke persamaan atur aliran dan dilanjutkan dengan manipulasi matematis.
- c. Solusi dari persamaan aljabar.

Metode lain dikembangkan dari ketiga metode tersebut, salah satunya metode volume hingga (*finite volume*). Metode ini merupakan pengembangan dari metode *finite difference* yang memiliki formulasi khusus. Algoritma numeriknya mengandung langkah sebagai berikut :

- a. Integrasi dari persamaan atur aliran dari fluida sepanjang semua volume atur dari domain.
- b. Diskritisasi yang melibatkan substitusi dari berbagai macam aproksimasi *finite difference* ke persamaan yang diintegrasikan. Sehingga persamaan integral diubah menjadi persamaan aljabar.
- c. Solusi dari persamaan aljabar dengan metode iteratif.

## 3. Post Processor

Tahap ini merupakan tahap penampilan hasil (*output*) dari proses simulasi numerik. Hasil dari proses simulasi numerik. Hasil dari proses simulasi numerik ini dapat berupa: luas, gaya, volume, torsi dan sebagainya. Selain itu, fitur pada *post processor* ini juga dapat menampilkan data visual. Hasil visual yang dapat ditampilkan dari fitur *post processor* ini diantaranya adalah sebagai berikut :

- a. Geometri domain
- b. Geometri model
- c. *Surface* fluida

- d. Plot vektor
- e. Plot kontur
- f. Plot aliran fluida
- g. Animasi

Dan lainnya (Ahadyanti, 2014 dalam Putra, 2016)

### 2.5.3. Permodelan *Boundary Layer* dalam CFD

Untuk bisa memprediksi hambatan (*viscous pressure drag*) secara akurat melalui analisis CFD, *boundary layer* harus diketahui secara akurat. Hal ini bisa dilakukan dengan dua cara; Pertama, *node-node* yang dikelilingi oleh *control volume* dapat diposisikan dekat dengan objek untuk dapat memecahkan persoalan *boundary layer*. Sayangnya, hal ini membutuhkan *node* dengan jumlah yang relatif banyak dan waktu komputasi yang lama. Alternatif kedua, yang sudah secara luas digunakan yaitu dengan memposisikan sebuah *node* sedekat mungkin dengan permukaan objek sehingga *boundary layer* yang terbentuk (diantara *node* dan permukaan objek) dapat diprediksi dengan profil kecepatan pelat datar.

Prediksi akurat secara layak dapat dilakukan karena *turbulent boundary layer* dibawah nol atau gradien tekan sederhana mengikuti profil logaritmik (White, 1999 dalam Baker 2004). Ini berarti bahwa hubungan antara *wall shear*, *free stream velocity*, dan *velocity* pada satu titik di batas *boundary layer* dapat ditemukan. Seperti pada persamaan 2.20, 2.21, dan 2.22.

$$u^+ = \frac{U_t}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln(y^+) + C \quad (2.20)$$

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu} \quad (2.21)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.22)$$

Pada persamaan diatas  $y^+$  merupakan simbol yang menyatakan jarak dari dinding objek, menunjukkan dimana fokus pemecahan masalahnya cenderung relatif terhadap ukuran dari *boundary layer*,  $u^+$  merupakan simbol *near wall velocity*,  $U_t$  merupakan *velocity tangent* terhadap dinding pada jarak  $\Delta y$  dari dinding,  $u_t$  merupakan *friction velocity*, dan  $C$  serta  $k$  merupakan konstanta fluida.

Persamaan lanjutan digunakan untuk dapat menghitung ketinggian *boundary layer*. Yaitu persamaan *wall shear stress*, seperti pada persamaan 2.23.

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U^2 \quad (2.23)$$

Ambiguitas dalam perhitungan  $\Delta y$  yang melingkupi nilai  $C_f$ , selanjutnya digunakan persamaan dari hasil empiris untuk menyelesaikan persamaan *wall shear stres*. Seperti pada persamaan 2.24 untuk menghitung koefisien gesek pelat berdasarkan kondisi aliran yang dimodelkan dari luar model (Zhang, 2018).

$$C_f = 0.058Re^{-0.2} \quad (2.24)$$

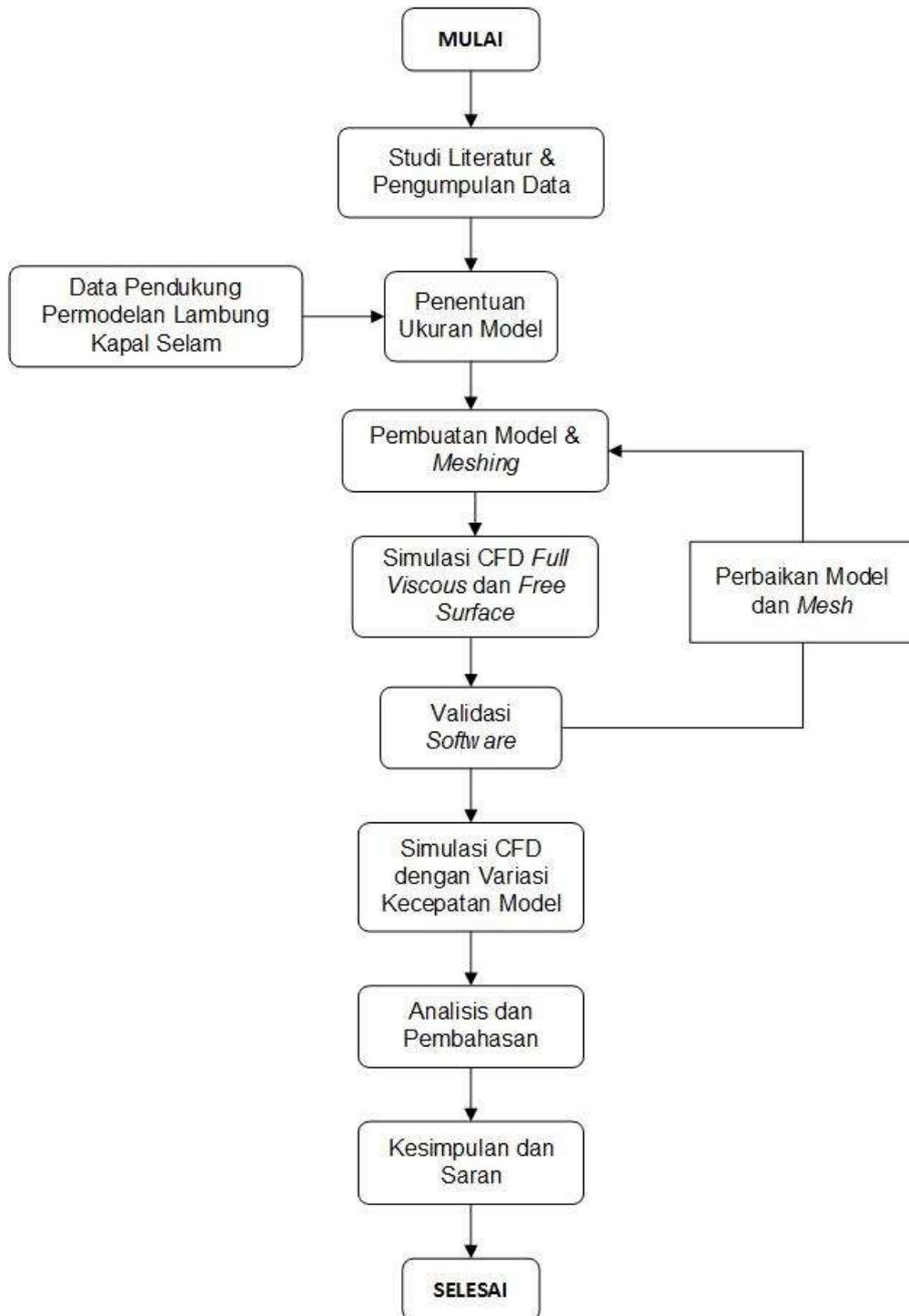
Analisis CFD selanjutnya dapat menentukan nilai aliran di titik yang cukup dekat dengan *boundary layer* untuk meng-ekstrapolasikan *wall shear stress*-nya. Hal ini menarik untuk dicatat, bahwa prosedur ini hanya valid untuk sebaran nilai  $y^+$  (secara umum antara 20 dan 100), dan nilai  $y^+$  untuk *node* yang dekat dengan permukaan model dapat ditentukan sampai analisis konvergen karena tergantung nilai *wall shear*-nya.

Dalam hal ini teori pelat datar digunakan untuk memperkirakan ketinggian *boundary layer* bisa sangat berguna, maka perkiraan untuk jarak *node* terdekat bisa disimbolkan dengan  $\Delta y$  (Baker, 2004).

Halaman ini sengaja dikosongkan

# BAB 3 METODOLOGI

## 3.1. Bagan Alir



Gambar 3.1 Bagan alir pengerjaan Tugas Akhir

## **3.2. Langkah Pengerjaan**

Langkah pada pengerjaan Tugas Akhir ini telah ditampilkan pada Gambar 3.1 Bagan alir pengerjaan Tugas Akhir. Penggunaan bagan alir dimaksudkan untuk mempermudah proses penyelesaian Tugas Akhir.

Metode yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah metode numerik dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS.

### **3.2.1. Studi Literatur**

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang baik akan teori dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Permasalahan yang dihadapi dalam Tugas Akhir ini meliputi pembuatan model lambung polos kapal selam dengan 5 variasi bentuk haluan dan pengukuran hambatan dalam dua kondisi, (menyelam dan permukaan) yang terjadi pada variasi lambung.

Studi yang dilakukan berkaitan dengan proses desain lambung polos kapal selam yang optimal, dengan mempertimbangkan desain-desain yang sudah teruji dan pengukuran hambatan pada bentuk lambung polos kapal selam, bagaimana kondisi menyelam dan permukaan mempengaruhi karakteristik hambatannya. Pemahaman dalam penggunaan metode CFD juga perlu dimaksimalkan agar analisis berjalan sesuai dengan prosedur yang benar.

Literatur yang digunakan untuk pengerjaan Tugas Akhir ini antara lain didapat dari : buku, jurnal ilmiah, artikel, tugas akhir, thesis, disertasi, dan seminar.

### **3.2.2. Pengumpulan Data**

Pengumpulan data didapatkan dari berbagai sumber literatur. Data pendukung yang dihimpun berguna sebagai acuan dalam pembuatan model lambung, juga proses serta perhitungan hambatan pada Tugas Akhir ini.

Data pendukung yang digunakan untuk memecahkan persoalan pada penelitian Tugas Akhir ini, meliputi :

1. Data Ukuran Model Lambung Polos Kapal Selam

Data ukuran model lambung polos dibutuhkan sebagai titik awal proses penelitian. Ukuran lambung yang telah didapatkan selanjutnya dimodelkan menjadi bentuk lambung polos kapal selam 3 dimensi. Model yang diwujudkan berguna sebagai bahan uji yang merupakan inti penelitian.

## 2. Data Proses Analisis Hambatan

Data pendukung berupa proses analisis hambatan dengan perangkat lunak merupakan prosedur operasional yang digunakan. Data didapat dari penelitian terdahulu mengenai perhitungan hambatan dengan metode CFD khususnya dengan perangkat lunak ANSYS. Pentingnya mendapat data proses analisis hambatan dari penelitian yang sudah berhasil sebelumnya, agar prosedur yang dilakukan sesuai dengan aturan yang berlaku.

### 3.2.3. Pembuatan Model

Tahap pembuatan model dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak permodelan 3 dimensi AutoCAD. Berdasarkan data yang diperoleh berupa koordinat bentuk 2 dimensi, maka dilakukan permodelan menjadi 3 dimensi sesuai dengan metode permodelan yang dilakukan, yaitu menggunakan revolusi geometri.

Permodelan yang dilakukan menggunakan AutoCAD menghasilkan 5 bentuk model dengan ketentuan sebagai berikut :

Tabel 3.1 Asumsi permodelan pada pengujian numerik

$V$ (knot)	$L$ (m)	$L_f$ (m)	$PMB$ (m)	$L_a$ (m)	$D$ (m)	$L/D$	Bentuk Haluan
4 variasi	7	2,4	1	3,6	1	7	5 variasi

Nantinya, dari model yang telah diwujudkan akan dilakukan proses *meshing* pada ICEM CFD. Proses *meshing* termasuk proses pendefinisian elemen atau *grid* yang nantinya dilakukan analisis hambatannya dalam ANSYS CFX.

### 3.2.4. Simulasi CFD

Pada tahap ini digunakan aplikasi CFD sebagai *solver* dan *simulator* dalam penelitian Tugas Akhir ini. Berikut tahapan yang digunakan dalam simulasi CFD :

#### 1. *Pre-Processor*

Pada tahap ini digunakan perangkat lunak ANSYS CFX-Pre untuk menentukan kondisi lingkungan uji, yang meliputi *inlet*, *outlet*, interaksi dinding batas dengan fluida dan objek pengujian, kecepatan aliran fluida, temperatur dan kondisi-kondisi lain yang berpengaruh pada proses pengujian.

## 2. *Processor/Solver*

*Solver* atau *processor* merupakan tahap perhitungan yang dilakukan pada aplikasi CFD. Dalam proses *solver* ini ditentukan batas konvergensi dengan besaran tertentu agar mencapai hasil yang diinginkan.

## 3. *Post Processor*

Pada tahap akhir ini dilakukan visualisasi hasil analisis menggunakan ANSYS CFD-Post. Aplikasi ini menyediakan informasi berupa data, gambar hambatan yang terjadi.

### 3.2.5. Validasi Data

Pada tahap ini data yang telah diperoleh dari hasil simulasi numerik dengan perangkat lunak ANSYS akan divalidasi. Terdapat 2 parameter yang digunakan untuk tahap validasi data, yaitu :

#### 1. Konvergensi

Analisis kebenaran internal perangkat lunak, dimana tingkat kesalahan yang dirancang dipenuhi oleh model yang dikembangkan. Pada tahap ini tingkat kesalahan ditentukan pada pada konvergensi  $10^{-5}$  untuk simulasi *full viscous* dan  $10^{-4}$  untuk simulasi *free surface*.

#### 2. Grid Independensi

Besarnya jumlah elemen atau *grid* yang digunakan dalam perhitungan akan menentukan keakuratan hasil yang diperoleh. Karena jumlah elemen mempengaruhi pembacaan bentuk geometri pada saat pemrosesan data uji dalam perangkat lunak. Pada tahap ini dilakukan analisis dengan variasi jumlah elemen berbeda, dimulai dari jumlah elemen terkecil. Juga memperhatikan aturan minimal lima variasi elemen agar elemen optimal yang didapatkan benar-benar akurat.

Hasil simulasi dinyatakan sah apabila jumlah elemen yang digunakan tidak mempengaruhi hasil simulasi. Pada penelitian ini hasil simulasi dikatakan sesuai aturan apabila selisih hasil kurang dari 2 % dari hasil analisis yang pertama.

### 3.2.6. Analisis dan Pembahasan

Pada tahap ini dilakukan analisis data hasil simulasi model numerik pada perangkat lunak ANSYS. Data yang diperoleh dari hasil simulasi model numerik ini digunakan untuk menentukan perhitungan dan kesimpulan dari Tugas Akhir ini. Berikut ini adalah analisis numerik yang dilakukan :

#### 1. Simulasi *Full Viscous*

Dilakukan analisis terhadap besarnya hambatan *viscous (drag force)* yang terjadi pada lambung polos kapal selam pada kondisi menyelam. Dan fenomena yang terjadi pada berbagai variasi kecepatan yang diberlakukan.

#### 2. Simulasi *Free Surface*

Dilakukan analisis terhadap besarnya hambatan total dan fenomena yang terjadi pada berbagai variasi kecepatan yang diberlakukan.

### **3.2.7. Kesimpulan**

Kesimpulan diambil dengan mengacu pada hasil analisis data yang telah diperoleh, serta disesuaikan dengan dasar teori pada data literatur.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB 4**

### **PERMODELAN DAN SIMULASI CFD**

#### **4.1. Permodelan Uji Numerik**

Permodelan pada tahap ini terbagi menjadi 2, yaitu : pertama, dilakukan permodelan lambung polos kapal selam berjumlah 5 variasi. Permodelan yang dilakukan terbagi menjadi 3 bagian : haluan, PMB (*Parallel Middle Body*), dan burita sesuai dengan Gambar 2.7 Bab 2.3 Dasar Desain Kapal Selam. Pada tiap bagian mempunyai panjang yang berbeda sesuai asumsi yang dijelaskan pada Tabel 3.1. Permodelan difokuskan pada bentuk haluan, karena pada pengujian numerik nantinya, analisis hambatan lambung polos kapal selam divariasikan berdasarkan bentuk haluannya.

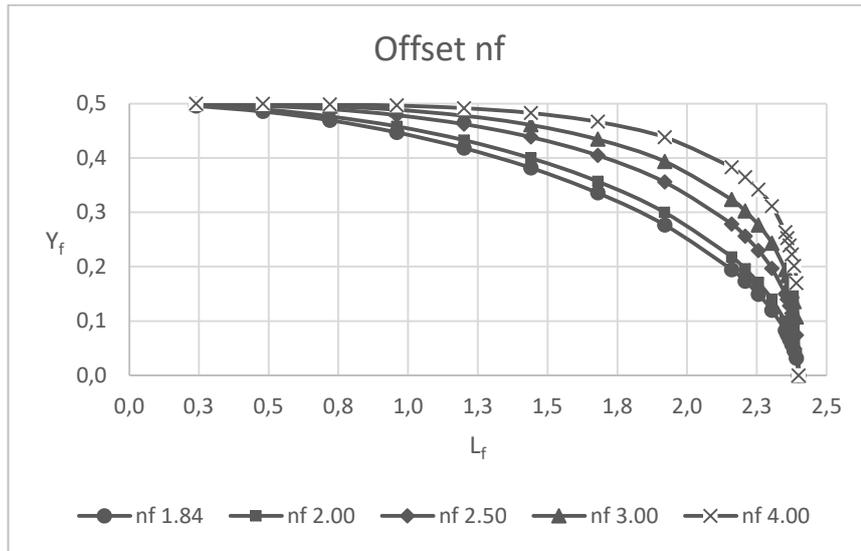
Data yang digunakan untuk membuat model lambung polos, didapat dari rangkuman Moonesun et al. (2016), ditampilkan pada Gambar 2.9. berupa geometri haluan kapal selam beserta koefisien  $n_f$ .

Kedua, dilakukan pendefinisian elemen pada tiap bentuk lambung polos kapal selam untuk bisa dilakukan proses perhitungan hambatan. Pendefinisian elemen digunakan untuk pengujian hambatan *full viscous* dan *free surface*.

##### **4.1.1. Permodelan Lambung Polos Kapal Selam**

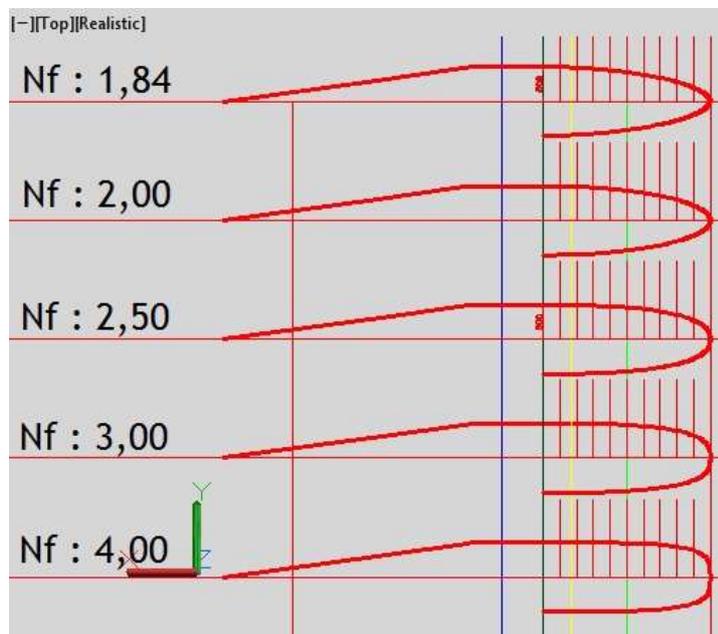
Proses permodelan lambung polos kapal selam dimulai dengan pembacaan data pendukung yang telah diperoleh berupa gambar dengan variasi koefisien  $n_f$  sejumlah 5 variasi, yaitu : 1,84; 2,00; 2,50; 3,00; dan 4,00. Kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan bentuk 2 dimensi.

Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan 2.1, yaitu persamaan untuk mendapatkan tinggi kurvatur haluan lambung polos kapal selam. Dari perhitungan yang dilakukan didapatkan koordinat nilai kurvatur haluan pada sumbu  $y$  sejumlah 19 titik koordinat, seperti pada Gambar 4.2. Dikarenakan permodelan menggunakan teori revolusi bentuk atau perputaran bentuk, titik koordinat yang didapatkan masih berupa setengah kurvatur dari bentuk haluan lambung polos kapal selam.



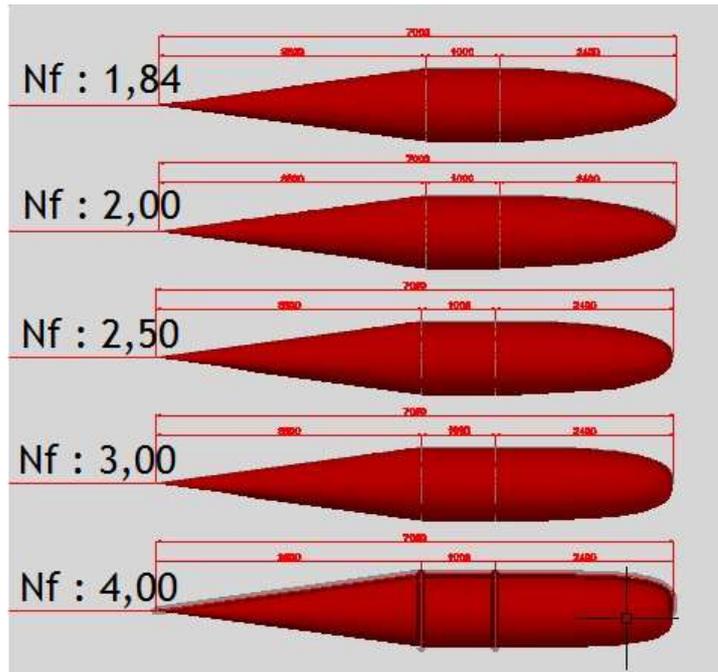
Gambar 4.1 Grafik  $nf$  model

Dari koordinat kurvatur Haluan lambung yang diperoleh dari perhitungan, dimodelkan dalam AutoCAD menjadi bentuk 3 dimensi sehingga terwujud gambaran bentuk haluan lambung polos. Kemudian ditambahkan bentuk PMB dan buritan sesuai dengan ketentuan asumsi desain yang digunakan yaitu PMB berbentuk silinder dan buritan berbentuk kerucut.



Gambar 4.2 Permodelan bentuk 2 dimensi

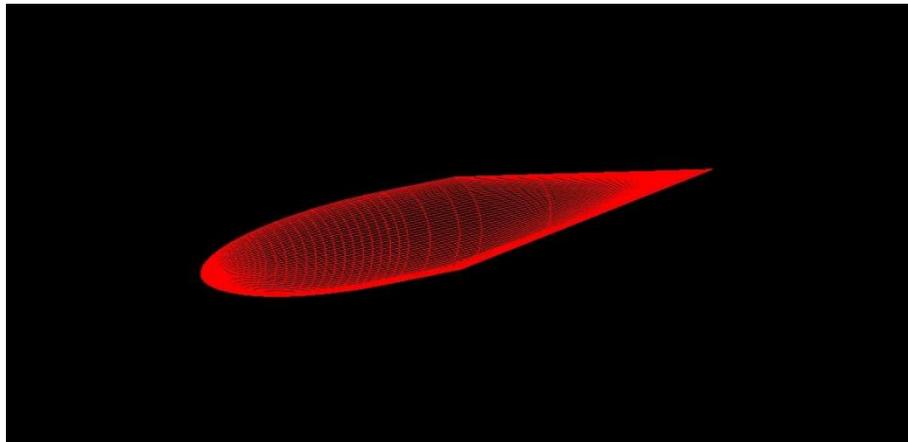
Dari permodelan yang dilakukan, didapatkan bentuk lambung polos kapal selam seperti ditunjukkan pada Gambar Gambar 4.3 Permodelan bentuk 3 dimensi. Selanjutnya masing-masing model di *import* ke dalam perangkat lunak pendefinisian meshing ICEM CFD. Dengan menggunakan fitur *export* dalam format *.iges*.



Gambar 4.3 Permodelan bentuk 3 dimensi

#### 4.1.2. Pendefinisian *Meshing*

Dari tahapan permodelan 3 dimensi didapatkan *file* dengan format *.iges* yang berjumlah 5 bentuk lambung polos. Dengan fitur *import* model bisa diproses dalam perangkat lunak ICEM CFD.



Gambar 4.4 Hasil *import* model di ICEM CFD

*Meshing* dalam tahap ini menggunakan fitur *symmetry* yaitu bentuk lambung didefinisikan dalam setengah bentuknya. Karena bentuknya yang simetris dan dimaksudkan untuk meningkatkan waktu simulasi dalam CFX Solver.

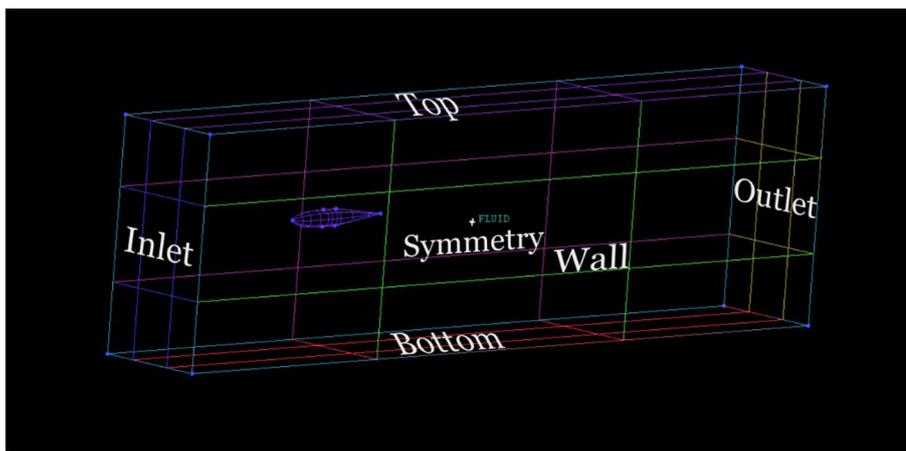
Dipilih jenis *meshing*, *Unstructured Mesh* yaitu *Tetra/Prism Meshing*. Jenis ini dipilih karena *meshing* bisa dilakukan secara sederhana, serta karakteristik pembagian elemennya yang

berbentuk segitiga, sehingga bisa untuk semua bentuk model. Tahapan yang dilakukan dalam proses *Meshing* ini sebagai berikut :

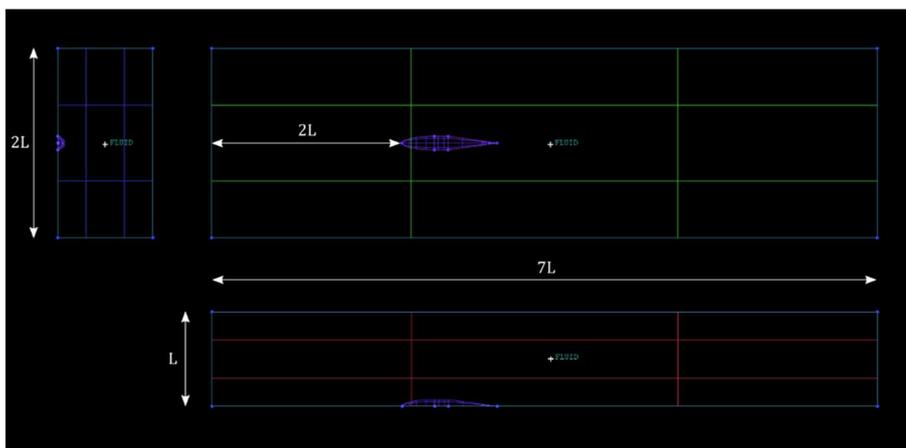
### 1. Pemberian dinding uji (*boundary domain*)

Pemberian dinding uji yang terdiri dari Inlet, Outlet, Wall, Top, Bottom, Symmetry, dan Model. Ukuran dinding uji yang digunakan berdasarkan pada Moonesun et al. (2016) yaitu sebagai berikut :

- Jarak sisi depan (*Inflow*) terhadap sumbu model berjarak  $2L$ .
- Jarak dinding samping terhadap sumbu model berjarak  $L$ .
- Jarak sisi belakang (*Outflow*) terhadap sumbu model berjarak  $4L$ .
- Jarak atas dan bawah terhadap sumbu model berjarak  $L$ .



(a)

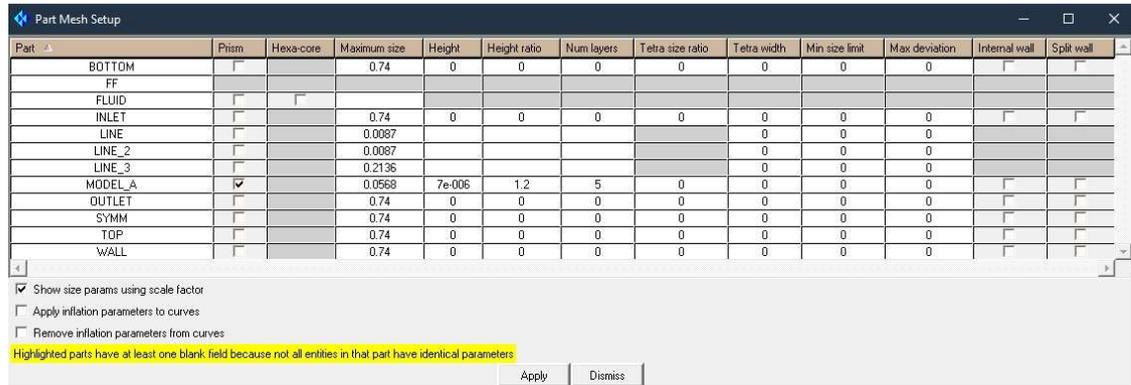


(b)

Gambar 4.5 (a) Pendefinisian domain fluida(b) Ukuran dinding *domain* fluida simetris

## 2. Pendefinisian masing-masing dinding uji

Setelah pemberian *domain* dilakukan pada geometri, langkah selanjutnya adalah proses *meshing*. Proses *meshing* dilakukan dengan membagi model lambung polos menjadi beberapa bagian (*part meshing*). Proses *part meshing* ini bertujuan untuk memberikan ketentuan kerapatan elemen pada masing-masing bagian.



Gambar 4.6 Pengaturan *part meshing*

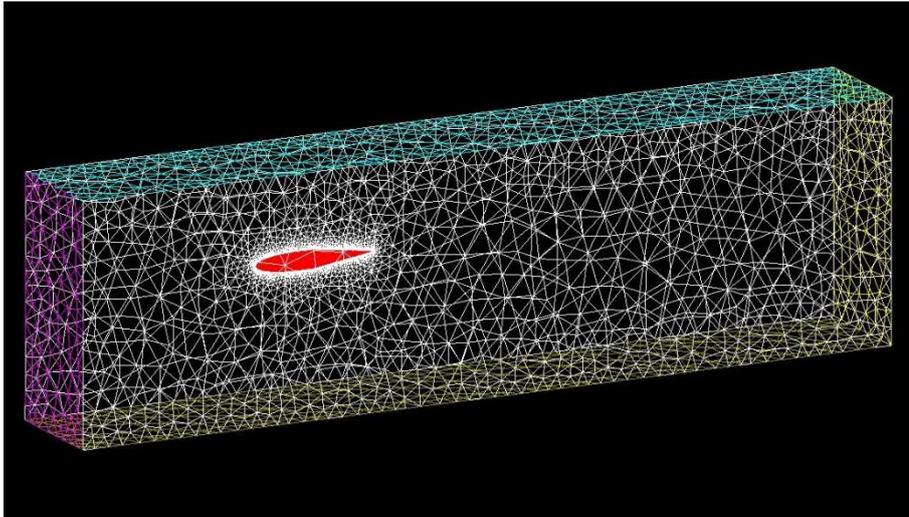
## 3. Perlakuan $y^+$ pada model uji

Proses ini dilakukan untuk memprediksi ketinggian dinding *boundary layer* dengan penggunaan prisma pada *meshing* di sekitar badan model menggunakan besaran  $y^+$ .  $Y^+$  merupakan besaran yang tidak memiliki satuan dan digunakan untuk memprediksi ukuran *near wall cell boundary layer*. Perhitungan  $y^+$  berhubungan dengan model turbulensi yang dipakai, pada analisis ini dipakai model turbulensi SST (*Shear Stress Transport*), maka pemecahan ketinggian dinding *boundary layer* mensyaratkan untuk nilai  $y^+ \approx 1$ .

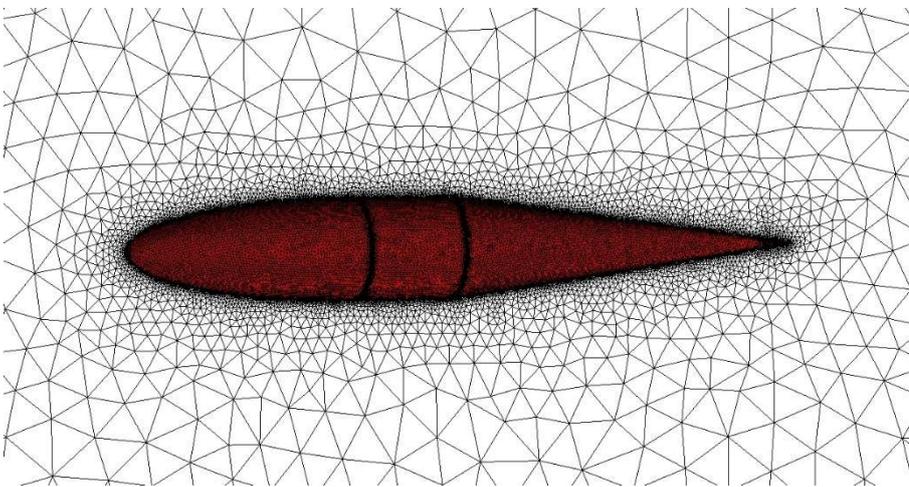
Seperti telah dijelaskan pada Bab 2.5.3 Permodelan *Boundary Layer* dalam CFD, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan jarak atau ketinggian dinding *boundary layer* sesuai dengan syarat yang ditentukan untuk model turbulensi SST. Berdasarkan uji analisis yang dilakukan menggunakan 4 variasi kecepatan, maka didapatkan 4 variasi ketinggian *boundary layer*  $\Delta y$ . Ditampilkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perhitungan  $y^+$  model dan kecepatan

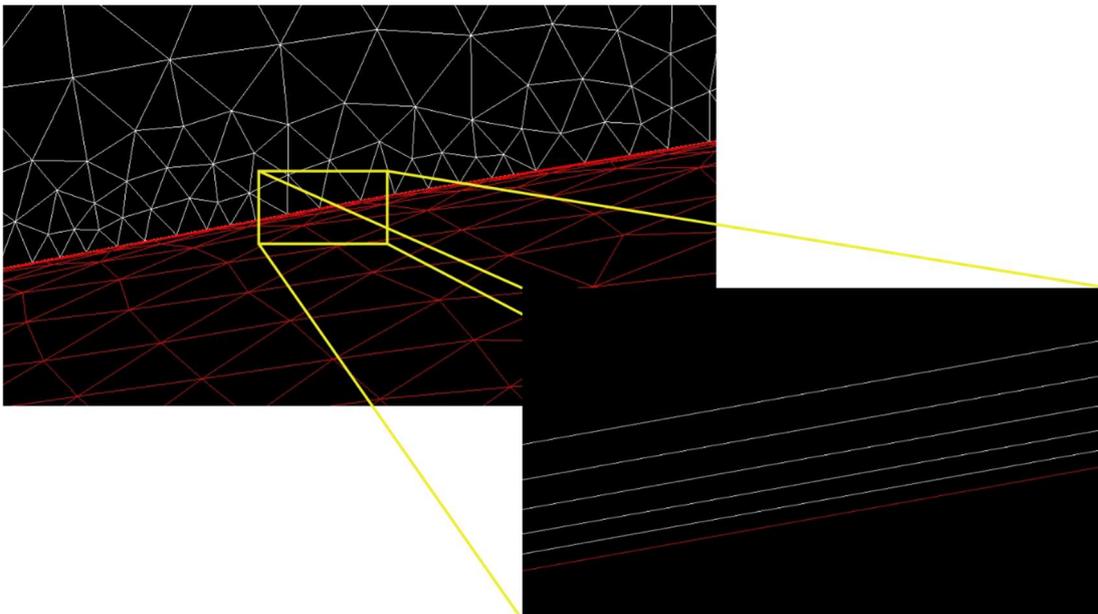
Kecepatan Uji	$\Delta y \times 10^{-3}$
10 knot	0,007 m
15 knot	0,005 m
20 knot	0,004 m
25 knot	0,003 m



Gambar 4.7 Hasil *meshing*



Gambar 4.8 *Meshing* model



Gambar 4.9 *Meshing* disekitar model lambung polos

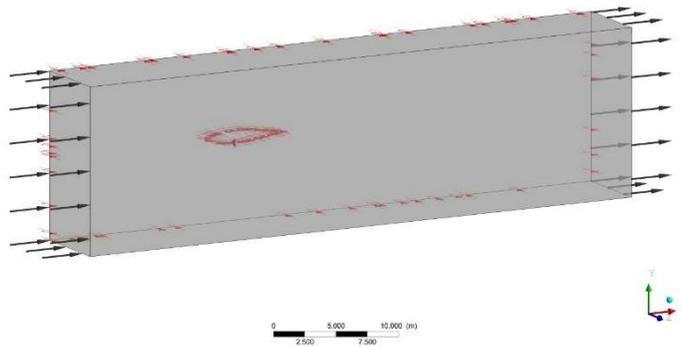
## 4.2. Simulasi CFD

### 4.2.1. Tahap CFX-Pre Processor

#### A. Simulasi Kondisi Menyelam

Proses ini dilakukan setelah permodelan dan *meshing* selesai. Pada tahap *Pre Processor* ini ditentukan kondisi batas pada model uji yaitu pada model lambung polos kapal selam, beserta domain uji yang meliputi; *Inlet*, *Outlet*, dan *Wall*. Setiap aturan yang ditentukan pada tahap ini akan berpengaruh pada hasil simulasi nantinya.

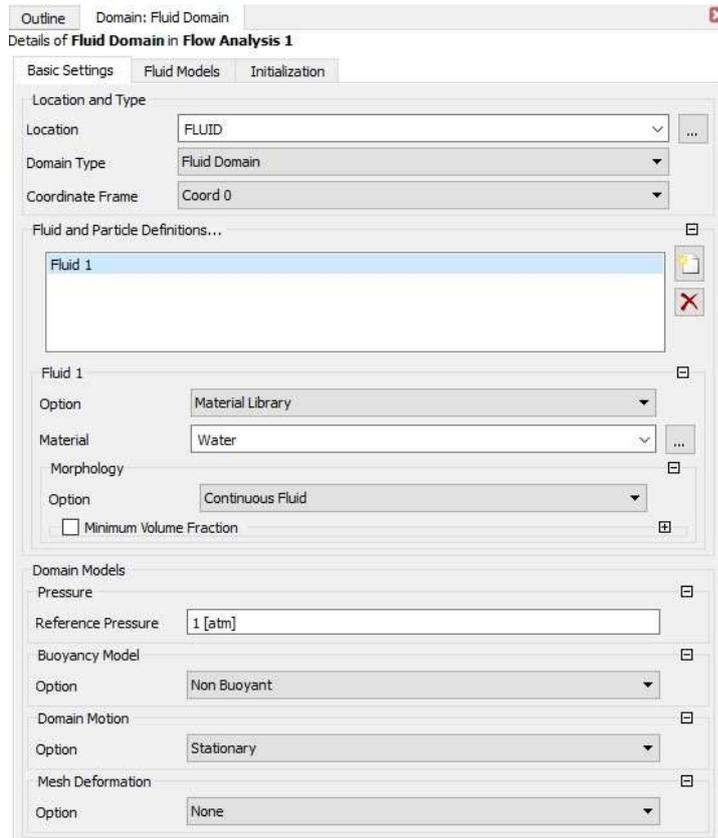
Pada kondisi menyelam, berlaku aturan simulasi kekentalan murni (*full viscous*) yang berarti perlakuan fluida dalam simulasi ini hanya satu fasa fluida saja yaitu air, sehingga tidak terjadi adanya fraksi antar fluida.



Gambar 4.10 Kondisi batas simulasi menyelam

#### 1. Domain Fluida

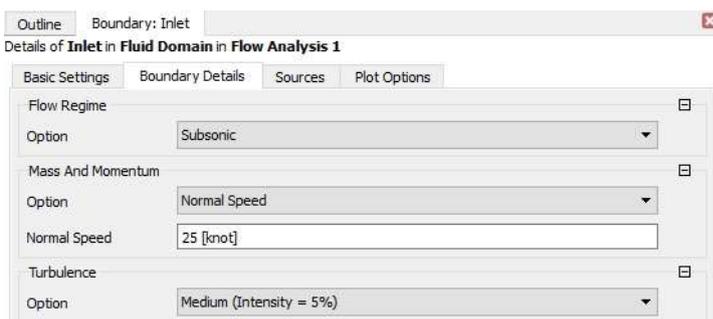
Pada tahap pengaturan domain fluida ini, model turbulensi ditentukan. Model turbulensi SST (*Shear Stress Transport*) dipilih sesuai pada perkiraan dalam *meshing*. Pengaturan pada bagian ini hanya pemilihan model turbulensi saja, pengaturan lain dibiarkan *default*. Model turbulensi SST digunakan karena telah terbukti memberikan akurasi yang baik untuk permodelan berbagai aliran, juga menampilkan tingkah laku yang baik dalam separasi aliran. Prediksi dari turbulensi model SST ini juga selain tidak terikat oleh nilai *freestream* juga menunjukkan hasil yang lebih baik dari data eksperimen untuk aliran dalam hal *adverse pressure gradient boundary layer* (Menter, 1993).



Gambar 4.11 Pengaturan domain fluida

## 2. Inlet

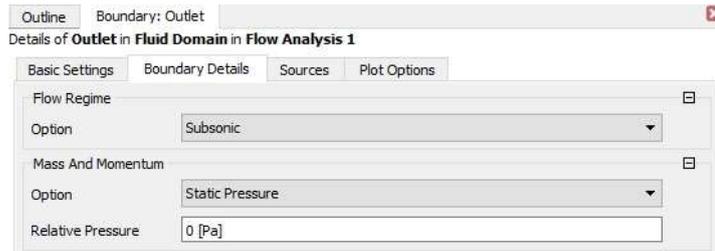
Bagian ini merupakan tempat dimana fluida masuk. Pada kondisi batas *Inlet* dilakukan pengaturan kecepatan yang sesuai dengan kecepatan gerak model uji. Pada simulasi ini fluida diasumsikan sebagai elemen yang bergerak, sedangkan model uji pada posisi statis.



Gambar 4.12 Kondisi batas *Inlet*

## 3. Outlet

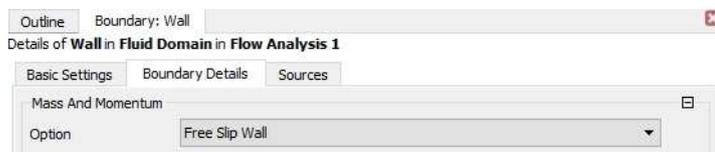
Bagian ini merupakan tempat dimana fluida keluar. Pada kondisi batas *Outlet* dilakukan pengaturan *pressure* fluida sebagai *static pressure*, dimana *relative pressure* adalah 0 Pa.



Gambar 4.13 Kondisi batas *Outlet*

#### 4. *Wall*

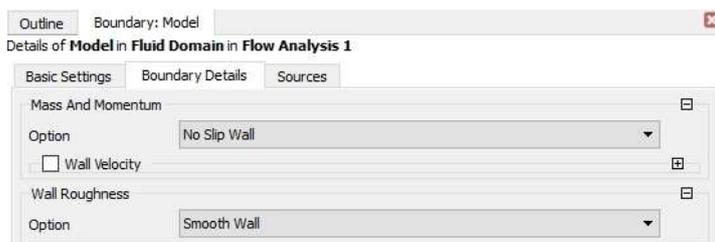
Dinding-dinding fluida dianggap berada pada kondisi tanpa gesekan, sehingga dilakukan pengaturan kondisi batas *Wall* dipilih *free slip wall*.



Gambar 4.14 Kondisi batas *Wall*

#### 5. Model Uji

Berbeda dengan keadaan yang diterapkan pada daerah dinding-dinding fluida. Permukaan model uji akan mengalami gesekan dengan fluida akibat terjadinya kontak langsung antara model dan fluida. Sehingga pada kondisi batas Model Uji ini dilakukan pengaturan kondisi batas *Wall* dipilih *no slip wall*.



Gambar 4.15 Kondisi batas Model

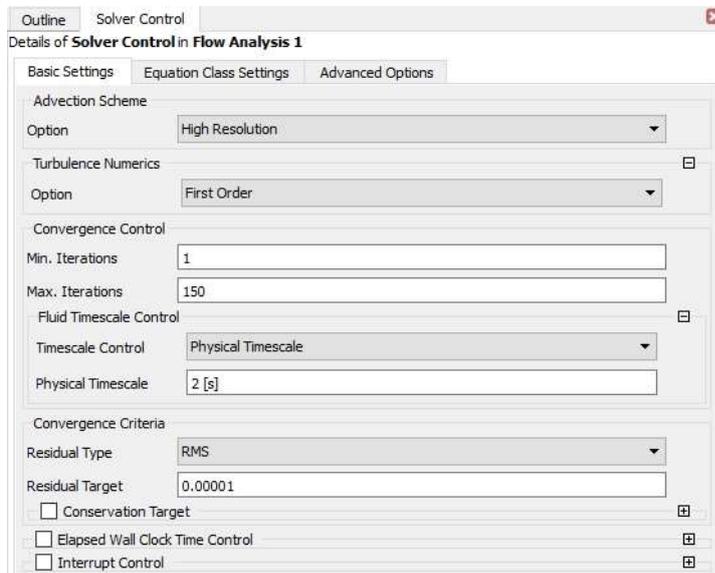
#### 6. *Initialization*

Agar konsisten dengan kondisi batas *inlet*, pada bagian *Global Initialization* ini komponen kecepatan diatur sesuai nilai kecepatan pada kondisi batas *inlet*.

#### 7. *Solver Control*

Pada bagian ini dikenal istilah RMS (*Root Mean Square*), merupakan salah satu komponen dari proses konvergensi pada validasi internal perangkat lunak. RMS menggambarkan jumlah iterasi yang diinginkan. Jumlah iterasi tersebut menunjukkan upaya perhitungan yang dilakukan

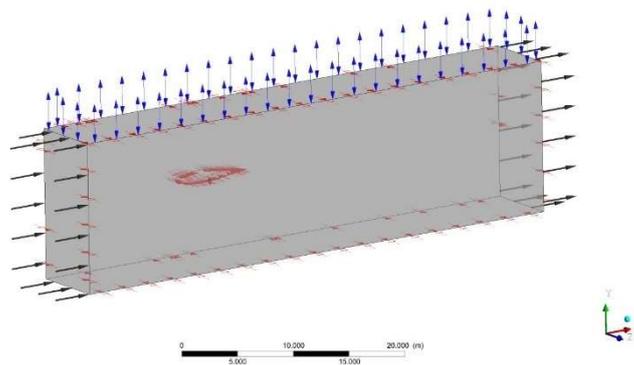
perangkat lunak untuk mencapai *residual target* yang diinginkan. Pada simulasi satu fasa fluida ini ditetapkan aturan *residual target* sebesar  $10^{-5}$ .



Gambar 4.16 *Solver Control*

### B. Simulasi Kondisi Permukaan

Sama halnya dengan simulasi kondisi menyelam, pada tahap *Pre Processor* kondisi permukaan ini, diberlakukan juga aturan pada kondisi batasnya. Yang menjadi pembeda pada kondisi menyelam ini yaitu, berlaku aturan simulasi permukaan bebas (*free surface*). Perlakuan fluida dalam simulasi ini menjadi multi fasa fluida yaitu air dan udara, sehingga akan terjadi fraksi antar fluida.



Gambar 4.17 Kondisi batas simulasi permukaan

Berlaku aturan tambahan pada perangkat lunak ANSYS CFX yaitu adanya CEL (*CFX Expression Language*) yang menentukan bagaimana interaksi multi fluida dalam simulasi.

## 1. CEL (*CFX Expression Language*)

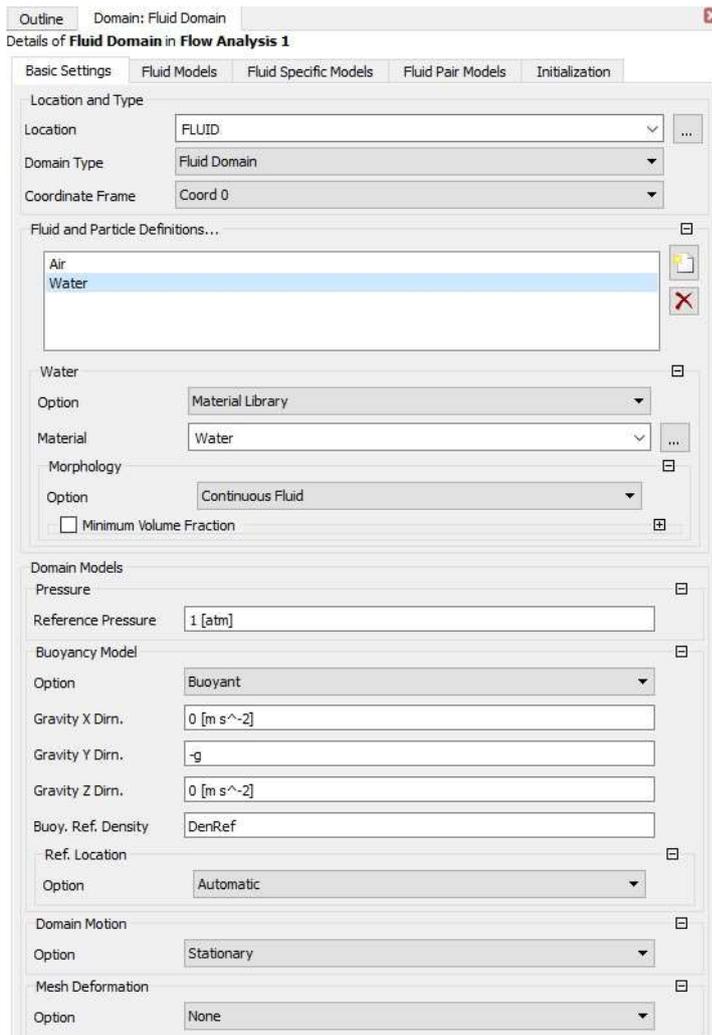
Pada bagian ini dilakukan pengaturan untuk menambahkan ekspresi bahasa pemrograman untuk permukaan bebas. Parameter yang ditambahkan ditampilkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Pendefinisian CEL-Pre Processor

Parameter	CEL	Definisi
Tinggi hulu <i>free surface</i>	UpH	0,2 [m]
Tinggi hilir <i>free surface</i>	DownH	0,2 [m]
Densitas air	DenWater	1024,8103 [kg m <sup>-3</sup> ]
Densitas udara	DenRef	1.185 [kg m <sup>-3</sup> ]
Densitas air-udara	DenH	(DenWater-DenRef)
Fraksi volume udara (hulu)	UpVFAir	Step((y-UpH)/1[m])
Fraksi volume air (hulu)	UpVFWater	1-UpVFAir
Distribusi tekanan hulu	UpPres	DenH*g*UpVFWater*(UpH-y)
Fraksi volume udara (hilir)	DownVFAir	Step((y-DownH)/1[m])
Fraksi volume air (hilir)	DownVFWater	1-DownVFAir
Distribusi tekanan hilir	DownPres	DenH*g*DownVFWater*(DownH-y)

## 2. Domain Fluida

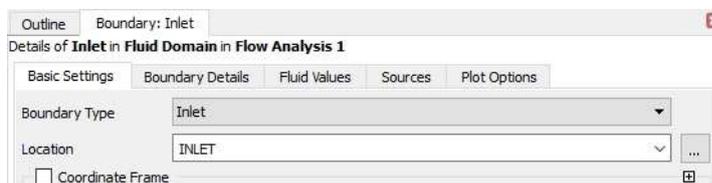
Pada bagian ini dilakukan pendefinisain simulasi multi fasa dua fluida. Pegaturan yang dilakukan meliputi, *Fluid and Particle Definitions* yaitu, pemilihan dua fluida yang digunakan dalam simulasi, diatur sebagai air dan udara. *Bouyancy Model* diatur sebagai berikut *Gravity X Dirn.* 0 m/s<sup>2</sup>, *Gravity Y Dirn.* -g, *Gravity Z Dirn.* 0 m/s<sup>2</sup>, *Bouy. Ref. Density DenRef* sesuai aturan *CEL. Fluid Models* diatur sebagai *Homogeneous Model*. Model turbulensi SST dipilih. Sesuai dengan simulasi menyelam model turbulensi SST juga digunakan untuk simulasi permukaan karena telah terbukti akurat, seperti dijelaskan pada Bab sebelumnya.



Gambar 4.18 Pengaturan domain fluida

### 3. Inlet

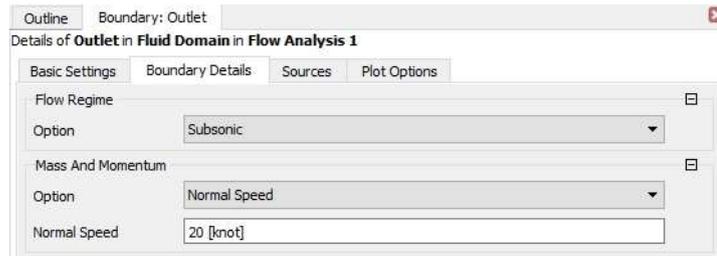
Pada kondisi batas ini dilakukan pengaturan kecepatan sesuai dengan kecepatan model uji. Dipilih *Normal Speed* dalam satuan knot.



Gambar 4.19 Kondisi batas *Inlet*

### 4. Outlet

Dilakukan pengaturan kondisi batas keluarnya fluida. Dipilih pengaturan kecepatan *Normal Speed* dalam satuan knot, sesuai dengan kecepatan pada kondisi batas *Inlet*. Pemilihan *Normal Speed* didasarkan bahwa tipe simulasi yang dilakukan adalah *Steady State*.



Gambar 4.20 Kondisi batas *Outlet*

### 5. *Wall*

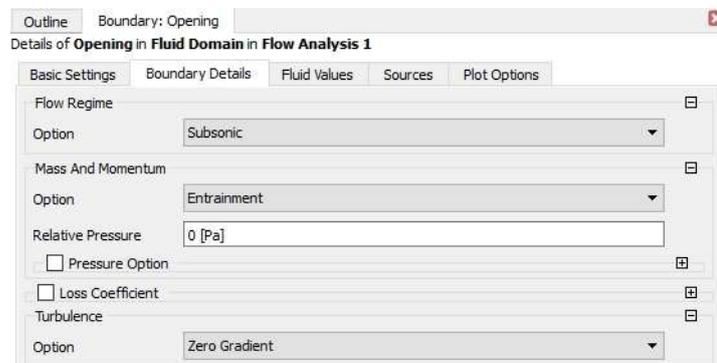
Pada kondisi batas *Wall*, meliputi dinding samping dan bawah. Dipilih pengaturan sebagai kondisi batas *symmetry*. Ini berarti tekanan di dalam dan luar domain pengujian adalah sama, gelombang tidak dipantulkan terhadap dinding.

### 6. Model Uji

Model uji didefinisikan sebagai *Wall* dengan pengaturan *no slip wall*. Berarti bahwa permukaan model uji akan mengalami gesekan dengan fluida akibat terjadinya kontak langsung antara model dan fluida.

### 7. *Opening*

Pada kondisi batas atas dipilih pengaturan *Opening* ataupun dinding terbuka, yang berarti tidak ada pengaruh tekanan dari manapun.



Gambar 4.21 Kondisi batas *Opening*

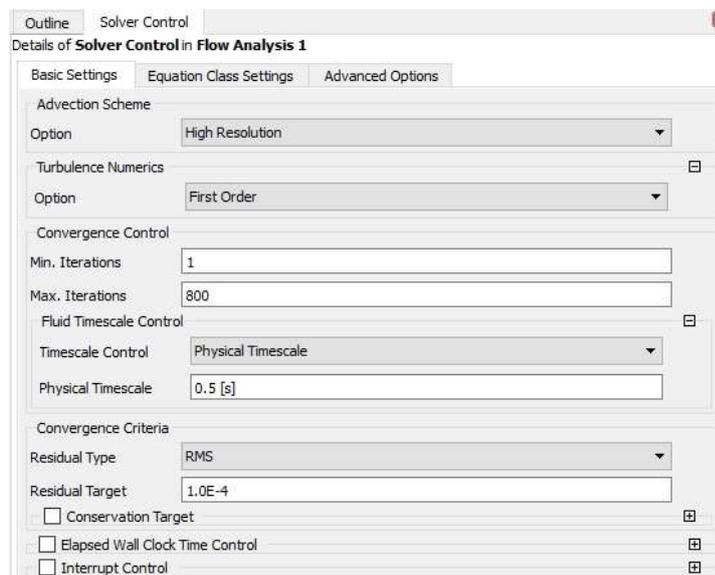
### 8. *Initialization*

Pada pengaturan bagian ini, disesuaikan dengan pengaturan pada kondisi batas *Inlet* agar konsisten untuk semua bagian domain fluida.

### 9. *Solver Control*

Seperti halnya simulasi pada kondisi menyelam, *residual target* pada proses iterasi juga ditetapkan. Namun aturan dalam simulasi permukaan ini diatur sebesar  $10^{-4}$ , lebih besar dibandingkan pada kondisi menyelam dikarenakan pada simulasi ini terjadi fraksi antara model

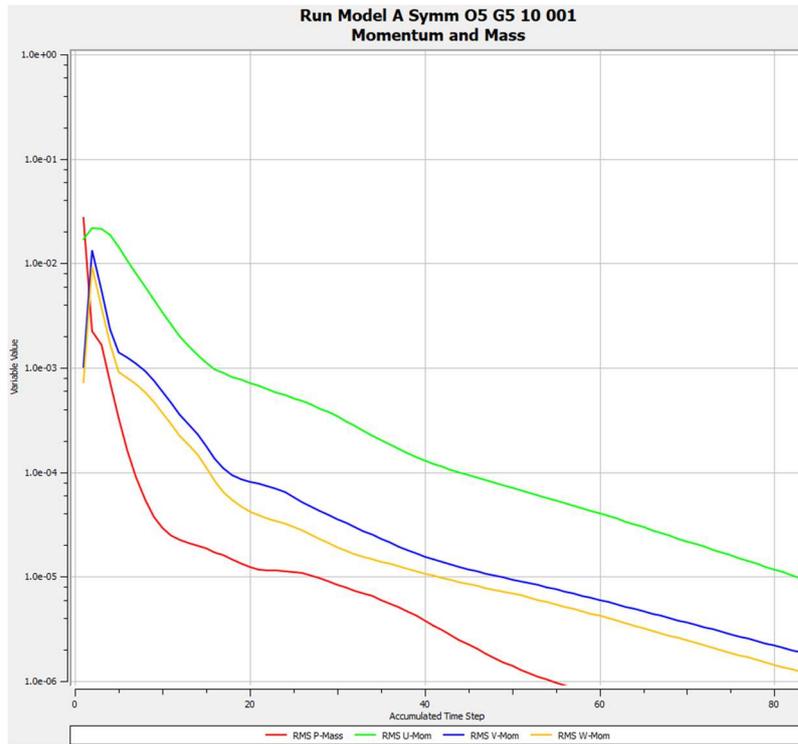
uji dengan dua fluida yaitu air dan udara yang memiliki lebih banyak perhitungan. Nilai residual sebesar  $10^{-4}$  dirasa cukup untuk dapat menyelesaikan simulasi multi fasa fluida.



Gambar 4.22 Solver Control Free Surface

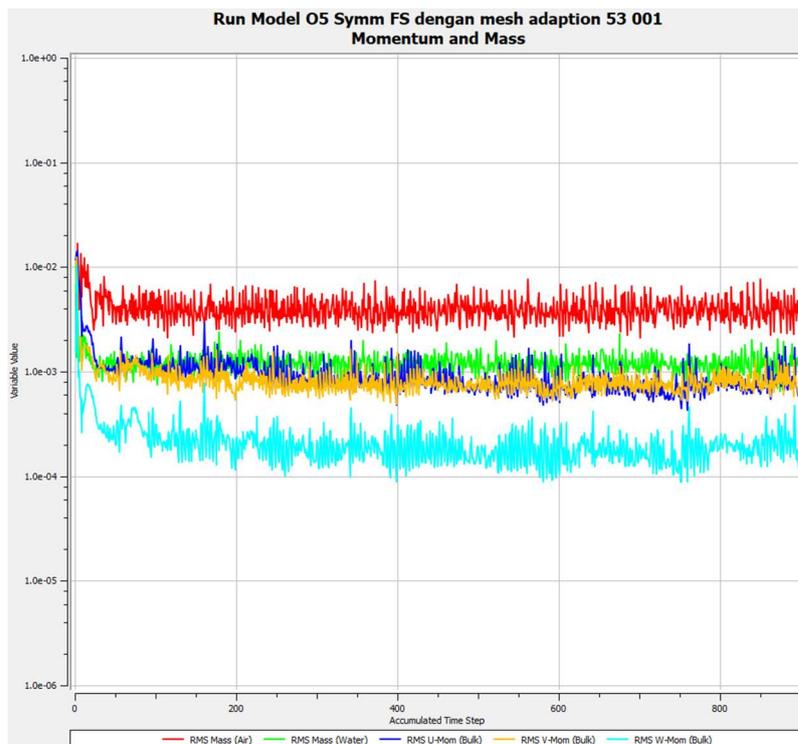
#### 4.2.2. Tahap CFX- Solver

Tahap ini menunjukkan proses perhitungan oleh perangkat lunak, ditampilkan dalam bentuk grafik dan disebut juga dengan proses iterasi atau *running*. Grafik yang ditampilkan berupa sumbu x yang menunjukkan *time step* ataupun waktu iterasi yang dilakukan, sumbu y menunjukkan *variable value* ataupun nilai konvergensi yang ingin dicapai. Proses iterasi akan berhenti jika nilai *residual target* ataupun konvergensi yang telah diatur pada tahap *Pre-Processor* mampu dicapai, namun bisa juga telah mencapai batas maksimum jumlah iterasi yang ditetapkan.



Gambar 4.23 Grafik simulasi kondisi menyelam

Pada iterasi untuk simulasi kondisi multi fasa dua fluida akan diketahui grafik perhitungan yang lebih fluktuatif dibandingkan simulasi satu fasa. Bentuk grafik yang ditunjukkan juga dipengaruhi oleh *time step* yang diatur pada tahap *Pre-Processor*.



Gambar 4.24 Grafik simulasi kondisi permukaan

### 4.2.3. Tahap CFX-Post Processor

Pada tahap ini ditampilkan hasil simulasi yang dilakukan pada tahap *CFX-Solver*, sehingga bisa diketahui dengan jelas profil fluida yang terjadi. Sebagai contoh *streamlines plots*, *vector plots*, *contour plots*, dan lainnya. *Contour plots* dalam hal ini sangat berguna untuk menampilkan *pressure*, *velocity*, *turbulent kinetic energy* dan nilai  $y^+$  dari hasil simulasi model uji, juga banyak lainnya.

*CFX-Post* juga berfungsi sebagai *function calculator*. Hal ini digunakan untuk melihat nilai kuantitatif dari simulasi yang telah dilakukan. Sebagai contoh luasan keseluruhan dari *shear stress* yang terjadi pada model uji dan *drag* dapat dikalkulasikan. Juga statistik dari *mesh* yang digunakan, bisa ditampilkan dalam tahap ini.

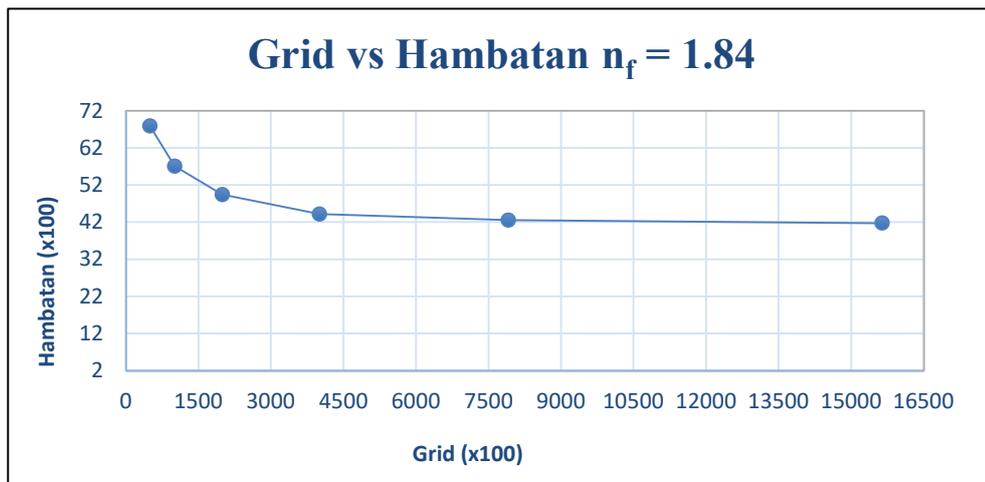
### 4.3. Validasi Grid Independence

Studi *Grid Independence* dimaksudkan untuk melihat apakah nilai hasil simulasi dipengaruhi oleh perubahan dari jumlah elemen atau *grid* yang digunakan dalam simulasi. Jumlah elemen yang banyak dengan ukuran lebih kecil akan menunjukkan peningkatan ketelitian pada hasil simulasi. Metode *Grid Independence* dilakukan untuk mendapatkan hasil simulasi yang paling optimal dari perubahan jumlah elemen yang dilakukan. Metode ini dapat dicapai dengan presentase selisih hasil simulasi dari jumlah elemen yang ditingkatkan tidak boleh melebihi 2%. Proses simulasi dari perubahan jumlah elemen juga harus memperhatikan aturan bahwa minimal lima kali simulasi dengan perubahan jumlah elemen harus dilakukan, untuk memastikan variasi elemen berpengaruh pada nilai hasil simulasi.

*Grid Independence* telah dilakukan pada semua variasi model uji yang berjumlah lima variasi. Dilakukan pada kecepatan 20 knot terhadap hasil *drag force* yang didapatkan. Dalam simulasi pada penelitian Tugas Akhir ini *Grid Independence* hanya dilakukan untuk simulasi kekentelan murni pada kondisi satu fluida atau kondisi menyelam saja. Ini dilakukan karena tidak ada perbedaan bentuk maupun jumlah elemen untuk simulasi kondisi menyelam maupun permukaan, perbedaan hanya terletak pada perlakuan parameter permukaan bebasnya.

Tabel 4.3 *Grid Independence Model*  $n_f = 1,84$

$n_f$	Grid	Hambatan (N)	Selisih	Validasi (2%)
1,84	49476	6796,340	1092,040	16,1
	100837	5704,300	757,680	11,1
	199516	4946,620	531,520	7,8
	400468	4415,100	156,720	2,3
	<b>790667</b>	<b>4258,380</b>	<b>85,120</b>	<b>Valid</b>
	1564233	4173,260		

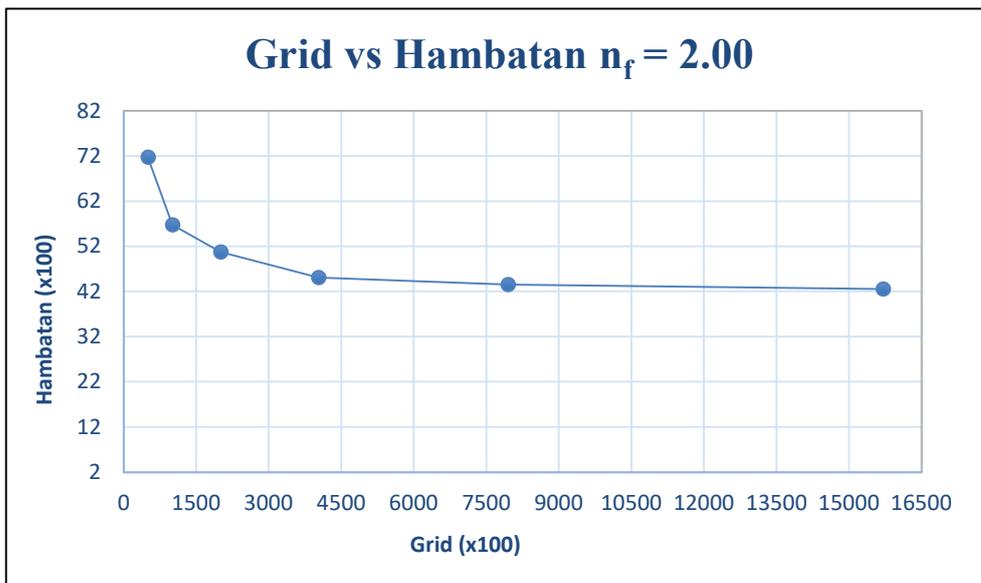


Gambar 4.25 *Grid Independence Model*  $n_f = 1,84$

Tabel 4.3 menunjukkan hasil *Grid Independence Model*  $n_f = 1,84$  dengan jumlah elemen optimum sebesar 7900667 elemen untuk dilakukan simulasi menyelam maupun permukaan dengan 4 variasi kecepatan berbeda.

Tabel 4.4 *Grid Independence Model  $n_f = 2,00$*

$n_f$	Grid	Hambatan (N)	Selisih	Validasi (2%)
2,00	50000	7169,960	1494,120	20,8
	100898	5675,840	600,100	8,4
	200548	5075,740	570,160	8,0
	402916	4505,580	153,340	2,1
	<b>794529</b>	<b>4352,240</b>	<b>99,500</b>	<b>Valid</b>
	1570646	4252,740		

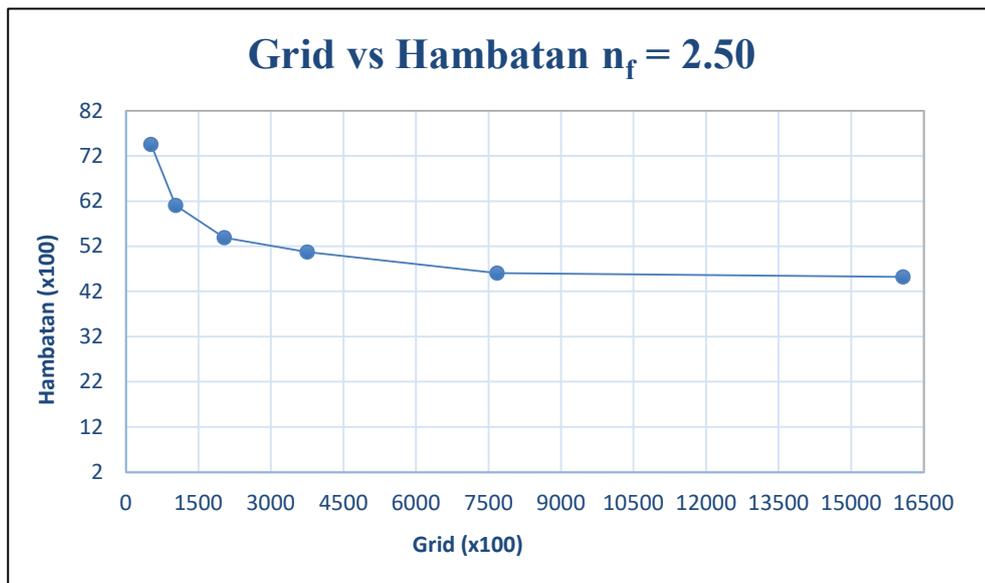


Gambar 4.26 *Grid Independence Model  $n_f = 2,00$*

Tabel 4.4 menunjukkan hasil *Grid Independence Model  $n_f = 2,00$*  dengan jumlah elemen optimum sebesar 794529 elemen untuk dilakukan simulasi menyelam maupun permukaan dengan 4 variasi kecepatan berbeda.

Tabel 4.5 *Grid Independence Model*  $n_f = 2,50$

$n_f$	Grid	Hambatan (N)	Selisih	Validasi (2%)
2,50	51914	7452,200	1351,000	
	102650	6101,200	709,840	9,5
	203455	5391,360	315,660	4,2
	375117	5075,700	466,460	6,3
	<b>767932</b>	<b>4609,240</b>	<b>87,920</b>	<b>Valid</b>
	1607198	4521,320		

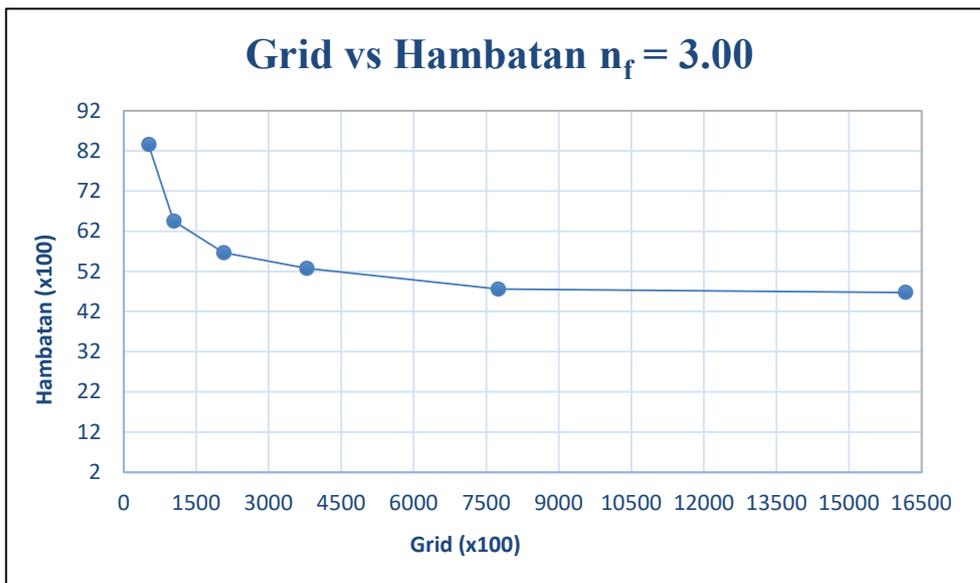


Gambar 4.27 *Grid Independence Model*  $n_f = 2,50$

Tabel 4.5 menunjukkan hasil *Grid Independence Model*  $n_f = 2,50$  dengan jumlah elemen optimum sebesar 767932 elemen untuk dilakukan simulasi menyelam maupun permukaan dengan 4 variasi kecepatan berbeda.

Tabel 4.6 *Grid Independence Model  $n_f = 3,00$*

$n_f$	Grid	Hambatan (N)	Selisih	Validasi (2%)
3,00	51511	8358,760	1907,900	28,1
	103245	6450,860	784,480	11,5
	206267	5666,380	390,120	5,7
	378277	5276,260	514,940	7,6
	<b>774162</b>	<b>4761,320</b>	<b>82,120</b>	<b>Valid</b>
	1616276	4679,200		

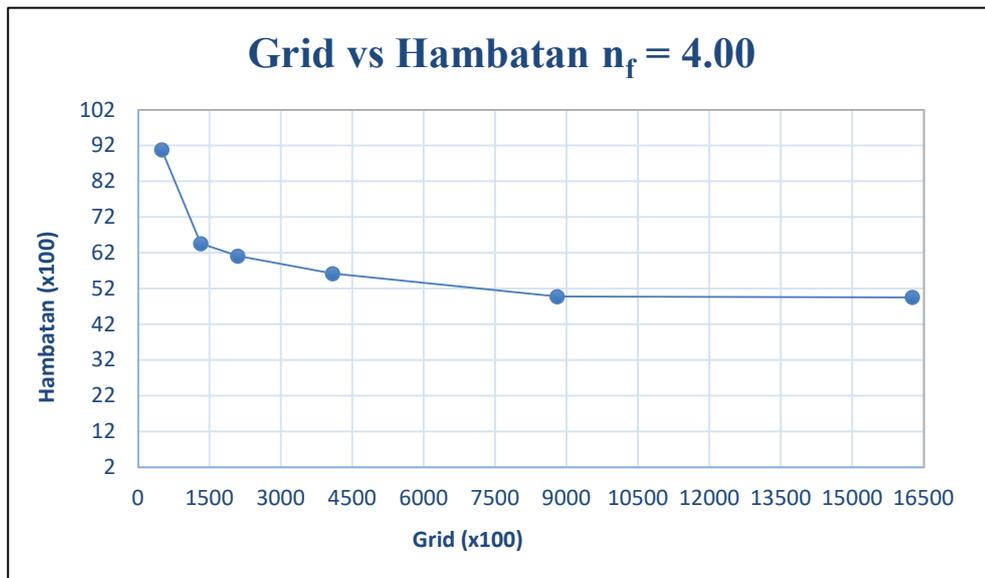


Gambar 4.28 *Grid Independence Model  $n_f = 3,00$*

Tabel 4.6 menunjukkan hasil *Grid Independence Model  $n_f = 3,00$*  dengan jumlah elemen optimum sebesar 774162 elemen untuk dilakukan simulasi menyelam maupun permukaan dengan 4 variasi kecepatan berbeda.

Tabel 4.7 *Grid Independence Model*  $n_f = 4,00$

$n_f$	Grid	Hambatan (N)	Selisih	Validasi (2%)
4,00	49747	9083,220	2624,800	38,6
	131278	6458,420	348,320	5,1
	209549	6110,100	486,180	7,2
	408450	5623,920	650,220	9,6
	<b>880086</b>	<b>4973,700</b>	<b>16,580</b>	<b>Valid</b>
	1626495	4957,120		



Gambar 4.29 *Grid Independence Model*  $n_f = 4,00$

Tabel 4.7 menunjukkan hasil *Grid Independence Model*  $n_f = 3,00$  dengan jumlah elemen optimum sebesar 880086 elemen untuk dilakukan simulasi menyelam maupun permukaan dengan 4 variasi kecepatan berbeda.

Dalam proses iterasi menggunakan CFD, kapasitas komputer yang digunakan akan mempengaruhi lamanya proses iterasi.

Processor: Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @ 2.40GHz 2.40 GHz  
 Installed memory (RAM): 8,00 GB (7,85 GB usable)  
 System type: 64-bit Operating System, x64-based processor  
 Pen and Touch: No Pen or Touch Input is available for this Display

Gambar 4.30 Spesifikasi komputer

Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB 5 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 5.1. Pendahuluan

Simulasi lambung polos kapal selam pada kondisi menyelam dan permukaan selesai dilakukan, langkah selanjutnya adalah pembahasan bagaimana karakteristik hambatan yang terjadi pada dua kondisi tersebut. Bagaimana perbedaan kondisi fluida mempengaruhi hambatannya. Pada kondisi menyelam, hambatan gelombang akan bisa diabaikan, sedangkan pada kondisi permukaan, hambatan gelombang akan sangat mempengaruhi komponen hambatan total dari lambung polos kapal selam. Juga bagaimana karakteristik hambatan pada perbedaan luasan variasi haluan lambung polos dalam Tugas Akhir ini.

### 5.2. Perbandingan Hambatan Kondisi Menyelam

Dari simulasi pada kondisi menyelam yang telah dilakukan didapatkan hambatan *viscous* untuk setiap variasi model uji, yaitu model dengan  $nf = 1,84; 2,00; 2,50; 3,00; 4,00$  dalam 4 variasi kecepatan  $V_s = 10, 15, 20,$  dan  $25$  knot. Ditampilkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Nilai hambatan kondisi menyelam untuk setiap variasi model

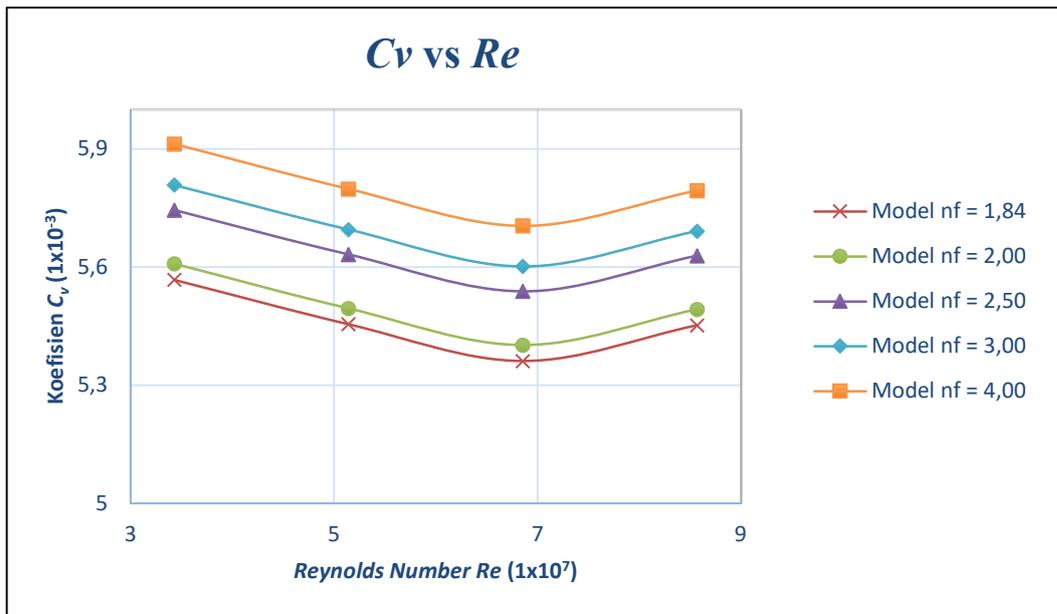
$V_s$ (knot)	Model $nf = 1,84$		Model $nf = 2,00$		Model $nf = 2,50$		Model $nf = 3,00$		Model $nf = 4,00$	
	$R_{viscous}$ (N)	$C_v$ ( $1 \times 10^{-3}$ )								
10	1105,58	5,57	1129,67	5,61	1195,23	5,75	1234,30	5,81	1288,75	5,91
15	2437,18	5,46	2490,42	5,40	2636,60	5,63	2722,98	5,70	2843,78	5,80
20	4258,38	5,36	4352,24	5,40	4609,24	5,54	4761,32	5,60	4973,70	5,71
25	6766,40	5,45	6914,58	5,49	7319,42	5,63	7558,70	5,69	7893,66	5,80

Tabel 5.1 memperlihatkan nilai hambatan *viscous* dari setiap model uji dalam variasi beberapa kecepatan. Dilakukan perhitungan koefisien hambatan *viscous*  $C_v$  sesuai dengan persamaan 2.11 pada Bab 2.4.3 Hambatan Kapal Selam.

Untuk dapat melihat bagaimana karakteristik koefisien hambatan *viscous* dari kondisi menyelam dengan seiring adanya penambahan kecepatan, dibuat grafik perbandingan koefisien

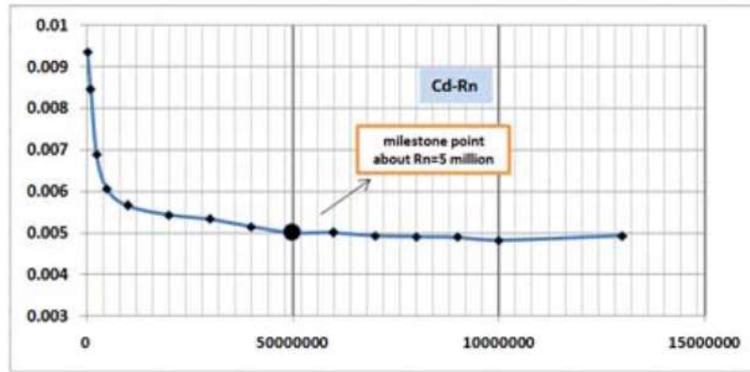
hambatan *viscous*  $C_v$  dengan *Reynolds Number*  $Re$  pada semua variasi kecepatan. Penggunaan  $Re$  menjadi sesuai untuk kondisi menyelam karena hambatan *viscous* didominasi hambatan gesek yang berkaitan dengan *Reynolds Number*.

*Reynolds Number* dihitung dengan persamaan 2.7 Pada Bab 2. Hasil dari perbandingan koefisien  $C_v$  dan  $Re$  ditunjukkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Grafik perbandingan hambatan *viscous*

Gambar 5.1 menunjukkan perbedaan koefisien hambatan *viscous* yang dihasilkan oleh model uji; Model  $nf = 1,84; 2,00; 2,50; 3,00; 4,00$ . Dari hambatan *viscous* yang telah dihitung dan ditampilkan pada Tabel 5.1, diketahui bahwa besarnya koefisien hambatan *viscous* mulai turun pada *Reynolds Number*  $3 \times 10^7$  dan mulai ada sedikit kenaikan nilai koefisien pada *Reynolds Number*  $7 \times 10^7$  pada semua variasi model. Fluktuasi ini terjadi karena pengaruh kecepatan tinggi yaitu berada di kisaran angka *Reynolds* lebih dari  $5 \times 10^7$ . Moonesun et al. (2014) yang melakukan pengujian untuk model lambung polos dengan karakteristik yang hampir sama membuktikan bahwa nilai koefisien hambatan total pada kondisi menyelam di lebih dari *Reynolds Number*  $5 \times 10^7$  sampai  $1 \times 10^9$  berfluktuasi namun selishnya kecil dan bisa dianggap konstan.

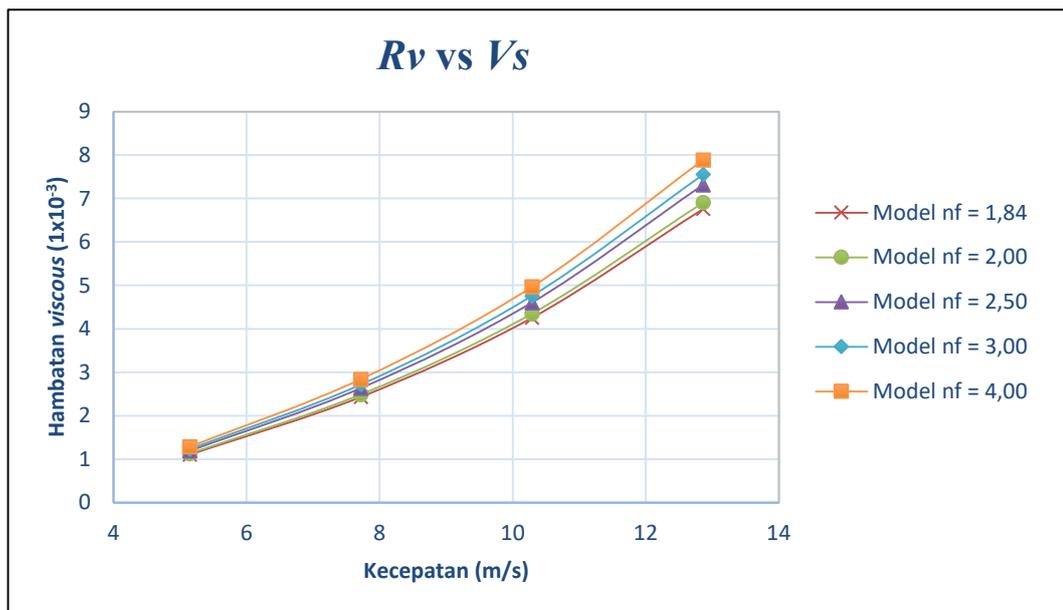


**Figure 10:** The diagram of variations of total resistance coefficients versus Reynold's numbers in case 2

Gambar 5.2 Grafik koefisien hambatan *viscous* (Moonesun et al., 2014)

### A. Karakteristik hambatan *viscous*

Hambatan *viscous* memiliki 2 komponen utama yaitu hambatan tekan berdasarkan kekentalan fluida (*viscous pressure*) dan hambatan gesek (*friction resistance*) (Lewis, 1988).

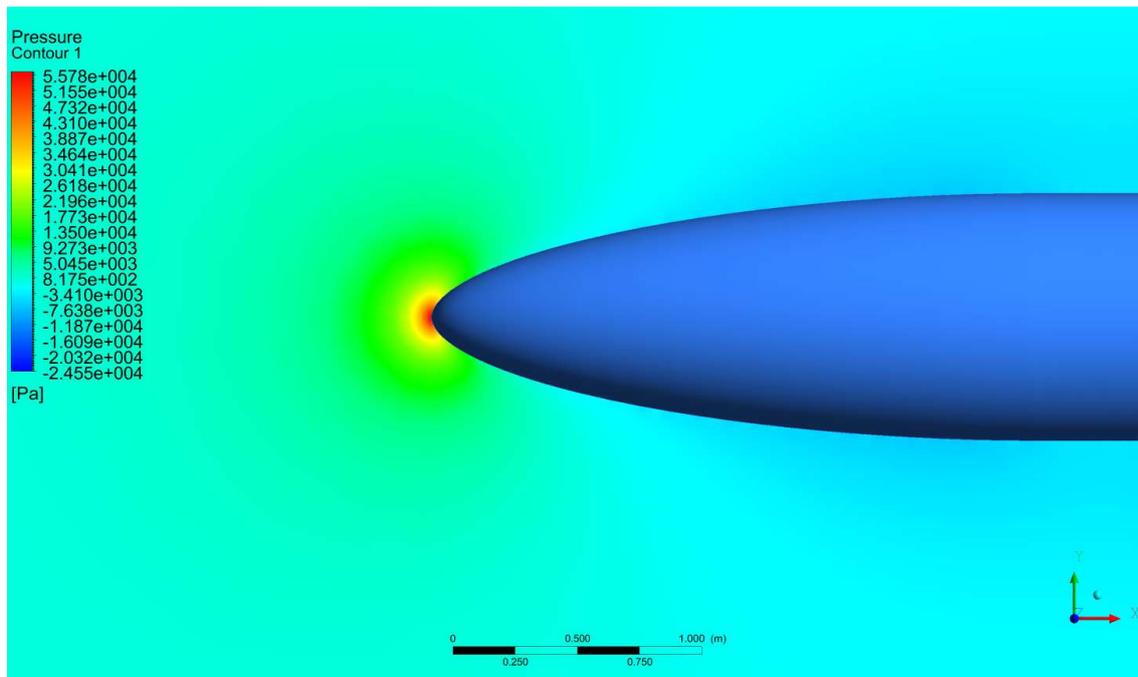


Gambar 5.3 Grafik nilai hambatan selam pada setiap model

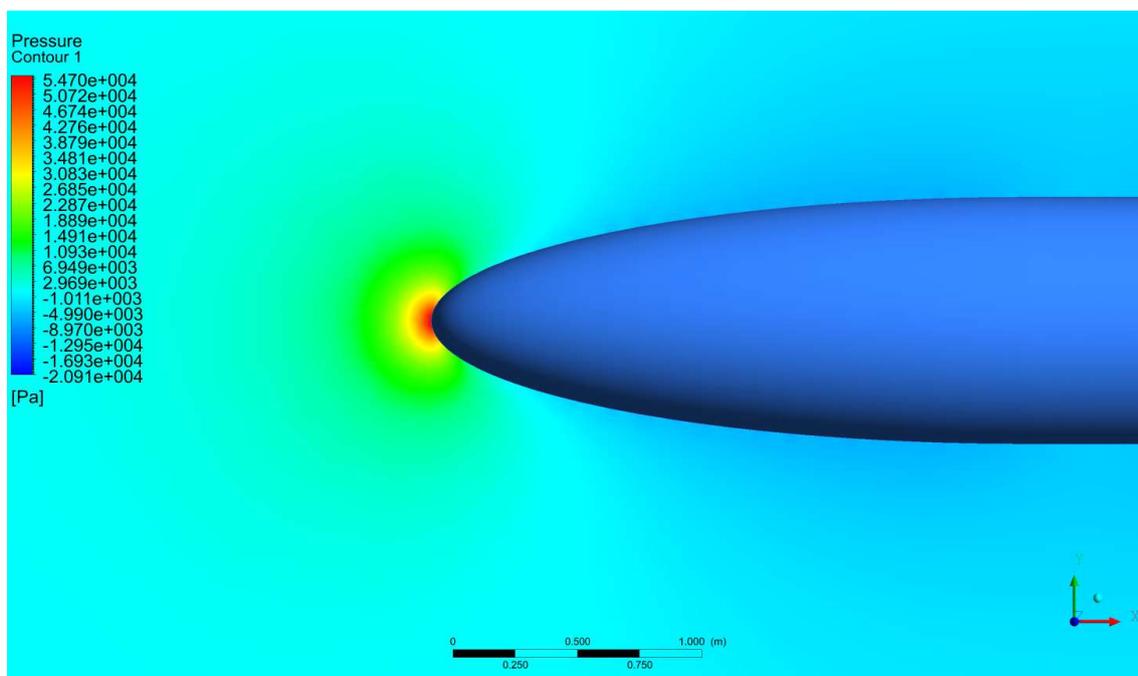
Pada Gambar 5.3 dapat dilihat bahwa nilai hambatan *viscous* yang dihasilkan berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan model. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, komponen hambatan tekan (*viscous pressure*) merupakan gaya normal akibat tekanan fluida disekitar lambung. Tekanan fluida ini dipengaruhi oleh kecepatan aliran di sekitar lambung polos kapal selam. Maka seiring kecepatan bertambah maka nilai komponen hambatan tekan ini juga semakin besar. Dipengaruhi juga komponen hambatan gesek (*friction resistance*), komponen ini cukup dominan terhadap hambatan *viscous*, nilai komponen ini didapatkan dari hasil integral

nilai tegangan tangensial pada seluruh permukaan basah model lambung polos  $A$  (*Wetted Surface Area*). Sehingga nilai hambatan gesek berbanding lurus dengan besarnya  $A$  lambung polos (Nugroho, 2012).

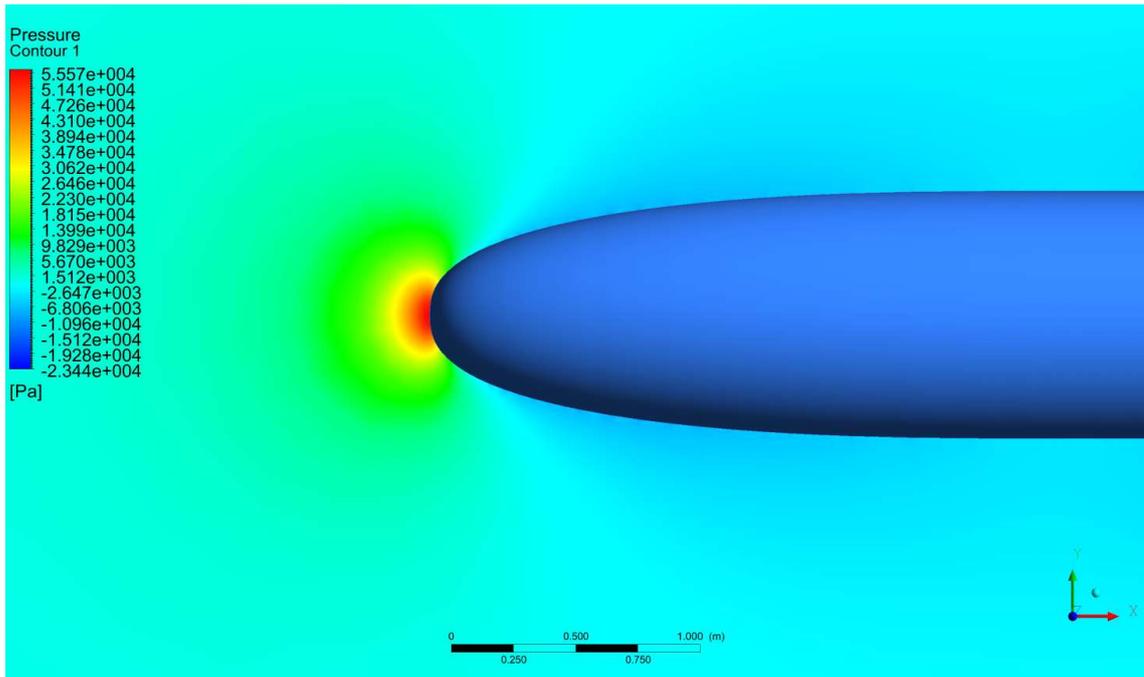
Pada gambar berikut ini akan ditampilkan pengaruh nilai tekanan dan kecepatan aliran disekitar haluan lambung polos kapal selam untuk semua variasi pada kecepatan 20 knot.



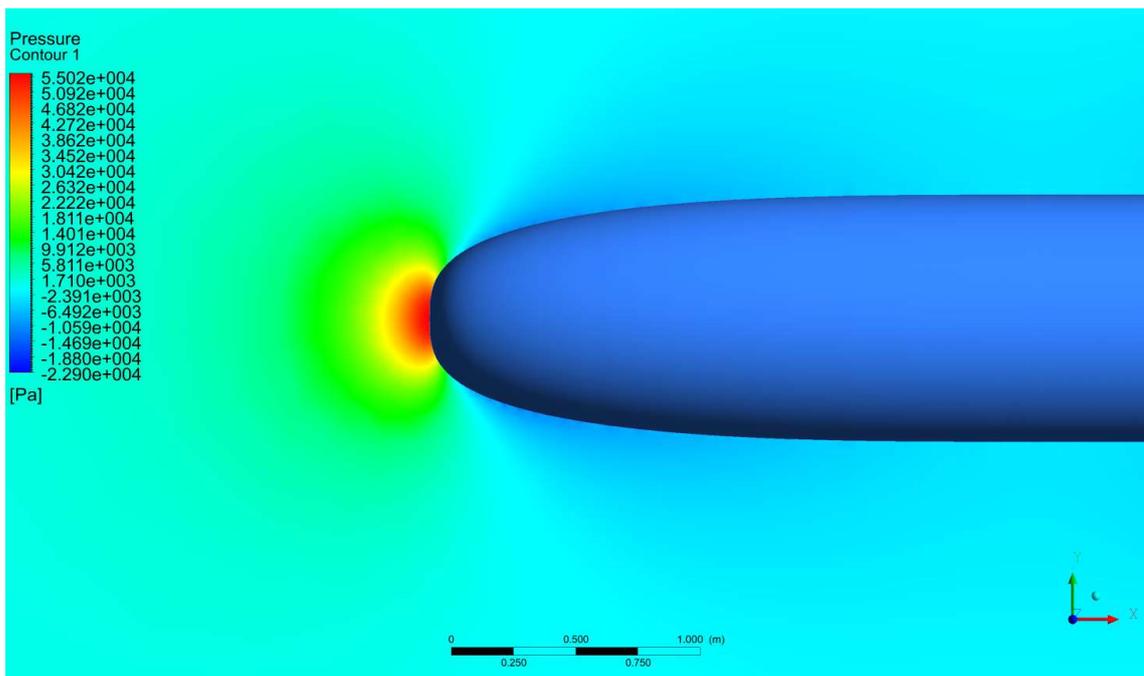
Gambar 5.4 *Pressure plot* Model  $nf = 1,84$  pada 20 knot



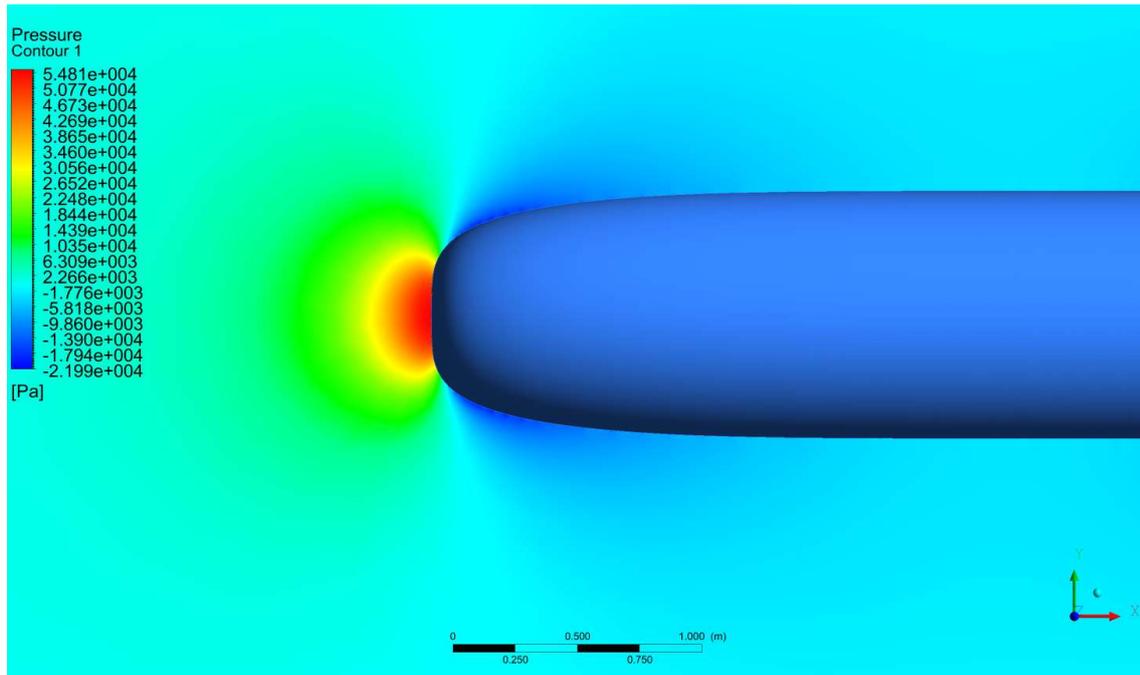
Gambar 5.5 *Pressure plot* Model  $nf = 2,00$  pada 20 knot



Gambar 5.6 *Pressure plot* Model  $nf = 2,50$  pada 20 knot

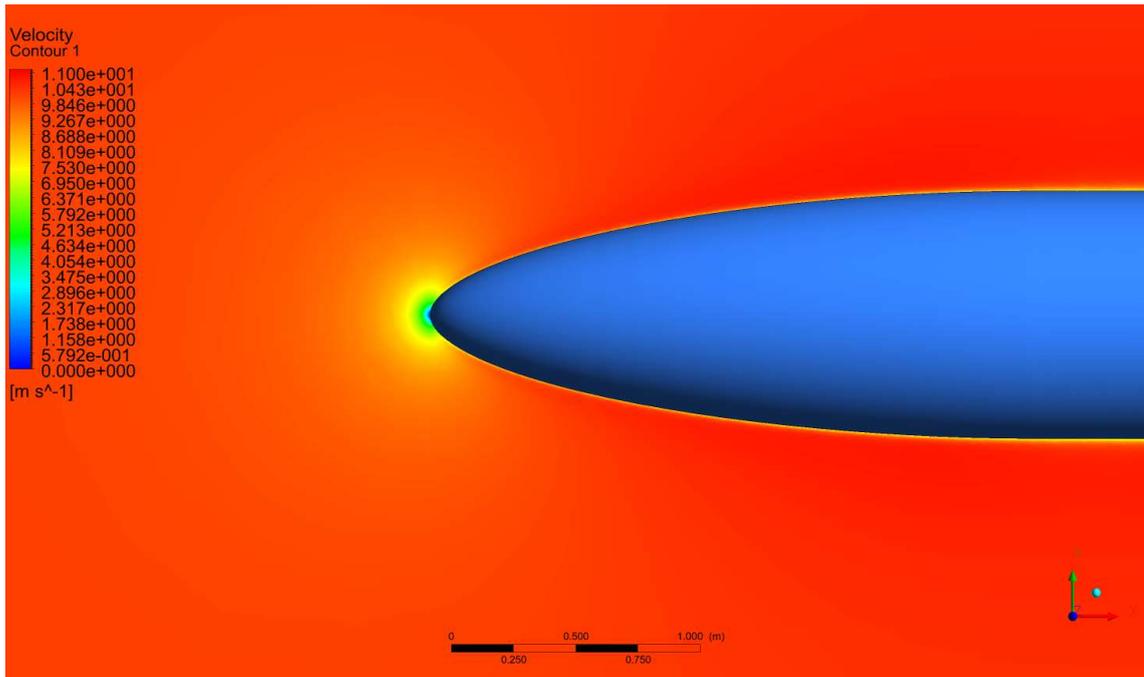


Gambar 5.7 *Pressure plot* Model  $nf = 3,00$  pada 20 knot

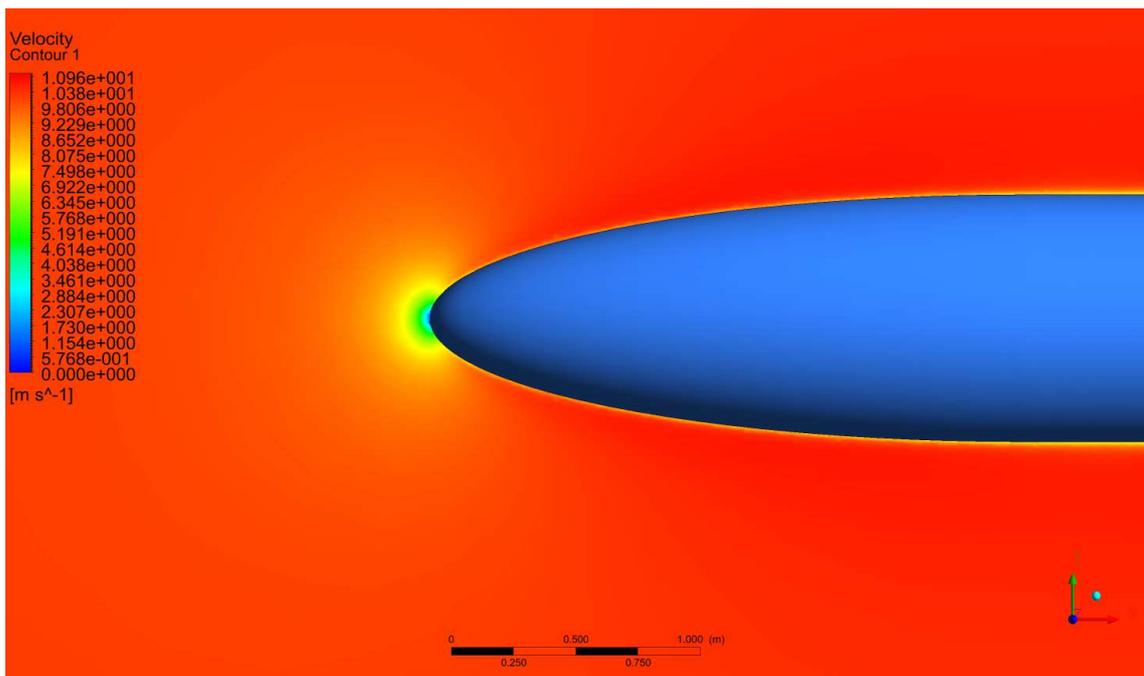


Gambar 5.8 *Pressure plot* Model  $nf = 4,00$  pada 20 knot

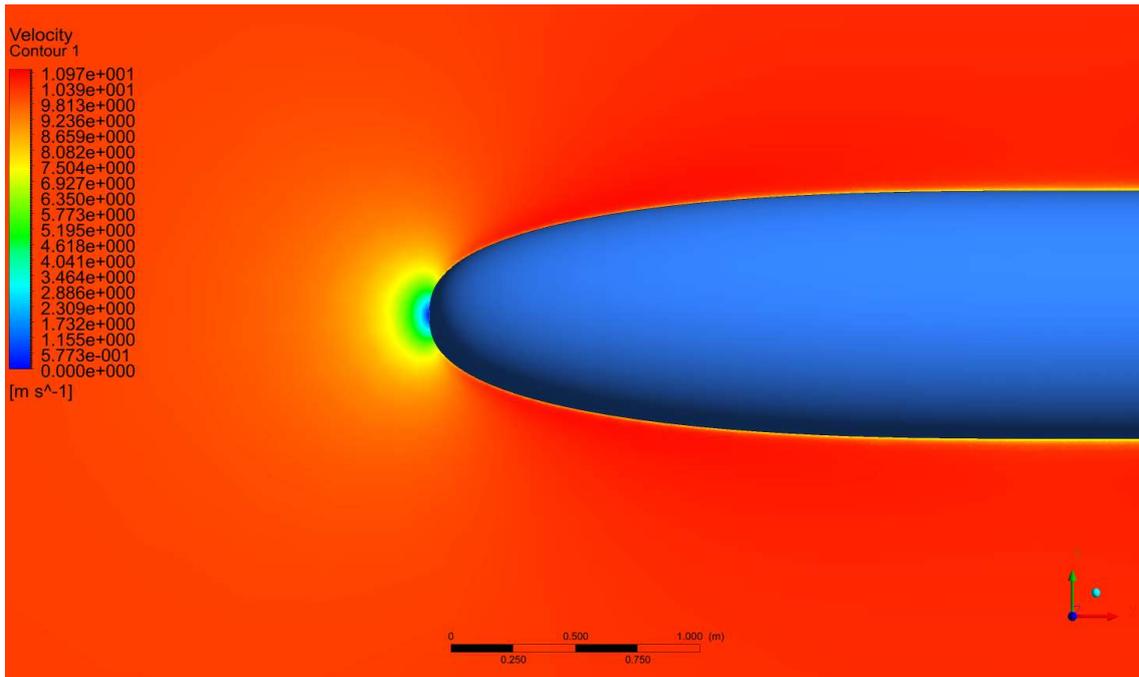
Dari Gambar 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 masing-masing untuk nilai  $nf = 1,84; 2,00; 2,50; 3,00; 4,00$  bisa dilihat bahwa nilai tekanan tertinggi berada pada titik ujung haluan atau disebut titik stagnasi. Kecepatan aliran paling rendah berada pada daerah ini, dapat dilihat juga daerah dengan kecepatan tertinggi berbeda untuk masing-masing model lambung. Pada nilai  $nf$  kecil aliran dengan kecepatan tertinggi berada menjauhi titik stagnasi, sedangkan semakin besar nilai  $nf$  daerah dengan kecepatan aliran tertinggi semakin mendekat pada ujung haluan lambung polos kapal selam.



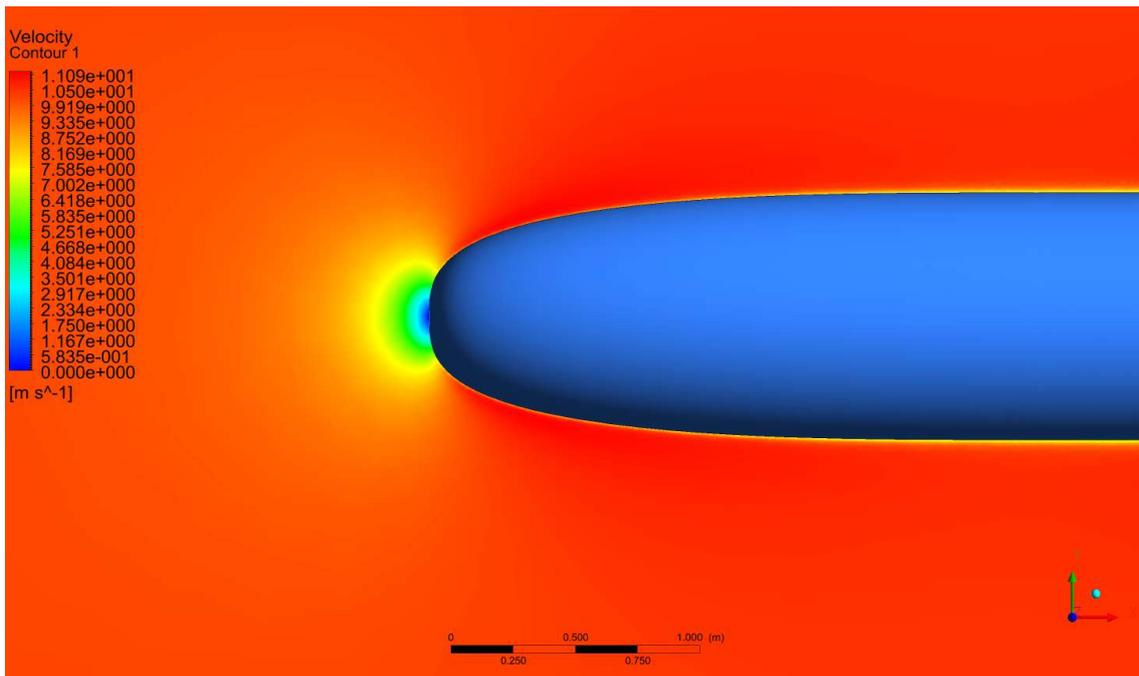
Gambar 5.9 *Velocity plot* Model  $nf = 1,84$  pada 20 knot



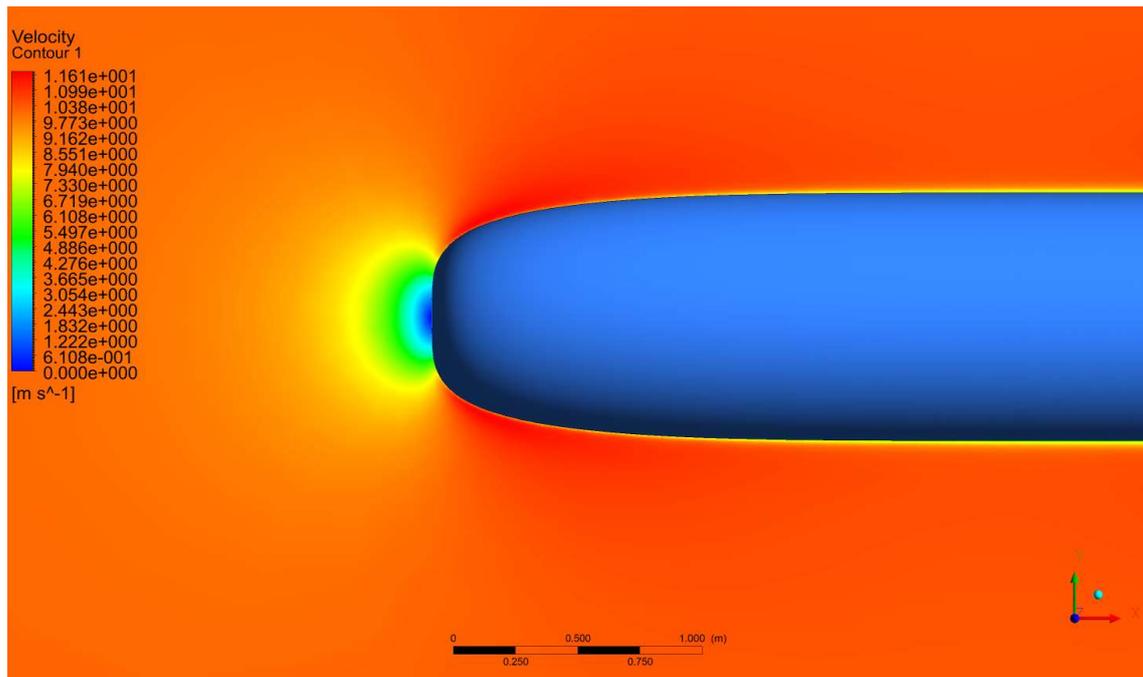
Gambar 5.10 *Velocity plot* Model  $nf = 2,00$  pada 20 knot



Gambar 5.11 *Velocity plot* Model  $nf = 2,50$  pada 20 knot



Gambar 5.12 *Velocity plot* Model  $nf = 3,00$  pada 20 knot



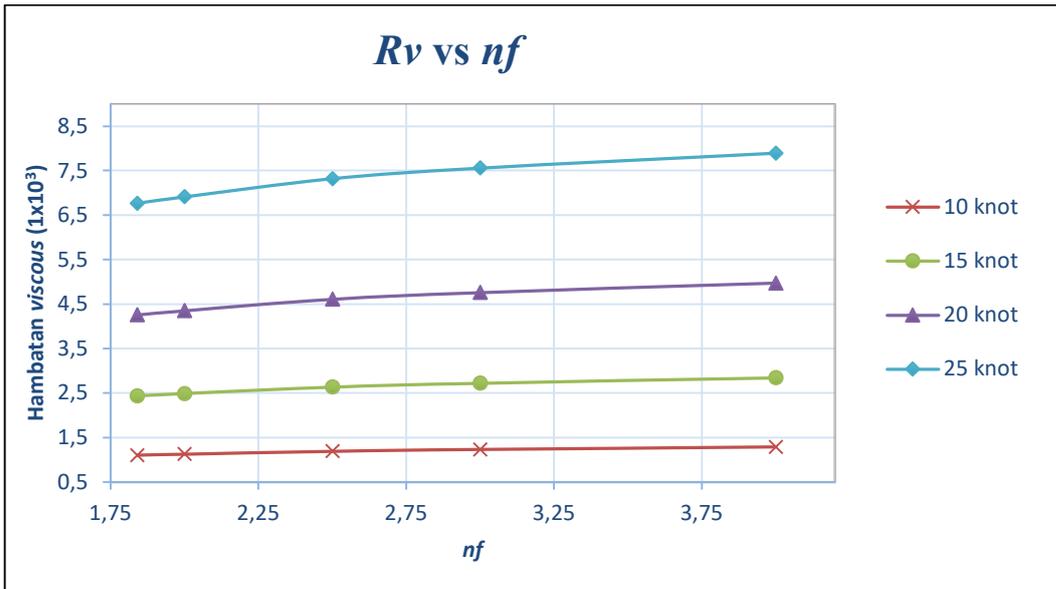
Gambar 5.13 Velocity plot Model  $nf = 4,00$  pada 20 knot

Dari Gambar 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 masing-masing untuk nilai  $nf = 1,84; 2,00; 2,50; 3,00; 4,00$  bisa dilihat bahwa nilai kecepatan aliran terendah berada pada titik stagnasi, ini sejalan jika dibandingkan dengan gambar tekanan (*pressure plot*) disekitar lambung. Gradien tekanan pada bagian haluan dari titik stagnasi menuju belakang menyebabkan terciptanya daerah dengan kecepatan tertinggi yaitu menjauhi titik stagnasi sesuai arah aliran. Hal ini sesuai dengan hukum *Bernoulli* dimana daerah dengan peningkatan kecepatan, terjadi pula penurunan tekanan atau penurunan energi potensial.

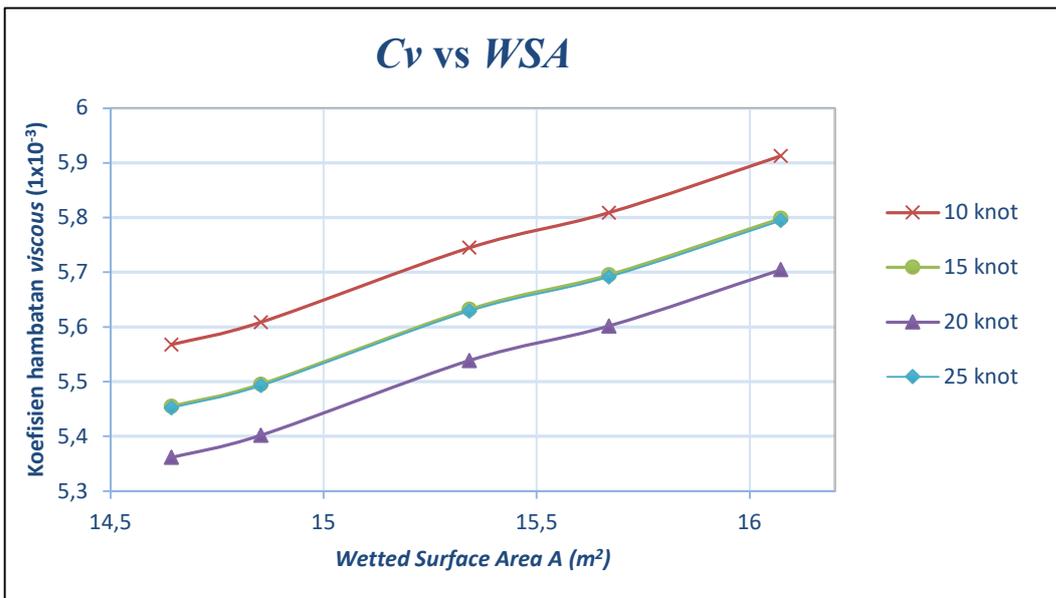
### B. Pengaruh nilai $nf$ dan $WSA$ terhadap nilai hambatan

Karena nilai  $nf$  yang menjadi inti penelitian dalam Tugas Akhir ini, maka perlunya untuk melihat bagaimana pengaruh nilai variabel  $nf$  yang berbanding lurus dengan nilai luasan permukaan basah  $WSA$  lambung polos terhadap nilai hambatan total pada kondisi menyelam. Selain nilai variabel  $nf$  juga berpengaruh untuk mengetahui nilai hambatan total terkecil, nilai  $nf$  yang besar akan mempengaruhi nilai volume lambung dari segi desain model lambung polos. Nilai  $nf$  yang cukup besar akan sangat baik dalam pemanfaatan ruang lambung, maka dari itu sebisa mungkin dicari nilai  $nf$  yang besar namun dengan nilai koefisien hambatan yang paling kecil.

Hubungan antara nilai  $nf$  dengan hambatan total maupun nilai  $WSA$  terhadap koefisien hambatan total ditampilkan pada Gambar 5.14 dan 5.15.



Gambar 5.14 Hubungan nilai hambatan total dengan  $nf$



Gambar 5.15 Hubungan nilai koefisien hambatan total dengan  $WSA$

Dari Gambar 5.14 dan 5.15 dapat dilihat bahwa hubungan kedua variable  $nf$  maupun  $WSA$  yang mencakup semua sebaran variasi model lambung polos, menunjukkan nilai perbandingan lurus dalam peningkatan nilai hambatan total. Kedua gambar menunjukkan tren kenaikan, namun terdapat perbedaan tren kenaikan diantara keduanya, pada grafik perbandingan hambatan total dengan nilai  $nf$  kenaikan cenderung melandai, sedangkan pada grafik perbandingan koefisien hambatan total pada kondisi menyelam dengan  $WSA$  tren kenaikan cenderung tajam, namun sedikit fluktuatif searah dengan pertambahan  $WSA$ .

Dari kedua perbandingan dapat diambil kesimpulan bahwa semakin kecil nilai  $nf$ , maka hambatan yang didapatkan juga semakin kecil dengan nilai  $nf = 1,84$  merupakan nilai koefisien bentuk haluan lambung yang paling baik. Sedangkan pada peningkatan  $WSA$  dari  $14 - 17 \text{ m}^2$  tidak ditemukan adanya penurunan nilai koefisien hambatan total, hal ini berarti dari segi volume dan hambatan yang didapat nilai koefisien  $nf = 1,84$  merupakan nilai yang paling baik dari segi hidroeffisiensinya.

### 5.3. Perbandingan Hambatan Kondisi Permukaan

Dari simulasi pada kondisi permukaan yang telah dilakukan didapatkan hambatan *surfaced condition* (total) untuk setiap variasi model uji, yaitu model dengan  $nf = 1,84; 2,00; 2,50; 3,00; 4,00$  dalam 4 variasi kecepatan  $V_s = 10, 15, 20, \text{ dan } 25 \text{ knot}$ . Ditampilkan pada Tabel 5.2

Tabel 5.2 Nilai hambatan kondisi permukaan untuk setiap variasi model

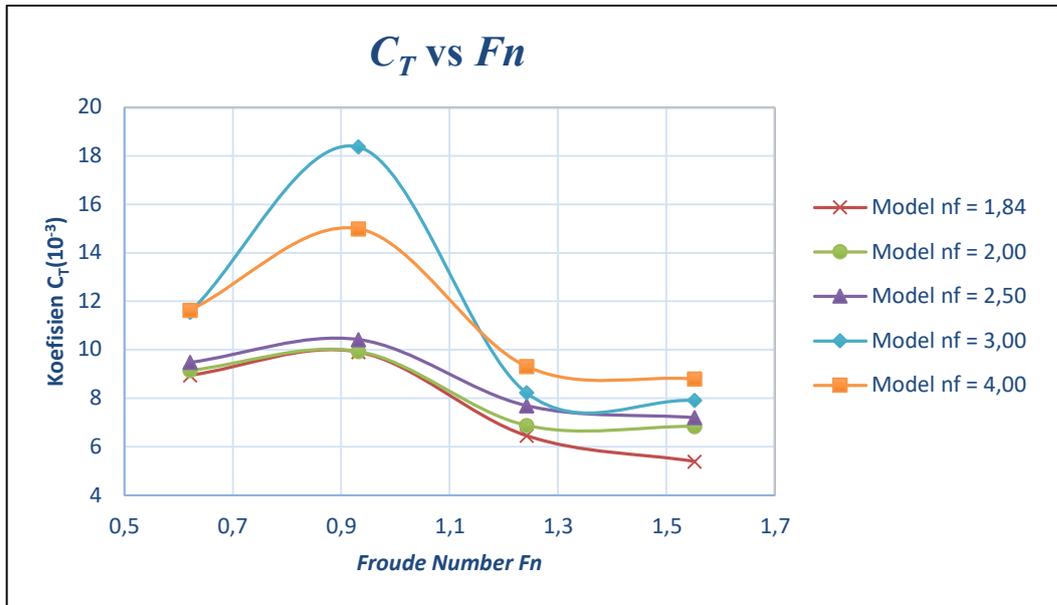
$V_s$ ( <i>knot</i> )	Model $nf = 1,84$		Model $nf = 2,00$		Model $nf = 2,50$		Model $nf = 3,00$		Model $nf = 4,00$	
	$R_{total}$ ( $N$ )	$C_T$ ( $1 \times 10^{-3}$ )	$R_{total}$ ( $N$ )	$C_T$ ( $1 \times 10^{-3}$ )	$R_{total}$ ( $N$ )	$C_T$ ( $1 \times 10^{-3}$ )	$R_{total}$ ( $N$ )	$C_T$ ( $1 \times 10^{-3}$ )	$R_{total}$ ( $N$ )	$C_T$ ( $1 \times 10^{-3}$ )
10	1238,03	8,95	1266,46	9,16	1311,94	9,48	1599,07	11,56	1610,02	11,64
15	3118,36	9,91	3126,38	9,94	3280,54	10,43	5781,40	18,38	4717,62	15,00
20	3702,04	6,46	3946,74	6,89	4411,86	7,70	4717,62	8,23	5341,80	9,32
25	4913,66	5,40	6228,10	6,84	6559,94	7,21	7209,86	7,92	8013,04	8,80

Tabel 5.2 memperlihatkan nilai hambatan total dari setiap model uji dalam variasi beberapa kecepatan. Dilakukan perhitungan koefisien hambatan total  $C_T$  sesuai dengan persamaan 2.11 pada Bab 2.4.3 Hambatan Kapal Selam.

Untuk dapat melihat bagaimana karakteristik koefisien hambatan total pada kondisi permukaan dengan seiring adanya penambahan kecepatan, dibuat grafik perbandingan koefisien hambatan total  $C_T$  dengan *Froude Number*  $Fn$  pada semua variasi kecepatan. *Froude Number* digunakan pada perbandingan hambatan kondisi permukaan karena erat kaitannya dengan berpengaruhnya hambatan gelombang pada saat kondisi permukaan.  $Fn$  dihitung pada semua variasi kecepatan berdasarkan persamaan 5.1.

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

Persamaan 5.1 merupakan persamaan *Froude Number*, dengan  $V$  : kecepatan model uji dalam  $m/s$ ,  $g$  : percepatan gravitasi ( $9,81 m/s$ ), dan  $L$  : panjang model uji dalam  $m$ .



Gambar 5.16 Grafik perbandingan hambatan total

Pada gambar 5.16 menunjukkan perbedaan koefisien hambatan total yang dihasilkan oleh model uji; Model  $nf = 1,84$ ;  $2,00$ ;  $2,50$ ;  $3,00$ ;  $4,00$ . Dari hambatan total yang telah dihitung, diketahui bahwa, koefisien hambatan total mulai mengalami kenaikan pada  $Fn$   $0,5$  sampai terjadi penurunan nilai koefisien pada  $Fn$   $0,9$ . Fluktuasi ini berbeda jika dibandingkan dengan koefisien hambatan *viscous* pada kondisi menyelam. Jika hambatan menyelam, pengaruh hambatan gesek sangat tinggi, berbeda halnya dengan hambatan pada kondisi permukaan yang lebih dipengaruhi oleh hambatan gelombang (*wave making resistance*).

Fluktuasi nilai koefisien hambatan total  $C_T$  seiring bertambahnya nilai *Froude Number* menunjukkan adanya pengaruh yang kuat akan hambatan gelombang. Moonesun (2015) membuktikan bahwa dengan angka *Froude Number* yang tinggi, efek interaksi antara hambatan yang mengenai haluan dan buritan sangat mempengaruhi besarnya nilai koefisien hambatan total, adanya angka kritical *Froude Number* sehingga berpengaruh pada nilai koefisien hambatan total.

Dari Gambar 5.16 juga diketahui nilai  $nf = 1,84$  menghasilkan nilai koefisien hambatan terkecil dari semua variasi koefisien  $nf$  untuk bentuk haluan lambung polos.

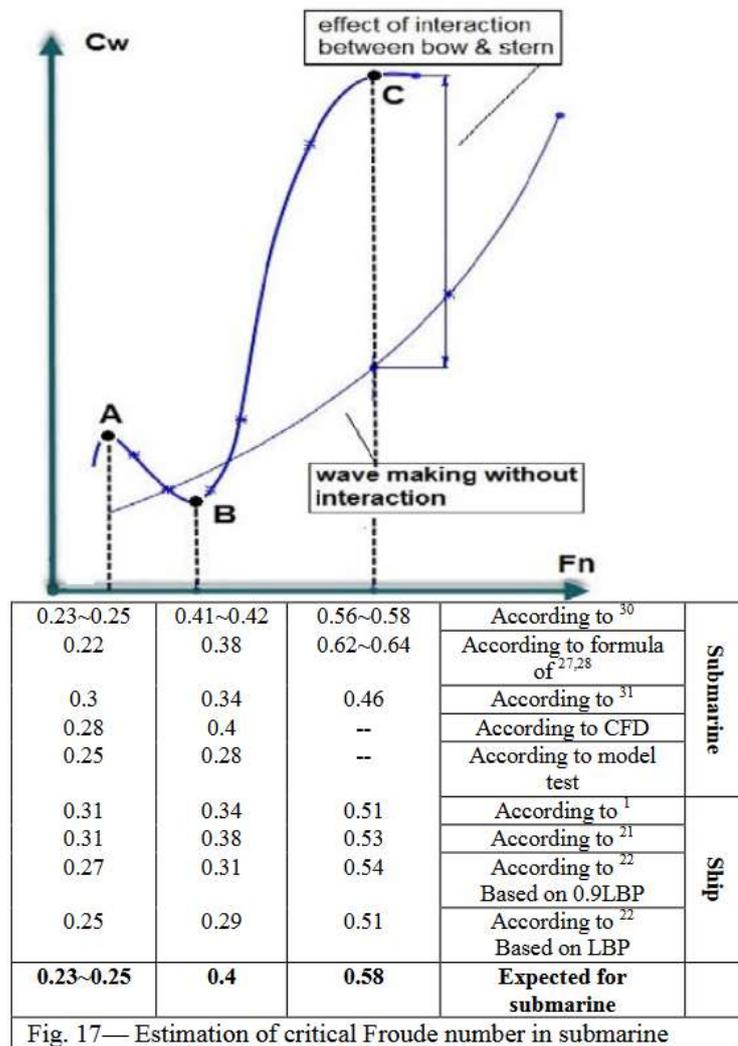


Fig. 17— Estimation of critical Froude number in submarine

Gambar 5.17 Fenomena adanya kritikal *Froude Number* (Moonesun et al. 2015)

Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB 6

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.4. Kesimpulan

Setelah adanya analisis dan pembahasan terhadap hasil simulasi CFD yang dilakukan pada Tugas Akhir ini, dapat disimpulkan bahwa :

1. Pada kondisi menyelam hambatan yang berpengaruh yaitu hambatan gesek (*friction resistance*), sedangkan pada kondisi permukaan terdapat tambahan pengaruh hambatan yaitu hambatan gelombang (*wave making resistance*).
2. Dari metode analisis yang dilakukan, mampu untuk melihat karakteristik hambatan pada masing-masing kondisi, namun variasi kecepatan sangat berpengaruh. Pengaruh variasi kecepatan 10 – 25 knot menghasilkan nilai *Reynolds Number* yang tinggi sehingga menyebabkan fluktuasi nilai koefisien hambatan *viscous*, sehingga nilai koefisien hambatan *viscous* mulai naik pada  $Re : 7 \times 10^7$ , sedangkan pada kondisi permukaan nilai *Froude Number* kritis pada kisaran  $Fn 0,7 - 1$ .
3. Nilai hambatan pada semua variasi model lambung polos kapal selam pada kondisi menyelam dibandingkan pada kondisi permukaan mengalami kenaikan pada kecepatan 10 – 15 knot namun mengalami penurunan pada kecepatan 20 - 25 knot, kecuali model dengan  $nf = 4,00$ . Masing-masing penurunan nilai hambatan menyelam dan permukaan pada 20 knot : Model  $nf = 1,84$  dari 4258,28 – 3702,04 N; Model  $nf = 2,00$  dari 4352,24 – 3946,74 N; Model  $nf = 2,50$  dari 4609,24 – 4411,86 N; Model  $nf = 3,00$  dari 4761,32 – 4717,62; Model  $nf = 4,00$  dari 4973,70 – 5341,80 N.
4. Model lambung polos dengan koefisien haluan  $nf = 1,84$  menghasilkan nilai hambatan paling kecil pada kondisi menyelam dan permukaan. Permodelan dengan nilai koefisien haluan  $nf = 1,84$  memiliki profil bentuk elipsoid, menghasilkan koefisien hambatan yang kecil dan volume yang optimal, sehingga bentuk ini atau sejenisnya sangat direkomendasikan.

## 5.5. Saran

Adapun saran untuk simulasi yang akan datang yang berhubungan dengan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Variasi nilai  $\eta f$  , variasi kecepatan dan variasi bentuk dengan rentang lebih luas untuk dapat melihat karakteristik permodelan lambung secara keseluruhan.
2. Pemilihan perangkat lunak untuk pengujian lambung polos pada kondisi permukaan, karena permodelan hambatan gelombang akan semakin baik.
3. Pemilihan *meshing* dan model turbulensi selain dalam Tugas Akhir ini, khususnya pada simulasi kondisi permukaan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Allmendinger, E. E. (1990). *Submersible Vehicle System Design*. Jersey City: Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics : The Basic With Applications*. New York City, NY: McGraw-Hill Inc.
- Baker, C. (2004). *Estimating Drag Forces on Submarine Hulls*. Defence R&D Canada Atlantic.
- Burcher, R., & Rydill, L. (1994). *Concepts in Submarine Design*. Cambridge: University of Cambridge Press.
- de Fretes, E. R. (2014). *Studi Parametrik Terhadap Aliran Hidrodinamika Kapal Selam*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Givler, R. C., Gartling, D. K., Engelman, M. S., & Haroutunian, V. (1991). Navier-Stokes Simulation of Flow Past Three-Dimensional Submarine Models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 87, 175-200.
- Granville, P. S. (1975). *Drag and Turbulent Boundary Layer of Flat Plates at Low Reynolds Numbers*. Bethesda, Maryland: Naval Ship Research and Development Center US NAVY.
- ITTC. (2011). ITTC-Recommended Procedures and Guidelines : Fresh Water and Seawater Properties. *International Towing Tank Conference*, (hal. 1- 45).
- ITTC. (2011). ITTC-Recommended Procedures and Guidelines : Resistance Test. *International Towing Tank Conference*, (hal. 1-13).
- Jackson, H. A. (1992). Fundamentals of Submarine Concepts Design. *SNAME Transactions*, Vol. 100, 419-488.
- Joubert, P. N. (2004). *Some Aspects of Submarine Design Part 1. Hydrodynamics*. Victoria: DSTO Platforms Science Laboratory.
- Joubert, P. N. (2006). *Some Aspects of Submarine Design Part. 2 Shape of a Submarine 2026*. Victoria: Defence Science and Technology Organisation.
- Lewis, E. V. (1988). *Principles of Naval Architecture, Vol II : Resistance, Propulsion and Vibration*. Jersey City: Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Liu, Z. H., Ying, X., Wang, Z. Z., Wang, S., & Tu, C. X. (2010). Numerical Simulation and Experimental Study of the new Method Horseshoe Vortex Control. *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22 Issue 4, 572-581.
- Mahardika, N. (2007). *Simulasi Numerik Aliran 3D untuk Kondisi Quasi Steady dan Unsteady pada Turbin Uap Aksial*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Menter, F. R. (1993). Zonal Two Equation Kappa-Omega Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *24th AIAA Fluid Dynamics Conference*. Orlando: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Moonesun, M., Korol, Y. M., Ardeshiri, S., Mahdian, A., Gharechahi, A., Tahvildarzade, D., & Ursalov, A. (2015). Evaluation of Naval Submarine Seakeeping Criteria. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 2(4): 45-54.
- Moonesun, M., Korol, Y. M., Moosavizadegan, S. H., Dalayeli, H., Mahdian, A., Javadi, M., & Brazkho, A. (2016). Wave Making System in Submarines at Surface Condition. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 45(1) : 44-53.
- Moonesun, M., Korol, Y. M., Nikrasov, V. A., Ursalov, A., & Brajhko, A. (2016). CFD Analysis of The Bow Shapes of Submarines. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 3(1):1-6.

- Moonesun, M., Mikhailovich, K. Y., Tahvildarzade, D., & Javadi, M. (2014). Practical Scaling Method for Underwater Hydrodynamics model test of submarine. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 1217-1224.
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., & Rothmayer, A. P. (2012). *Fundamentals of Fluid Mechanics 7 Edition*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Nugroho, A. C., & Sulisetyono, A. (2012). Studi Hambatan Kapal Trimaran Akibat Variasi Posisi Sidehull Terhadap Mainhull Secara Melintang. *Jurnal Teknik ITS*, G-1.
- Pohler, C. H., Bement, A. A., Wilson, D. S., & Skinner, W. A. (1965). *Submarine Main Ballast Tanks - Theory and Methods for Refined Structural Design*. Bureau of Ships Washington D C: Defense Technical Information Center.
- Putra, B. G. (2016). *Studi Desain Midget Submarine untuk Aplikasi Intelijen dan Monitoring Perairan Indonesia*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rumampuk, R. (2013). Hak Atas Pengelolaan Kawasan Pesisir di Provinsi Sulawesi Utara. *Lex et Societas*, Vol. I Nomor 5.
- Stenard, J. K. (1988). *Comparative Naval Architecture of Modern Foreign Submarines*. Naval Postgraduate School, Dudley Knox Library. Cambridge, Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology.
- Stern, F., Wang, Z., Yang, J., Sadat-Hosseini, H., Mousaviraad, M., Bhushan, S., . . . Grenstedt, J. L. (2015). Recent Progress in CFD for Naval Architecture and Ocean Engineering. *Journal of Hydrodynamics*, 27(1) : 1-23.
- Wahyudi, R. (2017). *Analisa Pengaruh Konfigurasi Fin pada Stern Terhadap Kemampuan Hydro-Acoustic*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Zhang, Z. (2018). *Large Eddy Simulation of Rough Surface Flow in Shallow Open Channels*. Montreal: Concordia University.

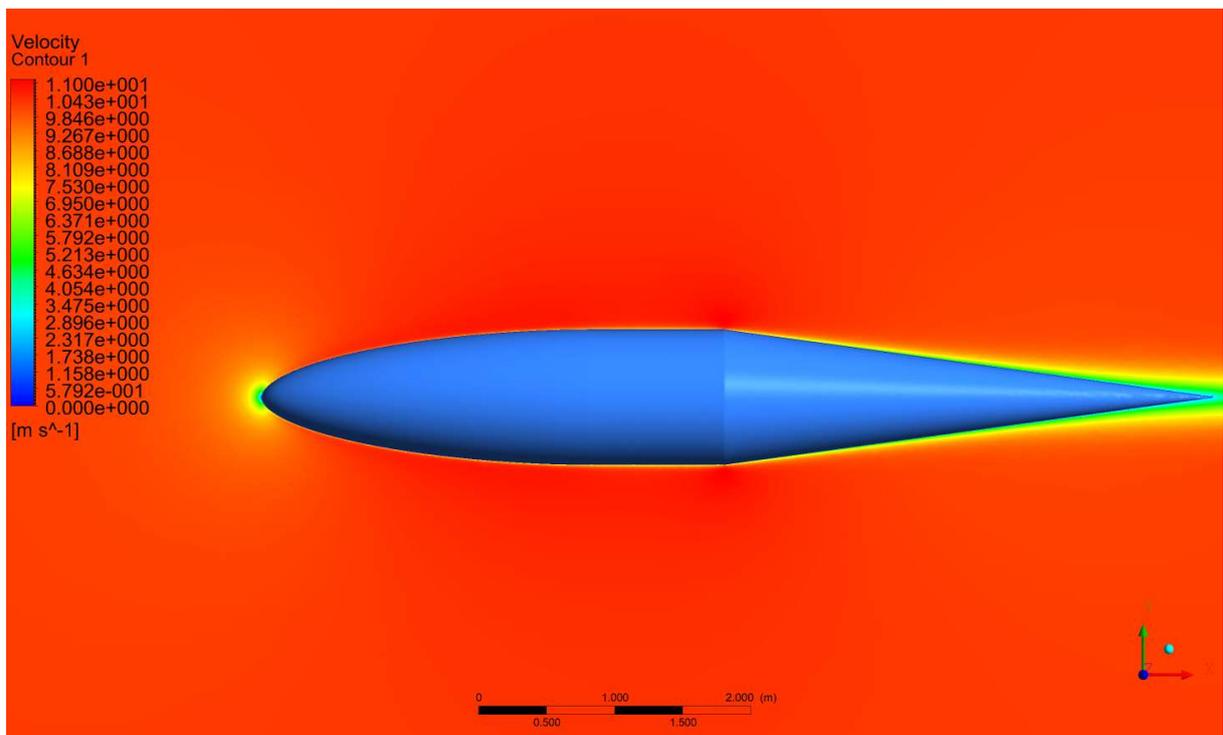
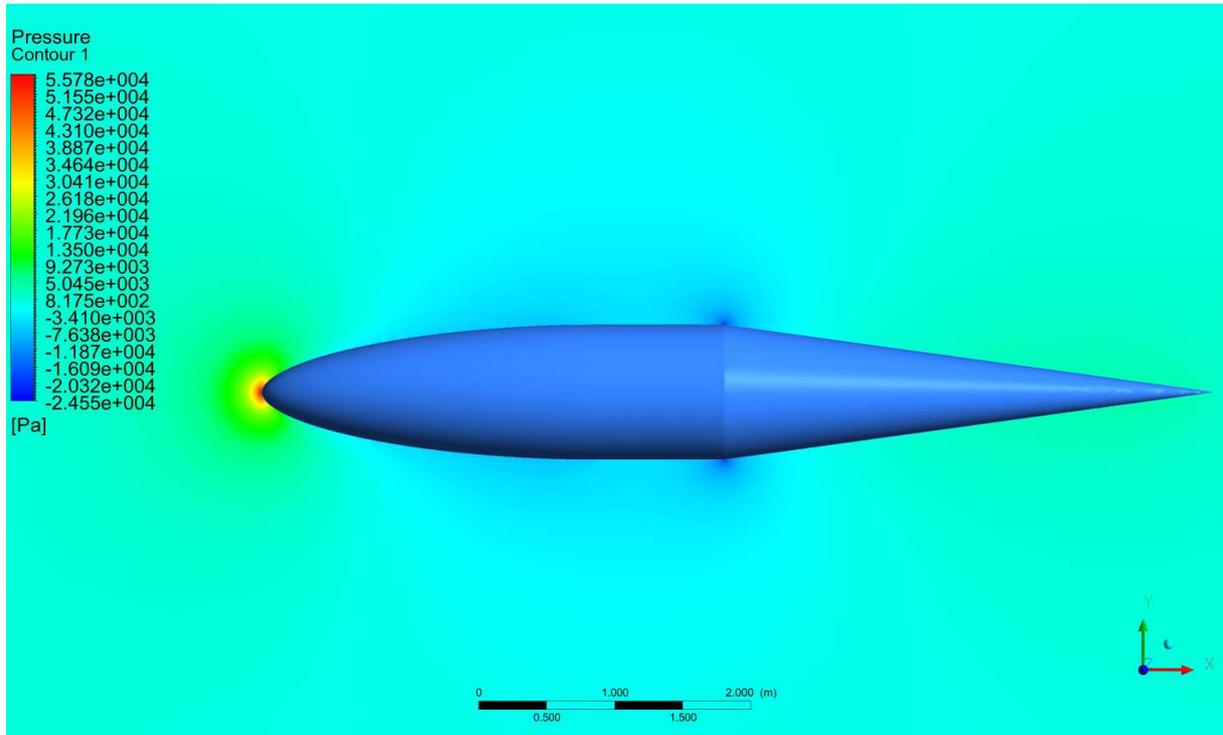
## **LAMPIRAN**

Lampiran A Simulasi Kondisi Menyelam  
Lampiran B Simulasi Kondisi Permukaan

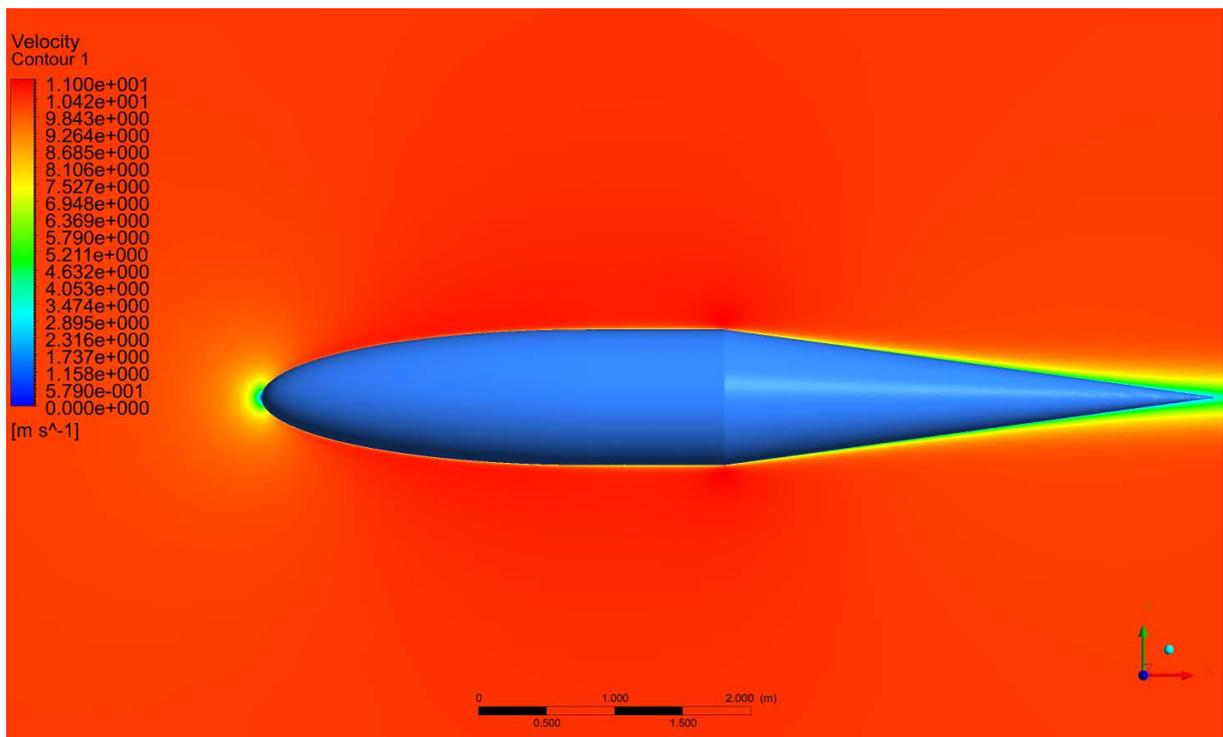
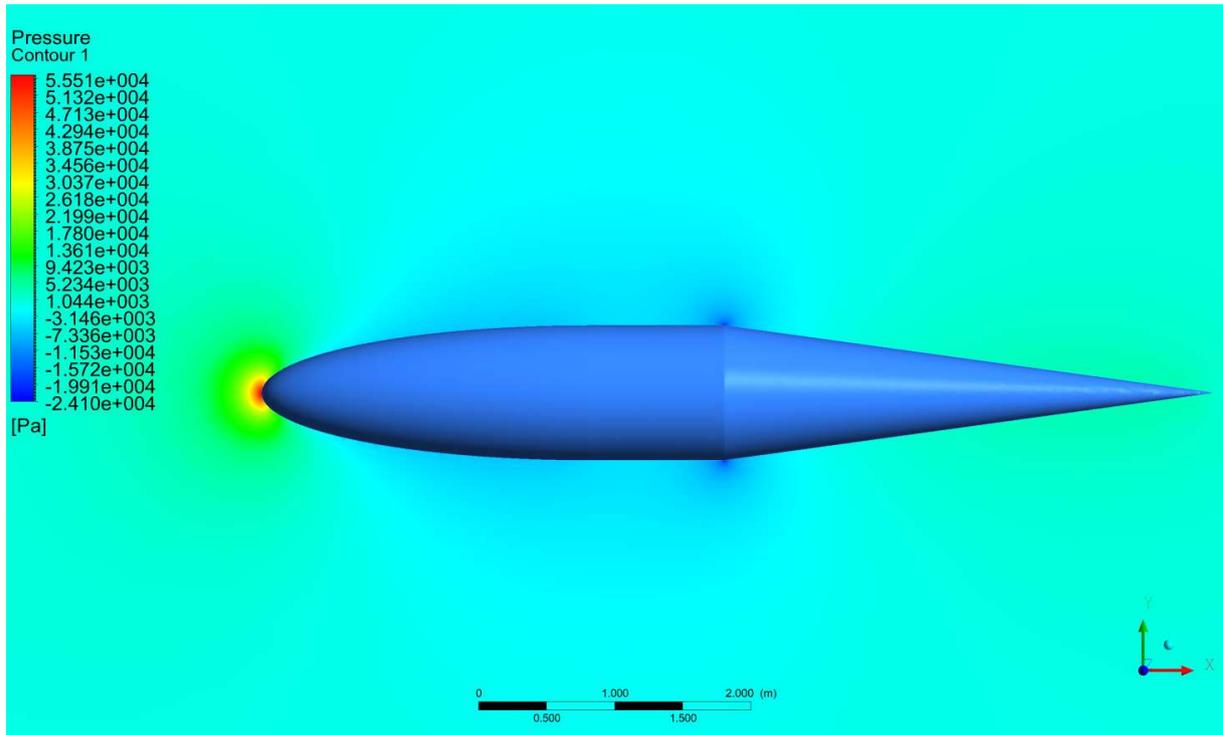
# LAMPIRAN A

## SIMULASI KONDISI MENYELAM

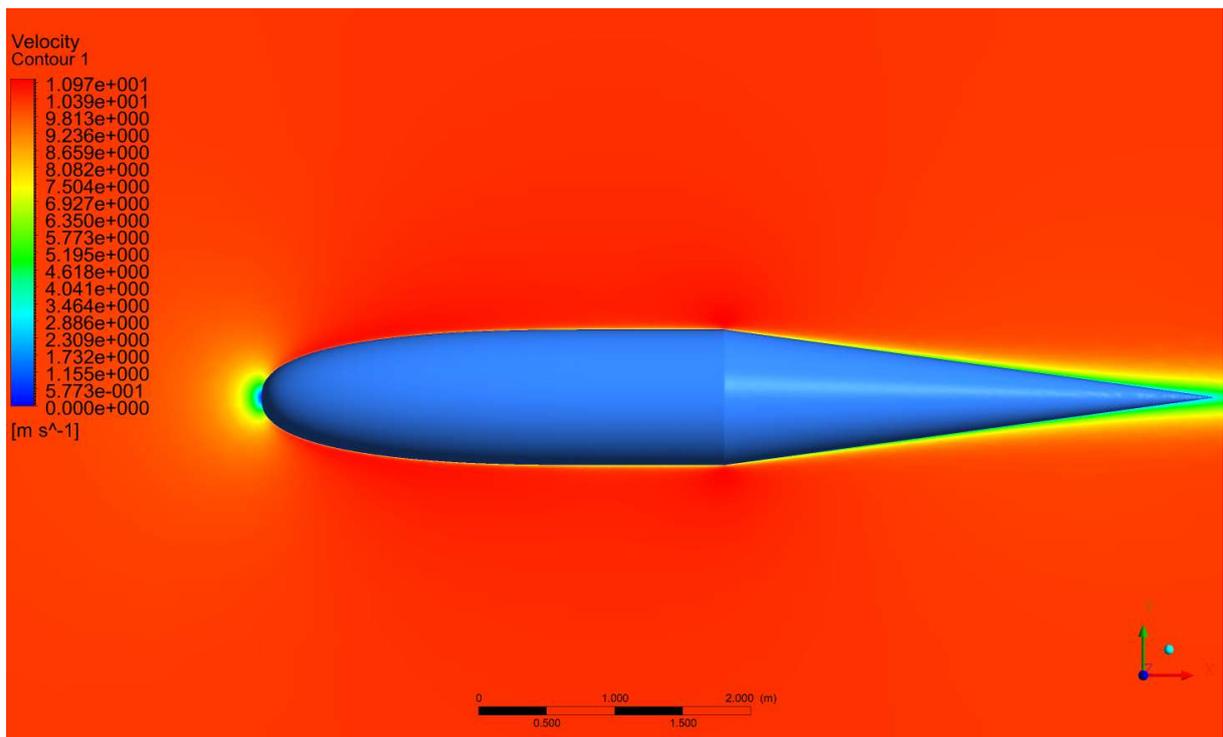
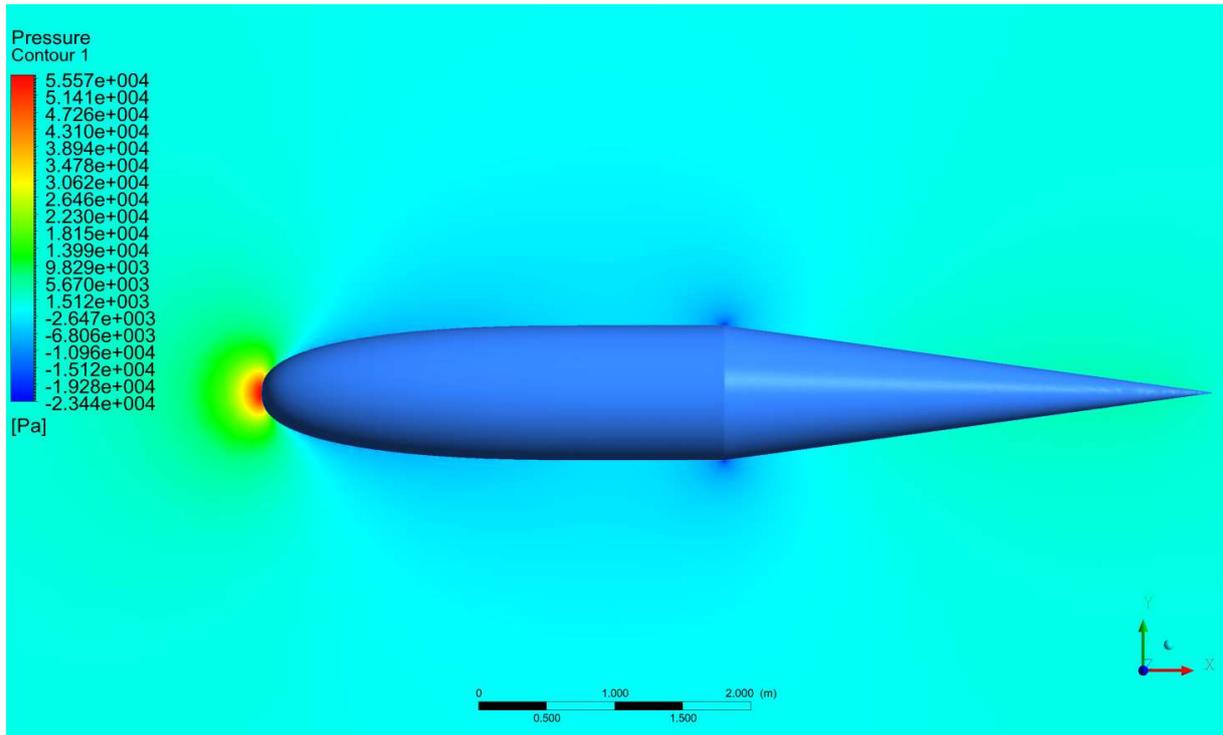
Model *nf*: 1,84



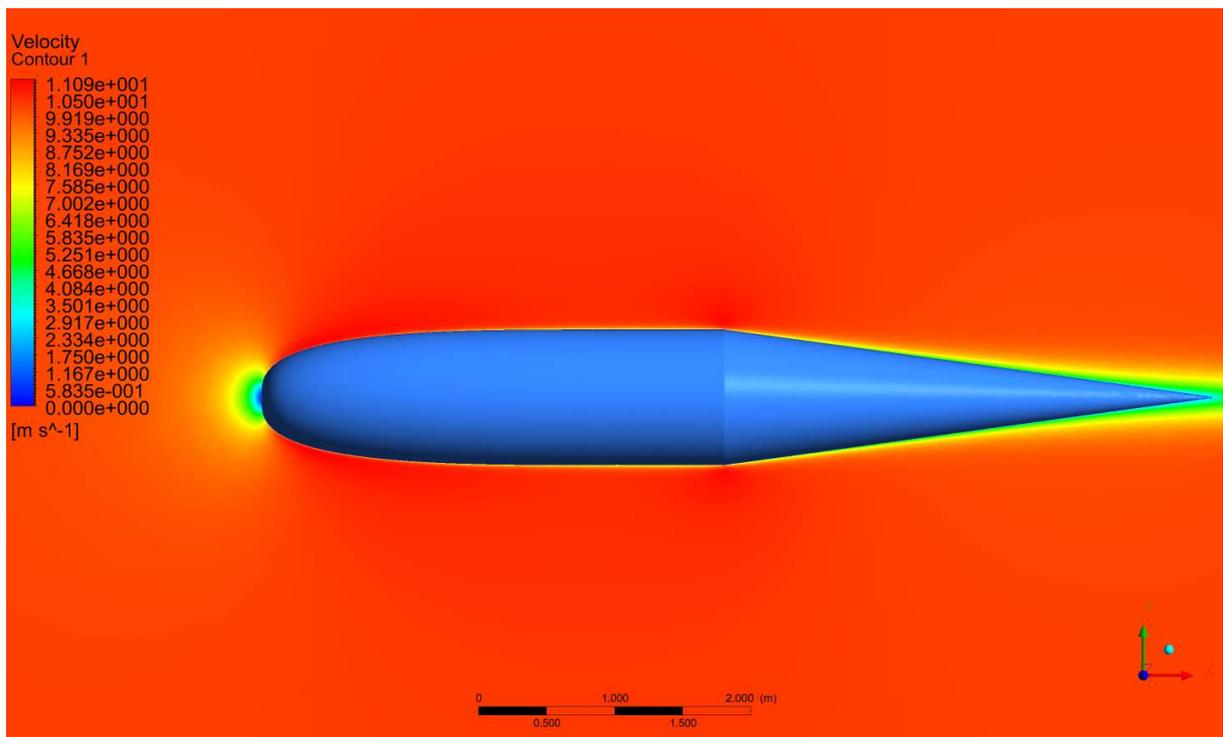
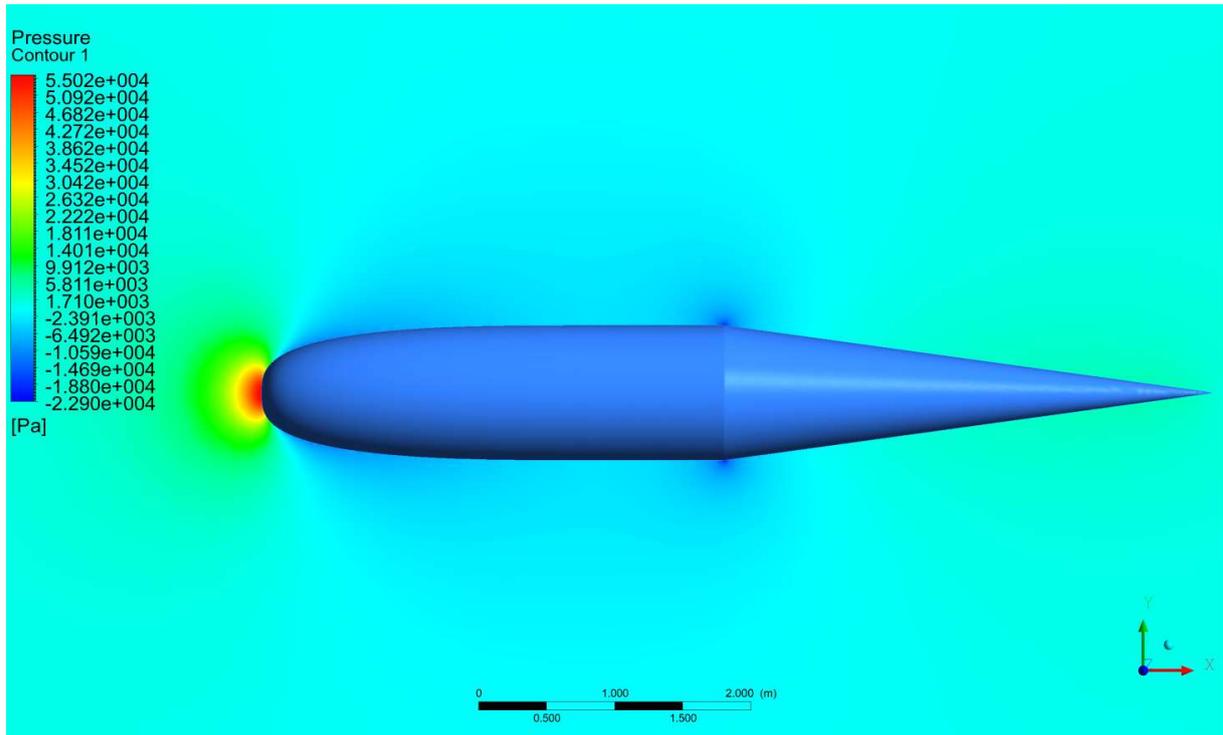
Model *nf*: 2,00



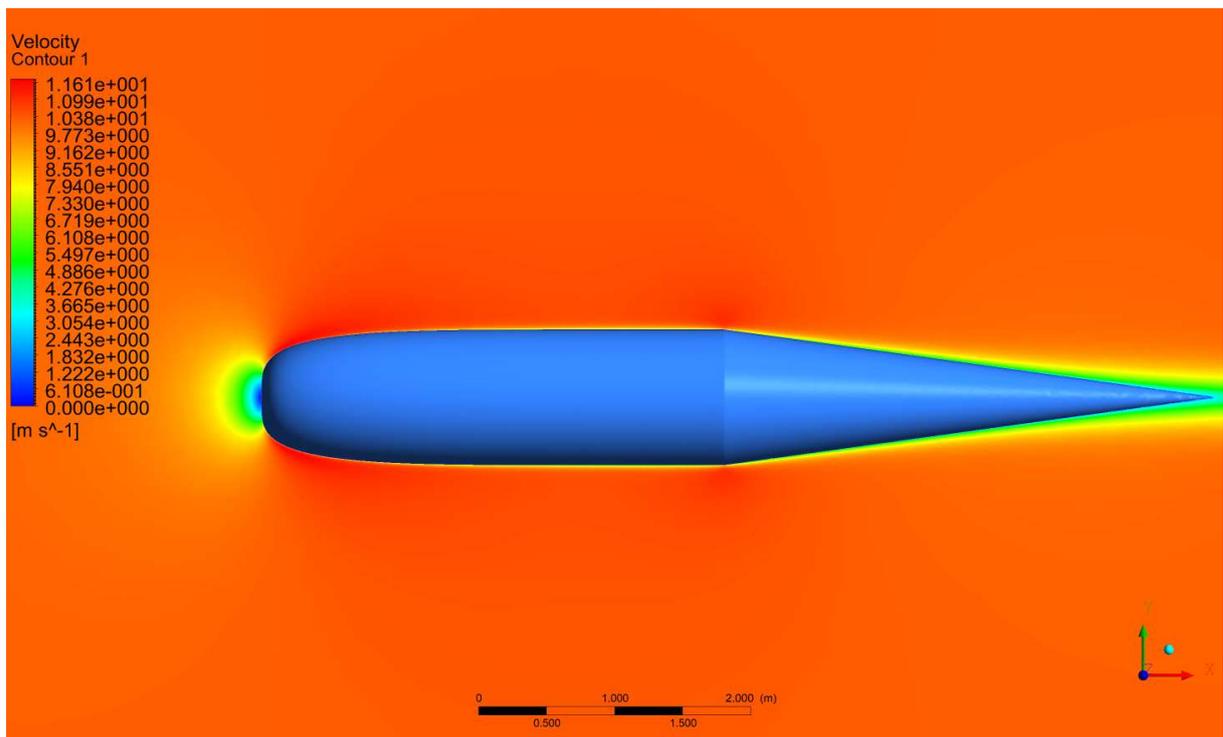
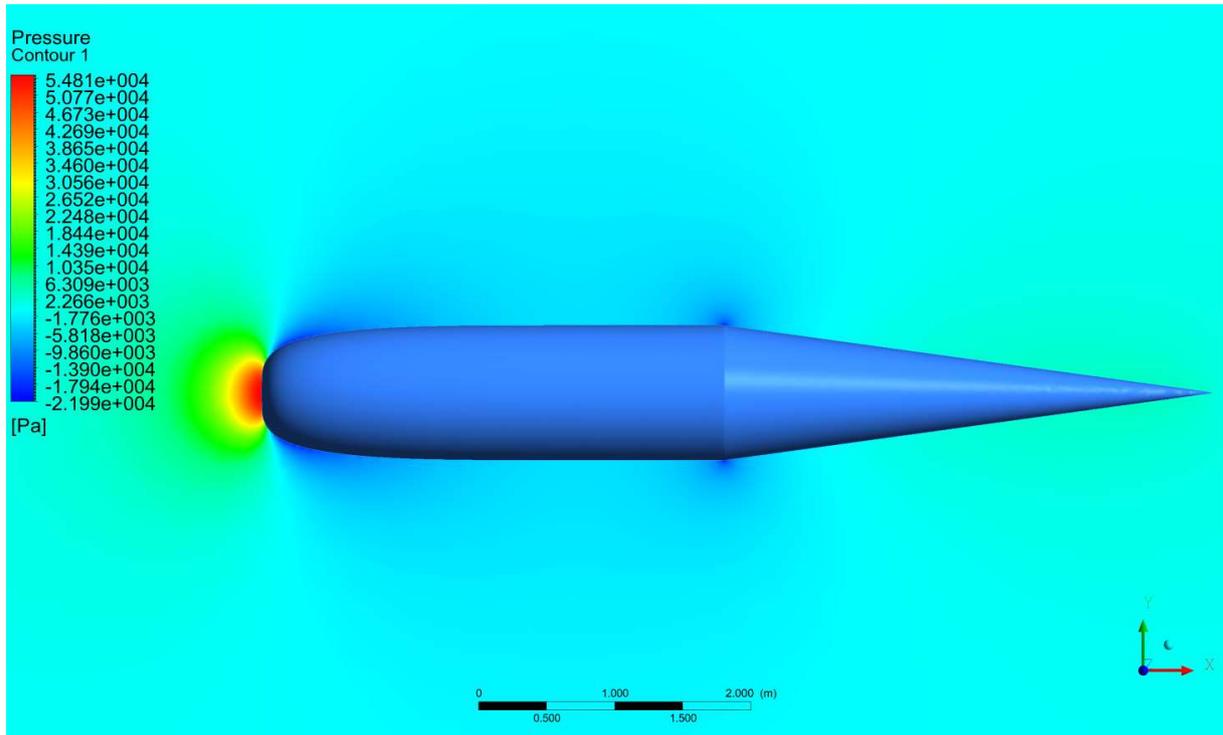
Model *nf*: 2,50



Model *nf*: 3,00



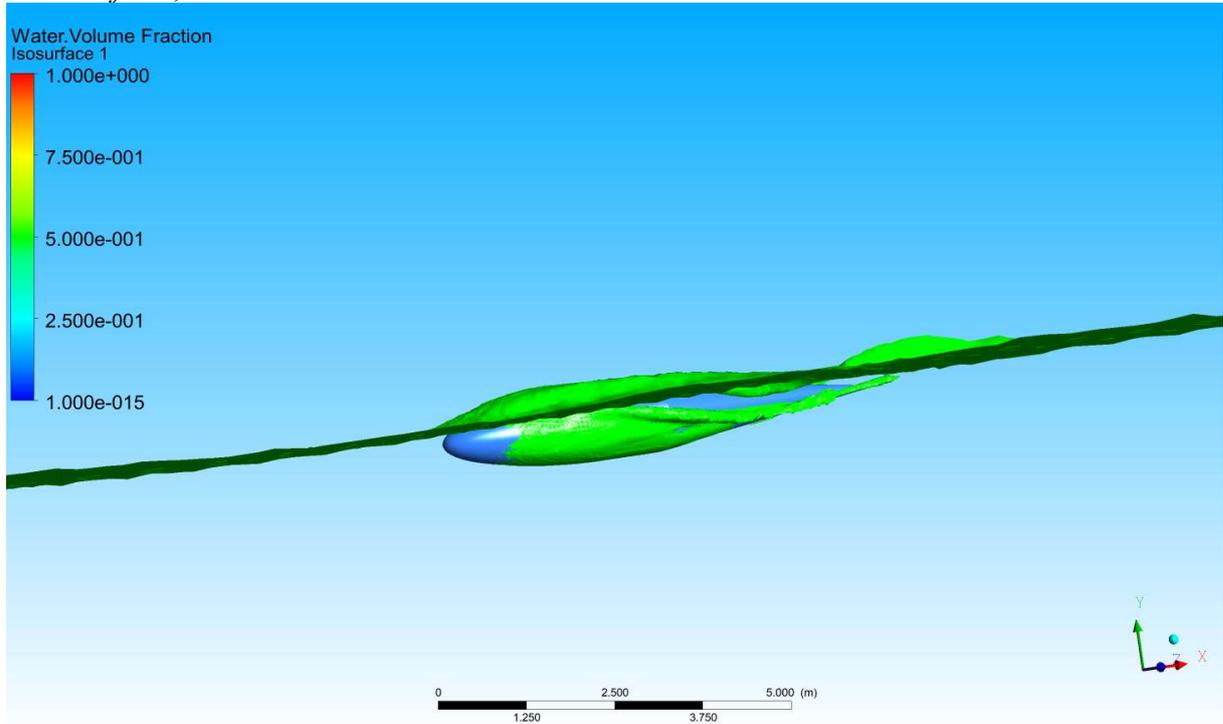
Model *nf*: 4,00



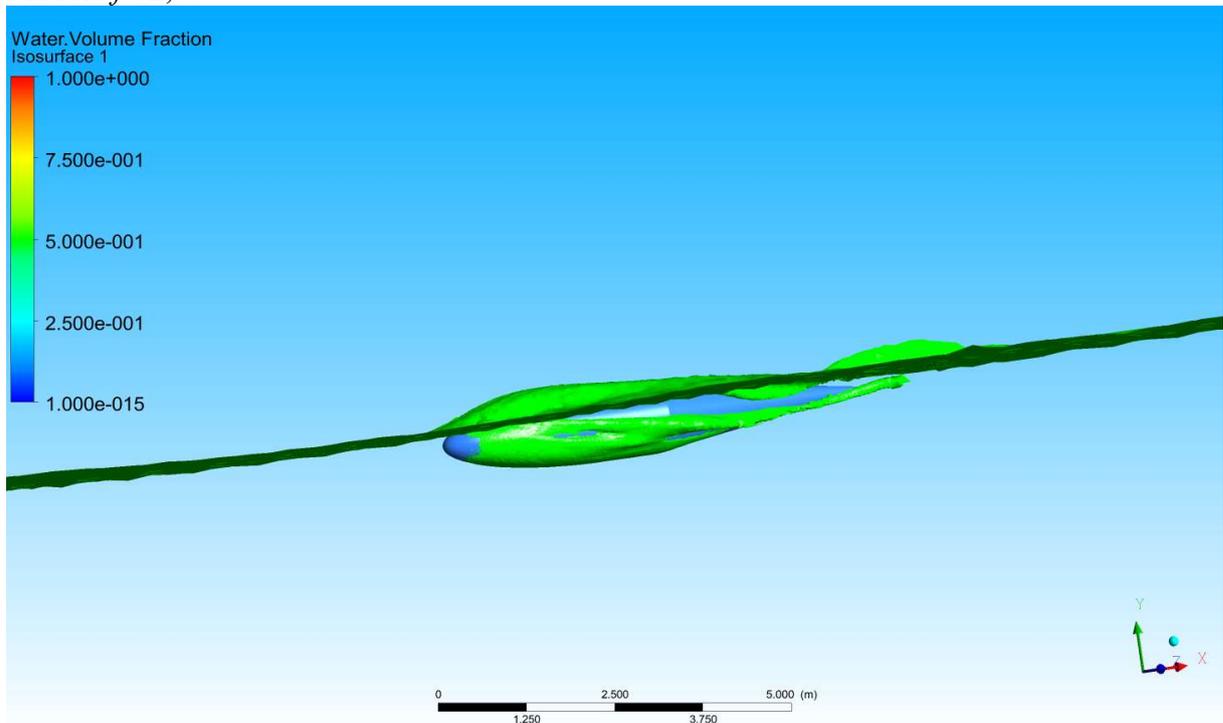
# LAMPIRAN B

## SIMULASI KONDISI PERMUKAAN

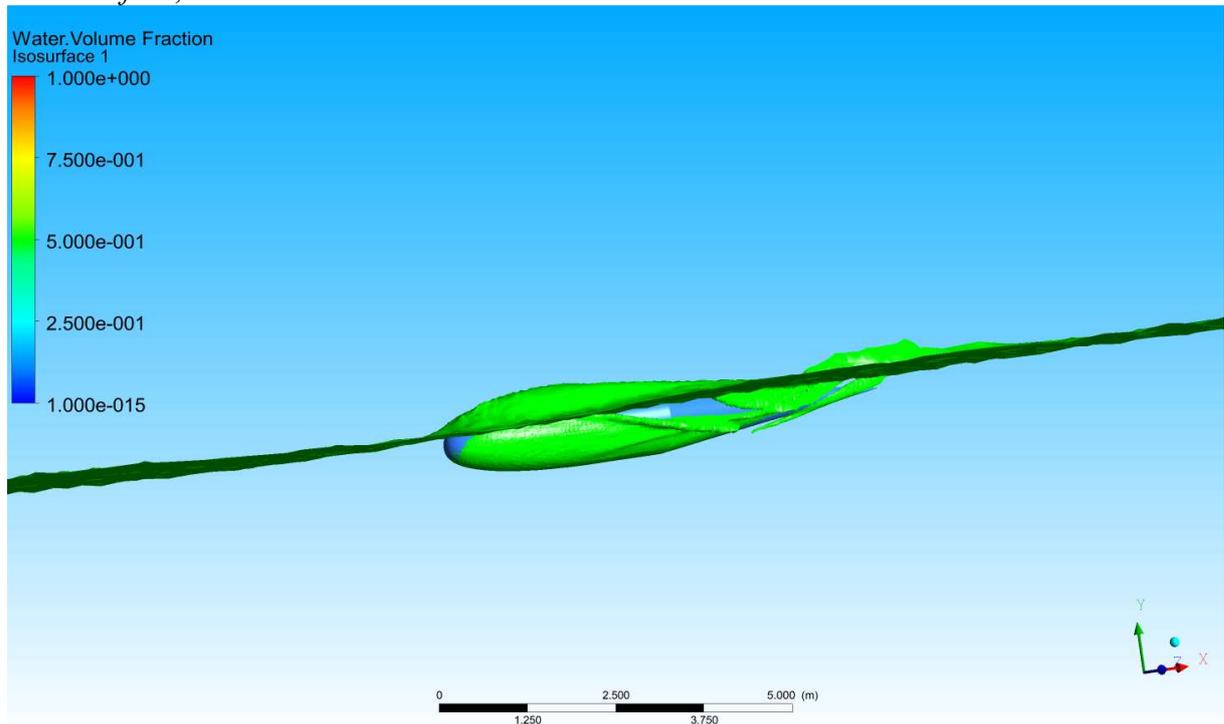
Model  $nf$  : 1,84



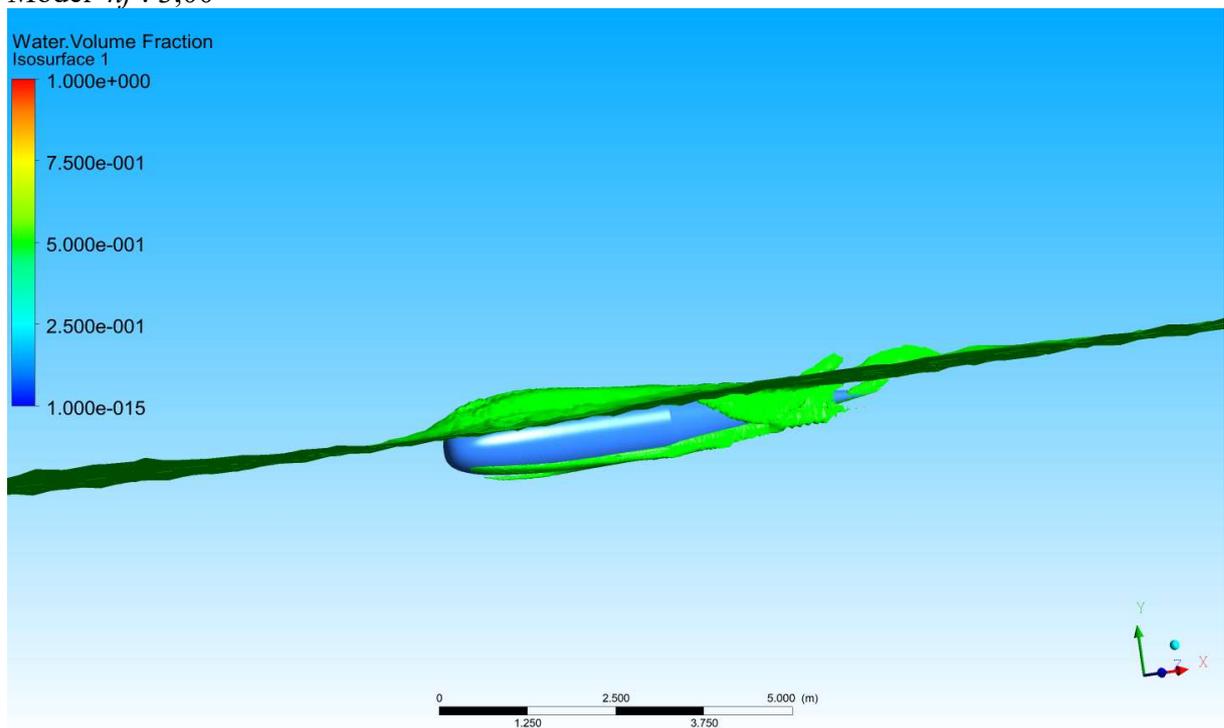
Model  $nf$ : 2,00



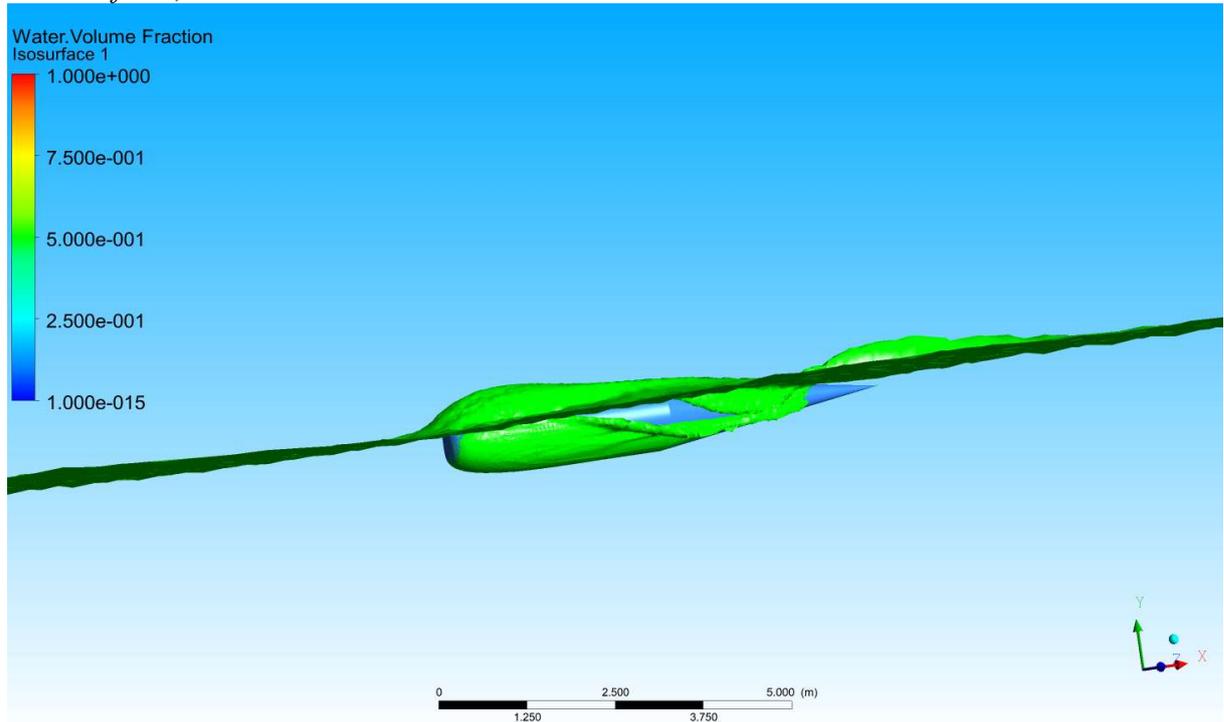
Model  $nf: 2,50$



Model  $nf: 3,00$



Model  $nf : 4,00$



## BIODATA PENULIS



Muhammad Rais Amin, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Klaten pada 20 Oktober 1995 silam, Penulis merupakan anak pertama dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK RA Masyithoh I Batur, kemudian melanjutkan ke SDN 1 Ceper, SMPN 1 Pedan dan SMAN 1 Karanganom. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2013. Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi *staff* Departemen KOMINFO HIMATEKPAL FTK ITS 2014/2015 serta kadiv Multimedia Kreatif Departemen KOMINFO BEM FTK ITS 2015/2016.

+6281358942839

Email: [muhammadamin601@aol.com](mailto:muhammadamin601@aol.com)