



TUGAS AKHIR - MN141581

**ANALISIS HAMBATAN KAPAL SELAM MINI
MENGUNAKAN PENGUJIAN PADA *WIND TUNNEL*
YANG TERVALIDASI DENGAN *COMPUTATIONAL FLUID
DYNAMICS***

RINALDI EKA WARDANA
NRP. 4110 100 022

Aries Sulisetyono ST., MA.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.

JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - MN141581

**RESISTANCE ANALYSIS OF MINI SUBMARINE WIND
TUNNEL TESTING VALIDATED WITH COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMICS**

RINALDI EKA WARDANA
NRP. 4110 100 022

Aries Sulisetyono ST., MA.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.

DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE & SHIPBUILDING ENGINEERING
Faculty of Marine Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2015

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS HAMBATAN KAPAL SELAM MINI MENGUNAKAN PENGUJIAN PADA *WIND TUNNEL* YANG TERVALIDASI DENGAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

TUGAS AKHIR

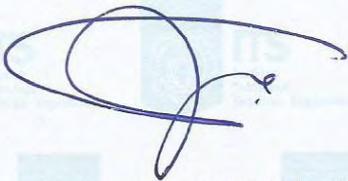
Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan - Hidrodinamika Kapal
Program S1 Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RINALDI EKA WARDANA
NRP. 4110 100 022

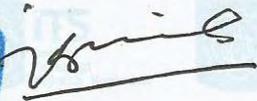
Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing I



Ariès Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.
NIP. 19710320 199512 1 002

Dosen Pembimbing II



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

SURABAYA, 3 JULI 2015

RESISTANCE ANALYSIS OF MINI SUBMARINE WIND TUNNEL TESTING

VALIDATED WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Author : Rinaldi Eka Wardana
ID No. : 4110 100 022
Dept. / Faculty : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Supervisors : 1. Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.
2. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.

ABSTRACT

In the process of designing the mini-submarines are concerned on resistance problem that occurs in the mini-submarine. With minimal resistance required the driving force becomes smaller. So that the motor power is used will be more economical in terms of price. In the calculation of the resistance can be done with experimental wind tunnel and CFD simulations. Wind tunnel used open-circuit type tunnel (subsonic wind tunnel) with a 1:12 scale. Variations are used there are 2 mini-submarines barehull and mini-submarines with fin. There are five variations of the speeds used that is 15.43 m/s; 18.01 m/s; 20.57 m/s; 23.14 m/s; 25.72 m/s. The results of experiments and simulations are a total resistance mini-submarine. Of the total resistance will be sought value C_d of mini-submarine. The addition fin has effect on the C_d that is equal to 3.703%. Resistance mini-submarine with fin size of 6 m using a wind tunnel at the lowest speed 15.433 (m / s) is 78.414 kN, while the highest speed 25.722 (m / s) is 227.402 kN. Resistance mini submarine barehull size of 6 m using a wind tunnel at the lowest speed 15.433 (m / s) is 76.502 kN, while the highest speed 25.722 (m / s) is 222.928 kN. Based on the results of wind tunnel testing and CFD simulations show the *mean absolute percentage error* results for mini submarine I 5.207% and mini submarine II 5.611%

Key word: mini-submarine, wind tunnel, fin

KATA PENGANTAR

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

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

1. Aries Sulisetyono ST., MA.Sc., Ph.D. dan Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Perkapalan yang telah memberikan kemudahan sarana dan prasarana sehingga tugas akhir ini selesai;
3. Ir. Asjhar Imron, M.Sc., MSE., PED. Selaku Dosen Wali atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
4. Ir. Murdijanto, M.Eng. selaku Kepala Laboratorium Perancangan Kapal Jurusan Teknik Perkapalan FTK ITS atas bantuannya selama pengerjaan Tugas Akhir ini dan atas ijin pemakaian fasilitas laboratorium;
5. Kepala Laboratorium Mesin dan Mekanika Fluida jurusan Teknik Mesin ITS yang telah mengizinkan penulis menggunakan fasilitasnya untuk menyelesaikan Tugas akhir ini;
6. Sahabat saya yang sangat membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, Yogi Ardyansah dan rekan-rekan seperjuangan tugas akhir;
7. Orang tua, kekasih dan keluarga saya yang selalu mendukung serta kawan-kawan 2008, 2009, 2010 dan 2011 terutama CAPTAIN.

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

Surabaya, 7 Juli 2015

DAFTAR ISI

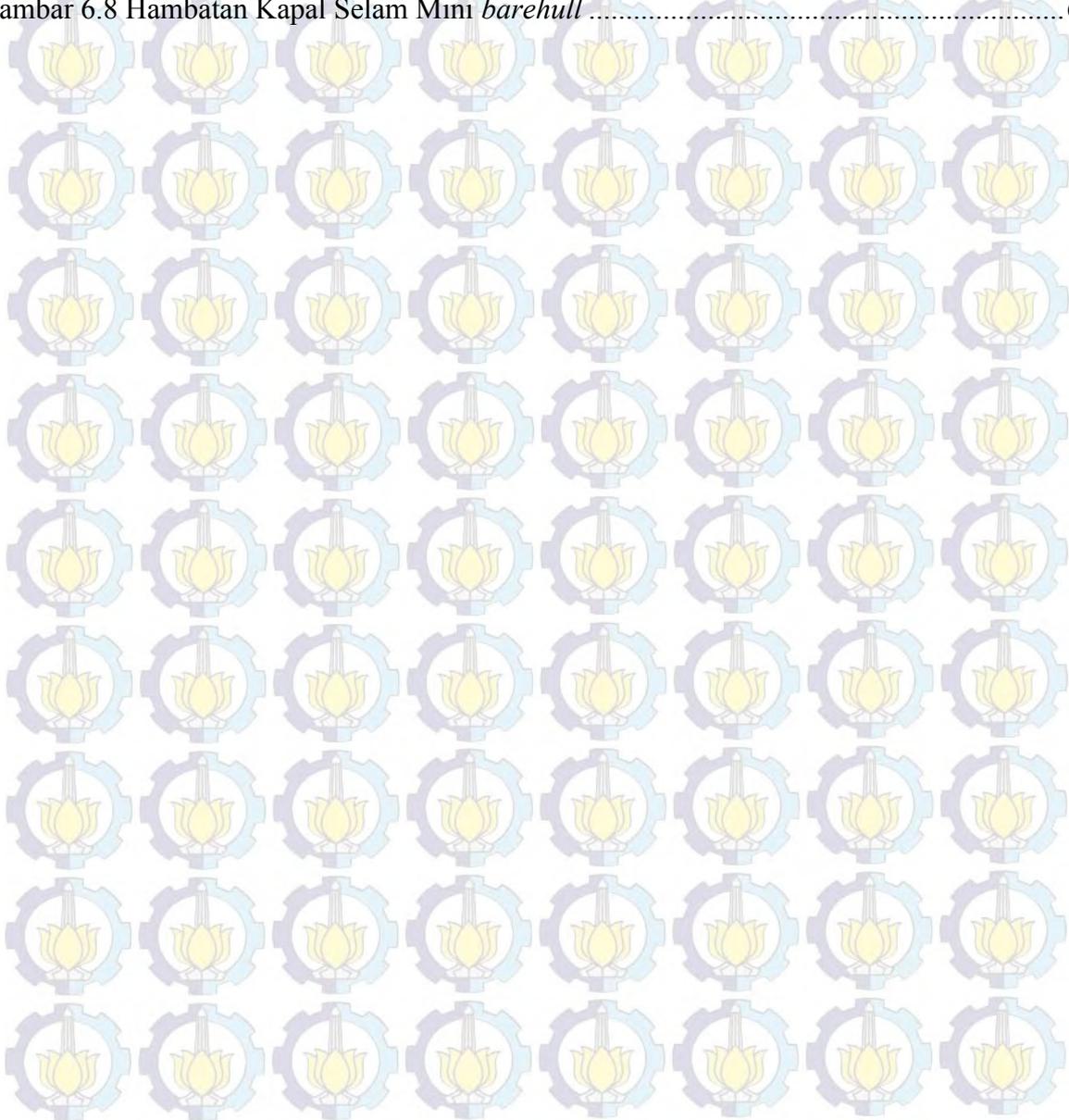
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR REVISI	iv
HALAMAN PERUNTUKAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	6
BAB II DASAR TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 <i>Appendages</i> Kapal Selam Mini	10
2.3 Hambatan	11
2.4 Computational Fluid Dynamic	14
2.5 Wind Tunnel Experiments	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Studi Literatur	23
3.2 Persiapan Model Pengujian	23
3.3 Simulasi Computational Fluid Dynamics	23
3.4 Pengujian pada <i>Wind Tunnel</i>	24
3.5 Mean Absolute Percentage Error	25
BAB IV PENGUJIAN WIND TUNNEL	27
4.1 Wind Tunnel	27
4.2 Jenis – jenis Wind Tunnel	27

4.2.1	<i>Open Circuit Tunnel</i>	27
4.2.2	<i>Closed Circuit Tunnel</i>	29
4.3	Pengukuran Gaya dan Kecepatan	31
4.3.1	Pengukuran Gaya	31
4.3.2	Pengukuran Kecepatan	33
4.4	Pengujian Kapal Selam Mini pada <i>Wind Tunnel</i>	33
BAB V SIMULASI COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS		41
5.1	Computational Fluid Dynamics	41
5.2	Persamaan Dasar Dinamika Fluida dalam CFD	42
5.3	ANSYS Fluent	44
5.3.1	Tahap Preprocessor	44
5.3.2	Tahap Processor (Solver)	54
5.3.3	Tahap Post – Processor	54
BAB VI ANALISA DATA HASIL EKSPERIMEN DAN SIMULASI		59
6.1	Data Eksperimen Wind Tunnel	59
6.1.1	Dimensi Kapal Selam Mini	59
6.1.2	Perhitungan Bilangan Reynolds	59
6.1.3	Pengukuran Drag Force dan Lift Force	60
6.2	Data Hasil Computational Fluid Dynamic	62
6.2.1	Grid Independence	63
6.2.2	Hasil Drag Force dan Lift Force pada Simulasi CFD	63
6.3	Perbandingan Data Wind Tunnel dengan Simulasi CFD	65
6.4	Analisa Hambatan Kapal Selam Mini Ukuran 6 m	67
6.5	Evaluasi Hasil Pengujian pada <i>Wind Tunnel</i> dan Simulasi CFD	70
BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN		71
7.1	Kesimpulan	71
7.2	Saran	71
DAFTAR PUSTAKA		72
LAMPIRAN		75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Penampang Melintang Kapal Selam pada Umumnya.....	7
Gambar 2.2 Proses Menyelam dan Kepermukaan.....	8
Gambar 2.3 Model kapal selam mini.....	10
Gambar 2.4 Profil <i>fin</i> NACA 0018 (satuan dalam mm).....	10
Gambar 2.5 Gaya yang bekerja pada kapal selam.....	11
Gambar 2.6 Komponen <i>Open Circuit wind tunnel</i>	22
Gambar 2.7 <i>Open circuit wind tunnel</i> teknik mesin ITS.....	22
Gambar 3.1 Model simulasi kapal selam <i>barehull</i>	24
Gambar 3.2 Model simulasi kapal selam dengan <i>fin</i>	24
Gambar 4.1 <i>Open Circuit wind tunnel</i>	28
Gambar 4.2 <i>Open circuit wind tunnel</i> laboratorium mekanika fluida.....	28
Gambar 4.3 <i>Test section open circuit wind tunnel</i>	29
Gambar 4.4 <i>Closed circuit wind tunnel</i>	29
Gambar 4.5 <i>Open circuit subsonic wind tunnel</i> teknik mesin FTI ITS.....	33
Gambar 4.6 Model kapal selam mini <i>barehull</i>	35
Gambar 4.7 Model kapal selam mini dengan <i>fin</i>	35
Gambar 4.8 Pemasangan <i>holder</i> pada model kapal selam.....	36
Gambar 4.9 Pemasangan model kapal selam pada <i>force balancing wind tunnel</i>	37
Gambar 4.10 Model uji kapal selam dalam <i>test section wind tunnel</i>	37
Gambar 4.11 Indikator <i>drag force</i> pada <i>wind tunnel</i>	38
Gambar 4.12 Indikator <i>lift force</i> pada <i>wind tunnel</i>	38
Gambar 4.13 Pengukuran <i>drag force</i> pada kecepatan 7.45 m/s dengan sudut 10^0	39
Gambar 5.1 Prosedur Pemrograman Simulasi.....	41
Gambar 5.2 Proses Penentuan Boundary Condition pada ICEM CFD.....	45
Gambar 5.3 Penentuan Independence meshing pada ICEM CFD.....	46
Gambar 5.4 Proses Meshing pada ICEM CFD.....	47
Gambar 5.5 Hasil meshing kapal selam <i>barehull</i>	47
Gambar 5.6 Hasil meshing kapal selam dengan <i>fin</i>	48
Gambar 5.7 FLUENT Launcher.....	48
Gambar 5.8 Viscous Model.....	49
Gambar 5.9 Material Fluida.....	50
Gambar 5.10 Proses penentuan <i>boundary condition</i>	51
Gambar 5.11 Penentuan Velocity Inlet.....	51
Gambar 5.12 Penentuan <i>velocity outlet</i>	52
Gambar 5.13 Penentuan untuk <i>wall</i>	52
Gambar 5.14 Proses grafik C_d	53
Gambar 5.15 Proses Post-Processor dalam bentuk <i>streamline barehull</i>	55
Gambar 5.16 Visualisasi aliran kapal selam <i>barehull</i>	55

Gambar 5.17 <i>Total pressure</i> kapal selam <i>barehull</i>	56
Gambar 5.18 Proses Post-Processor dalam bentuk <i>streamline</i> kapal selam dengan <i>fin</i>	56
Gambar 5.19 Visualisasi aliran kapal selam <i>with fin</i>	57
Gambar 5.20 <i>Total pressure</i> kapal selam dengan <i>fin</i>	57
Gambar 5.21 Visualisasi aliran bagian buritan kapal selam <i>barehull</i>	58
Gambar 5.22 Visualisasi aliran bagian buritan kapal selam <i>with fin</i>	58
Gambar 6.1 Variasi kapal selam <i>barehull</i>	61
Gambar 6.2 Variasi kapal selam dengan <i>fin</i>	62
Gambar 6.3 Model Simulasi <i>Barehull</i>	64
Gambar 6.4 Model Simulasi dengan <i>Fin</i>	65
Gambar 6.5 Grafik Cd Kapal Selam Mini <i>barehull wind tunnel vs CFD</i>	66
Gambar 6.6 Grafik Cd Kapal Selam Mini dengan <i>fin wind tunnel vs CFD</i>	66
Gambar 6.7 Hambatan Kapal Selam Mini dengan <i>fin (6m)</i>	68
Gambar 6.8 Hambatan Kapal Selam Mini <i>barehull</i>	69



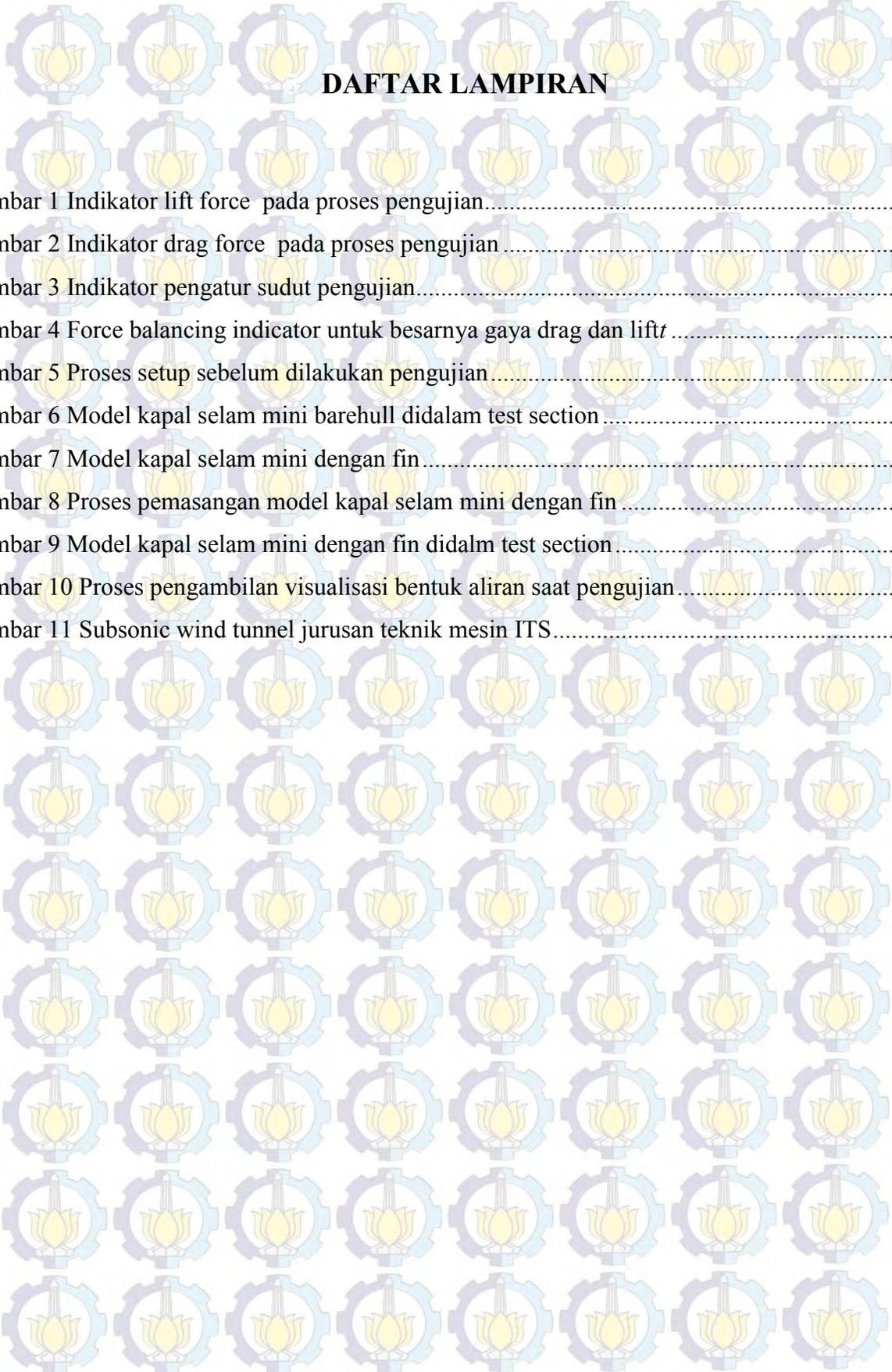
DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Dimensi kapal selam mini dan model.....	34
Tabel 5.1 <i>Grid independence meshing</i>	46
Tabel 6.1 <i>Drag force, lift force, drag coefficient</i> dan <i>lift coefficient</i> variasi <i>barehull</i> sudut 0°	61
Tabel 6.2 <i>Drag force, lift force, drag coefficient</i> dan <i>lift coefficient</i> variasi dengan <i>fin</i> sudut 0°	62
Tabel 6.3 <i>Drag force, lift force, drag coefficient</i> dan <i>lift coefficient</i> variasi <i>barehull</i> sudut 0°	64
Tabel 6.4 <i>Drag force, lift force, drag coefficient</i> dan <i>lift coefficient</i> variasi <i>fin</i> sudut 0°	65
Tabel 6.5 Perbandingan C_D variasi <i>barehull</i> pada simulasi CFD dan <i>wind tunnel</i>	65
Tabel 6.6 Perbandingan C_D variasi dengan <i>fin</i> pada simulasi CFD dan <i>wind tunnel</i>	66
Tabel 6.7 <i>Speed, drag (CFD), drag (wind tunnel), C_D (CFD)</i> dan <i>C_D (wind tunnel)</i> variasi <i>with fin</i>	67
Tabel 6.8 Hambatan kapal selam mini ukuran 6 m variasi <i>with fin</i>	67
Tabel 6.9 <i>Speed, drag (CFD), drag (wind tunnel), C_D (CFD)</i> dan <i>C_D (wind tunnel)</i> variasi <i>barehull</i>	68
Tabel 6.10 Hambatan kapal selam mini ukuran 6 m variasi <i>barehull</i>	69
Tabel 6.11 Evaluasi hasil hambatan kapal selam mini <i>full scale</i>	70

DAFTAR SIMBOL



L	= Panjang (m)
B	= Lebar (m)
H	= Tinggi (m)
V	= Kecepatan (m^2)
A	= Luas (m^2)
R_T	= Hambatan total (N)
R_{BH}	= Hambatan <i>hull</i> (N)
R_{App}	= Hambatan <i>appendages</i> (N)
ρ	= Massa jenis (kg/m^3)
ν	= Viskositas kinematic (m^2/s)
μ	= Viskositas dinamik (kg/ms)
C_T	= Koefisien hambatan total
C_f	= Koefisien gesek
C_r	= Koefisien hambatan sisa
C_w	= Koefisien <i>wave</i>
C_L	= <i>Coefficient of lift</i>
C_D	= <i>Coefficient of drag</i>
Re	= <i>Reynolds number</i>
F_D	= <i>Drag</i> (N)
F_L	= <i>Lift</i> (N)
T	= Suhu (K)
ΔC_f	= Koefisien korelasi hambatan gesek



DAFTAR LAMPIRAN

Gambar 1 Indikator lift force pada proses pengujian.....	2
Gambar 2 Indikator drag force pada proses pengujian.....	2
Gambar 3 Indikator pengatur sudut pengujian.....	3
Gambar 4 Force balancing indicator untuk besarnya gaya drag dan lift.....	3
Gambar 5 Proses setup sebelum dilakukan pengujian.....	4
Gambar 6 Model kapal selam mini barehull didalam test section.....	4
Gambar 7 Model kapal selam mini dengan fin.....	5
Gambar 8 Proses pemasangan model kapal selam mini dengan fin.....	5
Gambar 9 Model kapal selam mini dengan fin didalm test section.....	6
Gambar 10 Proses pengambilan visualisasi bentuk aliran saat pengujian.....	6
Gambar 11 Subsonic wind tunnel jurusan teknik mesin ITS.....	7

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Luas lautan di Indonesia mencapai 5,8 juta km² atau mendekati 70% dari luas seluruh permukaan Indonesia sehingga potensi negara Indonesia yang sangat kaya ini perlu mendapat perhatian dan teknologi yang baik untuk menggali seluruh potensi yang ada. Melimpahnya kekayaan laut Indonesia memang mampu memberikan dukungan terhadap perekonomian Indonesia pada bidang perikanan dan kelautan. Namun masih terdapat kekurangan dalam menggali potensi yang sudah ada.

Secara geografis Indonesia merupakan Negara Maritim dengan luas laut sebesar 5.8 juta km² yang terdiri dari territorial laut dengan luas 0.8 juta km² dan laut nusantara dengan luas 2.3 juta km², serta zona ekonomi eksklusif seluas 2.7 km². Indonesia merupakan Negara dengan wilayah laut terluas di dunia yang berbatasan dengan sejumlah Negara, sehingga sangat rentan terhadap pelanggaran wilayah dan kedaulatan, penyelundupan, pencurian dan lain sebagainya. Salah satu contoh pelanggaran wilayah dan kedaulatan telah terjadi pada pulau Sipadan-Ligitan yang pada tanggal 17 Desember 2002 melalui putusan Mahkamah Internasional di Den Haag disahkan menjadi bagian dari wilayah Malaysia. Ancaman lainnya adalah sengketa blok Ambalat yang mana sejak tahun 2005 diklaim oleh Malaysia sebagai bagian dari wilayah territorial maritimnya (Wulandari, 2005). Selanjutnya menurut data yang ada, kekayaan negara yang diselundupkan lewat laut antara lain pasir laut senilai US\$ 8 milyar (Rp 72 triliun), BBM senilai US\$ 5,6 milyar (Rp 50 triliun), kayu senilai US\$ 3-4 milyar (Rp 30 triliun) (Sudrajat, 2003). Pusat Analisis Kerja Sama Internasional dan Antar Lembaga pada Sekretariat Jenderal Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) menyebutkan bahwa, rata-rata selama satu decade terakhir negara mengalami kerugian sebesar Rp 30 triliun per tahun dari pencurian ikan atau ikan yang dicuri sebesar 166 ton per tahun (Tempo, 6 Juni 2012). Mengingat semakin besarnya potensi ancaman yang ada maka strategi pengembangan teknologi pertahanan dan keamanan Indonesia termasuk konsep dan strategi serta pengadaan Alutista haruslah mendapat perhatian serius, seperti sistem pertahanan bawah laut yang mengingat terbatasnya armada kapal selam yang dimiliki TNI-AL saat ini maka disadari pentingnya rancang bangun kapal selam perlu nasional secara berkelanjutan.

Kapal selam pada umumnya digunakan untuk tujuan dan kepentingan militer, di samping untuk tujuan komersial serta pengembangan ilmu pengetahuan terutama untuk penelitian bawah air yang tidak dapat dicapai dengan kemampuan penyelaman manusia. Penggunaan kapal selam pertama kali dilakukan oleh *Alexander the Great* ketika menyusup ke kota Tyre pada tahun 332 SM. Bentuk fisik kapal selam tersebut berupa *diving bell* yang masih sangat sederhana. Diyakini bahwa upaya manusia untuk menciptakan kapal selam terus berkembang pada jaman kuno, namun baru pada abad pertengahan ditemukan catatan lebih ilmiah tentang sketsa pertama kapal selam yang dibuat oleh Leonardo da Vinci. Pada tahun 1620, seorang ilmuwan Belanda, Cornelius van Drebbel berhasil melakukan penyelaman bersama Raja James I dari Inggris di sungai Thames dengan menggunakan kapal dari kayu yang dilapisi kulit binatang. Kedalaman penyelaman adalah sekitar 3-5 m dan dapat bertahan di dalam air sampai beberapa jam.

Pada tahun 1800, Robert Fulton membuat kapal selam yang dilengkapi dengan layar yang diberi nama *Nautilus*. Kemudian salah satu kapal selam bertenaga manusia dibuat oleh pihak Konfederasi selama perang saudara di Amerika adalah kapal selam *Hunley*. Kapal selam ini digunakan oleh pihak konfederasi untuk menembus blockade pihak Union dan berhasil menenggelamkan kapal korvet Federal, *Housatonic* di pelabuhan Charleston pada tahun 1864 (Allmendinger, 1990). Lebih dari satu abad kemudian, kapal selam berawak yang dilengkapi dengan pipa pernapasan *Turtle*, dibangun oleh David Bushnell pada masa perang revolusi Amerika. Kapal yang digerakkan dengan engkol dan propeller ini adalah kapal selam pertama yang terlibat dalam perang laut. walaupun masih menggunakan tenaga manusia, namun pada perkembangan berikutnya kapal berkembang menjadi kian rumit selama beberapa dasawarsa pada awal ke-19.

Perkembangan kapal selam modern dimulai pada akhir tahun 1800-an dan awal 1900-an. Awal perkembangan kapal mesin modern ditandai dengan upaya menemukan sumber tenaga mesin penggerak yang cocok untuk kapal selam. Seorang Insinyur Swedia, T. Nordenfelt pada tahun 1880-an membuat kapal selam yang digerakkan oleh mesin uap. Penggunaan baterai untuk daya penggerak kapal selam dipelopori oleh orang-orang Perancis. Pada tahun 1880-an Inggris mengembangkan kapal selam dengan menggunakan tenaga dua motor listrik, masing-masing berkekuatan 45 daya kuda. Kapal selam yang didesain Andrew Campbell dan James As tersebut mampu menyelam dengan kecepatan 8 Knot dan memiliki daya jelajah 130 km. kapal selam ini diberi nama *Nautilus*. Keterbatasan yang masih mencolok pada kapal selam listrik adalah tidak adanya cara pengisian kembali baterai di laut.

menjelang akhir tahun 1890-an, perubahan besar dibuat oleh seorang imigran Irlandia berkebangsaan Amerika John Holland, dengan desain kapal selamnya yang diberi nama *Holland*. John Holland menggunakan mesin bensin untuk pengisian ulang baterai. Motor bensin ini hanya digunakan pada saat kapal selam di permukaan, dimana selain untuk mengisi ulang baterai, juga untuk mendorong kapal. Pada waktu yang hampir bersamaan, Simon Lake dengan kapal selam buatannya, *Protector*, mengembangkan periskop sebagai alat penginderaan saat kapal selam berada di bawah permukaan air. *Protector* juga menggunakan kombinasi mesin bensin dan baterai sebagai sumber tenaga penggerak. Namun lagi-lagi model penggerak ini masih memiliki keterbatasan. Uap bensin yang tidak selalu dapat dihilangkan sepenuhnya dari dalam ruangan kapal, sewaktu-waktu dapat memicu terjadinya ledakan yang dapat mengoyak badan kapal.

Diesel mulai digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Seperti diketahui mesin diesel dinyalakan dengan kompresi bukan dengan percikan api seperti mesin bensin. Selain itu, bahan bakarnya pun tidak mudah menguap dan tidak begitu beracun. Kapal selam diesel yang terkenal pada masa perang dunia I dan II adalah kapal selam milik Jerman, *Unterseeboote* atau dikenal dengan *U-boat*. Kapal selam ini pun masih memiliki kelemahan. Selama perang dunia II kapal selam Jerman ini sering terjebak serangan saat muncul ke permukaan untuk mengisi baterai selama kurun waktu itu orang-orang Jerman banyak berpikir untuk memperbaiki kelemahan yang masih melekat pada kapal selam buatan mereka. Ide ini membawa ke sebuah penemuan penting dalam sejarah perkembangan kapal selam. *Schnorchel* dalam bahasa Jerman yang berarti “moncong” mulai diperkenalkan sekitar tahun 1944. Alat ini berupa pipa udara yang menonjol dari puncak kapal selam, satu untuk memasukkan udara bersih untuk mesin dan awak kapal serta satu lagi untuk saluran gas buang mesin. Alat ini memungkinkan kapal selam bernapas di dalam air, berjalan dengan diesel atau mengisi baterai dengan agak tersembunyi. Walaupun demikian, snorkel masih meninggalkan jejak berupa bekas alur yang dapat dilihat dari udara.

Pada tahun 1933, Hellmuth Walter menemukan mesin yang kemudian dipasang sebagai penggerak kapal selam *Type 21*. Mesin Walter ini menggunakan katalisator kimia untuk menguraikan hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen. Pada tahun 1950-an, Angkatan Laut Inggris membuat dua buah kapal selam percobaan *Explorer* dan *Excalibur* yang juga menggunakan tenaga mesin daur Walter. Kedua kapal tersebut beroperasi dengan baik. Pembangunan kapal selam Amerika Serikat, *Nautilus* bertenaga nuklir pada tanggal 14 Juni 1952, mengakhiri masa depan mesin Walter. Sesudah peluncuran *Nautilus*, masih ada

dua prestasi revolusioner dalam teknologi yang akan membuat kapal selam sebagai perombak sejarah strategi Angkatan Laut dan militer, yaitu bentuk kapal yang hidrodinamis. Pengembangan bentuk kapal selam yang hidrodinamis dimulai setelah berakhirnya perang dunia II dengan diciptakannya kapal selam *Albacore* pada tahun 1953. Sejarah menunjukkan bahwa ada dua peningkatan yang signifikan dari kapal selam dari kajian ilmiah, pertama adalah oleh Jerman pada akhir perang dunia II ketika memproduksi tipe 21, kedua oleh Amerika yang memproduksi *Albacore* di tahun 1953 yang dibuat untuk operasi bawah air (Burcher Nrydll, 1994). Pada decade sebelum tahun 1953 pengertian kapal selam adalah kapal permukaan yang dapat menyelam, sedangkan sesudah decade tersebut pengertiannya telah berubah menjadi kapal yang menyelam dan sewaktu-waktu dapat muncul di permukaan air. Australia meluncurkan kapal selam terbarunya dengan kelas *Collin* (Hervey, 1994). Kapal selam *Collins* merupakan manivestasi dari pengembangan bentuk *Albacore*, namun mempunyai kelemahan yaitu paralel midle body yang lebih panjang, sehingga masih mempunyai efek hambatan yang besar. Oubert merekomendasikan bahwa untuk desain kapal selam tahun 2026, agar kembali ke bentuk *Albacore* yang hidrodinamisnya baik (Joubert, 2006).

Teknologi merupakan masalah yang perlu dikembangkan untuk menyelesaikan kekurangan yang ada. Banyak metodologi yang telah dikembangkan untuk memonitoring kondisi bawah laut, mulai dari konvensional maupun dengan menggunakan teknologi modern. Metode konvensional dilakukan dengan bantuan para penyelam tradisional, sedang metode berteknologi tinggi menggunakan kapal selam mini. Kapal selam mini merupakan sebuah kendaraan yang dikendalikan dengan menggunakan *remote control*. Namun pada kenyataannya kendaraan ini masih sangat mahal dari segi ekonomi.

Dalam proses perancangan kapal selam mini sangat diperhatikan masalah hambatan yang terjadi pada kapal selam mini tersebut. Dengan melakukan perancangan kapal selam mini yang seminimal mungkin mengenai hambatan maka akan berpengaruh terhadap besarnya gaya dorong yang dibutuhkan untuk menggerakkan kapal selam mini menjadi lebih kecil sehingga tenaga motor yang digunakan akan lebih murah dalam segi harga.

Dalam hal ini hambatan menjadi faktor utama yang dicari. Sebuah perhitungan dengan berbagai metode baik dengan metode pendekatan maupun dengan percobaan perlu dilakukan guna mengetahui hambatan yang terjadi pada kapal selam mini. Sehingga pada akhirnya dapat dilakukan inovasi terdapat kapal selam mini ini untuk meminimalisir dari hambatan yang

terjadi, sehingga akan berpengaruh pada pemilihan motor penggerak yang akan digunakan pada kapal selam mini.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana hambatan yang terjadi pada kapal selam mini?
2. Bagaimana pengaruh variasi *barehull* dan menggunakan *fin* terhadap besarnya hambatan?
3. Bagaimana pengaruh penambahan *fin* terhadap besarnya hambatan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Ukuran utama kapal selam mini; L = 6000 mm; B = 533 mm; H = 533 mm
2. Model kapal selam didesain tanpa propeller.
3. Terdapat 2 variasi dari *bare hull* dan menggunakan *fin*.
4. Terdapat 5 variasi kecepatan.
5. Simulasi CFD hanya pada sudut 0°
6. Menghitung besarnya hambatan berdasarkan Cd (koefisien *drag*).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Untuk mengetahui besarnya hambatan yang terjadi pada kapal selam mini.
2. Untuk mengetahui besarnya hambatan *bare hull* kapal selam mini.
3. Untuk mengetahui besarnya hambatan terhadap penambahan *fin*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Memberikan uraian tentang besarnya hambatan yang terjadi pada kapal selam.
2. Memberikan hasil mengenai perbandingan antara percobaan *wind tunnel* dengan hasil simulasi CFD (*Fluent*) terhadap hambatan kapal selam.
3. Memberikan informasi mengenai inovasi atau perubahan yang dikembangkan pada kapal selam mini tersebut.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan

Bagian ini berisi konsep dasar penyusunan tugas akhir yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, sistematika penulisan, dan manfaat.

BAB II Dasar Teori

Bagian ini membahas tentang teori-teori yang mendukung dalam menyelesaikan tugas akhir ini yaitu teori tentang hambatan, computational fluid dynamic dan wind tunnel.

BAB III Metodologi Penelitian

Bagian ini memaparkan metode dalam melakukan perhitungan, mulai dari simulasi computational fluid dynamic dan pengujian pada wind tunnel.

BAB IV Pengujian Wind Tunnel

Bagian ini berisi informasi mengenai wind tunnel, jenis-jenis wind tunnel, pengukuran gaya dan kecepatan.

BAB V Simulasi Computational Fluid Dynamics

Bagian ini berisi informasi mengenai computational fluid dynamics, persamaan dasar dinamika fluida dalam CFD, serta ANSYS Fluent.

BAB VI Analisa Data Hasil Eksperimen dan Simulasi

Bagian ini mengkaji data hasil eksperimen wind tunnel serta hasil simulasi menggunakan computational fluid dynamics serta analisa hambatan kapal selam mini ukuran 6m.

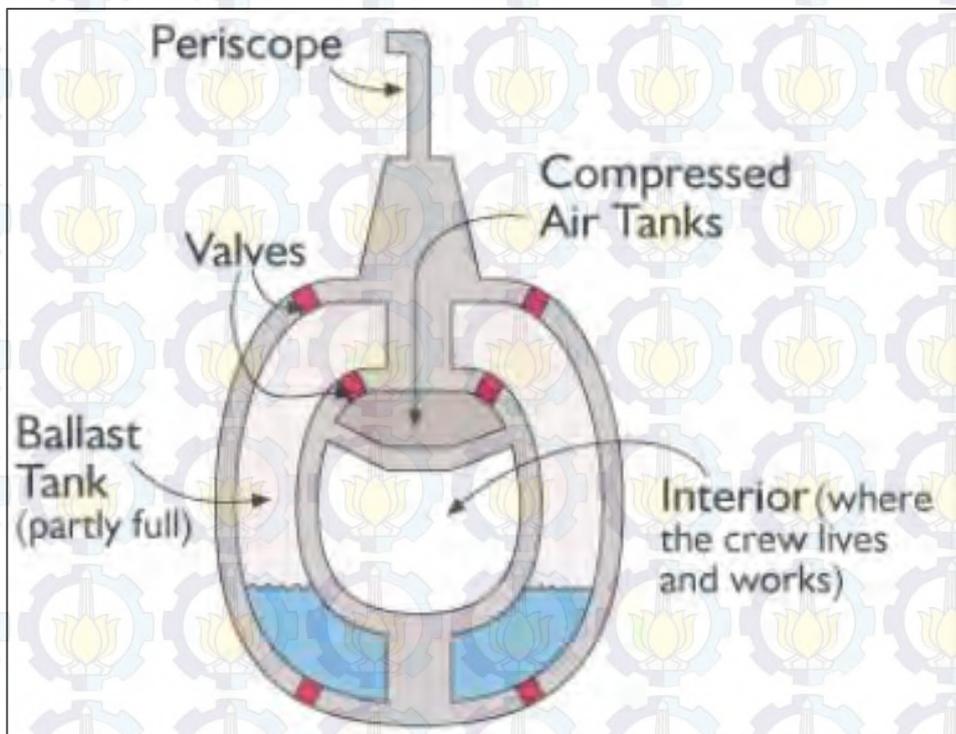
BAB VI Kesimpulan dan Saran

Bagian ini berisi kesimpulan dari semua perhitungan yang sudah dilakukan serta saran yang berguna untuk penelitian selanjutnya.

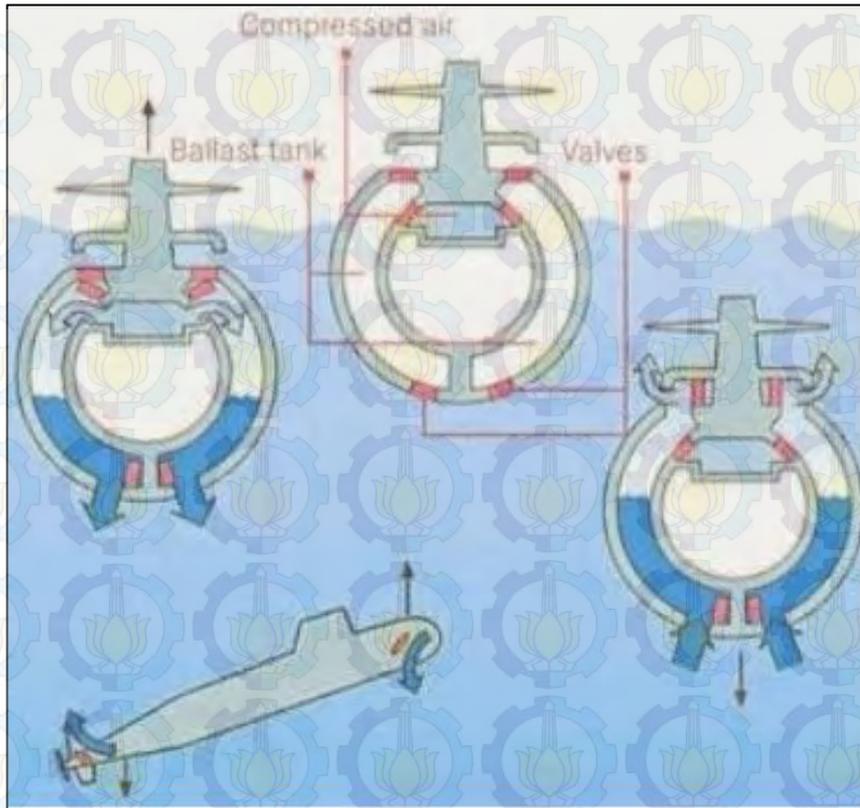
BAB II DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

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 *barehull* dan komponen-komponen tambahan, seperti *sail*, *hydroplane* depan dan belakang serta *rudder* (Liu et al., 2010) kapal selam dapat beroperasi di dalam air, di permukaan dan pada mode *snorkeling* yaitu untuk pengambilan oksigen. Kapal selam dapat mengapung karena adanya berat fluida (air laut) yang dipindahkan sebesar berat kapal. Fluida yang dipindahkan oleh displasemen kapal ini akan menghasilkan gaya angkat, yang disebut *buoyant force*, yang arahnya berlawanan dengan gaya gravitasi. Untuk tenggelam dan mengapung kapal selam melakukan pengaturan berat dengan menggunakan bantuan tangki *ballast*. Sedangkan untuk mempertahankan kondisi *even keel*, kapal selam memanfaatkan gaya angkat yang dihasilkan oleh bagian belakang.



Gambar 11.1 Penampang Melintang Kapal Selam pada Umumnya



Gambar 11.2 Proses Menyelam dan Kepermukaan

Pada perkembangan teknologi kendaraan bawah air secara umum dibagi menjadi dua yaitu pertama, *Autonomous Underwater Vehicles (AUV)* yang merupakan kendaraan bawah air yang beroperasi pada permukaan air secara otomatis tanpa ada kontak dengan manusia. Wang et al [1992] dari Stanford University telah mengembangkan *Unmanned Underwater Vehicle (UUVs)* yang sudah terdapat kamera dalam pengoperasiannya. Kemudian Willian dan Mahon [2006] juga mengembangkan UUVs dengan nama Omeron yang dioperasikan di sekitar karang Great Barrier Reef Australia untuk survei lingkungan. Dalam hal pengoperasiannya, video dapat dioperasikan dari permukaan yang sinyalnya di transmisikan ke video dengan menggunakan *tether*. Kemudian kedua, *Remotely Underwater Vehicle (ROV)* yang merupakan kendaraan bawah air yang gerakannya dioperasikan secara langsung melalui kabel oleh manusia yang berada di permukaan air.

Definisi ROV (*Remotely Operated Vehicle*) menurut Marine Technology Society ROV Committee's dalam "Operational Guidelines for ROVs" (1984) dan The National Research Council Committee's dalam "Undersea Vehicles and National Needs" (1996) adalah pada dasarnya sebuah robot bawah laut yang dikendalikan oleh operator ROV, untuk tetap dalam kondisi yang aman, pada saat ROV bekerja di lingkungan yang berbahaya. Remote Operation Vehicle (ROV) secara luas dikenal sebagai nama umum dengan kapal selam mini

yang kerap digunakan pada industri minyak dan gas lepas pantai. Kapal selam ini tak berawak, tapi dioperasikan dari kapal lain. Keduanya terhubung melalui kabel yang berfungsi juga sebagai penambat. kapal selam mini tersusun dari satu set pengapung besar di atas sasis baja atau aluminium. Pengapung itu biasanya terbuat dari busa sintetis. Pada bagian bawah konstruksi terpasang alat-alat sensor yang berat. Komposisi ini merupakan komponen ringan di atas dan berat di bawah yang akan menghasilkan pemisahan yang besar antara pusat apung dan pusat gravitasi. Maka alat ini pun lebih stabil di dasar laut saat melakukan tugas-tugasnya. kapal selam mini memiliki kemampuan manuver yang tinggi. Kabel tambat berfungsi mengirimkan energi listrik serta data video dan sinyal. Saat bertugas memasang kabel-kabel listrik tegangan tinggi, kapal selam mini biasanya ditambahkan tenaga hidrolis.

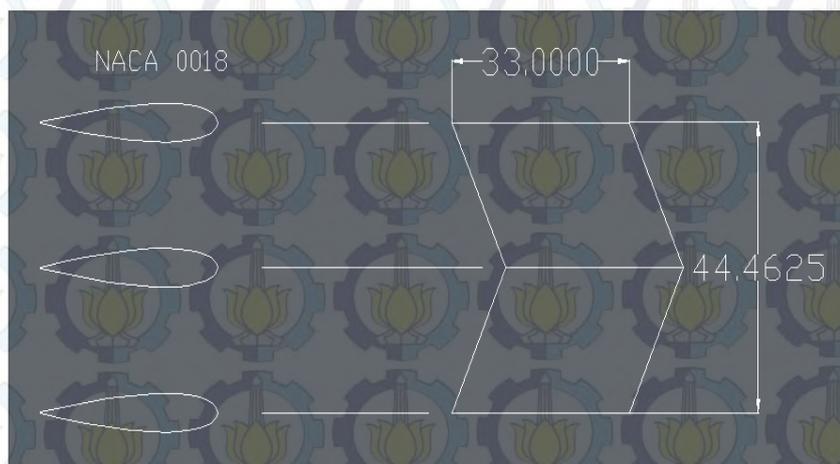
Banyak penelitian yang telah dikembangkan sebelumnya mengenai kapal selam mini. Pada tahun 2009 telah dilakukan perancangan kapal selam mini sebagai *monitoring* pada daerah pesisir pantai. Kapal selam mini ini beroperasi untuk mengatasi masalah polusi dan *sewage* pada daerah pesisir pantai. Awal dari penelitian ini mempunyai ukuran yang relatif kecil, yang mana mempunyai panjang 1 meter. Kemudian pada penelitian ini juga dihasilkan masalah mengenai *dynamics stability* pada kapal selam mini pada pengoperasian bawah air (Sulisetyono, 2009). Kemudian dalam perjalanannya dilakukan inovasi pada desain kapal selam mini mengenai ukuran utamanya. Hal ini dilakukan dengan mempertimbangkan peralatan yang akan di pasang pada kapal selam mini, mengingat pada desain ini kapal selam mini beroperasi tanpa awak. Banyak peralatan elektronik yang akan dipasang untuk tujuan pengoperasian, seperti kamera, perangkat *wireless* sebagai transfer data, perangkat *control* dan sebagainya. Pada perkembangan kapal selam mini tersebut dipakai panjang sebesar 2 meter yang mana mengalami perubahan panjang dari penelitian sebelumnya. Pada penelitian kali ini menggunakan kapal selam dengan ukuran panjang 6 meter. Pada penelitian kali ini dilakukan pengujian dengan menggunakan *wind tunnel* dengan skala 1:12 untuk mengetahui besarnya hambatan yang terjadi. Kemudian berdasarkan hasil hambatan yang didapat dari *wind tunnel* dapat dicari hambatan kapal selam mini ukuran sebenarnya. Berikut kapal selam mini yang telah diskala 1:12 pada gambar 2.3.



Gambar 11.3 Model kapal selam mini

2.2 Appendages Kapal Selam Mini

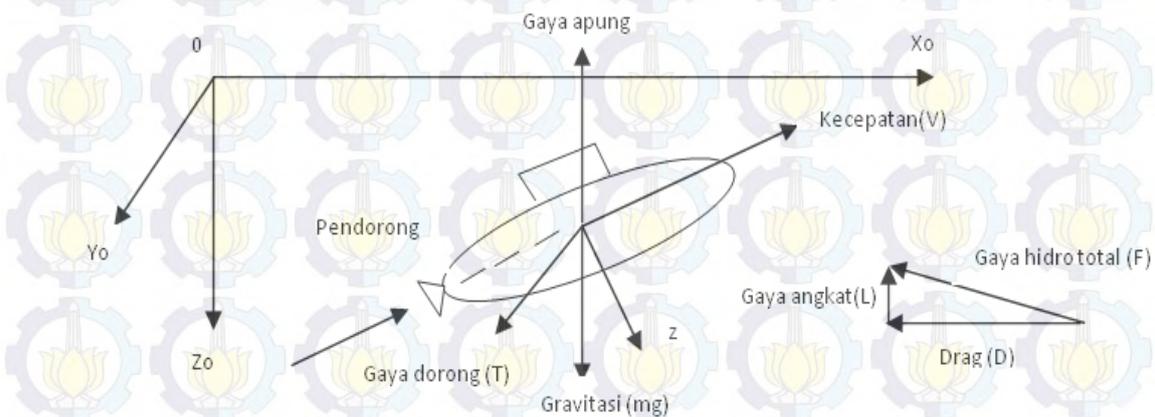
Pada bagian buritan kapal selam mini terdapat hydroplane belakang yang berfungsi sebagai *fin*. *Fin* ini juga berfungsi sebagai *rudder* dan horizontal hydroplane kapal selam mini. Fungsi dari hydroplane belakang adalah untuk membantu kapal menyelam maupun naik ke permukaan (*diving*), *maneuvering* dan menjaga trim dari kapal selam tersebut. Bentuk parameter dari hydroplane belakang menggunakan NACA 0018.



Gambar 11.4 Profil *fin* NACA 0018 (satuan dalam mm)

2.3 Hambatan

Hambatan kapal adalah gaya yang menahan kapal ketika melaju dengan kecepatan dinasnya. Tahanan tersebut sama dengan gaya fluida yang bekerja sejajar dengan sumbu gerakan kapal. Sedangkan suatu tahanan kapal ini adalah sama dengan suatu gaya dan karena dihasilkan oleh air, maka ini disebut gaya *hidrodinamika*. Gaya hidrodinamika ini semata-mata disebabkan oleh gerakan relatif kapal terhadap air. Gerakan kapal di fluida bekerja seperti sistem sumbu orthogonal yaitu 3 (tiga) buah sumbu x , y dan z , ditempatkan sedemikian rupa, pusat sumbu berimpit dengan titik berat kapal. Bidang x , dan y satu bidang dengan permukaan bumi (sejajar).



Gambar 11.5 Gaya yang bekerja pada kapal selam

Gerakan kapal dibebani 4 (empat) gaya yang tidak tergantung satu sama lainnya:

- Gaya hidrostatis yaitu massa kali percepatan gravitasi bumi (mg).
- Hambatan hidrostatis (gaya apung) $F\Delta$ atau γv . Seperti halnya mg , tekanan atau gaya ini selalu sejajar dengan Z_0 .
- Resultant gaya hidrodinamik (F) yang didesakkan oleh air pada kapal sebagai akibat gerakan menerjang air tersebut. Gaya F dapat diuraikan dalam 2 (dua); komponen gaya angkat (L) dan komponen tahanan (atau drag) R . Dimana L tegak lurus terhadap kecepatan kapal dan R (atau D) sejajar V .
- Gaya dorong (T), yang didesakkan oleh air pada pendorong kapal, umumnya berlawanan arah dengan R .

Gaya-gaya tersebut diatas timbul akibat adanya;

- Kecepatan kapal (V), relatif terhadap air dan udara atau yang dilintasi oleh kapal tersebut.

- b. Gaya gravitasi bumi yang bekerja baik pada kapal maupun pada air yang dibebani oleh kapal itu.
- c. Aksi yang dilakukan pendorong kapal (*Propeller*).

Gaya hambat ini harus dilawan oleh gaya dorong yang dihasilkan oleh mesin kapal agar tercapai kecepatan yang dikehendaki. Hambatan memiliki beberapa kriteria yang akan terjadi pada kapal, meliputi dari Hambatan gesekan / *Frictional Resistance* (R_F), hambatan yang ditimbulkan oleh media fluida berviskositas yang ikut terseret badan kapal, sehingga terjadi *frictional force*. *Frictional force* berakibat harus keluarnya energi yang terbuang percuma. Kedua Hambatan gelombang / *Wave Resistance* (R_W), yakni hambatan yang timbul akibat bergeraknya kapal. Dapat terjadi meskipun fluidanya ideal (*nonviscous*). Gaya yang terlibat adalah *potential force*. Selanjutnya Hambatan tekanan / *Pressure Resistance* (R_P), hambatan ini terjadi akibat gerakan kapal atau benda pada fluida non-ideal (fluida yang berviskositas) akan menimbulkan gaya *pressure forces*. Kemudian Hambatan udara / *Air Resistance* (R_A), akibat dari bangunan atas kapal (*superstructure*) yang tinggi dengan bentuk tidak *streamline*. Dan yang terakhir Hambatan *Appendages* (R_{APP}), akibat adanya *appendages* pada lambung kapal di bawah garis air antara lain lunas sayap (*bilge keels*), penumpu poros *propeller*, lubang *Bow Thruster*.

Akibat dari hambatan yang terjadi pada kapal akan menghasilkan yang namanya aliran ikut atau bisa dikatakan aliran yang terjadi pada badan kapal karena pergerakan kapal tersebut. Adanya aliran ini dapat mengurangi kecepatan dari kapal dan akan berpengaruh lebih jauh pada kapal lain sebagai pendorongnya.

Satu dari beberapa studi kapal selam untuk memprediksi jumlah *power* yang diminta untuk memindahkan lambung pada kecepatan yang telah ditentukan, atau sebaliknya untuk memprediksi kecepatan dengan jumlah *power* yang diberikan. Seperti prediksi yang dibuat berdasarkan basis kondisi *steady – state* pada *level flight* dengan tanpa *maneuvering* yang dihitung secara sederhana. Dalam persamaan gerak, semua persamaan gelombang dapat dihapus karena asumsi pada *level flight* dan tanpa *maneuvering* sehingga mengurangi koefisien – koefisien karena diasumsikan nilainya nol. Persamaan gerak adalah

$$\Sigma X_{hyb} = X_{u/u} + X_{app} + X_{prop} + X_{thr} + X_{bal}$$

Persamaan gerak tersebut merupakan dasar dari persamaan *drag* secara *tipikal* yang digunakan dalam arsitek kapal. *Drag* atau hambatan pada saat pergerakan kapal selam pada saat penyelaman sepanjang *longitudinal axis* diberikan sebagai :

$$RT = RBH + RAPP$$

Dimana:

RT = Hambatan Total

RBH = Hambatan kapal kosong

RAPP = Hambatan *appendages*

$$RBH = \frac{1}{2}rAV^2CT$$

Dimana:

r = Massa jenis fluida

A = *Reference area* ROV, luasan basah lambung di bawah air (m²)

V = Kecepatan ROV (m/s)

CT = Koefisien *drag nondimensional*

Persamaan diatas dapat digunakan dalam *surge, heave, dan sway*. Koefisien *drag nondimensional* dikumpulkan dengan *particular reference area*. Desainer harus hati – hati agar tetap konsisten dengan penggunaan area. Koefisien *drag* dapat diperoleh dalam 4 komponen, yaitu :

$$CT = Cf + DCf + Cr + Cw$$

Dimana :

Cf = Koefisien hambatan gesek

$$Cf = 0.075 / (\text{Log}_{10} Re - 2)^2$$

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

Dimana :

L = Panjang kapal

V = Kecepatan kapal

ν = viskositas kinematik

$$= 1.07854 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

ΔCf = korelasi yang diijinkan

= tipikal nilainya antara 0.0004 ~ 0.0009

Cr = koefisien hambatan sisa

= nilainya tergantung pada jenis dan bentuk kapal selam.

$$RAPP = \frac{1}{2}rAV^2CT$$

Dimana:

r = Massa jenis fluida

A = Luasan dari tonjolan (*fin, rudder*) yang tercelup dalam air (m^2)

V = Kecepatan ROV (m/s)

CT = Koefisien *drag nondimensional*

Pada dasarnya rumus antara RBH dan RAPP hampir sama, yang membedakan antara hambatan kapal kosong dengan hambatan *appendages* adalah nilai koefisien *drag nondimensional* (CT). Dalam buku *Submersible Vehicle System Design* menjelaskan bahwa : $CT = 0.005$. (E.Eugene, 1990)

2.4 Computational Fluid Dynamic

Banyak sekali metode dalam menyelesaikan masalah salah satunya dengan cara simulasi. Simulasi merupakan teknik atau cara penyelesaian persoalan melalui pengolahan data operasi sistem imitasi untuk memperoleh data luaran penyelidikan atau percobaan penelitian sebagai bahan solusi persoalan ataupun sebagai bahan masukan dalam rangka pengembangan dan perbaikan struktur dan operasi sistem riil. Dasar dari semua permasalahan pada CFD adalah persamaan *Navier-Stokes* yang mendefinisikan seluruh aliran fluida satu fase. Persamaan ini bisa disederhanakan dengan mengurangi suku persamaan yang mengandung variabel viskositas sehingga mendekati persamaan *Euler*. Penyederhanaan lebih lanjut dengan menghilangkan suku persamaan *vorticity* sehingga menghasilkan *full potential equations*. Akhirnya, persamaan ini bisa disederhanakan menjadi *linearized potential equations*. Sejarah CFD berawal pada tahun 1960an:

- a. 1970an : Sistem CFD pertama berhasil dibuat dan sukses dalam pemakaian terjadi pada tahun
- b. 1980an : CFD sudah merambah ke industri
- c. 1990an : penggunaan CFD dalam industri mengalami perkembangan yang signifikan.
- d. Millennium ke-2 : paket CFD terus dikembangkan dengan kemudahan penggunaan ke sistem lain seperti *CAD* dan *solid-stress analysis*.
- e. Perkembangan selanjutnya di masa depan adalah ketika pemakaian sistem CFD bisa dilakukan *remote computing* melalui internet.

Computational fluid dynamics (CFD) adalah salah satu cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numeric dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisa masalah yang terjadi pada aliran fluida. Dalam CFD penggunaan computer sangat vital karena harus melakukan jutaan perhitungan untuk mensimulasikan interaksi fluida dan gas yang

digunakan pada bidang *engineering*. Ketika kita menggunakan CFD dengan dukungan perangkat keras yang canggih sekalipun maka yang didapatkan hanya berupa pendekatan. Inilah salah satu aspek yang terus dibenahi dalam pengembangan metode CFD. Secara ringkas CFD adalah memprediksi secara kuantitatif apa yang akan terjadi ketika terjadi aliran fluida dan seringkali terjadi kombinasi dengan hal-hal berikut:

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

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

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

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

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

Munculnya ide untuk mengembangkan teknik komputasi dengan CFD ini merupakan kemajuan yang sangat berarti dalam perkembangan teknologi. Analisa yang dilakukan melalui sebuah simulasi sebelum *prototype* dibuat dapat meminimalisasi biaya karena dapat

mencegah terjadinya kegagalan produk. Selain itu, dalam hal *product development* yang dilakukan sebuah perusahaan juga dapat disimulasikan dengan bantuan *software* berbasis CFD ini sebelum langsung dilakukan proses manufakturnya. Dengan bantuan *software* berbasis CFD ini juga mempermudah komunikasi antara bagian mekanik dan elektrik dalam perancangan sebuah produk pada perusahaan, dan secara langsung akan menghemat biaya. Seperti sudah disebutkan sebelumnya, CFD menggunakan komputer untuk memecahkan persamaan matematis yang relevan dengan menggunakan informasi keadaan. Sehingga bisa disebutkan bahwa komponen dari CFD adalah sebagai berikut:

- a. Manusia yang menyatakan permasalahannya
- b. Pengetahuan ilmiah yang diekspresikan secara matematis
- c. Kode komputer (misalnya *software*) yang merangkum pengetahuan tersebut dan mengekspresikan permasalahan dalam istilah ilmiah
- d. Hardware komputer yang akan melakukan perhitungan dan kalkulasi yang diberikan oleh *software*
- e. Manusia yang menginspeksi dan menginterpretasikan hasilnya.

Kemampuan CFD dan pesatnya perkembangan kecepatan komputasi telah membuat penggunaan CFD sebagai alat untuk mendapatkan solusi dalam dunia *engineering*. Penggunaannya telah meliputi area yang luas pada industri dan aplikasi-aplikasi keilmuan. CFD dapat digunakan untuk menghasilkan prediksi kualitatif dan terkadang bahkan prediksi kualitatif dalam aliran fluida, hal ini banyak dilakukan dengan menggunakan beberapa metode :

- a. Model matematik (PDE)
- b. Metode numerik (diskritisasi dan teknik solusi)
- c. Perangkat lunak

CFD digunakan oleh para ilmuwan dan engineer untuk melakukan sebuah eksperimen numerik dalam sebuah virtual laboratorium. Dalam karakteristik aliran, CFD dapat memperlihatkan pola-pola aliran yang lebih detail dan akurat yang akan sulit dan mahal, bahkan tidak mungkin dilakukan dengan menggunakan teknik percobaan. Salah satu contoh aplikasi yang telah dilakukan adalah dalam analisa mendapatkan gaya-gaya dan efek dari sebuah *riser* yang memiliki sangat panjang dan berada didalam laut dalam. Schowalter menyatakan bahwa toleransi kesalahan dalam penskalaan dapat dikurangi dengan adanya CFD. Dalam area penelitian yang berbeda, penerapan CFD dilakukan sebagai pembanding

dengan percobaan apabila memungkinkan dilakukan percobaan dan menjadi superior dalam hal percobaan sangat sulit atau bahkan tidak mungkin dilakukan.

Dalam hal prediksi sebuah fenomena aliran, maka CFD dapat digunakan untuk mendapatkan kuantitas yang diinginkan dengan resolusi yang tinggi untuk setiap bagian dan waktu. Pemanfaatan CFD juga digunakan sebagai metode untuk menyederhanakan (secara virtual) permasalahan dengan kondisi-kondisi operasi yang realistis dan tetap pada domain aliran yang aktual. Meskipun demikian *error*/kesalahan selalu ada dan biasanya terjadi karena beberapa hal berikut :

- a. Kesalahan dalam memodelkan objek penelitian
- b. Kesalahan dalam diskritisasi
- c. Kesalahan dalam melakukan iterasi
- d. kesalahan dalam implementasi

Dalam hal kemampuan mendiskripsikan secara kuantitatif sebuah fenomena, maka metode pengukuran/eksperiment hanya mendapatkan satu kuantitas dalam satu waktu dan terbatas dalam jumlah titik pengukuran dan waktunya. Selain itu skala yang digunakan terbatas pada skala laboratorium dan meliputi area permasalahan dan kondisi operasi yang terbatas. Dengan demikian *error*/kesalahan yang mungkin terjadi adalah:

- a. Adanya kesalahan dalam melakukan pengukuran
- b. Adanya gangguan pada probe yang digunakan

Sebagai sebuah algoritma, CFD tidak sepenuhnya dapat menggantikan pengukuran secara eksperiment, tetapi jumlah dan biaya eksperiment yang dilakukan dapat berkurang sangat signifikan. Dalam hal ini perbandingan antar CFD dan percobaan adalah sebagai berikut :

Melalui percobaan:

- a. Biaya mahal
- b. Membutuhkan waktu persiapan yang lebih lama
- c. Bersifat sekuensial
- d. Memiliki tujuan tunggal

Sedangkan pada sisi CFD:

- a. Biaya lebih murah
- b. Lebih cepat dilakukan
- c. Dapat dikerjakan secara paralel
- d. Dapat digunakan untuk tujuan yang lebih dari satu

Namun demikian reliabilitas hasil dari simulasi CFD tidak pernah dapat mencapai 100% dikarenakan data input yang digunakan memiliki potensi perkiraan atau kurang presisi. Selain itu terdapat kemungkinan model matematik yang mungkin tidak sesuai serta akurasi yang terbatas tergantung kemampuan kecepatan komputer yang digunakan. Untuk beberapa kasus telah terbukti bahwa simulasi CFD memiliki reliabilitas yang tinggi, yaitu pada :

- a. Aliran laminar dengan kecepatan yang rendah
- b. Aliran-aliran *single-phase*

Dengan berkembangnya penelitian yang menggunakan simulasi CFD sebagai metode untuk lebih memperpendek *distance to reality* (DTR) pada banyak kasus dalam multi-disiplin keilmuan, kemudian muncul kaidah-kaidah yang banyak dilakukan oleh para peneliti dalam memposisikan CFD dan percobaan. Salah satu kaidah yang banyak dipakai adalah menggunakan CFD sebagai metode prediksi dan percobaan sebagai metode untuk melakukan validasi.

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

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

Persamaan Navier-Stokes merupakan sistem persamaan differensial non-linier yang mendeskripsikan bagaimana fluida mengalir. Persamaan dasar dari aliran fluida yang diperkenalkan oleh Navier pada tahun 1823, dan beberapa tahun kemudian ditempat yang berbeda diperkenalkan oleh Stokes. Simulasi aliran fluida dapat digambarkan dengan menyelesaikan persamaan tersebut.

Persamaan Navier-Stokes merupakan persamaan diferensial parsial nonlinier orde dua. Selama ini belum terdapat solusi analitik penyelesaian persamaan tersebut. Metode yang

digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida selama ini adalah metode Euler yaitu *Finite Element* (FE) dan *Finite Difference* (FD) yang menggunakan anggapan bahwa, fluida merupakan sistem yang kontinyu dan mengikuti hukum-hukum gerak Newton. Cara ini sangat tidak efektif untuk dilakukan mengingat persamaan Navier-Stokes merupakan persamaan yang sangat kompleks.

Persamaan Navier-Stokes didapatkan dengan mensubstitusi hukum ketiga Newton kedalam elemen fluida dV . Bentuk umum persamaan Navier-Stokes dituliskan pada persamaan berikut ini (Versteeg, 2007):

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla P + F + \mu \left(\nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) \right)$$

F adalah gaya luar dan μ adalah viskositas fluida. Untuk fluida yang tidak termampatkan, maka persamaan $\nabla \cdot u = 0$ harus disubstitusikan pada sistem. Jika persamaan tersebut dikombinasikan maka persamaan Navier-Stokes untuk fluida tidak termampatkan (misalnya air) dapat dituliskan pada persamaan berikut.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla P + F + \mu \nabla^2 \vec{u}$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

Simulasi aliran fluida dapat dilakukan dengan mencari solusi persamaan Navier-Stokes. Selama ini belum terdapat solusi analitik persamaan Navier-Stokes tersebut, karena itu untuk mencari solusi persamaan Navier-Stokes dapat dilakukan dengan metode numerik. Syarat awal dan syarat batas juga diperlukan dalam simulasi aliran fluida. Secara umum, syarat awal yang digunakan adalah $(\rho(t = 0, x, y, z), (t = 0, x, y, z))$, dan syarat batas untuk simulasi aliran fluida pada permukaan.

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

- a. Disaat produk yang ingin kita buat sulit untuk di buat prototipe ataupun diadakan riset yang mendalam, misalnya dikarenakan mahalnya membuat prototipe ataupun riset, maka menggunakan analisa CFD merupakan hal yang tepat. Artinya, dalam dunia industri hal ini sangat berguna ketika kita akan membuat sebuah produk. Dengan analisa CFD kita akan mudah mengetahui dan melihat data-data yang dibutuhkan untuk membuat produk yang efisien, parameter-parameter yang berpengaruh dan fenomena-fenomena fisika yang terjadi.
- b. Karena analisa CFD merupakan tools untuk memprediksi parameterparameter yang ada dengan kondisi tertentu, maka analisa CFD bisa menjawab pertanyaan

“WHAT IF” dengan sangat cepat. Dengan simulasi CFD kita dapat mengubah parameter yang ada melihat hasilnya, mengubahnya lagi hingga didapat kondisi yang diinginkan sebelum dibuatnya prototipe fisik. Jadi, dalam waktu yang sama kita dapat melakukan test dari model CFD yang kita buat, melihat hasilnya, dan mengubah variabel-variabel yang ada hingga didapatkan hasil yang optimal, dalam waktu yang singkat, dengan biaya yang murah dan bahkan membuat produk kita sesuai dengan *code* dan *standard* yang ada terutama *safety*.

- c. Design dan analisis yang baik dalam aplikasi industri adalah design yang memberikan design *cycle* yang singkat, biaya yang murah, waktu yang singkat sampai ke tangan *client* atau *market*, pengembangan produk dilakukan dengan instalasi dalam waktu singkat dan minimum *downtime*. CFD adalah *tools* untuk mempersingkat siklus *design* dan pengembangan dari suatu produk.

Walaupun CFD mampu memberikan prediksi yang cukup mendekati keadaan yang sebenarnya, CFD tetaplah tidak mampu memberikan prediksi yang benarbenar 100 % tepat. Hal ini dikarenakan:

- a. Data yang dimasukkan mungkin terlalu banyak berupa perkiraan atau kurang presisi
- b. Kemampuan komputer yang tersedia mungkin terlalu rendah untuk melakukan perhitungan numerik yang akurat
- c. Dasar pengetahuan ilmiah yang mungkin belum mencukupi

Penggunaan sistem dengan menggunakan CFD juga memiliki beberapa kelemahan diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Dalam hal menentukan *boundary condition* (kondisi batas) yang tepat pada saat akan melakukan pemodelan, oleh sebab itu dalam memberikan *boundary condition* harus memiliki pemahaman yang baik.
- b. Peralatan misalnya seperti perangkat computer harus memadai, karena banyak data yang masuk dan yang dilakukan proses analisa.

2.5 Wind Tunnel Experiments

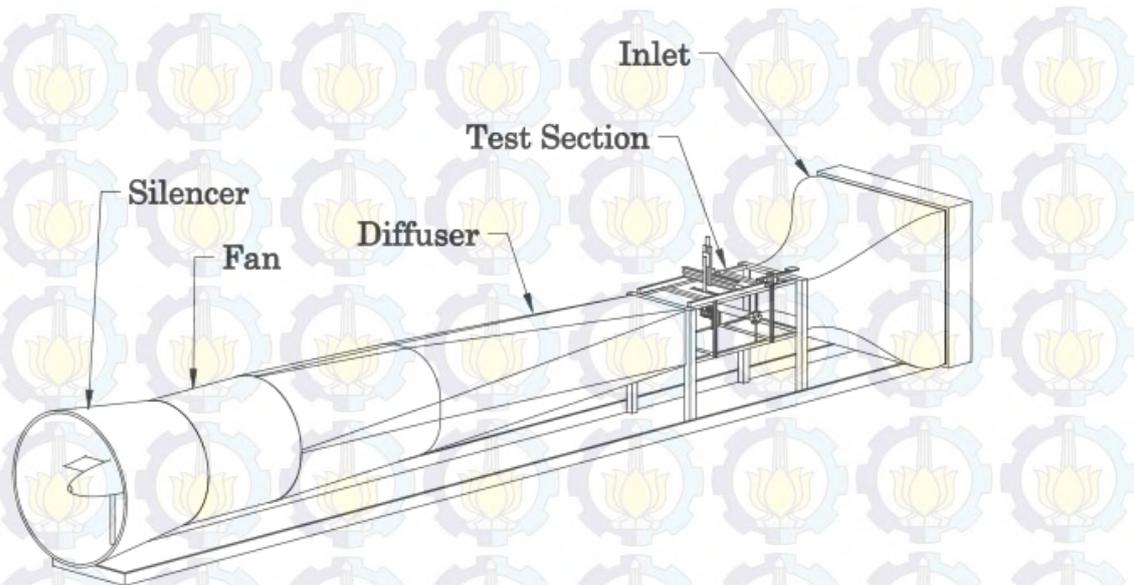
Wind tunnel (terowongan angin) adalah salah satu alat yang digunakan dalam penelitian aerodinamik. Terowongan angin adalah sebuah alat yang dirancang dan dilindungi secara khusus di mana udara ditarik atau ditiup dengan cara mekanis untuk mencapai

kecepatan tertentu dan bentuk alirannya tertentu. Aliran yang dikehendaki dapat diamati dari luar angin terowongan melalui jendela transparan (*test section*) yang menyertakan bagian pengujian dan karakteristik aliran yang terukur menggunakan instrumen khusus. Sebuah objek, seperti model, atau ukuran sebenarnya (*full scale*) biasanya kendaraan atau bagian dari itu, dapat diletakkan di dalam terowongan angin untuk melihat bentuk aliran. Tujuan dari penelitian ini termasuk mampu mensimulasikan, memvisualisasikan, mengamati dan mengukur seberapa aliran di sekitar objek terhadap hembusan angin (Libii, 2011).

Wind tunnel digunakan untuk mempelajari efek aliran udara yang melewati benda solid. Saat ini pengujian terowongan angin sudah banyak diaplikasikan pada mobil, aerofoil dan benda uji lainnya. Ada dua tipe dasar dari *wind tunnel*, yaitu *Open Circuit Tunnel* dan *Closed Circuit Tunnel*. Berdasarkan dari tipe dasar *wind tunnel*, aliran yang mengalir akan terus berputar (*closed circuit tunnel*) atau aliran akan keluar ke dunia luar (*open circuit tunnel*). Pada *open circuit tunnel* letak kipas atau *suction* dapat berada dibelakang atau didepan *test section* (Geurts, 2005). Sedangkan berdasarkan kecepatan udara, *wind tunnel* dibedakan atas:

- a. *Subsonic wind tunnel* (Mach number < 1)
- b. *Transonic wind tunnel* (Mach number $= 1$)
- c. *Supersonic wind tunnel* (Mach number > 1)
- d. *Hypersonic wind tunnel* (Mach number > 5)

Percobaan dilakukan dalam sebuah *Open Circuit Tunnel* (*subsonic wind tunnel*), dengan kapasitas kecepatan udara antara 20 Hz sampai 50 Hz seperti terlihat pada gambar 2.7. Terowongan angin tersebut mempunyai ukuran panjang 2980 mm dengan *test section* berbentuk bujur sangkar berukuran 300 x 300 mm² dan panjang 450 mm. Gaya model layar diukur dengan menggunakan timbangan gaya aerodinamik (*aerodynamic force balance*) yang mempunyai ketelitian sebesar 1 mN.



Gambar 11.6 Komponen *Open Circuit wind tunnel*



Gambar 11.7 *Open circuit wind tunnel* teknik mesin ITS

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

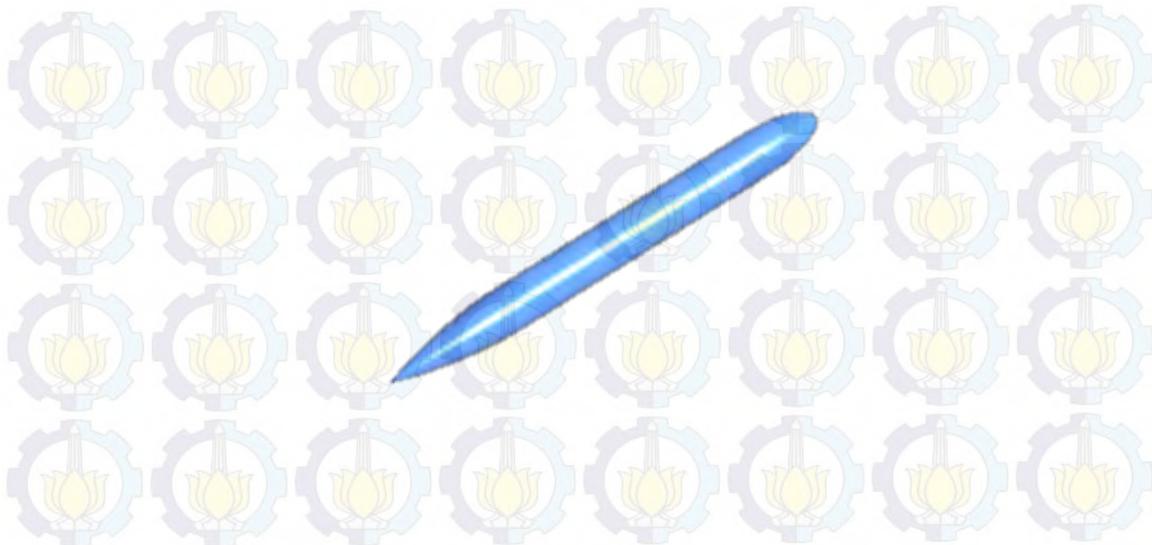
Studi literatur yang dilakukan berkaitan dengan konsep perhitungan hambatan baik secara numerik maupun dengan melakukan simulasi pada perangkat lunak. Selain itu juga dilakukan studi mengenai teori dan metode analisis pada *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan *Wind Tunnel Experiments*. Proses studi literatur dilakukan dengan referensi penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, buku – buku literatur, pencarian lewat internet kemudian melakukan survei/pembelajaran langsung pada pihak laboratorium yang bersangkutan.

3.2 Persiapan Model Pengujian

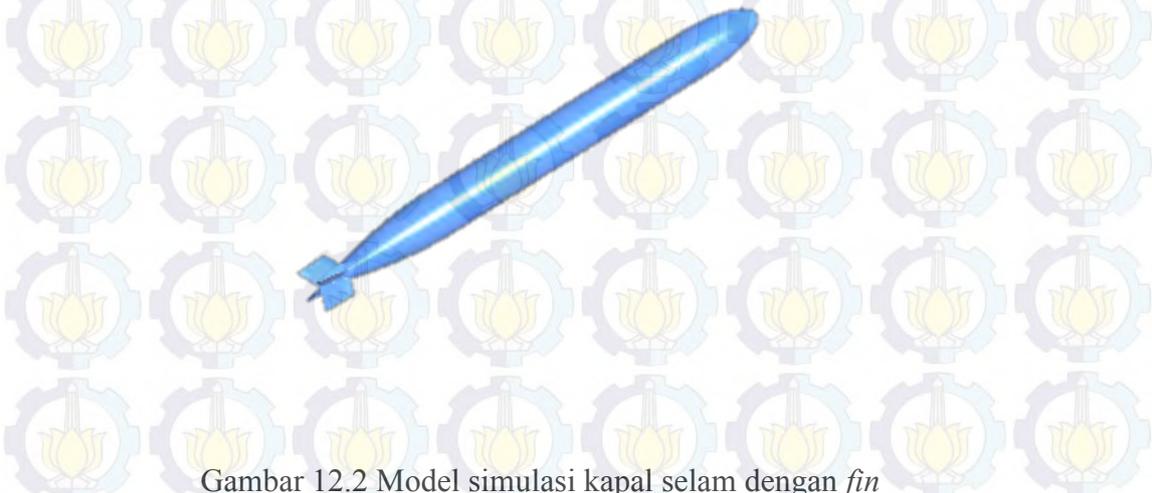
Persiapan model dilakukan dengan pembuatan model dengan bantuan *software* Maxsurf dan AutoCAD. Dalam model kapal selam mini mempunyai dimensi dengan panjang = 6000 mm, lebar = 533 mm, tinggi = 533 mm. Kemudian dari model tersebut divariasikan menjadi 2 variasi pada kapal selam mini tersebut yaitu *barehull* dan dengan tambahan *fin*. Pada simulasi CFD dan *Wind Tunnel Experiments* dilakukan skala model 1:12 untuk model 3-D. Proses skala ini menyesuaikan dengan peralatan pada Laboratorium Mekanika Fluida Teknik Mesin ITS.

3.3 Simulasi Computational Fluid Dynamics

Pada proses simulasi CFD yang dilakukan pada perangkat lunak ANSYS FLUENT, model divariasikan menjadi 2 variasi sesuai pada gambar 3.1 dan gambar 3.2. Kemudian model yang telah dibuat dilakukan proses *meshing* dan *grid independence* untuk menentukan jumlah dari elemen *meshing* yang sesuai. Kemudian dilakukan analisis dengan menentukan kondisi batas dari model pengujian. Kemudian dari hasil simulasi akan didapatkan hambatan total dari proses simulasi pada ANSYS FLUENT 14. Secara umum langkah – langkah pada proses CFD dilakukan dalam 3 tahap yaitu *Preprocessor*, *Processor/Solver*, *Post-processor*.



Gambar 12.1 Model simulasi kapal selam *barehull*



Gambar 12.2 Model simulasi kapal selam dengan *fin*

3.4 Pengujian pada *Wind Tunnel*

Pengujian model kapal selam mini dilakukan pada Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida Teknik Mesin FTI-ITS. Dimana terdapat 2 metode yang dapat dilakukan pada Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida ITS yaitu dengan metode *Force Balancing* dan *Pressure Tab*. Pada pengujian ini dengan mempertimbangkan masalah waktu dan segi biaya metode *Force Balancing* sangat sesuai untuk dilakukan pada pengujian model kapal selam mini. Kemudian sebelum dilakukan pembuatan model dan pengujian pada *Wind Tunnel* dilakukan observasi mengenai peralatan pada *Wind Tunnel* yang akan digunakan untuk mendapatkan skala model yang sesuai agar tidak terjadi *blocking* pada aliran yang dihasilkan

pad *Wind Tunnel* yang dikarenakan oleh ukuran model yang terlampau besar dibandingkan dengan *test section*. Dari hasil diskusi dengan pihak laboratorium didapatkan skala 1:12 pada model kapal selam mini 3-D.

Pada proses pembuatan model dengan bantuan dari pihak laboratorium. Model kapal selam mini ini terbuat dari bahan paralon (PVC). Pada pengujian yang dilakukan akan diperoleh *drag* total dari model pengujian. Hasil yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan koefisien dari hambatan total (C_d). Kemudian dapat dibandingkan dengan hasil dari CFD.

3.5 Mean Absolute Percentage Error

Metode ini melakukan perhitungan perbedaan antara data pengujian dan data hasil simulasi. Perbedaan tersebut diabsolutkan, kemudian dihitung kedalam bentuk presentase terhadap data asli. Hasil presentase tersebut kemudian didapatkan nilai *mean*-nya. Suatu model memiliki kinerja sangat bagus jika nilai MAPE berada dibawah 10%, dan mempunyai kinerja bagus jika nilai MAPE berada diantara 10% dan 20% (Zainun dan Majid, 2003). Dalam peramalan menggunakan MAPE ini menggunakan tiga ukuran sebagai berikut:

$$PE_i = \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \times 100\% \quad MPE = \overline{\frac{PE_i}{N}} \quad MAPE = \overline{\frac{|PE_i|}{N}}$$

Dimana:

y = data pengujian pada *wind tunnel*

\hat{y}_i = data simulasi pada *computational fluid dynamics*

PE = *percentage error*

MPE = *mean percentage error*

MAPE = *mean absolute percentage error*

Diagram Metodologi Penelitian



BAB IV PENGUJIAN WIND TUNNEL

4.1 Wind Tunnel

Wind tunnel atau yang lebih dikenal dengan terowongan angin merupakan salah satu alat yang digunakan pada pengujian aerodinamik. Dalam terowongan angin ini dapat mempelajari efek dari aliran udara yang melewati sebuah benda uji. *Wind tunnel* banyak digunakan pada sarana pembelajaran pada dunia penerbangan. Kemudian pada perkembangannya *wind tunnel* digunakan pada benda – benda lain untuk dipelajari pola aliran yang terjadi.

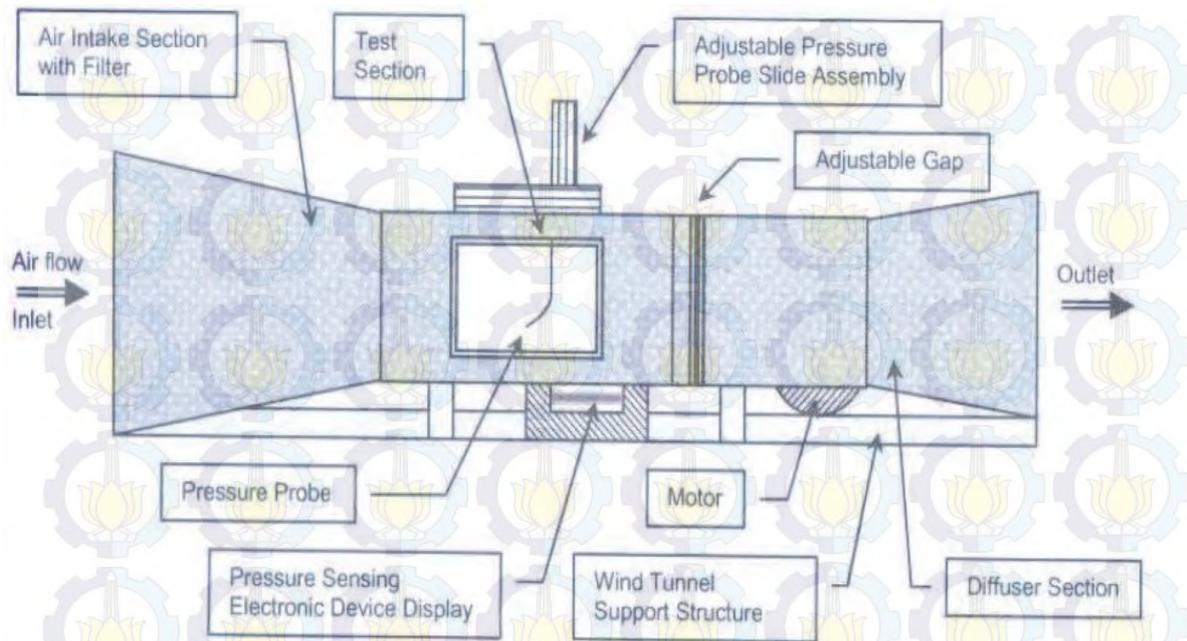
Pada saat ini pengujian pada terowongan angin tidak hanya digunakan dalam dunia penerbangan. Namun sudah banyak digunakan pada industri otomotif, *aerofoil*, layar, kapal selam dan benda uji lainnya. Kemudian pada pengujian ini akan divariasikan penambahan *fin* dan *barehull* pada kapal selam mini tersebut. Dari variasi tersebut akan diketahui hambatan total dari masing – masing variasi sehingga dapat diketahui koefisien total hambatan. Kemudian akan diketahui berapa besar penambahan hambatan dari kapal selam mini tersebut.

4.2 Jenis – jenis Wind Tunnel

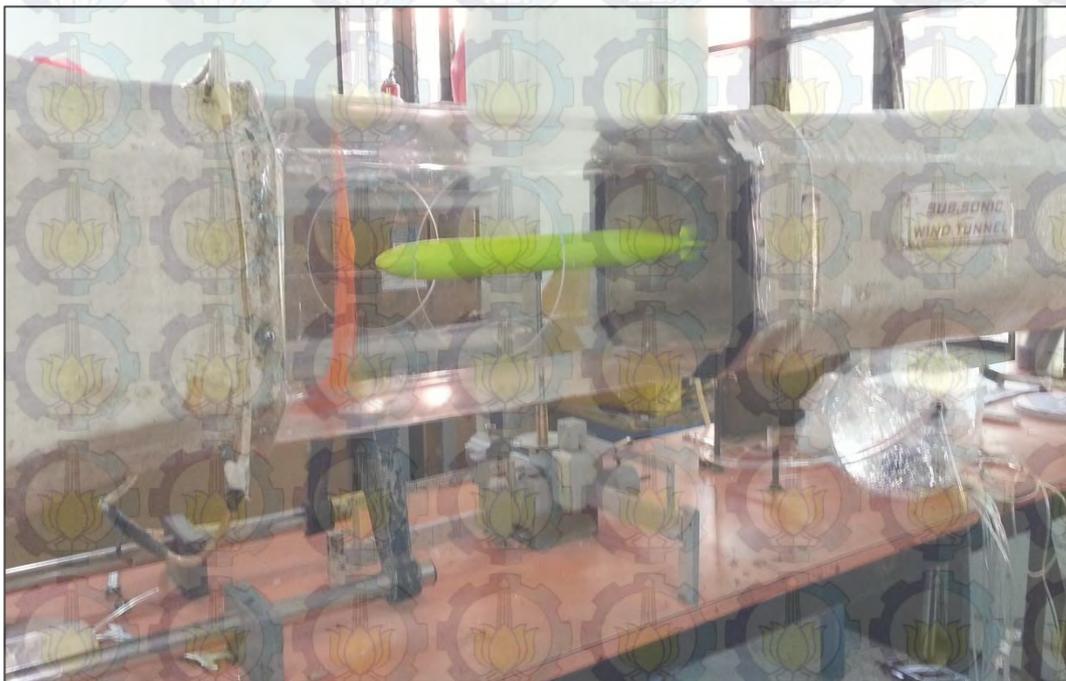
Wind tunnel atau yang lebih dikenal dengan terowongan angin merupakan peralatan yang banyak digunakan pada dunia aerodinamik atau dalam dunia penerbangan. Terdapat beberapa jenis dari *wind tunnel* (terowongan angin). Penggunaan macam dari *wind tunnel* menyesuaikan dari kebutuhan pengujian, model yang akan diuji serta *output* yang akan dihasilkan dari proses pengujian tersebut. Terdapat dua tipe dari *wind tunnel*, yaitu *Open Circuit Tunnel* dan *Closed Circuit Tunnel*.

4.2.1 Open Circuit Tunnel

Tipe *Open Circuit Tunnel* merupakan salah satu jenis dari *wind tunnel* yang mana fluida mengalir pada kondisi terbuka (*open circuit*) secara lurus melalui bagian masuk atau yang lebih dikenal dengan kondisi *inlet* kemudian menuju pada bagian model pengujian atau *test section*. Kemudian dari *test section* udara mengalir melalui *fan* dan keluar ke udara bebas/atmosfer. Jadi pada tipe ini udara mengalir secara terus-menerus dari bagian *inlet* menuju *outlet*.



Gambar 13.1 *Open Circuit wind tunnel*



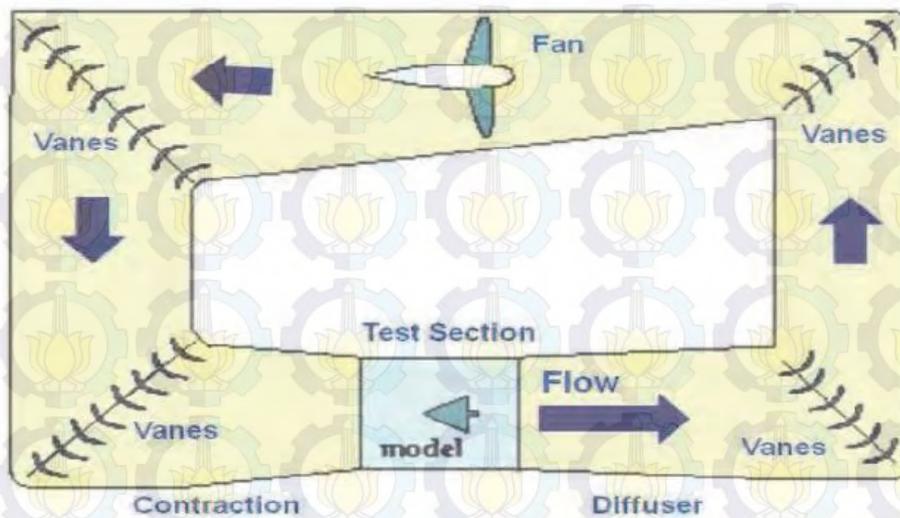
Gambar 13.2 *Open circuit wind tunnel* laboratorium mekanika fluida



Gambar 13.3 *Test section open circuit wind tunnel*

4.2.2 *Closed Circuit Tunnel*

Tipe *Closed Circuit Tunnel* merupakan salah satu jenis dari *wind tunnel* yang mana fluida mengalir secara terus – menerus dan mengalami sirkulasi secara kontinu dengan sedikit atau tanpa pertukaran udara dengan udara atmosfer. Berbeda dengan tipe *Open Circuit Tunnel* yang mana udara mengalami sirkulasi dengan atmosfer.



Gambar 13.4 *Closed circuit wind tunnel*

Terdapat kelebihan dan kekurangan pada *Open Circuit Tunnel* dan *Closed Circuit Tunnel*. Pada *Open Circuit Tunnel* memiliki beberapa keuntungan jika dibandingkan dengan *Closed Circuit Tunnel*, yaitu:

- a. Pada tipe ini memiliki biaya yang lebih murah dalam hal pembuatan dan konstruksinya.
- b. Jika menggunakan visualisasi berupa asap, tidak terdapat masalah pada pembuangan asap karena pada bagian *inlet* dan *outlet* langsung berhubungan dengan atmosfer.

Kemudian pada *Open Circuit Tunnel* juga memiliki beberapa kekurangan jika dibandingkan dengan *Closed Circuit Tunnel*, yaitu:

- a. Dari tingkat kebisingan yang terjadi, pada *Open Circuit Tunnel* cenderung lebih berisik dari pada *Closed Circuit Tunnel*. Untuk test section yang besar suara berisik yang ditimbulkan dapat mengganggu lingkungan sehingga pengoperasian sangat terbatas oleh waktu.
- b. Membutuhkan materi yang bagus pada bagian *inlet* sehingga mendapatkan kualitas dari aliran udara yang lebih bagus.
- c. Pada *Open Circuit Tunnel* karena pada *inlet* dan *outlet* terbuka ke atmosfer, maka cuaca dan suhu dari lingkungan sangat berpengaruh dalam proses pengoperasian.
- d. Pada *Open Circuit Tunnel* membutuhkan energy yang lebih besar dalam hal pengoperasiannya.

Dalam dunia akademik *Open Circuit Tunnel* banyak digunakan karena jika dilihat dari segi ekonomi memiliki harga yang murah dalam proses pembuatannya. Sedangkan pada *Closed Circuit Tunnel* memiliki kelebihan jika dibandingkan dengan *Open Circuit Tunnel*, yaitu:

- a. Tidak menimbulkan berisik yang berlebihan jika dibandingkan dengan *Open Circuit Tunnel*.
- b. Membutuhkan sumber energy yang lebih kecil sehingga dapat digunakan tanpa adanya batasan waktu.
- c. Kualitas aliran dapat dikontrol dengan baik dan tidak tergantung dengan kondisi cuaca.

Namun pada *Closed Circuit Tunnel* mempunyai kekurangan jika dibandingkan dengan *Open Circuit Tunnel*, yaitu:

- a. Pada pengoperasian *Closed Circuit Tunnel* membutuhkan sirkulasi udara untuk proses pendinginannya jika *tunnel* digunakan dalam waktu yang lama.
- b. Pada *Closed Circuit Tunnel* jika digunakan untuk pengujian motor pembakaran dalam dan visualisasi asap, maka dibutuhkan saluran untuk pembuangan asap dari *tunnel*.
- c. Biaya pada proses pembuatan dan konstruksi yang mahal karena adanya saluran *return* dan *corner vanes*.

Kemudian jika dilihat berdasarkan kecepatan udara yang mengalir di dalam *wind tunnel*, maka dapat dibedakan atas:

- a. *Subsonic Wind Tunnel* ($M < 1$)
- b. *Transonic Wind Tunnel* ($M = 1$)
- c. *Supersonic Wind Tunnel* ($1 < M < 3$)
- d. *Hypersonic Wind Tunnel* ($M > 5$)

4.3 Pengukuran Gaya dan Kecepatan

4.3.1 Pengukuran Gaya

Pada aeromodeling, gaya aerodinamik dapat muncul sebagai akibat dari aliran udara pada suatu permukaan dari suatu benda seperti pesawat, mobil, kereta api, helicopter. Gaya aerodinamik dapat muncul karena adanya distribusi tekanan yang berbeda – beda pada permukaan dan tegangan geser pada permukaan yang berasal dari efek gesekan fluida yang melawan bidang permukaan benda. Gaya aerodinamik yang terjadi pada benda dapat dibedakan menjadi dua, yaitu gaya hambat aerodinamik (*drag force*) dan gaya angkat aerodinamik (*lift force*). Fungsi utama baik secara analitis maupun eksperimental dalam aerodinamika adalah untuk memprediksi dan mengukur gaya aerodinamik yang terjadi pada suatu benda.

- a. Gaya Hambat Aerodinamik (*Drag Force*)

Gaya hambat (*Drag Force*) merupakan komponen yang bekerja pada suatu bodi yang sejajar dengan arah gerakan. Gaya hambat atau *drag* ini merupakan gaya yang menahan gerakan benda. Gaya hambat yang terjadi pada suatu benda yang berbentuk kotak di dalam aliran fluida dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$F_D = f(l, V, \rho, \mu)$$

Dimana :

l = panjang benda (m)

V = kecepatan aliran (m/s)

ρ = massa jenis fluida yang mengalir (kg/m³)

μ = viskositas kinematik fluida yang mengalir (kg/ms)

Dengan teori *Buckingham Pi* didapat dengan hubungan pada persamaan

$$\frac{F_D}{\rho V^2 d^2} = f\left(\frac{\rho V d}{\mu}\right)$$

Besarnya koefisien drag (*drag coefficient*), C_D dari penampang tiga dimensi dapat dirumuskan dimana A merupakan luasan benda.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

b. Gaya Angkat (*Lift Force*)

Gaya angkat (*Lift*) merupakan komponen gaya fluida pada suatu bodi yang tegak lurus arah gerakan fluida. Koefisien *lift* penampang 3-D dirumuskan sebagai berikut:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

Pada pesawat terbang gaya *Lift* ini diharapkan sebesar mungkin, sehingga pada kecepatan dorong yang kecil pesawat dapat terbang pada ketinggian yang lebih tinggi. Pada suatu model sayap pesawat (*aerofoil*) kecepatan udara yang melalui permukaan atas didesain agar lebih tinggi daripada permukaan bawah, sehingga permukaan bawah akan bertekanan positif dan permukaan atas bertekanan negative. Dari perbedaan tekanan ini akan menimbulkan suatu gaya yang arahnya ke atas yang disebut gaya *lift*, yang dipakai untuk menerbangkan pesawat. Harga C_L dan C_D untuk *aerofoil* merupakan fungsi dari angka Reynolds dan sudut serang (*angle of attack*) α , yaitu sudut antara *chord aerofoil* dengan vector kecepatan *freestream*.

4.3.2 Pengukuran Kecepatan

Pada pengujian *wind tunnel* kapal selam mini menggunakan alat ukur yang bernama *force balancing*. Pada pengukuran ini langsung dapat diketahui *Total of Drag Force* dan *Total of Lift Force*. Pada pengukuran ini *Force Balancing* beroperasi layaknya seperti timbangan. Sehingga ketika *wind tunnel* beroperasi pada kecepatan tertentu *Force Balancing* akan mengalami perubahan posisi dari posisi normal, sehingga perlu diseimbangkan dengan menggeser bandul pada timbangan tersebut.

4.4 Pengujian Kapal Selam Mini pada *Wind Tunnel*

a. *Wind Tunnel*

Percobaan dilakukan pada sebuah terowongan angin *subsonic* dengan *Open Circuit Tunnel* dengan kapasitas maksimal terowongan mencapai 18 m/s. Terowongan angin tersebut mempunyai ukuran panjang = 2980 mm dengan *test section* berbentuk bujur sangkar berukuran 300 x 300 mm² dan panjang 450 mm. Pada *wind tunnel* ini memiliki ketelitian sebesar 1 mN.



Gambar 13.5 *Open circuit subsonic wind tunnel* teknik mesin FTI ITS

b. Model Kapal Selam Mini

Dalam prosedur pengujian yang direkomendasikan oleh laboratorium mekanika fluida teknik mesin dan teori *blockage ratio* bahwa luasan model sebaiknya kurang dari 5% luasan dari *test section wind tunnel* (A_T) (Geurts, 2005) untuk menghindari efek dinding atau *blockage effect* yang disebabkan oleh *boundary layer* pada dinding *wind tunnel*. Maka luasan penampang *frontal* model harus lebih kecil dari $A_T = (300 \times 300) \text{ mm}^2$. Dalam percobaan ini menggunakan pemilihan skala 1:12 berdasarkan ukuran sebenarnya.

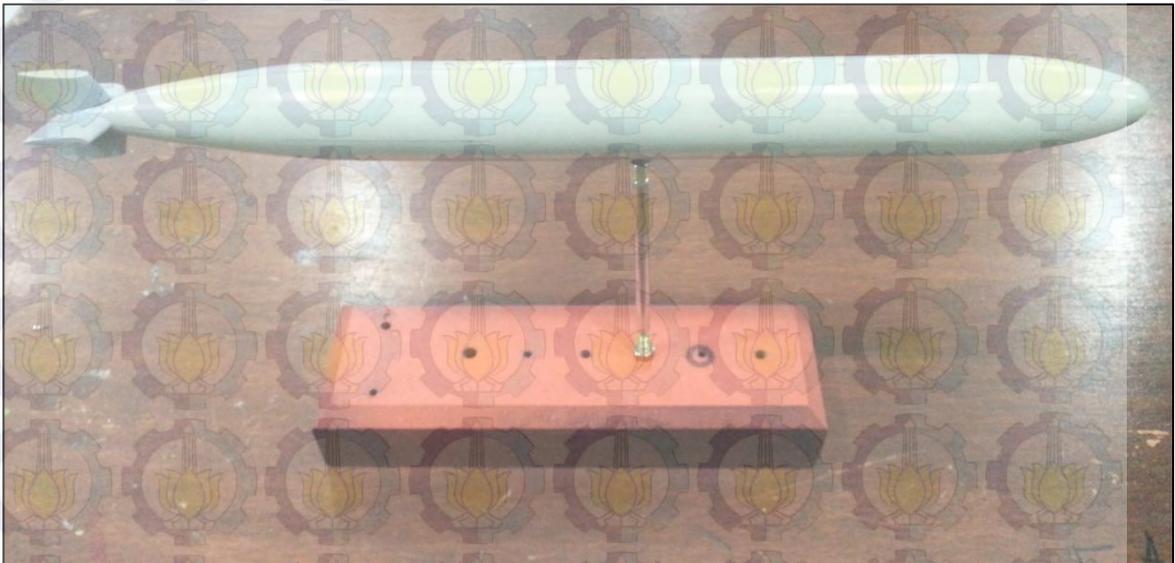
Tabel 13.1 Dimensi kapal selam mini dan model

Dimensi	Kapal Selam Mini	Model	
Panjang	6 m	0.5 m	500 mm
Diameter	0.533 m	0.044 m	44.41 mm
Luasan	0.284 m ²	0.001550 m ²	1550.091 mm ²

Fenomena *blockage effect* adalah fenomena dimana aliran yang ditimbulkan akibat aliran udara dari benda uji mengenai dinding *test section* sehingga dapat mempengaruhi keakuratan pengambilan data. A (luasan *frontal* model) = 1550.09112 mm² (1.7223% dari luasan A_T). Sehingga luasan A memenuhi batas 5% *blockage ratio* (Geurts, 2005) dari luasan *Test Election* $A_T = 90000 \text{ mm}^2$. Sedangkan bahan model terbuat dari paralon (PVC) dengan variasi desain sebagai berikut:



Gambar 13.6 Model kapal selam mini *barehull*



Gambar 13.7 Model kapal selam mini dengan *fin*

c. Prosedur Pengujian

Pada pengujian *wind tunnel* kapal selam mini menggunakan alat ukur yang bernama *force balancing*. Pada pengukuran ini langsung dapat diketahui *Total of Drag Force* dan *Total of Lift Force*. Pada pengukuran ini *Force Balancing* beroperasi layaknya seperti timbangan. Sehingga ketika *wind tunnel* beroperasi pada kecepatan tertentu *Force Balancing* akan mengalami perubahan posisi dari posisi normal, sehingga perlu diseimbangkan dengan menggeser bandul pada timbangan tersebut.

Prosedur Pengujian

- a. Langkah – langkah yang dilakukan dalam melakukan pengujian menggunakan *wind tunnel* adalah sebagai berikut
- b. Menentukan kecepatan *freestream* yang diinginkan pada *test section*. Dalam hal ini kecepatan *freestream* menyesuaikan dengan kemampuan dari *wind tunnel* yang ada pada laboratorium mesin dan mekanika fluida Teknik Mesin ITS. Sesuai dengan kemampuan peralatan yang ada kecepatan ditentukan dengan 5 variasi kecepatan yaitu 7.4 m/s, 6.6 m/s, 5.9 m/s, 5.1 m/s dan 4.4 m/s.
- c. Melakukan persiapan terhadap test section sehingga tidak terjadi masalah ketika proses *running* berlangsung misalnya dengan membersihkan debu dan kotoran – kotoran yang menempel pada *test section*.
- d. Menyiapkan model uji berupa kapal selam mini dan dipasangkan pada *force balancing*.



Gambar 13.8 Pemasangan *holder* pada model kapal selam

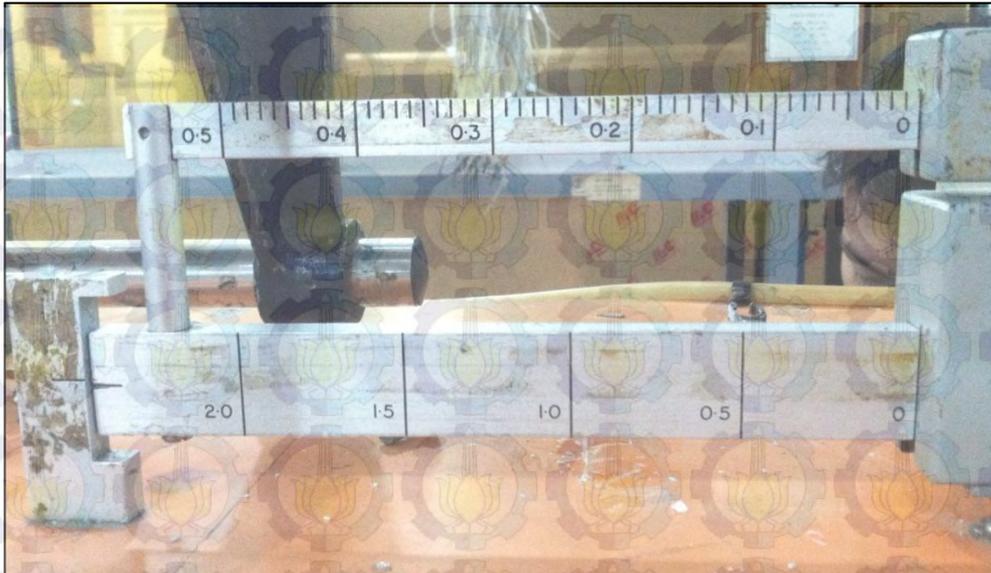


Gambar 13.9 Pemasangan model kapal selam pada *force balancing wind tunnel*



Gambar 13.10 Model uji kapal selam dalam *test section wind tunnel*

- e. Melakukan penyebaran berat pada kapal selam mini sehingga posisi model uji berda pada keadaan normal, dengan posisi *drag* dan *lift* pada posisi nol.



Gambar 13.11 Indikator *drag force* pada *wind tunnel*



Gambar 13.12 Indikator *lift force* pada *wind tunnel*

- f. Menentukan kecepatan *free stream* pada *wind tunnel* dengan menentukan frekuensi pada inverter sehingga dihasilkan kecepatan yang diinginkan yang dapat dibaca pada manometer.
- g. Melakukan pengukuran gaya yang diterima pada model uji sehingga diketahui *Total of Drag Force* untuk tiga variasi model dan 5 variasi kecepatan.



Gambar 13.13 Pengukuran *drag force* pada kecepatan 7.45 m/s dengan sudut 10^0

- h. Untuk setiap model uji dilakukan pengambilan data sebanyak 3 kali percobaan untuk mendapatkan *Total of Drag Force* kemudian dihitung nilai rata – rata dari 3 kali pengambilan data.
- i. Menganalisis dari data yang diperoleh kemudian mencari harga dari koefisien total dari *drag force* (CT).

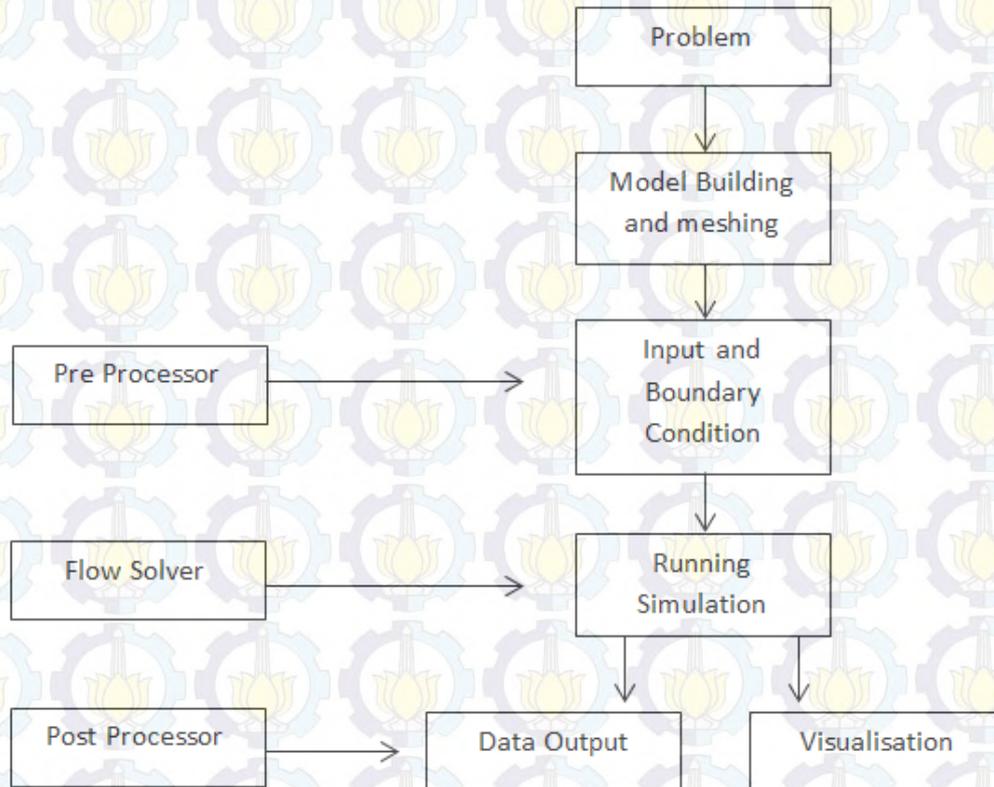


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V SIMULASI COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

5.1 Computational Fluid Dynamics

Pada dasarnya Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan ilmu sains dalam penentuan penyelesaian numeric dinamika fluida. Pemodelan CFD sendiri didefinisikan sebagai teknik perhitungan untuk memprediksi fenomena dasar aliran yang menggunakan komputer berkemampuan tinggi. (Morgan dan Lin, 1987). Kemudian CFD didefinisikan sebagai suatu program yang dapat digunakan untuk menganalisis aliran fluida beserta karakteristik yang ditimbulkan akibat Bergeraknya suatu benda pada fluida tersebut. Prinsip perhitungan CFD diawali dengan membagi domain fluida menjadi sejumlah elemen yang terintegrasi. Setiap elemen tersebut dikontrol oleh suatu persamaan dengan menggunakan perhitungan numerik dan kemudian diperoleh hasil berupa gaya-gaya yang bekerja pada model ataupun keterangan lain yang dapat menggambarkan kondisi model pada suatu kondisi batas tertentu. Kondisi batas dalam hal ini diperlukan sebagai input. Prinsip ini sering dipakai pada proses perhitungan dengan menggunakan bantuan komputasi computer.



Gambar 14.1 Prosedur Pemrograman Simulasi

Fluida merupakan zat yang mudah untuk berubah bentuk secara kontinu (terus menerus) bila terkena tegangan geser, meskipun terjadi tegangan geser yang kecil. Gaya geser merupakan komponen gaya yang menyentuh permukaan dan jika gaya ini dibagi dengan luas permukaan tersebut maka disebut dengan gaya geser rata-rata pada permukaan tersebut. Tegangan geser pada suatu titik merupakan nilai batas perbandingan gaya geser terhadap berkurangnya luas hingga menjadi titik tersebut. Fluida diklasifikasikan sebagai fluida newton dan fluida bukan-newton. Dalam fluida newton viskositas fluidanya tidak berubah dengan berubahnya tegangan geser. Misalnya cairan encer dan gas, sedangkan Fluida bukan-newton adalah fluida yang viskositasnya berubah dengan berubahnya tegangan geser misalnya pasta gigi.

Fluida mengalir disebabkan oleh adanya perbedaan tekanan. Dalam kehidupan sehari-hari banyak dijumpai fluida yang mengalir. Air dalam pipa PDAM keluar melalui kran, aliran air sungai. Dalam aliran fluida semacam itu terdapat fenomena yang bisa dipelajari. Ada hal-hal yang berpengaruh satu sama lain. Jenis zat, kekentalan, kecepatan alir menjadi dasar tema pembicaraan. Berdasarkan karakteristik struktur internal aliran, aliran fluida dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu aliran laminar dan turbulen.

Aliran Laminer merupakan aliran fluida yang bergerak dengan kondisi lapisan lapisan (lamina - lamina) membentuk garis-garis alir yang tidak berpotongan satu sama lain. Hal tersebut ditunjukkan oleh percobaan Osborne Reynolds. Pada laju aliran rendah, aliran laminer tergambar sebagai filamen panjang yang mengalir sepanjang aliran.

Aliran Turbulen merupakan aliran fluida yang partikel-partikelnya bergerak secara acak dan tidak stabil dengan kecepatan berfluktuasi yang saling interaksi. Akibat dari hal tersebut garis alir antar partikel fluidanya saling berpotongan. Oleh Osborne Reynolds digambarkan sebagai bentuk yang tidak stabil yang bercampur dalam waktu yang cepat yang selanjutnya memecah dan menjadi tak terlihat.

5.2 Persamaan Dasar Dinamika Fluida dalam CFD

Pada *computational fluid dynamics* (CFD) berdasarkan persamaan dasar dinamika fluida yang merupakan persamaan kontinuitas, momentum dan energi. Persamaan-persamaan ini merupakan pernyataan matematis pada 3 prinsip dasar fisika:

- a. Hukum kekekalan massa
- b. Hukum kedua Newton, $F = m a$

c. Hukum kekekalan energy

Persamaan dasar gerak fluida yang akan didapatkan terdapat 3 prinsip sebagai berikut:

- a. Memilih prinsip fisika dasar dari hukum-hukum fisika (hukum kekekalan massa, hukum kedua Newton dan hukum kekekalan energi)
- b. Menetapkan prinsip-prinsip fisika dalam bentuk model aliran.
- c. Kemudian dapat diuraikan persamaan matematis yang meliputi prinsip-prinsip fisika

Persamaan Navier-Stokes merupakan sistem persamaan differensial non-linier yang mendeskripsikan bagaimana fluida mengalir. Persamaan dasar dari aliran fluida diperkenalkan oleh Navier pada tahun 1823, dan beberapa tahun kemudian ditempat yang berbeda diperkenalkan oleh Stokes. Simulasi aliran fluida dapat digambarkan dengan menyelesaikan persamaan tersebut.

Persamaan Navier-Stokes merupakan persamaan diferensial parsial nonlinier orde dua. Selama ini belum terdapat solusi analitik penyelesaian persamaan tersebut. Metode yang digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida selama ini adalah metode Euler yaitu *Finite Element* (FE) dan *Finite Difference* (FD) yang menggunakan anggapan bahwa, fluida merupakan sistem yang kontinyu dan mengikuti hukum-hukum gerak Newton. Cara ini sangat tidak efektif untuk dilakukan mengingat persamaan Navier-Stokes merupakan persamaan yang sangat kompleks.

Persamaan Navier-Stokes didapatkan dengan mensubstitusi hukum ketiga Newton kedalam elemen fluida dV . Bentuk umum persamaan Navier-Stokes dituliskan pada persamaan berikut ini (Versteeg, 2007):

$$\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = \left(\nabla^2 \vec{u} - \vec{u} \right)$$

F adalah gaya luar dan μ adalah viskositas fluida. Untuk fluida yang tidak termampatkan, maka persamaan $\nabla \cdot u = 0$ harus disubtitusikan pada sistem. Jika persamaan tersebut dikombinasikan maka persamaan Navier-Stokes untuk fluida tidak termampatkan (misalnya air) dapat dituliskan pada persamaan berikut.

$$\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = \mu \nabla^2 \vec{u}$$

Simulasi aliran fluida dapat dilakukan dengan mencari solusi persamaan Navier-Stokes. Selama ini belum terdapat solusi analitik persamaan Navier-Stokes tersebut, karena itu untuk mencari solusi persamaan Navier-Stokes dapat dilakukan dengan metode numerik.

Syarat awal dan syarat batas juga diperlukan dalam simulasi aliran fluida. Secara umum, syarat awal yang digunakan adalah $(\rho(t = 0, x, y, z), (t = 0, x, y, z))$, dan syarat batas untuk simulasi aliran fluida pada permukaan.

5.3 ANSYS Fluent

ANSYS FLUENT merupakan salah satu software pada *computational fluid dynamics* (CFD). Banyak kelebihan dan kekurangan dalam penggunaan *software* ANSYS FLUENT.

Kelebihan penggunaan ANSYS FLUENT sebagai berikut

- a. Pada proses pengerjaan dapat berlangsung lebih cepat dan mengeluarkan biaya yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan melakukan percobaan.
- b. Keakuratannya selalu dikontrol dalam proses desain
- c. Memiliki kemampuan pada saat kondisi sesudah melewati titik kritis.
- d. Memiliki kemampuan yang dapat mengendalikan percobaan yang sulit dan tidak mungkin dilakukan dalam sebuah eksperimen.

Dengan menggunakan *software Fluent*, dapat juga dilakukan komputasi paralel untuk menghitung solusi dari *model* dengan *mesh* yang sangat banyak dengan menggunakan beberapa prosesor komputer. *Software Fluent* dibangun dengan menggunakan bahasa pemrograman C (dengan sedikit modifikasi) sehingga sangat eksibel dalam hal alokasi memori dan daya komputasi. *Software Fluent* juga dapat diperkaya oleh pengguna dengan menambahkan makro atau *user defined function* (UDF) yang ditulis dalam bahasa pemrograman C jika modul standar pada *Fluent* tidak menyediakan fitur yang sesuai dengan kasus yang dihadapi.

Aplikasi dari *software* untuk penyelesaian masalah aliran pada kapal telah mengalami kemajuan. Pada *software* yang ada sekarang ini merupakan bagian dari proses desain dalam diagram spiral desain. Dengan *software* memungkinkan untuk memprediksi fenomena aliran fluida yang jauh lebih kompleks dengan berbagai tingkat akurasi. Secara umum pada proses pengerjaan ini terdiri dari 3 langkah dalam menjalankan *software* ANSYS FLUENT yaitu tahap *preprocessor*, *processor (solver)*, *post processor*.

5.3.1 Tahap Preprocessor

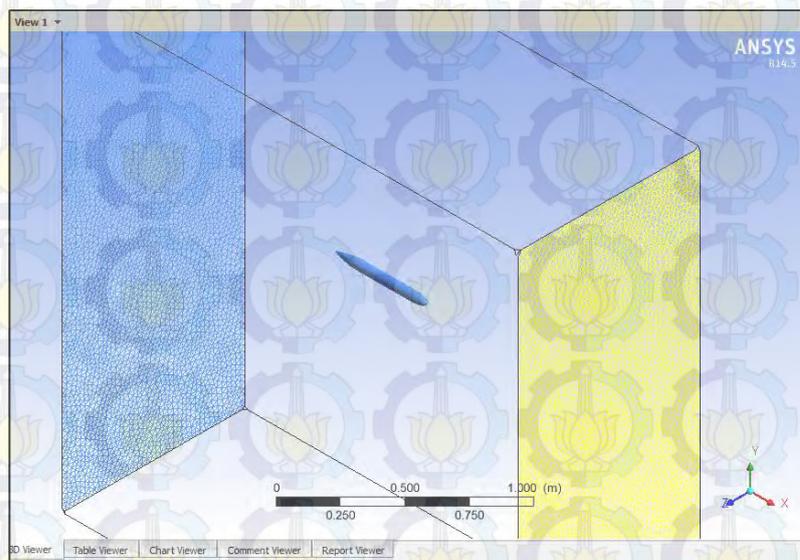
Pada tahap *preprocessor* terdiri dari input masalah aliran untuk *software* melalui *interface* kemudian mengubahnya menjadi bentuk yang sesuai dengan format yang

dikehendaki oleh bagian solver. Pada tahap ini perlu dilakukan input permasalahan sesuai dengan aturan pada *software* meliputi:

- a. Membentuk geometri benda dan daerah sekeliling benda sebagai *domain* komputasi.
- b. Membentuk *grid generation* atau membagi *domain* yang telah ditentukan menjadi bagian yang lebih kecil
- c. Penentuan fenomena fisika dan kimia dari model
- d. Penentuan sifat – sifat fluida (*boundary condition*)
- e. Penentuan kondisi batas model geometri, lokasi pembuatan kondidi batas harus ditentukan.
- f. Penentuan besar kecilnya atau kekasaran *grid*

ICEM CFD

Pada gambar 5.2 merupakan proses penentuan dari *boundary condition* pada pemodelan dengan menggunakan ANSYS ICEM CFD. Pada langkah ini ditentukan *inlet*, *wall*, *outlet*, objek (kapal selam mini) yang diuji dan material fluida. Kemudian dilakukan proses *meshing*. Semakin kecil elemen yang dibuat maka jumlah elemen yang terbentuk semakin banyak sehingga waktu untuk proses *running* akan semakin lama dan menghasilkan kapasitas file yang besar. Proses *meshing* yang telah dilakukan akan menghasilkan jumlah elemen. Jumlah elemen ini yang akan menentukan tingkat keakuratan hasil yang didapat.

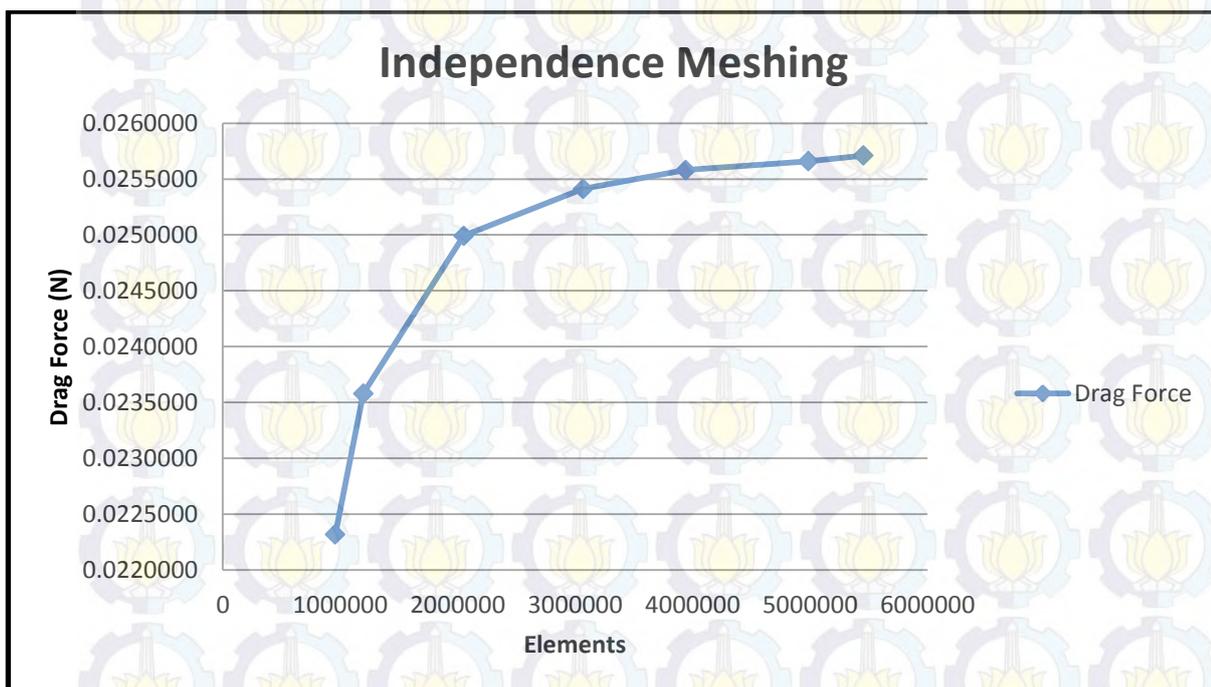


Gambar 14.2 Proses Penentuan Boundary Condition pada ICEM CFD

Kemudian pada gambar 5.4, gambar 5.5 dan gambar 5.6 merupakan hasil dari proses *meshing* yang mana dilakukan proses *running* dengan 7 percobaan sampai mendapatkan hasil yang sesuai.

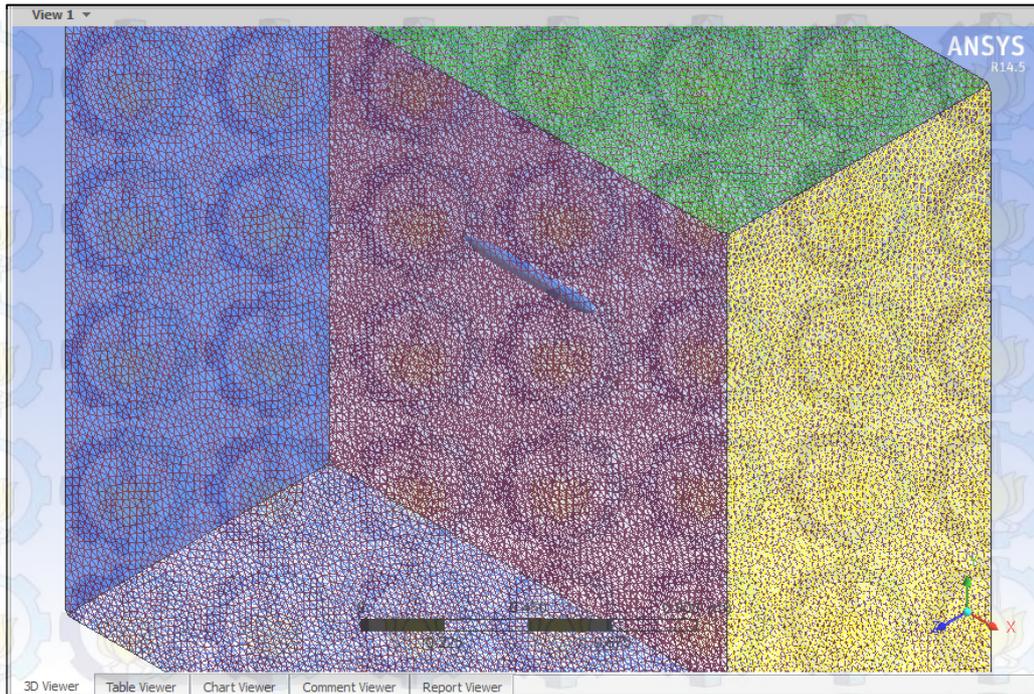
Tabel 14.1 *Grid independence meshing*

Jumlah Meshing	Drag Force (N)
958133	0.0223168
1196702	0.0235785
2051350	0.0249921
3068548	0.0254117
3943286	0.0255815
4985783	0.0256592
5455596	0.0257113



Gambar 14.3 Penentuan Independence meshing pada ICEM CFD

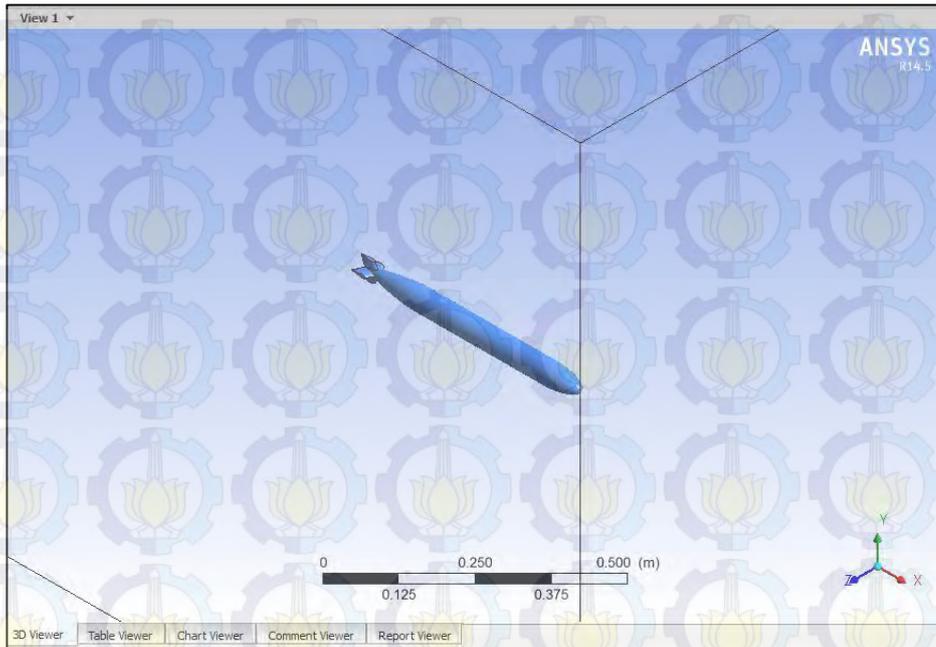
Berdasarkan Utama (2002) *independence meshing* mencapai posisi optimum apabila selisih perbedaan nilai hambatan antara suatu jumlah elemen dengan elemen sebelumnya kurang dari 2%. Maka dari tabel diatas nilai optimum yang didapat untuk penggunaan elemen berada pada jumlah elemen 4985783.



Gambar 14.4 Proses Meshing pada ICEM CFD



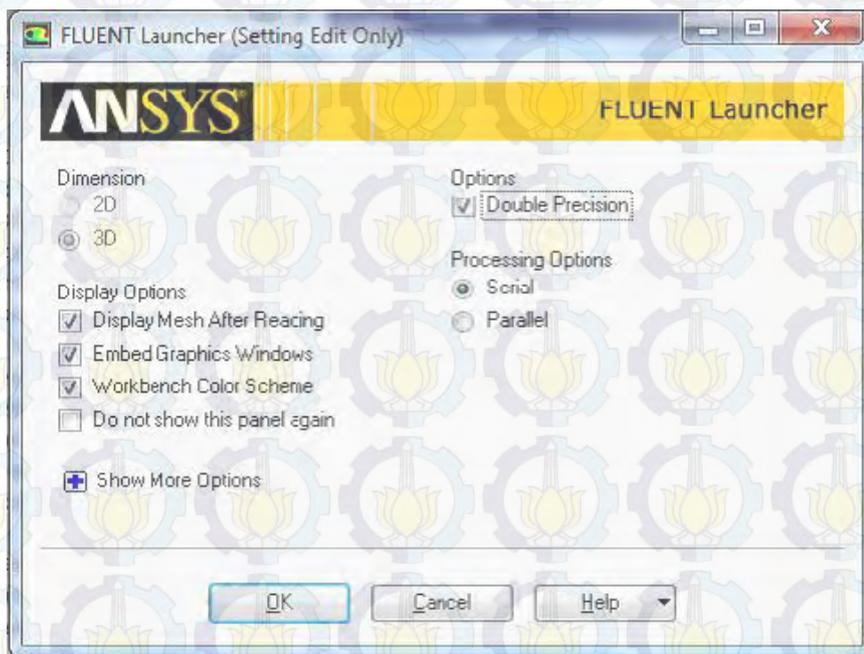
Gambar 14.5 Hasil meshing kapal selam *barehull*



Gambar 14.6 Hasil meshing kapal selam dengan *fin*

Penentuan Kondisi Batas

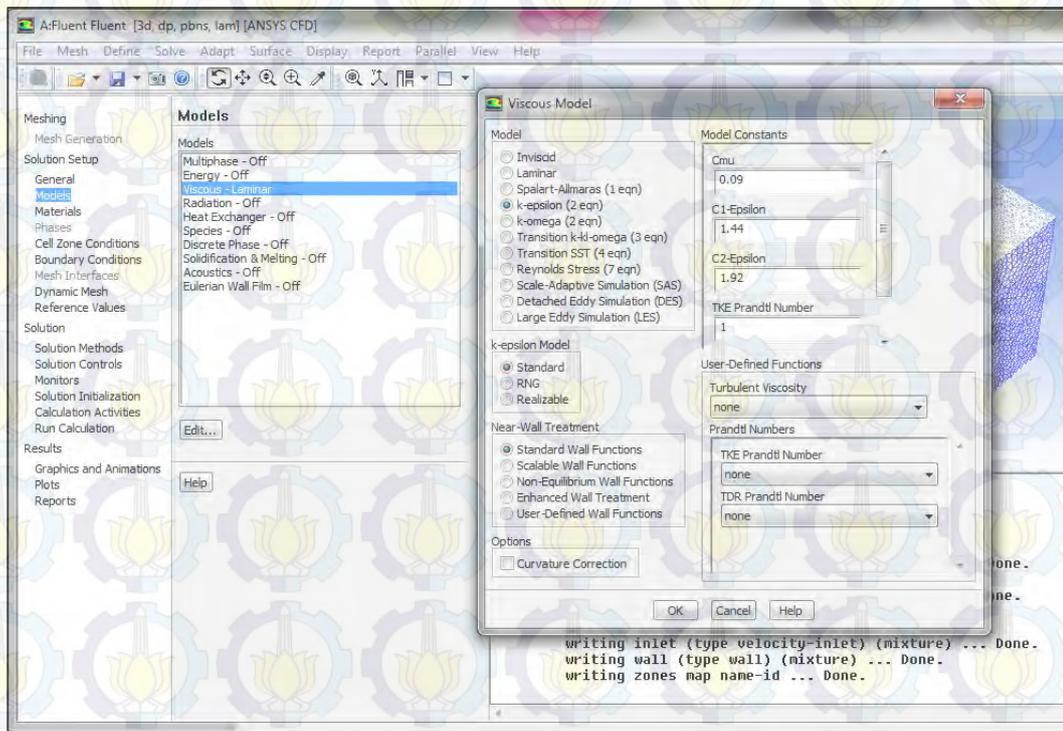
Pada ANSYS FLUENT terdapat 2 pilihan dalam proses solver yaitu 2 dimensi *single precision* atau *double precision* dan 3 dimensi *single precision* dan *double precision*. Pada pengujian kali ini digunakan 3 dimensi dengan *double precision*. *Double precision* dibutuhkan untuk simulasi pada geometri yang sangat panjang, diameter yang sangat kecil, atau kasus konveksi dengan perbedaan konduktivitas tinggi.



Gambar 14.7 FLUENT Launcher

Viscous Model

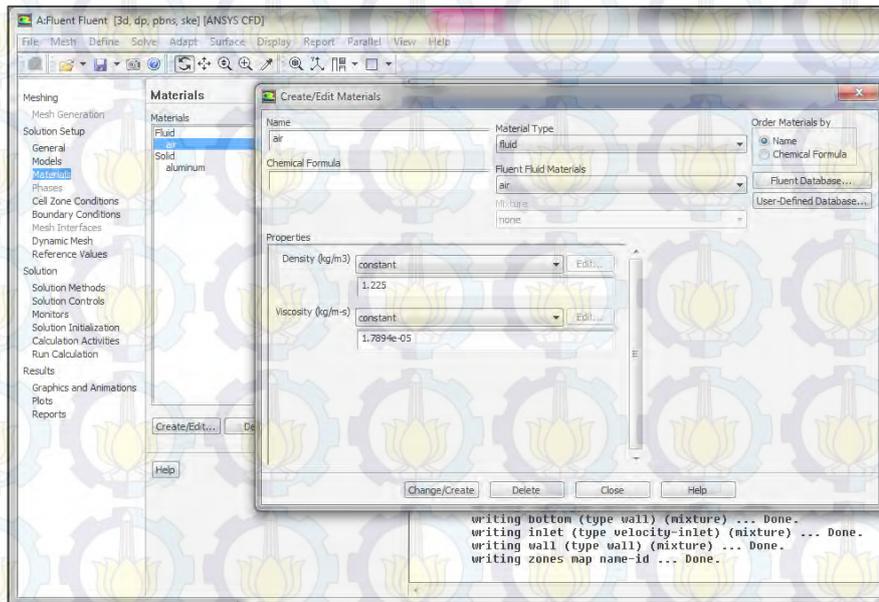
Pada menu ANSYS FLUENT terdapat menu untuk memilih model aliran pada proses running. Disini terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan seperti formulasi *solver*, ruang model (*space*), dll. Pada simulasi ini dipilih model *k-epsilon*. Pada model ini merupakan model semi empiris yang dikembangkan oleh *Launder & Spalding*. Model *k-epsilon* merupakan model turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scales*) ditentukan secara independen. Kestabilan, ekonomis (dari sisi komputasi), dan akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen membuat model *k-epsilon* sering digunakan pada simulasi aliran fluida (Tuakia, 2008).



Gambar 14.8 Viscous Model

Material Definition

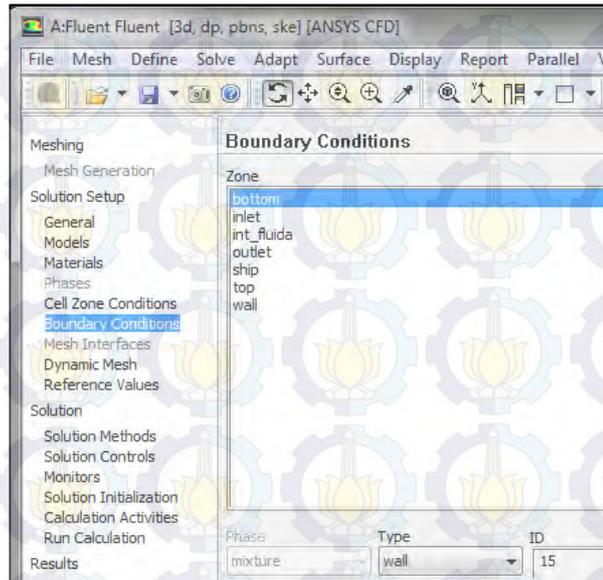
Pada menu ini kita memilih jenis dari material yang kita gunakan, dan juga *density* serta *viscosity* dari material



Gambar 14.9 Material Fluida

Boundary Condition

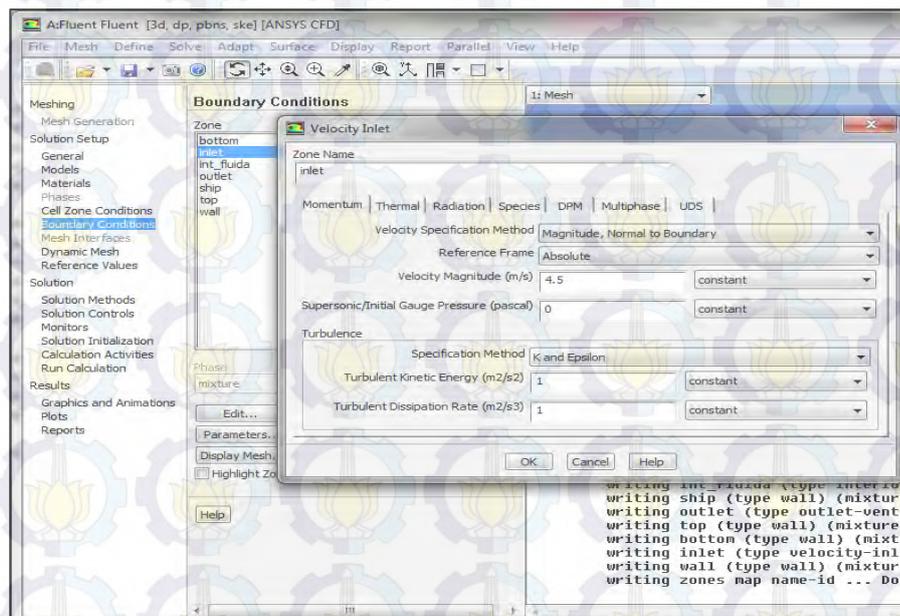
Pada penentuan kondisi batas merupakan masukan data yang sangat penting untuk simulasi aliran dengan FLUENT. Pada tahap ini menentukan *inlet*, *wall*, *outlet* dan benda uji.



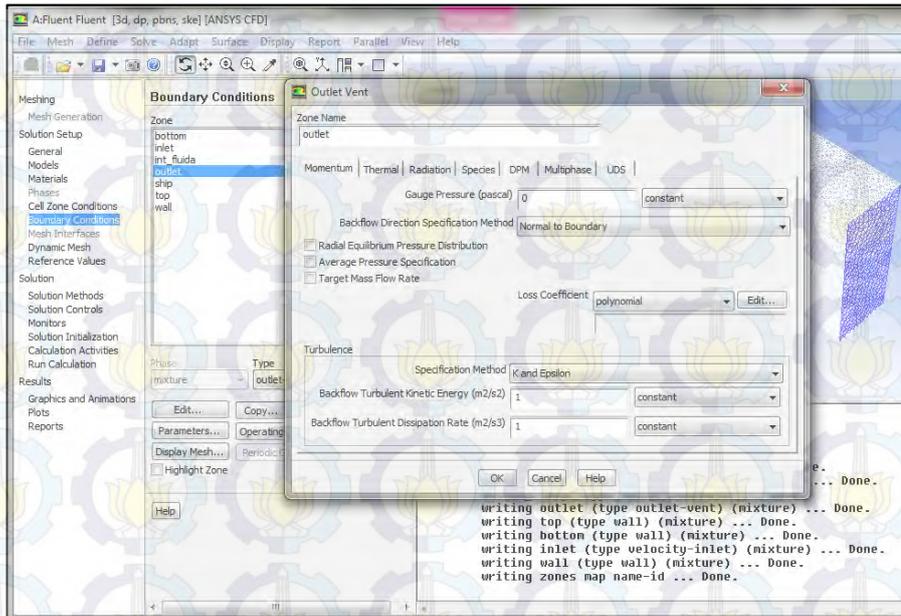
Gambar 14.10 Proses penentuan *boundary condition*

Velocity – inlet dan outlet

Lokasi kondisi batas ini berada pada sisi masuk daerah saluran. Nilai masukan yang dibutuhkan adalah kecepatan aliran air, arah aliran, dan sifat turbulensi. Pada kondisi batas ini, kecepatan masuk aliran akan selalu tetap sepanjang iterasi. *Velocity inlet* hanya dapat digunakan pada aliran inkompresible. Pada kondisi batas ini diperlukan nilai masukan berupa tekanan statik, arah aliran dan kecepatan aliran serta besaran turbulensi.



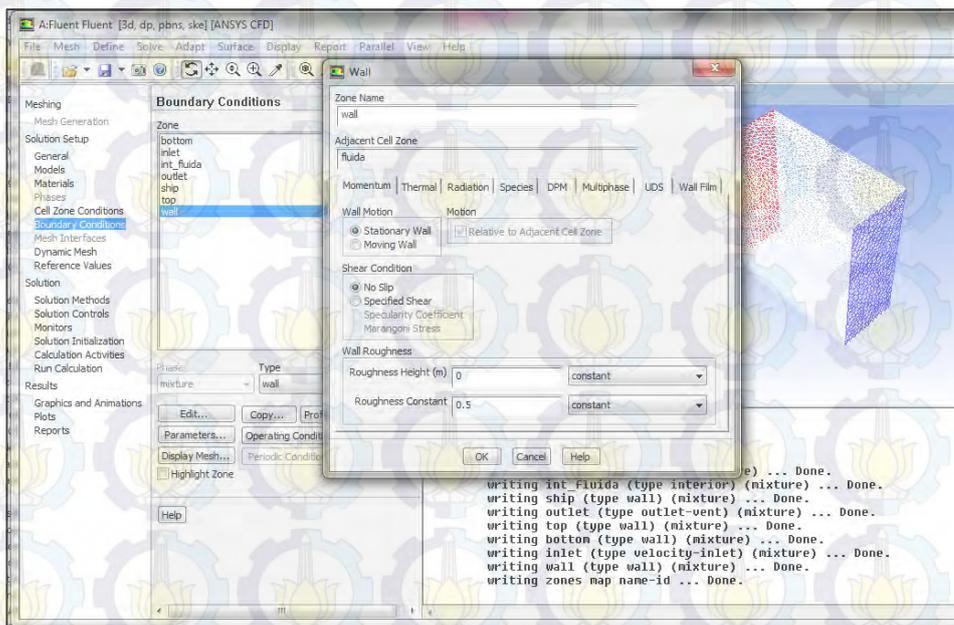
Gambar 14.11 Penentuan Velocity Inlet



Gambar 14.12 Penentuan *velocity outlet*

Wall

Seluruh dinding yang terdapat pada saluran didefinisikan sebagai dinding. Tidak ada nilai yang harus dimasukkan pada kondisi batas ini apabila dinding tidak bergerak terhadap waktu dan tidak melakukan perpindahan panas (adiabatik). Pada kondisi ini dinding dikondisikan sebagai *free slip*, dimana tidak terjadi gesekan antara dinding dengan fluida sehingga tidak terjadi perlambatan kecepatan saat proses running.



Gambar 14.13 Penentuan untuk *wall*

Model kapal selam mini

Meshing yang digunakan pada model kapal selam mini adalah model elemen *meshing tetrahedral*. Agar mendapatkan tingkat keakuratan hasil yang diinginkan maka ukuran *meshing* diperkecil sehingga menghasilkan jumlah *meshing* yang banyak. Model elemen *meshing tetrahedral* biasanya digunakan juga pada bentuk-bentuk yang unstruktural sehingga menghasilkan *meshing* yang rapat.

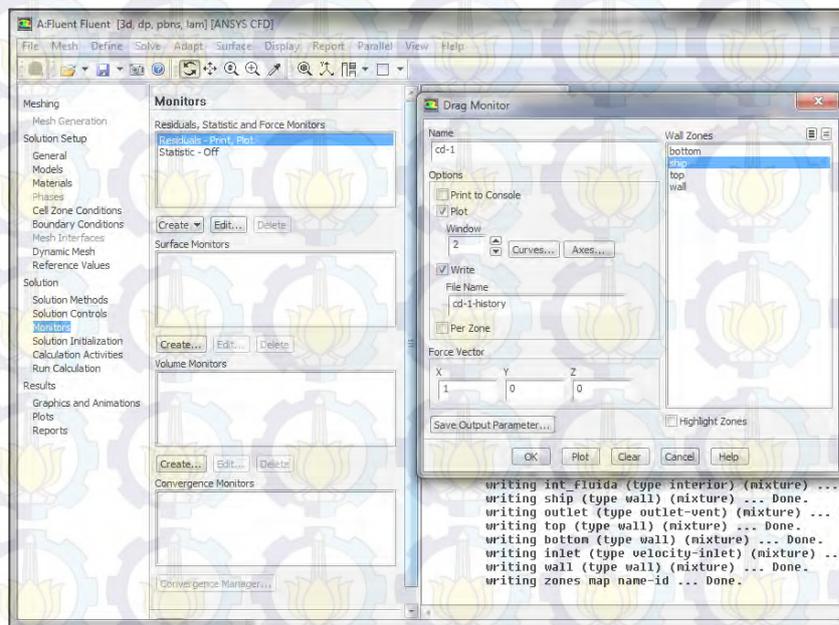
Untuk proses penentuan kondisi batas kapal selam mini *barehull* dan kapal selam mini dengan *fin* dikondisikan dengan *no slip*. *No slip* merupakan suatu batasan kondisi dimana kebalikan dari *free slip*, dimana kecepatan fluida pada daerah dekat kapal selam mini akan mengalami perlambatan. Perlambatan tersebut dikarenakan adanya efek gesekan / kekasaran kulit daripada model kapal selam mini tersebut.

Velocity

Pada tahap ini menentukan kecepatan pada proses *running*. Dalam simulasi yang dilakukan penentuan kecepatan sesuai arah aliran dari *inlet* ke *outlet*.

Monitors

Tampilan grafik dari proses berjalannya simulasi *fluent* untuk *drag*. Kita dapat memantau perkembangan grafik hingga mencapai tahap *konvergen*.



Gambar 14.14 Proses grafik C_d

Run calculation

Setelah semua parameter masukan ditentukan maka langkah selanjutnya adalah proses running. Namun sebelum proses running dimulai terlebih dahulu memasukkan angka iterasi yang di inginkan, dalam tahap ini ditentukan maksimal 1000 iterasi.

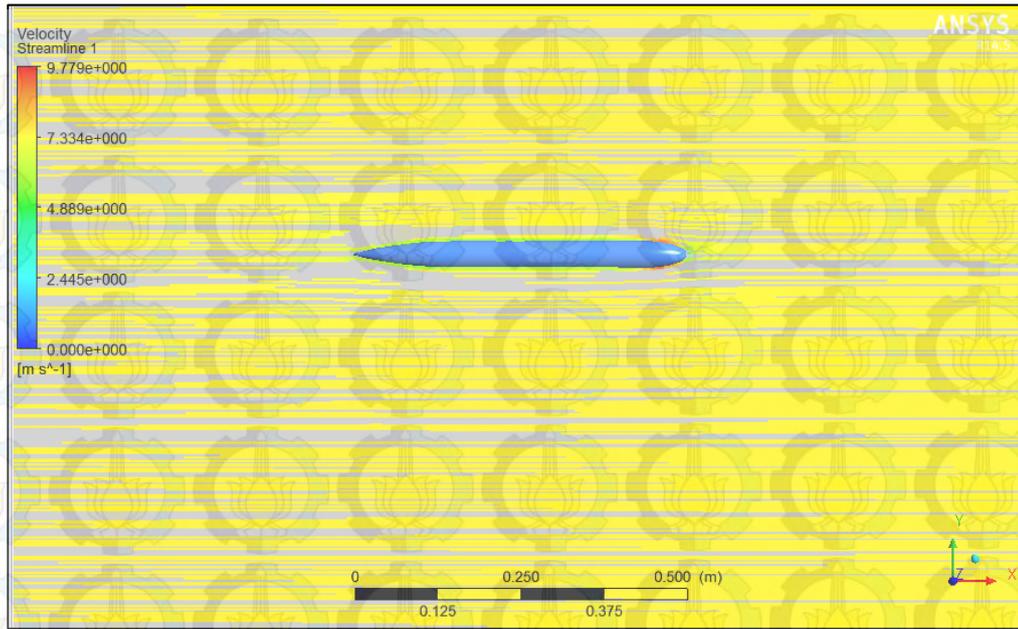
5.3.2 Tahap Processor (Solver)

Tahap *solver* merupakan tahap dimana telah dilakukannya tahap *preprocessor*. Secara umum metode numerik pada tahap ini terdiri dari beberapa langkah, yaitu:

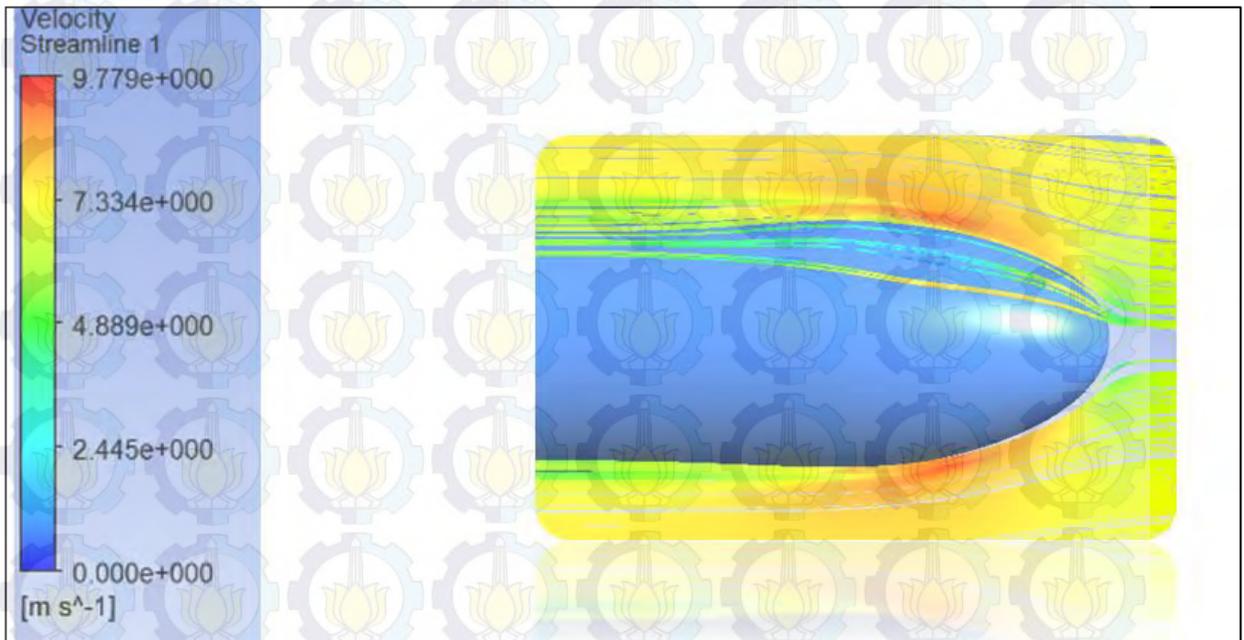
1. Perkiraan variabel yang tidak diketahui dengan menggunakan fungsi sederhana
2. Diskretisasi dengan substitusi perkiraan – perkiraan tersebut dengan persamaan aliran yang berlaku dan berbagai manipulasi matematik
3. Penyelesaian dari persamaan aljabar metode *finite volume* merupakan pengembangan khusus dari formulasi *finite difference*. *Finite volume* merupakan metode yang digunakan pada berbagai *software* komersil seperti PHOENICS, CFX, FLUENT, NUMECA, FLOW 3D, STARCD

5.3.3 Tahap Post – Processor

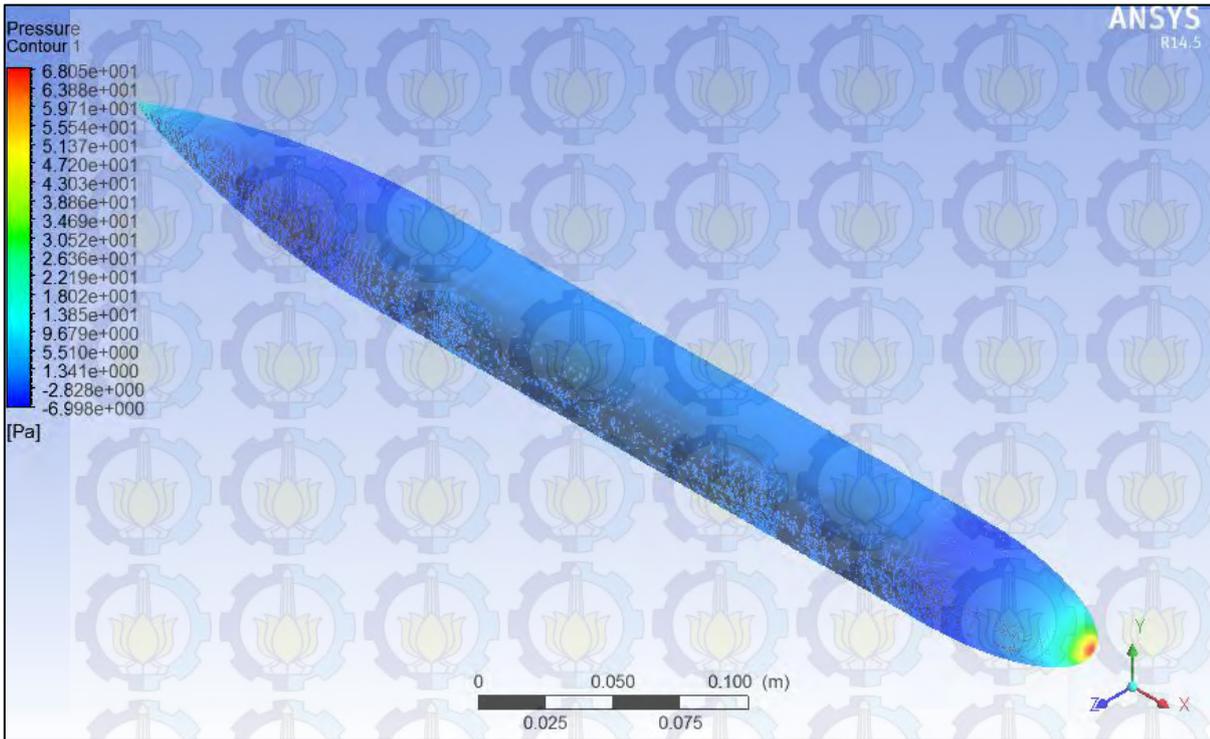
Pada tahap ini akan ditampilkan hasil perhitungan yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya, hasil perhitungan dapat dilihat berupa data numerik dan data visualisasi aliran fluida pada model. Pada tahap ini digunakan untuk menganalisis, visualisasi dan mempresentasikan hasil interaktif sesuai dengan kasus yang sedang ditinjau. Data numerik yang dapat ditampilkan pada tahap ini yaitu data *export* dan *quantitative calculation*. Kemudian data visual model yang bisa ditampilkan pada tahap ini yaitu gambar geometri model, gambar *surface* sifat fluida, animasi aliran fluida, arah aliran fluida, dan dalam bentuk *hardcopy output*.



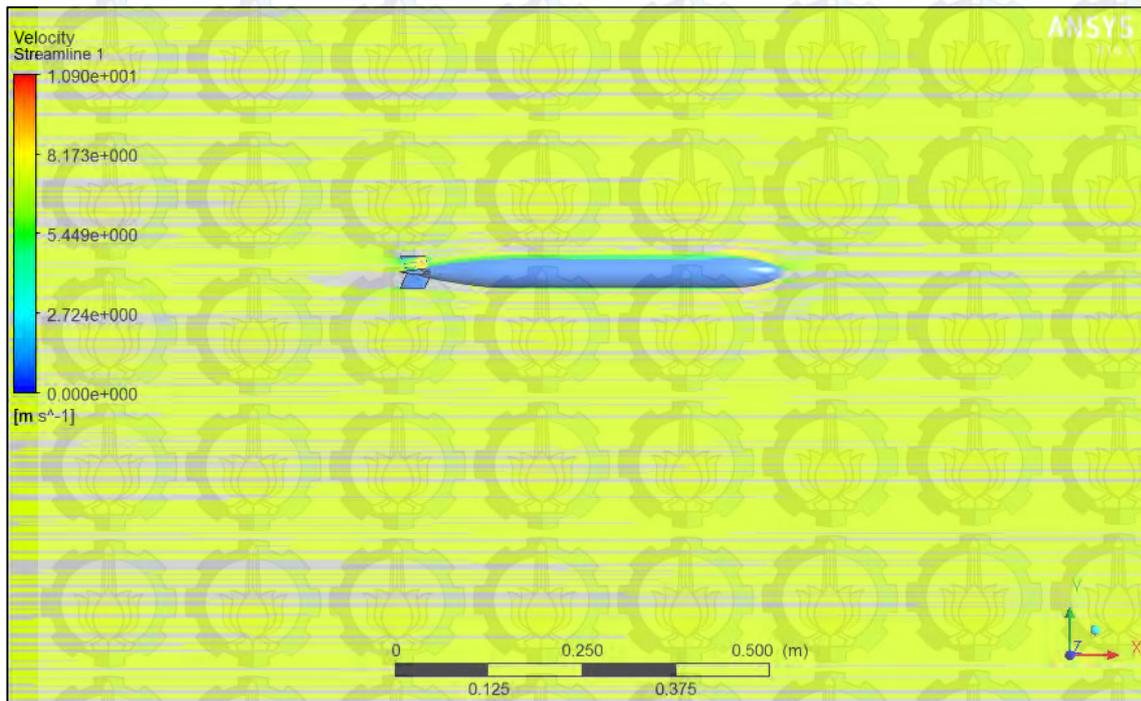
Gambar 14.15 Proses Post-Processor dalam bentuk *streamline barehull*



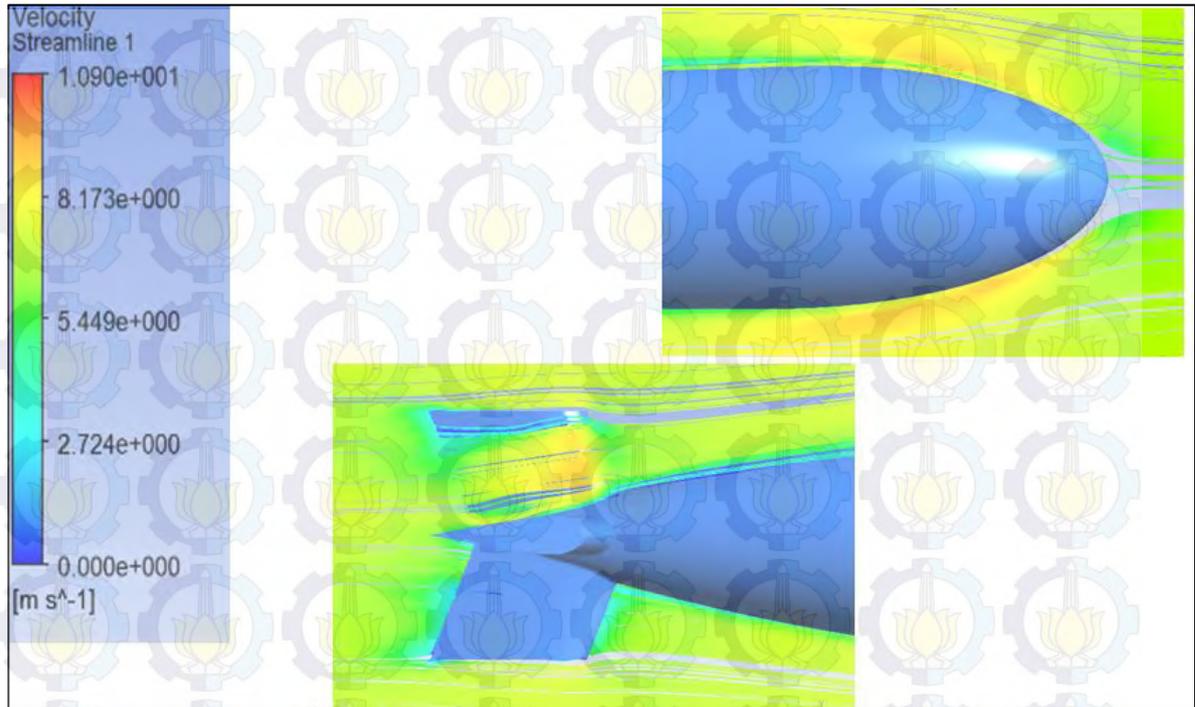
Gambar 14.16 Visualisasi aliran kapal selam *barehull*



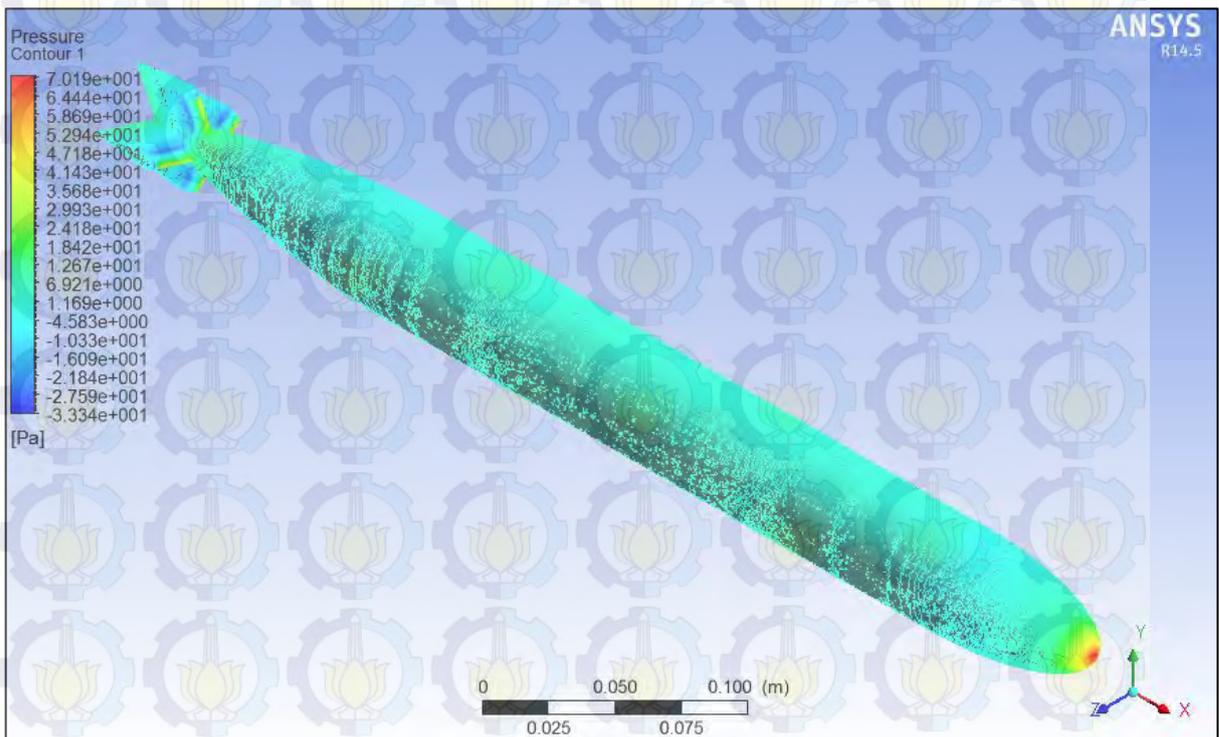
Gambar 14.17 Total pressure kapal selam barehull



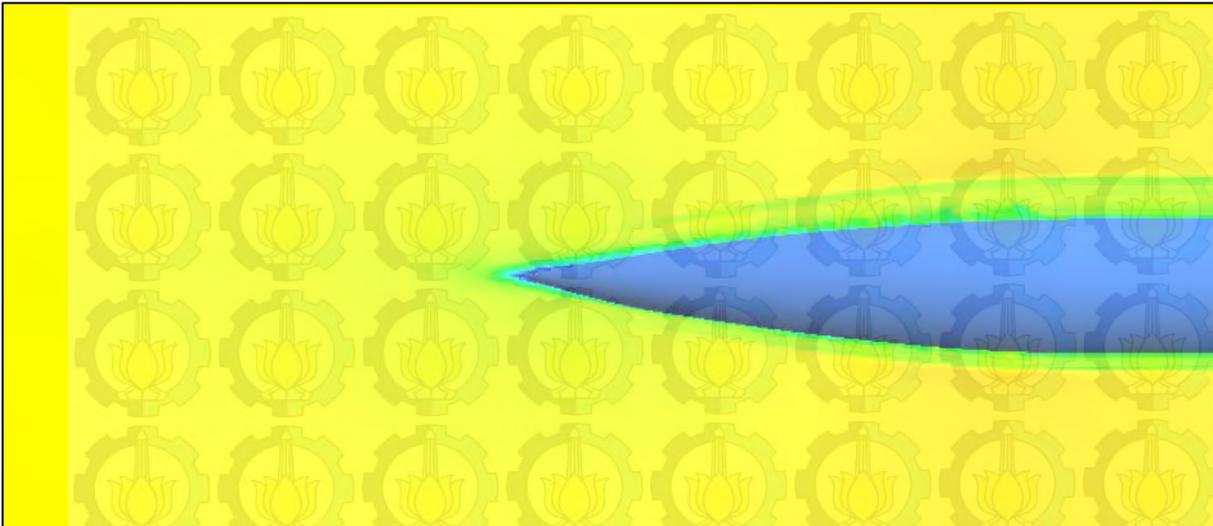
Gambar 14.18 Proses Post-Processor dalam bentuk streamline kapal selam dengan fin



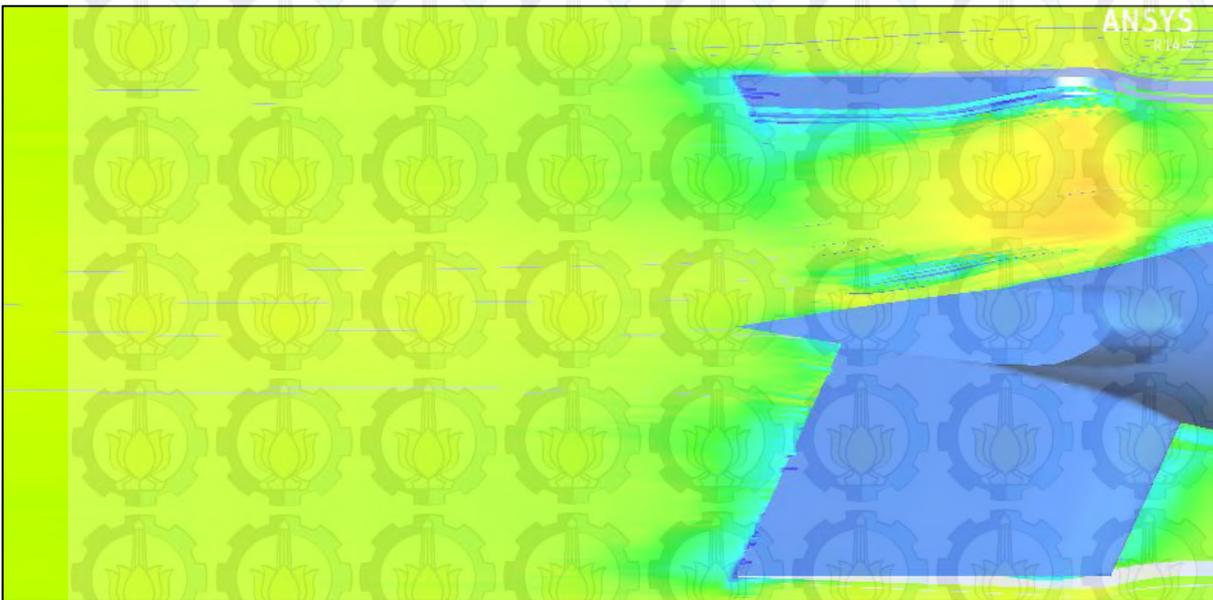
Gambar 14.19 Visualisasi aliran kapal selam *with fin*



Gambar 14.20 Total pressure kapal selam dengan *fin*



Gambar 14.21 Visualisasi aliran bagian buritan kapal selam *barehull*



Gambar 14.22 Visualisasi aliran bagian buritan kapal selam *with fin*

BAB VI ANALISA DATA HASIL EKSPERIMEN DAN SIMULASI

6.1 Data Eksperimen Wind Tunnel

Hasil data eksperimen pada wind tunnel akan dijelaskan sebagai berikut.

6.1.1 Dimensi Kapal Selam Mini

Dimensi kapal selam mini mempunyai skala 1:12 dari ukuran sebenarnya. Dari proses ini maka didapatkan dimensi dari kapal selam mini yaitu :

Panjang	= 500 mm
Lebar	= 44 mm
Tinggi	= 44 mm
Bahan	= Paralon (PVC)

6.1.2 Perhitungan Bilangan Reynolds

a. Viskositas Udara

Untuk perhitungan viskositas udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu :

Dimana untuk udara :

$$b = 1.458 \times 10^{-6}$$

$$S = 110.4$$

$$T = \text{temperature}$$

Dari nilai-nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan diatas sehingga didapatkan :

b. Bilangan Reynolds (Re)

Perhitungan bilangan reynolds didasarkan pada panjang kapal selam mini, kemudian bilangan reynolds dapat diselesaikan dengan persamaan berikut:

Dimana :

$$\rho = \text{Massa Jenis Fluida} = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \text{Viskositas Udara} = 1.865 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}^2$$

L = Panjang kapal

V = Kecepatan *freestream*

6.1.3 Pengukuran Drag Force dan Lift Force

Drag Force dan *Lift Force* diukur dengan timbangan gaya yang terdapat pada *wind tunnel*. Pengukuran dilakukan dengan pengambilan 3 kali pengujian pada 5 variasi kecepatan, dan variasi barehull serta *fin* dari model pengujian. Kemudian dari 3 kali pengujian diambil rata – rata dari pengambilan data tersebut. Rekapitulasi dari nilai rata – rata dalam pengujian dimasukkan pada Tabel. Dari data pengujian maka dapat ditentukan pula koefisien total dari hambatan pada kapal selam mini sebagai berikut :

$$\frac{1}{2}$$

Dimana,

$$\rho = \text{Massa jenis fluida} = 1.18 \text{ kg/m}^3$$

V = Kecepatan *freetream* udara

A = Luas penampang kapal selam mini

a. Variasi Barehull



Gambar 6.1 Variasi kapal selam *barehull*

Tabel 6.1 *Drag force, lift force, drag coefficient dan lift coefficient variasi barehull sudut 0°*

NO	Kecepatan (m/s)	R_D (N)	C_D
1	4.455	0.026	0.0364
2	5.198	0.035	0.0360
3	5.94	0.046	0.0362
4	6.683	0.058	0.0361
5	7.425	0.069	0.0348

b. Variasi dengan *fin*



Gambar 6.2 Variasi kapal selam dengan *fin*

Tabel 6.2 *Drag force*, *lift force*, *drag coefficient* dan *lift coefficient* variasi dengan *fin* sudut 0°

NO	Kecepatan (m/s)	R_D (N)	C_D
1	4.455	0.030	0.037
2	5.198	0.042	0.038
3	5.94	0.050	0.035
4	6.683	0.063	0.035
5	7.425	0.080	0.036

6.2 Data Hasil Computational Fluid Dynamic

Ukuran dari kapal selam mini yang akan dimodelkan pada ANSYS CFD adalah sebagai berikut.

Panjang	= 500 mm
Lebar	= 44 mm
Tinggi	= 44 mm
Bahan	= Paralon (PVC)

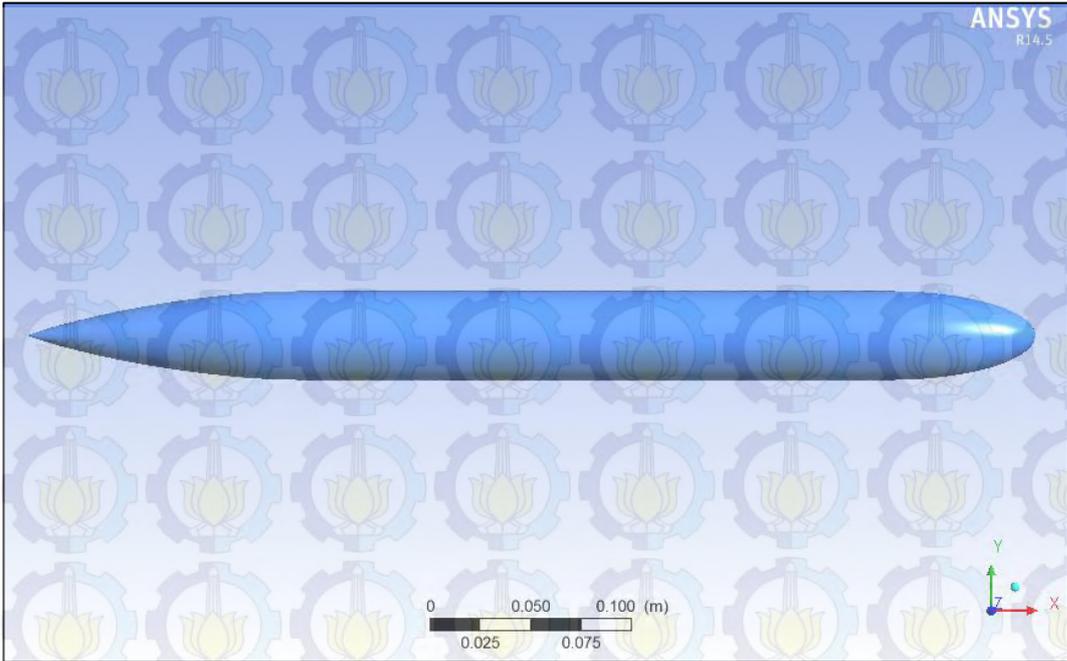
6.2.1 Grid Independence

Grid Independence merupakan langkah awal dalam simulasi *computational fluid dynamics* untuk mendapatkan jumlah elemen dari kapal selam mini yang efektif agar data yang dihasilkan memiliki keakuratan yang baik dan jumlah elemen yang efisien. Dalam hal ini sangat penting ketika proses *running* dari *software* ANSYS FLUENT, karena dengan banyaknya jumlah elemen maka akan memakan waktu yang lebih lama dan membutuhkan kapasitas *memory* (RAM) dan *drive storage* yang lebih banyak.

Meshing merupakan kumpulan dari ribuan bahkan jutaan elemen yang bergabung membentuk suatu bentuk tertentu. Dalam hal ini banyaknya elemen pada proses *meshing* sangat mempengaruhi tingkat ketelitian dalam model tersebut. Ukuran *grid* yang banyak akan mempengaruhi tingkat kehalusan dari model yang akan disimulasikan. Namun dalam hal ini jumlah dari *grid* harus dipertimbangkan pada proses pengoperasian. Dengan *grid* yang kecil maka akan memperbanyak elemen yang terbentuk namun mempunyai kelemahan pada proses *meshing*. Proses *meshing* akan membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan jumlah elemen yang lebih sedikit. Namun ketika jumlah elemen sedikit menyebabkan *grid* yang terbentuk akan lebih besar dan mengurangi tingkat keakuratan dari hasil yang akan didapat dari proses *meshing*. Pemilihan jumlah *grid* yang dipakai pada pemodelan kapal selam mini memakai ANSYS ICEM CFD, ditentukan berdasarkan percobaan pemodelan dengan berbagai macam model yang divariasikan. Jumlah *grid* yang optimum merupakan jumlah *grid* yang digunakan tidak berpengaruh terdapat besar kecilnya hasil yang didapatkan.

6.2.2 Hasil Drag Force dan Lift Force pada Simulasi CFD

Data hasil percobaan dengan CFD hanya dilakukan pada sudut 0° sebagai bahan validasi dari hasil percobaan dengan *wind tunnel*. Berdasarkan simulasi CFD maka didapatkan hasil sebagai berikut:



Gambar 6.3 Model Simulasi *Barehull*

Tabel 6.3 *Drag force, lift force, drag coefficient dan lift coefficient variasi barehull sudut 0⁰*

NO	Kecepatan (m/s)	R_D (N)	C_D
1	4.455	0.026	0.0365
2	5.198	0.031	0.0319
3	5.940	0.037	0.0291
4	6.683	0.040	0.0249
5	7.425	0.045	0.0227



Gambar 6.4 Model Simulasi dengan *Fin*

Tabel 6.4 *Drag force, lift force, drag coefficient* dan *lift coefficient* variasi *fin* sudut 0°

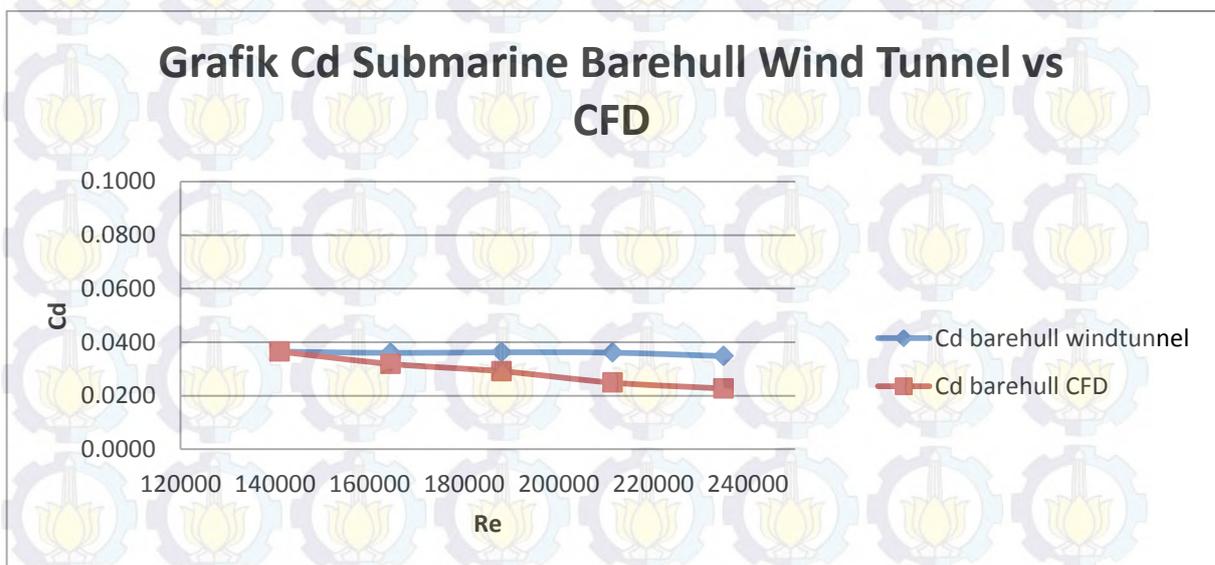
NO	Kecepatan (m/s)	R_D (N)	C_D
1	4.455	0.027	0.0335
2	5.198	0.033	0.0300
3	5.940	0.039	0.0272
4	6.683	0.046	0.0253
5	7.425	0.052	0.0232

6.3 Perbandingan Data Wind Tunnel dengan Simulasi CFD

Pada proses perbandingan antara data hasil pengujian kapal selam mini dengan simulasi *computational fluid dynamics* dengan perangkat lunak ANSYS FLUENT dapat dilihat pada tabel 6.5 dan 6.6.

Tabel 6.5 Perbandingan C_D variasi *barehull* pada simulasi CFD dan *wind tunnel*

NO	Kecepatan (m/s)	Re	C_D Wind Tunnel	C_D CFD	Selisih (%)
1	4.455	140941	0.0364	0.0365	0.27
2	5.198	164431	0.0360	0.0319	11.39
3	5.940	187921	0.0362	0.0291	19.61
4	6.683	211412	0.0361	0.0249	31.02
5	7.425	234902	0.0348	0.0227	34.77

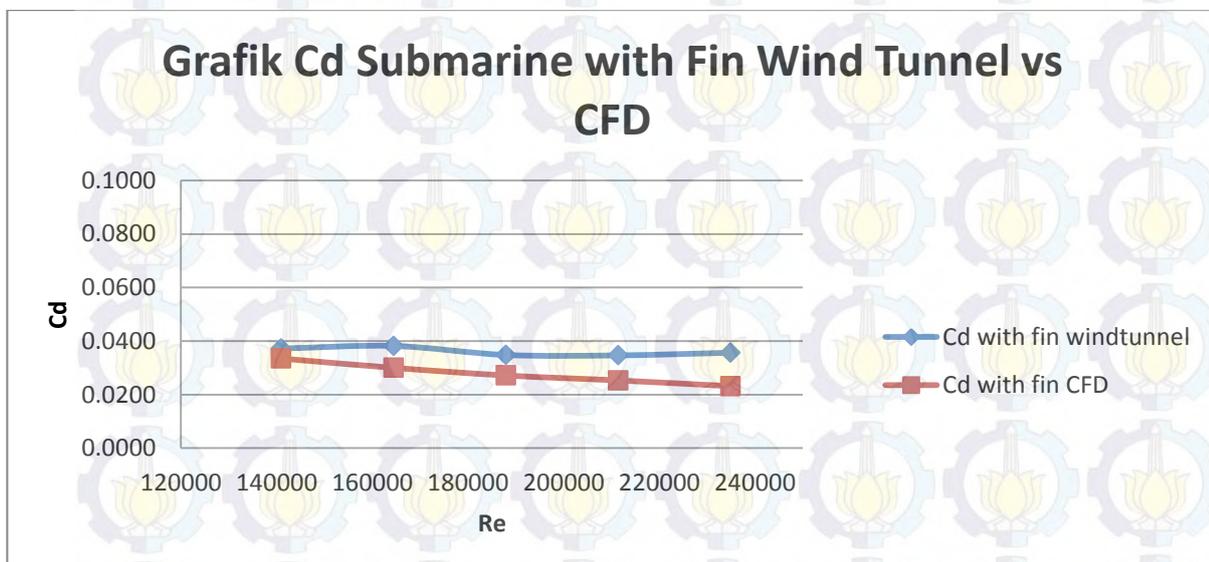


Gambar 6.5 Grafik C_d Kapal Selam Mini *barehull* wind tunnel vs CFD

Berdasarkan pada tabel 6.5 dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan hasil antara pengujian *wind tunnel* dengan simulasi CFD untuk variasi barehull. Pada kecepatan 4.455 m/s terdapat perbedaan sebesar 0.27%. Pada kecepatan 5.198 m/s perbedaannya mencapai 11.39%. Sedangkan pada kecepatan 5.940 m/s perbedaannya mencapai 19.61 %. Untuk kecepatan 6.683 m/s perbedaannya mencapai 31.02 %. Kemudian pada kecepatan 7.425 m/s perbedaan hasilnya mencapai hingga 34.77%.

Tabel 6.6 Perbandingan C_D variasi dengan *fin* pada simulasi CFD dan *wind tunnel*

NO	Kecepatan (m/s)	Re	C_D Wind Tunnel	C_D CFD	Selisih (%)
1	4.455	140941	0.0372	0.0335	9.94
2	5.198	164431	0.0382	0.0300	21.46
3	5.940	187921	0.0348	0.0272	21.84
4	6.683	211412	0.0346	0.0253	26.87
5	7.425	234902	0.0356	0.0232	34.83



Gambar 6.6 Grafik C_d Kapal Selam Mini dengan fin wind tunnel vs CFD

Berdasarkan pada tabel 6.6 dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan hasil antara pengujian *wind tunnel* dengan simulasi CFD untuk variasi dengan Fin. Pada kecepatan 4.455 m/s terdapat perbedaan sebesar 9.94%. Pada kecepatan 5.198 m/s perbedaannya mencapai 21.46%. Sedangkan pada kecepatan 5.940 m/s perbedaannya mencapai 21.84 %. Untuk

kecepatan 6.683 m/s perbedaannya mencapai 26.87%. Kemudian pada kecepatan 7.425 m/s perbedaan hasilnya mencapai hingga 34.83%.

6.4 Analisa Hambatan Kapal Selam Mini Ukuran 6 m

Dari hasil pengujian *wind tunnel* dan simulasi CFD berupa nilai C_d (*drag coefficient*) dapat digunakan untuk mencari hambatan kapal selam mini ukuran 6m dengan rumus sebagai berikut

$$R_T = C_d \frac{1}{2} \rho V^2 A$$

Dimana,

C_d = *drag coefficient*

ρ = Massa jenis fluida

V = Kecepatan *freestream* udara

A = Luas penampang kapal selam 6 m

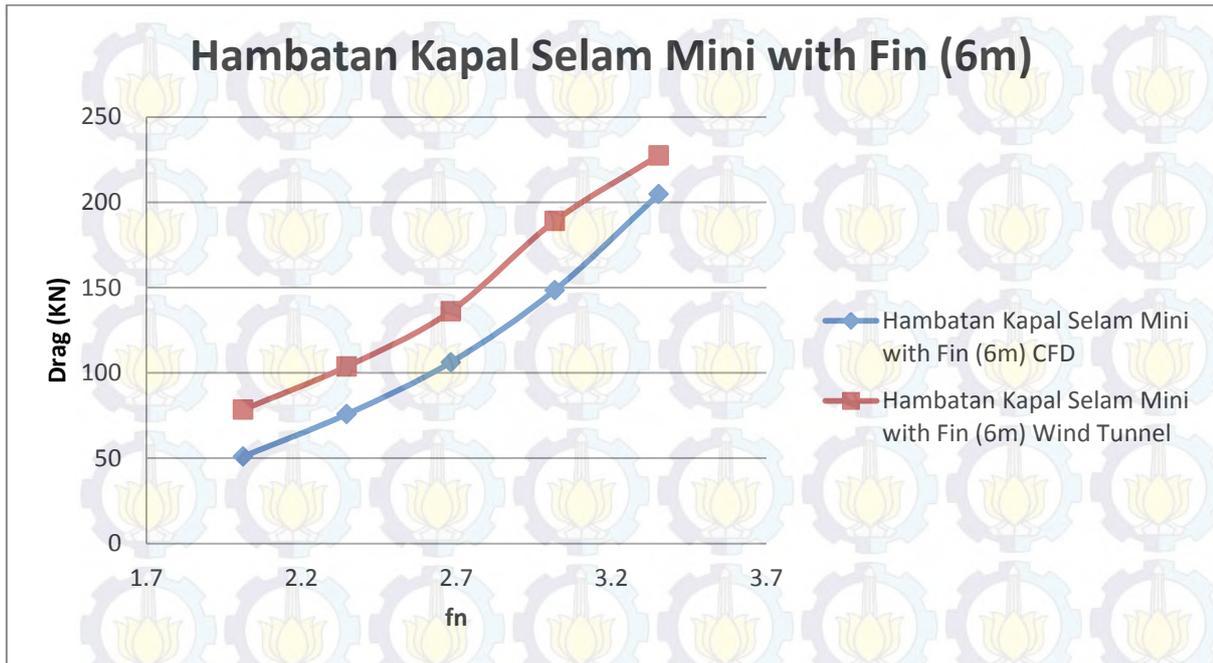
1. Kapal selam mini *with fin*

Tabel 6.7 *Speed, drag (CFD), drag (wind tunnel), C_D (CFD) dan C_D (wind tunnel) variasi with fin*

No.	speed (m/s)	Drag (CFD) (N)	Drag (Wind Tunnel) (N)	Cd (CFD)	Cd (wind tunnel)
1	4.450	0.027	0.030	0.0335	0.0372
2	5.198	0.033	0.042	0.0300	0.0382
3	5.940	0.039	0.050	0.0272	0.0348
4	6.683	0.046	0.063	0.0253	0.0346
5	7.425	0.052	0.080	0.0232	0.0356

Tabel 6.8 Hambatan kapal selam mini ukuran 6 m variasi *with fin*

No.	speed (m/s)	Drag (CFD) (kN)	Drag (Wind Tunnel) (kN)	fn
1	25.722	204.661	227.402	3.3526
2	23.149	148.497	188.996	3.0174
3	20.577	106.185	136.135	2.6821
4	18.005	75.753	103.749	2.346
5	15.433	50.968	78.414	2.0116



Gambar 6.7 Hambatan Kapal Selam Mini dengan *fin* (6m)

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan nilai hambatan antara pengujian dengan menggunakan *wind tunnel* dan simulasi pada CFD (*computational fluid dynamic*) dengan ANSYS FLUENT. Pada kecepatan tertinggi yaitu 25.722 m/s terdapat perbedaan hambatan sebesar 10% dan pada kecepatan terendah yaitu 15.433 m/s terdapat perbedaan hambatan sebesar 31%.

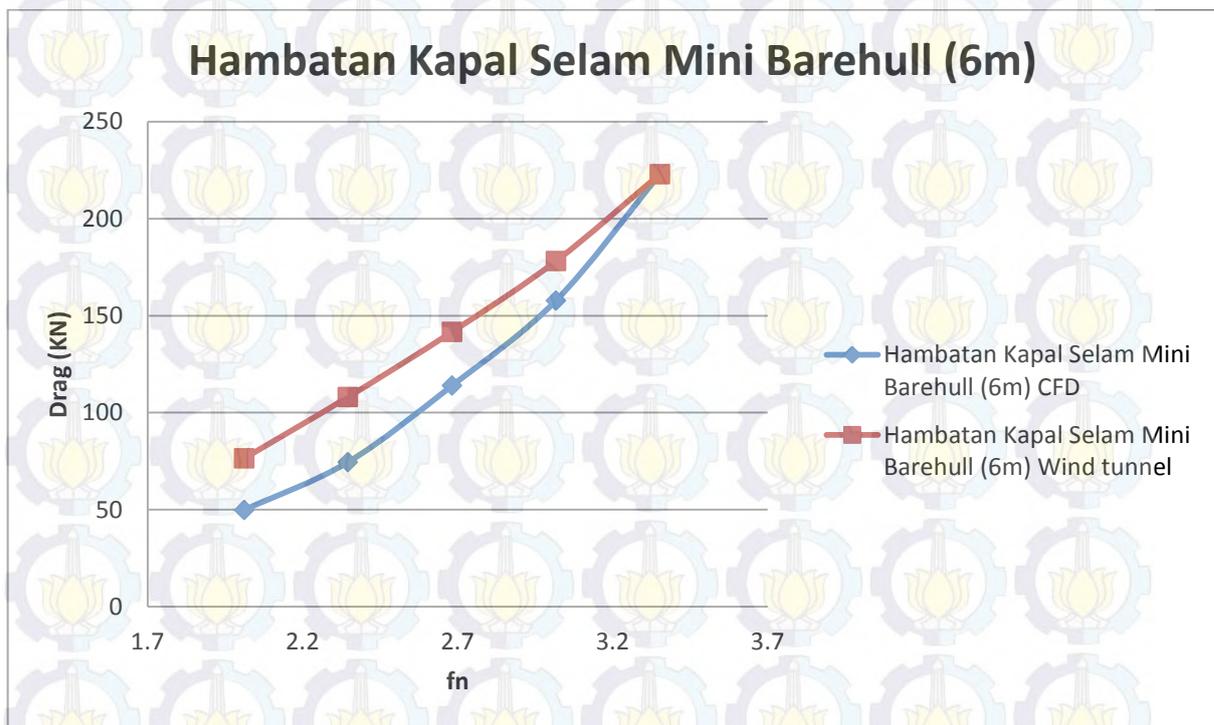
2. Kapal selam mini dengan *barehull*

Tabel 6.9 *Speed, drag (CFD), drag (wind tunnel), C_D (CFD) dan C_D (wind tunnel) variasi barehull*

No.	speed (m/s)	Drag (CFD) (N)	Drag (Wind Tunnel) (N)	C _D (CFD)	C _D (wind tunnel)
1	4.450	0.026	0.026	0.0365	0.0365
2	5.198	0.031	0.035	0.0319	0.0360
3	5.940	0.037	0.046	0.0291	0.0362
4	6.683	0.04	0.058	0.0249	0.0361
5	7.425	0.045	0.069	0.0227	0.0348

Tabel 6.10 Hambatan kapal selam mini ukuran 6 m variasi *barehull*

No.	speed (m/s)	Drag (CFD) (kN)	Drag (Wind Tunnel) (kN)	fn
1	25.722	222.928	222.928	3.3526
2	23.149	157.792	178.152	3.0174
3	20.577	113.951	141.670	2.6821
4	18.005	74.511	108.042	2.346
5	15.433	49.892	76.502	2.0116



Gambar 6.8 Hambatan Kapal Selam Mini *barehull*

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan nilai hambatan antara pengujian dengan menggunakan *wind tunnel* dan simulasi pada CFD (*computational fluid dynamic*) dengan ANSYS FLUENT. Pada kecepatan tertinggi yaitu 25.722 m/s terdapat perbedaan hambatan sebesar 0.001% dan pada kecepatan terendah yaitu 15.433 m/s terdapat perbedaan hambatan sebesar 32%.

6.5 Evaluasi Hasil Pengujian pada *Wind Tunnel* dan Simulasi CFD

Kapal selam I = kapal selam mini *barehull*

Kapal selam II= kapal selam mini dengan *fin*

Tabel 6.11 Evaluasi hasil hambatan kapal selam mini *full scale*

No.	Variasi	MAPE (<i>Mean Absolut Percentage Error</i>)
1.	Kapal selam I	5.207 %
2.	Kapal selam II	5.611 %

Dari tabel 6.11 dapat dilihat bahwa nilai persentase tingkat kesalahan data antara pengujian *wind tunnel* dengan simulasi CFD pada variasi I sebesar 5.207% yang mana termasuk pada kriteria sangat bagus. Kemudian pada variasi II sebesar 5.611% yang mana termasuk pada kriteria sangat bagus.

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, meliputi permodelan fisik pada pengujian *wind tunnel*, permodelan numerik pada simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) serta perbandingan keduanya. Dapat diambil sejumlah kesimpulan dari pelaksanaan tugas akhir ini.

1. Harga hambatan kapal selam mini dengan *fin* ukuran 6 m (*full Scale*) menggunakan *wind tunnel* pada kecepatan terendah 15.433 (m/s) adalah 78.414 KN sedangkan pada kecepatan tertinggi 25.722 (m/s) adalah 227.402 KN.
2. Harga hambatan kapal selam mini *barehull* ukuran 6 m (*full scale*) menggunakan *wind tunnel* pada kecepatan terendah 15.433 (m/s) adalah 76.502 KN sedangkan pada kecepatan tertinggi 25.722 (m/s) adalah 222.928 KN.
3. Penambahan *fin* berpengaruh terhadap harga C_d sebesar 3.703% pada pengujian *wind tunnel*
4. Penambahan *fin* pada pengujian *wind tunnel* berpengaruh terhadap hambatan kapal selam mini tersebut seharga 2.44% pada kecepatan terendah dan 1.97% pada kecepatan tertinggi.
5. Persentasi tingkat kesalahan (MAPE) pada pengujian *wind tunnel* dengan simulasi CFD pada variasi I sebesar 5.207% dan variasi II sebesar 5.611%.

7.2 Saran

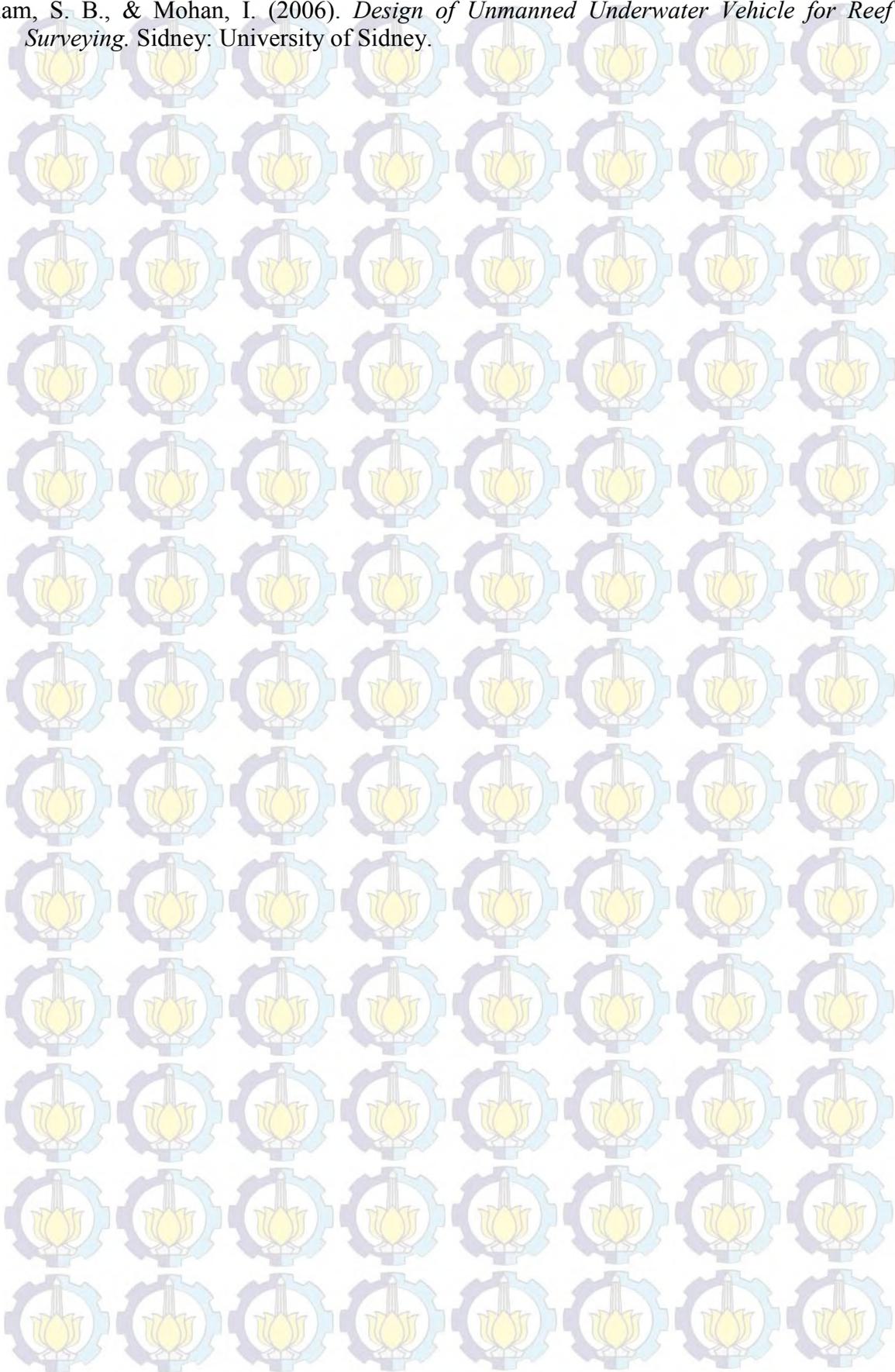
Saran yang dapat diberikan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pada pengambilan data di *wind tunnel* perlu dilakukan pengambilan data yang lebih banyak demi keakuratan data yang lebih baik melihat segi usia dan keterbatasan alat yang ada.
2. Pengawasan terhadap factor kelembapan dan suhu udara mempengaruhi tingkat keakuratan pengambilan data.
3. Pada simulasi menggunakan CFD perlu dilakukan penambahan *independence meshing* untuk tiap variasi model uji.

DAFTAR PUSTAKA

- Allmendinger, E. E. (1990). *Submersible Vehicles Systems Design*. Jersey: SNAME.
- Burcher, R. and Rydill L (1994) "Concepts in Submarine Design". Ocean Technology Series 2, Cambridge University Press, New York.
- Geurts, C. P. W. (2005) "The use of Wind Tunnel Experiments for Wind Loads on Structures". Delft, Netherlands.
- Joubert, P. N. (2004) "Some Aspect of Submarine Design". Part I. Hydrodynamics, Department of Defence Science and Technology Organisation, Australia.
- Libii, J. N. (2011) "Wind Tunnel and Experimental Fluid Dynamics Research". USA: Indiana University.
- Liu Z. H., Xiong Y., Wang Z. Z., Wang S., (2010) "Numerical Simulation and Experimental Study of The New Method of Horseshoe Vortex Control" *Journal of Hydrodynamics*, 22 (4), 572-581, Elsevier.
- Majid, Zainun, & Wheelwright, S. C. (2003). *Metode dan Aplikasi Peramalan*. Jakarta: Binarupa Aksara.
- Pereira, J. D. (2011). *Wind Tunnels Aerodynamics Models and Experiments*. NewYork: Nova Science Publishers.
- Sudrajat, (2003), "Perubahan Wajah Ancaman dan Keamanan Domestik Indonesia" Seminar dan Lokakarya Pembangunan Hukum Nasional VIII, Departemen Hukum dan Hak Asasi Manusia, Denpasar.
- Sulisetyono, A. (2009). Dynamics Stability Prediction of the Mini-Submarine in Underwater Mission. *Seminar Nasional Pascasarjana IX*. Surabaya: ITS.
- Sulisetyono, A., & Purnomo, D. (2009). The Mini-Submarine Design for Monitoring of the Pollutant and Sewage Discharge in Coastal Area. *5th International Conference on Asian and Pacific Coasts*. Singapore: NTU.
- Utama, K.A., Hantoro, R., & Sutiyo. (2013). *Computational Fluid Dynamic*. Surabaya: ITS Surabaya.
- Wulandari, B. T. (2005), "Sengketa Wilayah Perbatasan Perairan Ambalat-Karang Unarang Pasca Kasus Sipadan dan Ligitan" *Jurnal Ilmiah Hukum*, Fakultas Hukum Universitas Muhammadiyah Malang.
- Versteeg, H. K. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. London: Pearson Education.

William, S. B., & Mohan, I. (2006). *Design of Unmanned Underwater Vehicle for Reef Surveying*. Sidney: University of Sidney.





Gambar 1 Indikator lift force pada proses pengujian



Gambar 2 Indikator drag force pada proses pengujian



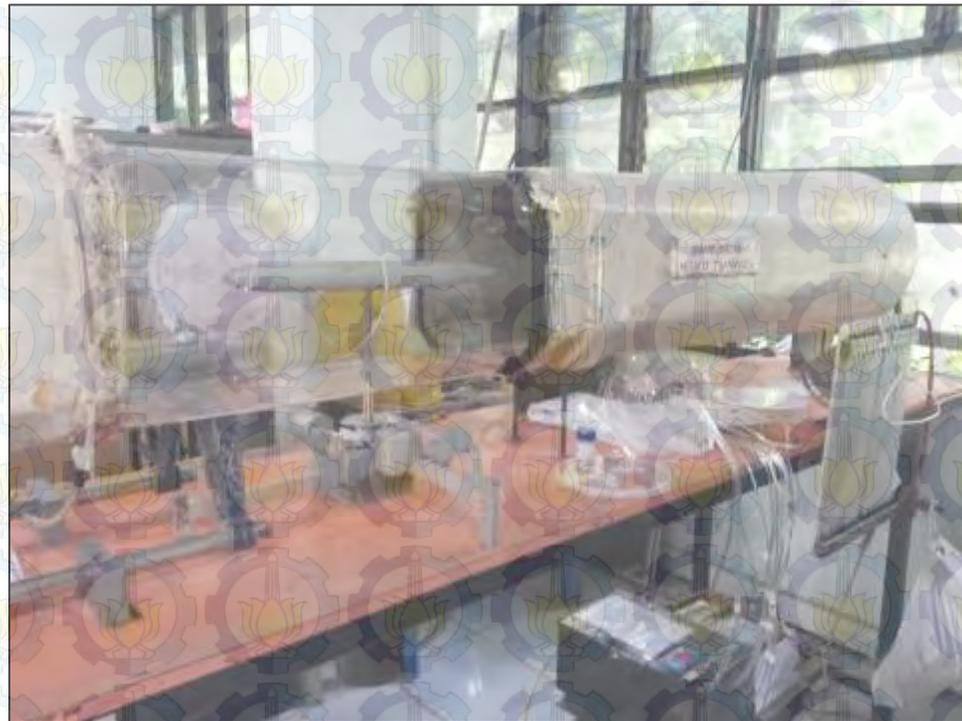
Gambar 3 Indikator pengatur sudut pengujian



Gambar 4 Force balancing indicator untuk besarnya gaya drag dan lift



Gambar 5 Proses setup sebelum dilakukan pengujian



Gambar 6 Model kapal selam mini barehull didalam test section



Gambar 7 Model kapal selam mini dengan fin



Gambar 8 Proses pemasangan model kapal selam mini dengan fin



Gambar 9 Model kapal selam mini dengan fin didalm test section



Gambar 10 Proses pengambilan visualisasi bentuk aliran saat pengujian



Gambar 11 Subsonic wind tunnel jurusan teknik mesin ITS

BIODATA PENULIS



Rinaldi Eka Wardana, itulah nama lengkap penulis yang telah berhasil merampungkan penelitian tugas akhir yang berjudul “Analisis Hambatan Kapal Selam Mini Menggunakan Pengujian pada *Wind Tunnel* yang Tervalidasi dengan *Computational Fluid Dynamics*”. Penulis dilahirkan di Surabaya pada 12 Januari 1992 silam. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal sejak tingkat dasar pada TK Dharmawanita Magersari 1996-1998. Penulis melanjutkan ke SDN Pucang II Sidoarjo 1998-2004.

Lalu melanjutkan studi pada SMPN 1 Sidoarjo 2004-2007. Kemudian lanjut lagi pada SMAN 1 Sidoarjo 2007-2010. Setelah dinyatakan lulus setelah mengenyam pendidikan SMA penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2010 melalui jalur SNMPTN undangan dimana dahulu bisa disebutkan jalur tanpa tes yang hanya menggunakan nilai rapor pada saat SMA.

Di Jurusan Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal. Selama masa studi di ITS, selain mengikuti kegiatan perkuliahan penulis juga menjadi anggota aktif Himatekpal (Himpunan Mahasiswa Teknik Perkapalan 2011-2012). Penulis juga pernah menjabat Duta Anti Narkoba untuk wilayah daerah Kabupaten Sidoarjo yang aktif memberikan penyuluhan dan bersosialisasi dengan masyarakat sekitar untuk memberantas narkoba 2009-2010. Penulis juga tercatat sebagai mahasiswa aktif program Pasca Sarjana ITS Jurusan Teknologi Produksi dan Material Kelautan FTK sejak 2013-sekarang melalui program *fast track*.

Email: rinaldi10@mhs.na.its.ac.id / rinaldiekawardana@gmail.com