

22485/H/05



BILIK PERPUSTAKAAN
INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH - NOPEMBER

TUGAS AKHIR (KP 1701)

ANALISA TAHANAN ELIPSOID 3D SEBAGAI REPRESENTASI KAPAL-KAPAL MONOHULL



RSPe
623.848
Sis
9-1
2004

Oleh:

SISWANTO
NRP : 4199 100 512

PERPUSTAKAAN I T S	
Tgl. Terima	1-12-2007
Terima Dari	HJ
No. Agenda Prp.	221230

JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2004

**TUGAS AKHIR
(KP 1701)**

**ANALISA TAHANAN ELIPSOID 3D SEBAGAI
REPRESENTASI KAPAL-KAPAL MONOHULL**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Teknik Perkapalan
Pada

Bidang Studi Hidrodinamika
Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

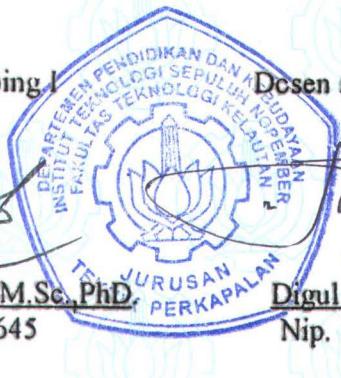
Surabaya, juli 2004
Mengetahui / Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. I.K.A. Pria Utama, M.Sc., PhD.
Nip. 132 007 645

Digul Siswanto, M.Sc.
Nip. 130 355 299



**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2004**

LEMBAR PENGESAHAN :

JUDUL TUGAS AKHIR :

ANALISA TAHANAN ELIPSOID 3D SEBAGAI REPRESENTASI KAPAL-KAPAL MONOHULL

Dikerjakan oleh :

S I S W A N T O
NRP. 4197 100 008

“Telah direvisi sesuai dengan sidang Tugas Akhir 4 Agustus 2004 dalam daftar revisi”

Surabaya, Agustus 2004

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. I.K.A Pria Utama, MSc, PhD
NIP. 132 007 645

Digul Siswanto, MSc
NIP. 130 355 299



ABSTRAK

Penyelidikan tentang tahanan elipsoid 3D sebagai representasi kapal-kapal monohull dikerjakan dengan menggunakan konsep computational fluid dinamics (CFD).

Aliran fluida yang melewati elipsoid 3D akan menghasilkan tahanan gesek dan tahanan tekan. Tahanan gesek tergantung luas permukaan basah dan tahanan bentuk tergantung bentuk elipsoid yang menghasilkan separasi.

Eksperimen ini mengkaji tahanan pada elipsoid 3D dengan rasio panjang lebar (L/B) 8. Pengujian dilakukan pada Reynold number ($10^2, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7$) dan sudut serang aliran ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$)

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pemberian sudut serang dan perubahan Reynold number mempengaruhi distribusi tekanan dan letak titik separasi sehingga mempengaruhi harga koefisien gesek (CF) dan koefisien tekan (CP). Harga Cf dan Cp pada Re 10^2 - 10^4 turun drastis kemudian harganya relatif stabil sampai Re 10^5 - 10^7 . Pada perubahan sudut serang pada Re 10^4 - 10^6 harga Cp cenderung fluktuatif dan Cf cenderung stabil.

ABSTRACT

Investigation about resistance for 3D ellipsoid form as representation monohull ship will result frictional drag and pressure drag. Frictional drag is depend water surface area and skin friction, Pressure drag is depend form ellipsoid of result wake separation.

This experiment is study discuss resistance form ellipsoid 3D with ratio length of bread (L/B) 8 with variation Reynold number ($10^2, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7$) and variation angle of attack ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$).

Result experiment are angle of attack and Reynold number to give influence pressure distribution and position separation of change, so influence friction coefficient (CF) and pressure coefficient (CP). CF and CP to decrease with reynold number 10^2-10^4 than constant with reynold number 10^5-10^7 . Angle of attack of change with Re 10^4-10^6 graphic CP result fluctuate and CF constant.

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim.

Sesungguhnya segala puji milik Allah. Atas petunjuk dan penerangan-Nya, sehingga tugas akhir ini dengan judul “ANALISA TAHANAN ELIPSOID 3D SEBAGAI REPRESENTATISI KAPAL-KAPAL MONOHULL” dapat terselesaikan pada waktunya.

Sebagai salah satu syarat akhir dalam menyelesaikan studi bagi setiap mahasiswa Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan-ITS dibuatlah suatu penulisan ilmiah yang dinamakan Tugas Akhir.

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis banyak sekali menemui hambatan. Tanpa bantuan dan dorongan dari semua pihak penulis tidak akan bisa menyelesaikan tugas akhir ini. Oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis, atas bantuan dan dukungan moral, material dan doa yang tiada kenal lelah.
2. Bapak Dr. Ir. IKA. Pria Utama, MSc. dan Bapak Digul Siswanto, MSc. Selaku dosen pembimbing yang dengan segala kesabaran dan keikhlasannya memberikan bimbingan, pengarahan, waktu serta bantuannya dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Triwilaswadio, MSc dan Bapak Dr. Ir. Wasis Dwi Aryawan, MSc. Selaku Ketua dan Sekertaris Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS dan Bapak Ir. Mohammad Bakri, selaku dosen wali yang telah banyak memberikan bimbingan selama menempuh studi di Jurusan Teknik Perkapalan-ITS.
4. Arek kapal 'Lintas Jalur '99, atas kebersamaan dalam menjalani hidup di perkapalan, Hidro mania atas masukan dan diskusinya.
5. Seluruh karyawan jurusan teknik perkapalan atas bantuannya selama ini.
6. Semua pihak yang telah membantu tidak dapat penulis sebutkan satu persatu disini, dengan tidak mengurangi rasa hormat.

Berpijak dari keterbatasan dan kelemahan manusia, penulis sadar bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna sehingga kritik dan saran yang membangun selalu penulis harapkan demi penyempurnaan dimasa datang.

Akhir kata semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi para pembaca dan pihak-pihak yang berkepentingan.

Surabaya, Agustus 2004

S I S W A N T O

DAFTAR ISI

Halaman Judul

Halaman Pengesahan

Abstrak	i
Abstract	ii
Kata Pengantar	iii
Daftar isi	v
Daftar Tabel	ix
Daftar Gambar	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	I-1
1.2. Tujuan	I-2
1.3. Manfaat	I-2
1.4. Batasan Masalah	I-2
1.5. Metodologi	I-3
BAB II DASAR TEORI	
2.1. Tahanan Kapal	II-1
2.1.1. Tahanan Gesek	II-3
2.1.1.a. Aliran Laminar dan Turbulen	II-5
2.1.1.b. Lapisan Batas	II-5
2.1.2. Tahanan Bentuk Kapal	II-7
2.2. Computational Fluid Dynamics	II-10
2.2.1. Bagian – bagian CFD Code (CFX)	II-12

2.2.1.a. Pre-Prosesor	II-13
2.2.1.b. Flow Solver	II-14
2.2.1.c. Post Prosesor	II-22
2.3. Proses Validasi	II-24
2.4. Model Matematika dan Alogaritma Solusi pada CFX-Solver 5.41	II-25
2.4.1. Persamaan governing	II-25
2.4.2. Momentum, Energy dan Sumber Variabel Tambahan	II-30
2.4.3. Model Turbulensi	II-32
2.4.4. Permodelan Aliran di Dekat Dinding (Wall)	II-37
2.4.5. Boundary condition	II-38

BAB III METODOLOGI

3.1. Geometri	III-2
3.2. Rencana Percobaan	III-3
3.3. Rencana Percobaan dari Aspek CFD	III-3
3.4. Analisa Hasil	III-14

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1. Validasi	IV-1
4.1.1. Convergence	IV-1
4.1.2. Grid Independence	IV-3
4.1.3. Verifikasi Hasil dengan Teori atau Data lain	IV-6
4.2. Analisa Meshing	IV-6
4.3. Analisa Data	IV-8

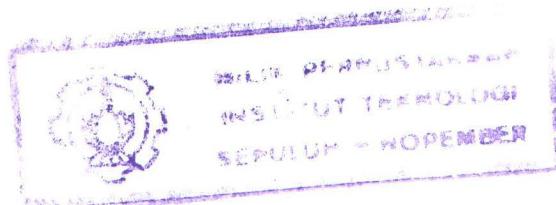
4.4. Analisa Grafis	IV-9
4.4.1. Pembahasan	IV-12
4.4.1.1. Koefisien Gesek vs Reynold Number	IV-12
4.4.1.2. Koefisien Bentuk vs Reynold Number	IV-13
4.4.1.3. Koefisien Drag vs Reynold Number	IV-14
4.4.2. Koreksi Luas Permukaan Elipsoid	IV-15
4.5 Analisa Sifat Fluida di sekitar Elipsoid	IV-16
4.5.1. Density	IV-16
4.5.2. Tekanan (Pressure)	IV-17
4.5.3. Gradien Tekanan	IV-17
4.5.5. Kecepatan (Velocity)	IV-17

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	V-1
5.2. Saran	V-2

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Identifikasi boundary condition pada model elipsoid Pada tunel	III-6
Tabel 4.1.	Data export : Locator, Variabel dan Write Vector	IV-8
4.2.	Nilai CF, CP dan CD pada sudut kemiringan 0°	IV-10
4.3.	Nilai CF, CP dan CD pada sudut kemiringan 5°	IV-10
4.5.	Nilai CF, CP dan CD pada sudut kemiringan 0°	IV-11
4.6.	Nilai CF, CP dan CD pada sudut kemiringan 0°	IV-11

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Kurva koefisien tahanan	II-2
2.2.	Profil aliran diantara pelat yang sejajar	II-3
2.3.	Lapisan batas disepanjang permukaan bidang	II-6
2.4.	Distribusi tekanan yang bekerja pada suatu penampang floating body	II-7
2.5.	Potensial flow dan boundary layer system aliran fluida pada suatu penampang floating body	II-8
2.6.	Separation point/Eddies pada waktu penampang floating Body yang mempunyai bentuk penampang bagian tumpul	II-8
2.7.	Desain kerja CFD	II-12
2.8.	Bagian-bagian CFD Code	II-13
2.9.	Aliran massa pada elemen fluida	II-16
2.10.	Komponen Tegangan arah sumbu x	II-18
2.11.	Arah perhitungan tekanan dan temperatur dari titik 1 ke titik 2	II-28
Gambar 3.1.	Bentuk Geometri Ellipsoid	III-2
3.2.	Cara menentukan boundary condition	III-6
3.3.	Struktur inflated volume mesh	III-10
3.4.	Bentuk empat tipe mesh control	III-11
Gambar 4.1.	Grafik Convergence	IV-2
4.2.	Tabel dan grafik grid independence	IV-3
4.3.	Inflation layer inerstitial	IV-4
4.4.	Inflation gap	IV-4

4.4.a. Jumlah cell yang banyak dengan grid yang rapat	IV-5
4.4.b. Jumlah cell yang sedikit dengan grid yang besar	IV-5
4.5. Meshing elipsoid pada masing-masing surface edge length	IV-7
4.6. Hasil visualisasi presure dengan jumlah cell yang berbeda	IV-7
4.7. Grafik Koefisien Gesek vs Reynold number	IV-13
4.8. Grafik Koefisien Pressure vs Reynold number	IV-14
4.9. Grafik Koefisien Tahanan vs Reynold number	IV-15

BAB I
PENDAHULUAN



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu aspek yang menjadi bahan pertimbangan dalam merancang bentuk badan kapal adalah tahanan kapal. Besarnya tahanan kapal akan menentukan nilai ekonomis suatu kapal, semakin kecil tahanan kapal, semakin tinggi nilai ekonomisnya. Tetapi sebaliknya semakin besar tahanan kapal, semakin rendah nilai ekonomis suatu kapal.

Besarnya tahanan kapal akan mempengaruhi daya mesin penggerak yang diperlukan, kapal yang mempunyai tahanan yang kecil membutuhkan daya mesin penggerak yang kecil pula. Mesin yang berdaya kecil mempunyai kebutuhan bahan bakar yang rendah, sehingga pemakaian bahan bakar menjadi lebih hemat. Hal ini akan menyebabkan biaya operasional kapal menjadi lebih murah dan kebutuhan ruang untuk tangki bahan bakar bisa dikurangi, selain itu mesin yang berdaya rendah besarnya biasanya mempunyai ukuran yang tidak terlalu besar sehingga beratnya relatif ringan dengan demikian kapasitas kapal menjadi lebih besar.

Untuk percobaan dengan *towink tank* dengan experimental membutuhkan biaya yang mahal, pengadaan fasilitas yang cukup besar dan terbatas dan biaya operasionalnya tidak sedikit. Berangkat dari kenyataan diatas maka saat ini sudah mulai dikembangkan suatu metode yang merupakan gabungan dari metode analitis dan experimental. Metode ini dikenal dengan *computational fluid dynamics* (CFD).

1.2. Tujuan

Menyusun suatu perhitungan prediksi tahanan elipsoid 3D sebagai representasi kapal-kapal monohull secara analitis dengan bantuan komputer berkecepatan tinggi. Dari perhitungan ini diharapkan dapat dimanfaatkan untuk :

1. Memprediksi tahanan elipsoid 3D dengan cepat dan tepat sebelum nantinya diprediksi secara experimental dengan menggunakan model.
2. Menganalisa sifat fluida di sekitar body.
3. Mengetahui parameter-parameter yang mempengaruhi besarnya tahanan elipsoid 3D.



1.2. Tujuan

Menyusun suatu perhitungan prediksi tahanan elipsoid 3D sebagai representasi kapal-kapal monohull secara analitis dengan bantuan komputer berkecepatan tinggi. Dari perhitungan ini diharapkan dapat dimanfaatkan untuk :

1. Memprediksi tahanan elipsoid 3D dengan cepat dan tepat sebelum nantinya diprediksi secara experimental dengan menggunakan model.
2. Menganalisa sifat fluida di sekitar body.
3. Mengetahui parameter-parameter yang mempengaruhi besarnya tahanan elipsoid 3D.

1.3. Manfaat

Manfaat yang akan diperoleh dalam penulisan tugas akhir ini :

1. Dengan menggunakan bentuk elipsoid 3D sebagai pendekatan untuk menghitung kapal-kapal monohull yakni kapal selam diharapkan tahanan kapal yang diperoleh dengan metode CFD tidak jauh berbeda dengan perhitungan secara teori.
2. Pada tahap selanjutnya bisa digunakan sebagai dasar pembuatan model-model kapal selam untuk mendapatkan tahanan yang paling kecil.

1.4. Batasan Masalah

Dalam menganalisa tahanan elipsoid 3D sebagai representasi kapal-kapal monohull pada tugas akhir ini dipakai batasan :

1. Analisa tahanan dalam 3 dimensi, kapal dimodelkan elipsoid.



2. Penampang berbentuk elipsoid dengan perbandingan panjang dan lebar (L/D) = 8, yang mewakili perbandingan kapal-kapal monohull.
3. Menggunakan 5 variasi angka Reynold yaitu 10^2 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 . Dan menggunakan 4 macam sudut kemiringan terhadap arah arus fluida, yaitu 0° , 5° , 10° , 15° .
4. Sifat dan aliran fluida, fluida dianggap Newtonian fluids, Steady state, dan incompresible.

1.5. Metodologi

Pengerjaan tugas akhir ini, untuk mencapai tujuan mengetahui tahanan elipsoid 3D sebagai representasi kapal-kapal monohull terutama bentuk kapal selam, dilakukan beberapa langkah pengerjaan. Metodologi penelitian meliputi tahap-tahap *investigasi* (pemahaman/intellegence), tahap desain (perencanaan), dan tahap penelitian yang kemudian diteruskan dengan penulisan laporan.

Deskripsi untuk masing-masing tahap pengerjaan adalah sebagai berikut :

1. Fase Pemahaman (Intellegence)

Tahap *intellegence* disebut juga tahap *investigasi*, merupakan tahap untuk menentukan, mengidentifikasi dan merumuskan masalah serta pengumpulan informasi yang diperlukan.

Pada fase ini terdapat beberapa langkah yang dilakukan yaitu :

➤ Mengidentifikasi dan mengklasifikasi permasalahan yang ada, sehingga dapat dilakukan penelitian awal, untuk mengetahui fenomena bahwa kapal selam akan mengalami tahanan diakibatkan karena bentuk dan pengaruh



kekentalan, dalam menghitung tahanan tersebut menggunakan permodelan elipsoid 3D dan menggunakan perangkat komputer yang berkecepatan tinggi.

➤ Studi Pustaka

Studi kepustakaan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui *tool* apa yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang akan diteliti dan dilakukan eksplorasi terhadap penelitian-penelitian yang telah ada sebelumnya yang dapat dijadikan sebagai referensi bagi penelitian yang akan dilakukan ini. Tinjauan pustaka meliputi konsep dasar tahanan kapal, aliran fluida, cara kerja CFD dan cara penggunaan software CFD dimana dalam pengerjaan Tugas Akhir ini menggunakan CFX.

2. Fase Perancangan (Desain).

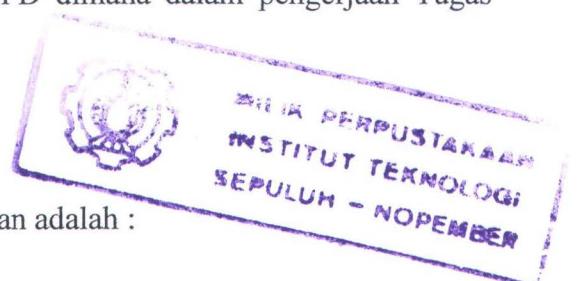
Pada fase langkah-langkah yang dilakukan adalah :

➤ Memformulasikan model.

Memformulasikan model akan mempermudah untuk mencari alternatif pemecahan masalah sesuai dengan informasi yang dikumpulkan tahap sebelumnya. Dalam tahap ini diambil model elipsoid 3D yang mewakili model kapal selam yaitu perbandingan panjang dan lebar $L/B = 8$.

➤ Merealisasikan formulasi model tersebut dalam suatu perangkat lunak (software) yang digunakan untuk menangani permasalahan. Dalam merealisasikan model tersebut ke software CFX dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu :

1. Mendeskripsikan model kedalam CFX.
2. Menentukan tipe aliran dan sifat-sifat fluida dengan spesifikasi sebagai berikut :





Tipe simulasi : *Steady state*

Jenis turbulen : K-epsilon

Jenis Buoyency : non Buoyency

3. Menentukan kecepatan model.

Kecepatan model mempunyai variasi angka Reynold yaitu ; $10^2, 10^4, 10^5, 10^6$, dan 10^7 .

4. Menentukan sudut kemiringan model $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ dan 15° .
5. Menentukan boundary condition dari fluida domain yang berguna untuk mengeset persamaan metode volume hingga, sehingga dapat diselesaikan secara numerik dengan perincian sebagai berikut:
- Inlet merupakan daerah masuknya fluida.
 - Outlet merupakan daerah keluarnya fluida.
 - Geometri model.
 - Permukaan dan dasar yang memiliki sifat slip.
 - Penentuan variabel penyelesaian.
 - Membuat Mesh pada permukaan dan mesh fluida dengan dibuat garis control pada geometri.
 - Menentukan pengendali dan penyelesaian yang dihasilkan dari CFX solver.
 - Menyelesaikan program dengan melakukan running pada CFX solver.
 - Memvisualisasikan hasil running CFX.
 - Mendapatkan data output dari running.
3. Fase Pemilihan (Choice).

Pada fase ini langkah-langkah yang dilakukan adalah :



- a. Mencari penyelesaian dari model yang dibuat.
 - b. Melakukan pemilihan alternatif-alternatif perancangan yang terbaik dari penyelesaian masalah yang dihasilkan pada tahap sebelumnya dengan mempertimbangkan kriteria-kriteria tertentu berdasarkan pada tujuan yang ingin dicapai.
 - c. Melakukan validasi terhadap model rancangan yang telah dibuat. Hal ini untuk mengetahui apakah model tersebut valid dan dapat diterapkan pada sistem nyata.
4. Setelah melalui berbagai fase perancangan diatas maka kemudian akan dapat dilakukan penarikan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan dan proses penyusunan laporan penelitian.

BAB II

DASAR TEORI



BAB II

DASAR TEORI

2.1. Tahanan Kapal

Tahanan (*resistance*) kapal pada suatu kecepatan adalah gaya fluida yang bekerja pada kapal sedemikian rupa sehingga melawan gerakan kapal tersebut. Tahanan tersebut sama dengan komponen gaya fluida yang bekerja sejajar dengan sumbu gerakan kapal.

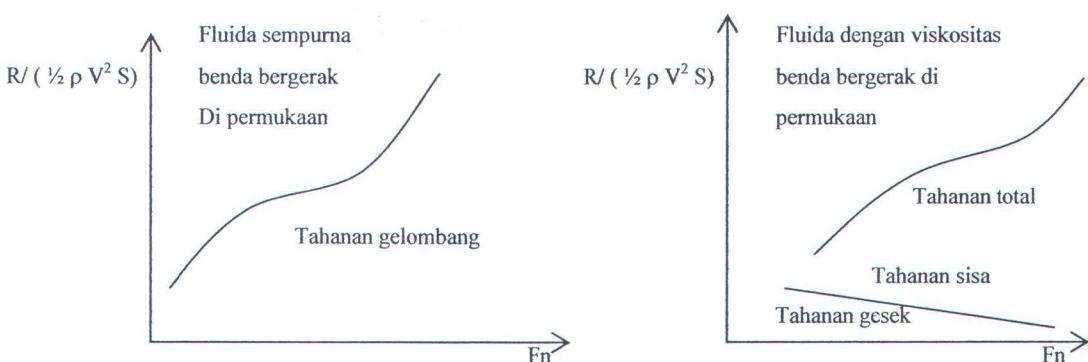
Gambar 2.1. menunjukkan beberapa kurva tahanan untuk benda yang bergerak diperlukaan atau jauh terbenam di dalam fluida yang sempurna dan fluida yang mempunyai viskositas. Koordinat horizontalnya adalah angka froude.

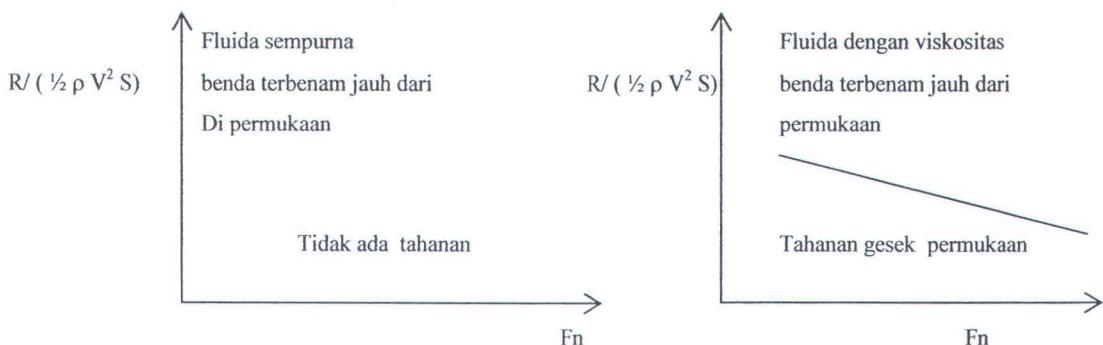
$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2.1)$$

Sedangkan ordinatnya adalah koefisien tahanan yang didefinisikan sebagai

$$C_R = \frac{R}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (2.2)$$

dimana : V = kecepatan kapal [m/s]
 L = panjang benda [m]
 g = percepatan gravitasi [m/s²]
 ρ = massa jenis [kg/m³]
 S = luas permukaan basah benda. [m²]



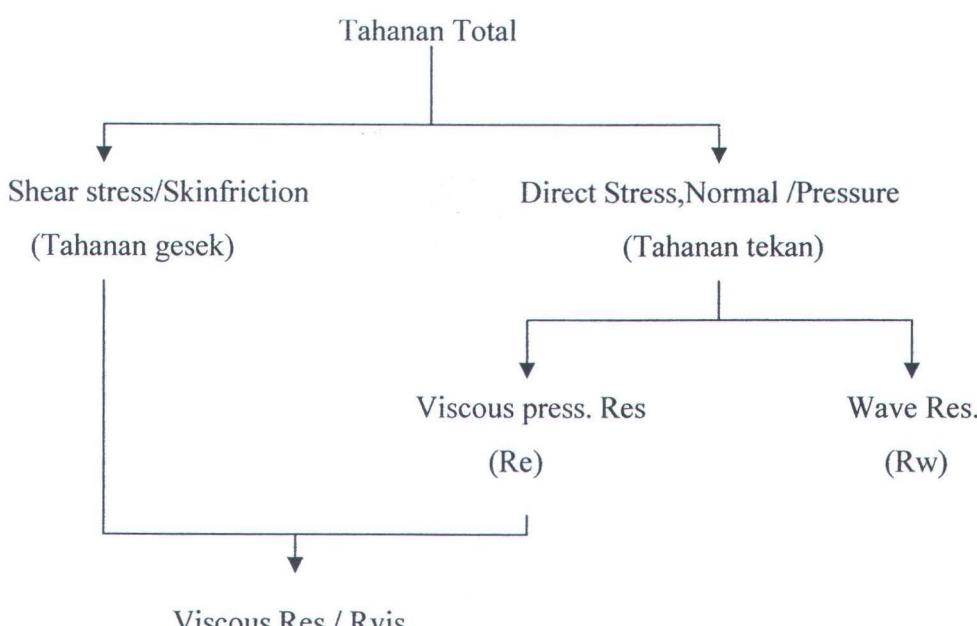


Gambar 2.1. Kurva koefisien tahanan

Dilihat dari segi macamnya tahanan yang akan dialami kapal, yang disebabkan perbedaan tempat bergeraknya maka kapal dapat dibagi dalam tiga golongan yaitu :

1. Kapal dipermukaan air, jadi ada bagian badan kapal yang tercelup dalam air, dan ada bagian yang diatas permukaan air.
2. Kapal yang bergerak keseluruhan di dalam air, misalnya kapal selam, maka tahanan yang berkerja pada kapal tersebut adalah tahanan yang disebabkan oleh air.
3. Kapal-kapal yang dipermukaan air misalnya : speed boat, hidrofoil, jet-foil,dan lain-lain.

Tahanan total kapal dapat dibagi dalam beberapa komponen tahan seperti skema dibawah ini :





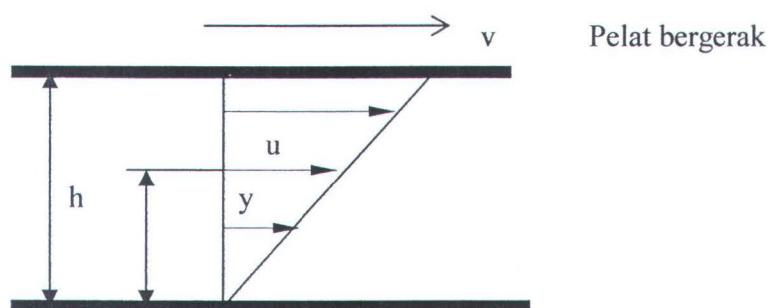
Tahanan penuh adalah $R_t = R_f + R_{vis} + R_w$

Dimana R_f dan R_w adalah berhubungan dengan kekentalan cairan, sehingga R_{vis} disebut tahanan kekentalan.

Pada gerakan kapal dalam kecepatan yang tetap dalam udara atau dalam cairan misal kapal selam, maka tahanan yang disebabkan oleh kekentalan.

2.1.1. TAHANAN GESEK

Tahanan gesek adalah komponen tahanan yang diperoleh dengan jalan mengintegralkan tegangan tangensial ke seluruh permukaan basah kapal menurut arah gerakan kapal. Semua fluida mempunyai viskositas, dan viskositas ini menimbulkan gesekan. Penting tidaknya gesekan ini dalam suatu fisik tergantung pada jenis fluida dan konfigurasi fisik atau pola alirannya (*flow pattern*). Jika gesekan tersebut dapat diabaikan maka alirannya disebut ideal. Viskositas adalah ukuran tahanan fluida terhadap geseran bila fluida tersebut bergerak. Pandang suatu fluida viskos dalam jumlah yang cukup diantara dua buah pelat sejajar yang berjarak h (lihat Gb. 2.2)



Gambar 2.2. Profil aliran diantara pelat yang sejajar

Kedua pelat yang berukuran besar itu berada dalam gerakan relatif yang tunak (*steady*) sementara jarak h selalu tetap. Fluida diantara kedua pelat tersebut akan mempunyai profil kecepatan yang linear jika sepanjang pelat tersebut tidak ada gradient tekanan dalam arah gerakan tersebut. Penyelidikan menunjukkan bahwa fluida viskositas melekat pada kedua pelat tersebut. Lapisan fluida yang langsung menyentuh pelat tidak mempunyai kecepatan relatif terhadap pelat yang bersangkutan antara fluida dan keduanya tersebut tidak terjadi slip. Fluida tersebut



didesak sedemikian rupa sehingga berbagai lapisan fluida dapat saling bergeser secara seragam (uniform). Kecepatan lapisan yang berjarak y dari pelat yang diam dapat dinyatakan sebagai :

$$U = \frac{y}{h} V \quad (2.3)$$

dimana : V = kecepatan pelat yang bergerak. [m/s]

Untuk mempertahankan gerakan, harus ada gaya F yang bekerja pada pelat yang bergerak. Percobaan menunjukkan bahwa gaya tersebut berbanding lurus dengan luas pelat dan berbanding terbalik dengan jarak antara kedua pelat. Ini dapat ditulis sebagai

$$F = \mu \frac{S \cdot V}{h} \quad (2.4)$$

dimana : S = luas pelat $[m^2]$

μ = koefisien viskositas dinamis. [kg/ms]

Gaya F secara numerik sama dengan tahanan yang dihasilkan oleh perpindahan pelat, dan dapat dijelaskan dengan menganggap bahwa diseluruh fluida viskos yang bergerak terdapat tegangan tangensial-gesa yang melawan perubahan bentuk yang terjadi. Dengan meninjau elemen kecil pada fluida yang sedang dalam keadaan bergeseran dengan yang lainnya maka persamaan (2.4) akan dapat ditulis kembali menjadi :

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \quad (2.5)$$

dimana : τ = tegangan geser $[N/m^2]$

$\frac{\partial U}{\partial y}$ = laju perubahan kecepatan sebagai fungsi dari jarak y dari plat yang diam.

Dengan demikian maka koefisien viskositas dinamis dapat didefinisikan sebagai tegangan geser per satuan gradien kecepatan.

$$\nu = \mu / \rho \quad [m^2/s] \quad (2.6)$$



2.1.1.a. ALIRAN LAMINAR DAN TURBULEN

Dalam aliran laminar, fluida bergerak sebagai sejumlah laminasi atau lipasan. Semua lapisan tersebut tidak saling memotong dan membaur tetapi saling bergeser pada kecepatan relatif yang bervariasi dalam penampang aliran. Dalam aliran turbulen, komponen kecepatan fluida mempunyai fluktuasi yang tidak menentu. Aliran tersebut terpotong dan fluidanya terbaur dalam gerakan ulakan (*eddy motion*). Kecepatan aliran harus dipandang sebagai harga rata-rata kecepatan partikel.

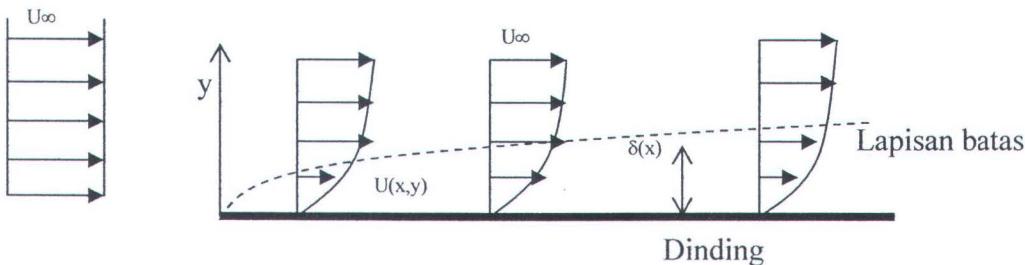
Faktor yang menetukan laminar atau turbulennya suatu aliran adalah fluida, kecepatan, bentuk, dan ukuran benda yang diletakkan dalam aliran, kedalam air, dan jika aliran tersebut berada di dalam kanal, konfigurasi serta ukuran kanal.

Bila kecepatan bertambah, aliran akan berubah dari laminar ke turbulen, melalui daerah transisi. Transisi terjadi pada angka reynold $R_n = 10^5 - 10^6$.

2.1.1.b. LAPISAN BATAS

Lapisan batas diartikan sebagai daerah fluida yang dekat dengan benda padat. Di daerah ini gradien lintang (transverse gradient) kecepatannya sangat besar dibandingkan dengan variasi longitudinalnya, dan tegangan gesernya mempunyai arti yang sangat penting. Lapisan batas bisa laminar, turbulen, atau transisional, dan kadang-kadang disebut sabuk gesekan (*frictional belt*).

Bila disepanjang suatu pelat datar terdapat aliran yang homogen, maka kecepatan fluida tepat pada permukaannya adalah nol karena adanya gaya gesek yang memperlambat gerakan fluida, sehingga terjadi lapisan tipis didekat pelat tersebut. Didalam lapisan batas, kecepatan fluida U naik dari nol di pelat hingga mencapai harga maksimumnya yang sesuai dengan kecepatan di dalam aliran luar tanpa gesekan U_∞ (Gb. 2.3). Tebal lapisan batas, δ , adalah jarak dari dan tegak lurus permukaan benda ke titik yang di titik tersebut kecepatan aliran mencapai harga yang sama dengan harga kecepatan aliran tanpa viskositas (*invicid flow*) yang ekivalen. Dalam praktek, kecepatan ini kadang-kadang diambil sebesar 99% kecepatan aliran tanpa viskositas.



Gambar 2.3 Lapisan batas disepanjang permukaan bidang.

Penerapan hukum momentum untuk elemen volume yang berada tepat dibelakang pelat menunjukkan bahwa momentum yang hilang persatuan waktu harus sama dengan tahanan yang dialami pelat tersebut. Ini menghasilkan persamaan sebagai berikut untuk elemen volume tersebut :

$$\int_0^x \rho U (U_{\infty} - U) dy = \int_0^x \tau_0 dx = R \quad (2.7)$$

R adalah tahanan pada bagian pelat yang terletak antara 0 dan x, τ_0 adalah tegangan geser pada dinding dan sama dengan

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_0 \quad (2.8)$$

Angka nol dibawah menunjukkan harga pada dinding, yaitu untuk $y = 0$. Di sini, R sama dengan tahanan gesek R_f , yang juga dapat dinyatakan sebagai
 $R_f = C_f (1/2 \rho V^2) S$ (2.9)

Dimana C_f = koefisien tahanan gesek spesifik atau koefisien drag.

ρ = massa jenis $[kg/m^3]$

V = kecepatan pelat relatif terhadap aliran [m/s]

S = permukaan basa pelat. $[m^2]$

Umumnya, C_f tergantung pada sifat aliran, angka reynolds, bentuk permukaan, sifat dan keadaan permukaan.

Harga C_f diperoleh dari garis korelasi model-kapal ITTC 1957 yaitu :

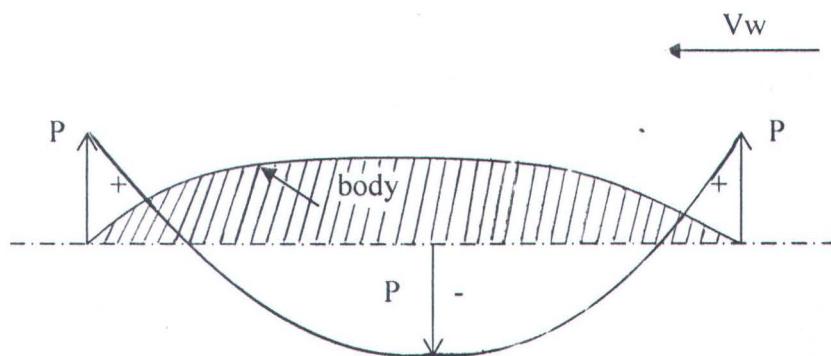
$$C_f = 0,075 / (\log_{10} R_n - 2)^2 \quad (2.10)$$



2.1.2. TAHANAN BENTUK KAPAL

Suatu floating body yang bergerak pada / dalam fluida yang mempunyai viskositas, maka pada pada floating body tersebut akan bekerja tahanan bentuk / tahanan tekanan. Oleh karena itu besar kecilnya tahanan tersebut terutama tergantung pada faktor bentuk floating body di bawah permukaan air.

Untuk memahami proses timbulnya tahanan ini dapat dipakai pendekatan teori *Potential Flow / Bernoulli* tentang distribusi tekanan dan kecepatan sepanjang floating body yang bergerak dalam air. Distribusi tekanan yang bekerja pada penampang tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4 dibawah ini :



Gambar 2.4. Distribusi tekanan yang bekerja pada suatu penampang floating body

Menurut teori *Potential Flow / Bernoulli*. Pada penampang tersebut akan terjadi bahwa pada bagian depan tekanannya tinggi dan kecepatannya rendah, kemudian pada bagian tengah kecepatan naik / tinggi dan tekanan berkurang / rendah, dan pada akhirnya di bagian belakang tekanan akan naik / tinggi dan kecepatan akan berkurang / rendah.

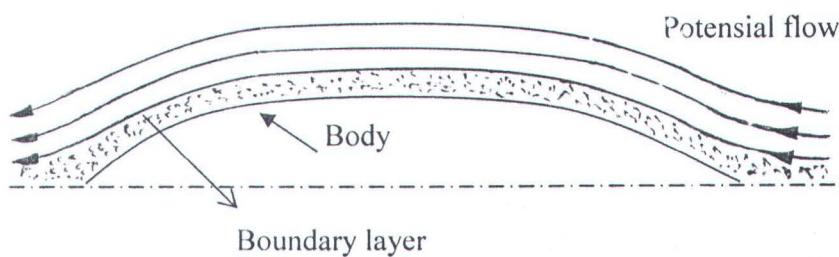
Akibat adanya viskositas, aliran fluida sepanjang penampang tersebut akan mempunyai bentuk aliran yang bermacam-macam. Turunnya kecepatan pada daerah belakang menjadi rendah dan mencapai nol. Hal ini tergantung pada bentuk dan konstruksi penampang pada daerah belakang.

Pada kejadian dimana kecepatan aliran pada daerah belakang menjadi nol, maka pada bagian ini akan terjadi pengumpulan fluida yang kehilangan energi kinetiknya.



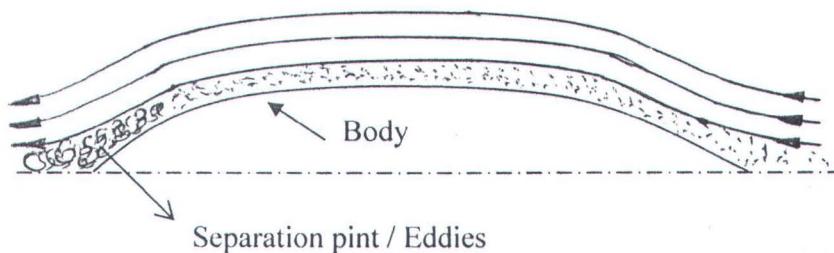
Jadi pada keadaan suatu floating body yang bergerak pada suatu fluida yang mempunyai viskositas akan terjadi :

1. Aliran potensial dan boundary layer akan terpisah kesamping / boundary layer separation (seperti gambar 2.5)



Gambar 2.5. Potesial flow dan boundary layer system aliran fluida pada suatu penampang floating body.

2. Pada daerah dimana terjadi pengumpulan fluida (kecepatan = 0), sehingga partikel-partikel fluida yang datang kemudian bergerak mengelilingi massa air yang stationer (bergerak berputar-putar / Stagnasi). Sehingga pada daerah tersebut terjadi Separation Point / Eddies.(seperti gamabar 2.6)



Gambar 2.6. Separation point / Eddies pada waktu penampang floating body yang mempunyai bentuk penampang bagian yang tumpul.

Kondisi semacam ini banyak terjadi pada floating body yang mempunyai bentuk penampang yang tumpul.

Lebih lanjut, menurut Hughes tahannya kapal dapat dipandang sebagai jumlah dari tiga bagian :



1. Tahanan gesek permukaan bidang yang mempunyai luas permukaan basah dan panjang rata-rata yang sama dengan luas permukaan basah dan panjang kapal, di dalam aliran dua dimensi (yaitu tanpa pengaruh tepi).
2. Tahanan bentuk, merupakan kelebihan dari tahanan tersebut diatas (1) yang akan dialami kapal jika badan kapal tersebut terbenam dalam-dalam sebagai bagian dari model rangkap.
3. Tahanan permukaan bebas, merupakan kelebihan dari tahanan total permukaan model di atas permukaan badan kapal yang terbenam dalam-dalam ketika menjadi bagian dari model rangkap.

Tahanan total = Tahanan gesek dasar (1) + Tahanan bentuk (2) + Tahanan permukaan bebas (3).

Tahanan total = (tahanan gesek dasar) $\times r$ + Tahanan permukaan bebas.

$$\text{Tahanan gesek dasar} = R_f = C_f (1/2 \rho V^2) S$$

$$\text{Dimana : } C_f = 0,066 / (\log R_n - 2,03)^2 \quad (2.11)$$

$$r = (1 + k) = C_v / C_f^2 \quad (2.12)$$

C_v = Koefisien tahanan viskos untuk benda yang bersangkutan.

$$C_f^2 = C_f$$

r adalah ratio tahanan. Untuk suatu benda berbentuk badan kapal ratio ini merupakan suatu faktor tetap, atau $r = 1 + k$. Dalam hal ini k adalah faktor bentuk. Untuk koefisien tahanan gesek dasar dapat dipakai koefisien C_f dari pers (2.12) atau dari persamaan serupa.



2.2. Analisa computational Fluid Dynamic

Computational Fluid Dynamics (CFD) didefinisikan sebagai teknik perhitungan untuk memprediksi fenomena dasar masalah aliran dengan menggunakan computer berkemampuan tinggi. Selain itu CFD juga didefinisikan sebagai suatu analisa terhadap sistem seperti aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena lainnya yang sejenis melalui simulasi komputer. Teknik CFD dianggap cukup ampuh dan telah digunakan secara luas di dunia industri maupun non-industri sejak awal 1990-an.

Beberapa keuntungan yang diperoleh dengan menggunakan CFD antara lain :

- Meminimumkan waktu dan biaya dalam mendesain suatu produk, bila proses desain tersebut dilakukan dengan uji eksperimen dengan akurasi tinggi.
- Memiliki kemampuan system studi yang dapat mengendalikan percobaan yang sulit atau tidak mungkin dilakukan melalui eksperimen.
- Memiliki kemampuan untuk studi dibawah kondisi berbahaya pada saat atau sesudah melewati titik kritis (termasuk studi keselamatan dan skenario kecelakaan)
- Keakuratannya akan selalu dikontrol dalam proses desain.

Namun demikian investasi yang dikeluarkan cukup besar, tetapi tidak sebesar bila dibandingkan dengan harga dari sejumlah fasilitas yang digunakan untuk uji eksperimen seperti towing tank atau wind tunnel.

Aplikasi dari CFD untuk menyelesaikan masalah aliran pada kapal telah mengalami kemajuan yang cukup pesat pada akhir-akhir ini. Bahkan saat ini teknik CFD merupakan bagian dari proses desain dalam diagram spiral



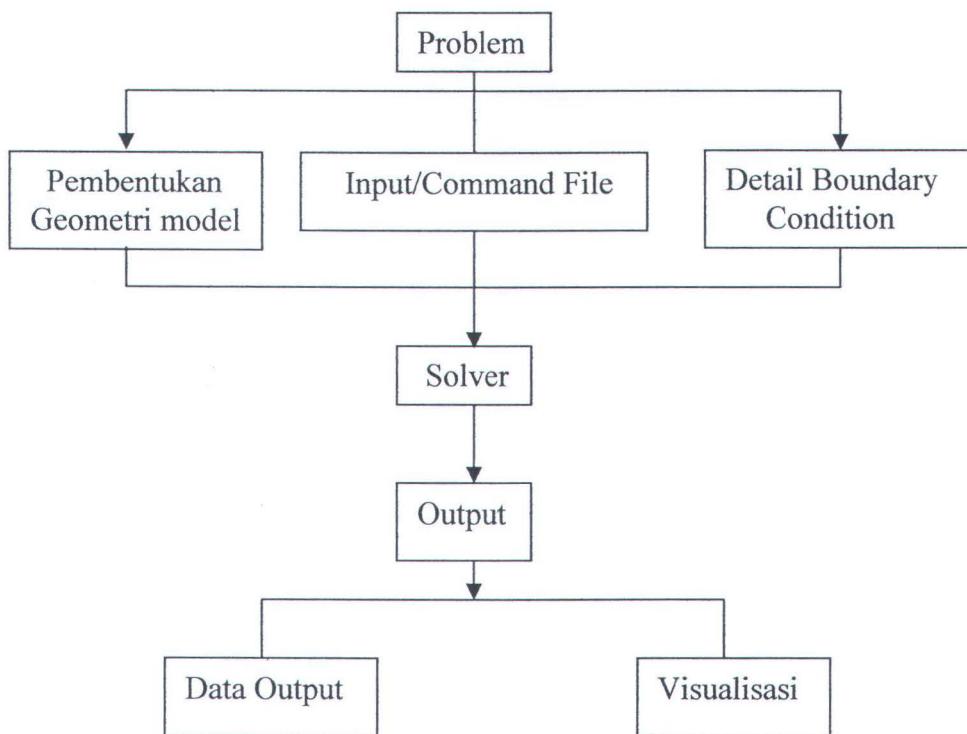
perencanaan. Dengan CFD dimungkinkan untuk memprediksi fenomena aliran yang jauh lebih kompleks dengan berbagai tingkat akurasi.

Berbagai program CFD yang bersifat komersil telah cukup banyak di pasaran seperti FLUENT, PHONICS, CFX, STAR-CD, ANSYS dan lain-lain.

Pada umumnya program-program komputer tersebut dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok berdasarkan jenis penyelesaiannya, yaitu : Metode Panel dan Metode Stokes.

Pada mulanya perkembangan CFD dengan metode panel banyak mengalami hambatan terutama pada masalah komputasinya. Beberapa program yang menggunakan metode panel diantaranya adalah VSAERO/WHIP dari USA, DAWSON dan MARIN dari Belanda, PALISUPAN dari Universitas Southampton Inggris. Akan tetapi seiring dengan perkembangan teknik komputer maka metode penyelesaian yang digunakan cenderung mengarah pada *Navier Stokes* (RANS). NSS mempunyai peran penting dalam pengembangan model *turbulensi* RANS CODE. RANS CODE paling banyak digunakan oleh program-program CFD untuk menyelesaikan masalah aliran dengan memanfaatkan persamaan Navier Stokes kemudian merata-ratakan terhadap waktu.

Dalam desain kerjanya, problem yang ada perlu dideskripsikan ke dalam software CFD dengan menggambarkan model yang akan dianalisa, sifat-sifat fluida yang ada di sekitar model dan juga penentuan kondisi batasnya. Selanjutnya dalam solver problem yang ada akan dihitung dengan pendekatan persamaan *Navier Stokes*. Dari hasil perhitungan kemudian didapatkan hasil running program CFD. Adapun desain kerja CFD adalah sebagai berikut (lihat gambar 2.7)



Gambar 2.7 Desain kerja CFD

Dalam CFD dilakukan pembuatan persamaan yang menggambarkan proses momentum, perambatan panas dan massa yang dikenal dengan penyelesaian secara numerik dan diskrit. Metode penyelesaian yang digunakan dalam CFD dikenal sebagai metode voleme hingga (*Finite Volume Technique*). Di dalam teknik tersebut daerah yang dianalisa dibagi menjadi sub daerah yang kecil yang dinamakan control volume (AEA Technology, 1996).

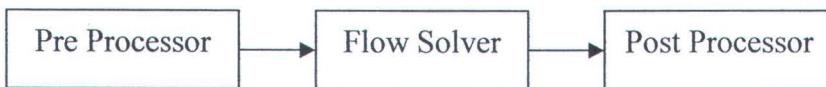
2.2.1. Bagian-bagian CFD Code (CFX)

Program CFD dibuat terstruktur dan dilengkapi dengan interface untuk memudahkan dalam pemasukan data input dan pengamatan hasil running program.



Program CFD terdiri dari tiga bagian dasar (lihat Gambar 2.8.), yaitu :

1. *Pre Prosesor*
2. *Flow Solver*
3. *Post Prosesor*



Gambar 2.8. Bagian-bagian CFD Code

2.2.1.a. Pre-Processor

Pada bagaian ini terdiri dari input masalah aliran untuk program CFD melalui suatu interface kemudian mengubahnya menjadi bentuk yang sesuai dengan format yang dikehendaki oleh bagian *Flow Solver*. Di bagian pre-processor ini pengguna diminta untuk mendeskripsikan :

1. Pendefinisian geometri benda dan daerah sekeliling benda sebagai domain komputasi.
2. Grid Generation

Membagi domain yang telah ditentukan menjadi bagian yang lebih kecil (sub-domain).

3. Penentuan fenomena fisika dan kimia yang dimodelkan.
4. Penentuan sifat-sifat fluida, seperti pendefinisian harga densitas, viskositas, temperatur fluida dan lain-lain.
5. Penentuan kondisi batas



Pada pembuatan model geometri, lokasi pembuatan kondisi batas harus ditentukan baik pada daerah disekeliling benda maupun pada aliran yang diperhitungkan.

Penyelesaian masalah aliran yang berupa kecepatan, tekanan atau temperatur didefinisikan pada simpul-simpul setiap *cell*. Jumlah *cell* dalam *grid* (*mesh*) menentukan akurasi penyelesaian CFD. Pada umumnya semakin banyak *cell* semakin baik akurasi penyelesaiannya. Akan tetapi sebagai konsekuensinya, biaya yang berkaitan dengan inventasi hardware dan waktu perhitungan yang diperlukan menjadi lebih besar. Untuk mendapatkan hasil yang optimal, biasanya pembuatan mesh dilakukan tidak seragam/*uniform*. Daerah yang memiliki perubahan bentuk sangat tajam, biasanya proses meshingnya dilakukan sangat halus, sedangkan pada daerah lainnya dibuat agak kasar.

2.2.1.b. Flow Solver (ref: Malalasekera and Veersteg 1995)

Metode numerik yang biasa digunakan dalam teknik CFD dapat dikelompokkan menjadi *finite difference*, *finite element* dan *spectral method*. Langkah-langkah yang dikerjakan dalam metode numerik flow solver adalah sebagai berikut :

- Pendekatan variabel dari aliran yang tidak diketahui dengan fungsi yang sederhana.
- Diskritisasi pergantian fungsi tersebut menjadi persamaan aliran dan dilanjutkan dengan manipulasi persamaan matematika.
- Penyelesaian persamaan aljabar.





Dalam tahap ini akan dilakukan perhitungan tentang model yang kita buat, secara iterasi. Semakin kecil tingkat kesalahan yang kita tentukan, maka semakin banyak iterasi yang akan dilakukan.

A. Metode Beda Hingga (*Finite Difference Method*)

Fungsi potensial aliran Φ yang tidak diketahui ditentukan pada titik-titik simpul grid. Ekspansi deret Taylor sering digunakan untuk memperoleh pendekatan dalam bentuk *finite difference*, turunan-turunan dari potensial aliran Φ tersebut diatas. Dengan mensubstitusi setiap turunan yang ada pada persamaan aliran dengan pendekatan tersebut, maka akan diperoleh suatu persamaan aljabar setiap titik grid.

Persamaan Dasar yang Digunakan

Beberapa hukum fisika yang biasanya digunakan pada analisa masalah aliran fluida terdiri dari hukum kekekalan massa dan hukum kekekalan momentum.

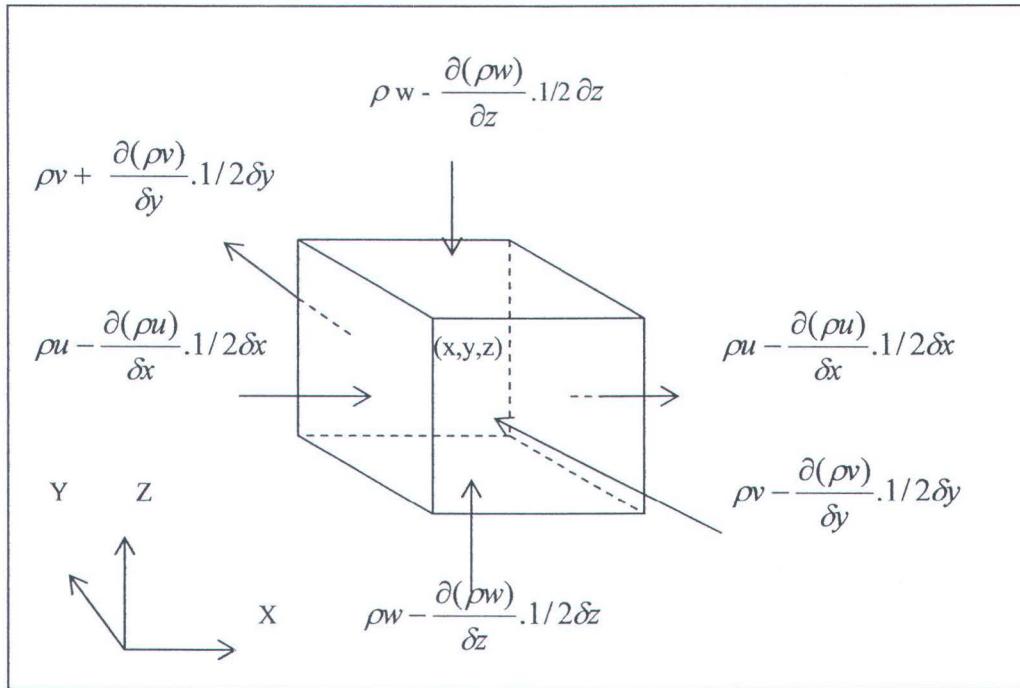
➤ Hukum Kekekalan Massa

Berdasarkan keseimbangan massa elemen fluida yang masuk dan keluar elemen fluida adalah sama sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.9, maka diperoleh persamaan berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.13)$$

atau dapat ditulis dalam bentuk vektor sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.14)$$



Gambar 2.9. Aliran massa pada elemen fluida

Persamaan (2.14) merupakan persamaan kekekalan massa atau persamaan kontinuitas pada titik dalam fluida yang bersifat dapat dimampatkan (*compressible*). Suku pertama menunjukkan perubahan rata-rata kerapatan fluida per satuan waktu (massa per satuan volume). Suku kedua menunjukkan massa aliran yang meninggalkan elemen fluida, dan disebut dengan suku konveksi. Pada fluida yang bersifat incompresible (misal cairan), kerapatannya bersifat tetap sehingga persamaan diatas menjadi :

$$\text{Div } \mathbf{U} = 0$$

Persamaan diatas dapat ditulis dalam bentuk panjang sebagai berikut :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$



➤ **Hukum Kekekalan Momentum**

Hukum Newton II menyatakan bahwa perubahan momentum yang terjadi pada partikel fluida adalah sama dengan jumlah gaya-gaya pada partikel tersebut. Pertambahan momentum per satuan volume dari partikel fluida diberikan oleh persamaan berikut :

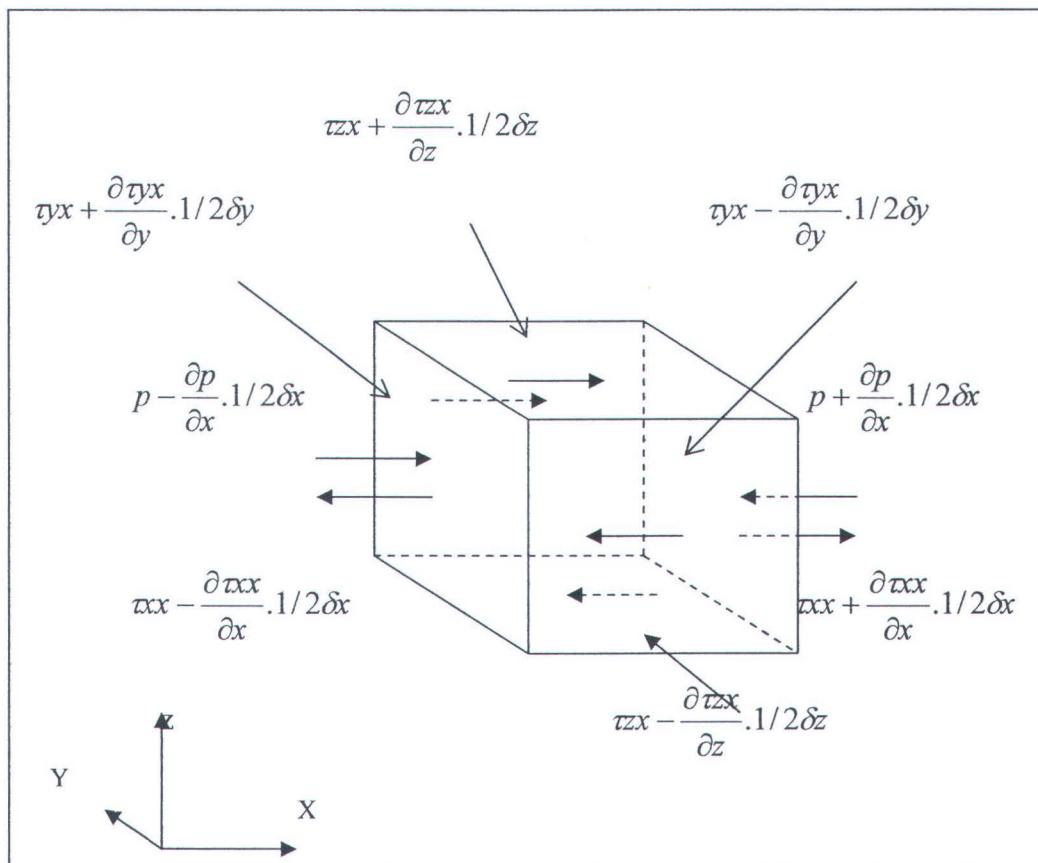
$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (2.16)$$

Gaya yang bekerja pada partikel fluida dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu :

- Surface force : - gaya akibat tekanan
 : - gaya akibat kekentalan
- Body force : - gaya grafitasi
 : - gaya sentrifugal
 : - gaya elektromagnetik

Pada penurunan persamaan kekentalan momentum, peranan gaya tekan p dan gaya kekentalan τ cukup penting. Dengan memperlihatkan Gambar 2.10, yang menyatakan komponen gaya pada elemen fluida yang bekerja pada arah sumbu x, maka akan ditentukan selisih gaya sebesar :

$$[(-\partial p/\partial x) + (\partial \tau_{xx}/\partial x)]\partial x \partial y \partial z + (\partial \tau_{yx}/\partial y)\partial x \partial y \partial z + (\partial \tau_{zx}/\partial z)\partial x \partial y \partial z \quad (2.17)$$



Gambar 2.10. Komponen Tegangan arah sumbu x

Bila persamaan (3.6) dibagi dengan volume $\delta x \delta y \delta z$ maka diperoleh

$$\partial(-p + \tau_{xx})/\partial x + \partial\tau_{yx}/\partial y + \partial\tau_{zx}/\partial z \quad (2.18)$$

Bila pengaruh *body force* dinyatakan sebagai besaran *source*, S_{MX} sedang persamaan momentum untuk arah sumbu x dapat diperoleh sebagai hubungan perubahan momentum pada partikel fluida sama dengan jumlah seluruh gaya-gaya akibat tegangan permukaan, persamaan (2.18) ditambah dengan perubahan

momentum akibat adanya *source*, maka persamaan momentum arah sumbu x dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\rho Du/Dt = \partial(-p + \tau_{xx})/\partial x + \partial\tau_{yx}/\partial y + \partial\tau_{zx}/\partial z + S_{MX} \quad (2.19)$$



Komponen persamaan momentum untuk arah sumbu y dinyatakan sebagai berikut :

$$\rho Dv/Dt = \partial(-p + \tau_{yy})/\partial x + \partial\tau_{xy}/\partial y + \partial\tau_{zy}/\partial z + S_{My} \quad (2.20)$$

Komponen persamaan momentum untuk arah sumbu z dinyatakan sebagai berikut :

$$\rho Dw/Dt = \partial(-p + \tau_{zz})/\partial x + \partial\tau_{xz}/\partial y + \partial\tau_{xz}/\partial z + S_{Mz} \quad (2.21)$$

B. Persamaan Navier Stokes untuk Fluida Newtonian

Persamaan penentu dalam aliran fluida mengandung besaran yang tidak diketahui yaitu komponen tegangan kekentalan τ_{ij} . Dalam aliran fluida, tegangan kekentalan tersebut dapat dinyatakan sebagai fungsi lokal. Pada analisa tiga dimensi, deformasi lokal tersebut terdiri dari linear dan deformasi volumetric.

Deformasi linear dibedakan menjadi :

1. Komponen deformasi elongasi, yang dinyatakan sebagai berikut :

$$e_{xx} = \partial u / \partial x \quad e_{yy} = \partial v / \partial y \quad e_{zz} = \partial w / \partial z \quad (2.22)$$

2. Komponen deformasi elongasi, yang dinyatakan sebagai berikut :

$$e_{xy} = e_{yx} = \frac{1}{2} [\partial u / \partial y + \partial v / \partial x]$$

$$e_{xz} = e_{zx} = \frac{1}{2} [\partial u / \partial z + \partial w / \partial x]$$

$$e_{yz} = e_{zy} = \frac{1}{2} [\partial v / \partial z + \partial w / \partial y] \quad (2.23)$$

Deformasi volumetric dinyatakan sebagai berikut :

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = \operatorname{div} U \quad (2.24)$$



Pada fluida yang bersifat Newtonia, tegangan kekentalan berbanding lurus terhadap deformasi. Dengan memasukkan besaran-besaran viskositas μ untuk deformasi linear dan λ untuk deformasi volumetric maka diperoleh komponen tegangan kekentalan sebagai berikut:

$$\tau_{xx} = 2\mu (\partial u / \partial x) + \lambda \operatorname{div} u$$

$$\tau_{yy} = 2\mu (\partial v / \partial y) + \lambda \operatorname{div} u$$

$$\tau_{zz} = 2\mu (\partial w / \partial z) + \lambda \operatorname{div} u$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu [(\partial u / \partial y) + (\partial v / \partial x)]$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu [(\partial u / \partial z) + (\partial w / \partial x)]$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu [(\partial v / \partial z) + (\partial w / \partial y)] \quad (2.25)$$

dengan substitusi persamaan (2.25) ke dalam persamaan (2.19) sampai (2.21) maka akan diperoleh persamaan Navier-Stokes, yang nantinya digunakan dalam metode finite volume.

$$\rho Du/Dt = -(\partial p / \partial x) + \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} u) + S_{Mx}$$

$$\rho Dv/Dt = -(\partial p / \partial y) + \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} v) + S_{My}$$

$$\rho Dw/Dt = -(\partial p / \partial z) + \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} w) + S_{Mz} \quad (2.26)$$

C. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode ini menggunakan fungsi bentuk sederhana (linear atau kuadrat) pada elemen yang menggambarkan variasi aliran Φ . Persamaan pengendali dapat dipenuhi dengan penyelesaian Φ secara eksak. Jika perkiraan persamaan tersebut tidak terpenuhi sehingga terjadi sisa (residual) yang dapat diukur kesalahannya.



Kemudian sisa tersebut diminimumkan dengan cara mengalikannya dengan fungsi berat dan pengintegralan. Hasilnya tersebut merupakan fungsi aljabar untuk koefisien yang tidak diketahui dari fungsi perkiraan.

D. Metode Spektral (*Spectral Method*)

Metode ini didekati dengan deret Forier atau deret polynomial Chebyshev. Tidak seperti metode beda dan elemen hingga yang memiliki pendekatan tidak lokal tetapi valid melalui *computational domain*. Pada metode ini kita menurunkan persamaan yang tidak diketahui tersebut ke dalam persamaan pengendali dengan fungsi deret.

E. Metode Volume Hingga (*Finite Volume Method*)

Metode ini dikembangkan sebagai formulasi khusus metode beda hingga. Secara global metode beda hingga memiliki algoritma numerik sebagai berikut :

1. Pengintegralan persamaan pengendali aliran fluida terhadap seluruh control volume dari domain penyelesaian.
2. Pendiskritan yang meliputi substitusi berbagai pendekatan beda hingga dari suku-suku persamaan yang diintegralkan tersebut diatas yang menggambarkan proses aliran seperti konveksi, difusi, dan sources. Pada tahap ini persamaan integral akan diubah menjadi persamaan aljabar.
3. Penyelesaian persamaan aljabar dengan metode iterasi.

Langkah pertama tersebut diatas, membedakan metode Finite Volume dari teknik-teknik CFD lainnya. CFD Code meliputi teknik-teknik pendiskritan yang cocok untuk menyelesaikan fenomena perpindahan (transport), konveksi (akibat



aliran fluida) dan difusi (akibat adanya perbedaan Φ antara satu titik dengan titik lainnya serta source (berhubungan dengan muncul dan hilangnya Φ). Kekentalan dari variabel aliran dalam finite control volume dapat diekspresikan dalam persamaan keseimbangan antara proeses kenaikan antara proses kenaikan dan penurunan, yaitu :

$$\boxed{\text{Perubahan } \phi \text{ dalam control volume terhadap waktu}} = \boxed{\text{Perubahan } \phi \text{ dari konveksi kedalam control}} + \boxed{\text{Perubahan } \phi \text{ difusi ke dalam control volume}} + \boxed{\text{Perubahan } \phi \text{ kedalam control volume}}$$

2.2.1.c. Post Processor

Di tahap ini akan ditampilkan hasil perhitungan yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya. Kita dapat melihat visualisasi model yang kita buat. Hal-hal yang bisa ditampilkan oleh *post processor* adalah sebagai berikut :

- Gambar geometri model
- Tampilan vector kecepatan
- Gerakan rotasi, translasi dan penyekalaan
- Arah aliran fluida
- Hardcopy output

Dalam proses set-up dan running simulasi CFD ada tahapan identifikasi dan formulasi permasalahan aliran dengan pertimbangan fenomena fisika dan kimia. Pemahaman yang cukup baik diperlukan dalam menyelesaikan algoritma penyelesaian numeric. Ada 3 konsep matematika yang digunakan dalam menentukan berhasil atau tidaknya algoritma, yaitu (AEA Technology, 1996) :

1. Konvergensi, yaitu property metode numerik untuk menghasilkan penyelesaian eksakta sebagai *grid spacing*, ukuran *control volume* atau ukuran



elemen dikurangi mendekati nol. Konvergensi biasanya sulit untuk didapatkan secara teoritis. Untuk kondisi lapangan kesamaan *Lax* yang menyatakan bahwa untuk permasalahan linear memerlukan konvergensi.

2. Konsistensi, yaitu urutan numerik untuk menghasilkan system persamaan aljabar yang dapat diperlihatkan sama (equivalen) dengan persamaan pengendali sebagai jarak grid mendekati nol.
3. Stabilitas, yaitu penggunaan factor kesalahan sebagai indikasi metode numerik. Jika sebuah teknik tidak stabil dalam setiap kesalahan pembuatan pada data awal maka dapat menyebabkan terjadinya osilasi atau divergensi.

CFD memberikan hasil fisik yang realistic dengan akurasi yang baik pada simulasi dengan grid yang berhingga. Ada tiga sifat perhitungan finite volume, yaitu : *Conservativeness*, *Boundedness*, dan *Transportiveness*. Ketiganya didesain menjadi bagian berhingga yang dapat menunjukkan keberhasilan simulasi CFD. Disamping itu ketiganya umumnya digunakan sebagai alternatif untuk konsep matematika yang akurat. Skema numerik memiliki sifat *conservativeness* yang dapat mempertahankan kekekalan sifat-sifat fluida secara global untuk seluruh domain penyelesaian. Pendekatan volume hingga dapat menjamin tetap berlangsungnyakekentalan property fluida Φ untuk tiap control volume. Proses aliran terdiri dari dua, yaitu konveksi dan difusi. Keduanya dapat dihitung pengaruh arahnya dengan bagian finite volume, yaitu *transportiveness*. Sedangkan *boundedness* dapat mempertahankan kestabilan suatu metode numerik yang mensyaratkan adanya batasan harga minimum dan maksimum dari variabel-variabel aliran.



2.3. Proses Validasi (AEA Technology, 1996)

Proses perhitungan dengan pendekatan CFD dilakukan dengan beberapa tahap validasi, yaitu :

1. Convergence

Pada tahap ini proses iterasi perhitungan akan selalu dikontrol dengan persamaan pengendali. Jika hasil perhitungan belum sesuai dengan tingkat kesalahan yang ditentukan, maka komputasi akan terus berjalan.

2. Grid Independence

Besarnya jumlah cell yang kita gunakan dalam perhitungan akan menentukan keakuratan hasil yang didapat. Tetapi tidak selamanya dengan jumlah cell yang banyak akan menambah keakuratan hasil perhitungan. Dengan demikian pengguna dituntut untuk dapat menentukan jumlah cell yang optimum, agar waktu dan memori komputer yang terpakai tidak terlalu besar.

3. Verifikasi hasil dengan teori atau data lain

Keakuratan hasil perhitungan dengan pendekatan CFD perlu dibandingkan dengan teori atau data lain yang sudah ada. Sehingga kevalidan hasil perhitungan tidak disangsikan lagi.



2.4. Model Matematika dan Alogaritma Solusi pada CFX-Solver 5.41

2.4.1 Persamaan governing

Persamaan *solver* pada *software* CFX-5 menggunakan persamaan *unsteady navier-stokes* dalam format kekekalan bentuk atau *conservation form*

A. Persamaan Transport

Pada umum persamaan massa, momentum dan kekekalan energi dapat ditulis sebagai berikut :

Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2.27)$$

Persamaan momentum

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = \nabla \cdot (-p \boldsymbol{\delta} + \mu (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) + \mathbf{S}_M \quad (2.28)$$

Persamaan energi

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \mathbf{S}_g \quad (2.29)$$

h_{tot} didefinisikan sebagai entalpi total spesifik, pada beberapa kasus umum, properti variable dan aliran compressible diberikan dalam bentuk enthalpi statik (termodinamika) spesifik, h , yakni :

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \quad (2.30)$$

dimana :

$$h = h(p, T)$$



jika *viscous work* berperan penting, maka syarat ekstra perlu ditambahkan pada ruas kanan persamaan energi diatas untuk menghitung efek lapisan atau *viscous shear* dan persamaan energi, sehingga persamaan berubah menjadi :

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + (\nabla \cdot (\mu (\nabla U (\nabla U)^T - 2/3 \nabla \cdot \delta) U) + S_g) \quad (2.31)$$

pada kelima persamaan diatas, terdapat tujuh variabel yang tidak diketahui yakni : u, v, w, p, T, ρ, h . Variabel tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan bantuan *equation of state*, yang berhubungan dengan *densitas* terhadap tekanan dan temperatur, dan *constitutive equation*. Yang berhubungan dengan *enthalpy* terhadap temperatur dan tekanan.

B. Model Fluida dan equation of state

Densitas fluida umum dapat dijelaskan sebagai fungsi temperatur, tekanan dan beberapa variabel tambahan :

$$\rho = \rho(p, T, AV_1, AV_2, \dots, Av_n) \quad (2.32)$$

Kapasitas panas spesifik C_p untuk fluida umum dapat dideskripsikan sebagai fungsi temperatur, tekanan dan beberapa variabel tambahan :

$$C_p = C_p(p, T, AV_1, AV_2, \dots, Av_n) \quad (2.33)$$

Untuk gas ideal, densitas didefinisikan melalui hukum gas Ideal. Sehingga pada *software CFX-5*, koeffisien C_p merupakan fungsi temperatur :

$$C_p = C_p(T) \quad (2.34)$$



C. Equation of state untuk densitas

Equation of state yang dimaksud adalah persamaan aljabar termodinamika untuk densitas fluida. Pada kondisi gas ideal, hubungan dideskripsikan oleh hukum gas ideal :

$$\rho = \frac{w(P + Pr ef)}{R_o T} \quad (2.35)$$

Dimana w adalah berat molekular gas, dan R_o adalah konstanta gas universal rasio panas spesifik γ , dihitung dari spesifikasi C_p dan berat molekular :

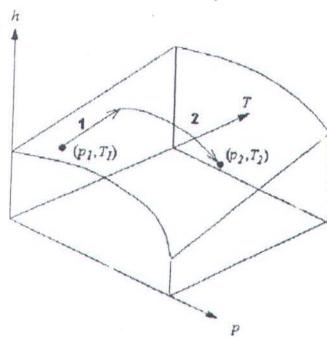
$$R = R_o / w \quad (2.36)$$

Dimana R adalah konstanta gas spesifik, dan,

$$\gamma = \frac{C_p}{C_p - R} \quad (2.37)$$

D. Equation of state untuk entalpi (persamaan constitutive)

Persamaan *constitutive* yang dimaksud adalah persamaan aljabar termodinamika untuk entalpi fluida. Selain untuk properti fluida umum, hubungan tekanan-temperatur-entalpi dihitung menggunakan tabel *property* dan integral dari turunan definisi perubahan entalpi menggunakan simbol r dan C_p tabel *property* dibentuk menggunakan batasan temperatur *upper* dan *lower*, dan tekanan kemudian, untuk beberapa perubahan umum, dari kondisi (p_1, T_1) ke (p_2, T_2), maka perubahan entalpi, dihitung dalam dua tahap : pertama pada tekanan konstan, kemudian pada temperatur konstan.



Gambar 2.11.. Arah perhitungan tekanan dan temperatur dari titik 1 ke titik 2

Perubahan total entalpi dihitung menggunakan :

$$h_2 - h_1 = \int_{T1}^{T2} CpdT + \int_{P1}^{P2} [v - T_2(\partial v / \partial T)] dP \quad (2.38)$$

Langkah pertama, terhadap perubahan entalphi untuk gas ideal. Langkah kedua adalah “koreksi” yang disyaratkan pada aliran nyata. *Solver* pada *software* CFX-5 menggunakan titik interpolasi bilangan konstanta atau *fixed number of interpolation points*, untuk membentuk tabel properti yang berisi akurasi estimasi terbaik untuk batas *upper* dan *lower*, akurasi interpolasi terbaik dari tabel.

Catatan :

Bawa di CFX-5,persamaan enthalpi diatas dihitung saat *user* mendefinisikan nilai referensi *Variabel tambahan*, sehingga perkiraan effek termodinamika dapat dimodelkan.

Jika hubungan densitas fluida didasarkan pada gas ideal, maka perubahan entalpi statis berubah sesuai dengan rumus :



$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} Cp dt \quad (2.39)$$

Jika densitas fluida dan kapasitas panas spesifik adalah konstan maka perubahan pada entalpi statis berubah :

$$dh = Cp P T + dp/\rho \quad (2.40)$$

E. Konjugasi Heat Tranfer

Software CFX-5 memiliki fasilitas untuk membuat wilayah solid, sehingga persamaan perpindahan panas dapat diselesaikan , tetapi tidak melalui aliran, dikenal sebagai perpindahan panas konjugasi atau *heat transfer* dan *solid regions*, secara umum dikenal sebagai *solid sub-domains*

Dalam *solid sub-domains*, rumus kekekalan persamaan energi disederhanakan (karena tidak ada aliran dalam *solid* tersebut), jadi konduksi hanya merupakan bentuk perpindahan panas. Konduksi panas melalui benda *solid* mengikuti persamaan transport sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_g \quad (2.41)$$

Dimana ρ , c_p , dan T adalah densitas, kapasitas panas spesifik dan konduktivitas suhu *solid*

F. Model Full Buoyancy

Untuk perhitungan aliran *buoyancy* dimana densitas adalah fungsi tekanan, temperatur atau variabel tambahan, maka digunakan model *full buoyancy*. *Full buoyancy* diimplementasikan dengan menambahkan *source term* terhadap



persamaan momentum, *source term* gaya *buoyancy* adalah fungsi variasi densitas lokal :

$$S_{M \text{ bouy}} = (\rho - \rho_{ref})g \quad (2.42)$$

G. Model Boussinesq

Untuk aliran *buoyancy* yang bergerak akibat adanya perbedaan temperatur (walaupun kecil), maka variasi densitas dalam fluida terlalu kecil untuk mencegah pembulatan nilai *error* dsalam perhitungan *source term*, jika densitas dijaga sebagai sebagai konstanta, maka model Boussinesq digunakan dan *source term* diberikan oleh rumusan berikut :

$$S_{M \text{ bouy}} = (\rho - \rho_{ref})g \quad (2.43)$$

Sebagai fungsi dimana taksiran Boussinesq terhadap variasi densitas lokal didefinisikan

$$\rho' = \rho\beta(T - T_{ref}) \quad (2.44)$$

Dimana β adalah ekspansivitas thermal, T_{ref} adalah temperatur referensi *buoyancy* dan ρ adalah konstanta densitas fluida. Taksiran ini berguna untuk kasus aliran dengan bilangan mach rendah ($M < 0.1$), dimana perbedaan temperatur relatif kecil (yakni , $\beta(T - T_{ref}) < 0,1$)

2.4.2. Momentum, Energy dan Sumber Variabel Tambahan

A. Sumber Momentum

Sources (dan *sinks*) momentum tiap unit volume dapat ditentukan untuk *subdomains*. *Sources* dapat ditentukan secara langsung melalui komponen momentum secara individual :



$$\begin{aligned} S_{M,x} &= S_{\text{spec},x} i \\ S_{M,y} &= S_{\text{spec},y} j \\ S_{M,z} &= S_{\text{spec},z} k \end{aligned} \quad (2.45)$$

Kuantitas $S_{\text{spec},x}$ merupakan komponen momentum khusus. Tahanan fluida *isotropic* dapat ditentukan melalui penggunaan koefisien tahanan *linear* dan *quadratic* C_{R1} dan C_{R2} . Komponen momentum *source* dimodelkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} S_{M,x} &= -C_{R1}U_x - C_{R2}|U_x|U_x \\ S_{M,y} &= -C_{R1}U_y - C_{R2}|U_y|U_y \\ S_{M,z} &= -C_{R1}U_z - C_{R2}|U_z|U_z \end{aligned} \quad (2.46)$$

Kolerasi antara *Linear* dan *quadratic pressure drop*, dapat dimodelkan menggunakan formula dengan menghitung gradien *pressure drop* suatu model tahanan. Sebagai contoh, hubungan kolerasi *pressure drop quadratic* :

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = KU_x^2 \quad (2.47)$$

Dapat dimodelkan menggunakan koefisien *single quadratic resistance*, dimana

$$C_{R2} = K \quad (2.48)$$

Catatan :

Selama solusi, kecepatan diambil sebagai kecepatan fluida *superficial*, yakni kecepatan yang diselesaikan dengan kode. Kecepatan fluida melalui tahanan berbeda terhadap *volume face area restrictions*, dan harus dimasukkan kedalam perhitungan ketika proses perhitungan nilai koefisien tahanan digunakan.



B. Sumber Energi

Sumber energi (*source of energy*) dapat ditentukan dengan *sub-domains* melalui penentuan nilai *source* dan koefisien *source* dan koefisien *source linear*

$$S_E = S_{\text{spec},E} + C_E T \quad (2.49)$$

Source beberapa variabel tambahan yang telah ditentukan dapat diperoleh dari *sub-domains* melalui penentuan nilai *source* dan koefisien *linear source*

$$S_\Phi = S_{\text{spec},\Phi} + C_{AV} \Phi \quad (2.50)$$

2.4.3. Model Turbulensi

A. Model Persamaan Zero

Model persamaan zero adalah suatu konsep sederhana *viskositas-eddy* yang menggunakan persamaan aljabar untuk menghitung kontribusi viskositas dari turbulensi *eddy*

Turbulensi viskositas dimodelkan sebagai produk skala kecepatan turbulensi, U_t dan skala panjang turbulensi l_t diperkenalkan oleh Pradinti dan Kolmogorov,

$$\mu_l = \rho f_\mu U_t l_t \quad (2.51)$$

Dimana f_μ adalah konstanta proporsionalitas skala kecepatan diambil untuk menjadi kecepatan maximum dalam domain fluida. Sedangkan skala panjang diturunkan menggunakan formula :

$$l_t = V_D^{1/3} / 7 \quad (2.52)$$

Dimana V_D adalah volume domain fluida.



B. Model k- ε

Model $k-\varepsilon$ (k-epsilon) menggunakan hipotesa viskositas-eddy untuk kondisi turbulen. Model $k-\varepsilon$ memperkenalkan dua variabel baru dalam system persamaan Yakni

k , adalah energi kinetik turbulensi, didefinisikan sebagai varian fluktuasi

dalam kecepatan dan berdimensi $L^2 T^{-2}$ misal m^2/s^2

ε adalah laju pada dissipasi fluktuasi kecepatan dan memiliki k tiap unit waktu $L^2 T^{-3}$ misal m^2/s^3

persamaan kontinuitas kemudian menjadi :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.53)$$

dan persamaan momentum menjadi :

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{ref} \nabla U) = \nabla \cdot (\mu_{ref} \nabla U)^T + B \quad (2.54)$$

Dimana B adalah jumlah gaya pada body, μ_{ref} adalah penghitungan viskositas effektif untuk turbulensi, dan p' adalah tekanan yang telah dimodifikasi sehingga rumusan menjadi :

$$P' = p + \rho k \quad (2.55)$$

Model $k - \varepsilon$ serupa dengan model persamaan zero, berbasis konsep viskositas Eddy, sehingga :

$$2 - \mu_{ref} = \mu + \mu_t \quad (2.56)$$

Dimana μ_{ref} adalah viskositas turbulensi. Model $k - \varepsilon$ mengasumsikan bahwa viskositas turbulensi memiliki hubungan terhadap energi kinetik turbulensi dan dissipasi via rumusan berikut :



$$\mu_t = C_\mu \rho (k^2/\varepsilon) \quad (2.57)$$

Dimana C_μ adalah suatu konstanta. Nilai k dan ε didapat persamaan *differential transport* untuk energi kinetik turbulensi dan laju dissipasi turbulensi adalah :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla (\rho U k) - \nabla \cdot \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} V k \right] &= P - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla (\rho U \varepsilon) - \nabla \cdot \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} V \varepsilon \right] &= \varepsilon/k (C_A P - C_s \rho \varepsilon) \end{aligned} \quad (2.58)$$

Dimana $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k dan σ_ε adalah konstanta, maka untuk perhitungan P atau produk *shear* terhadap turbulensi, untuk aliran *incomprensible* adalah :

$$P = \mu_t \nabla \cdot U (\nabla U + \nabla U^T) - 2/3 V \cdot U (\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) \quad (2.59)$$

C. Model RNG k- ε

Model RNG k- ε adalah alternatif terhadap model k- ε standart. Berbasis pada analisis renormalisasi group persamaan *Navier-Stokes*. Persamaan transport turbulensi terbentuk dan dissipasi serupa dengan standart model k- ε , tetapi dengan konstanta model berbeda, konstanta $C_{\varepsilon 1}$ diganti dengan fungsi $C_{\varepsilon 1RNG}$. Sehingga persamaan transport untuk dissipasi turbulensi menjadi :

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla (\rho U \varepsilon) - \nabla \cdot \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\varepsilon RNG}} V \varepsilon \right] = \varepsilon/k (C_A P - C_s \rho \varepsilon) \quad (2.60)$$

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1.42 - f\eta \quad (2.61)$$

$$\text{Dimana : } f\eta = \frac{\eta \left[1 - \frac{\eta}{4,38} \right]}{\left(1 + \beta_{RNG} \eta^3 \right)} \quad (2.62)$$



$$\eta = \sqrt{\frac{P}{\rho C_{\mu RNG} \epsilon}} \quad (2.63)$$

D. Model Reynold Stress

Alternatif penggunaan model viskositas eddy di CFX-5 adalah model *differensial Reynold stress*, dimana persamaan *differential transport* diselesaikan secara individual untuk mencapai tiap komponen *Reynold stress*. *Exact production term* dan pemodelan inherent stress anisotropies memberi hasil superior untuk aliran dengan kurva streamline dan dalam sistem yang berotasi. Solver pada software CFX-5 menyelesaikan persamaan *transport* dari *Reynold stress*.

$$\frac{\partial \rho \overline{u \otimes u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes \overline{u \otimes u}) = p + \phi - \left[\left((\mu + 2/3 C_s \rho \frac{k^2}{\epsilon}) \nabla \right) \right] (\rho \overline{u \otimes u}) - 2/3 \rho \epsilon \partial$$
(2.64)

Yang dapat ditulis dalam notasi indeks sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} \cdot (U_k \rho \overline{u_i u_j}) = p_{ij} + \phi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left((\mu + 2/3 C_s \rho \frac{k^2}{\epsilon}) \right) \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_k} \right] - 2/3 \rho \epsilon \partial$$
(2.65)

Dimana ϕ adalah korelasi antara tekanan-strain, dan P , *exact production term*, yang didapat melalui :

$$P = \rho (\overline{u \otimes u} (\nabla U)^T + (\nabla U) \overline{u \otimes u}) \quad (2.66)$$

Sebagai dissipasi turbulensi nampak pada persamaan *individual stress*, suatu persamaan untuk menyelesaikan ϵ . Sehingga bentuk akhir.



$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) = \varepsilon/k (C_A P - C_A \rho \varepsilon) + \nabla \cdot \left[\frac{1}{a_{\mu RS}} \left(\mu + \rho C_{\mu RS} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \cdot \varepsilon \right] \quad (2.67)$$

Dalam persamaan tersebut, koefisien *difusi isotropic* awal diganti dengan formula *isotropic*, yang menambah robustness model *Reynolds stress*.

- Persamaan –strain terms

Term terpenting dalam model *Reynolds stress* adalah korelasi antara tekanan-strain, ϕ . Korelasi tekanan-strain dapat dinyatakan dalam bentuk umum.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (2.68)$$

Dimana

$$\phi_1 = -\rho \varepsilon (C_{S1} u + C_{S2} (u u - 1/3 u \cdot u \delta))$$

$$\phi_2 = -$$

$$C_{r1} P u + C_{r2} \rho k S - C_{r3} \rho k S \sqrt{u \cdot u} + C_{r4} \rho k [u S^T + S u^T - 2/3 u \cdot S \delta] + C_{r5} \rho k (u W^T + W u^T) \quad (2.69)$$

Dan

$$U = \frac{\overline{u \otimes u}}{k} - 2/3 \delta$$

$$S = 1/2 (\nabla U + (\nabla U)^T) \quad (2.70)$$

$$W = -1/2 (\nabla U - (\nabla U)^T)$$

Dalam formula ini, A adalah tensor *isotropic*, S adalah laju *strain* dan W adalah viskositas. Bentuk umum ini dapat digunakan untuk model linear dan korelasi kuadratik dengan menggunakan nilai yang tepat untuk konstanta. Konstanta model didapat sebagai berikut :



- **Different models**

Ada tiga *different Reynolds stress models* yang tersedia di CFX-5. Dikenal dengan nama LRR-IP, LRR-QI dan SSG. Tiap model memiliki konstanta *different model*. Model LRR-IP dan LRR-QI dikembangkan oleh Launder, Reece dan Rodi. "IP" melambangkan *Isotropisation of Production*, dan QI melambangkan *Quasi-Isotropic*. Pada model tersebut, hubungan tekanan-strain adalah linear. Model LRR-IP adalah versi termudah dengan keakuratan yang minim tetapi lebih stabil. Model SSG dikembangkan oleh Speziale, Sarkar and Gatski. Model ini menggunakan relasi kuadratik untuk korelasi tekanan-strain.

2.4.4. Pemodelan Aliran di Dekat Dinding (Wall)

Heat flux pada dinding dapat pula dimodelkan menggunakan pendekatan fungsi dinding. Caranya dengan mempergunakan asumsi seperti diatas, maka profil temperatur *non-dimensional* dekat dinding akan mengikuti suatu profil logaritma universal, dimana temperatur *non-dimensional*, T^+ , didefinisikan sebagai :

$$T^+ = \frac{\rho C_p u^* (T_w - T_f)}{q_w} \quad (2.71)$$

Dimana T_w adalah temperatur pada dinding, T_f adalah temperatur fluida (non-dimensi), C_p adalah kapasitas panas fluida dan q_w flux panas pada dinding. Distribusi temperatur non-dimensi dimodelkan sebagai berikut :

$$T^+ = \frac{1}{2} \log(y + E) \quad (2.72)$$

Dimana konstanta model thermal berbeda terhadap momentum. Kombinasi dua persamaan akan mengarah pada bentuk sederhana untuk model *wall heat flux* :



$$Q_w = \frac{\lambda}{y} (Tw - Tf) \left[\frac{y^+}{T^+} \text{Pr} \right] \quad (2.73)$$

Dimana λ adalah konduktivitas thermal fluida dan Pr adalah bilangan *fluida Prandtl*.

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (2.74)$$

Model wall function untuk T^+ juga dimodifikasi dalam wilayah *laminar sub-layer*.

2.4.5. Boundary condition

A. Inlet (subsonic)

- **Massa dan Momentum**

Magnitude kecepatan *inlet* ditentukan dan arah diambil normal terhadap boundary. Batasan arah mensyaratkan bahwa, \mathbf{D}_i , parallel terhadap *boundary surface* normal, yang dihitung pada tiap *element face* pada *Inlet boundary*.

- **Komponen Kecepatan Cartesian**

Komponen kecepatan boundary ditetapkan, dengan non-zero resultant kedalam domain.

$$\mathbf{U}_{\text{inlet}} = U_{\text{spec}} \mathbf{j} + W_{\text{spec}} \mathbf{k} \quad (2.75)$$

- **Tekanan Total**

Tekanan Total, P_{tot} , untuk fluida incompressible didefinisikan sebagai

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{stat}} + 1/2 \rho U^2 \quad (2.76)$$

Dan ditentukan menggunakan tekanan total relatif dan arah aliran. Untuk aliran *compressible*, tekanan total didefinisikan sebagai



$$P_{\text{tot,inlet}} = P_{\text{stat,inlet}} \left[\frac{T_{\text{tot,inlet}}}{T_{\text{stat,inlet}}} \right]^{\frac{y}{y-1}} \quad (2.77)$$

Catatan :

Saat ini perhitungan g diatas hanya dilakukan, dimana C_p adalah konstanta. Di kasus lain, g diatur pada nilai 1.4. Jika anda menggunakan ekspresi untuk C_p , maka anda harus secara manual menambah nilai g menggunakan parameter ahli “*Specific Heat Ratio*”.

Batas normal terhadap pilihan *boundary* adalah sama seperti pada pilihan kecepatan normal. Secara alternatif, vektor arah dapat ditentukan secara eksplisit menggunakan tiga komponen. Pada kedua kasus boundary aliran massa adalah suatu hasil implisit simulasi aliran.

- **Laju Aliran Massa**

Batas laju aliran massa, ditentukan sepanjang arah komponen. Dimana influx massa dihitung menggunakan rumus

$$\rho U = \frac{m}{\int_s dA} \quad (2.78)$$

Dimana

$$\int_s dA \quad (2.79)$$

Adalah integrasi luasan *boundary surface* pada suatu resolusi mesh yang diberikan. Area tersebut berbeda dengan resolusi mesh karena resolusi menentukan bagaimana boundary surface diselesaikan. Nilai ρU dijaga tetap konstan diatas seluruh *boundary surface*.



- **Turbulensi**

Untuk model turbulensi $k-\varepsilon$ dan model *Reynolds stress* kuantitas turbulensi Inlet, k , dan ε , ditentukan secara langsung atau dihitung menggunakan skala distribusi pada Inlet dengan mengacu pada intensitas turbulensi, I , dimana

$$I = \frac{u}{U} \quad (2.80)$$

Aliran Inlet k dan ε melibatkan *advection* dan *diffusion*.

$$\begin{aligned} Q_{Inlet}^k &= Q_{advect}^k + Q_{diffus}^k \\ Q_{Inlet}^\varepsilon &= Q_{advect}^\varepsilon + Q_{diffus}^\varepsilon \end{aligned} \quad (2.81)$$

Aliran *advection* dievaluasi menggunakan perhitungan nilai Inlet k dan ε

$$\begin{aligned} Q_{Inlet}^k &= m k_{spec} \\ Q_{Inlet}^\varepsilon &= m \varepsilon_{spec} \end{aligned} \quad (2.82)$$

Assumsi aliran difusi diabaikan dan dibandingkan terhadap *advection*, dan ekuivalen/mendekati zero.

- **Intensitas Default dan Skala Panjang Autocompute**

Ketika intensitas turbulensi *Inlet* dipilih, maka nilai diatur mendekati :

$$I = \frac{u}{U} = 0,037 \quad (2.83)$$

Dengan suatu nilai taksiran untuk aliran pipa internal. Energi turbulensi *inlet* dihitung menggunakan :

$$k_{Inlet} = 3/2 I^2 U^2 \quad (2.84)$$

Dan dissipasi turbulensi dihitung menggunakan :



$$\varepsilon_{inlet} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\mu_t} \quad (2.85)$$

Dimana

$$\mu_t = 1000 I \mu \quad (2.86)$$

- **Intensitas dan Autocompute Length Scale**

Intensitas turbulensi ditentukan secara langsung dan distribusi k dan ε pada perhitungan inlet menggunakan hubungan *Default Intensity* dan pilihan *Autocompute Length Scale*.

- **Intensity dan Length Scale**

Intensitas turbulensi dan *length scale* ditentukan pada langkah awal perhitungan. Energy kinetik turbulensi dan dissipasi dihitung menggunakan rumus :

$$k_{inlet} = 3/2 I^2 U^2 \quad (2.87)$$

Dan

$$\varepsilon_{inlet} = k^{3/2} / l_i \quad (2.88)$$

- **K dan Epsilon**

Baik k dan ε ditentukan secara langsung:

$$K_{inlet} = k_{spec} \quad \text{dan} \quad \varepsilon_{inlet} = \varepsilon_{spec} \quad (2.89)$$

Ketika model *Reynolds stress* digunakan, *boundary conditions* inlet ditentukan dengan opsi turbulensi serupa untuk model $k-\varepsilon$, dan *stress tensors* diekstrak menggunakan nilai perhitungan k . Ini dilakukan dengan asumsi bahwa



boundary inlet menjadi *isotropic* dengan memperhatikan *Reynold stress*, komponen *normal stress* dan komponen *shear stress* mendekati nilai zero.

$$u_x u_x = u_y u_y = u_z u_z = 1/3 k \quad (2.90)$$

- **Heat Transfer**

1.Temperatur Static

Temperatur *Inlet Static* ditentukan menggunakan rumus,

$$T_{\text{stat,inlet}} = T_{\text{spec}} \quad (2.91)$$

Aliran energi inlet mencakup *advection* dan *diffusion*,

$$Q_{\text{inlet}} = Q_{\text{advect}} + Q_{\text{diffus}} \quad (2.92)$$

Aliran energi *advection* merupakan fungsi entalpi total spesifik, h_{tot}

$$Q_{\text{advect}} = m h_{\text{tot}} \quad (2.93)$$

Dimana h_{tot} dihitung dari entalpi statis spesifik, h_{stat} , dan kecepatan *boundary* pada inlet,

$$h_{\text{tot}} = h_{\text{stat}} + \frac{1}{2} U^2 \quad (2.94)$$

Entalpi statis dihitung menggunakan nilai T_{spec} yang telah ditentukan, nilai *boundary* U dan p , dan hubungan termodinamika $h=h(p,T)$ pada fluid. Evaluasi U bergantung pada keaslian spesifikasi momentum dan massa untuk *boundary condition*.

Aliran energi inlet melalui diffusi diassumsikan dapat diabaikan untuk kondisi *advection*, dan mendekati zero.



2. Temperatur Total

Boundary advection dan *diffusion terms* untuk temperatur total yang telah ditentukan, dievaluasi dengan seksama seperti pada penentuan temperatur statis, kecuali temperatur statis secara dinamis dihitung dari definisi temperatur total,

$$T_{\text{tot,Inlet}} = T_{\text{spec}} \quad (2.95)$$

Sedangkan untuk fluida dengan konstanta kapasitas panas :

$$T_{\text{stat,Inlet}} = T_{\text{tot,Inlet}} - \frac{U^2}{2C_p} \quad (2.96)$$

• Variabel Tambahan

Nilai variabel tambahan ditentukan secara eksplisit pada *inlet*.

$$\phi_{\text{Inlet}} = \phi_{\text{spec}} \quad (2.97)$$

Aliran inlet (ϕ) mencakup *advection* dan *diffusion*,

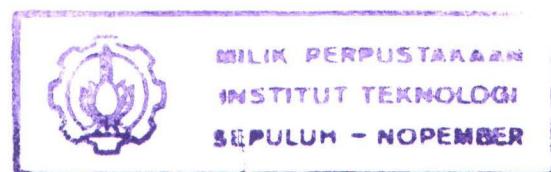
$$Q_{\text{Inlet}}^\phi = Q_{\text{advect}}^\phi + Q_{\text{diffus}}^\phi \quad (2.98)$$

Dan kuantitas *advection* dievaluasi menggunakan nilai (ϕ)

$$Q_{\text{advect}}^\phi = m\phi_{\text{spec}} \quad (2.99)$$

Aliran diffusi pada inlet diasumsikan dapat diabaikan sebagai pembanding *advection*, dan mendekati zero.

B. Outlet (subsonic)



• Tekanan Statis uniform

Tekanan statis relatif pada Outlet boundary didapat sebagai berikut :

$$P_{\text{stat,Outlet}} = P_{\text{spec}} \quad (2.100)$$



- **Normal Speed Out**

Magnitude kecepatan pada *outlet* ditentukan dan arah diambil normal terhadap *boundary* pada resolusi *mesh*.

- **Komponen kecepatan Cartesian**

Komponen kecepatan boundary ditentukan, melalui hasil resultan non-zero (tidak nol)

$$U_{\text{outlet}} = U_{\text{speci}} + V_{\text{spedj}} + W_{\text{speck}} \quad (2.101)$$

- **Tekanan Statis rata-rata**

Outlet Relativ Static Pressure persamaannya adalah

$$P_{\text{av}} = \frac{1}{A_s} \int P dA \quad (2.102)$$

- **Mass Flow Rate Out**

Distribusi massa di daerah Outlet ditentukan oleh aliran berat massa dinyatakan dalam persamaan :

$$m = \rho A F U \quad (2.103)$$

Dimana nilai F dihitung sehingga :

$$m_{\text{tot}} = \sum_{\text{all}} m \quad (2.104)$$

Dan The summation is over all boundary element faces thruogh which total mass flow is desired. Sehingga F dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F = \frac{m_{\text{tot}}}{\sum_{\text{all}} \rho A U} \quad (2.105)$$



Umumnya, F lebih besar dari atau kurang dari *unity*.

- **Turbulence, Heat Transfers and Additional Variables**

Untuk nilai perhitungan scalar, CFX-5 Solver menggunakan batasan konstanta gradien (*generally non-zero*) di Outlet boundary.

- **Heat Transfer**

1. **Temperatur statis**

Temperatur statis ditentukan pada *Opening boundary*

2. **Additional Variables**

Nilai Variabel Tambahan ditentukan pada Opening boundary :

$$\phi_{\text{Opening}} = \phi_{\text{spec}} \quad (2.106)$$

C. Wall

- **No Slip (Stationary)**

Kecepatan fluida pada *wall boundary* diatur mendekati *zero*, sehingga *boundary condition* untuk kecepatan menjadi :

$$U_{\text{wall}} = 0 \quad (2.107)$$

- **Free Slip**

Dalam kasus ini, komponen kecepatan paralel terhadap Wall, memiliki nilai finite (yang dihitung), tetapi kecepatan normal terhadap Wall, dan *wall shear stress*, diatur mendekati zero :



$$U_{n,wall} = 0$$

$$\tau_w = 0$$

(2.108)

- **No Slip (Moving)**

Untuk kasus berikut, fluida pada *wall boundary* bergerak pada kecepatan yang sama *wall*, sehingga, *boundary condition* :

$$U_{wall} = U_{speci} + V_{spedj} + W_{speck} \quad (2.109)$$

- **Counter Rotating Wall**

Untuk simulasi rotating frame, *Wall boundary* dapat ditentukan sebagai counter-rotating dengan mempertimbangkan rotasi domain. Dalam kasus ini, fluida pada *wall boundary* bergerak dengan kecepatan :

$$U_{wall} = -\omega R \quad (2.110)$$

Dimana *R* adalah jarak radial dari axis rotasi terhadap *Wall*.

- **Turbulensi**

Perlakuan *Wall boundary condition* untuk aliran turbulen adalah sama seperti aliran laminer, kecuali untuk *No Slip*.

- **Perpindahan panas**

Adiabatic Wall Boundary condition tidak memungkinkan terjadinya perpindahan panas pada *Wall boundary* :

$$q_{wall} = 0$$

(2.111)



1. Fixed Temperature

Temperatur *static* pada *wall boundary* :

$$T_{\text{stat,Wall}} = T_{\text{spec}} \quad (2.112)$$

2. Heat Flux

Heat flux pada *Wall boundary* ditetapkan sebagai :

$$q_{\text{Wall}} = q_{\text{spec}} \quad (2.113)$$

Koefisien perpindahan panas *Heat flux* pada *Wall boundary* dihitung menggunakan:

$$q_w = h_c (T_s - T_p) \quad (2.114)$$

Dimana h_c adalah koefisien perpindahan panas pada sisi dalam (telah ditentukan), T_s adalah temperatur *outside*, (yakni outside Domain Fluida) dan T_p adalah temperatur pada *internal near-wall boundary element centre node*.

- Variabel Tambahan

Opsi untuk kuantitas Variabel Tambahan pada *Wall boundaries* adalah analog terhadap perpindahan panas.

- Bidang Simetri

Bidang simetri *boundary condition* memberikan pembatas dengan cermin aliran pada kedua sisi. Sebagai contoh, komponen kecepatan normal pada boundary bidang simetri diatur mendekati zero :

$$U_n = 0 \quad (2.115)$$



Dan gradien normal Variabel scalar terhadap *boundary* juga diatur mendekati zero

:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (2.116)$$

BAB III

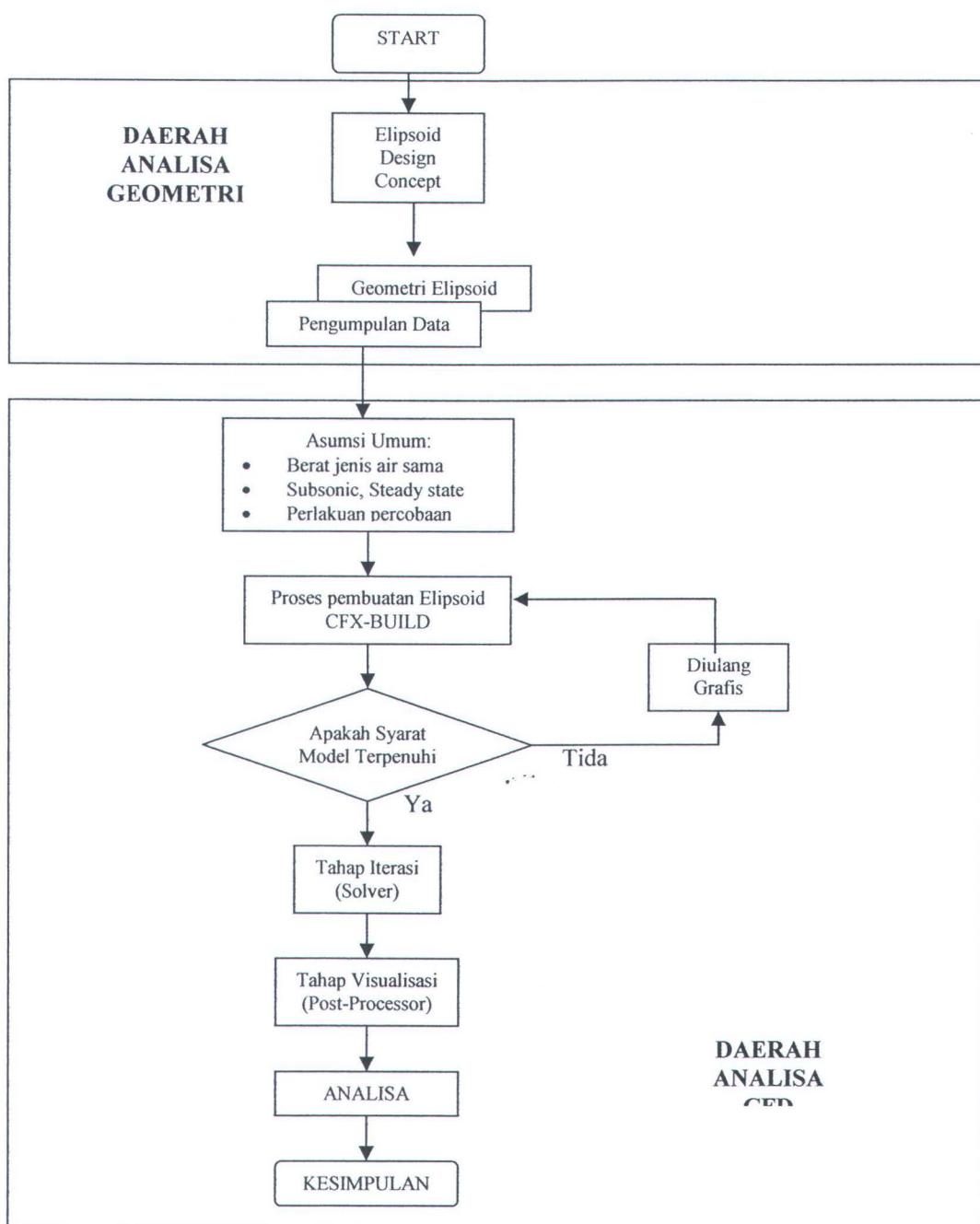
METODOLOGI



BAB III

METODOLOGI

Metode yang dipakai dalam tugas akhir ini meliputi uraian rincian desain, metode, dan pendekatan yang akan digunakan. Adapun alur metode dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



DAERAH
ANALISA
CFD



3.1. Geometri Elipsoid

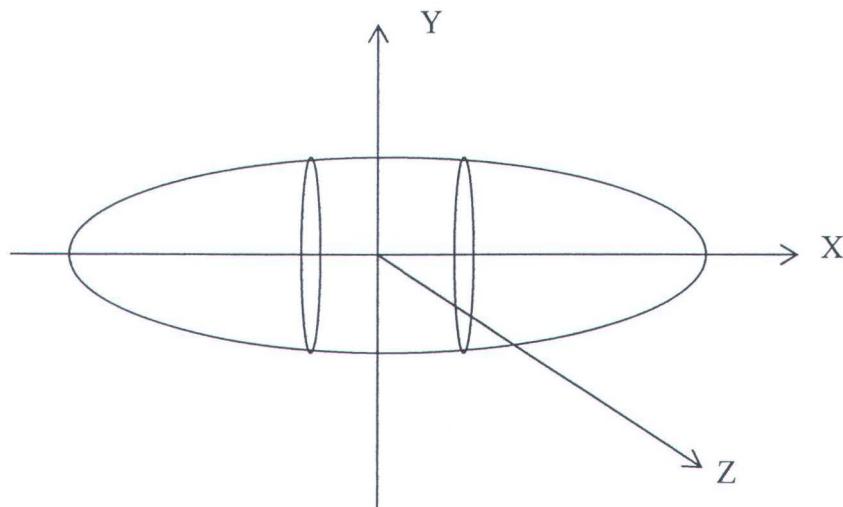
Pembuatan geometri elipsoid diperlukan untuk masukan model grafis di tahap *Pre-processor*. Langkah yang digunakan dalam pembuatan gometri elipsoid adalah sebagai berikut:

a. Rumus ellipsoid $\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1$

Dimana : a = setengah sumbu panjang arah sumbu X

b = setengah sumbu pendek arah sumbu Y

Untuk sumbu Z, panjang sumbunya sama dengan Y



Gambar 3.1. Bentuk Geometri Elipsoid

b. Perbandingan $a / b = 8$

Perbandingan $a / b = 8$ diambil karena pada umumnya kapal-kapal menggunakan ratio panjang lebar $L/B = 6$ sampai 10.

Jika $b = 1$ m

$a = 8$ m.

maka $L = 16$ m

$B = 2$ m.



3.2. Rencana Percobaan

Pemodelan untuk menghitung tahanan yang terjadi pada seluruh permukaan elipsoid yang terbenam di dalam fluida air laut yang perlu dilakukan pada perencanaan awal. Tujuannya adalah untuk effesiensi waktu dan mengoptimalkan hasil percobaan.

Karena media untuk percobaan menggunakan pendekatan CFD maka prosedur yang harus dilakukan adalah mempersiapkan dan menseleksi bentuk geometri obyek yang akan dianalisa, sifat, dan perlakuan fluida yang akan dimasukan dalam proses CFD.

Dimensional analisa geometri obyek berupa elipsoid 3D. Sifat dan karakteristik fluida perlu ditentukan didalam percobaan, antara lain *domain* fluida yang berkaitan dengan aliran fluida dalam bentuk *steady state* atau *transient*, tekanan dan kecepatan fluida dan sebagainya.

Dari rencana eksperimen diatas menggunakan 5 variasi angka Reynold mulai $Re = 10^2$, 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 dan 4 macam sudut kemiringan terhadap sudut aliran fluida yaitu 0° , 5° , 10° , dan 15° . Maka model dan iterasi dilakukan sebanyak 20 kali.

3.3. Rencana percobaan dari aspek CFD

CFX 5.4.1 menyediakan fasilitas untuk melaksanakan analisa fluida dinamik dengan 3 tahap yaitu *Pre-processor*, *Solver*, dan *Post-processor*. Dalam tahap *Pre-processor* masukan data dalam sub-bagiannya terdiri dan beberapa langkah. Langkah pertama di *Pre-processor* (CFX-Building) tersebut adalah sebagai berikut:



- A. Geometry Modeling
- B. Fluid Domains
- C. Boundary Conditions
- D. Initial Conditions
- E. Meshing
- F. Solver Control
- G. Definition File

Memasukan data untuk beberapa langkah tersebut, disesuaikan dengan kondisi obyek yang akan dianalisa. Di bawah ini akan memberikan batasan masalah dan masukan untuk data yang digunakan di dalam langkah-langkah *Pre-processor* atau *CFX-Build*.

A. Geometry modeling

Di tahap ini yang perlu dilakukan adalah mendesain obyek atau elipsoid secara grafis yang disediakan di CFX. Data rencana percobaan dapat dibuat ditahap ini. Ditahap ini yang perlu diperhatikan adalah satuan panjang yang digunakan meter, millimeter, feet dan sebagainya. Penentuan satuan ini akan berpengaruh terhadap pembuatan meshing. Data umum yang perlu dimasukan dalam tahap ini:

- Satuan geometri dan meshing dalam Meter (m), Berat (kg), Waktu (s).
- Solid 1 untuk tunnel dan solid 2 untuk elipsoid.



B. Fluid domains

Fluid domains adalah model fisik untuk analisa CFD. Geometri volume fluida dan daerah kerjanya dibuat pada tahap ini. Menu domain option yang dipilih untuk masukan data adalah:

- Tekanan : 101300 Pa
- Tipe Simulasi : Steady State
- Domain Motion : Stationary

Sedangkan menu model fluida yang dipilih adalah:

- Turbulance model : k-epsilon
- Heat Transher model : None
- Buoyancy Model : Non-Buoyancy

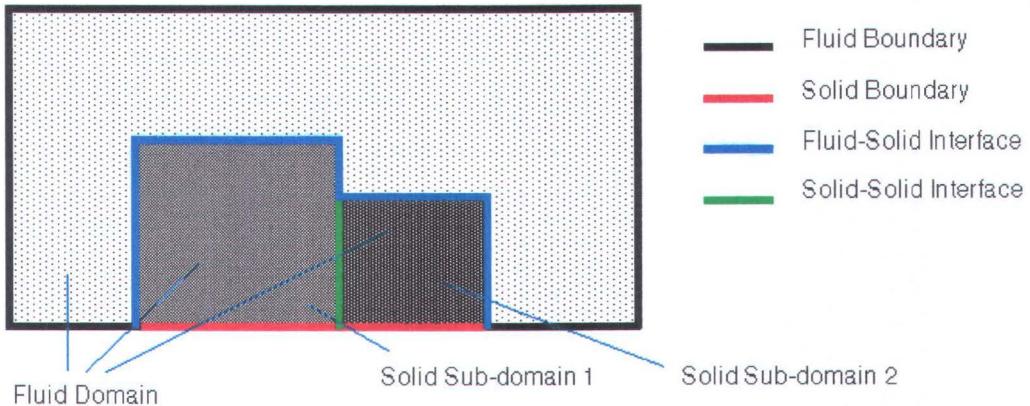
C. Boundary Conditions

Boundary condition di CFD untuk menentukan sifat atau kondisi dan surface di *Fluid Domain* dan *Sub-Fluid Domain*. Untuk uji aliran fluida dengan metode CFD, penentuan boundary condition sangat menentukan. Dari geometri elipsoid dan tunnel (*solid* dan *surface*) yang telah dibentuk pada tahap geometri modeling, langkah selanjutnya adalah menentukan boundary condition. Gambar 3.2 menunjukkan cara menentukan boundary condition untuk tipe *Fluid Boundary*, *Solid Boundary*, *Fluid-Solid Interface* dan *Solid-Solid Interface*.

Boundary Condition yang dibuat ada empat geometri dan pemilihan tipe boundary conditionnya dapat dilihat pada tabel 3.1. Lima *boundary condition* tersebut di CFX jenisnya ada *Inlet*, *Outlet*, *Opening*, *Wall*, *Components Model* dan



Additional Variabel Detail. Tetapi untuk pemodelan elipsoid ini menggunakan Inlet, Outlet dan Wall.



Gambar 3.2. Cara menentukan boundary condition

Boundary Condition	Nama	Jenis	Geometri	Type
Boundary Condition 1	Inlet	Fluid Boundary	Surface	Inlet
Boundary Condition 2	Outlet	Fluid Boundary	Surface	Outlet
Boundary Condition 3	Elipsoid	Fluid Boundary	Surface	Wall
Boundary Condition 4	Tunel	Fluid Boundary	Surface	Wall

Tabel 3.1. Identifikasi boundary condition pada model elipsoid dan tunnel

Inlet

Tipe inlet dan data yang penting untuk dipilih khususnya untuk inlet adalah:

Flow regime : Subsonic

Mass and momentum : Cartesian Velocity Components

$$U = 7,44 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}; V = 0, \text{ m/s} \text{ dan } W = 0 \text{ m/s}$$



Heat Transfer : *Static temperatur.*

Temperature : 15°C

Outlet

Tipe outlet dan data yang penting untuk dipilih khususnya untuk outlet adalah:

Flow regime : *Subsonic*

Mass and momentum : *Cartesian Velocity Components*

$$U = 7,44 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}; V = 0 \text{ m/s} \text{ dan } W = 0 \text{ m/s}$$

Wall

Tipe wall dan data yang dimasukan adalah:

Wall type : *Exterior Wall*

Wall Influence on Wall : *No Slip (Stationary)*

Wall Roughness : *Smooth Wall*

Heat Transfer : *Adiabatic*

D. Initial Conditions

Yang dimaksud initial condition adalah kondisi awal yang diperlakukan terhadap model yang akan diiterasi pada perhitungan steady state atau transient. Di tahap ini yang perlu dimasukan adalah memasukan kecepatan awal misalnya yaitu $7,44 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.



E. Meshing

Meshing di sini mengikuti default software CFX yang selalu berubah secara otomatis, artinya menyesuaikan dengan kondisi input data sebelumnya. Bagian ini, model diskritisasi CFD yang harus disempurnakan adalah membangun mesh, dimana sangat menentukan cepat atau lambatnya proses iterasi di solver. Untuk analisa CFD, software CFD-*Build* menawarkan dua cara pembuatan mesh, yaitu:

- *Advancing Front and Inflation (AFI)*

Meshing yang dibentuk melalui software CFX-*Build*

- *Volume Mesh Import*

Meshing yang diambil dengan import file.

CFX-*Build* mesh yang digunakan berdasarkan diskritisasi elemen *triangular/tetrahedral*. Software CFX-5.4.1 *Solver* mampu menganalisa bentuk elemen 3D termasuk elemen *prismatic*, *pyramidal* dan *hexahedral* serta *hybrid mesh* yaitu memakai lebih elemen tersebut. Dalam percobaan ini yang perlu diperhatikan adalah:

1. Set Mesh Parameter

Data yang dimasukan di tahap ini dapat mengikuti default yang telah ada atau memodifikasi. Untuk memodifikasi data inputan yang perlu diperhatikan adalah volume *mesh spacing* dan *surface mesh spacing*.

Volume mesh spacing umumnya untuk menentukan maksimum *edge length* yang digunakan untuk skala maksimum *background volume mesh*. Nilai defaultnya sebesar 5% dari ukuran geometri maksimum model. Sedangkan *surface volume spacing* terdapat empat pilihan yaitu terdiri dari:



- Use volume spacing
- Angular Resolution
- Relative Error
- Constant

Untuk kasus ini *surface volume spacing* menggunakan maksimum *edge length* yang telah ditentukan menurut *default*-nya atau melakukan modifikasi dengan membuat surface mesh yang lebih rapat.

2. Set Inflation Parameter

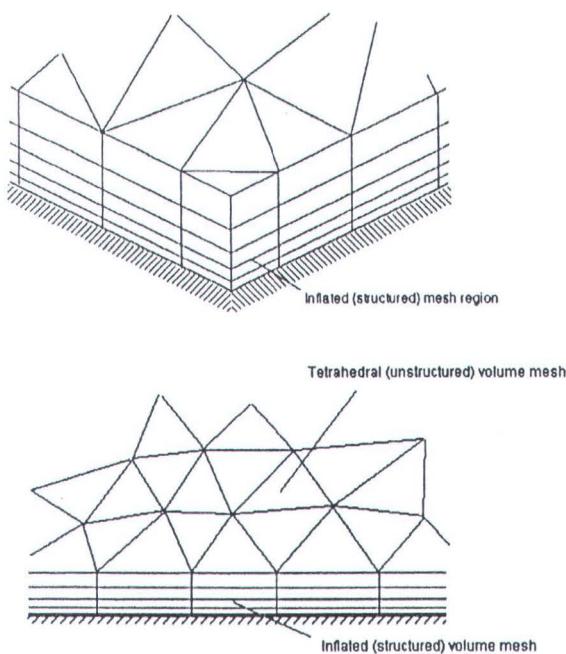
Di daerah dekat dinding *solid* (wall), efek *boundary* akan menyebabkan timbulnya gradient kecepatan lebih dari normalnya untuk *surface*. Untuk tahap komputerisasi, effesiensi *mesh* pada daerah tersebut dibutuhkan *aspect ratio* yang tinggi untuk elemen. Jika *tetrahedral* yang digunakan dengan *surface mesh* yang baik, yang perlu dihindari adalah munculnya distorsi elemen *tetrahedral* pada *surface*, lihat gambar 3.3.

Untuk itu AFI *mesher* menyelesaikan problem ini dengan menggunakan *mesh prismatic* yang akan menyelesaikan gradient kecepatan normal pada diding *surface*. Data inputan yang digunakan untuk menyelesaikan masalah ini mengikuti *default*-nya yaitu:

- Number of layers : 5
- Geometri Expansion Factor : 1.3
- Inflation Thickness Mulpilier : 1
- Advanced Quality Checking :
 - a. Number of spreading Interation : 0



b. Minimum InternalAngle (degrees) : 2.5



Gambar 3.3. Struktur inflated volume mesh

3. Mesh Control

Mesh Control berfungsi untuk mengoptimalkan *meshing*. Elipsoid yang dimodelkan seperti uji dalam tunnel, untuk mengoptimalkan dan effesiensi *meshing* semua titik tidak diperlukan *meshing* yang tinggi. Dengan *mesh control* kita dapat menentukan daerah *surface* yang ditingkatkan *mesh*-nya. Terdapat empat tipe bentuk *mesh* yang ditawarkan di CFX-Build yaitu:

- *Type Point*
- *Type Line*
- *Type Triangle*
- *Type Surface*

Gambar 3.4 menunjukkan bentuk *meshing* berdasarkan ke empat tipe tersebut di atas.

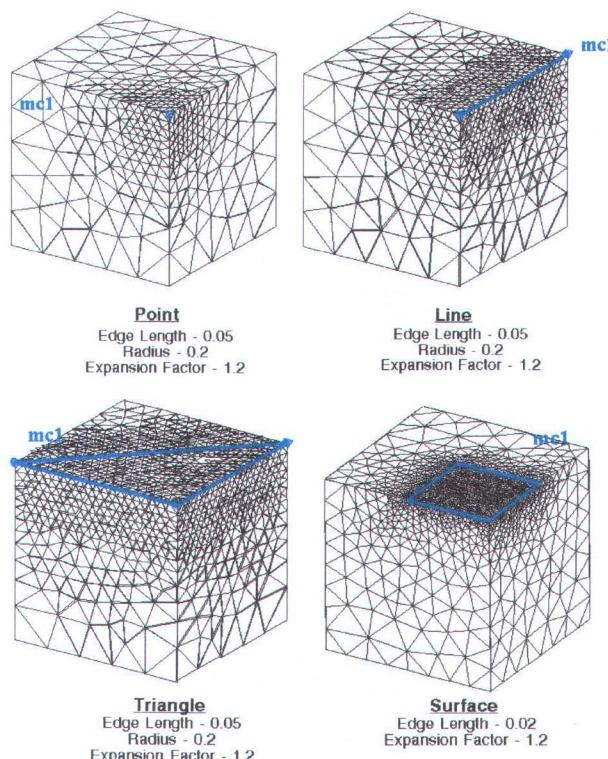


4. Inflated Boundary

Tahap ini kita menentukan surface yang akan dipilih untuk menjadi daerah boundary condition. Data inputan yang perlu dilakukan adalah menentukan tipe *inflation*. CFD-Build menyajikan dua tipe untuk *inflated boundary*, yaitu *boundary condition* dan *surfaces*. Nilai *maximum thickness* akan mucul mengikuti default berdasarkan inputan data sebelumnya. Nilai ini bisa dimodifikasi dengan nilai yang kita tentukan.

Untuk kasus elipsoid ini, *inflated boundary* menggunakan tipe *boundary condition*.

Ditipe ini yang akan dipilih adalah tipe *geometry* dengan *fluid boundary* jenis dinding (Wall). Model geometri elipsoid di CFD-Build terdapat dua tipe surface dengan jenis wall yaitu untuk *surface*: elipsoid dan tunel.



Gambar 3.4 Bentuk empat tipe mesh control



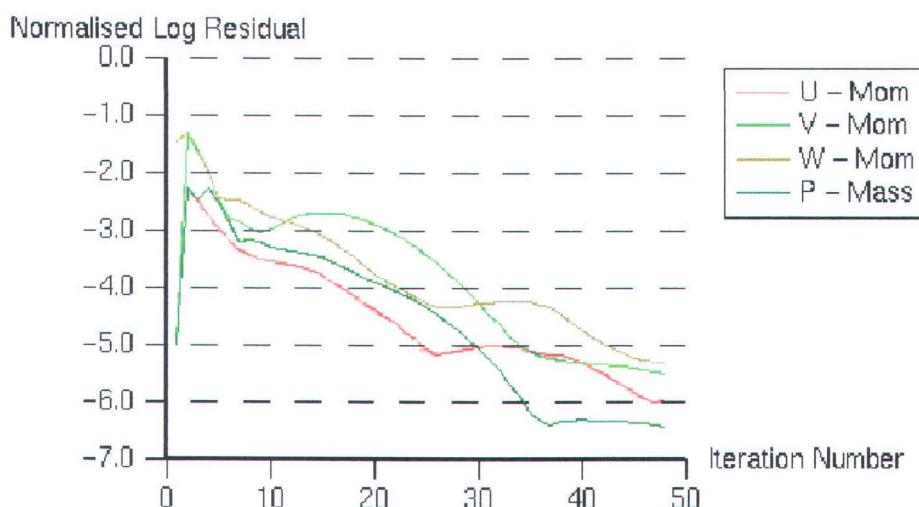
F. Solver Control

Solver control menentukan step iterasi yang diinginkan. Step iterasi di CFX tersedia antara 50 sampai 100. Untuk model ini step iterasi yang dipilih adalah 50 dengan metode timestep bernilai 1.

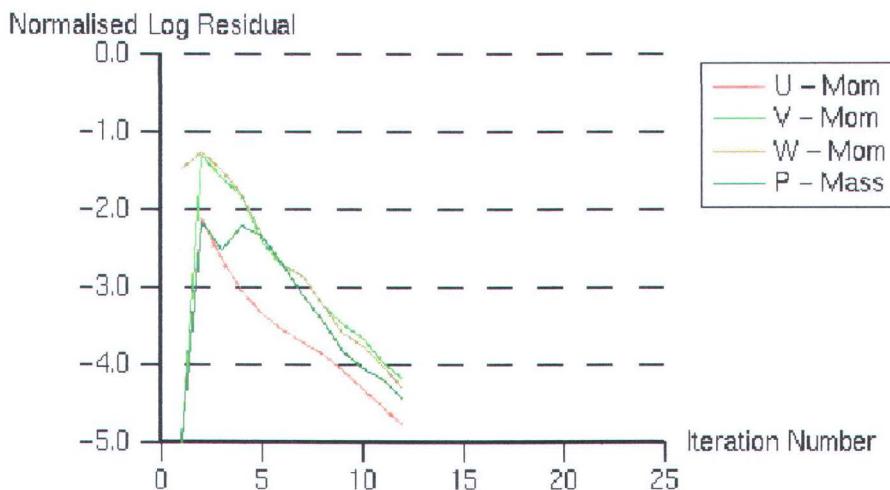
G. Definition File

Fungsi dari difinition file adalah menghimpun informasi yang dibutuhkan pada tahap *solving*. Bila terdapat data yang tidak sesuai atau error maka pada tahap ini akan memberi masukan untuk diperbaiki sesuai dengan aturan yang telah ditetapkan oleh software.

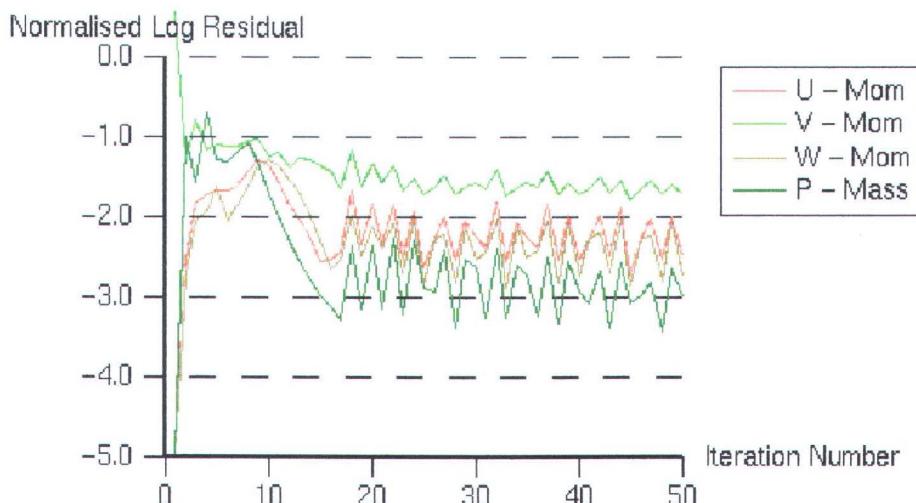
Langkah selanjutnya yang dilakukan apabila model yang digunakan untuk percobaan tersebut terpenuhi adalah melakukan *iterasi* dengan *solver manager*. Pada tahap ini kita akan tahu *convergensi iterasi* yang terjadi seperti *grafik 3.1* yang menunjukkan *convergensi* yang baik, *grafik 3.2* menunjukkan *convergensi* terlalu cepat dan *grafik 3.3* menunjukkan *convergensi* yang tidak diinginkan. Bila ini terjadi, maka perlu dilakukan perbaikan input pada tahap *Pre-processor*.



Grafik 3.1 Convergensi normal



Grafik 3.2 Convergensi terlalu dini (cepat)



Grafik 3.3 Convergensi yang tidak diinginkan (error)

Pada tahap Solver ini akan didapat hasil *iterasi* dan yang diambil adalah hasil *iterasi* berupa gaya terjadi di daerah elipsoid. Sedangkan pada tahap *Post-processor* atau visualisasi, kita dapat mengambil image dengan berbagai pilihan, antara lain distribusi tekanan, energi, density dan kecepatan.



3.4. Analisa Hasil

Analisa hasil akan dibicarakan lebih detail pada BAB V. Garis besar analisa hasil yang akan dilakukan adalah:

1. Validasi

Untuk validasi analisa CFD yang berbasis perhitungan numerik perlu dilakukan validasi untuk meyakinkan tentang percobaan/simulasi yang dilakukan cukup akurat. Ada tiga tipe validasi yang harus dilakukan, yaitu:

- *Convergence*
- *Grid Independence*
- Verifikasi hasil dengan teori atau data lain

2. Analisa *Meshing*

Analisa *meshing* ini bertujuan untuk mendapatkan bentuk visualisasi dan kuantitatif *numeric* yang akurat. Untuk mendeteksi *meshing* yang baik dapat dilihat dengan kerapatan *vector visualisasi*, distribusi sifat fluida dengan *surface visualisasi*, dan *stream visualisasi*.

3. Analisa Data

Analisa data yaitu mengambil data export (*Lampiran*) dan perhitungan *numeric/Quantitative Calculation* (*Lampiran*) yang dilakukan pada tahap CFX-Solver dan CFX-Visualise dengan mengacu pada proses validasi dan analisa *meshing*.

4. Analisa Grafik

Tahap analisa grafik adalah mempresentasikan data export dari CFX-Visualise yang telah dipilih dan memenuhi validasi, dibuat grafik koefisien tahanan untuk mengetahui tingkat tahanan pada tiap-tiap kecepatan percobaan.

BAB IV

HASIL DAN ANALISA



BAB IV

HASIL DAN ANALISA

4.1. Validasi

Untuk mendapatkan hasil yang akurat dan memastikan ketepatan prosedur penyelesaian masalah dan pengambilan data, maka perlu dilakukan validasi. Seperti yang dijelaskan pada sub-bab 2.6 proses validasi, terdapat tiga cara untuk validasi analisa CFD yaitu: *convergence*, *grid independence*, verifikasi hasil dengan teori atau data lain.

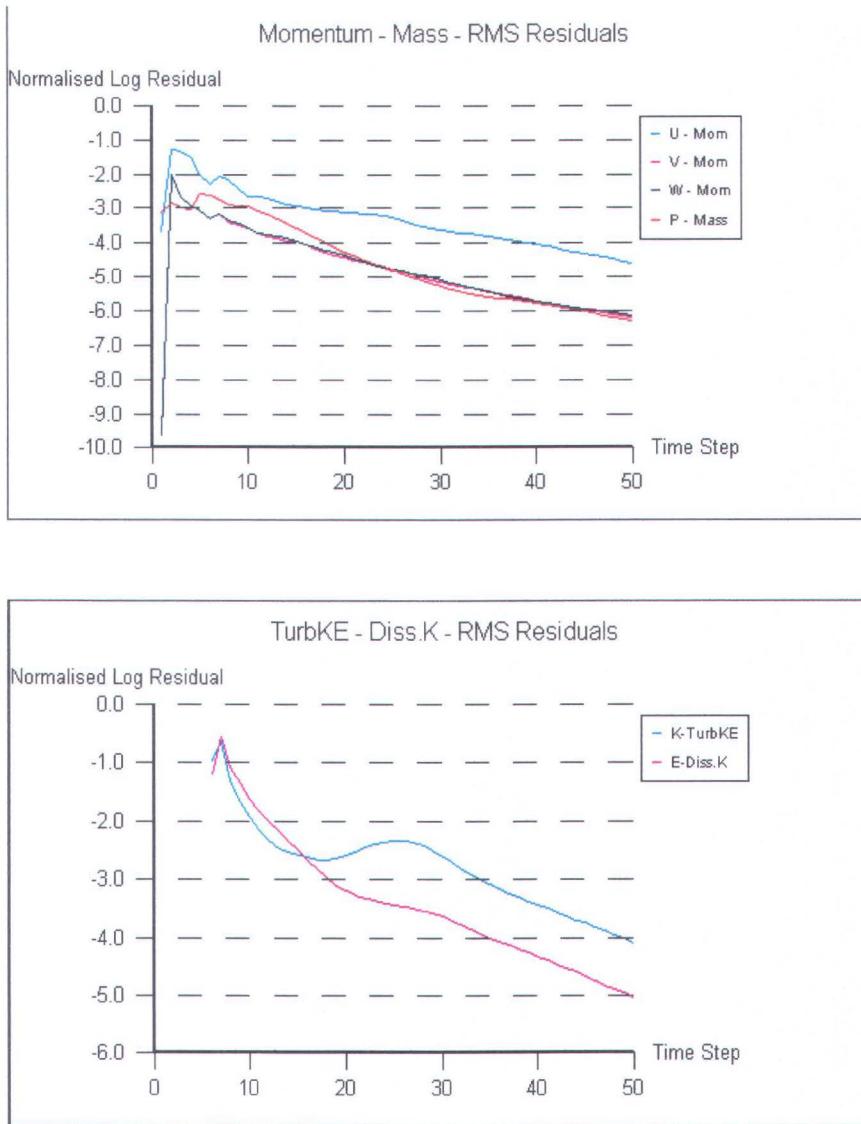
4.1.1. *Convergence*

Convergence adalah sifat metode numerik untuk menghasilkan penyelesaian eksakta dengan cara *grid spacing*, ukuran *control volume* atau ukuran elemen hingga dikurangi mendekati nol. Pada tahap ini proses iterasi perhitungan akan selalu dikontrol dengan persamaan pengendali. Jika hasil perhitungan belum memenuhi tingkat kesalahan yang diijinkan, maka komputasi akan terus berjalan. Di CFX Solver hasil dan persamaan pengendalinya ditampilkan dalam bentuk grafik. Gambar 4.1 menunjukkan hasil konvergensi normal dan iterasi di *solver* untuk RMS Residual (Momentum dan Mass) untuk ellipsoid pada posisi sudut 0° dan $V = 7.44 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Dengan persamaan kekekalan massa (3-1) dan dinyatakan dengan persamaan di Software CFX (3-16) bentuk grafik sebagai p = mass (berwarna biru) telah ditunjukan konvergensinya, Persamaan kekekalan momentum (3-8), (3-9), (3-10) yang dinyatakan dengan persamaan di Software CFX (3-17),



serta persamaan kekekalan momentum kearah x ($u=\text{mom}$), y ($v=\text{mom}$) dan z ($w=\text{mom}$) dengan jelas ditunjukan pada gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4.1.Grafik Convergance

Pada tahap Solver, sebanyak 20 titik harus dicari hasil iterasinya dengan 4 sudut yang berbeda dan 5 variasi kecepatan yang berbeda, sehingga membutuhkan sebanyak 20 kali iterasi. Dari 20 iterasi yang ada menghasilkan 20 titik untuk fenomena fluida dan harga nilai tahanan.

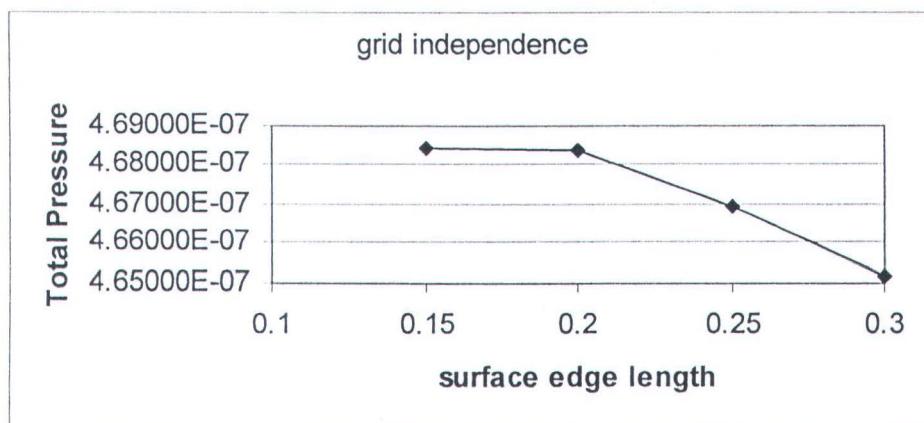


4.1.2. Grid Independence

Besarnya jumlah *cell* yang kita gunakan dalam perhitungan menentukan keakuratan hasil yang didapat. Akan tetapi jumlah *cell* yang banyak tidak selamanya akan menambah keakuratan hasil perhitungan. Dengan demikian jumlah *cell* yang optimum dituntut untuk dapat ditentukan, agar waktu dan memori komputer yang terpakai tidak terlalu besar.

Untuk mendapatkan jumlah *cell* yang optimal adalah dengan cara memvariasikan jumlah *cell* dengan cara mengatur *Mesh Parameter* dan *Mesh Control* untuk satu titik. Bila perubahan *cell* sudah tidak mempengaruhi hasil atau nilai akhir iterasi, maka dipilih jumlah *cell* yang paling rendah. Misalnya untuk surface edge length : 0.15, 0.2, 0.25, 0.3. Untuk surface edge length 0,15 dan 0,2 menghasilkan total tekanan sama maka yang dipakai adalah surface edge length 0.2. yang ditunjukkan dalam tabel dan grafik 4.2 dibawah ini

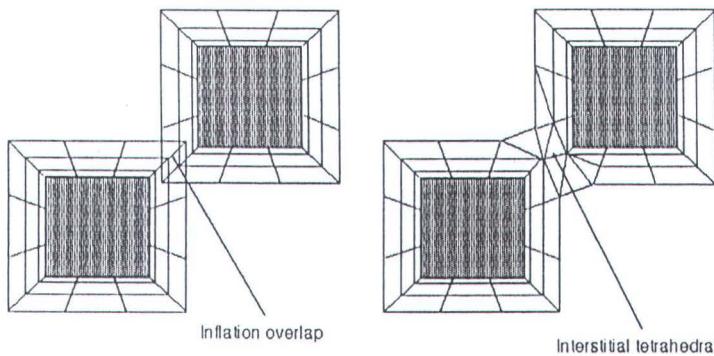
surface edge length	Number of Node	Area	Fy	Total Pressure
0.15	84792	78.1766	5.99189E-09	4.68426E-07
0.2	71779	78.1699	5.99196E-09	4.68391E-07
0.25	67785	77.9622	5.98913E-09	4.66926E-07
0.3	63052	77.6194	5.99329E-09	4.65196E-07



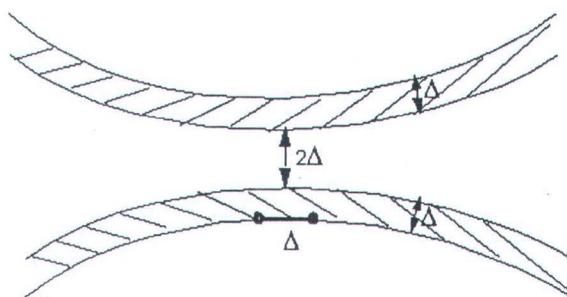
Gambar 4.2. Tabel dan Grafik Grid Independence



Fenomena yang tidak diinginkan adalah *premature iterasi*, *inflation overlap* dan *inflation gap*, kanena kesalahan di dalam pemilihan atau menentukan grid pada mesh control pada gambar 4.3 dan 4.4. dibawah ini :



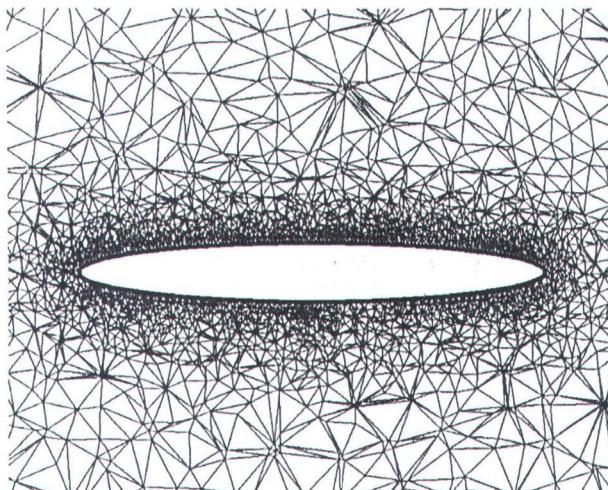
Gambar 4.3 Inflation layer interstitial



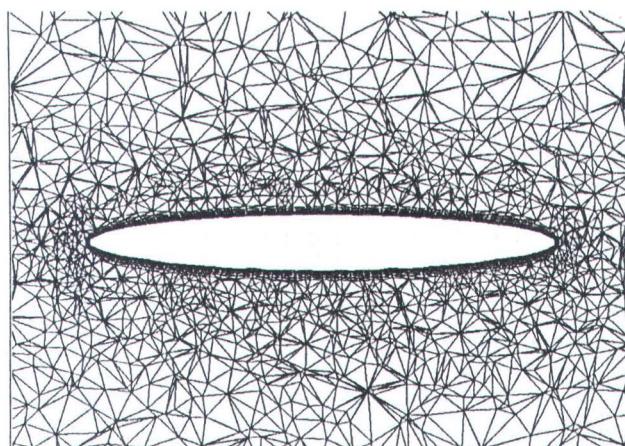
Gambar 4.4 Inflation gap



Untuk elipsoid dengan jumlah *cell* banyak atau grid yang rapat ditunjukkan pada gambar 4.4.a. dan jumlah *cell* yang sedikit atau grid yang besar ditunjukkan pada gambar 4.4.b.



Gambar 4.4.a. Jumlah cell yang banyak dengan grid yang rapat



Gambar 4.4.b. Jumlah cell yang sedikit dengan grid yang besar

Tipe grid yang dipilih untuk eksperimen ini adalah grid seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5.a. Dengan grid lebih rapat akan didapat hasil visualis yang lebih baik dan nilai iterasi dapat digunakan setelah dilakukan *grid independence*.

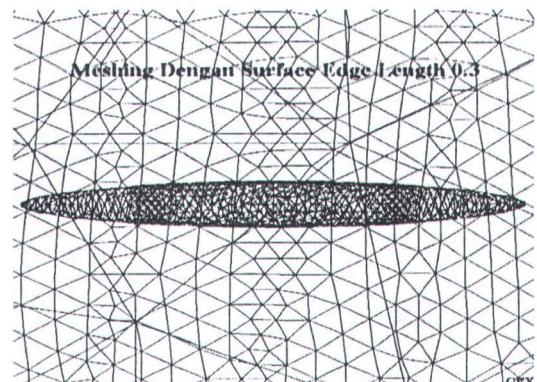
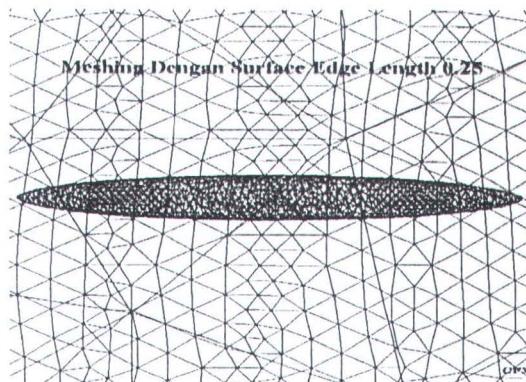
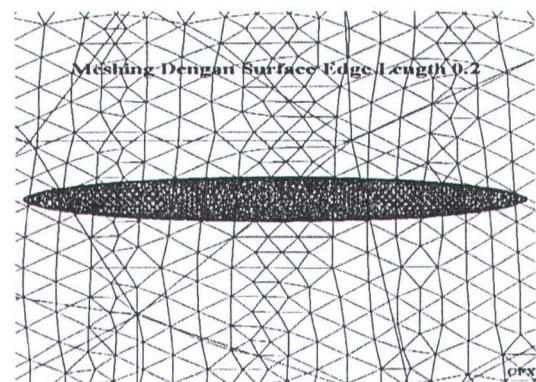
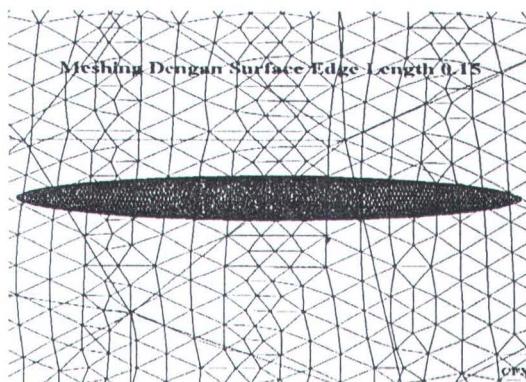


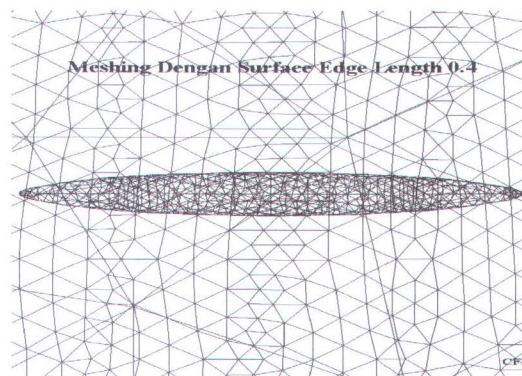
4.1.3. Verifikasi hasil dengan teori atau data lain.

Verifikasi hasil perlu dilakukan untuk membuktikan apakah hasil eksperimen mendekati hasil teori. Grafik koefisien tahanan menunjukkan kemiripan model grafik hasil teori dengan grafik yang telah dilakukan dalam tugas akhir ini. Grafik koefisien tahanan dari eksperimen ini dapat dilihat dalam subbab 4.4. analisa grafik.

4.2. Analisa Meshing

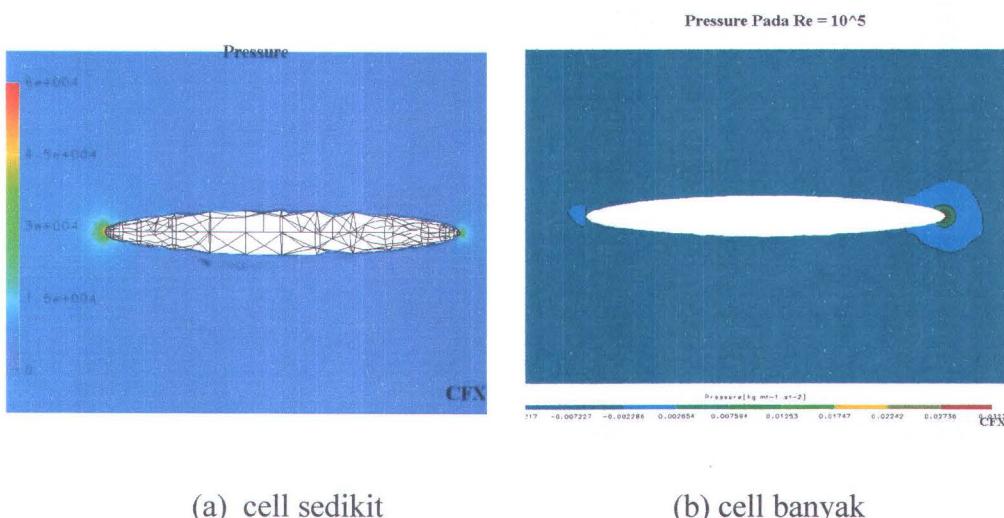
Pada BAB III sub-bab 3.2.E. *Meshing* telah dijabarkan pemilihan mesh untuk eksperimen. Pemilihan bentuk meshing dengan mengoptimalkan dan efisiensi meshing semua titik dipilih bentuk meshing dengan type Surface seperti pada gambar 4.5.





Gambar 4.5 Meshing ellipsoid pada masing-masing surface edge length

Type surface yang dipilih tersebut akan menghasilkan bentuk visualisasi di tahap post-prosesor seperti pada gambar 4.6.a, dengan surface edge length : 0.4 (grid renggang / cell sedikit), dan gambar 4.6.b. Surface edge length : 0.2 (grid rapat / cell banyak). Grid yang besar atau cell yang sedikit ditahap post-prosesor, kerapatan berkurang akibatnya bentuk dari elipsoid terlihat kurang stream line atau kurang bagus. Maka untuk hasil numerik yang ditunjukkan pada gambar 4.6.a tidak dapat dipakai untuk eksperimen pada semua titik.



(a) cell sedikit

(b) cell banyak

Gambar 4.6. Hasil visualisasi pressure dengan jumlah cell yang berbeda



4.3. Analisa Data

Data hasil perhitungan CFD di CFX-Visualise akan menghasilkan bentuk informasi yang dapat diambil berupa numerik dan grafis. Setiap titik yang disimulasikan menghasilkan data tentang variabel sifat-sifat fluida. Data yang dipakai adalah data yang telah divalidasi seperti yang dijelaskan pada sub-bab 4.1.

Adapun bentuk data di CFX-Visualise adalah:

- Data Export

Data Export terdiri dari *locator to export* dan *variable to export*. Data ini menunjukkan nilai numeric yang terdapat pada bagian surface yang dikenai *boundary condition* dengan nilai variabel berupa tekanan, temperatur, *density* dan lain-lain lihat tabel 5.1.

Locator to export		
1. Inlet	4. body	
2. Outlet		
3. wall		
Variable to export		
1. Density	9. Shear Strain Rate	17. Turbulence Eddi Dissipation
2. Density Viscosity	10. Specific Heat Capacity at Constant Pressure	18. Turbulence Kinetic Energy
3. Eddy Viscosity	11. Static Enthalpy	19. Velocity
4. Heat Transfer Coefficient	12. Temperature	20. Volume of Finite Volume
5. Isentropic Compressibility	13. Thermal Conductivity	21. Wall Heat Flux
6. Mach Number	14. Total Enthalpy	22. Wall Shear
7. Pressure	15. Total Pressure	23. Y plus
8. Pressure Gradient	16. Total Temperature	24. Coordinate
Write vector as		
1. All Components	4. Y Components only	
2. Magnitude	5. Z Components only	
3. X Components only		

Tabel 4.1 Data export : Locator, Variabel, dan Write Vector

Data Export memberikan informasi nilai numeric yang terdapat di beberapa titik pada surface yang dipilih. Nilai tersebut menunjukkan pada posisi (x,y,z) yang berada



pada surface yang dikenai sebagai boundary condition dan memiliki nilai variabel yang kita pilih. Tidak semua variabel dan data export digunakan di dalam analisa fluida, karena ada beberapa variabel yang tidak menunjukkan suatu perubahan nilai numeric yang berarti, misalnya variabel temperatur, Yplus dan Coordinate.

- Quantitative calculation

Quantitative Calculation (Lampiran) menghasilkan nilai numeric variabel yang dipilih. Berbeda dengan *Data Export*, nilai numeric yang didapat disini adalah nilai maksimum, minimum dan rata-rata dan variabel yang dipilih pada *locator* atau *surface* yang dikenai *boundary condition* pada tahap pre-processor. Format variasi data sama dengan *Data Export*, yaitu locator dan variabel sama dengan tabel 4.1. Dalam hal write vector tidak ada, akan tetapi CFX-Visualise memberikan tambahan kombinasi variabel yaitu untuk: Velocity dan Pressure Gradient.

- Visualisasi grafis

Visualisasi grafis adalah informasi tentang sifat fluida dalam bentuk grafis contoh hasil visualisasi grafis dapat dilihat pada gambar 4.6.

4.4. Analisa Grafis

Tahap analisa grafik adalah mempresentasikan data yang telah dipilih dan memenuhi validasi, kemudian dibuat grafik . Grafik yang dibuat dan dianalisa adalah :

- Grafik koefisien Geseck vs Re
- Grafik koefisien Pressure vs Re
- Grafik koefisien Drag vs Re



Hasil simulasi dari solver-manager di lampiran merupakan hasil yang berupa gaya-gaya (force) yang bekerja pada ellipsoid. Pada tiap-tiap eksperimen memiliki gaya gesek ke arah sumbu X dan gaya tekan kearah sumbu Y. Dalam tahap perhitungan, luas permukaan $S = 78,1699 \text{ m}^2$, berat jenis air laut = 1025 kg/m^3 , maka akan didapat hasil koefisien tahanan.

Sudut kemiringan $\alpha = 0^\circ$

Re	V (m/s)	Fx (Kg/ms ²)	Fy (Kg/ms ²)	Gaya Geser	Gaya Normal
100	7.4375E-06	2.21E-08	1.51E-07	1.7248E-06	1.18E-05
10000	0.00074375	8.31E-06	0.0001417	0.00064944	0.011076675
100000	0.0074375	0.000318	0.005239	0.02485803	0.409532106
1000000	0.074375	0.01612	0.360368	1.26009879	28.16993052
10000000	0.74375	0.95977	29.1741	75.0251249	2280.53648

Re	CF	CP	CD
100	0.77828804	5.313855953	6.092144
10000	0.02930547	0.499829659	0.52913513
100000	0.01121707	0.184799406	0.19601647
1000000	0.00568614	0.127115466	0.1328016
10000000	0.00338547	0.102908119	0.10629359

Tabel 4.2. Nilai CF, CP, dan CD pada sudut kemiringan 0°

Sudut kemiringan $\alpha = 5^\circ$

Re	V (m/s)	Fx (Kg/ms ²)	Fy (Kg/ms ²)	Gaya Geser	Gaya Normal
100	7.4375E-06	1.86E-08	9.49E-08	1.4512E-06	7.42E-06
10000	0.00074375	7.10E-06	0.000154	0.00055486	0.012038165
100000	0.0074375	0.0003145	0.0029815	0.02458443	0.233063557
1000000	0.074375	0.0138446	0.329466	1.082231	25.75432427
10000000	0.74375	0.92661	27.4612	72.433011	2146.639258

Re	CF	CP	CD
100	0.65483682	3.346918658	4.00175548
10000	0.02503787	0.543216426	0.56825429
100000	0.01109361	0.105168816	0.11626242
1000000	0.00488352	0.116215158	0.12109867
10000000	0.00326851	0.096866071	0.10013458

Tabel 4.3. Nilai CF, CP dan CD pada sudut kemiringan 5°

Sudut kemiringan $\alpha = 10^\circ$

Re	V (m/s)	Fx (Kg/ms ²)	Fy (Kg/ms ²)	Gaya Geser	Gaya Normal
100	7.4375E-06	1.89E-08	9.44E-08	1.4772E-06	7.38303E-06
10000	0.00074375	7.57E-06	0.00015178	0.00059197	0.011864627
100000	0.0074375	0.00033071	0.00804558	0.02585125	0.628922184
1000000	0.074375	0.0147896	0.511116	1.15610155	39.95388661
10000000	0.74375	0.966475	28.7316	75.5492541	2245.946299

Re	CF	CP	CD
100	0.667	3.332	3.998
10000	0.027	0.535	0.562
100000	0.012	0.284	0.295
1000000	0.005	0.180	0.186
10000000	0.003	0.101	0.105

Tabel 4.5. Nilai CF, CP dan CD pada sudut kemiringan 10° Sudut kemiringan $\alpha = 15^\circ$

Re	V (m/s)	Fx (Kg/ms ²)	Fy (Kg/ms ²)	Gaya Geser	Gaya Normal
100	7.4375E-06	2.03E-08	9.43E-08	1.5864E-06	7.36753E-06
10000	0.00074375	8.37E-06	0.000146498	0.00065446	0.011451734
100000	0.0074375	0.00036556	0.00752996	0.02857555	0.58861622
1000000	0.074375	0.0156224	0.458745	1.22120145	35.86005078
10000000	0.74375	1.00197	29.5076	78.3238947	2306.606141

Re	CF	CP	CD
100	0.716	3.325	4.040
10000	0.030	0.517	0.546
100000	0.013	0.266	0.279
1000000	0.006	0.162	0.167
10000000	0.004	0.104	0.108

Tabel 4.6. Nilai CF, CP dan CD pada sudut kemiringan 15°

Berdasarkan persamaan (2.10) harga CF diperoleh dari garis korelasi model kapal

ITTC 1957 didapat harga :

Hasil teoritis

Re	CF
100	0.4172
10000	0.01875
100000	0.00833
1000000	0.00469
10000000	0.003



4.4.1. Pembahasan

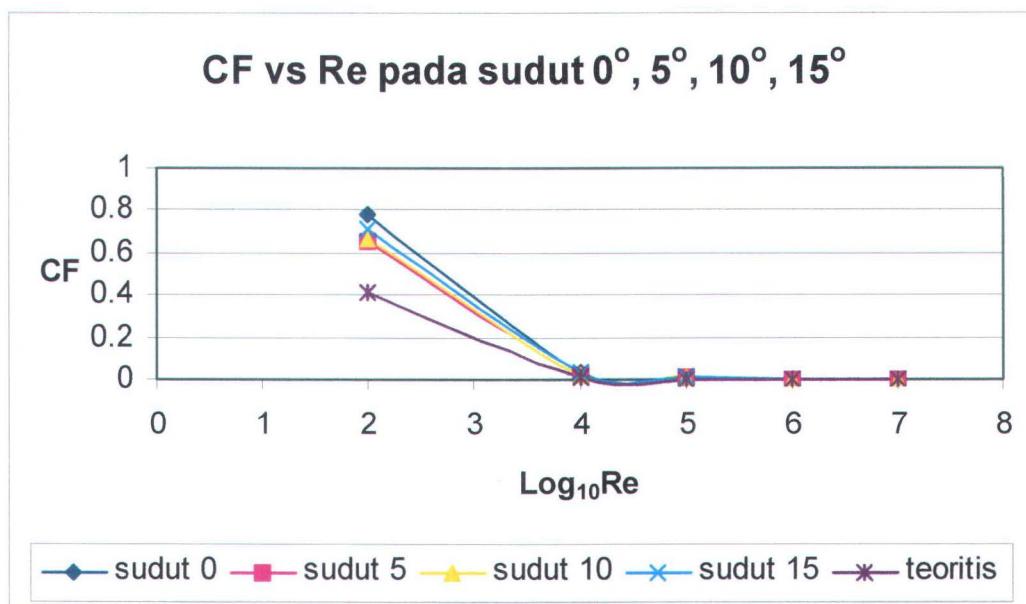
4.4.1.1. Koefisien Gesek vs Reynold number

Gambar 4.7, menunjukkan fenomena yang terjadi untuk nilai koefisien gesek terhadap variasi nilai Reynold number. Dari grafik tersebut terlihat bahwa terjadi penurunan nilai koefisien gesek seiring dengan meningkatnya nilai Reynold number (Re). Pada nilai Re yang rendah terlihat bahwa nilai koefisien gesek disini mempunyai harga yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai koefisien gesek pada Re yang lebih tinggi karena pada $Re = 10^2$ alirannya laminar lebih mendominasi.

Pengaruh perubahan sudut masuk aliran fluida sedikit sekali merubah nilai CF pada masing-masing harga Reynold number (Re) dikarenakan jumlah komponen-komponen dari tegangan geser sepanjang dinding elipsoid pada arah gerak adalah sama.

Dari eksperimen pada $Re = 10^2$ harga CF besar karena bentuk alirannya laminar, sehingga tegangan geser seluruhnya terjadi pada dinding elipsoid. Pada $Re = 10^4 \sim 10^5$ telah muncul bentuk aliran turbulence sehingga menurunkan harga $CF \pm 3\%$ dari total drag. Pada harga $Re = 10^6$ bentuk aliran laminar berubah menjadi turbulence yang terjadi di belakang elipsoid secara tetap sampai harga $Re = 10^7$ dan harga CF berangsurngsur turun secara linier.

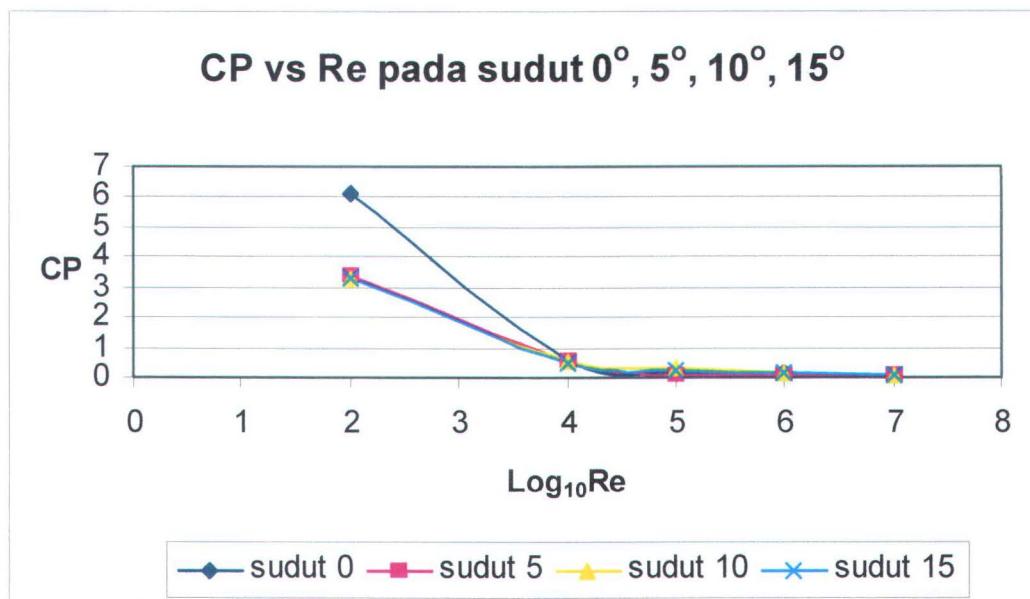




Gambar 4.7. Grafik Koefisien Gesek vs Reynold number

4.4.1.2. Koefisien Pressure vs Reynold number

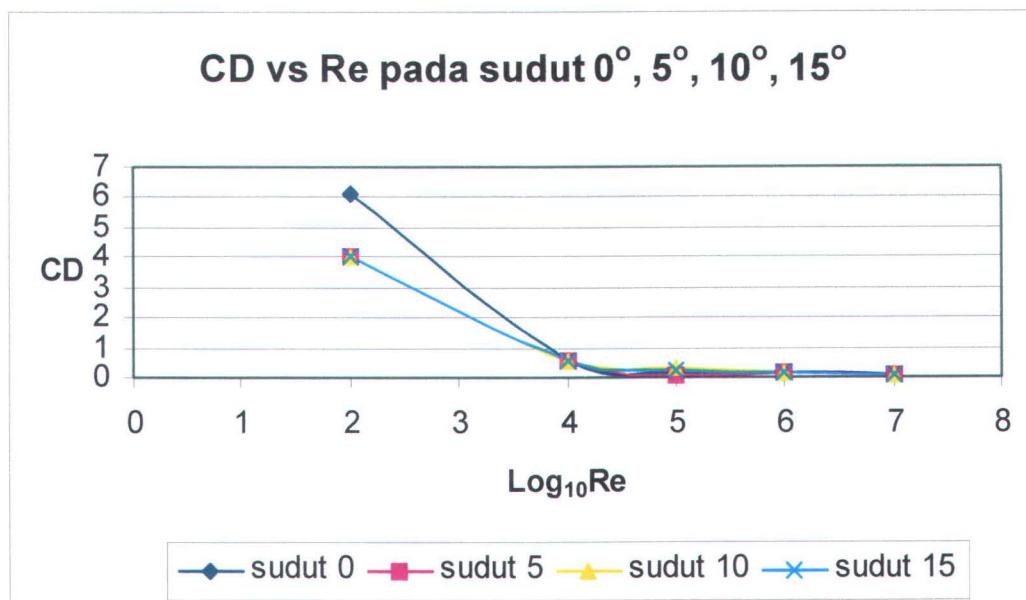
Berdasarkan gambar 4.8. diatas, fenomena yang terjadi pada eksperimen ini menunjukkan bahwa nilai koefisien tekan pada elipsoid mengalami penurunan sesuai dengan semakin besar harga Re. Pada $Re = 10^2$ harga koefisien tekan terbesar terjadi pada sudut 0° dikarenakan pressure terjadi tegak lurus pada bagian depan elipsoid. Pada sudut $5^\circ, 10^\circ$ dan 15° pada $Re = 10^4, 10^5, 10^6$, dan 10^7 nilai koefisien tahanan tekan hampir sama. Karena bentuknya streamline menghasilkan ukuran wake turbulence minimum yang mengakibatkan penurunan tahanan tekan dan menciptakan perubahan tekan yang gradui.



Gambar 4.8. Grafik Koefisien Pressure vs Reynold number

4.4.1.2. Koefisien Drag vs Reynold number

Koefisien drag merupakan jumlah tahanan gesek dan tahanan tekan. Fenomena yang terjadi tidak jauh berbeda dengan penjelasan yang diatas. Dimana koefisien drag semakin turun dengan bertambahnya harga Reynold number. Pada $Re 10^2$ harga CD paling besar karena bentuk alirannya laminar yang mana CF dan CP harganya besar. Pada $Re 10^4$ selanjutnya harga CD turun tajam karena mulai terbentuk aliran turbulan. Pada $Re 10^5\sim 10^7$ harga CD mulai turun secara stabil dan linear karena terjadi pengurangan ukuran wake dan tahanan tekan.



Gambar 4.9. Grafik Koefisien Tahanan vs Reynold number

4.4.2. Koreksi Luas Permukaan Elipsoid

Koreksi luas permukaan basah elipsoid hasil teori dengan perhitungan

CFX

Luas permukaan ellipsoid dengan CFX adalah 78,1699 m²

Luas permukaan dengan perhitungan teori adalah :

X	Y	FS	K	FS x K
0	1	1	6.2800	6.2800
1.6	0.98	4	6.1544	24.6176
3.2	0.91	2	5.7148	11.4296
4.8	0.8	4	5.0240	20.0960
6.4	0.6	1.375	3.7680	5.1810
7	0.484	1.5	3.0395	4.5593
7.6	0.32	0.5	2.0096	1.0048
7.8	0.23	0.5	1.4444	0.7222
8	0.01	0.125	0.0628	0.0079
				E1 = 73.8983

$$d = 1.6$$

$$\begin{aligned} WSA &= (1/3 \times d \times E1) \times 2 \\ &= 78.82488533 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Koreksi Luas} &= (\text{WSA teoritis} - \text{WSA hasil CFX}) / \text{WSA teoritis} \times 100 \% \\ &= (78.82488 - 78.1699) / 78.82488 \times 100 \% \\ &= 0.83 \% \end{aligned}$$



Hasil perhitungan dengan menggunakan CFX-5 dengan perhitungan hasil teori menunjukkan kesamaan yang tidak jauh berbeda selama pengambilan validasi dilakukan dengan baik dan benar.

4.5. Analisa Sifat Fluida di Sekitar Elipsoid

Analisa sifat fluida disekitar elipsoid bertujuan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi terhadap elipsoid yang dialiri fluida air dengan variasi angka Reynold. Analisa disini dilakukan dengan pendekatan visualis grafis dalam bentuk vektor, surface, dan stream. Sifat-sifat fluida yang akan dianalisa disekitar elipsoid adalah :

- Density
- Tekanan
- Gradient Tekanan
- Kecepatan

4.51. Density

Hukum kekekalan massa menyatakan keseimbangan massa elemen fluida yang masuk dan keluar elemen fluida adalah sama sedangkan hukum kekekalan momentum menyatakan bahwa perubahan momentum yang terjadi pada partikel fluida adalah sama dengan jumlah gaya-gaya pada partikel tersebut. Persamaan kedua hukum tersebut dapat dilihat pada persamaan (2-1) sampai dengan (2-10)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa massa jenis akan berpengaruh terhadap kedua hukum tersebut. Untuk fluida *incompresible*, perubahan massa jenis terhadap perubahan waktu akan mempengaruhi besar momentum dan energi. Pada lampiran menunjukkan tentang kondisi berat jenis fluida disekitar elipsoid.



4.5.2. Tekanan (Pressure)

Distribusi tekanan disekitar dinding elipsoid (wall) dapat dilihat pada Lampiran hasil visualis

Pada gambar tersebut diilustrasikan bagaimana fenomena tekanan yang terjadi disekitar

elipsoid dan arah tekanannya. Dan juga diperlihatkan tentang kontur tekanan yang terjadi akibat adanya kekuatan fluida masuk pada domain.

Tekanan disini melemah setelah berada pada belakang elipsoid.

Pada bagian depan tekanannya tinggi dan kecepatan rendah, kemudian pada bagian tengah kecepatan tinggi dan tekanan berkurang dan pada akhirnya dibagian belakang tekanan tinggi dan kecepatan berkurang.

4.5.3. Gradient Tekanan

Distribusi gradien tekanan dapat dilihat pada lampiran. Pada kondisi streamline, gradien tekanan yang terbesar terdapat di ujung elipsoid dan bagian belakang, dimana harga maksimum terdapat pada ujung elipsoid. Sedang pada elipsoid yang memiliki sudut kemiringan pressure gradient terbesar pada daerah bawah.

4.5.5. Kecepatan (Velocity)

Lampiran menunjukkan tentang fenomena dari pengaruh kecepatan yang terjadi yang menggambarkan aliran yang streamline. Pada sudut kemiringan 0° pada ujung elipsoid terjadi titik stagnasi dimana kecepatan sama dengan nol dan



berbanding terbalik dengan pressure yang memiliki harga maksimum. Pada bagian tengah terjadi kenaikan harga kecepatan dan turun lagi pada posisi belakang elipsoid.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dalam hasil eksperimen secara numerik dengan menggunakan software CFX maka dalam hal ini bisa ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Analisa tahanan dengan pendekatan CFD, telah menunjukkan fenomena yang terjadi pada elipsoid dimana semakin bertambahnya angka Reynold semakin berkurang koefisien tahanan.
2. Karena fluida mempunyai viskositas yang menyebabkan terjadinya gesekan dan pola aliran fluida. Pada Re 10² dihasilkan harga CF terbesar, karena boundary layer seluruhnya laminar. Pada Re 10⁴ harga CF turun tajam karena mulai terbentuk aliran turbulan, kemudian harga CF turun perlahan-lahan dan hampir konstan pada Re 10⁶ – Re 10⁷ karena terjadi perubahan bentuk aliran dari laminar ke turbulan secara konstan.
3. Harga tahanan tekan tergantung dari bentuk body dibawah fluida. Karena bentuknya streamline sehingga separation point/eddies yang timbul kecil maka harga CP tidak mendominasi harga CD walaupun harga Re semakin besar.
4. Sudut kemiringan elipsoid pengaruhnya sedikit sekali terhadap perubahan harga CD.

5.2. Saran

Untuk mendapatkan harga tahanan yang optimal dalam desain bentuk elipsoid khususnya desain kapal selam, variasi angka Reynold diperbanyak sehingga pola dari grafik yang didapat lebih akurat, serta variasi perbandingan L/B diperbanyak sehingga pada L/B berapa harga tahanan optimum.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

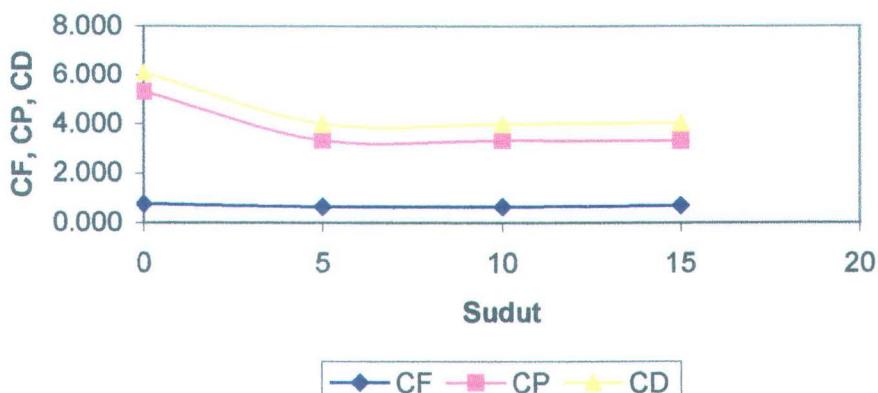
1. AEA Technology plc, Using CFX-5 for Unix & windows NT, Didcot, Oxfordshire OX11 ORA, United Kingdom, 1999
2. H.K. Versteeg and W. Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics The finite volume method, Malaysia Longman Group Ltd. 1995.
3. Harvald , Sv. Aa, Resistance and Propulsion of Ship, A Wiley Interscience Publication, 1983.
4. Todd, FH, Resistance and Propulsion, Principles of Naval Architecture, Chapter VII, Publised by The Society of Naval Architecture and Marine Engineers, New York, 1977.
5. Murtedjo, Mas, Studi Eksperimental Penentuan Tahanan Total Pada Semi-Submersible, Lembaga Penelitian ITS, Surabaya, 1998.

**LAMPIRANA
DATA HASIL**

Re 100

	CF	CP	CD
Sudut 0°	0.778	5.314	6.092
Sudut 5°	0.655	3.347	4.002
Sudut 10°	0.667	3.332	3.998
Sudut 15°	0.716	3.325	4.040

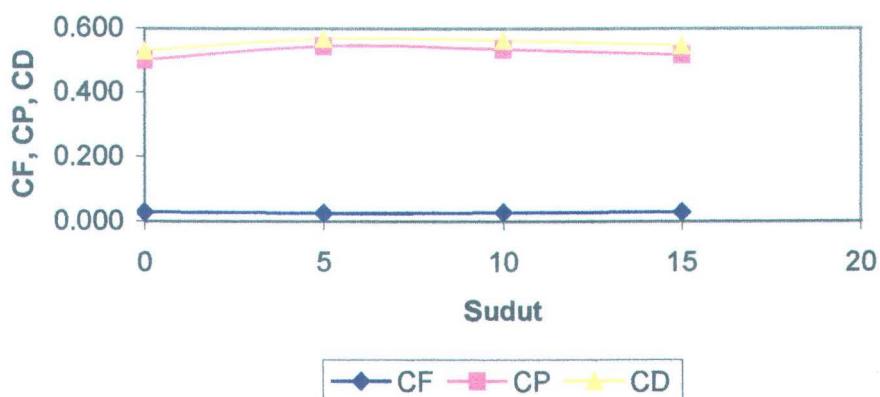
CF, CP, CD vs Variasi Sudut pada Re 100



Re 10^4

	CF	CP	CD
Sudut 0°	0.029	0.500	0.529
Sudut 5°	0.025	0.543	0.568
Sudut 10°	0.027	0.535	0.562
Sudut 15°	0.030	0.517	0.546

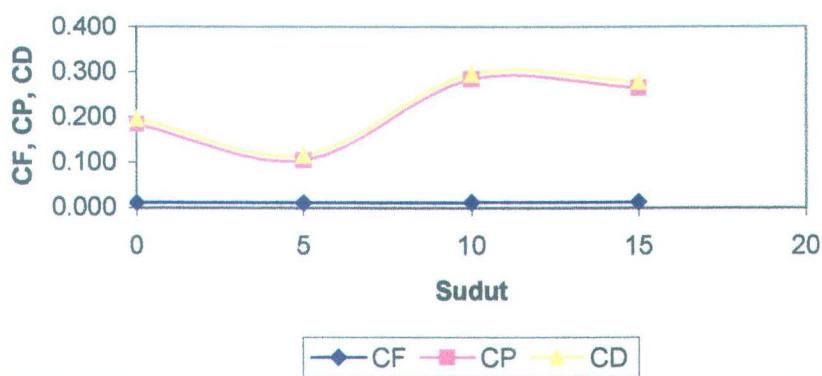
CF, CP, CD vs Variasi Sudut pada Re 10^4



$Re \times 10^5$

	CF	CP	CD
Sudut 0°	0.011	0.185	0.196
Sudut 5°	0.011	0.105	0.116
Sudut 10°	0.012	0.284	0.295
Sudut 15°	0.013	0.266	0.279

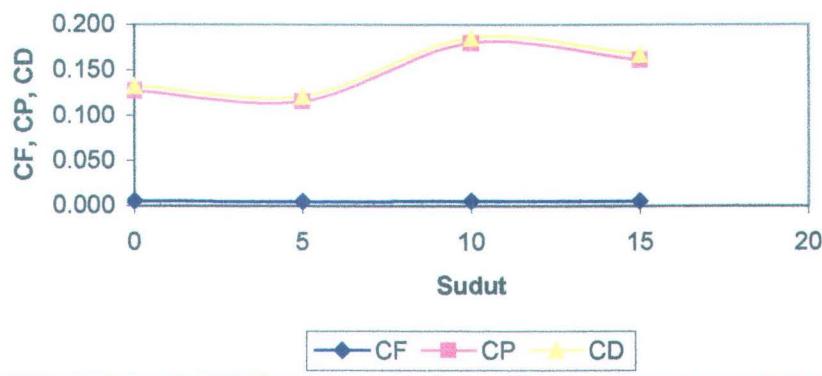
CF, CP, CD vs Variasi Sudut pada $Re \times 10^5$



$Re \times 10^6$

	CF	CP	CD
Sudut 0°	0.006	0.127	0.133
Sudut 5°	0.005	0.116	0.121
Sudut 10°	0.005	0.180	0.186
Sudut 15°	0.006	0.162	0.167

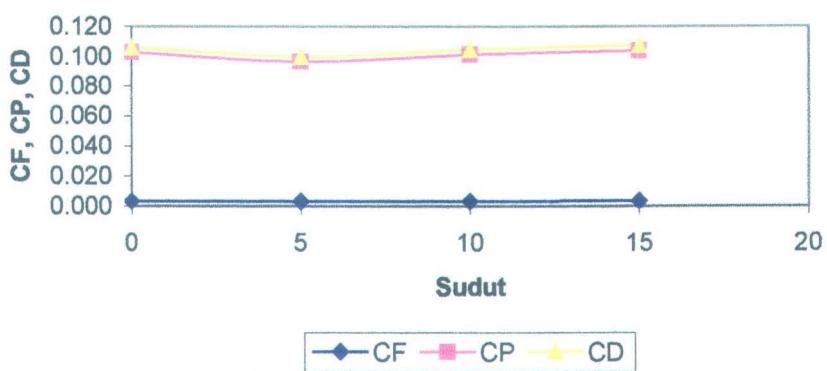
CF, CP, CD vs Variasi Sudut pada $Re \times 10^6$



$Re \cdot 10^7$

	CF	CP	CD
Sudut 0°	0.003	0.103	0.106
Sudut 5°	0.003	0.097	0.100
Sudut 10°	0.003	0.101	0.105
Sudut 15°	0.004	0.104	0.108

CF, CP, CD vs Variasi Sudut pada $Re \cdot 10^7$



KOEFISIEN PRESURE LOKAL

Sudut 0°

Koordinat			CP				
X	Y	Z	Re 10 ²	Re 10 ⁴	Re 10 ⁵	Re 10 ⁶	Re 10 ⁷
8.01	0.05	0.00	0.3980	0.25371	0.26359	0.25566	0.25065
7.81	0.28	0.00	0.0360	0.04603	0.09730	0.10183	0.10092
7.61	0.37	0.00	-0.0354	-0.02357	0.04392	0.05283	0.04977
7.21	0.49	0.00	-0.0935	-0.07522	0.00205	0.01411	0.01530
6.41	0.66	0.00	-0.1875	-0.10104	-0.01685	-0.00202	0.00133
4.81	0.86	0.00	-0.2860	-0.13471	-0.04110	-0.02423	-0.01060
3.21	0.97	0.00	-0.3110	-0.14145	-0.04455	-0.02732	-0.03593
1.61	1.03	0.00	-0.3254	-0.15268	-0.05195	-0.03459	-0.03574
0.01	1.06	0.00	-0.3540	-0.17288	-0.07051	-0.05084	-0.03445
-1.61	1.03	0.00	-0.3641	-0.17288	-0.07026	-0.05035	-0.03997
-3.21	0.97	0.00	-0.3687	-0.18074	-0.07618	-0.05790	-0.03994
-4.81	0.86	0.00	-0.3867	-0.18411	-0.07528	-0.05394	-0.05063
-6.41	0.66	0.00	-0.3987	-0.19983	-0.08459	-0.05912	-0.04469
-7.21	0.49	0.00	-0.4110	-0.20432	-0.08747	-0.06183	-0.04971
-7.61	0.37	0.00	-0.4021	-0.19197	-0.07785	-0.05051	-0.03027
-7.81	0.28	0.00	-0.3431	-0.17288	-0.06233	-0.02852	-0.00159
-8.01	0.05	0.00	-0.2421	-0.11563	-0.01215	0.04690	0.08461

Sudut 5°

Koordinat			CP				
X	Y	Z	Re 10 ²	Re 10 ⁴	Re 10 ⁵	Re 10 ⁶	Re 10 ⁷
7.98	0.75	0.00	0.406453	0.180741	0.046813	0.066352	0.06235
7.76	0.96	0.00	0.386450	0.168392	0.035295	0.052115	0.04223
7.55	1.03	0.00	0.383801	0.160534	0.026516	0.039331	0.02449
7.14	1.17	0.00	0.384516	0.166147	0.027931	0.035855	0.01933
6.33	1.22	0.00	0.376351	0.159411	0.022733	0.029906	0.01307
4.72	1.28	0.00	0.395432	0.162779	0.026179	0.032018	0.01449
3.11	1.25	0.00	0.396425	0.175128	0.033151	0.037015	0.01880
1.51	1.17	0.00	0.398769	0.177373	0.038135	0.042707	0.02523
-0.08	1.06	0.00	0.399986	0.178496	0.037899	0.040769	0.02299
-1.69	0.89	0.00	0.410755	0.189722	0.048531	0.050479	0.03326
-3.28	0.69	0.00	0.410220	0.193090	0.053975	0.057522	0.04094
-4.87	0.44	0.00	0.421023	0.211052	0.067884	0.068662	0.05258
-6.44	0.10	0.00	0.445300	0.234626	0.087833	0.087921	0.07198
-7.23	-0.14	0.00	0.497325	0.276163	0.124363	0.122293	0.10672
-7.61	-0.30	0.00	0.522098	0.340152	0.177901	0.173777	0.15822
-7.81	-0.40	0.00	0.589935	0.395160	0.223277	0.217798	0.20177
-7.98	-0.65	0.00	0.643026	0.501809	0.323998	0.320302	0.30548

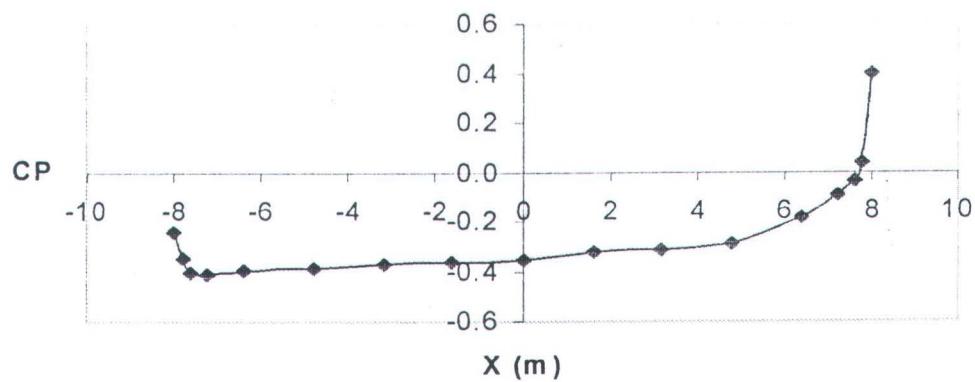
Sudut 10

Koordinat			CP				
X	Y	Z	Re 10^2	Re 10^4	Re 10^5	Re 10^6	Re 10^7
7.88	1.44	0.00	0.420645	0.162779	0.091493	0.075321	0.06493
7.64	1.63	0.00	0.396450	0.152676	0.079739	0.059301	0.04609
7.43	1.69	0.00	0.387380	0.154921	0.080671	0.052936	0.03619
7.02	1.73	0.00	0.389742	0.158289	0.084095	0.055621	0.03894
6.20	1.76	0.00	0.387623	0.180741	0.104740	0.075745	0.05885
4.59	1.68	0.00	0.389654	0.181864	0.105627	0.073599	0.05509
2.99	1.51	0.00	0.391264	0.184109	0.104302	0.072570	0.05456
1.41	1.29	0.00	0.396888	0.197580	0.116090	0.083762	0.06546
-0.17	1.05	0.00	0.398800	0.202071	0.121916	0.090451	0.07221
-1.76	0.74	0.00	0.409108	0.211052	0.127080	0.093227	0.07451
-3.33	0.40	0.00	0.410865	0.218910	0.135140	0.101101	0.08238
-4.89	0.02	0.00	0.427531	0.279531	0.192079	0.157189	0.13799
-6.43	-0.46	0.00	0.445395	0.310964	0.218281	0.182570	0.16286
-7.19	-0.77	0.00	0.489733	0.356991	0.258909	0.220529	0.20041
-7.56	-0.96	0.00	0.528642	0.413122	0.304666	0.263517	0.24326
-7.74	-1.08	0.00	0.597549	0.462517	0.348336	0.305034	0.28447
-7.90	-1.34	0.00	0.654303	0.518648	0.402210	0.357921	0.33899

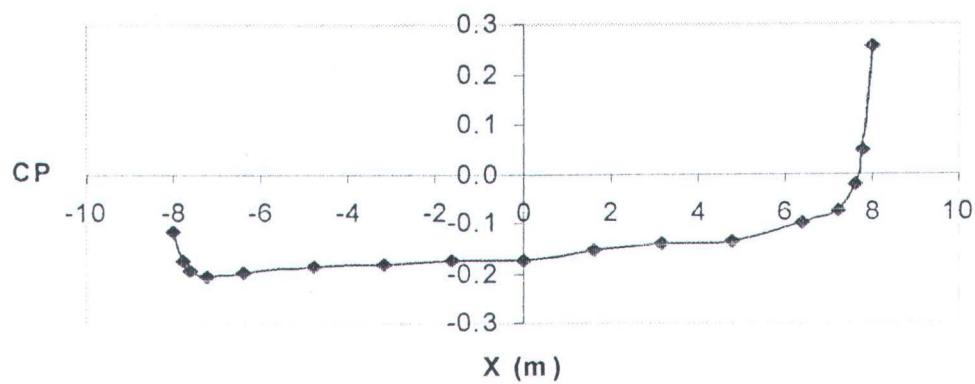
Sudut 15

Koordinat			CP				
X	Y	Z	Re 10^2	Re 10^4	Re 10^5	Re 10^6	Re 10^7
7.72	2.12	0.00	0.437121	0.1627791	0.0914	0.0756	0.065
7.47	2.29	0.00	0.420840	0.1493077	0.0809	0.0636	0.050
7.26	2.32	0.00	0.413874	0.1526756	0.0825	0.0586	0.043
6.84	2.34	0.00	0.424235	0.1616565	0.0841	0.0530	0.035
6.02	2.30	0.00	0.429439	0.1998254	0.1232	0.0955	0.079
4.42	2.08	0.00	0.431897	0.200948	0.1244	0.0926	0.074
2.85	1.77	0.00	0.432213	0.200948	0.1201	0.0877	0.070
1.29	1.41	0.00	0.443969	0.2200324	0.1358	0.1027	0.084
-0.27	1.03	0.00	0.441230	0.230136	0.1474	0.1153	0.097
-1.82	0.58	0.00	0.444219	0.235749	0.1506	0.1170	0.098
-3.35	0.11	0.00	0.449873	0.2469752	0.1598	0.1248	0.106
-4.87	-0.41	0.00	0.478439	0.3266808	0.2358	0.2003	0.181
-6.36	-1.02	0.00	0.496430	0.3603592	0.2633	0.2260	0.206
-7.09	-1.39	0.00	0.506420	0.4086316	0.3055	0.2660	0.246
-7.45	-1.61	0.00	0.536749	0.4468005	0.3358	0.2943	0.275
-7.62	-1.75	0.00	0.584280	0.4939503	0.3772	0.3339	0.314
-7.75	-2.03	0.00	0.663865	0.5399775	0.4252	0.3835	0.366

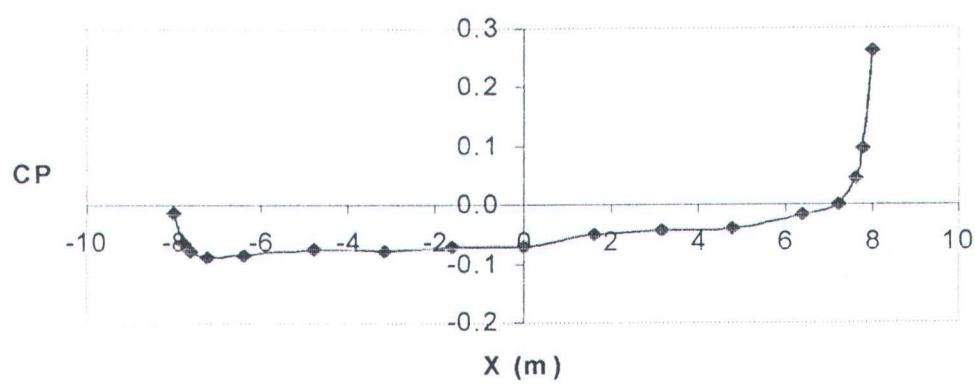
CP pada $Re = 10^2$ sudut 0°



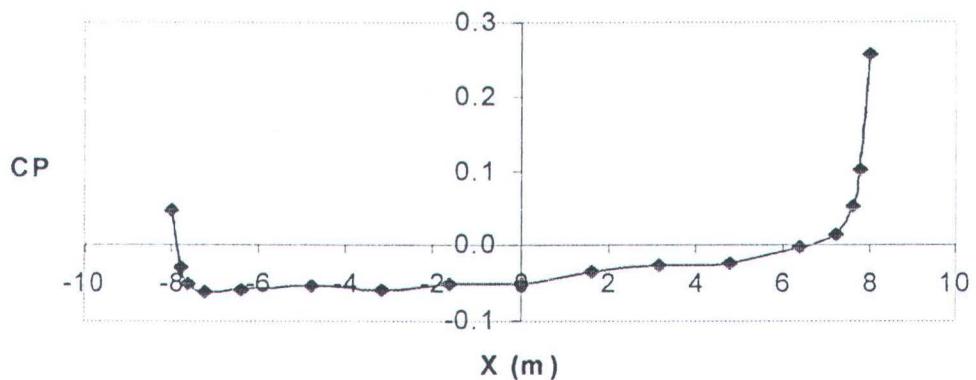
CP pada $Re = 10^4$ sudut 0°



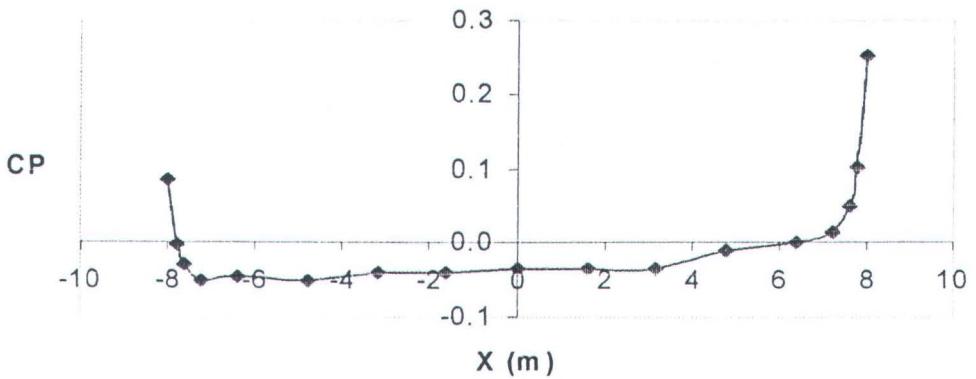
CP pada $Re = 10^5$ sudut 0°



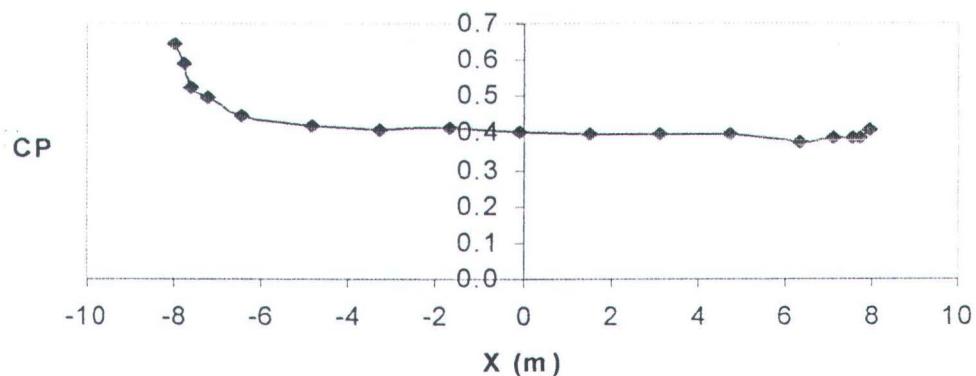
CP pada $Re = 10^6$ sudut 0°



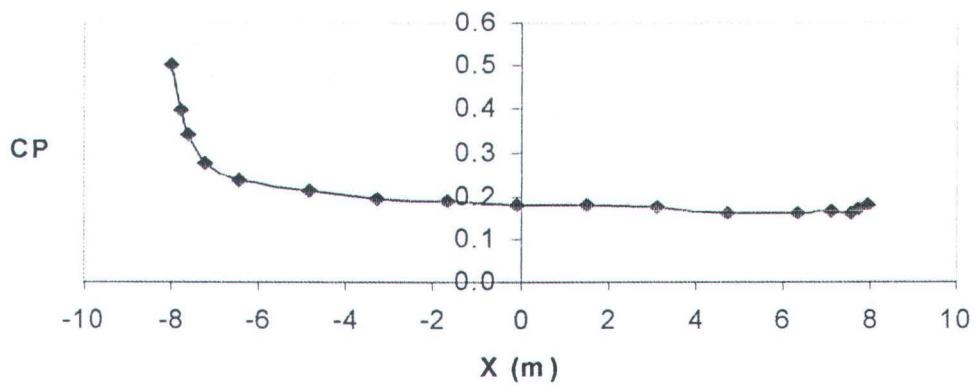
CP pada $Re = 10^7$ sudut 0°



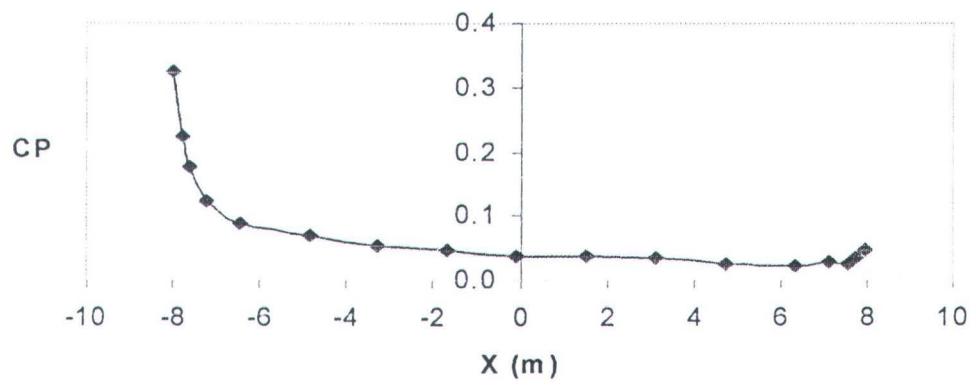
CP pada $Re = 10^2$ sudut 5°



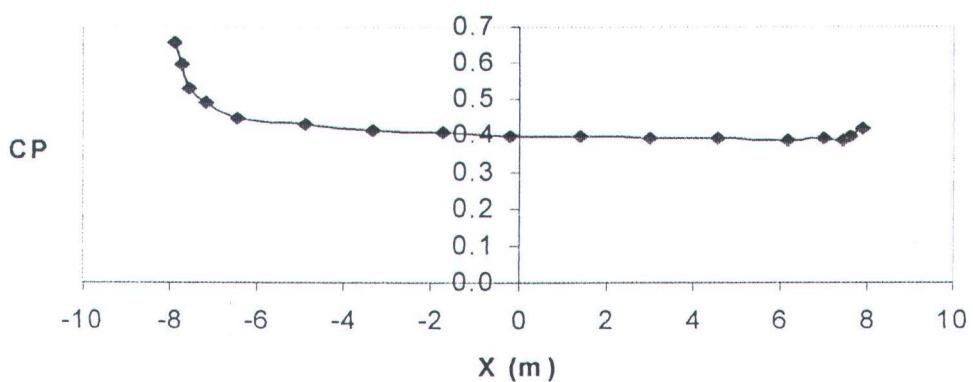
CP pada $Re = 10^4$ sudut 5°



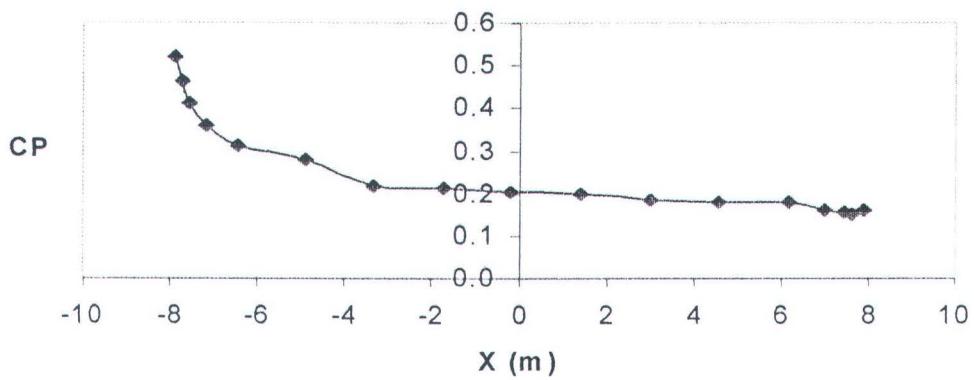
CP pada $Re = 10^5$ sudut 5°



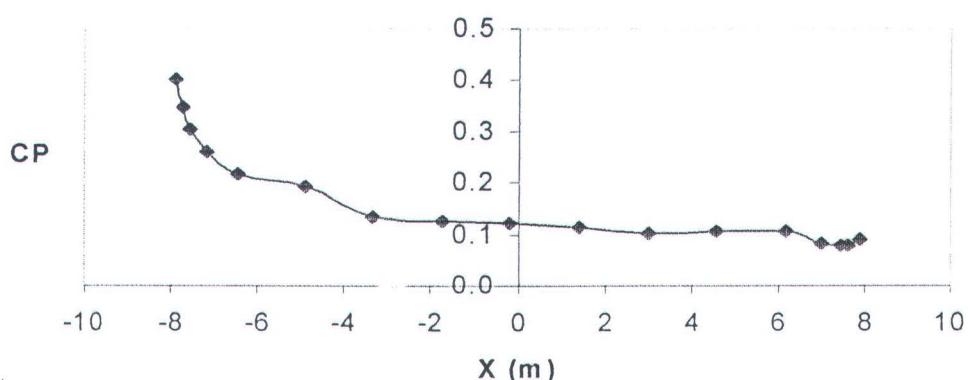
CP pada $Re = 10^2$ sudut 10°



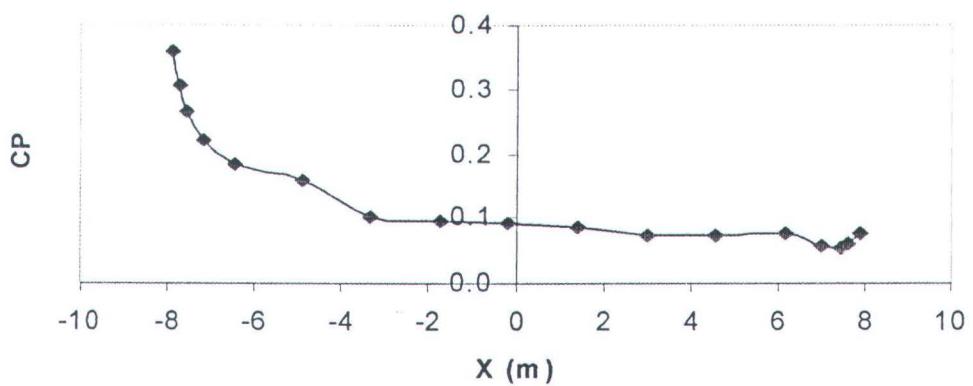
CP pada $Re = 10^4$ sudut 10°



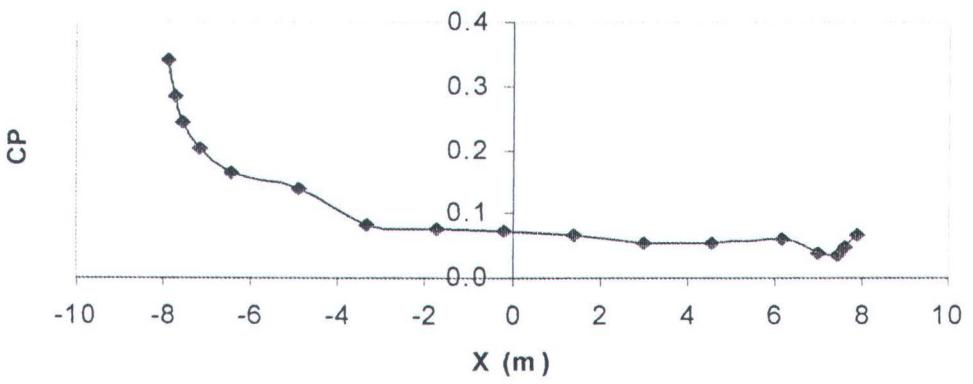
CP pada $Re = 10^5$ sudut 10°



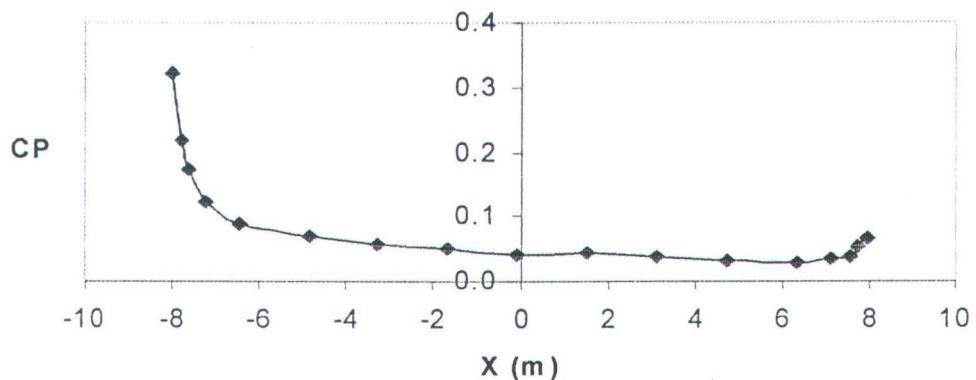
CP pada $Re = 10^6$ sudut 10°



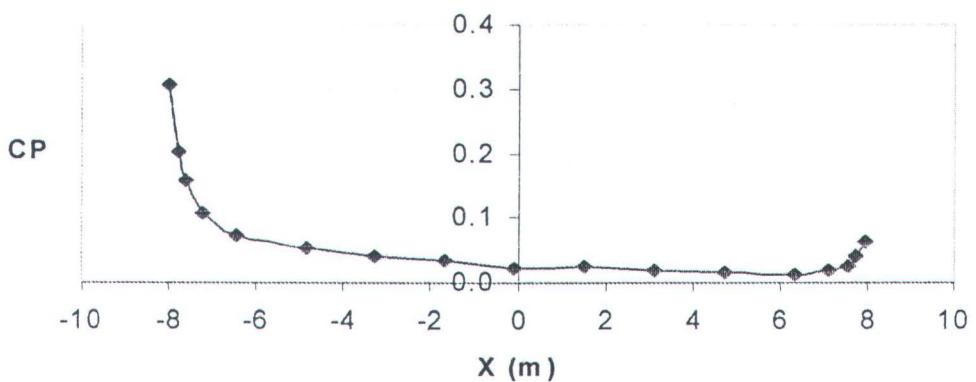
CP pada $Re = 10^7$ sudut 10°



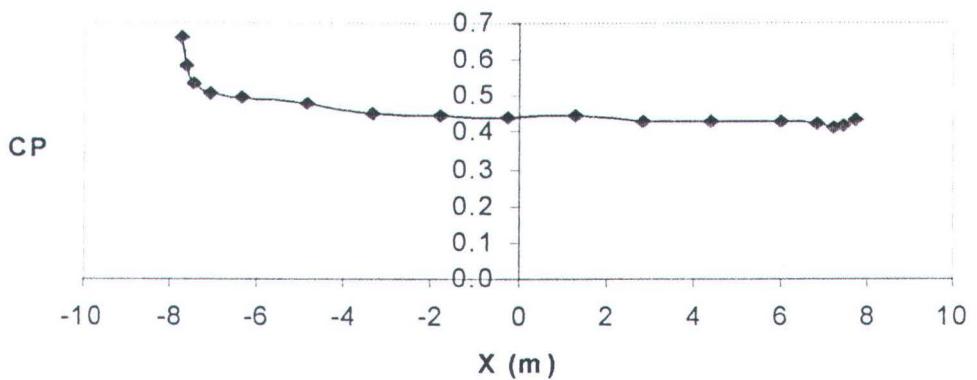
CP pada $Re = 10^6$ sudut 5°



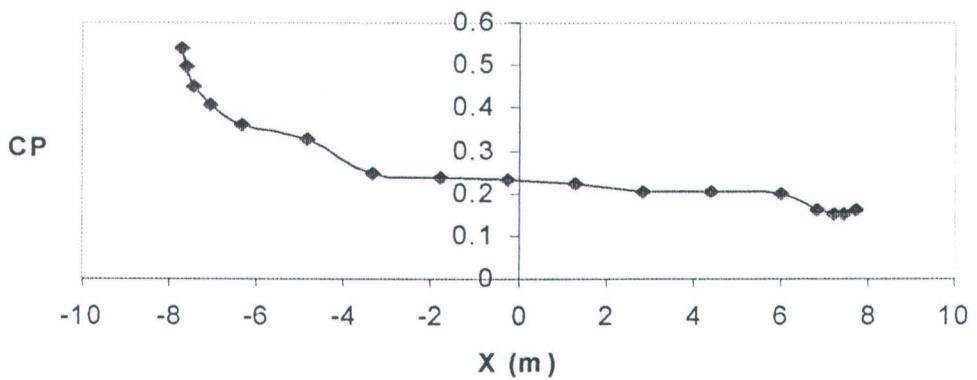
CP pada $Re = 10^7$ sudut 5°



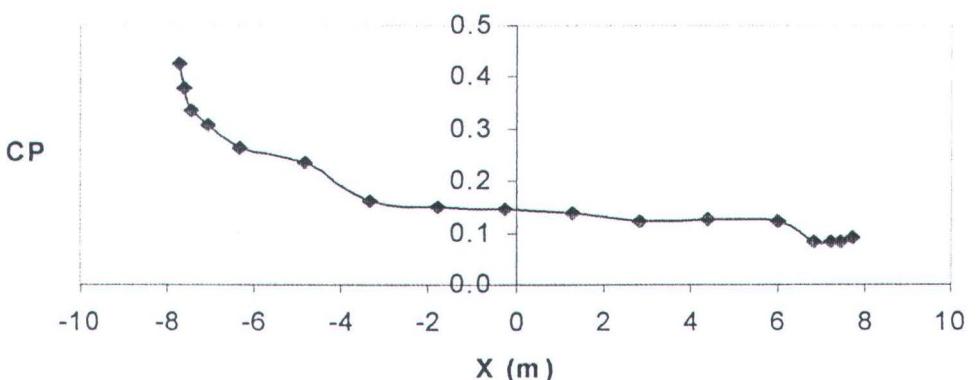
CP pada $Re = 10^2$ sudut 15°



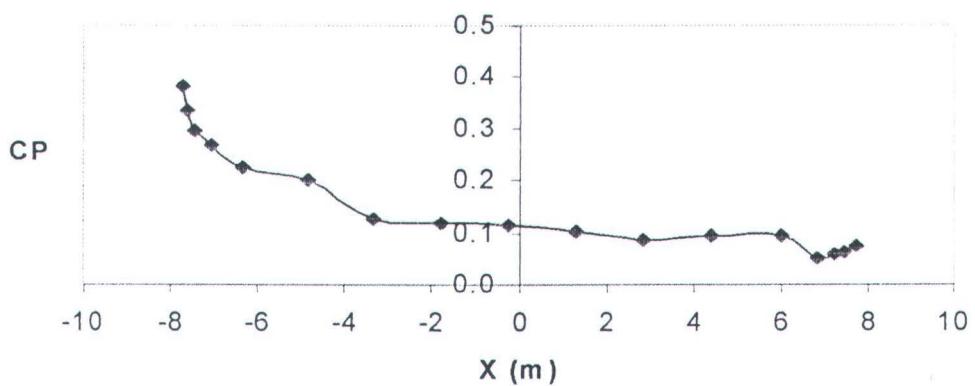
CP pada $Re = 10^4$ sudut 15°



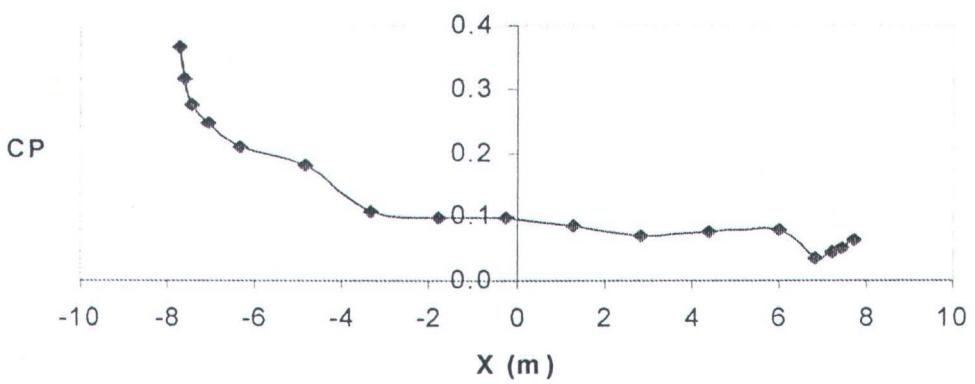
CP pada $Re = 10^5$ sudut 15°

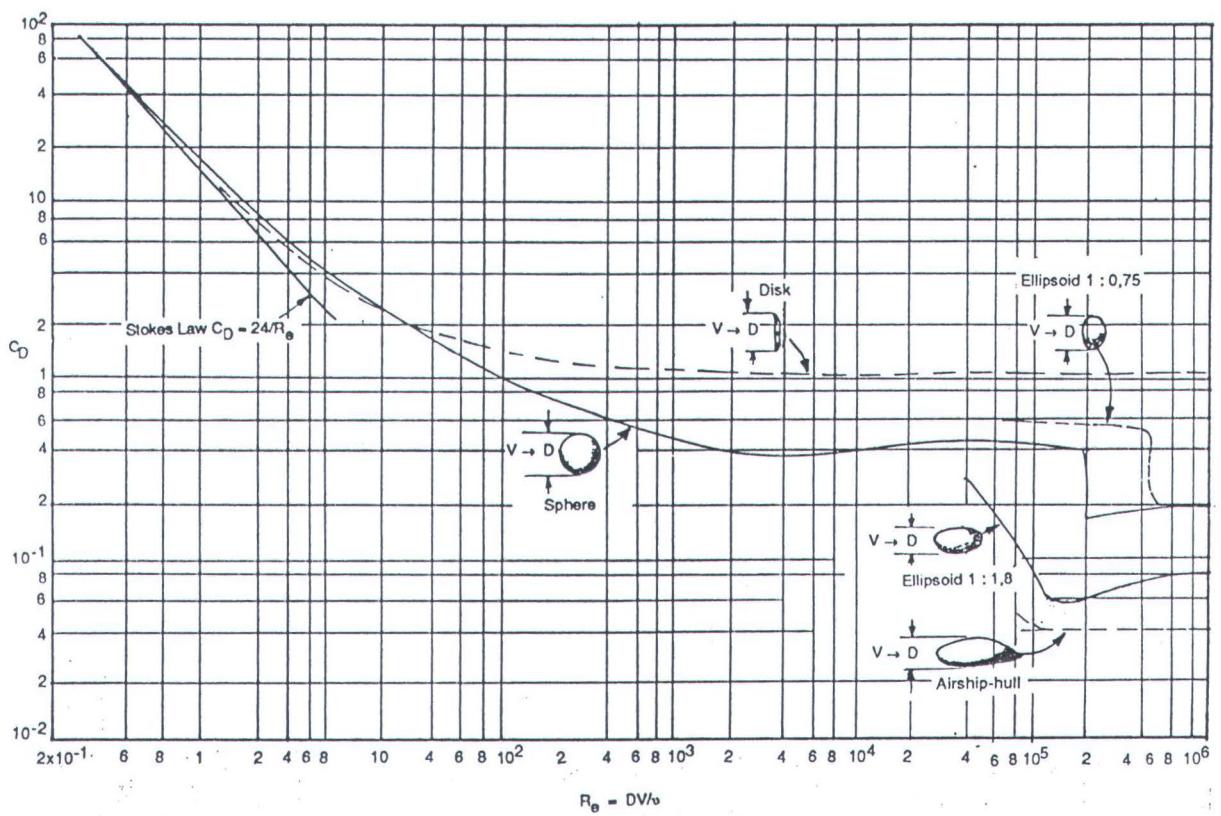


CP pada $Re = 10^6$ sudut 15°

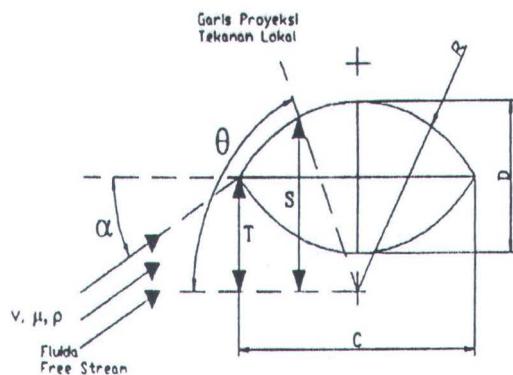


CP pada $Re = 10^7$ sudut 15°





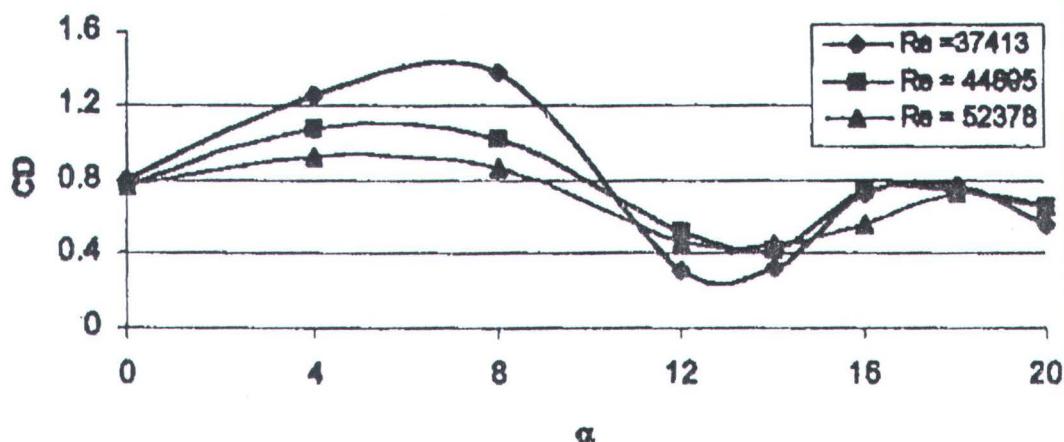
Gambar 7.13. Koefisien drag untuk benda-benda tiga dimensi



Gambar 1. Dimensi benda uji silinder double-symmetric biconvec

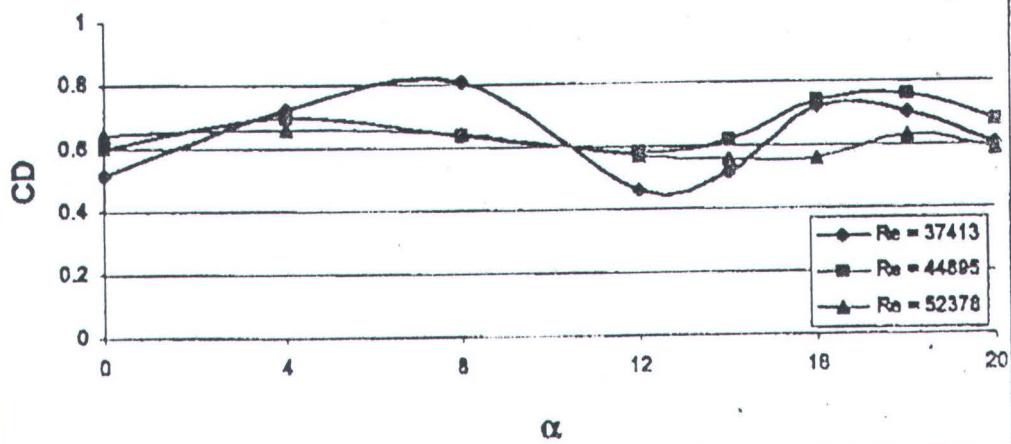
380 JURNAL TEKNIK MESIN, No. 3, Volume 3, September 2003

Grafik C_D Vs α pada benda uji $D/C = 2/3$



Gambar 4. Evolusi C_D fungsi sudut serang untuk berbagai bilangan Rynolds pada $D/C= 2/3$

Grafik C_D Vs α pada benda uji $D/C = 1/2$



Gambar 3. Evolusi C_D fungsi sudut serang untuk beberapa bilangan Reynold pada $D/C=1/2$

DATA GEOMETRI ELIPSOID

X	Y	Z
8	0.000	0.000
7.9	0.157	0.157
7.8	0.222	0.222
7.6	0.312	0.312
7.2	0.435	0.435
6.4	0.600	0.600
4.8	0.800	0.800
3.2	0.916	0.916
1.6	0.979	0.979
0	1	1
-1.6	0.979	0.979
-3.2	0.916	0.916
-4.8	0.800	0.800
-6.4	0.600	0.600
-7.2	0.435	0.435
-7.6	0.312	0.312
-7.8	0.222	0.222
-7.9	0.157	0.157
-8	0.000	0.000

LAMPIRAN B
DATA QUANTITATIVE

DATA QUANTITATIVE CALCULATION CFX-VISUALISE SUDUT 0°

$Re = 10^2$

The minimum value of Wall Shear over body is:

2.8486e-009 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

8.37258e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

2.20642e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

$Re = 10^4$

The minimum value of Wall Shear over body is:

1.23533e-007 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

4.22582e-005 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

8.30882e-006 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^5$

The minimum value of Wall Shear over body is:

4.69049e-006 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

0.00135032 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.000318677 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^6$

The minimum value of Wall Shear over body is:

0.000143211 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

0.0469575 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.0161181 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^7$

The minimum value of Wall Shear over body is:

0.00241158 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

1.41114 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.959774 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

DATA QUANTITATIVE CALCULATION CFX-VISUALISE SUDUT 5°

Re = 10^2

The minimum value of Wall Shear over body is:

8.51458e-009 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

6.22726e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

1.85644e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

Re = 10^4

The minimum value of Wall Shear over body is:

2.61374e-006 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

2.8036e-005 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

7.09815e-006 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

Re = 10^5

The minimum value of Wall Shear over body is:

7.2958e-005 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

0.0011358 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.000314548 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^6$

The minimum value of Wall Shear over body is:

0.0036986 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

0.0286159 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.0138446 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^7$

The minimum value of Wall Shear over body is:

0.197119 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

1.393 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.92661 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

DATA QUANTITATIVE CALCULATION CFX-VISUALISE SUDUT 10°

$Re = 10^2$

The minimum value of Wall Shear over body is:

2.49529e-009 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

7.3918e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

1.88974e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^4$

The minimum value of Wall Shear over body is:

1.40164e-006 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

3.73541e-005 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

7.5728e-006 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^5$

The minimum value of Wall Shear over body is:

3.17124e-005 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Wall Shear over body is:

0.00169629 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.000330706 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^6$

The minimum value of Wall Shear over body is:

0.00554374 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

0.0406026 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.0147896 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^7$

The minimum value of Wall Shear over body is:

0.214204 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

1.40618 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.966475 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

DATA QUANTITATIVE CALCULATION CFX-VISUALISE SUDUT 15°

Re = 10^2

The minimum value of Wall Shear over body is:

2.26641e-009 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

1.15183e-007 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

2.02947e-008 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

Re = 10^4

The minimum value of Wall Shear over body is:

1.21135e-006 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

5.11291e-005 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1669 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

8.37222e-006 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

Re = 10^5

The minimum value of Wall Shear over body is:

2.53158e-005 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

0.00157946 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.000365557 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^6$

The minimum value of Wall Shear over body is:

0.00423816 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

0.0331156 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

0.0156224 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

$Re = 10^7$

The minimum value of Wall Shear over body is:

0.202965 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Wall Shear over body is:

1.45469 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Wall Shear over body is:

1.00197 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Wall Shear over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Wall Shear over body is:

Undefined

DATA QUANTITATIVE CALCULATION CFX-VISUALISE SUDUT 0°

$Re = 10^2$

The minimum value of Total Pressure over body is:

-2.27185e-007 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Total Pressure over body is:

5.05911e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Total Pressure over body is:

-1.50646e-007 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

undefined

$Re = 10^4$

The minimum value of Pressure over body is:

-0.000186373 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

0.000323206 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

-0.000141822 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

undefined

$Re = 10^5$

The minimum value of Pressure over body is:

-0.00834724 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

0.0322959 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

-0.00523916 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

undefined

$Re = 10^6$

The minimum value of Pressure over body is:

-0.719264 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Pressure over body is:

2.99572 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1007 m²

The area weighted average of Pressure over body is:

-0.360368 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^7$

The minimum value of Total Pressure over body is:

-1900.75 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Total Pressure over body is:

8393.74 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Total Pressure over body is:

0.102908 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Total Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Total Pressure over body is:

undefined

DATA QUANTITATIVE CALCULATION CFX-VISUALISE SUDUT 5°

$Re = 10^2$

The minimum value of Pressure over body is:

6.16474e-008 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

2.18027e-007 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

9.48884e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^4$

The minimum value of Pressure over body is:

0.000136198 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

0.000472579 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

0.00015408 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^5$

The minimum value of Pressure over body is:

0.00116906 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

0.0313327 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

0.00298153 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^6$

The minimum value of Pressure over body is:

0.120504 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Pressure over body is:

3.12933 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Pressure over body is:

0.329466 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^7$

The minimum value of Pressure over body is:

-6.5058 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Pressure over body is:

300.602 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Pressure over body is:

27.4612 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

DATA QUANTITATIVE CALCULATION CFX-VISUALISE SUDUT 10°

$Re = 10^2$

The minimum value of Pressure over body is:

5.96898e-008 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

2.12759e-007 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

9.4444e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^4$

The minimum value of Pressure over body is:

0.000101697 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

0.000485926 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

0.000151757 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

undefined

$Re = 10^5$

The minimum value of Pressure over body is:

0.00287485 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

0.0382347 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

0.0080478 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^6$

The minimum value of Pressure over body is:

-0.070622 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Pressure over body is:

3.44522 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Pressure over body is:

0.511786 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^7$

The minimum value of Pressure over body is:

-24.3746 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Pressure over body is:

329.579 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Pressure over body is:

28.7316 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

DATA QUANTITATIVE CALCULATION CFX-VISUALISE SUDUT 15°

$Re = 10^2$

The minimum value of Pressure over body is:

5.18204e-008 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

2.21409e-007 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

9.42502e-008 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^4$

The minimum value of Pressure over body is:

5.97313e-005 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

0.000541044 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

0.000146498 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^5$

The minimum value of Pressure over body is:

-0.00129102 kg m^-1 s^-2

The maximum value of Pressure over body is:

0.0440652 kg m^-1 s^-2

The approximate area of body is:

78.1699 m^2

The area weighted average of Pressure over body is:

0.00752996 kg m^-1 s^-2

The approximate volumetric flow over body is:

0 m^3 s^-1

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s^-1

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^6$

The minimum value of Pressure over body is:

-0.511557 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Pressure over body is:

4.07969 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Pressure over body is:

0.458745 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

$Re = 10^7$

The minimum value of Pressure over body is:

-68.8704 kg m⁻¹ s⁻²

The maximum value of Pressure over body is:

394.686 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate area of body is:

78.1699 m²

The area weighted average of Pressure over body is:

29.5076 kg m⁻¹ s⁻²

The approximate volumetric flow over body is:

0 m³ s⁻¹

The volumetric flow weighted average of Pressure over body is:

undefined

The approximate total mass flow over body is:

0 kg s⁻¹

The mass weighted average of Pressure over body is:

Undefined

BARU2

face edge length 0.35
minimum value of Total Pressure over body is:
20.3487 kg m⁻¹ s⁻²
maximum value of Total Pressure over body is:
259.167 kg m⁻¹ s⁻²

approximate area of body is:
77.6461 m²
area weighted average of Total Pressure over body is:
39.1462 kg m⁻¹ s⁻²

approximate volumetric flow over body is:
0 m³ s⁻¹
volumetric flow weighted average of Total Pressure over body is:
undefined

approximate total mass flow over body is:
0 kg s⁻¹
mass weighted average of Total Pressure over body is:
undefined

5 SURFACE MESHING
ber of Nodes: 61069
ber of Elements: 229295
Tetrahedra: 173145
Prisms: 56150
Pyramids: 0
Hexahedra: 0
imum: 18.7421 kg m⁻¹ s⁻²
imum: 398.259 kg m⁻¹ s⁻²

BARU2

urface edge length 0.35
e minimum value of Total Pressure over body is:
20.3487 kg m^-1 s^-2
e maximum value of Total Pressure over body is:
259.167 kg m^-1 s^-2

e approximate area of body is:
77.6461 m^2
e area weighted average of Total Pressure over body is:
39.1462 kg m^-1 s^-2

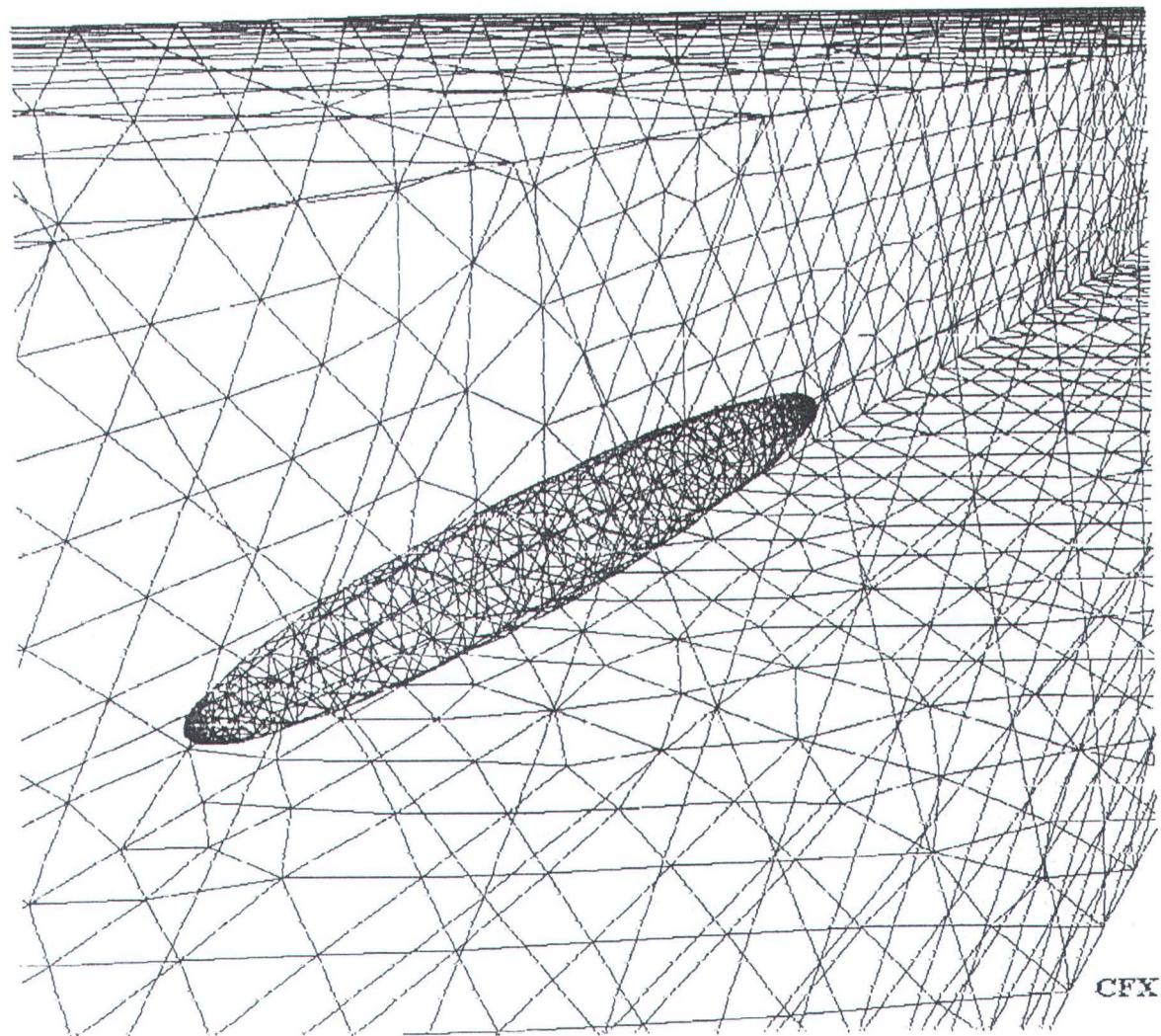
e approximate volumetric flow over body is:
0 m^3 s^-1
e volumetric flow weighted average of Total Pressure over body is:
undefined

e approximate total mass flow over body is:
0 kg s^-1
e mass weighted average of Total Pressure over body is:
undefined

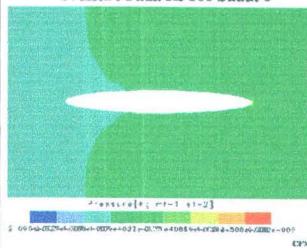
35 SURFACE MESHING
mber of Nodes: 61069
mber of Elements: 229295
Tetrahedra: 173145
Prisms: 56150
Pyramids: 0
Hexahedra: 0
nimum: 18.7421 kg m^-1 s^-2
ximum: 398.259 kg m^-1 s^-2

LAMPIRAN C
HASIL VISUALISASI

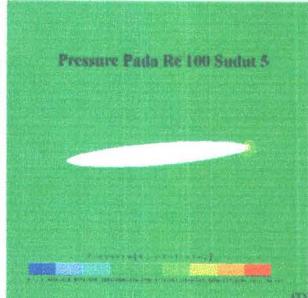
BENTUK MESHING ELIPSOID 3D PADA TUNEL



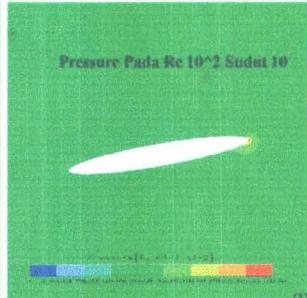
Pressure Pada Re 100 Sudut 0



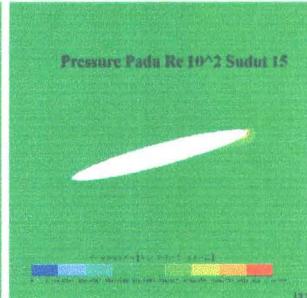
Pressure Pada Re 100 Sudut 5



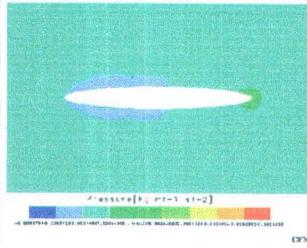
Pressure Pada Re 10^2 Sudut 10



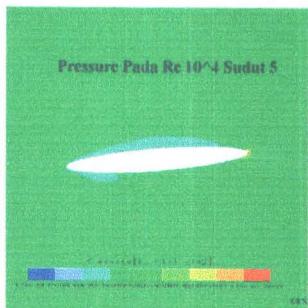
Pressure Pada Re 10^2 Sudut 15



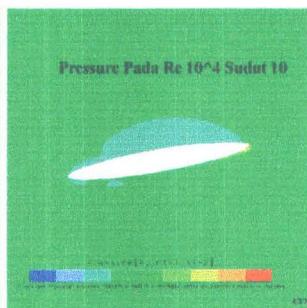
Pressure Pada Re 10^4 Sudut 0



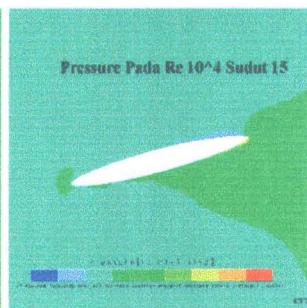
Pressure Pada Re 10^4 Sudut 5



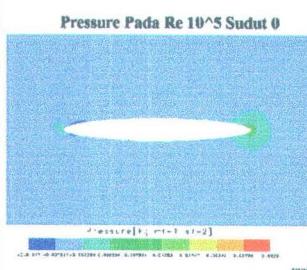
Pressure Pada Re 10^4 Sudut 10



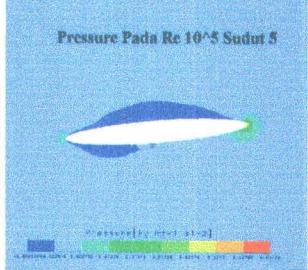
Pressure Pada Re 10^4 Sudut 15



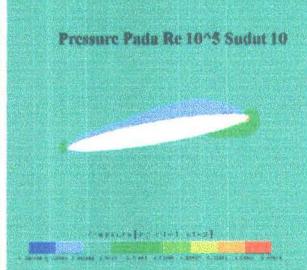
Pressure Pada Re 10^5 Sudut 0



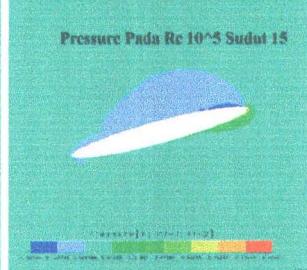
Pressure Pada Re 10^5 Sudut 5



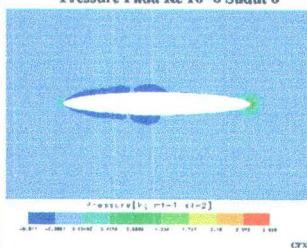
Pressure Pada Re 10^5 Sudut 10



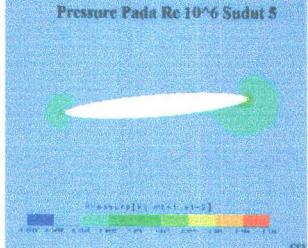
Pressure Pada Re 10^5 Sudut 15



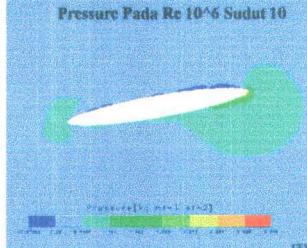
Pressure Pada Re 10^6 Sudut 0



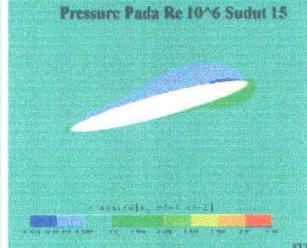
Pressure Pada Re 10^6 Sudut 5



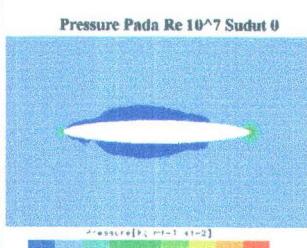
Pressure Pada Re 10^6 Sudut 10



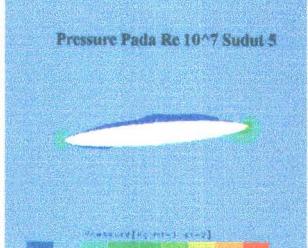
Pressure Pada Re 10^6 Sudut 15



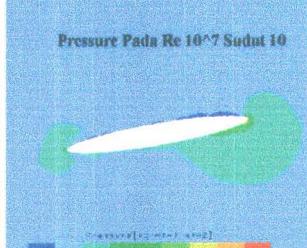
Pressure Pada Re 10^7 Sudut 0



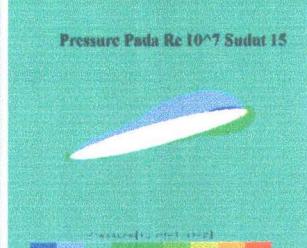
Pressure Pada Re 10^7 Sudut 5



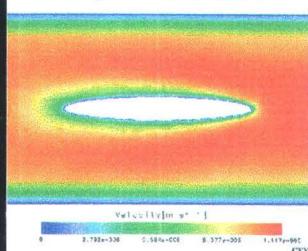
Pressure Pada Re 10^7 Sudut 10



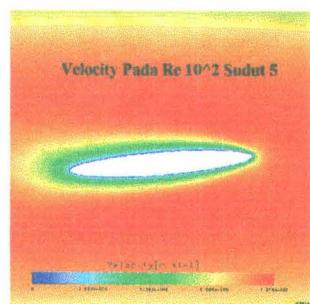
Pressure Pada Re 10^7 Sudut 15



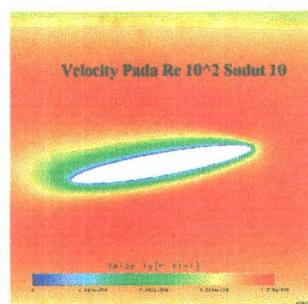
Velocity Pada Re 10^2 Sudut 0



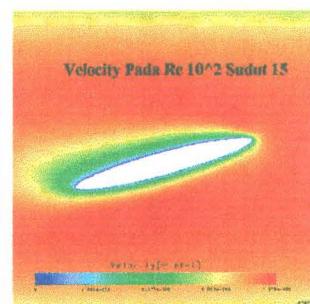
Velocity Pada Re 10^2 Sudut 5



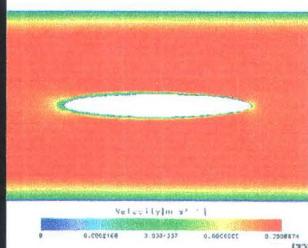
Velocity Pada Re 10^2 Sudut 10



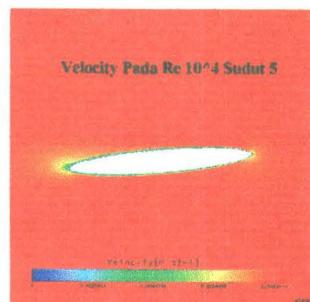
Velocity Pada Re 10^2 Sudut 15



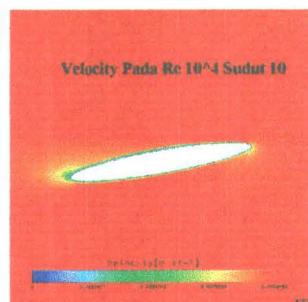
Velocity Pada Re 10^4 Sudut 0



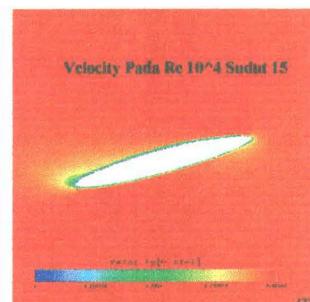
Velocity Pada Re 10^4 Sudut 5



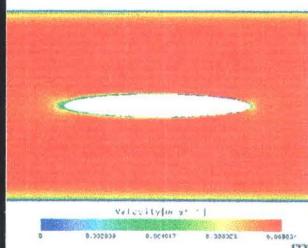
Velocity Pada Re 10^4 Sudut 10



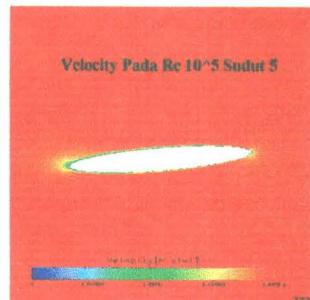
Velocity Pada Re 10^4 Sudut 15



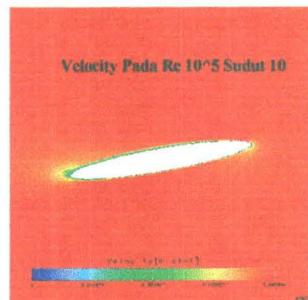
Velocity Pada Re 10^5 Sudut 0



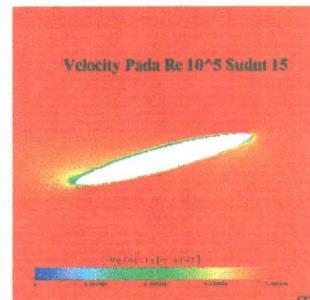
Velocity Pada Re 10^5 Sudut 5



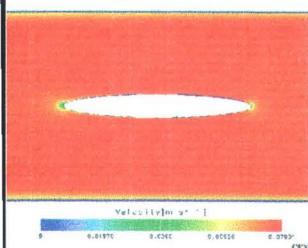
Velocity Pada Re 10^5 Sudut 10



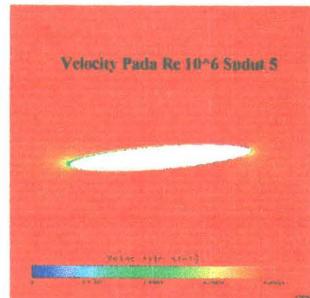
Velocity Pada Re 10^5 Sudut 15



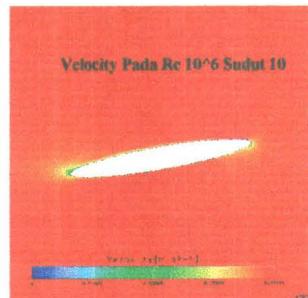
Velocity Pada Re 10^6 Sudut 0



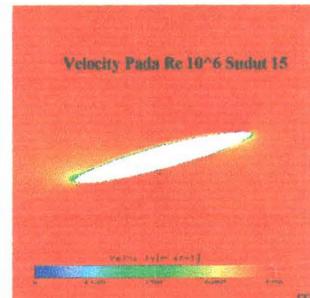
Velocity Pada Re 10^6 Sudut 5



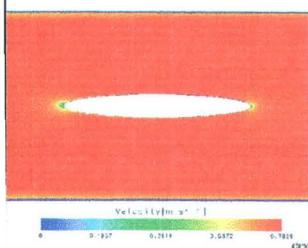
Velocity Pada Re 10^6 Sudut 10



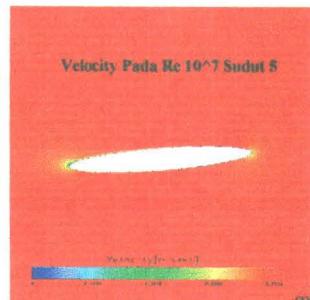
Velocity Pada Re 10^6 Sudut 15



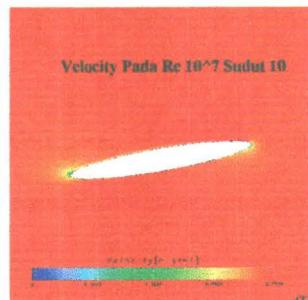
Velocity Pada Re 10^7 Sudut 0



Velocity Pada Re 10^7 Sudut 5



Velocity Pada Re 10^7 Sudut 10



Velocity Pada Re 10^7 Sudut 15

